

CHEMIE ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ I

Environmentální procesy

(09)

Transport chemických látek v prostředí

Ivan Holoubek

RECETOX, Masaryk University, Brno, CR

holoubek@recetox.muni.cz; <http://recetox.muni.cz>

Research Centre for Toxic Compounds in the Environment

<http://recetox.muni.cz>

(09) Transport chemických látek v prostředí

Transport chemických látek v prostředí.

Difuze. Fickovy zákony.

Disperze, advekce, depozice, vytěkávání, sedimentace, fázové rozdělení, vymývání, vymývání půd, odnos půd.

Biopříjem, eliminace, bioakumulace.

Transport v ovzduší, ve vodách, půdách a biotě.

Dálkový transport chemických látek, příklad POPs.

Osud chemických látek v prostředí

Osud látek v prostředí je založen na třech hlavních faktorech:

- ↪ **Rozdělení** chemické látky mezi složky prostředí
- ↪ **Transportní** vlastnosti jednotlivých složek prostředí
- ↪ **Rychlost transformací** chemické látky na jiné sloučeniny

Transport chemických látek v prostředí

Chemické látky mohou být **transportovány** uvnitř složky prostředí do které byly primárně emitovány, mohou být transportovány přes **rozhraní** do dalších složek prostředí, mohou být chemicky, fotochemicky nebo biologicky **transformovány** během jejich transportu a to může vést ke vzniku sekundárního znečištění.

Mohou se **kumulovat** v abiotických složkách prostředí a v živých složkách prostředí

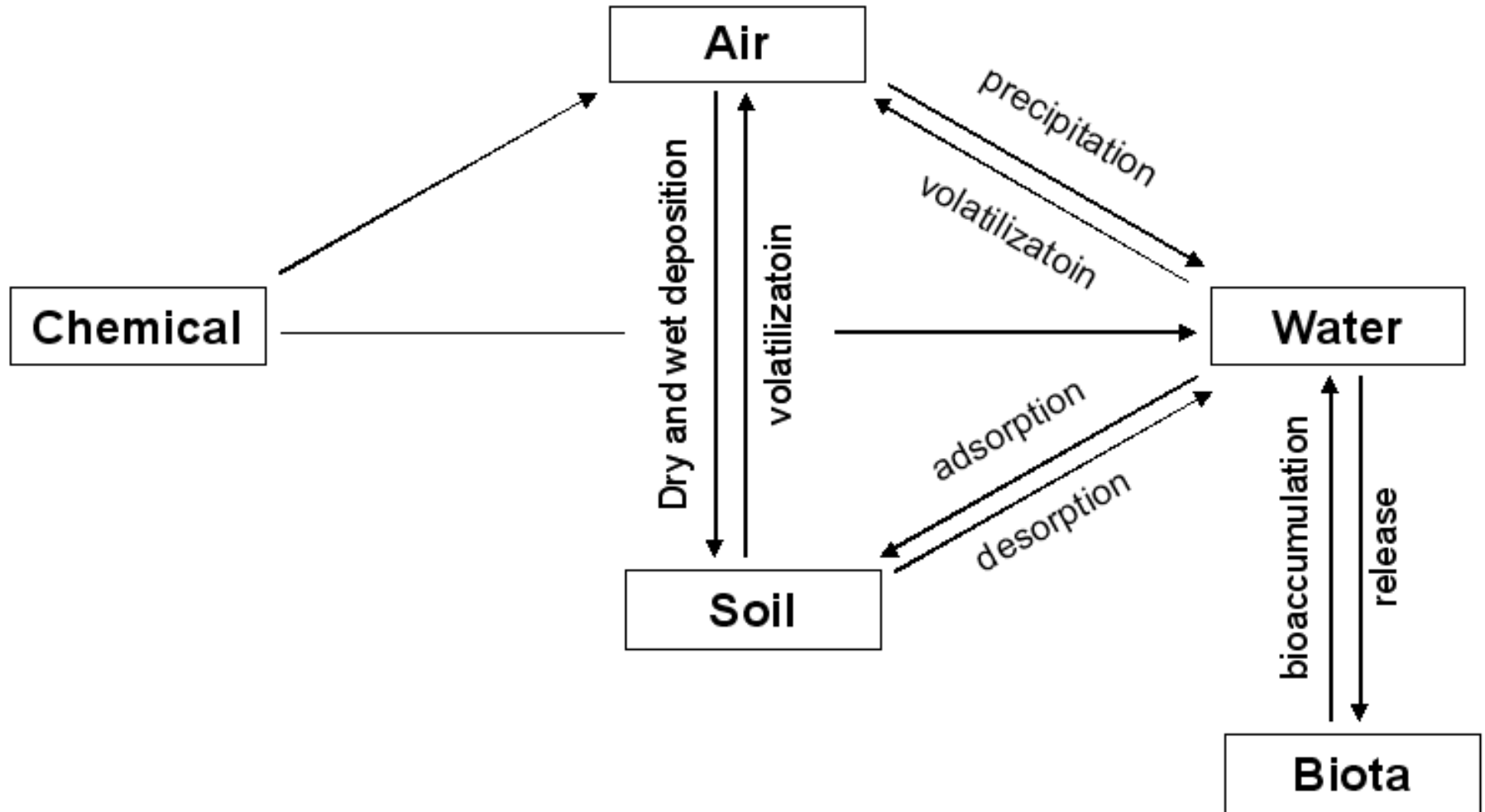
Transport chemických látek v prostředí

Důležitou složkou environmentální chemie je studium **distribučních procesů** založených na studiu **transportu** chemických látek **v** jednotlivých složkách prostředí, **mezi** složkami prostředí a **studium rovnováh** těchto procesů.

Rychlosti těchto procesů jsou řízeny fyzikálně-chemickými vlastnostmi chemických látek v prostředí, zejména tenzí par, rozpustností ve vodě a různými rozdělovacími koeficienty.

Látky mohou **migrovat** ve složce prostředí, což může vést k jejich široké **distribuci**.

Transport a transformační procesy v prostředí



Difuze, Fickovy zákony

Difúze

- ↪ transportní děj za účelem dosažení rovnovážné koncentrace
- ↪ v plynech a kapalinách probíhá snadno
- ↪ v biologických systémech všude a systémy přitom zůstávají ve stacionárním, nerovnovážném stavu

Difuze

Proces mísení dvou nebo více tekutin – neuspořádaný pohyb molekul a jejich vzájemné srážky způsobují vzájemné promísení, až se v celém objemu soustavy vytvoří směs mající všude stejné složení.

1. Fickův zákon – (*Natura non facit saltus* – příroda nedělá skoky)

Přechod koncentrační kapky ΔC přes imaginární zed'.

Difuze, Fickovy zákony

Difuze – **pasivní transport** - nerovnovážný termodynamický proces.

Při transportu elektricky nabitých látek i **gradient elektrický**.

Elektrochemický gradient = elektrický + chemický gradient

Pasivní transport iontů je jejich přenos dle elektrochemického gradientu.

Difuze bílkovinným kanálem – bez dodání energie - **selektivní propustnost**.

Difuze

Představme si tenkou vrstvičku plynu či kapaliny omezenou myšlenými rovinami v polohách x a $x + dx$.

Počet molekul A či B připadajících v daném okamžiku t na jednotku objemu vrstvičky je funkcí toliko polohy x , tzn. koncentrace obou druhů molekul lze označit $C_A(x,t)$ a $C_B(x,t)$.

Difuzní tok molekul A rovinou v místě x (označme jej J_A) je dán výsledným počtem molekul A prošlých plošnou jednotkou této roviny za jednotku času ve směru kladných hodnot x .

Difuze

Je přímo úměrný gradientu koncentrace molekul A v místě x, jež označíme $\delta C_A / \delta x$, platí tedy vztah:

$$J_A = - D_{AB} * \delta C_A / \delta x$$

Konstanta úměrnosti D_{AB} se nazývá **difuzní koeficient** a tento vztah je označován jako **1. Fickův zákon difuze**.

Difuze

Má-li celkový počet molekul na jednotku objemu zůstat stejný, musí být celkový tok molekul A i B kteroukoliv myšlenou rovinou roven nule:

$$J_A + J_B = 0$$

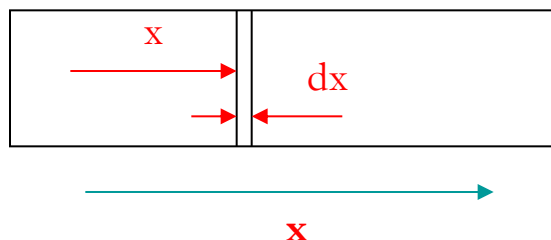
Pro J_B platí:

$$J_B = -D_{BA} * \delta C_B / \delta x$$
$$D_{AB} = D_{BA}$$

To znamená, že u dvousložkové soustavy se uplatňuje pouze jeden difuzní koeficient D , který se často označuje jako koeficient vzájemné difuze látek A a B.

Difuze

Jednorozměrný případ difuze - představme si vrstvičku omezenou rovinami v místech x a $x + dx$:



Vyberme si z této vrstvičky objemový element o průřezu S a vyjádřeme výraz pro rychlost vzrůstu koncentrace molekul A v tomto elementu.

Tato rychlost vzrůstu koncentrace $\delta C_A / \delta t$ je dána rozdílem, o který počet molekul A , jež za jednotku času přidifundovaly do tohoto objemového elementu, převyšuje počet těch, jež za tutéž dobu oddifundovaly, neboť je rovna tomuto rozdílu dělenému objemem elementu $S * dx$:

$$\delta C_A / \delta t = S [J_A(x) - J_A(x + dx)] / (S * dx)$$

Difuze

Protože však platí:

$$J_A(\mathbf{x} + d\mathbf{x}) = J_A(\mathbf{x}) + (\delta J_A / \delta \mathbf{x}) d\mathbf{x}$$

dostaneme dosazením do předchozí rovnice a za využití rovnice

1. Fickova zákona:

$$\delta C_A / \delta t = - (\delta J_A / \delta \mathbf{x}) = \delta / \delta \mathbf{x} (D * \delta C_A / \delta \mathbf{x})$$

Pro případ, že koeficient D je nezávislý na \underline{x} , lze tuto rovnici přepsat ve tvaru:

$$\delta C_A / \delta t = D * (\delta^2 C_A / \delta \mathbf{x}^2)$$

Tato rovnice je známa jako **2. Fickův zákon difuze.**

Difuze, Fickovy zákony

Hustota difúzního toku J (tok látky)

Látkové množství, které projde za sekundu jednotkovou plochou rozhraním

$$J = \Delta n / \Delta t * S$$

I. Fickův zákon

Hustota difúzního toku je přímo úměrná koncentračnímu gradientu v dané ose

$$J = -D * dc/dx$$

D = difúzní koeficient – závisí na teplotě – s rostoucí teplotou se difuze zvyšuje

- ↪ konstanta úměrnosti
- ↪ množství transportované látky v jednotce času jednotkovou plochou při jednotkovém gradientu

Difuze, Fickovy zákony

k = Boltzmanova konstanta

$$D = k * T / 6 * \pi * \mu * r$$

μ = koeficient dynamické viskozity

Platí jen pro **stacionární difúzi** ($J = \text{konst.}$) – např. iontové pumpy

II. Fickův zákon

Časová změna koncentrace je přímo úměrná prostorové změně gradientu koncentrace

$$dc/dt = D * d^2c/dx$$

Difuze

Molekulární difuzivita – reflektuje nahodilý pohyb molekul Brownovým pohybem (v ovzduší a vodách) – důležitá v mikroměřítku – při transportu látek přes rozhraní – vstup do živých buněk, na povrch částic, přes rozhraní vzduch-voda.

Difuzivita molekul v ovzduší:

$$D_A = 10^{-3} * \{T^{1,75} [(1/m_{\text{air}}) + (1/m)]^{1/2} / P * [V_{\text{air}}^{1/3} + V^{1/3}]^2\} \text{ [cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$$

kde:

T – absolutní teplota [K]

m_{air} – průměrná molekulová hmotnost vzduchu [28,97 g.mol⁻¹]

m – molekulová hmotnost látky [g.mol⁻¹]

P – tlak plynné fáze [atm]

V_{air} – průměrný molární objem plynů v ovzduší [~ 20,1 cm³.mol⁻¹]

V – molární objem dané látky [cm³.mol⁻¹]

Difuze

Difuzivita molekul ve vodě:

$$D W = 13,26 * 10^{-5} / m^{1,14} * (V)^{0,589} \text{ [cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$$

Kde:

m = viskozita roztoku [cPoise = $10^{-2} \cdot \text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$] při dané teplotě

Difuze

Turbulentní difuze – makroskopické měřítko – řeky, jezera, terestrický povrch – molekulární difuze je extrémně pomalá.

$$\text{Měřitelná difuzní vzdálenost} = s_x = (2D*t)^{1/2}$$

Charakteristický transportní čas:

$$t_d = L^2 / 2D$$

Rovnice platí pro transport na větší vzdálenosti - advekcí, kdy transport molekulární difuzí je zanedbatelný.

Difuze

Transport advekcí je popsán vektorem F_{ad} pomocí rovnice analogické 1. Fickovu zákonu:

$$F_{ad} = C * v \quad [M.L^{-2}.T^{-1}]$$

Pro případ konstantní rychlosti proudu v , transportní čas způsobený advekcí je dán:

$$t_{ad} = L / v$$

Výpočet vzdálenosti L_{krit} kdy molekulární difuze a advekce hrají stejnou roli v transportu látek:

$$L^2 / 2D = L / v \quad \Leftrightarrow \quad L_{krit} = 2D / v$$

Čas difuze

Čas advekce

Difuze

Na vzdálenost větší než L_{krit} je transport advekcí rychlejší a důležitější než transport molekulární difuzí.

V otevřených vodách (jezera, řeky, oceány) jsou typické rychlosti advekce mezi 1 a 10 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$.

Pro molekuly s $D_{\text{w}} = 10^{-5} \text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$, je kritická vzdálenost v řádech 10^{-7} a 10^{-5} cm, ale již při velmi malé rychlosti advekce $10^{-2} \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, je kritická vzdálenost $L_{\text{krit}} = 2\cdot 10^{-3}$ cm.

V ovzduší s typickými hodnotami $D_{\text{A}} = 0,1 \text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ a $v = 10 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ je kritická vzdálenost kolem 0,02 cm.

Výměnné procesy

- ↪ mokrá depozice (plynů + částic)
- ↪ plynná depozice na povrchové vrstvy (půda, mořská voda, vegetace)
- ↪ re-emise z environmentálních matric
- ↪ suchá depozice částic

Suchá a mokrá atmosférická depozice

Chemické látky jsou transportovány z atmosféry na povrch vody a půdy atmosférickou depozicí.

Atmosférická depozice:

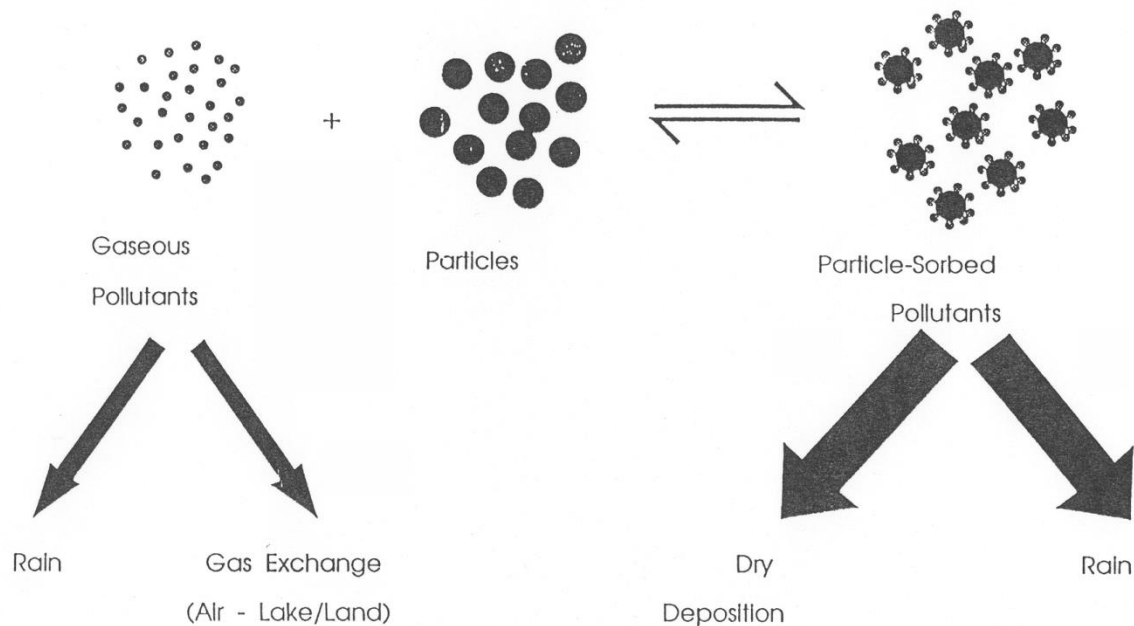
- ↪ mokrá,
- ↪ suchá.

Mokrá atmosférická depozice – složení je dáno sumou vymývání oblačnou kapalnou fází (vnitrooblačné vymývání) a vymývacího, podoblačného procesu (vlastní srážková událost).

Suchá atmosférická depozice – suma depozice aerosolu a absorpce plynů.

Suchá a mokrá atmosférická depozice

Atmospheric Deposition Fundamentals



Understanding phase distribution of semivolatile pollutants is critical to calculating net flux

Procesy vedoucí k atmosférické depozici

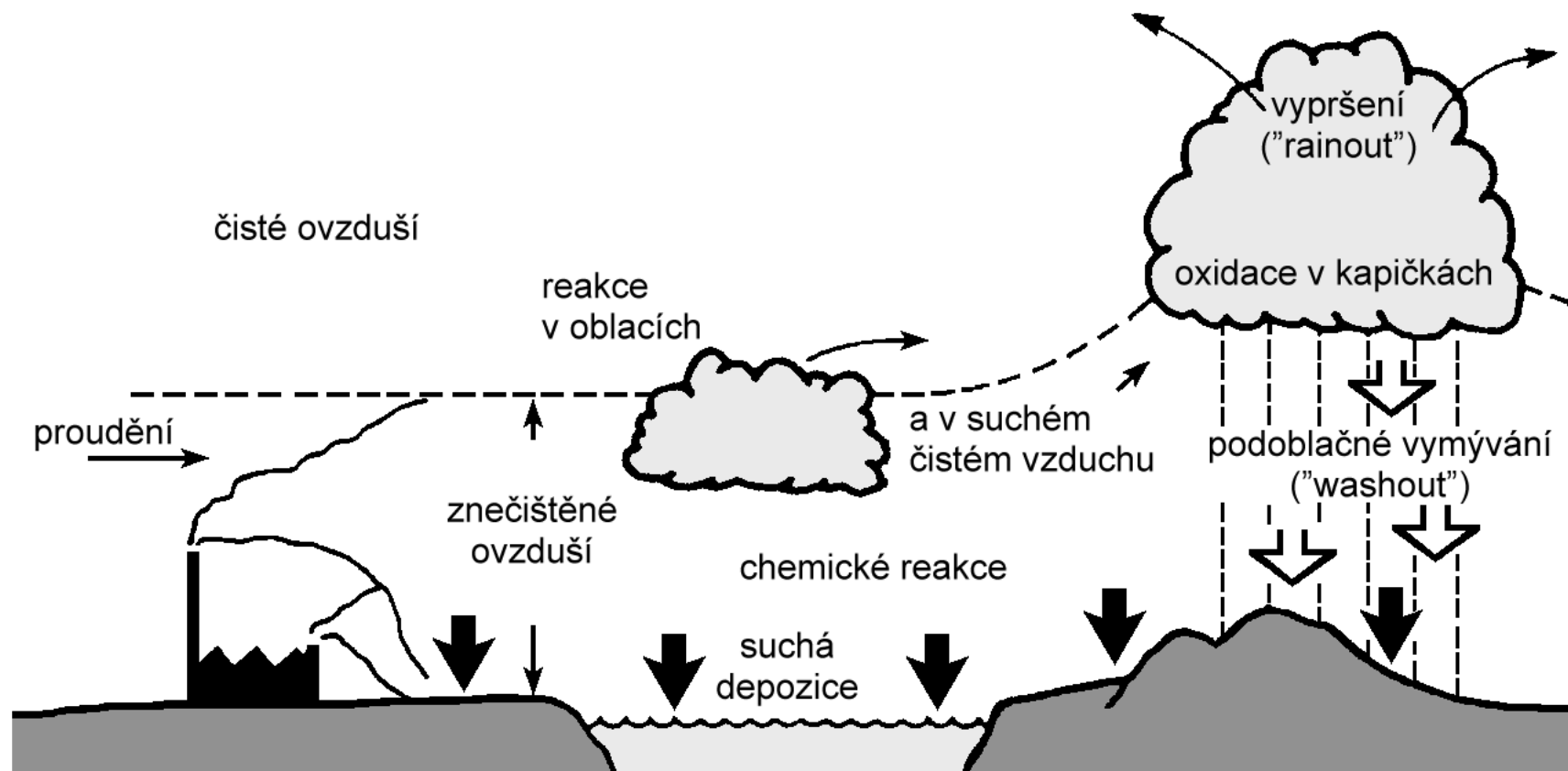
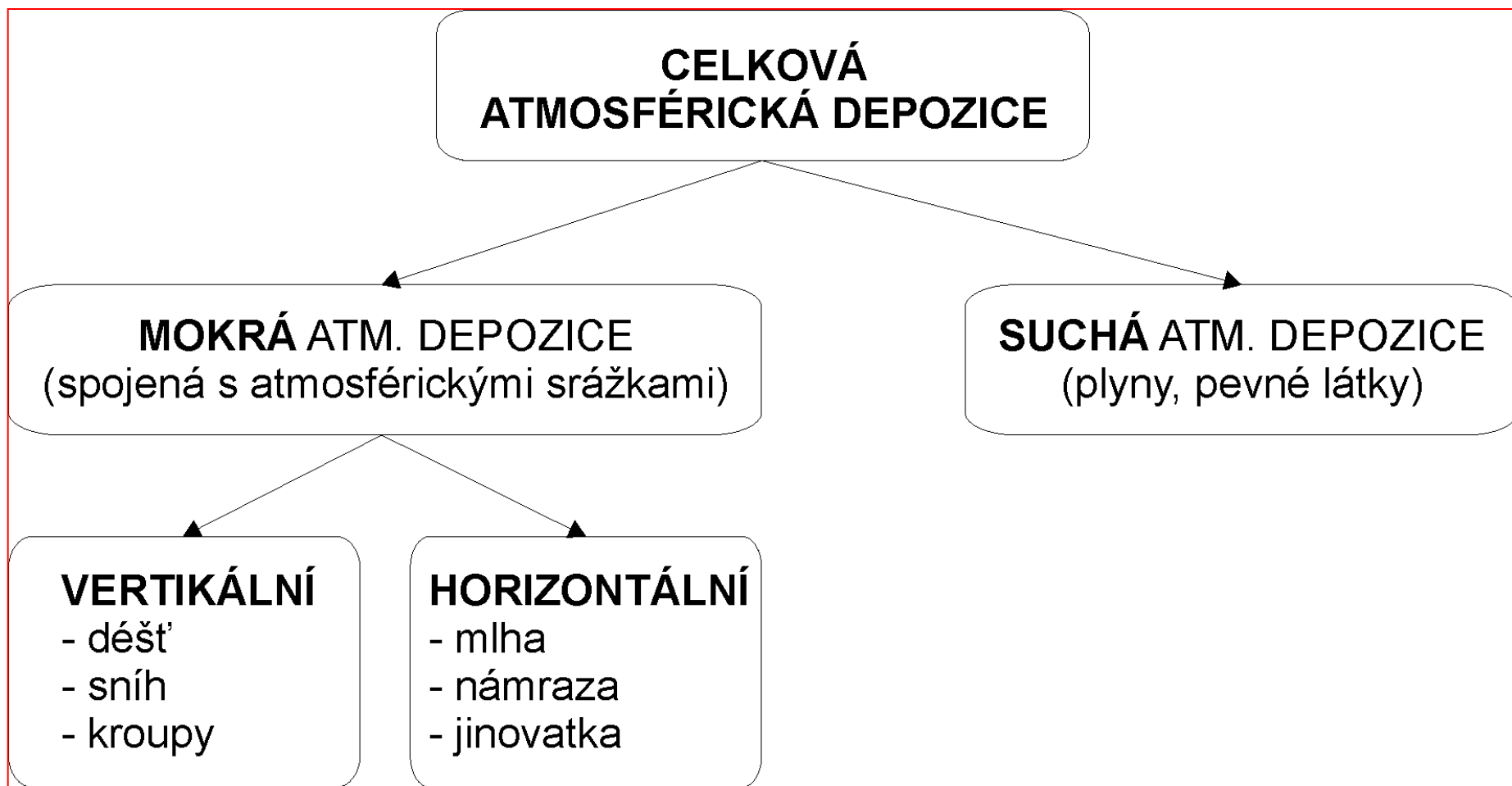
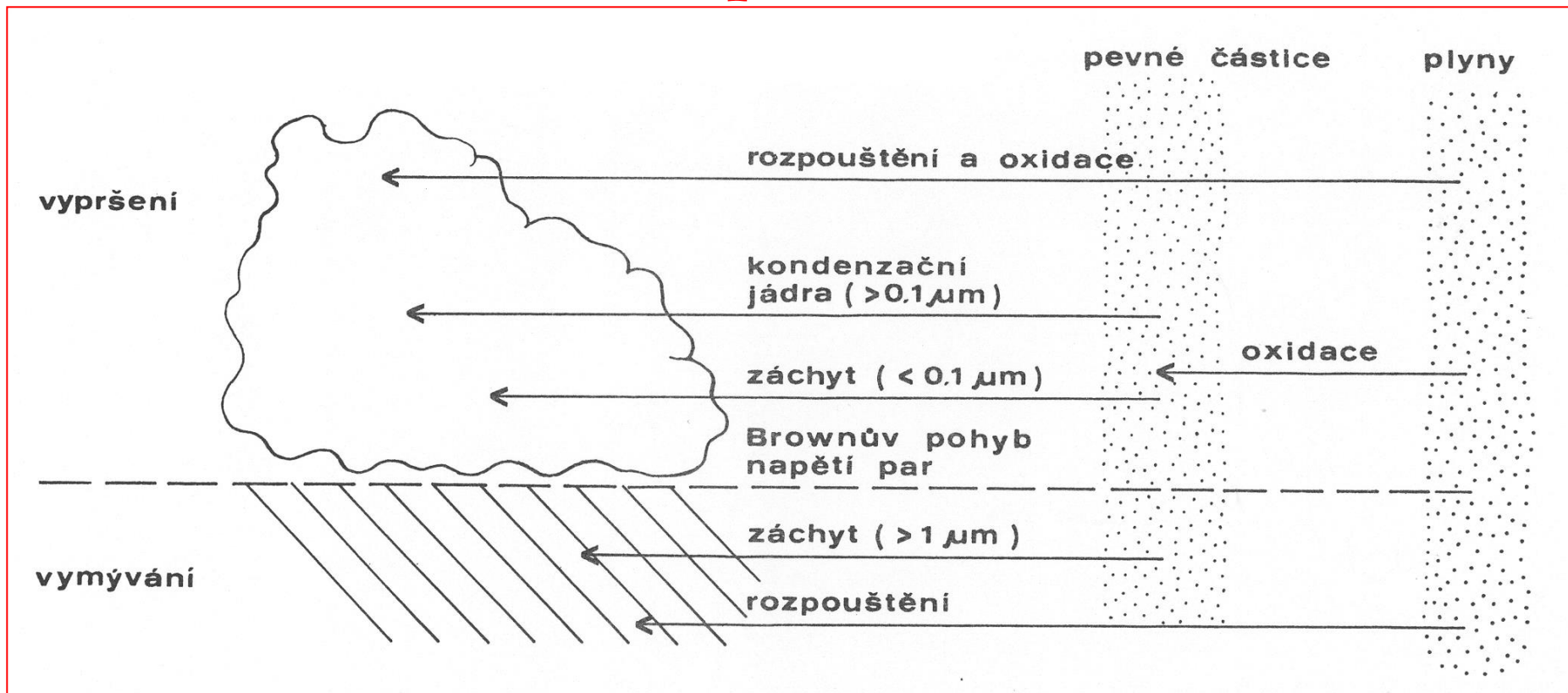


Schéma rozdělení celkové atmosférické depozice

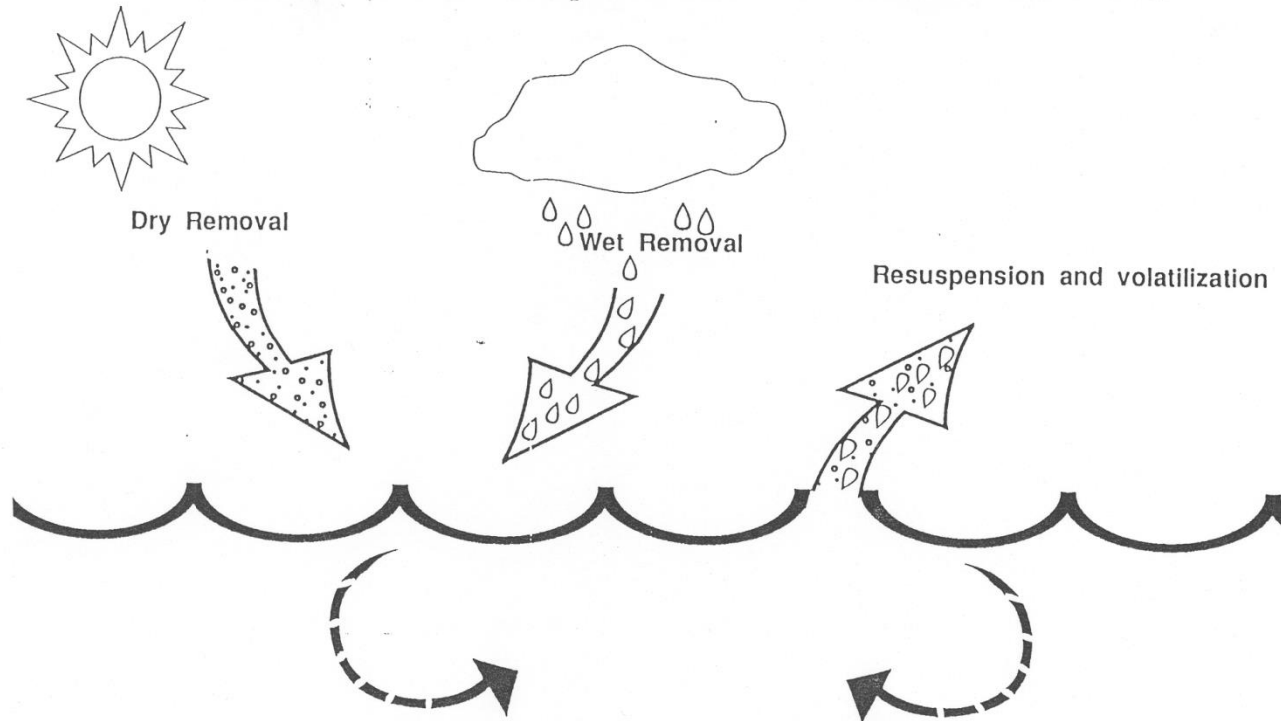


Mechanismy znečištění mokré atmosférické depozice



Suchá a mokrá atmosférická depozice

Atmospheric Deposition Fundamentals



Atmospheric loading = net flux \neq "deposition"

Net flux = dry removal + wet removal - resuspension - volatilization

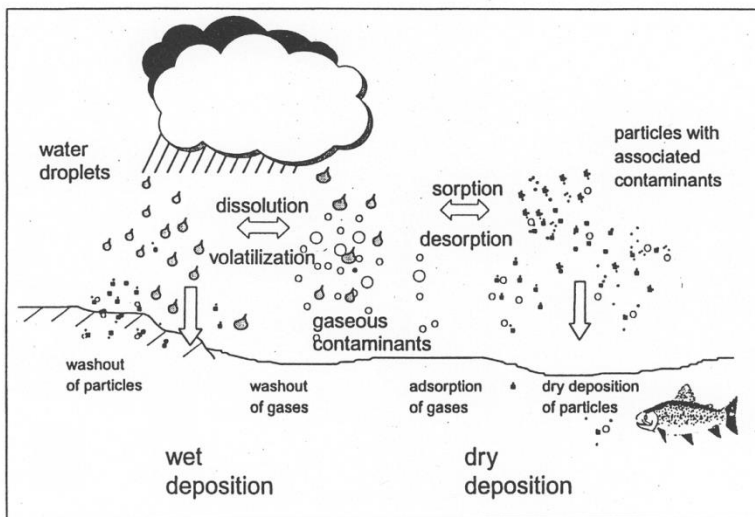
Suchá a mokrá atmosférická depozice

Vnitrooblačné vymývání, podoblačné vymývání a depozice aerosolu jsou jednosměrným advekčním transportním procesem – chemické látky jsou odstraňovány z atmosféry do vod a půd – tento mechanismus se realizuje pokud látka má vyšší fugacitu ve vodě nebo půdě.

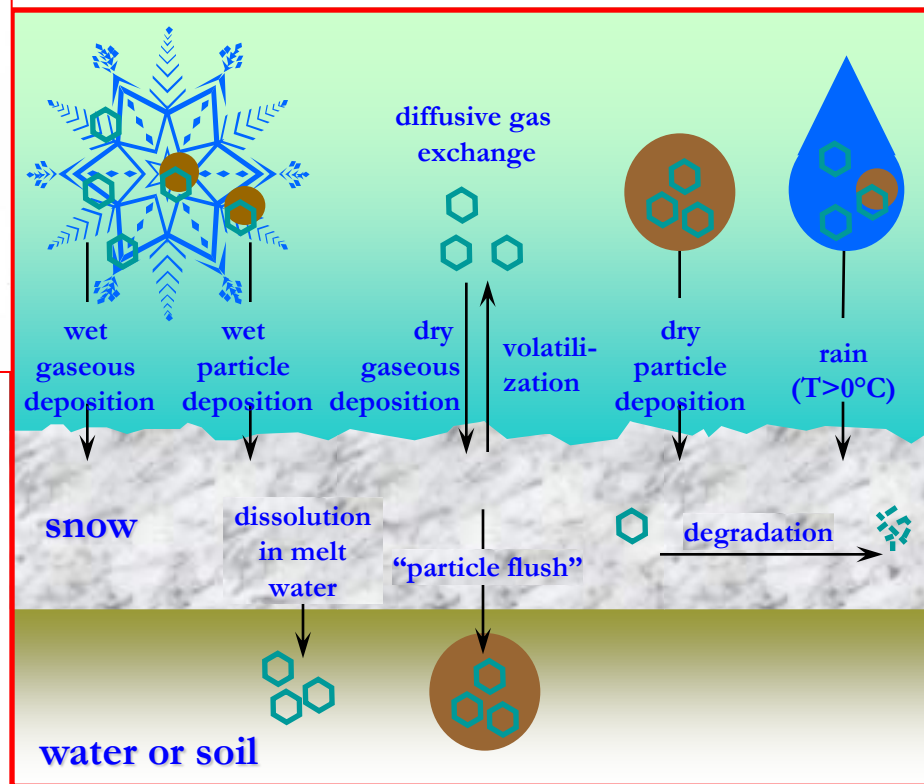
Absorpce plynů má difusní mechanismus. Dochází pouze k absorpci látky z plynné fáze vodou či půdou, pokud je fugacita ve vzduchu vyšší než fugacita ve vodě či půdě.

Pokud je fugacita ve vodě či půdě vyšší, výsledek je opačný, dochází k vytěkání.

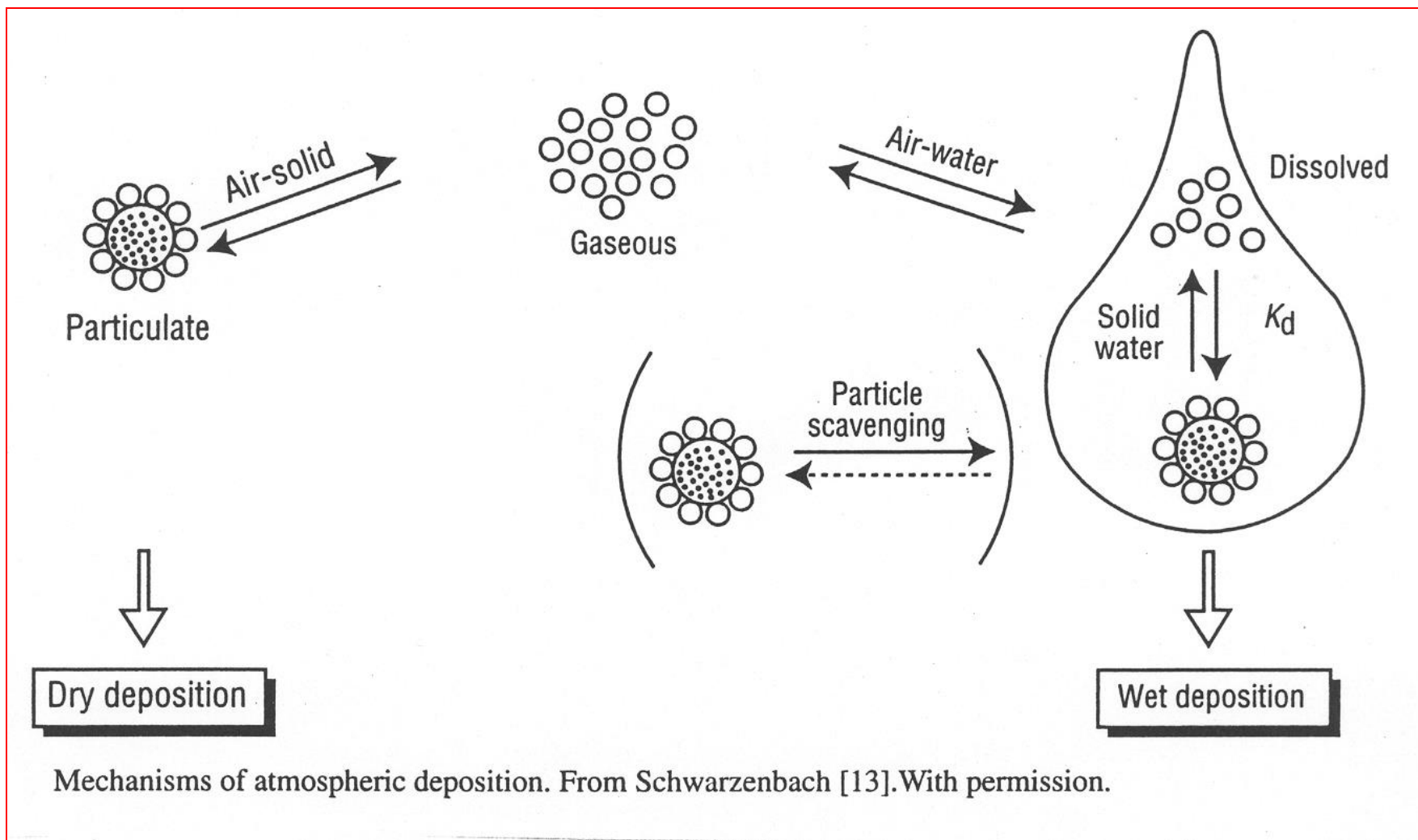
Suchá a mokrá atmosférická depozice



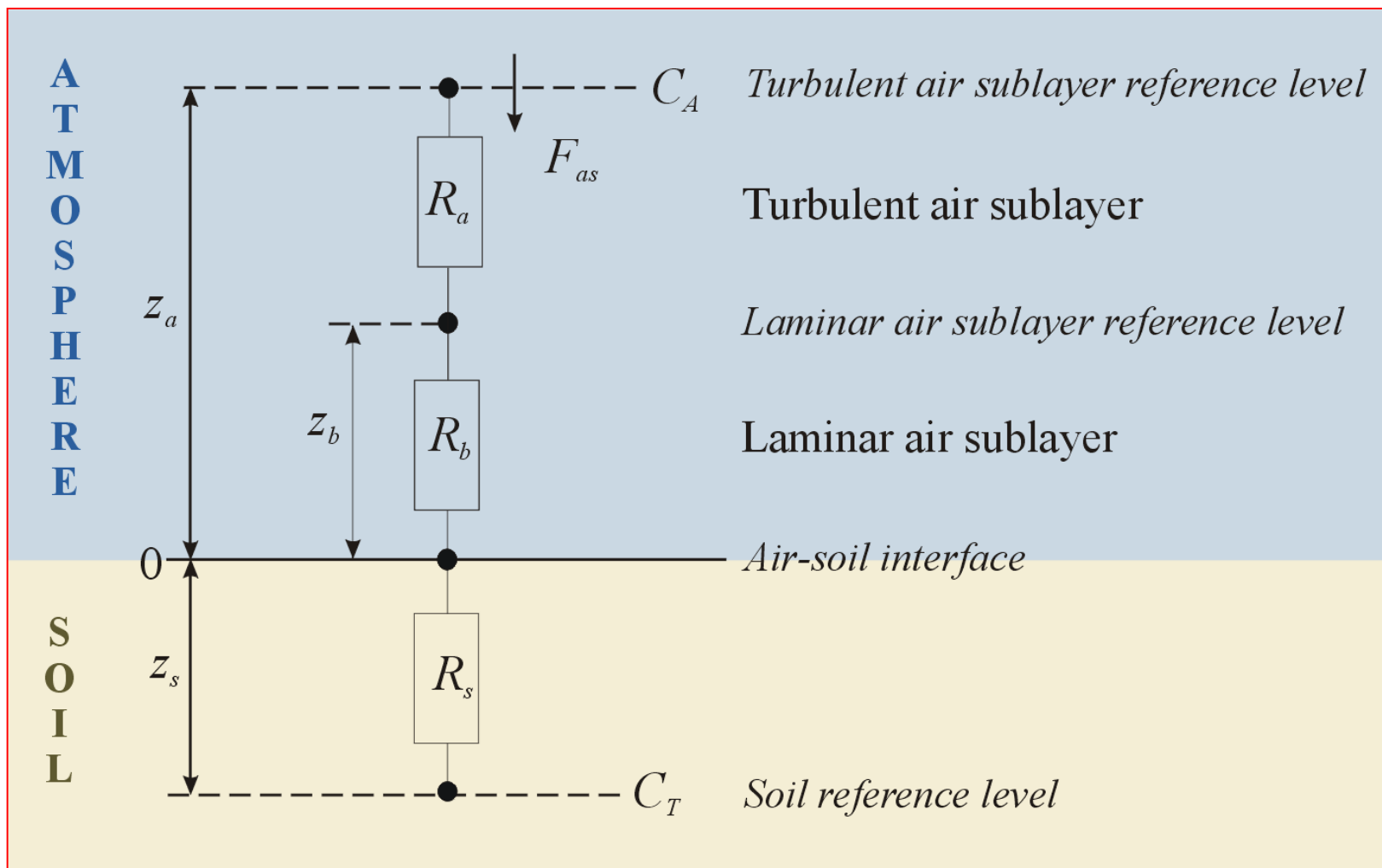
Atmospheric depositional processes that remove atmospheric species from the lower troposphere to surface waters and terrestrial systems



Suchá a mokrá atmosférická depozice



Výměna plynů s půdou



Suchá atmosférická depozice

Transport chemických látek z ovzduší do vod a půd **suchou depozicí** může být popsána analogicky průchodu elektrického proudu přes sérii odporů.

Rychlost depozice v_d je nepřímo úměrná třem „odporům“ reprezentujícím tři různé kroky procesu:

$$v_d = 1 / (r_a + r_b + r_c)$$

Kde:

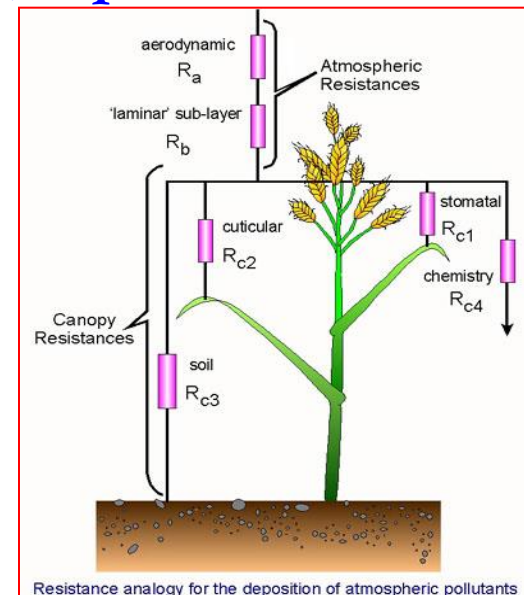
r_a = atmosférický odpor

r_b = odpor laminární vrstvy

r_c = odpor povrchového pokryvu

r_a, r_b – závisí na stabilitě atmosféry

r_c - závisí na chemickém složení a fyzikální struktuře přijímací povrchu a deponovaného materiálu.



Suchá atmosférická depozice

Pro vysoce rozpustné nebo chemicky reaktivní plyny (HNO_3) je povrchový odpor malý, zvláště když je povrch mokrá.

Pro mastné materiály jako jsou mnohé organické sloučeniny, odpor povrchu může být velký, což vede k nízké deponiční rychlosti.

Pokud je polutant vázán na částici jako nosič, odstraňovací rychlost může být popsána jako funkce fyzikálních parametrů částice, ze kterých je nejdůležitější velikost.

Malé částice mají tendenci chovat se jako plyny, větší částice ($> 2 \mu\text{m}$) jsou účinně odstraňovány z atmosféry deponičním působením gravitace.

Suchá atmosférická depozice

Setrvačný dopad je důležitý pro částice ve velikostním rozmezí 0,1 až 10 μm . Tento efekt silně závisí na rychlosti vzduchu a intenzitě turbulence, které se mění s vlastnostmi povrchu.

Doba života atmosférických částic je funkcí jejich velikosti, proto je důležité znát velikost částic dopadajících na povrch.

Odstraňování látek z ovzduší suchou depozicí je úměrné koncentraci látky v aerosolových částicích a depoziční rychlosti těchto částic.

Suchá atmosférická depozice

Rychlost depozice do vod a půdy mohou být vyjádřeny:

$$\text{DRYDEP}_{\text{aerosol}} = v_{d,\text{aerosol}} * \text{AREA}_{\text{W or S}} * C_A * \text{FR}_{\text{aerosol}}$$

Kde:

$\text{DRYDEP}_{\text{aerosol}}$ = rychlost odstraňování látky z atmosféry suchou depozicí aerosolových částic [mol.s^{-1}]

$v_{d,\text{aerosol}}$ = rychlost depozice částic aerosolu [m.s^{-1}]

$\text{AREA}_{\text{W or S}}$ = plocha rozhraní vzduch-voda nebo vzduch-půda [m^2]

C_A = úhrnná koncentrace v ovzduší [mol.m^{-3}]

$\text{FR}_{\text{aerosol}}$ = frakce látky asociovaná s aerosolem

Stejná rovnice popisuje suchou depozici absorpcí plynu (viz proces vytěkávání).

Mokrá atmosférická depozice

Mokrá atmosférická depozice zahrnuje následující procesy:

- ↪ **vymývání nebo pod-oblačné vynášení** – proces, který probíhá pod oblaky, během kterého plyny a částice jsou absorbovány padajícími kapkami,
- ↪ **dešťové vymývání nebo vnitro-oblačné vymývání**, proces, který probíhá v oblacích, plyny nebo částice jsou vynášeny kapkami oblaků a chemické látky jsou vynášeny během dalšího deště.

Mokrá atmosférická depozice

Účinnost procesu mokré depozice závisí na meteorologických faktorech jako je trvání, intenzita a typ srážek (sníh, déšť, kroupy), ale také na velikosti hustotě kapek. Důležitým parametrem je také rozpustnost v dešti nebo sněhu.

Podoblačný proces je účinným odstraňovacím procesem pro rozpustné plyny (nízká Henryho konstanta) a pro aerosoly o velikosti $> 1 \mu\text{m}$.

Pro méně rozpustné plyny (vyšší hodnoty Henryho konstanty) padající kapky budou absorbovat pouze malá množství látek pod oblaky.

Pro plynné organické látky vnitro-oblačné bude nejdůležitějším atmosférickým vymývacím procesem.

Pod-oblačné vymývání je důležité v případě, kdy koncentrace pod oblaky jsou vyšší než koncentrace uvnitř oblaků, například v blízkosti emisních zdrojů.

V oblacích je vysoce účinným procesem příjem aerosolů kapkami oblaků.

Mokr  atmosf rick  depozice

Vymyvac  rychlost mokr  depozice může být popsána rovnicí prvního řadu definována vynášecím koeficientem Λ , jež se skládá z časti charakterizujic  plynne a aerosolov  vynášení:

$$\text{WETDEP} = \Lambda * \text{AREA} * z_A * C_A = (\Lambda_G + \Lambda_{\text{aerosol}}) * \text{AREA} * z_A * C_A$$

Kde:

WETDEP = rychlost odstraňování látky z atmosféry mokrou depozicí [mol.s⁻¹]

Λ = celkov  vynášecí koeficient [s⁻¹]

Λ_G = plynny  vynášecí koeficient [s⁻¹]

Λ_{aerosol} = aerosolov  vynášecí koeficient [s⁻¹]

z_A = výška směsn  vrstvy vzduchu [m]

C_A = koncentrace v ovzduší [mol.m⁻³]

Ve většině p padů hodnocení poučujeme předpoklad rovnováhy mezi kapalnou (dešťovou) a plynnou fází.

Mokr  atmosf rick  depozice

Plynn  vynášecí koeficient Λ_G může být odhadnut z bezrozm rn  distribuční konstanty K_{AW} , intenzity deště a výšky vrstvy vzduchu:

$$\Lambda_G = \text{RAIN} * FR_G / z_A * K_{AW} = \text{RAIN} * (1 - FR_{\text{aerosol}}) / z_A * K_{AW}$$

Kde:

RAIN = intenzita deště [m.s⁻¹]

Mokr  atmosf rick  depozice

Pro stanoven  aerosolového vynášecí koeficientu Λ_{aerosol} můžeme předpokládat, že během spadu deště atmosférou, ka d  kapka proletí objemem vzduchu 200 000-kr t v t m n  že její vlastn  objem:

$$\Lambda_{\text{aerosol}} = \text{RAIN} * 2 * 10^5 * \text{FR}_{\text{aerosol}} / z_A$$

Tendence ke vzniku aerosolu je r zn  pro r zn  látky a r zn  látky jsou asociovány s různými velikostními frakcemi aerosolu – rychlost depozice aerosolu v_{daerosol} a aerosolov  vymývací koeficient Λ_{aerosol} jsou siln  l tkov  z visl .

Vymývání z atmosféry

$$W_t = C_1 / C_a$$

C_1 – koncentrace v kapalně fázi

C_a – koncentrace ve vzduchu

$$W_t = W_p * f + W_a * (1 - f)$$

W_t – celkový vymývací koeficient

W_p – vymývací koeficient částic

W_a – vymývací koeficient plynné fáze

f – frakce vázaná na částicích

$$W_a = 1 / K_{aw}$$

Rozšíření popisu o sorpci na fázovém rozhraní a vliv sněhu

$$K_{rain/air} = K_{wa} + 3K_{ia} / r$$

- Druhý člen je příspěvek sorpce sloučeniny na povrch dešťových kapek
- K_{ia} – rozdělovací koeficient fázové rozhraní/vzduch, r – poloměr kapek

$$K_{snow/air} = A_i \rho_w K_{sa}$$

r_w je hustota vody

A_i je specifický povrch sněhu

K_{sa} je sorpční koeficient na povrch sněhu

Vymývání z atmosféry

V případě sněhu lze tedy původní vymývací koeficient W_t rozložit na jednotlivé příspěvky:

$$W_t = C_s / C_a$$

$$W_t = \frac{C_{sw} + C_{si} + C_{sp}}{C_{ag} + C_{ap}}$$

C_{sw} je koncentrace rozpuštěná ve kvazikapalné vrstvě na fázovém rozhraní

C_{si} je koncentrace sorbovaná na rozhraní sněž-vzduch

C_{sp} je koncentrace na částicích zachycená padajícím sněhem

$$W_t = \frac{C_{ag}(v_{sw}K_{wa} + AK_{ia}) + W_p C_{ap}}{C_{ag} + C_{ap}}$$

v_{sw} je frakce vody ve sněhu a A je povrch sněhu

Vymývání z atmosféry

Dynamika procesu:

$$C = C_0 e^{-\frac{W t U_r t}{Y}}$$

Y je výška sloupce vzduchu

záchyt částic v průběhu podoblačného vymývání není 100%
efektivní rychlost ustalování rovnováhy!

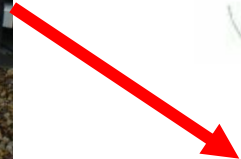
Povrchová sorpce je rychlejší, než difuze do vnitřních částí
sněhu.

Koncentrační změny ve vzduchu, tedy i ve srážkové vodě mohou
být velmi rychlé

vodivostní
čidlo



začátek
srážek



vzorkování vzduchu
před
předpokládanou
srážkou (24)

vzorkování srážek



zastavení
vzorkování
vzduchu



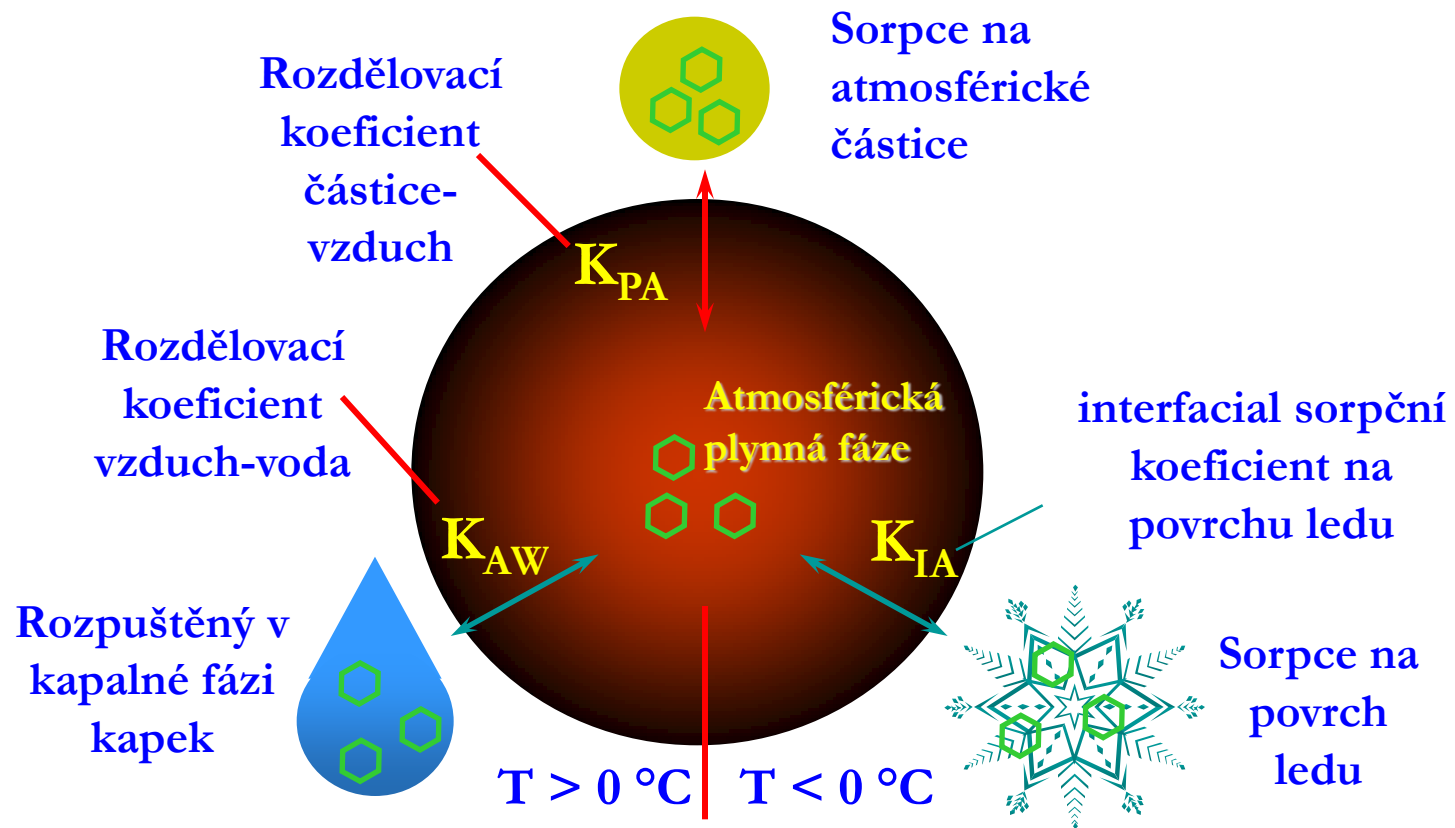
Research Centre for Toxic Compound

<http://recetox.muni.cz>

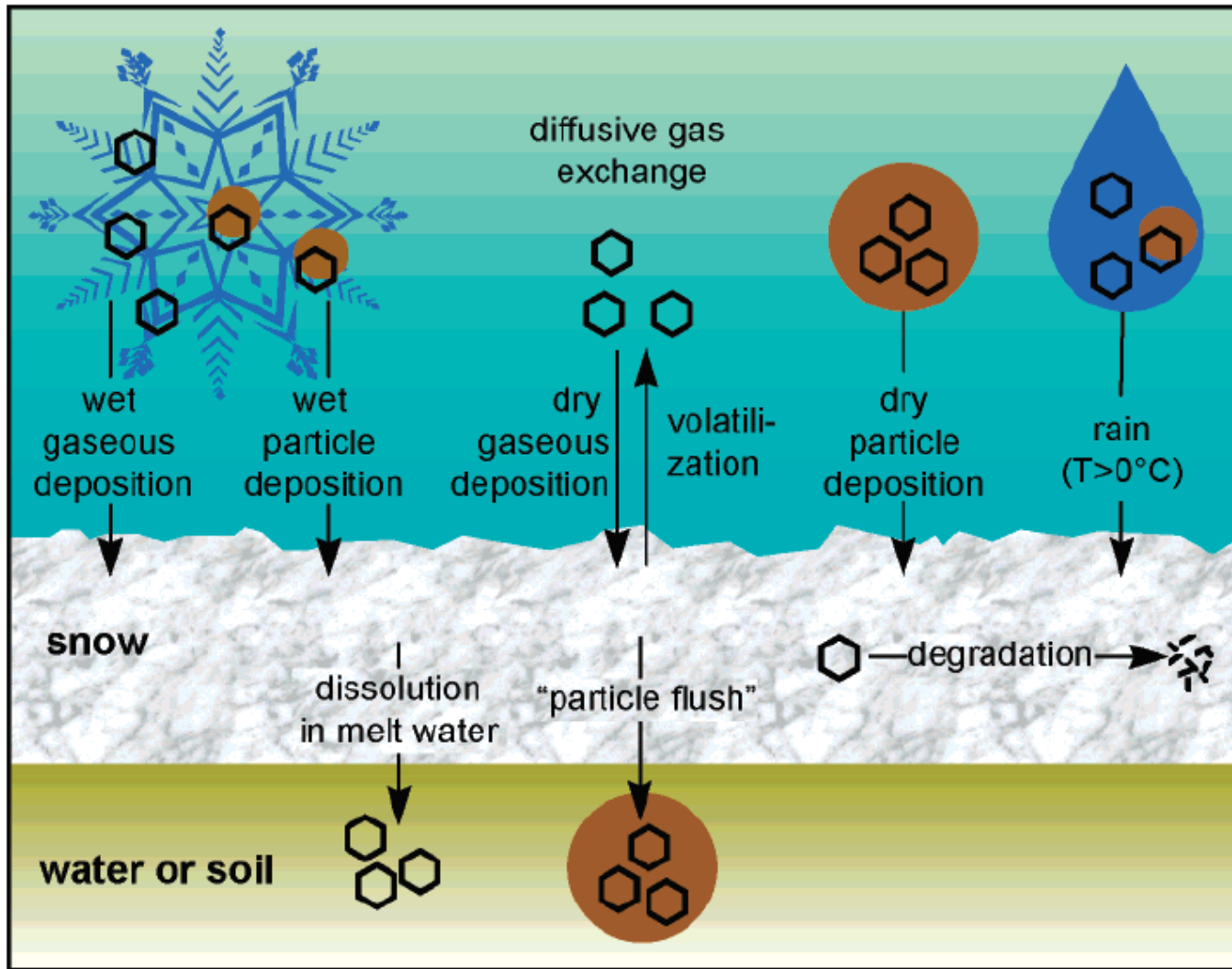


Účinnost vynášení organických látek z atmosféry

Předpokládané rovnovážné rozdělení v atmosféře



Delivery and loss of organic contaminants in a seasonal snow cover



Vznik ledu – homogenní a heterogenní mrznutí

Homogenní mrznutí:

- ↪ Mrznutí super podchlazených oblačných kapek
- ↪ V atmosféře při teplotách pod $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$

Heterogenní mrznutí:

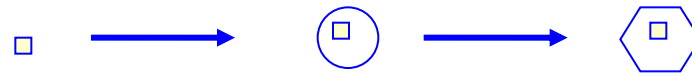
- ↪ Vyvolané částicemi ledových jader
- ↪ Ptavděpodobně při teplotách pod $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$

Vznik ledu – homogenní a heterogenní mrznutí

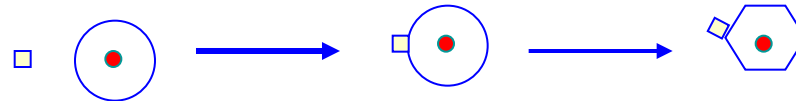
Depoziční mrznutí



Kondenzační mrznutí



Kontaktní mrznutí



□ Ledové jádro (IN)

● Oblačné kondenzační jádro (CCN)

○ Kapka vody

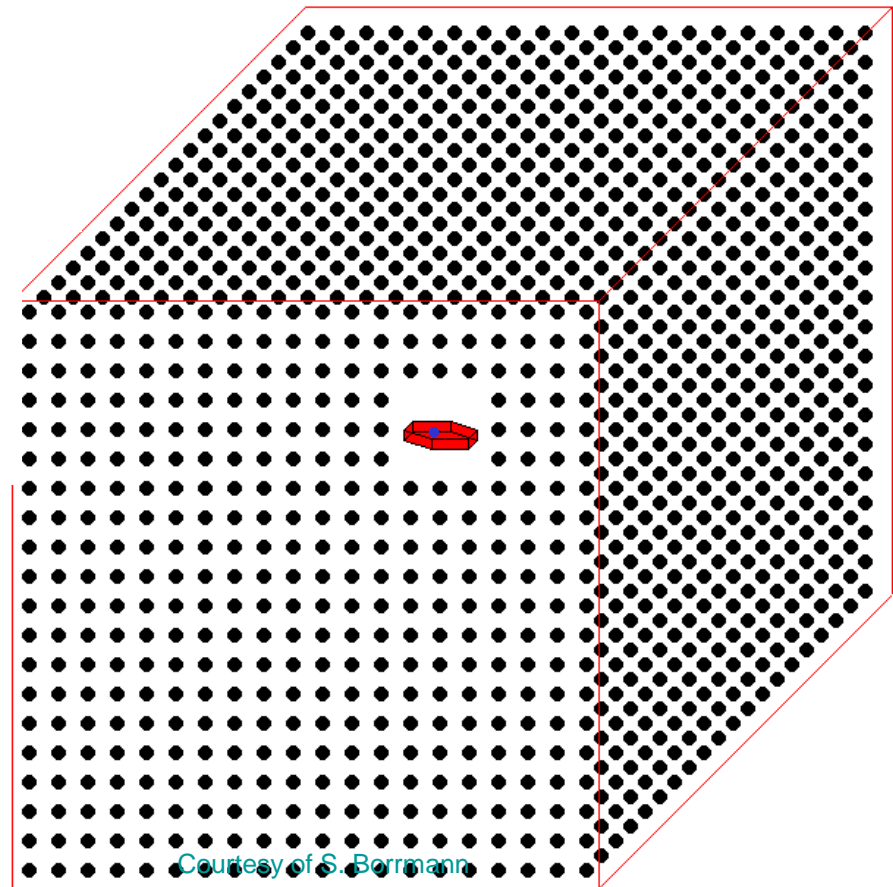
⬡ Krystal ledu

Přítomnost ledových jader v troposféře

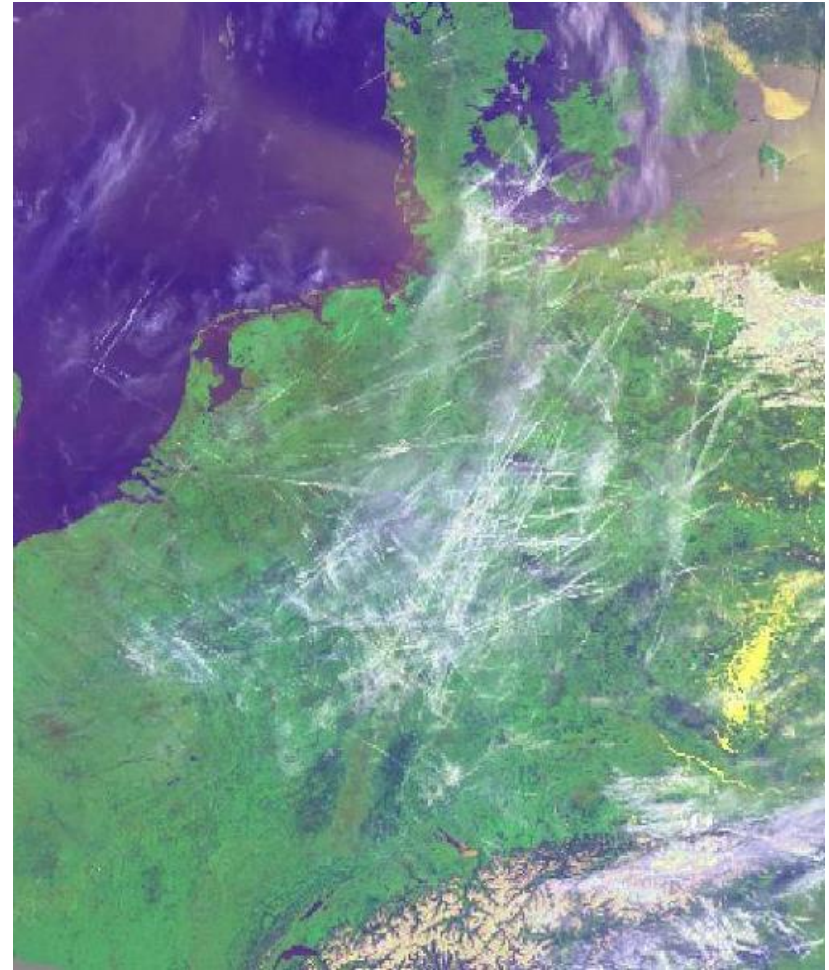
Ve vrchní troposféře:

Jedna částice aerosolu z 10 000
má takové vlastnosti, že
působí jako ledové jádro.

Jaké jsou to vlastnosti ???

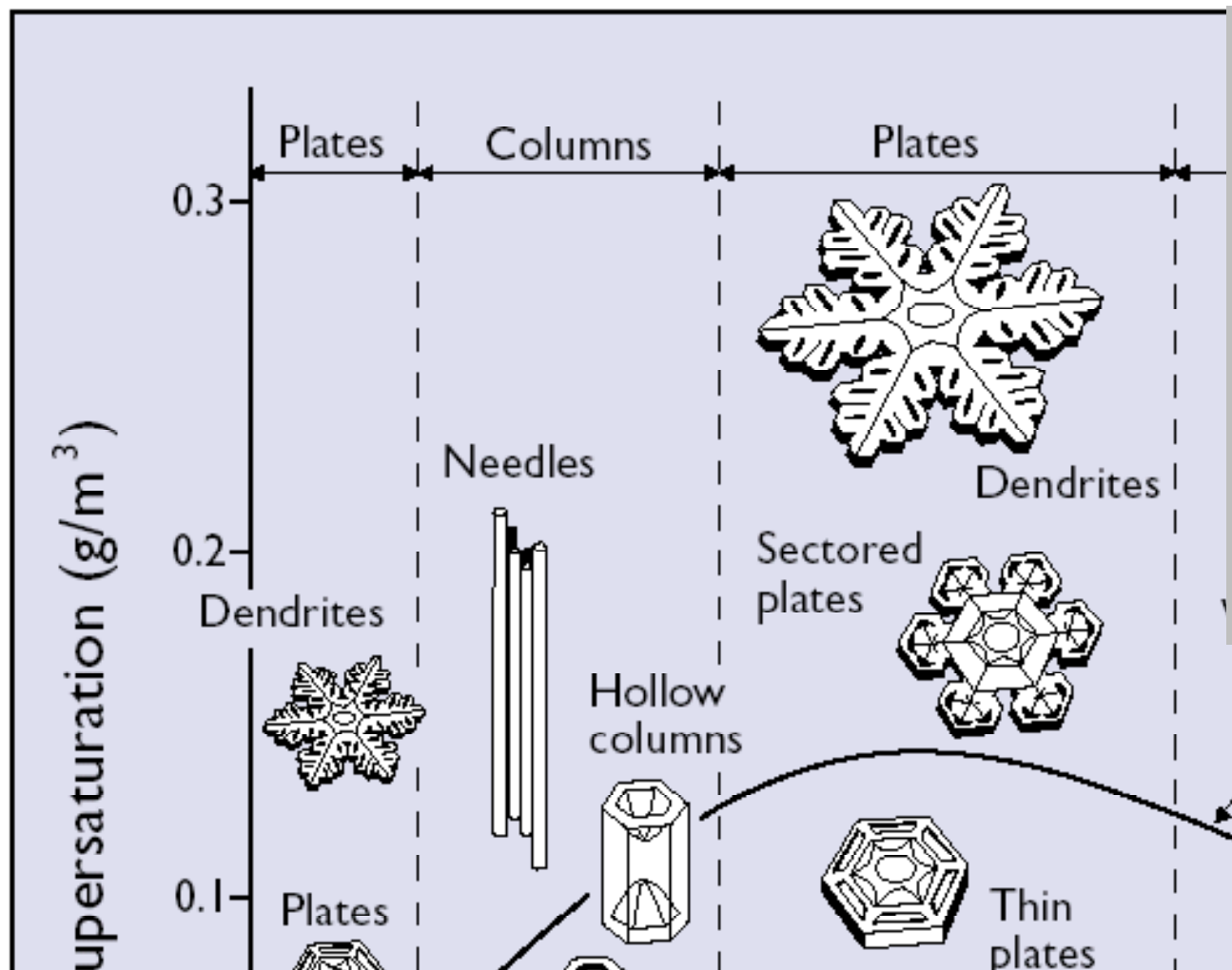


Antropogenní led v atmosféře



NOAA-12 AVHRR Satellite, 4. May 1995, 09:58

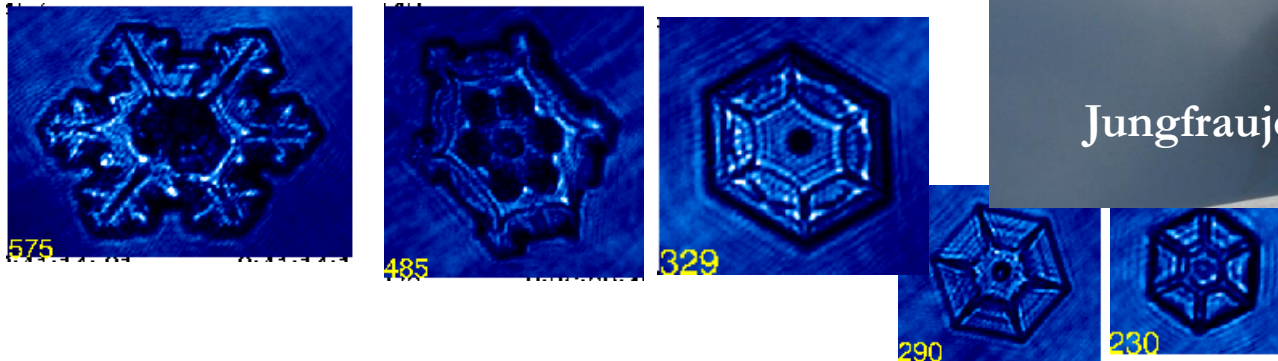
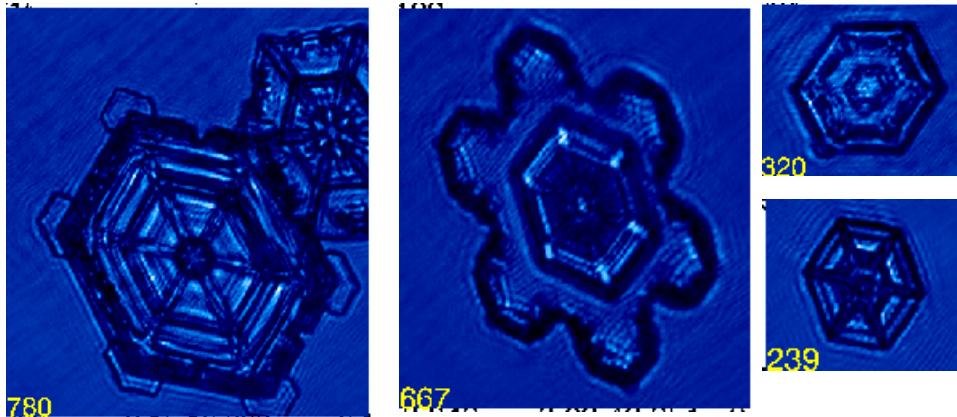
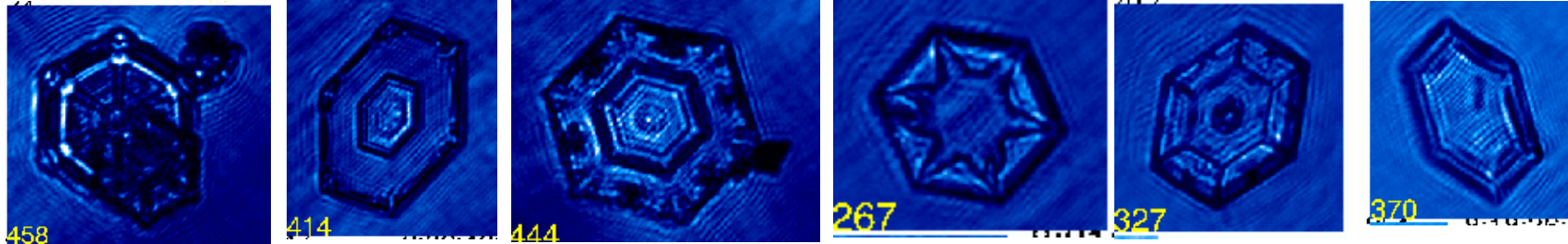
Tvar a velikost ledových krystalů



Environmental Temperature (°C)	Crystal Habit
0 to -4	thin plates
-4 to -6	needles
-6 to -10	columns
-10 to -12	plates
-12 to -16	dendrites, plates
-16 to -22	plates
-22 to -40	hollow needles

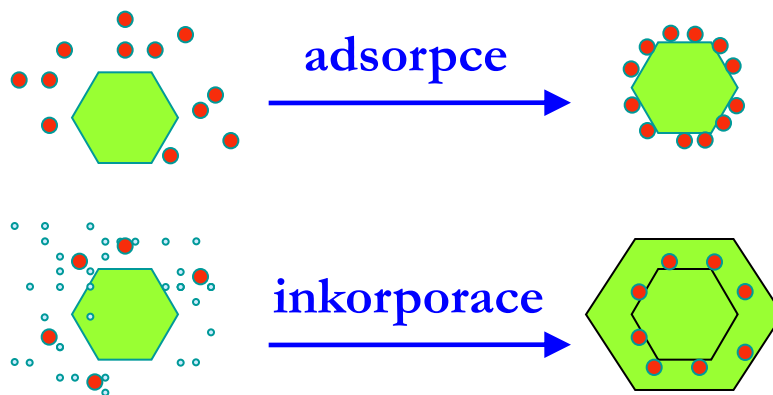
adapted from a diagram by Y. Furakwa (1997), Chemie in unserer Zeit

Ledové krystaly v oblacích (Courtesy of Keith Bower et al., UMIST)



Důležité vynášecí procesy

1. Vynášení plynů



- Organické plyny
- ⬡ Ledové krystaly
- ⋯ Vodní pára
- Kapky
- Ledová jádra
- Aerosol

2. Riming



3. Vynášení částic

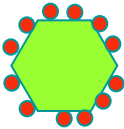


Research Centre for Toxic Compounds in the Environment

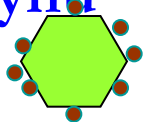
<http://recetox.muni.cz>

Důvody pro vyšší koncentrace OC ve sněhu

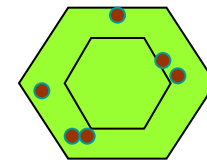
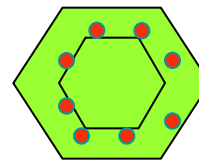
↪ Povrchy sněhových vloček a ledových krystalů jsou větší než povrch dešťových kapek



↪ Rozdělení je závislé na teplotě → povrchová adsorpce plynů a částic je vyšší pro sníh než pro kapky deště



↪ Inkorporace plynů a částic může přispívat k příjmu uhlovodíků a dalších OCs během růstu krystalů, což není možné v případě dešťových kapek



↪ OCs mohou být adsorbovány na ledová jádra



Rozhraní vzduch – voda, těkání

Processes Resulting in Emissions and/or Depositions at the Air/Water Interface

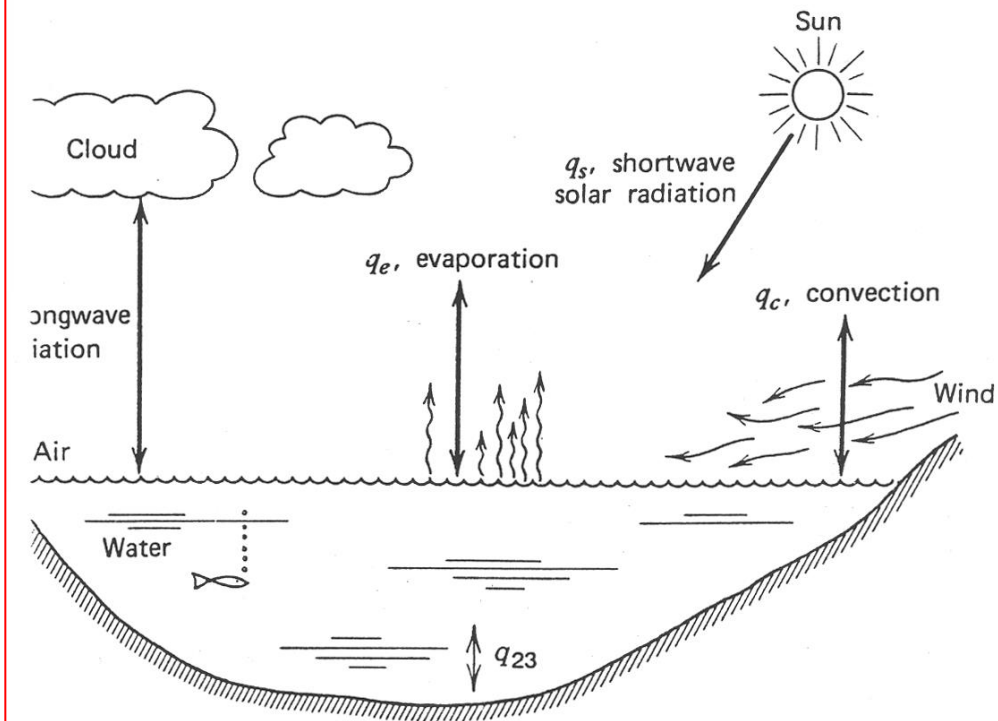
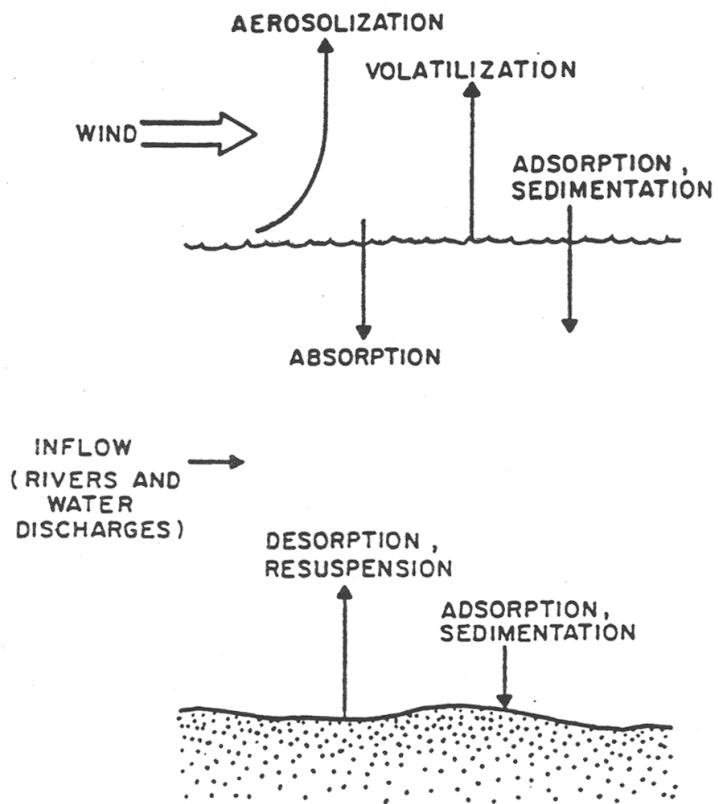
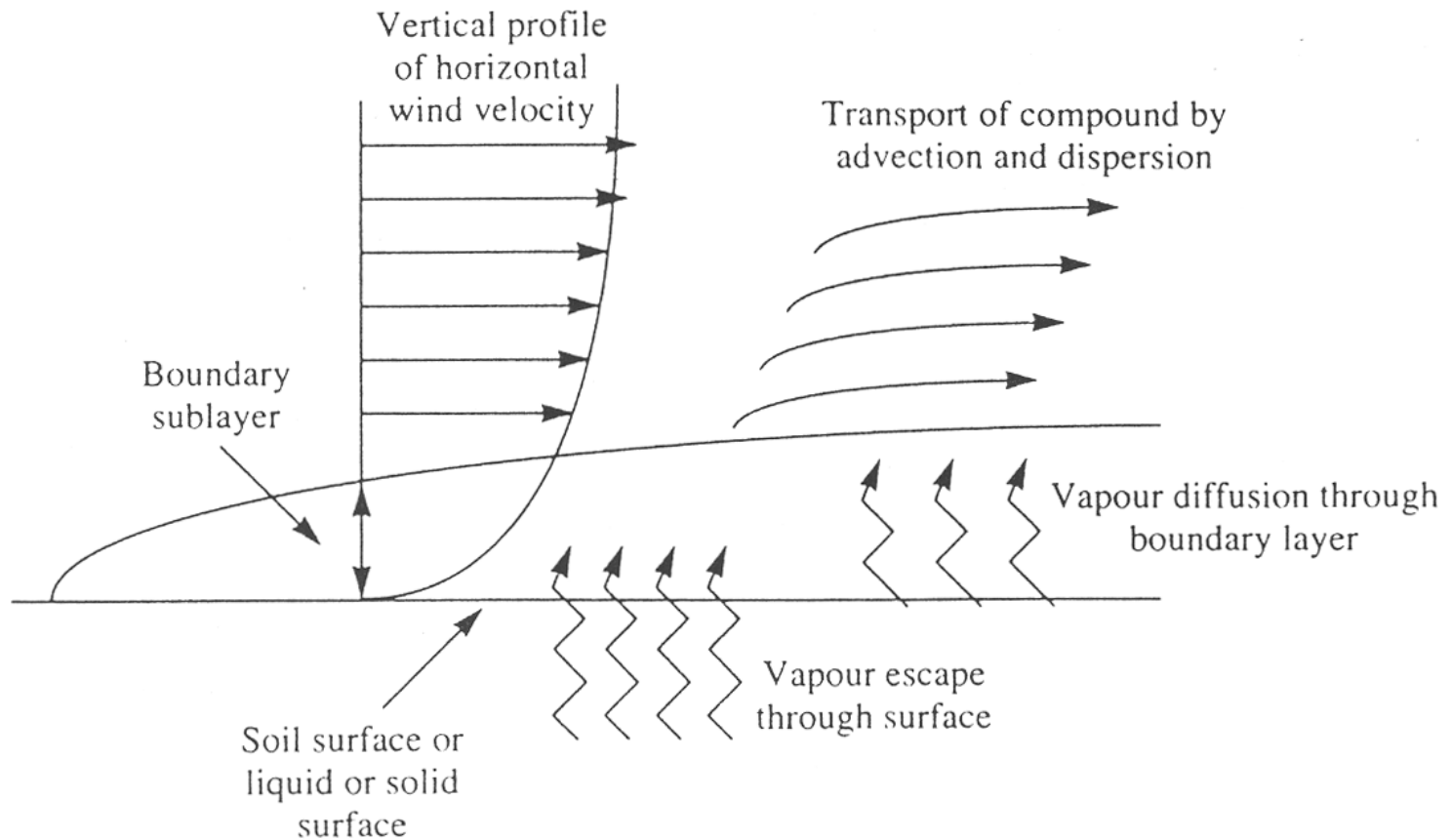


Figure 4.3-1. Heat and energy transfers at the air–water interface.

Těkání z vody



Schematic of vaporization/volatilization process.

Rozhraní vzduch – voda

$$F_a = -D_a \frac{dC}{dz} = -D_a \frac{C_a - C_{a/w}}{z_a} \quad [M \cdot L^{-2} \cdot T^{-1}] \quad (10)$$

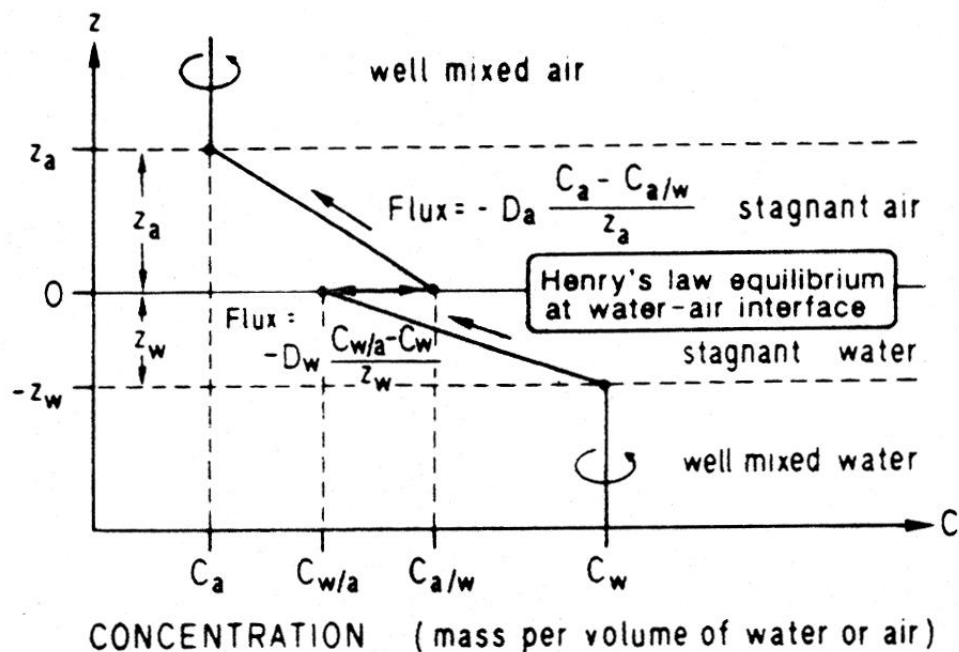


Figure 10.2 Stagnant boundary layer model for air–water exchange of chemicals. Note that the vertical coordinate z is defined as positive upwards and that $z = 0$ at the level of air–water contact.

Vymývání z půd

Vymývací mechanismy uvolňují chemické látky z půd a sedimentů a způsobují kontaminaci podzemních vod.

Transport látek ze svrchních vrstev půdy do spodních je považován za odstraňovací proces podobně jako je advekce a disperze látek od zdroje v ovzduší a ve vodě.

K tomuto procesu dochází **vymýváním perkolující vodou** – pokud budeme podzemní vodu považovat za součást půdního systému můžeme tento proces považovat za příklad intrasložkového transportu (z horních vrstev půdy do spodních vrstev) nebo můžeme uvažovat o intersložkovém transportu z půdy do spodní vody.

Vymývání z půd

Pohyb polutantů půdou zahrnuje **dva základní mechanismy**:

- ↪ difuzí chemických látek, primárně v (g) a (l) fázi,
- ↪ transport hmoty vodou způsobený gravitačními silami.

Půdní vymývání je zjednodušeně hodnoceno jako rovnováha mezi tuhou fází a pórovou vodou v čase a prostoru.

Vymývání z půd

Vymývání látek z horní půdní vrstvy může být vyjádřeno jako odstraňovací proces 1. řádu:

$$\text{LEACH} = (\text{RAIN} * \text{FR}_{\text{inf}} * \text{AREA}_{\text{Soil}} * \text{C}_{\text{Soil}}) / (\text{FR}_{\text{W}} + \text{FR}_{\text{S}} * \text{K}_{\text{p}} * \text{RHO}_{\text{S}})$$

Kde:

LEACH – odstraňování látky ze svrchní vrstvy půdy [mol.s⁻¹]

RAIN – rychlost mokré depozice [m.s⁻¹]

FR_{inf} – frakce srážkových vod infiltrující půdou

AREA_{Soil} – plocha půdy [m²]

C_{Soil} – koncentrace látky v půdě [mol.m⁻³]

FR_W – objem frakce vodní fáze v půdě

FR_S – objem frakce tuhé fáze v půdě

K_p – rozdělovací koeficient půda-voda [l.kg⁻¹]

RHO_S – hustota tuhé fáze půdy [kg.l⁻¹]

Vymývání z půd

Vymývání je důležitým faktorem pro látky s nízkou hodnotou K_p .

Podobné procesy probíhají i v sedimentech – povrchová voda vstupuje do sedimentů a poté jsou transportovány z vyšších vrstev sedimentu do spodních.

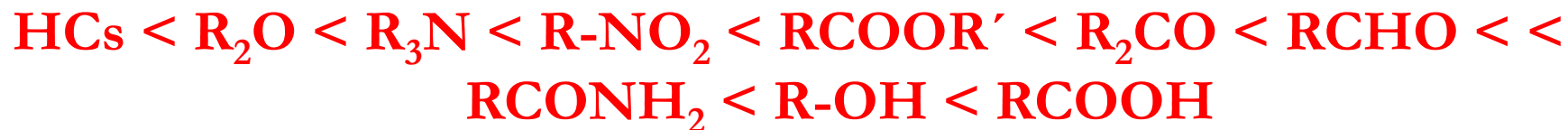
Tento proces může být popsán stejným vztahem jako vymývání půd.

Pokud dochází ke kontinuální sedimentaci – kontaminovaná svrchní vrstva je transportována do vrstev spodních – **překrývání sedimentů.**

Vymývání z půd

Všeobecně platí, že polárnější látky jsou v půdách a sedimentech mobilnější.

Nárůst mobility:



Odnos půdy

Část dešťové vody odnáší částice půdy do povrchových vod.

V sídelních oblastech je srážková voda odnášena kanalizačním systémem.

Ve venkovských oblastech srážková voda odnáší částice půd přímo do povrchových vod.

Odnos půdy vodou – vodní eroze.

Látka rozpuštěná ve vodě nebo asociovaná s půdními částicemi je transportována tímto mechanismem z půd do vod.

Odnos půdy

Pokud předpokládáme, že voda, která odnáší půdu je v rovnováze s půdou, **hmotnostní tok látky vyplývající z odtoku může být kvantifikován následovně:**

$$\text{RUN-OFF} = [(\text{RAIN} * \text{FR}_{\text{run}}) / (\text{FR}_{\text{W}} + \text{FR}_{\text{S}} * \text{K}_{\text{p}} * \text{RHO}_{\text{S}}) + \text{EROSION}_{\text{soil } i}] * \text{AREA}_{\text{soil}} * \text{C}_{\text{soil}}$$

Kde:

RUN-OFF – hmotnostní tok látky způsobený odnosem půdy do vody [mol.s⁻¹]

RAIN – rychlost mokré depozice [m.s⁻¹]

FR_W – objem frakce vodní fáze v půdě

FR_S – objem frakce tuhé fáze v půdě

K_p – rozdělovací koeficient půda-voda [l.kg⁻¹]

RHO_S – hustota tuhé fáze půdy [kg.l⁻¹]

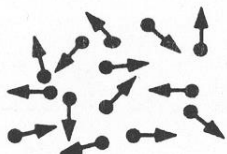
EROSION_{soil i} – rychlost, kterou je půda vymývána z půdy do povrchových vod [m.s⁻¹]

AREA_{Soil} – plocha půdy [m²]

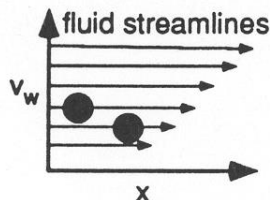
C_{Soil} – koncentrace látky v půdě [mol.m³]

Sedimentace / resuspendace

A. Brownian diffusion



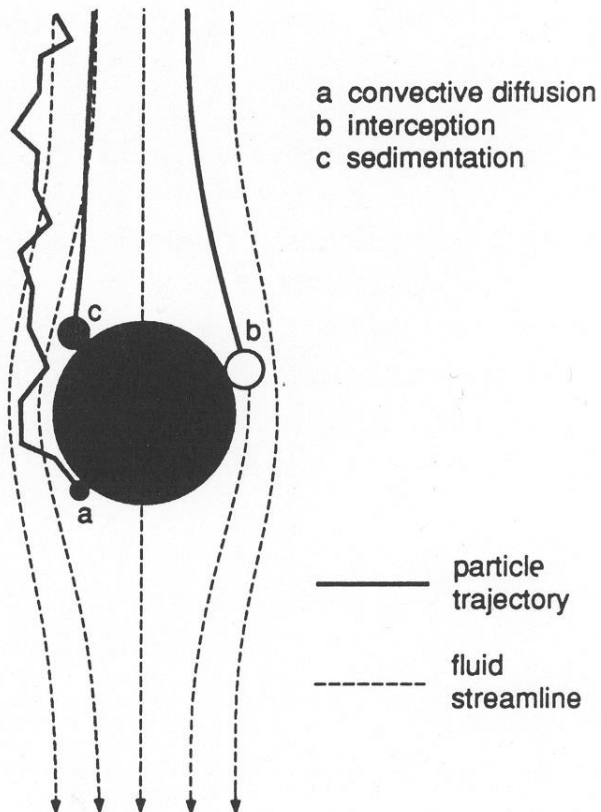
B. Velocity gradients



C. Differential sedimentation



(a)



a convective diffusion
b interception
c sedimentation

— particle trajectory
- - - fluid streamline

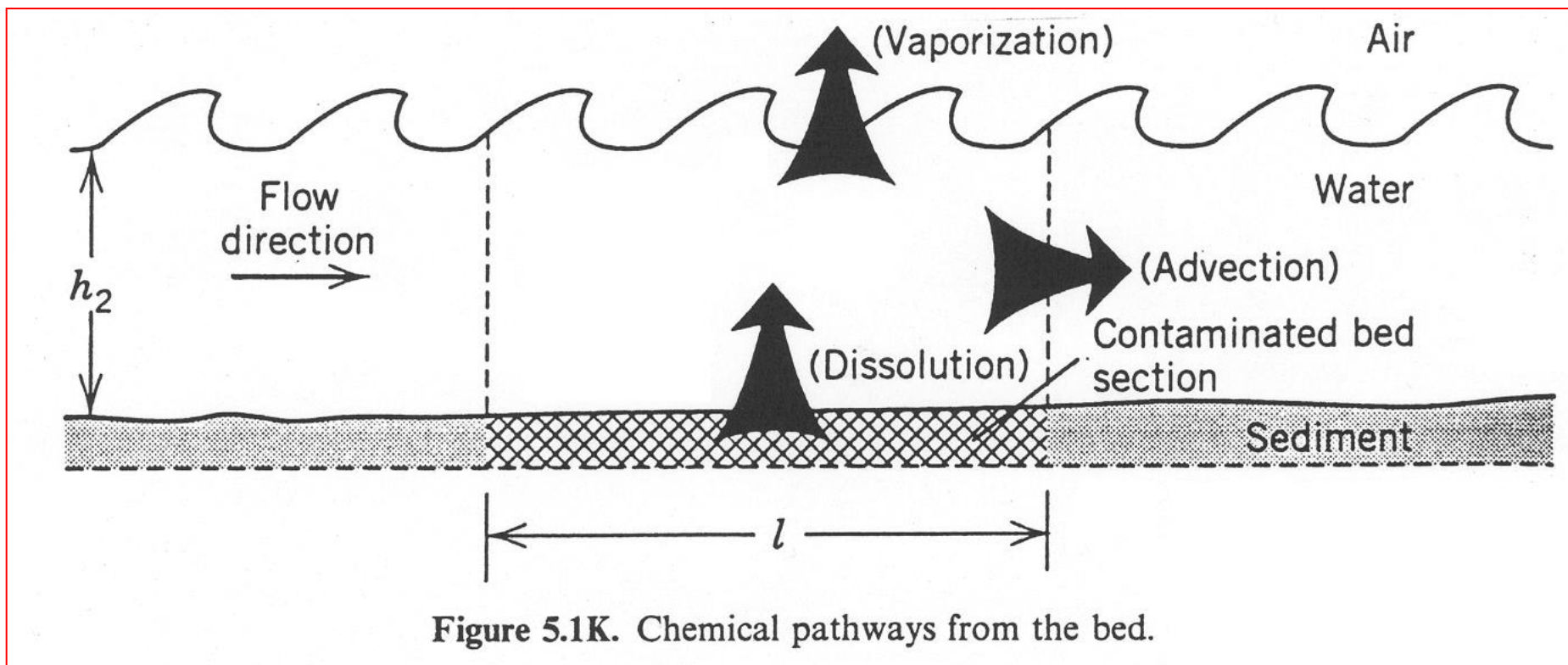
(b)

Figure 14.21. Transport mechanisms. (Adapted from O'Melia and Tiller, 1993.)

Sedimentace
částic jako
transportní
mechanismus
pohybu
chemických
látek ve vodním
tělese

Sedimentace / resuspendance

Cesty pohybu chemických látek po desorpci/resuspendaci



Sorpce na povrchu sedimentů

Rozhraní voda - sediment

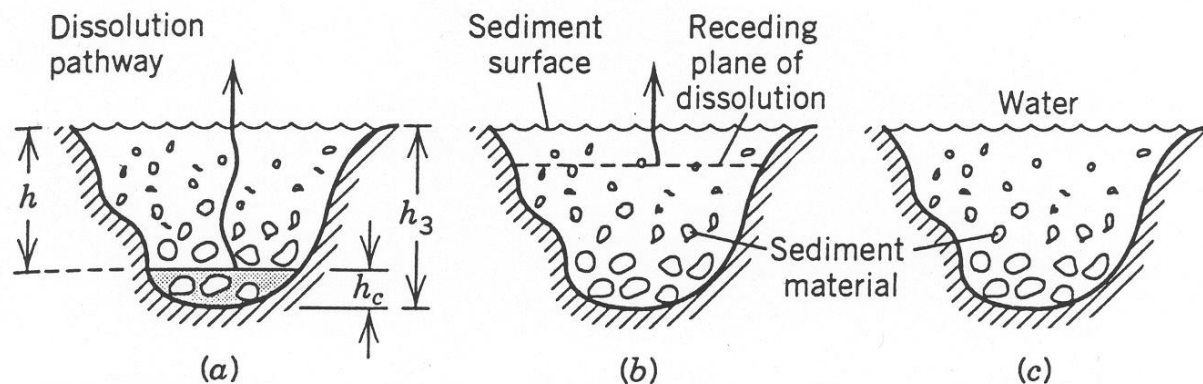
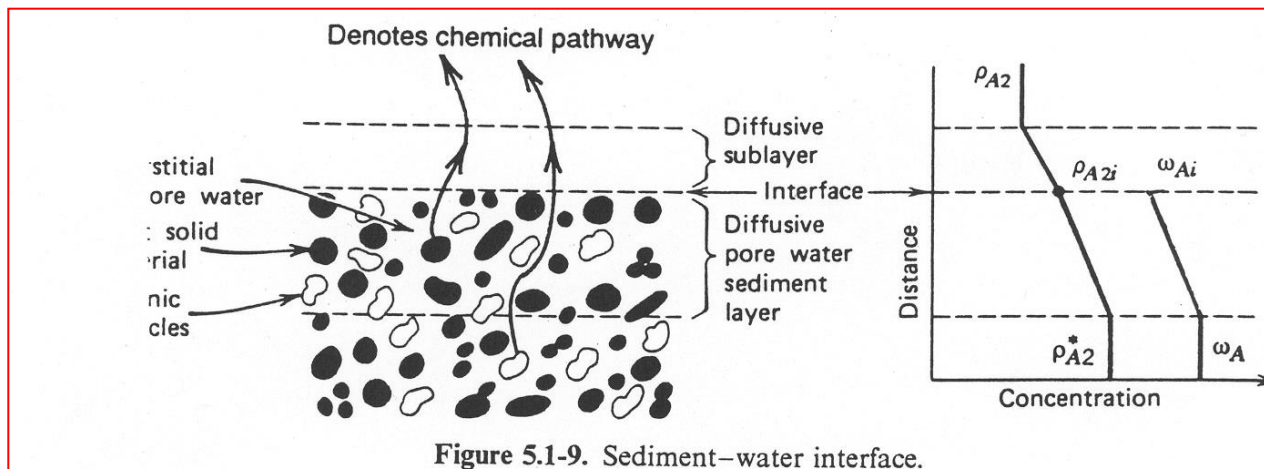


Figure 5.1-10. Dissolution of pure and sorbed chemical from within beds: (a) pure and sorbed; (b) sorbed; (c) clean.

Překrývání sedimentů

Tento transportní proces z vyšších vrstev překrýváním může být popsán opět odstraňovací rovnicí 1. řádu:

$$\text{BURIAL} = \text{NETSED} * \text{AREA}_{\text{sed}} * C_{\text{sed}}$$

Kde:

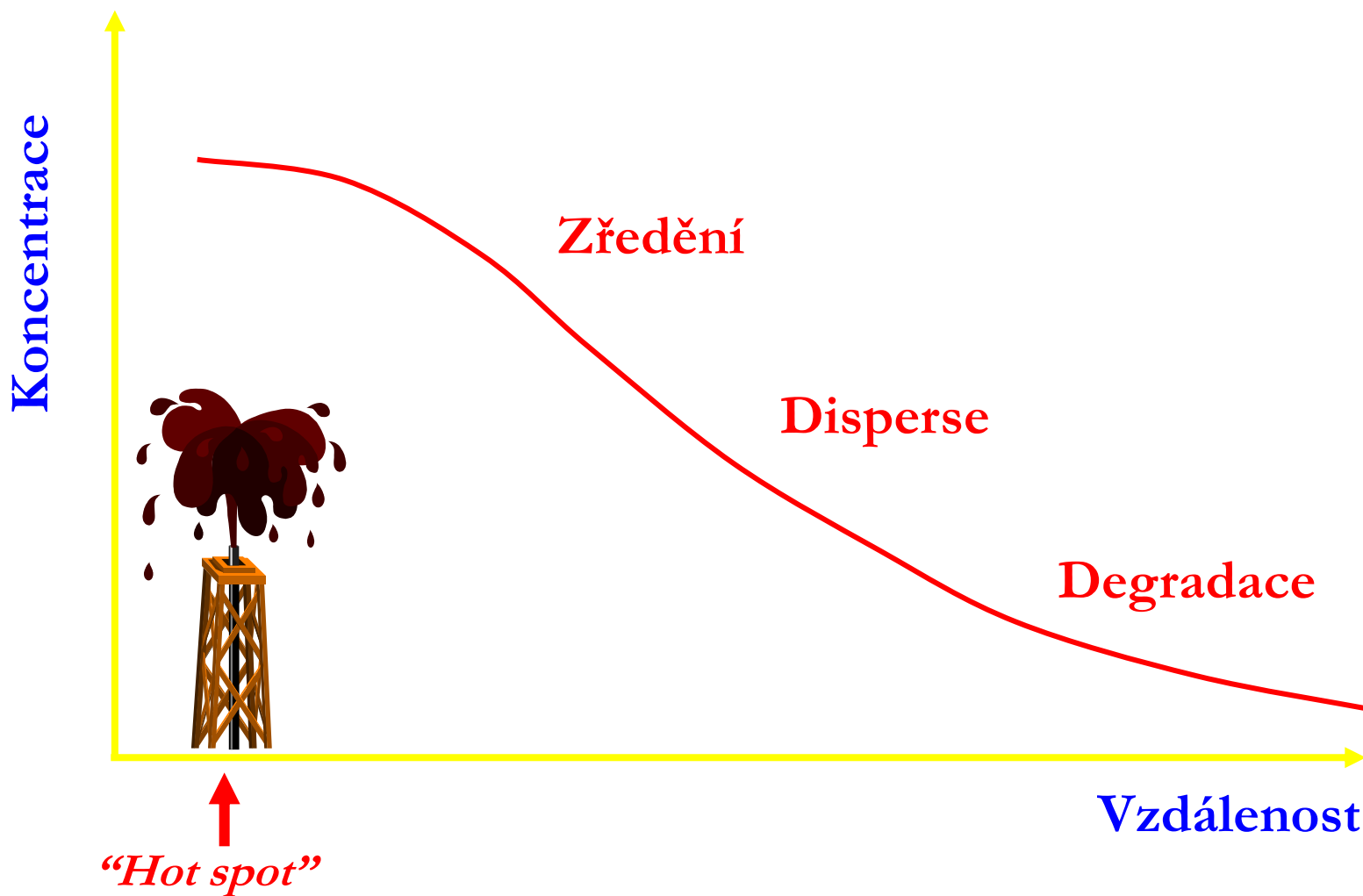
BURIAL – tok překrývající hmoty ze složek sedimentů [mol.s^{-1}]

NETSED – rychlost sedimentace [m.s^{-1}]

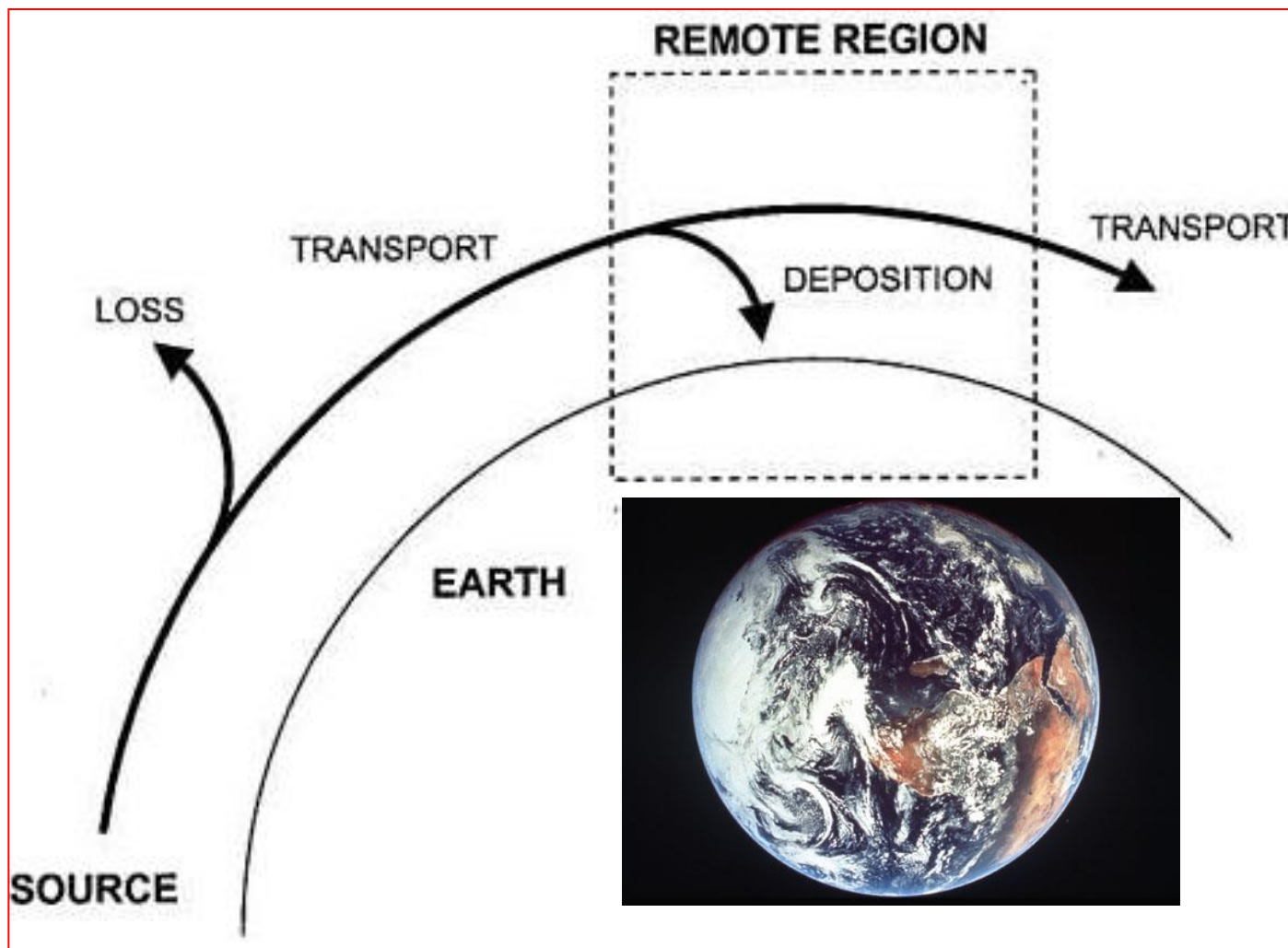
AREA_{sed} – plocha rozhraní sediment-voda [m^2]

C_{sed} – úhrnná koncentrace látky v sedimentu [mol.m^{-3}]

Typický gradient znečištění



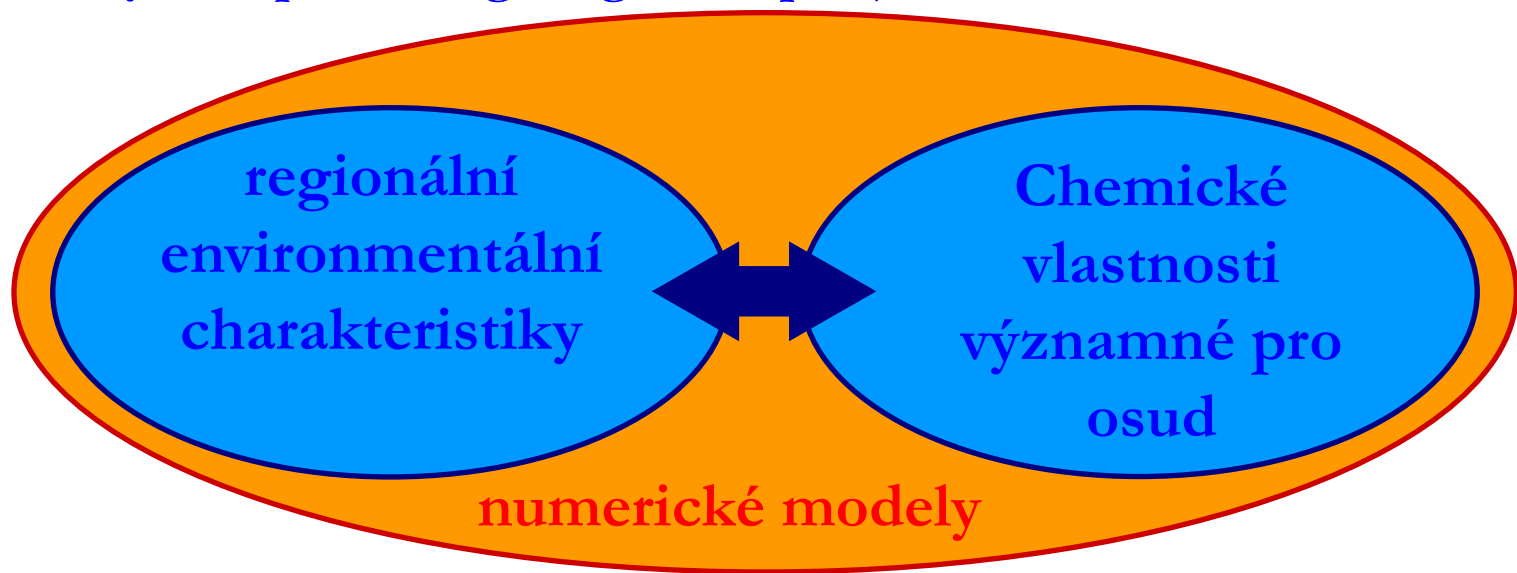
POPs – dálkový transport



Transportní mechanismy POPs

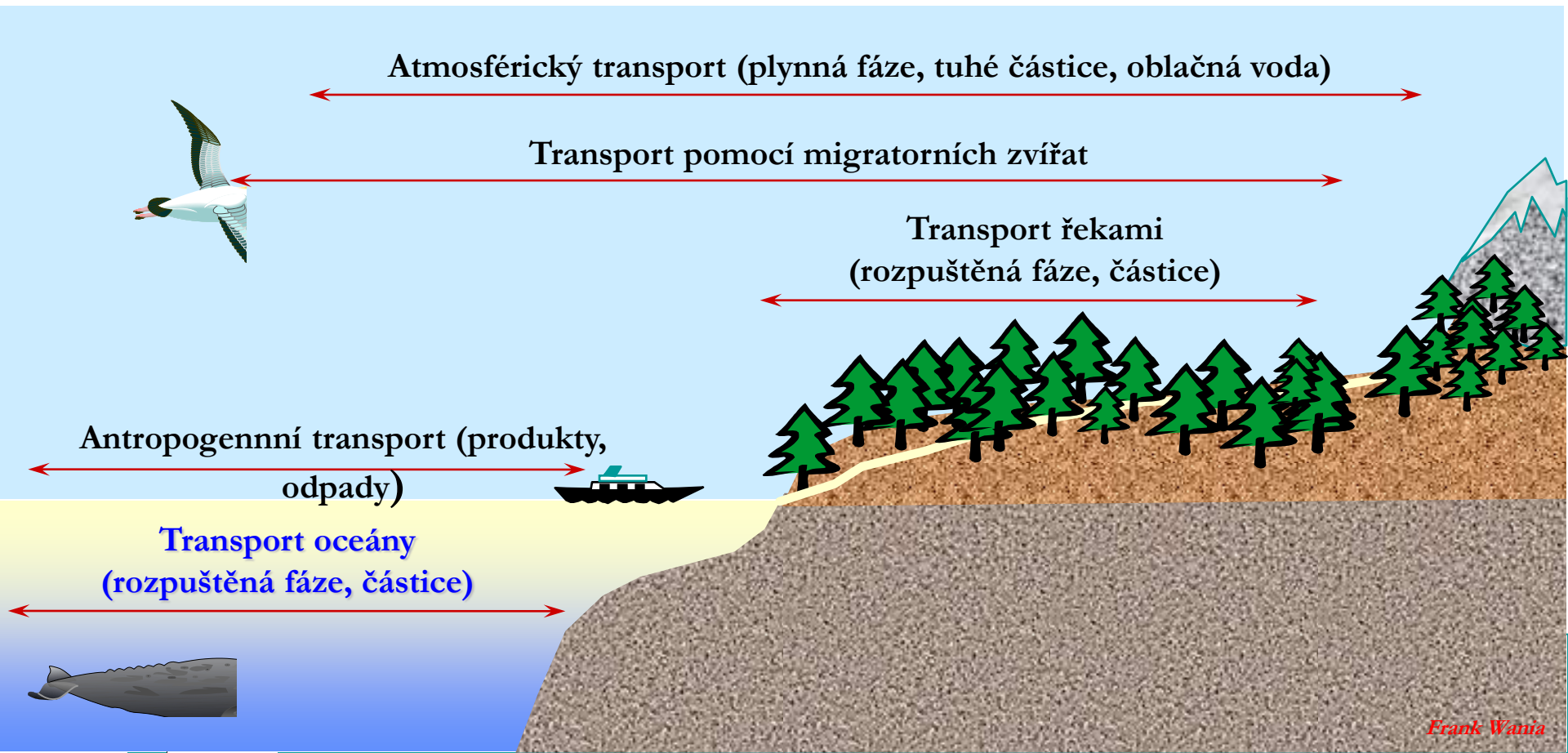
Porozumění mechanismům environmentálního transportu vyžaduje poznat:

- ↪ Spojení, nejlépe kvantitativní, mezi zdroji POPs a expozicí těmito látkami v daném regionu
- ↪ Informace o potenciálním transportu těchto látek z jedné oblasti do druhé (dálkový transport - long range transport)

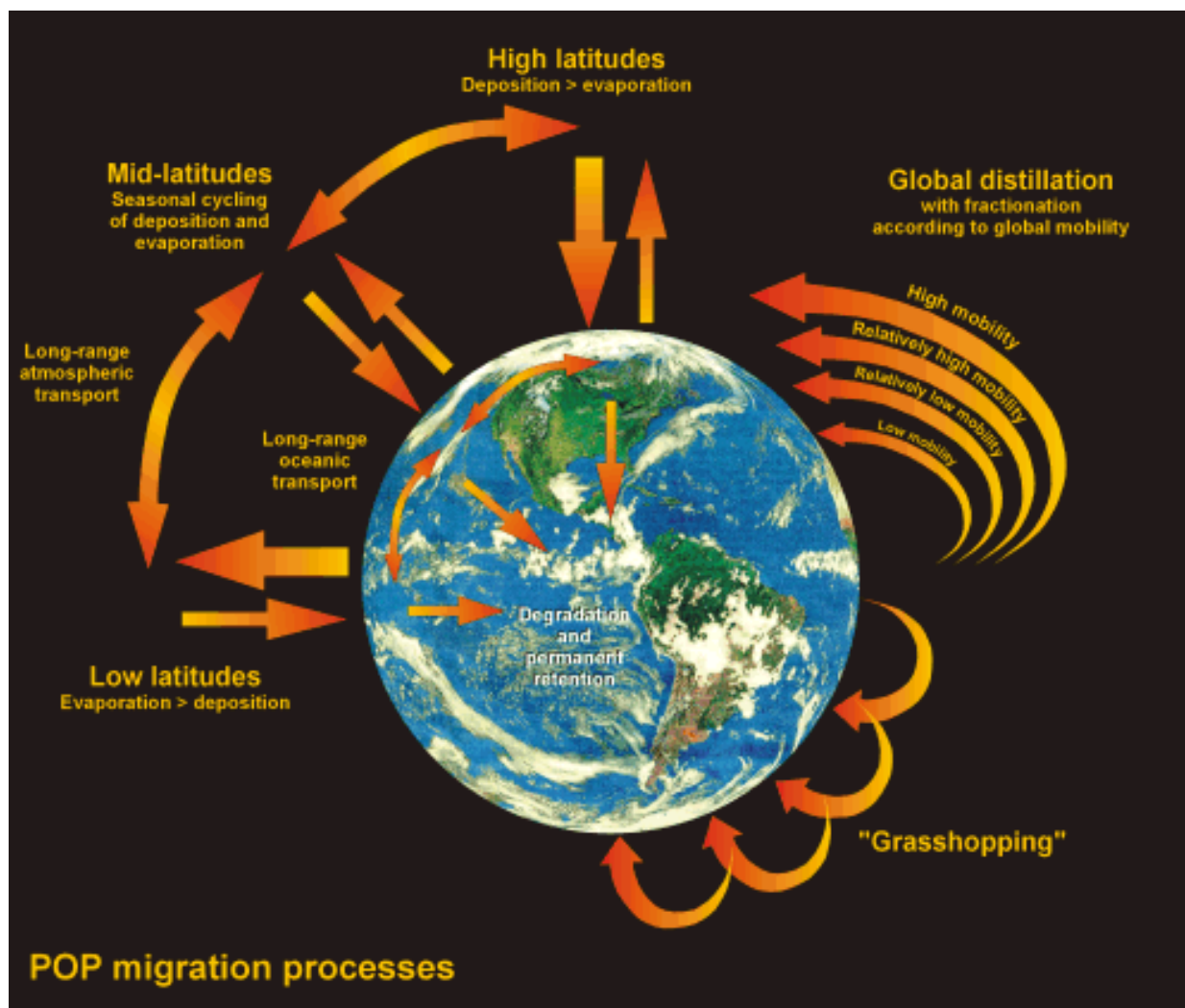


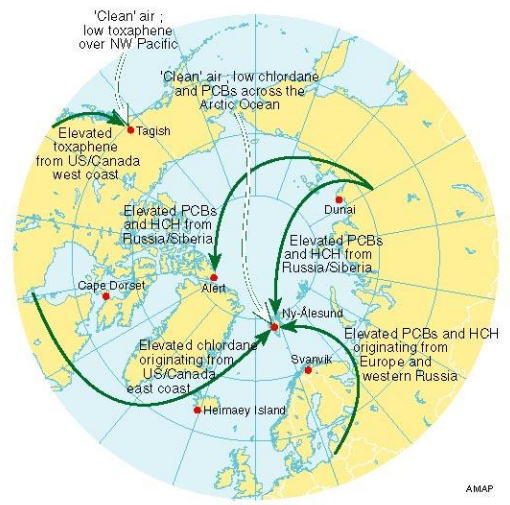
Transportní mechanismy POPs v prostředí

- ↪ persistence zvyšuje svůj relativní význam pro transport ve vztahu k transformacím řídícím osud kontaminantu
- ↪ distribuční charakteristiky vedou k významné přítomnosti v různých environmentálních složkách (ovzduší, voda, půda)

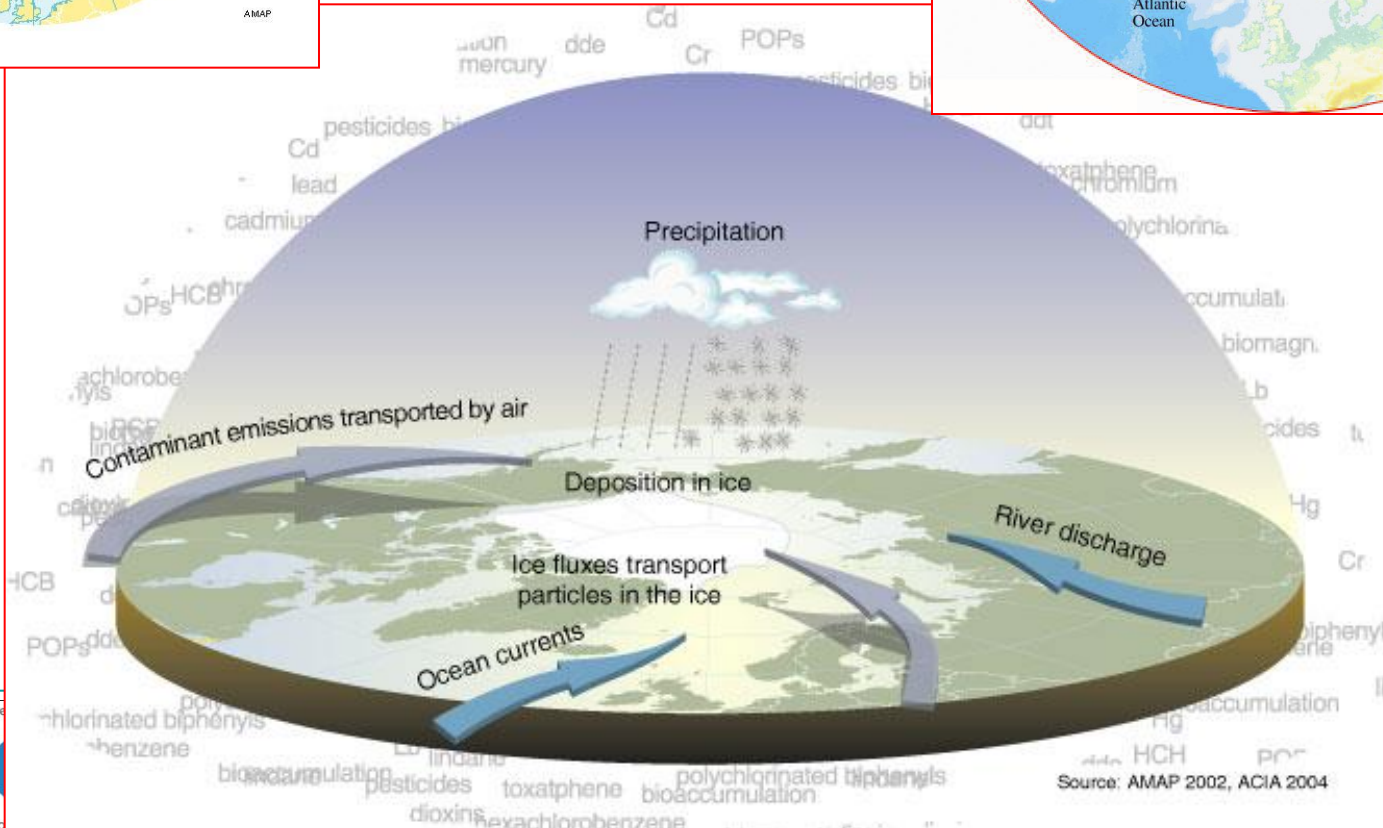


Migrační procesy POPs





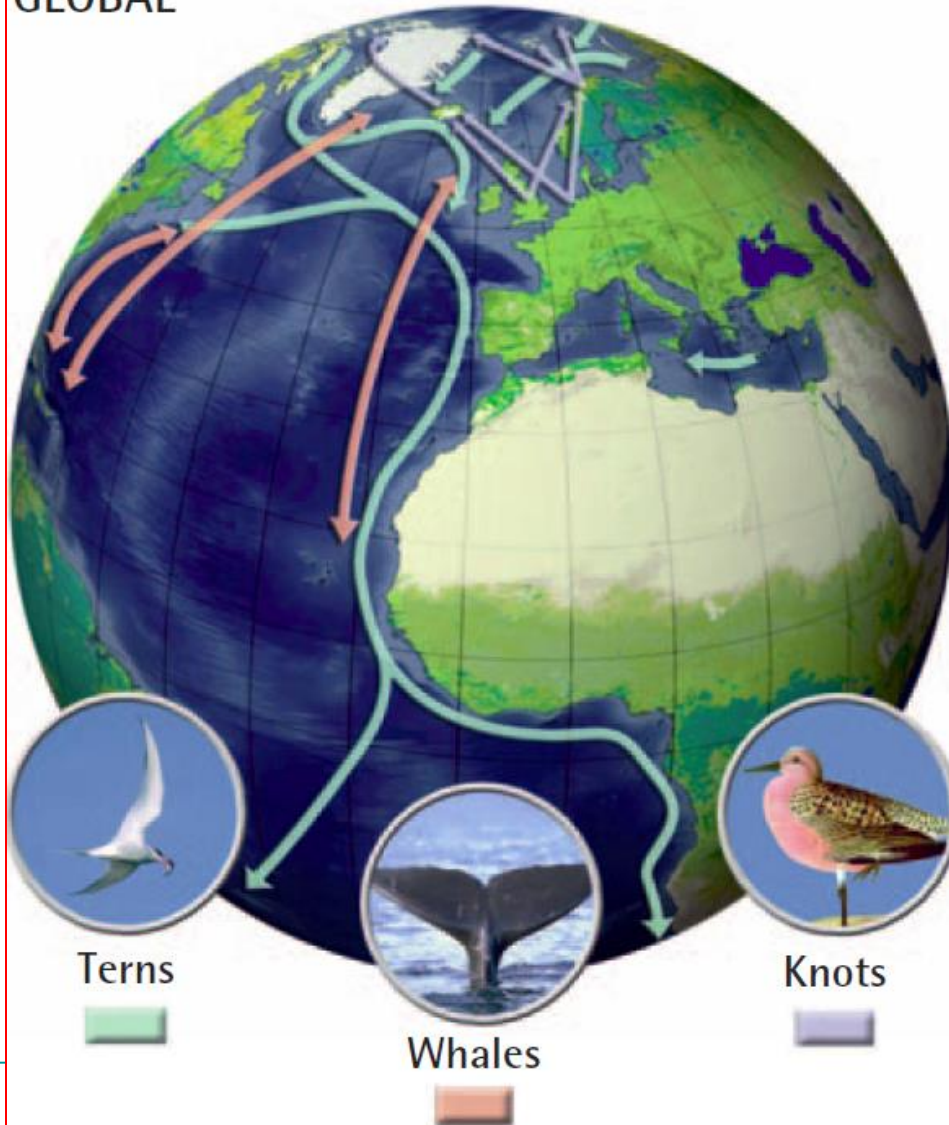
Migrační procesy POPs



Source: AMAP 2002, ACIA 2004

Migrační procesy POPs

GLOBAL



Terns

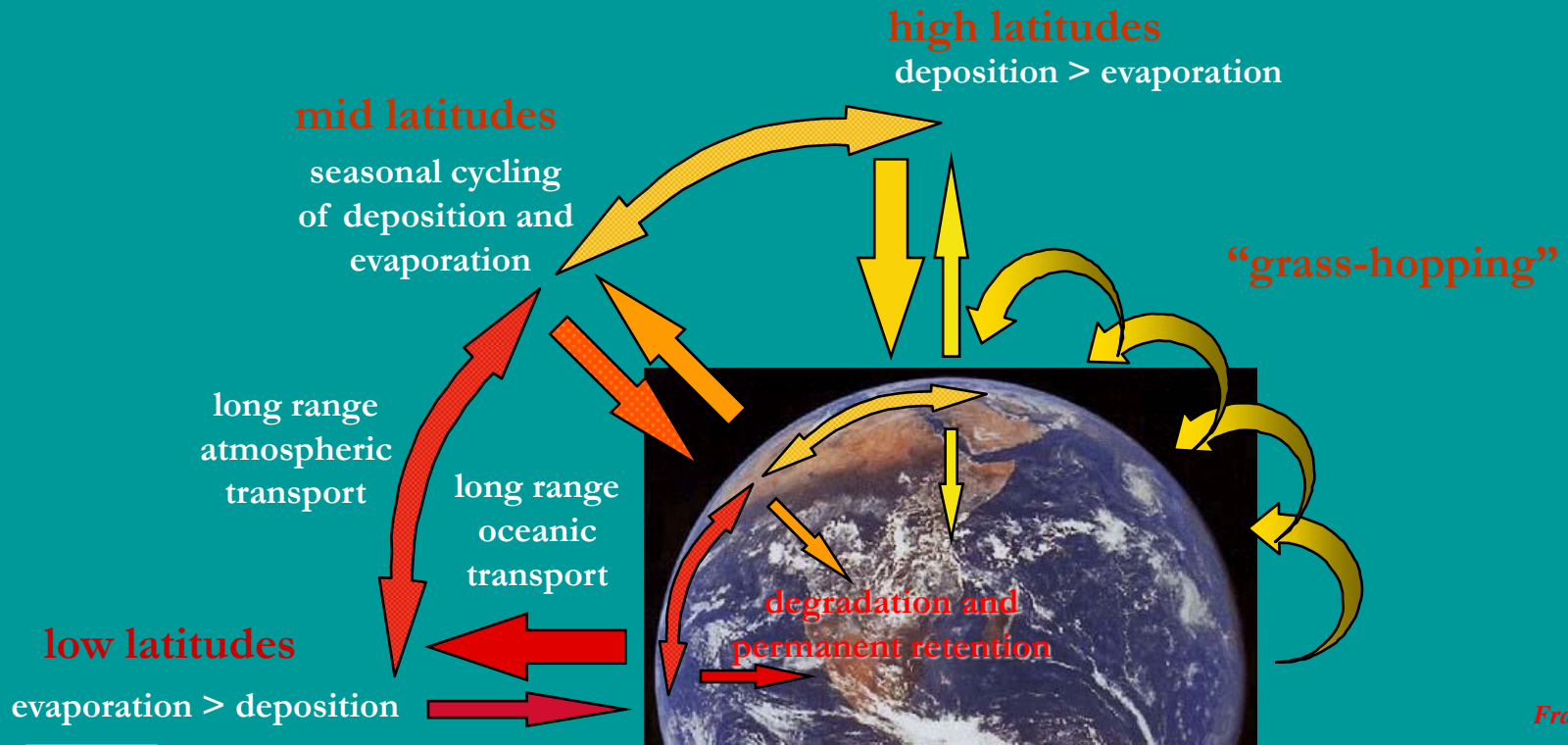
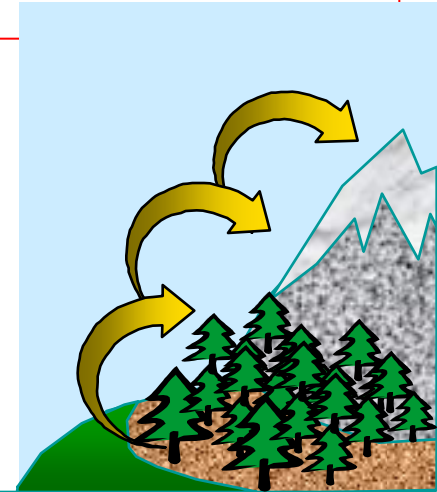
Whales

Knots

LRT chování „Multi-Hop“ POPs (HCB)

Protože rychlosti depozice a vypařování jsou teplotně závislé, poskakování (hopping) je řízeno sezónními, periodickými teplotními změnami

Teplotní gradienty jsou v prostoru v kombinaci s atmosférickým mísením a zajišťují přednostní transport z teplejších do chladnějších regionů na globální i regionální úrovni



Transportní mechanismy ve vodě rozpustných POPs

Chemické látky rozpustné ve vodě zůstávají ve vodné fázi, to znamená, že například těkání není uvažováno jako významný mechanismus dálkového transportu

Účinný LRT vodami vyžaduje vysokou persistenci ve vodě



Transportní chování POPs v různých regionech

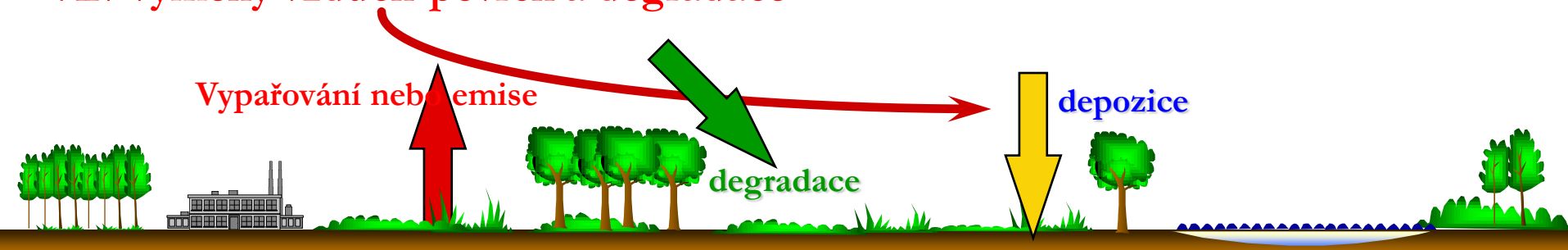
Zatímco relativní význam různých transportních mechanismů se může lišit pro jednotlivé regiony, **základní mechanismy a principy LRT jsou platné globálně.**

Rozdíly v transportním chování mezi jednotlivými regiony jsou způsobeny variacemi:

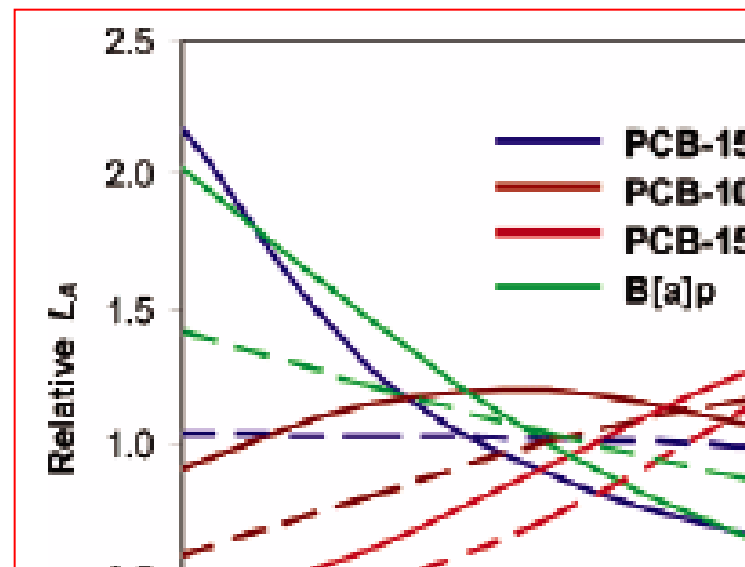
- ↙ **Klimatu (teplota, srážky, rychlost větru, variabilita)**
- ↙ **Vzdušných a oceánických proudění**
- ↙ **V pokrytí povrchu (distribuce země/oceán, pokrytí zemského povrchu, topografie)**
- ↙ **Charakteristik hydrologického cyklu**

Region-specific effects on atmospheric transport

Vliv výměny vzduch-povrch a degradace



- ↪ **Atmosférická degradace** vzrůstá s koncentrací OH radikálů
- ↪ **Atmosférická depozice** vzrůstá s vyšší rychlostí srážek, nižší teplotou, vyšší zátěží atmosférickými částicemi, vyšší rychlost větru a atmosférické turbulence, vysoká retenční kapacita a drsnost povrchu
- ↪ **Vypařování** vzrůstá s vyšší teplotou, vyšší rychlostí větru, snížením retenční kapacity povrchového materiálu



Potenciál pro atmosférický transport v regionech

Nižší zeměpisné šířky

Pro POPs, které reagují rychle s OH, atmosférický LRT je v nižších zeměpisných šířkách zcela omezen. Látky přežívající déle atak OH radikálu za koncentrací v nižších zeměpisných šířkách, mohou mít vysoký potenciál pro rychlé cykly opakovaných skoků.

Střední zeměpisné šířky

Pokud je LRT limitován účinnou degradací (relativně reaktivní, relativně těkavé) atmosférický LRT je vyšší v zimě, zatímco pro látky, u kterých je LRT limitován účinnosti depozice (relativně pomalé reakce, semi-volatilní) nastane opačný případ.

Vyšší zeměpisné šířky

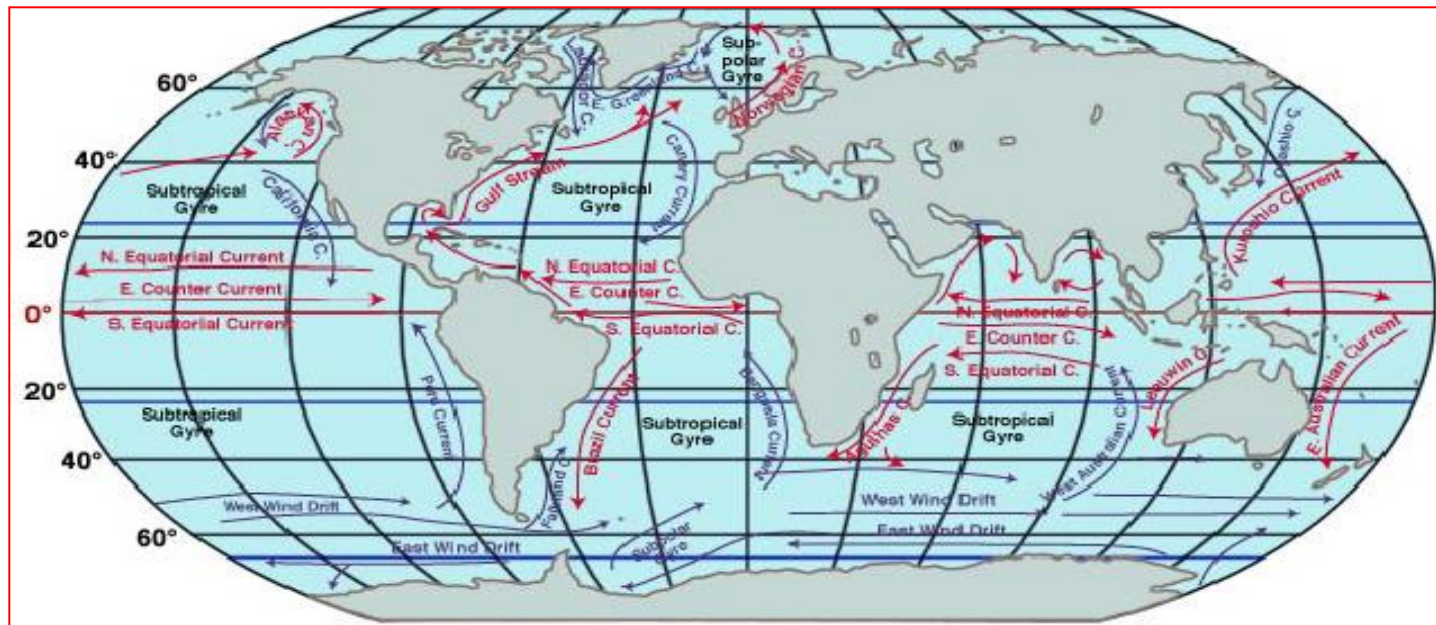
Nízký potenciál pro vypařování (nízká T, pokrytí sněhem/ledem), nízká degradace (tma, zima) a depozice (malé srážky, omezené množství aerosolů, silná stratifikace)



Region-specifické vlivy na oceánický transport

Vlivy oceánických proudů

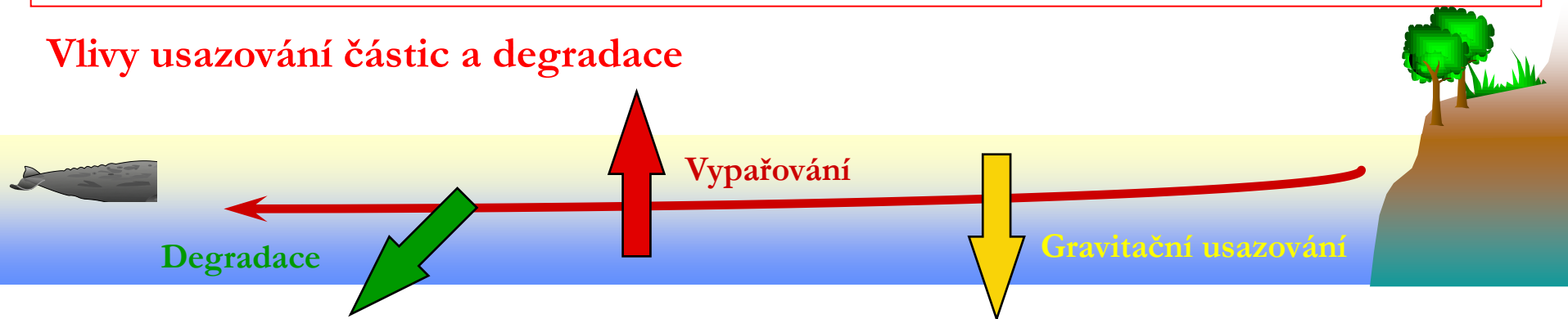
Regionálně, v povrchových vrstvách oceánů jsou řízen geostrofickými větry



- ↪ Existují velmi omezené experimentální důkazy pro mořský transport POPs v nižších zeměpisných šířkách
- ↪ Množství důkazů velkoplošného transportu HCHs v severních vodách

Region-specifické vlivy na oceánický transport

Vlivy usazování částic a degradace



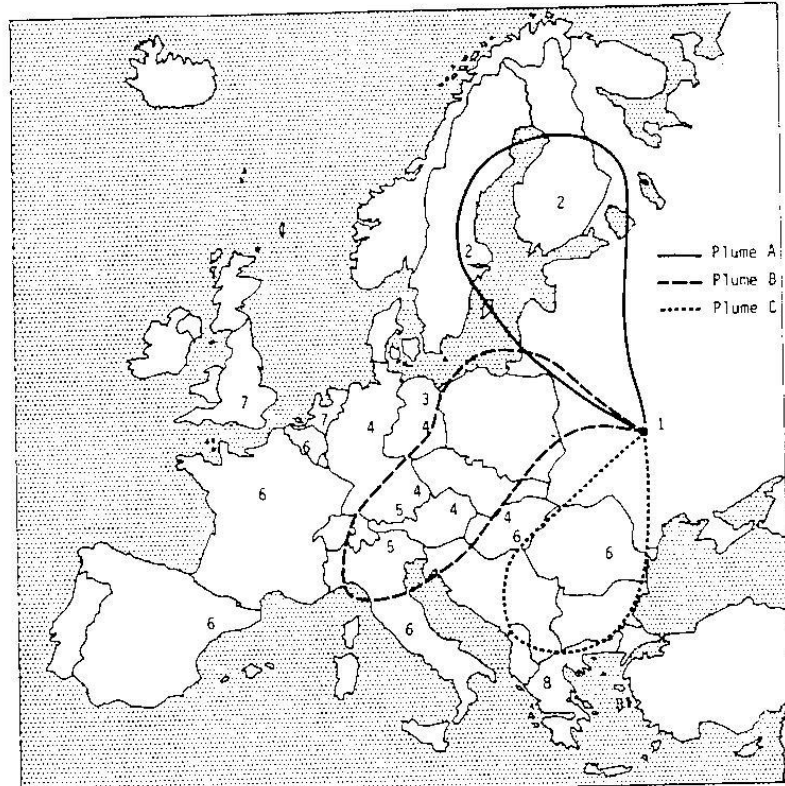
- ↪ **Degradace v oceánické vodě** je závislá na teplotě (hydrolýza), přítomnosti a aktivitě mikroorganismů (biodegradace), a intenzitě slunečního záření (fotooxidace). To předpokládá, že degradace je pomalejší ve vyšších zeměpisných šířkách a vyšší v teplejších, slunečných mořích s vysokou biologickou aktivitou.
- ↪ **Gravitační usazování** závisí na mořské biologické produktivitě a je vyšší v pobřežních mořích a zálivech.

Oceánický LRT je nejvýznamější ve vyšších zeměpisných šířkách, protože nízký výpar z vody, pomalé degradační rychlosti a omezené gravitační usazování budou zvyšovat dobu zdržení POPs v chladných povrchových vodách.

Region-specifické vlivy transportu řekami

- ↪ **Rozpustnost ve vodě mnoha POPs je příliš malá pro významný transport řekami v rozpuštěné fázi**
- ↪ **Transport málo rozpustných POPs je pak závislý na transportu koloidních nebo suspendovaných částic sedimentů**
- ↪ **Závisí na hydrologickém režimu a charakteristikách povodí (relief, geologie, vegetační kryt a klima)**
- ↪ **Vysoké zátěže řek suspendovanými částicemi sedimentů jsou spojeny s vysokými proudovými podmínkami, v určitých obdobích na intenzitě odtoku a záplavách**
- ↪ **POPs transportované řekami budou eventuálně kontaminovat pobřežní sedimenty**

Transport radionuklidů - Černobyl



Ankunftszeiten nachweisbarer Aktivitäten in der Luft:
1 = 26.4.; 2 = 27.4.; 3 = 28.4.; 4 = 29.4.; 5 = 30.4.; 6 = 1.5.; 7 = 2.5.; 8 = 3.5. (11)

Fig 1: Verhalten der radioaktiven Wolken

