



Centrum pro výzkum
toxických látek
v prostředí

Stabilita a chaos v ekologii

**Inovace a rozšíření výuky zaměřené
na problematiku životního prostředí na PŘF
MU (CZ.1.07/2.2.00/15.0213) spolufinancován
Evropským sociálním fondem a státním
rozpočtem
České republiky**



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Centrum pro výzkum
toxických látek
v prostředí

Látky a stabilita ekosystémů



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

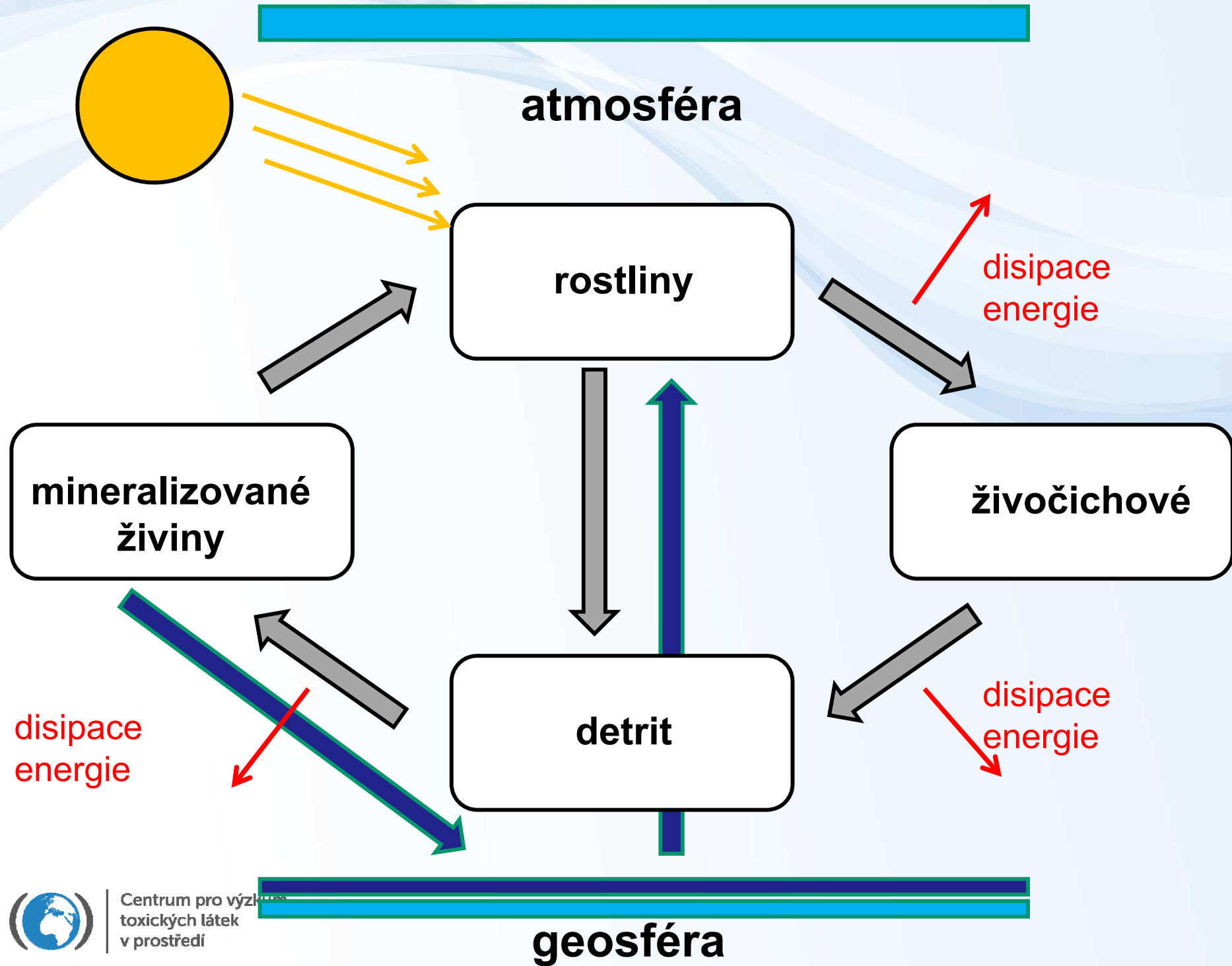


OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

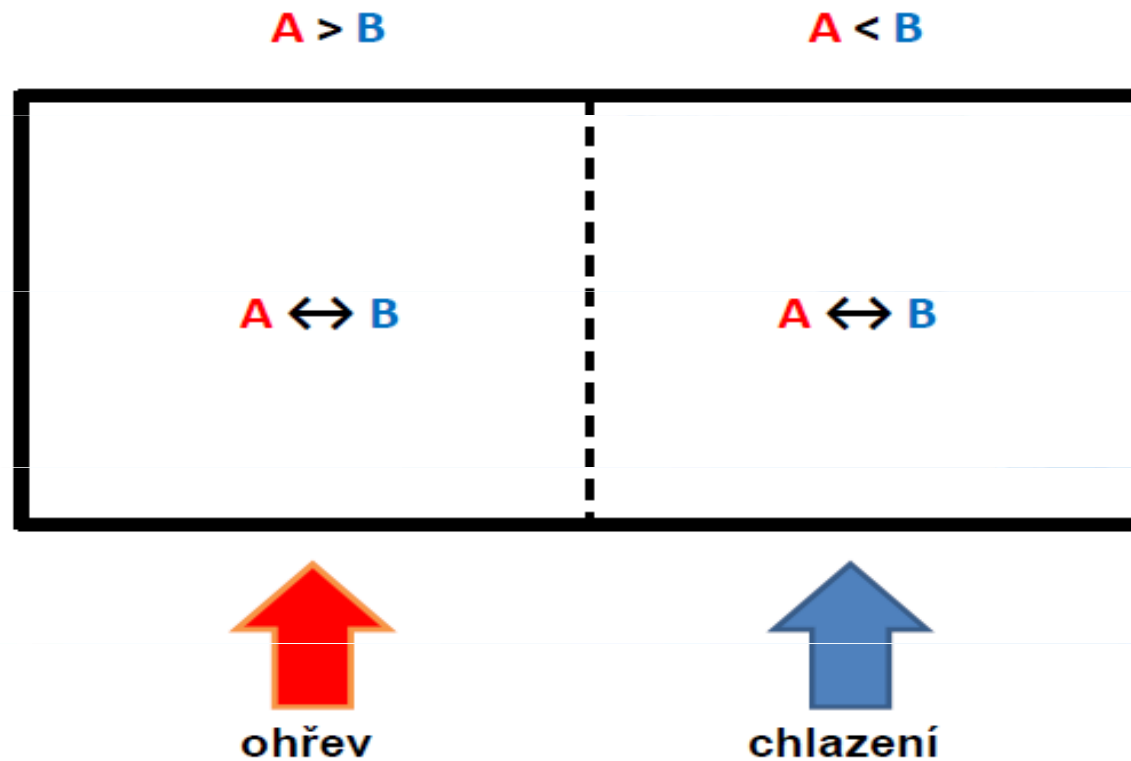


INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Koloběh hmoty v ekosystému: kde má svůj původ?



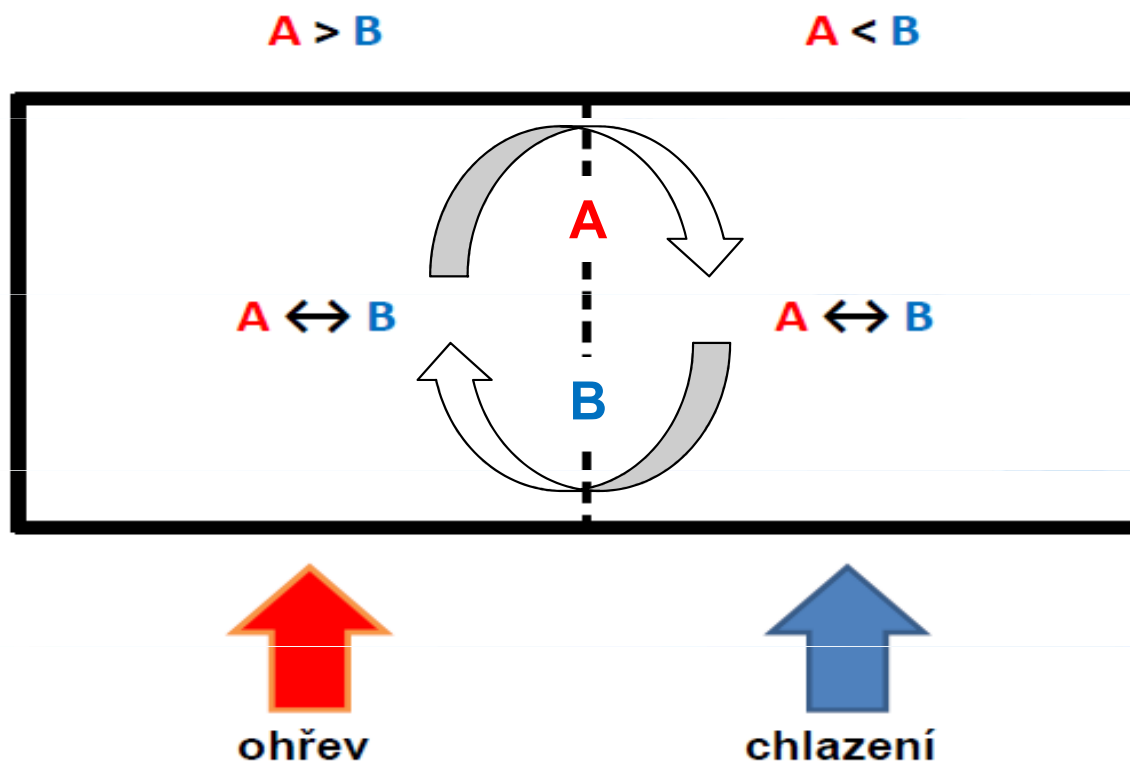
Vznik koloběhu hmoty u neživého systému s gradientem...



komora s propustnou membránou a rovnovážnou reakcí v plynném stavu:



Vznik koloběhu hmoty u neživého systému s gradientem...



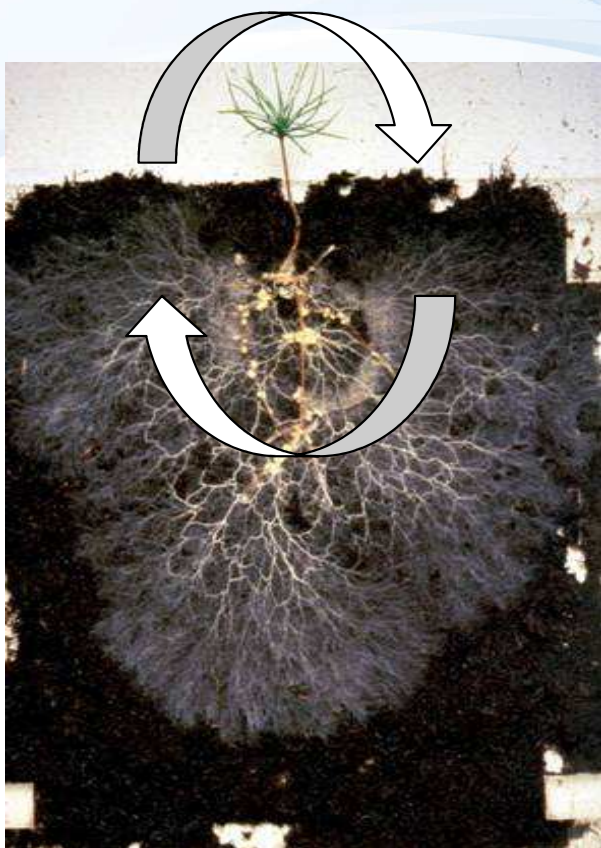
komora s propustnou membránou a rovnovážnou reakcí v plynném stavu:



vznik koloběhu hmoty

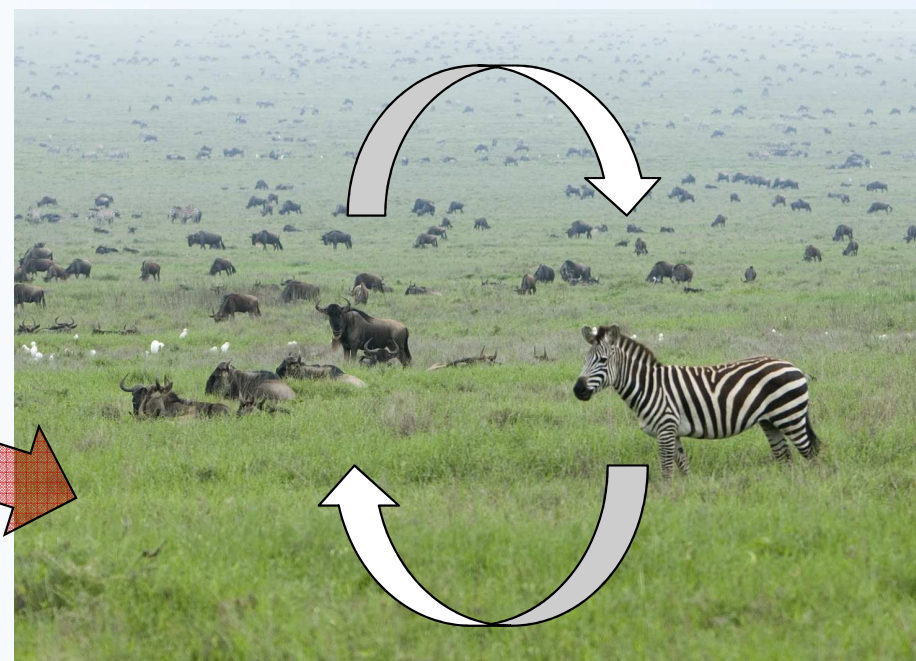


Vznik koloběhu prvků a evoluce?: příklady

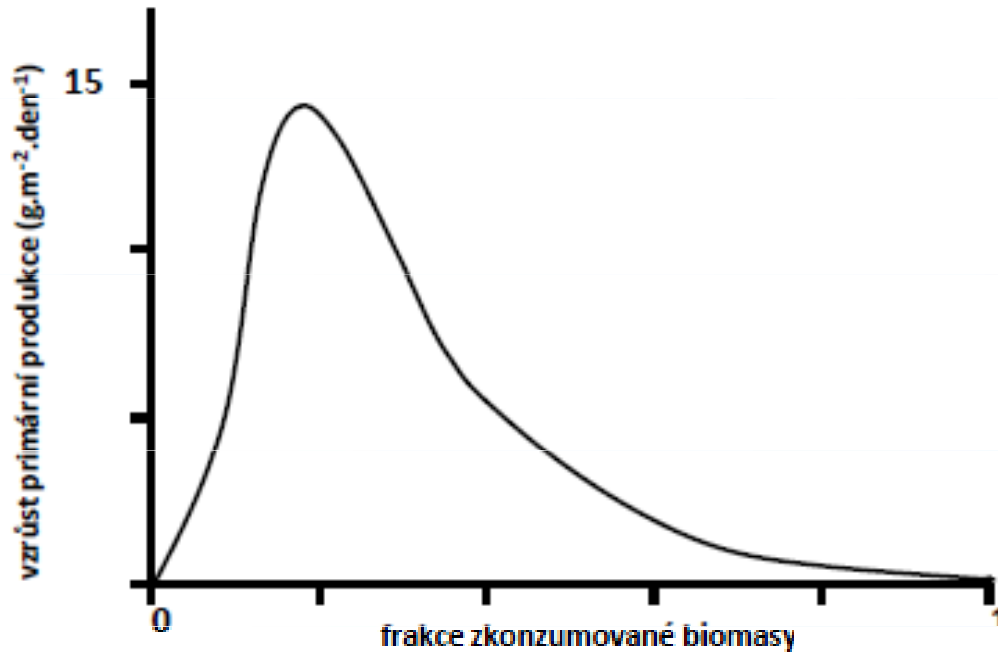


mykorhizní
symbióza

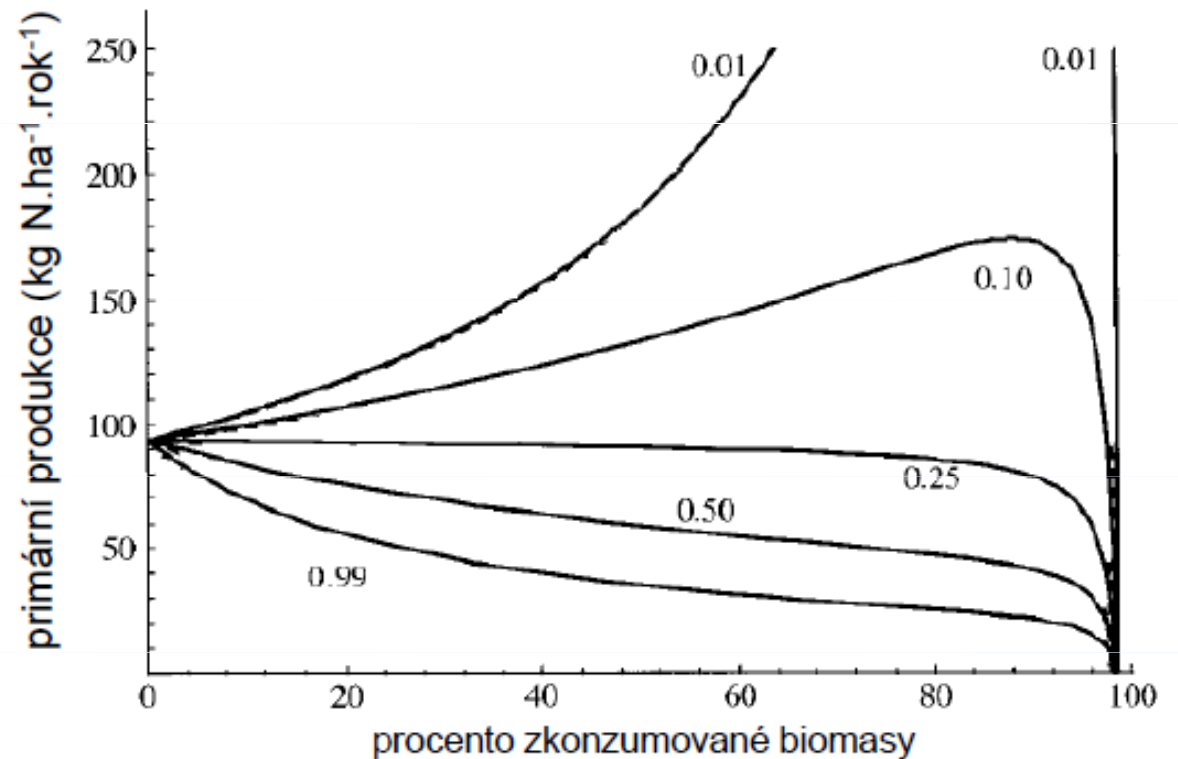
ekosystém
savany v
Serengeti



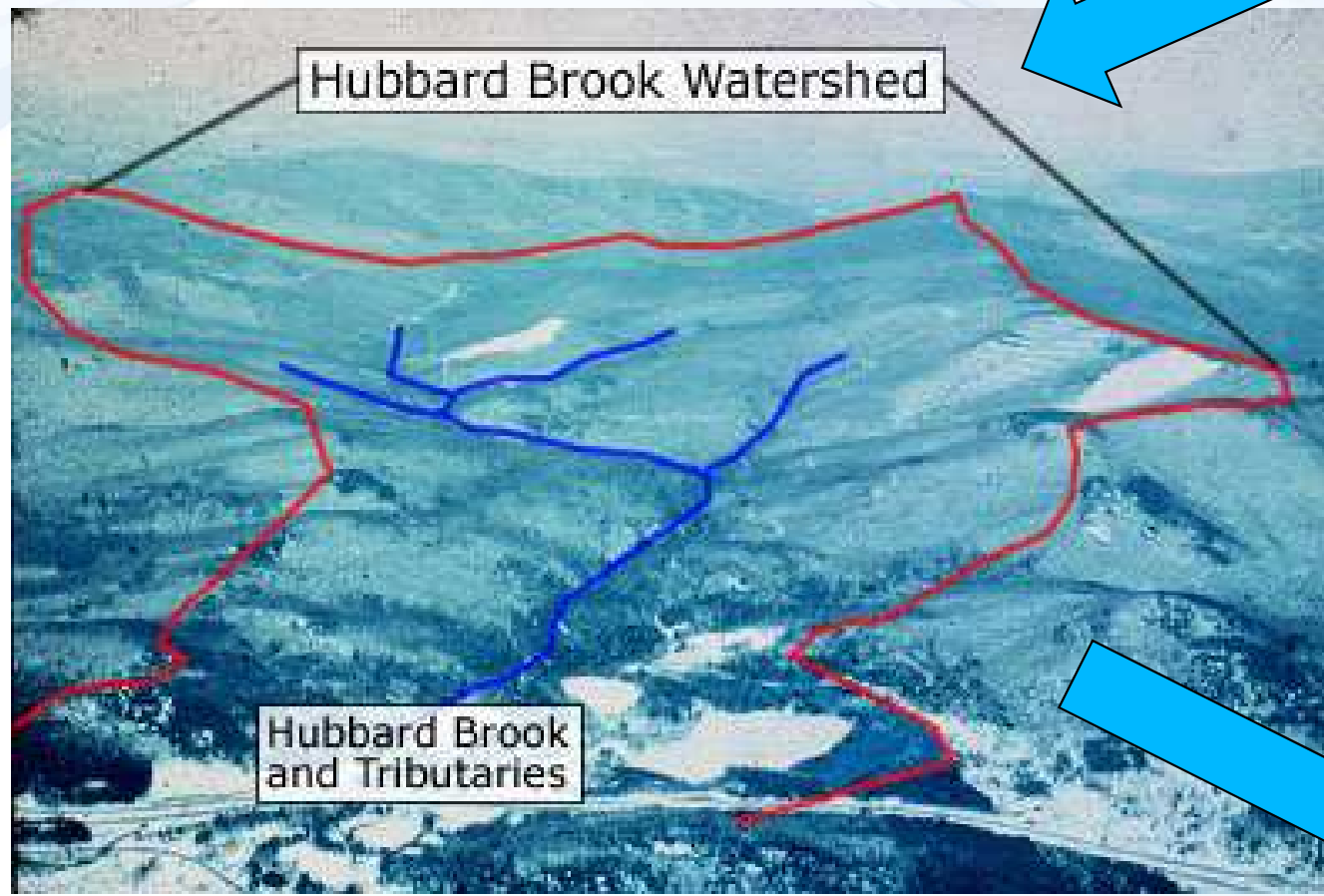
ekosystém Serengeti: vztah herbivor-primární producent



přímá predace a
nepřímý mutualismus
zprostředkovaný právě
přes cyklus hmoty



Hubbard Brook experiment



vstupy

výstupy



Stanovení látkových bilancí přineslo následující zjištění:

Ve většině případů převyšoval výstup živin toky vstupy ze srážek. Zdrojem přebytků je matečná hornina, které větrá a půdy, kde dochází k vymývání.

Vstupy a výstupy živin jsou nepatrné ve srovnání s množstvím naakumulovaným v biomase i ve srovnání s množstvím recyklovaným v rámci systému.

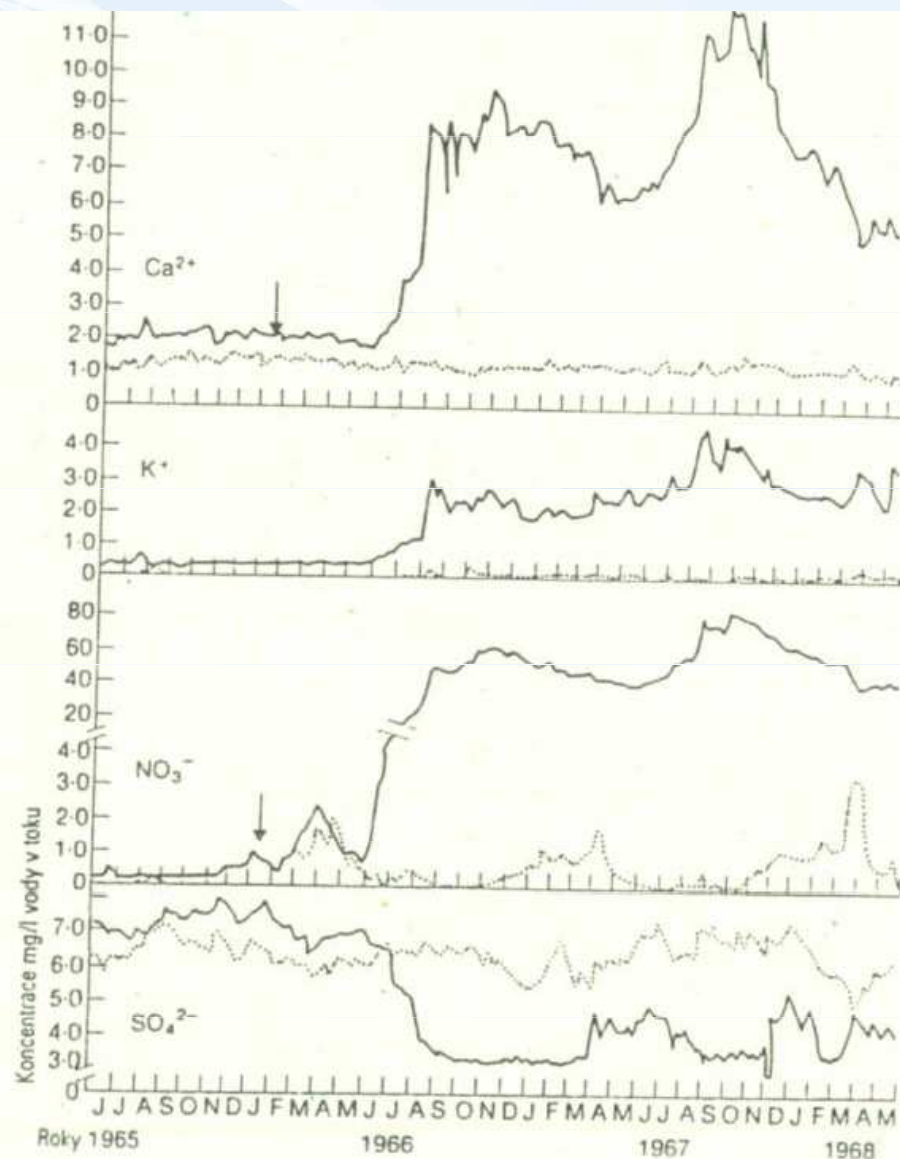
Např. z netknutého povodí odcházejí tokem ve víceletém průměru jen 4 kg/ha dusíku, což je jen 0,1% celkového dusíku poutaného v živé a odumřelé hmotě uvnitř ekosystému. Relativně vysoká úroveň recyklace je pravidlem i u ostatních živin.



Velkoplošný experiment: smýcení části porostů (16 ha)

V následujících letech přesahovaly výstupy anorganických substancí z tohoto povodí 13 krát hodnoty z kontrolního povodí:

- Mg^{2+} 5 násobný vzestup
- Ca^{2+} 7 násobný vzestup
- K^+ 14 násobný vzestup
- NO_3^- 60 násobný vzestup



Vysvětlení

Odlesnění přerušilo recyklaci živin uvnitř ekosystému.

Živiny z dekompozitory rozložené biomasy jsou ve fungujícím ekosystému velkou měrou opět využity, především primárními producenty, k čemuž ve zdevastovaném systému nedochází, zde jsou takto uvolněné živiny naopak vymývány do podzemních vod.

Zničení evapotranspiračního proudu zvýšilo množství vody protékající půdou a došlo tedy ke zvýšenému vyluhování půdy i půdotvorného substrátu.

Jediný iont, u něhož byl v experimentálním povodí pozorován pokles je SO_4^{2-}

Ve zdravém ekosystému neexistují významné mechanismy retence pro přebytky síry, naopak u dusíku tyto mechanismy existují.

stabilní terestrický ekosystém se tedy projevuje vysokou mírou recyklace živin, které mohou limitovat jeho existenci



Indikátory stability založené na biogeochemických cyklech prvků ?

Charakter hlavních biogeochemických cyklů živé hmoty

Prvek	Hlavní vstup do ekosystému	Hlavní zásobník uvnitř ekosystému	Hlavní výstup z ekosystému
C	jako CO ₂ fotosyntézou z atmosféry	biomasa primárních producentů anebo půdní humus	jako CO ₂ dýcháním do atmosféry
O	z atmosféry	vzduch	fotosyntézou do atmosféry
H ₂ O	atmosférické srážky	půda	výparem do atmosféry, odtokem
N	mikrobiální fixace z atmosféry	půda (organický N, NO ₃ , NH ₃)	denitrifikací do atmosféry jako N ₂
K, Ca, Mg aj. minerální živiny	srážky z atmosféry větrání hornin	půda rostliny a půda	sklizeň biomasy odtokem v rozpuštěné podobě



Narušení cyklu vody na úrovni krajiny

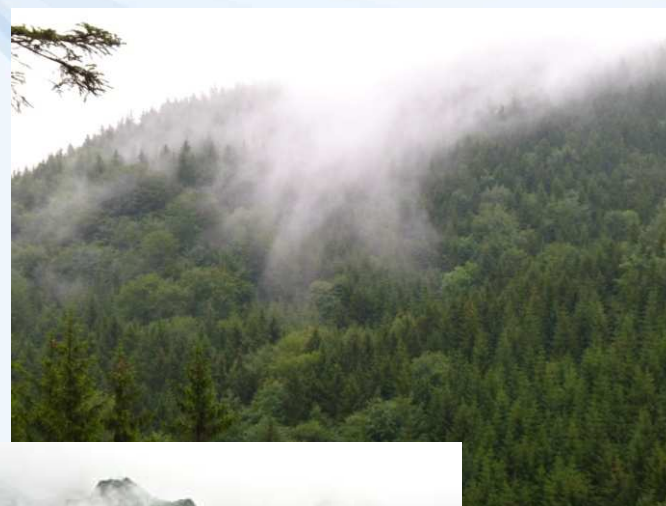
sluneční energie dopadající na **porost** je z velké části spotřebována na energetické krytí transpiračních a evaporačních toků

takto vzniklá pára často opět snadno kondenzuje (stačí mírný pokles teploty)

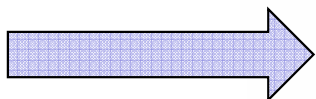
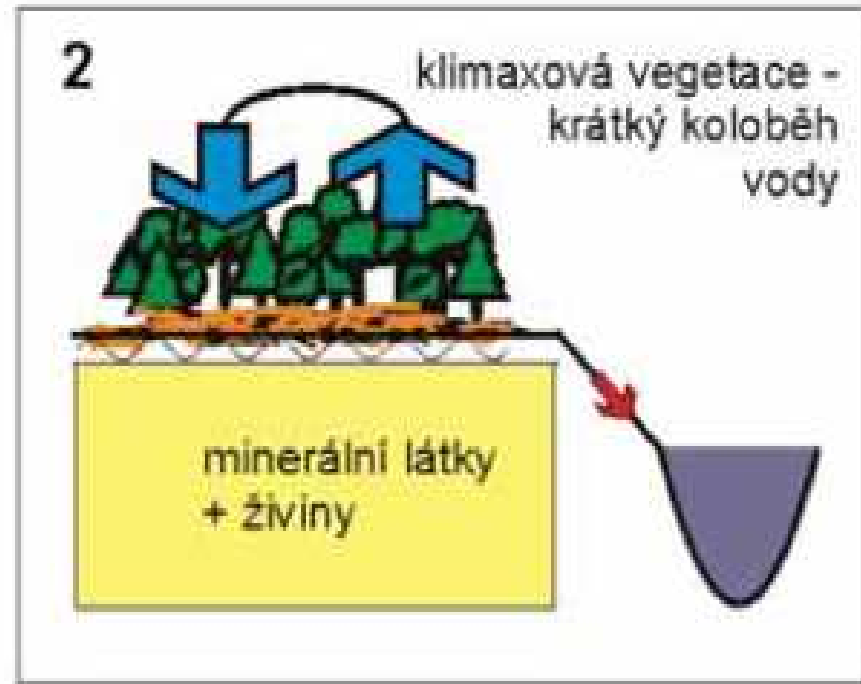
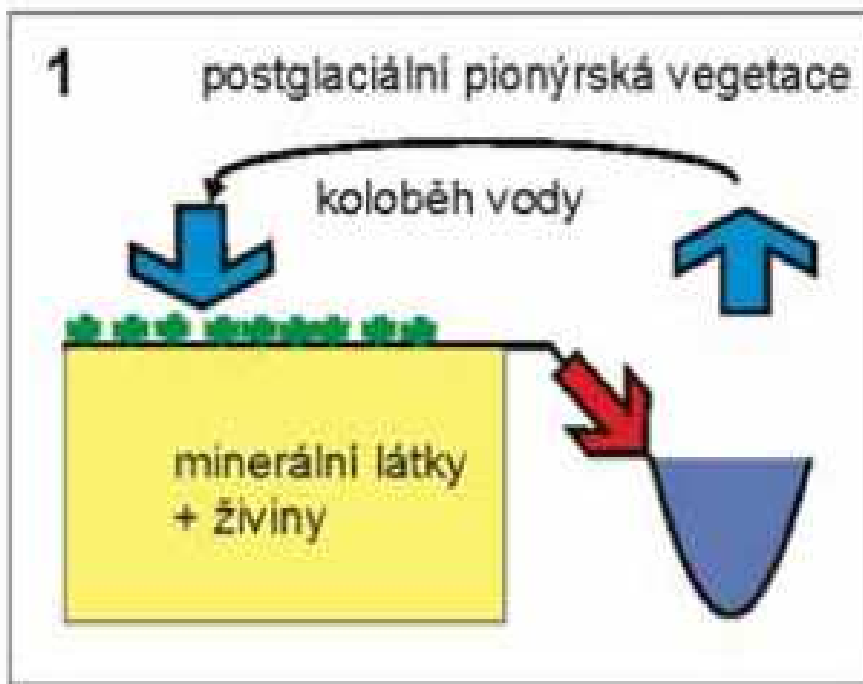


v krajině vzniká tzv. malý cyklus vody

dochází ke stabilizaci teplotního režimu



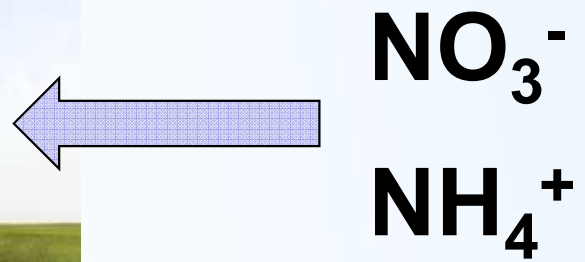
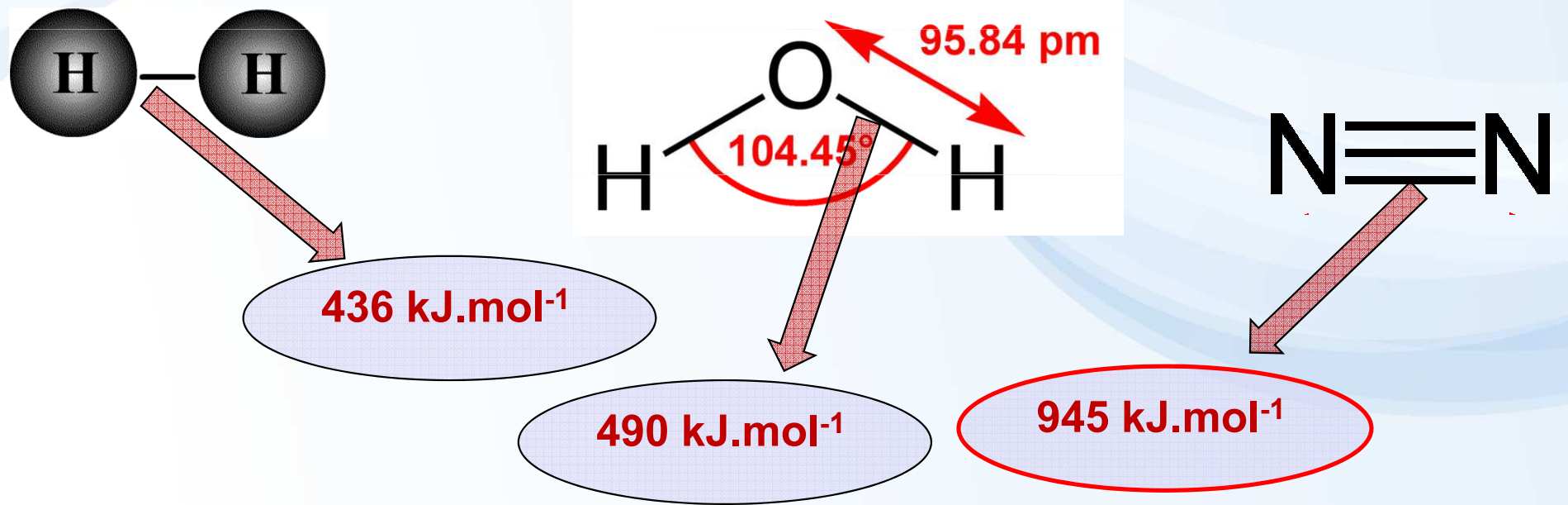
Velké změny ve struktuře krajiny (převod lesů v pole, růst měst a asfaltových či betonových ploch, skladišť, to vše posouvá cyklus vody směrem k cyklu otevřenému, který se přirozeně vyskytoval v postglaciálním období, či v interstadiálech.



eroze, povodně, odnos prvků



Narušení cyklu dusíku na úrovni středoevropských (terestrických) ekosystémů



biologická fixace atmosférického dusíku

nejvýznamnějším zdrojem dusíku pro členy ekosystému je biologická fixace atmosférického dusíku pomocí volně žijících či symbiotických bakterií

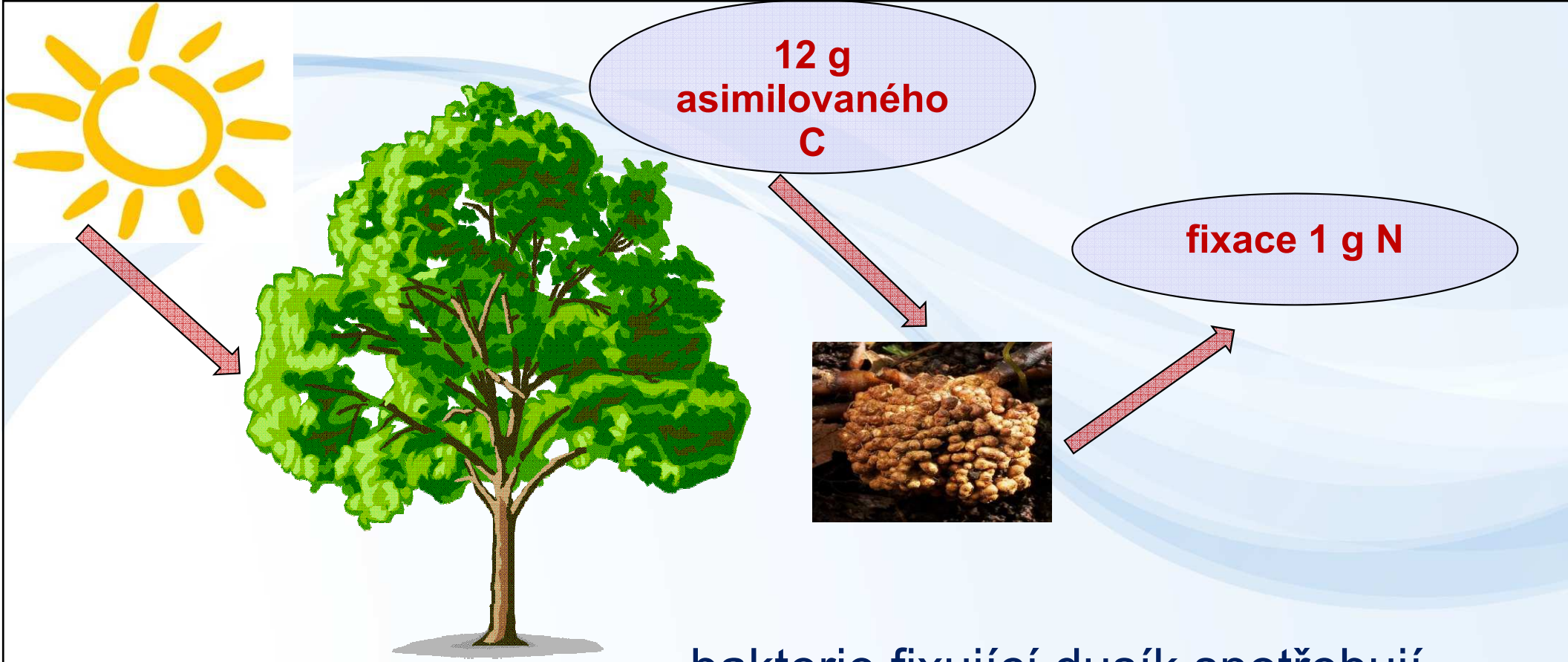


Azotobacter, *Clostridium*, *Rhizobium* (žijí v symbióze s kořínky luštěnin), aktinomycety rodu *Frankia* (půdní symbiotická bakterie více než 200 druhů rostlin, například olše), sinice rodů *Nostoc*, *Anabaema*

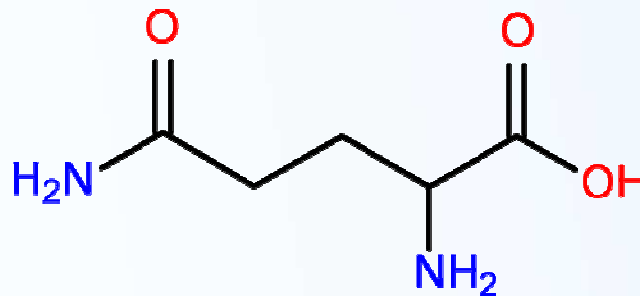
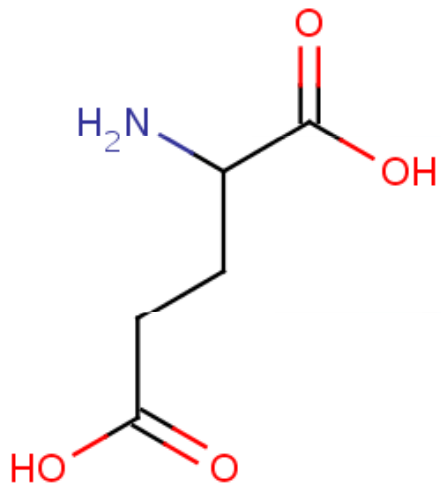


nutné
anaerobní
prostředí

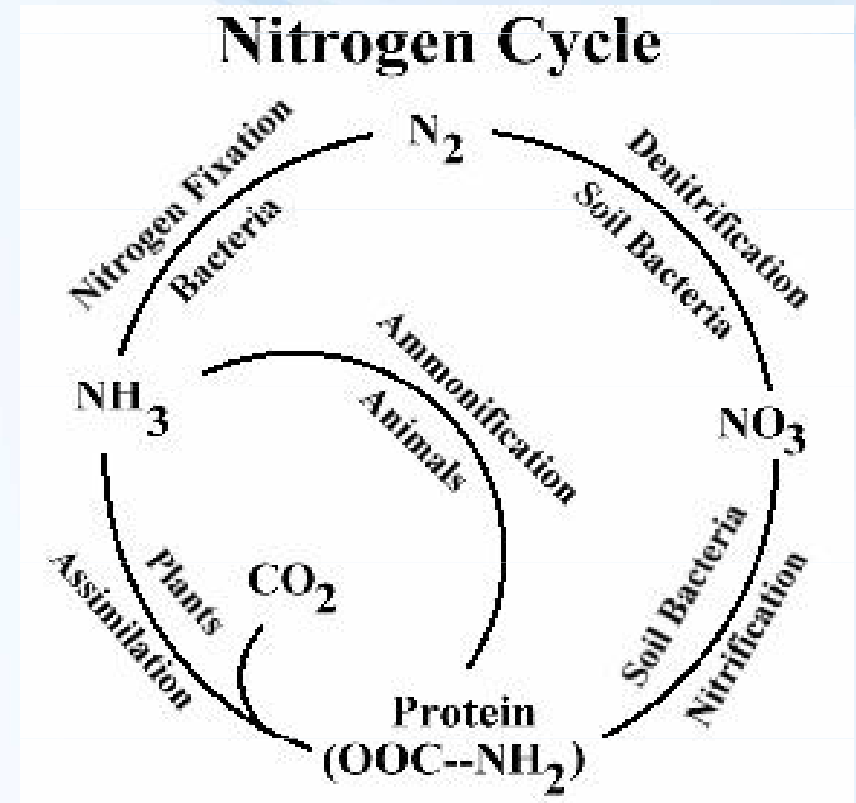
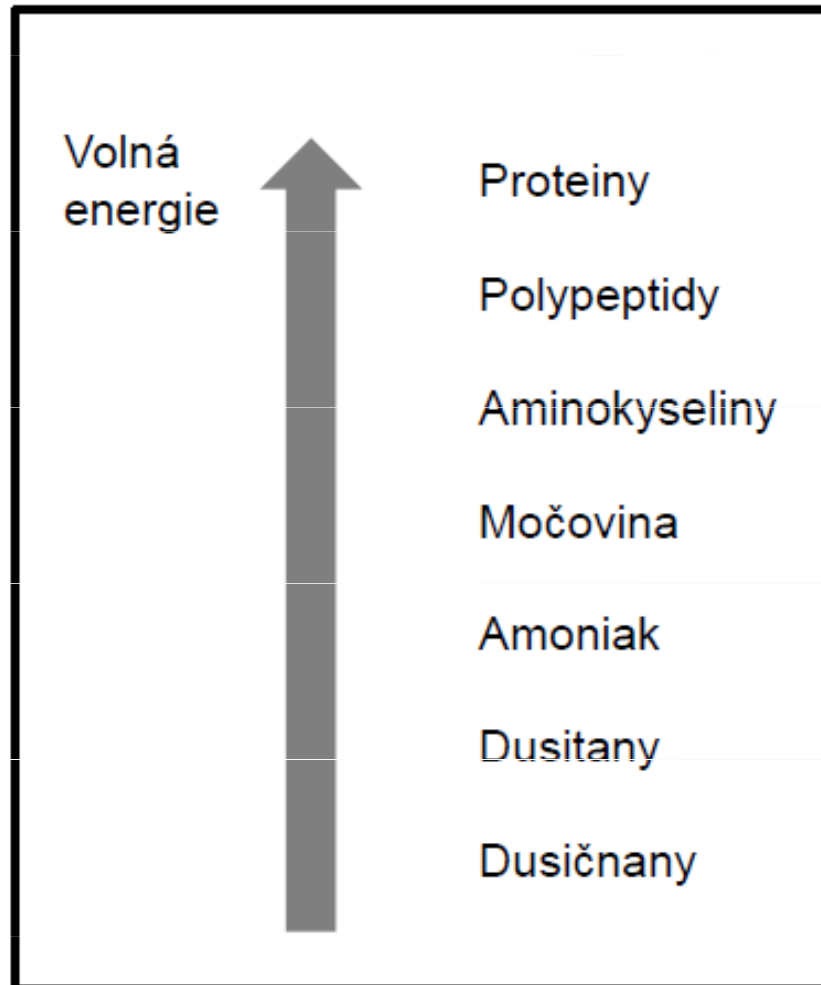




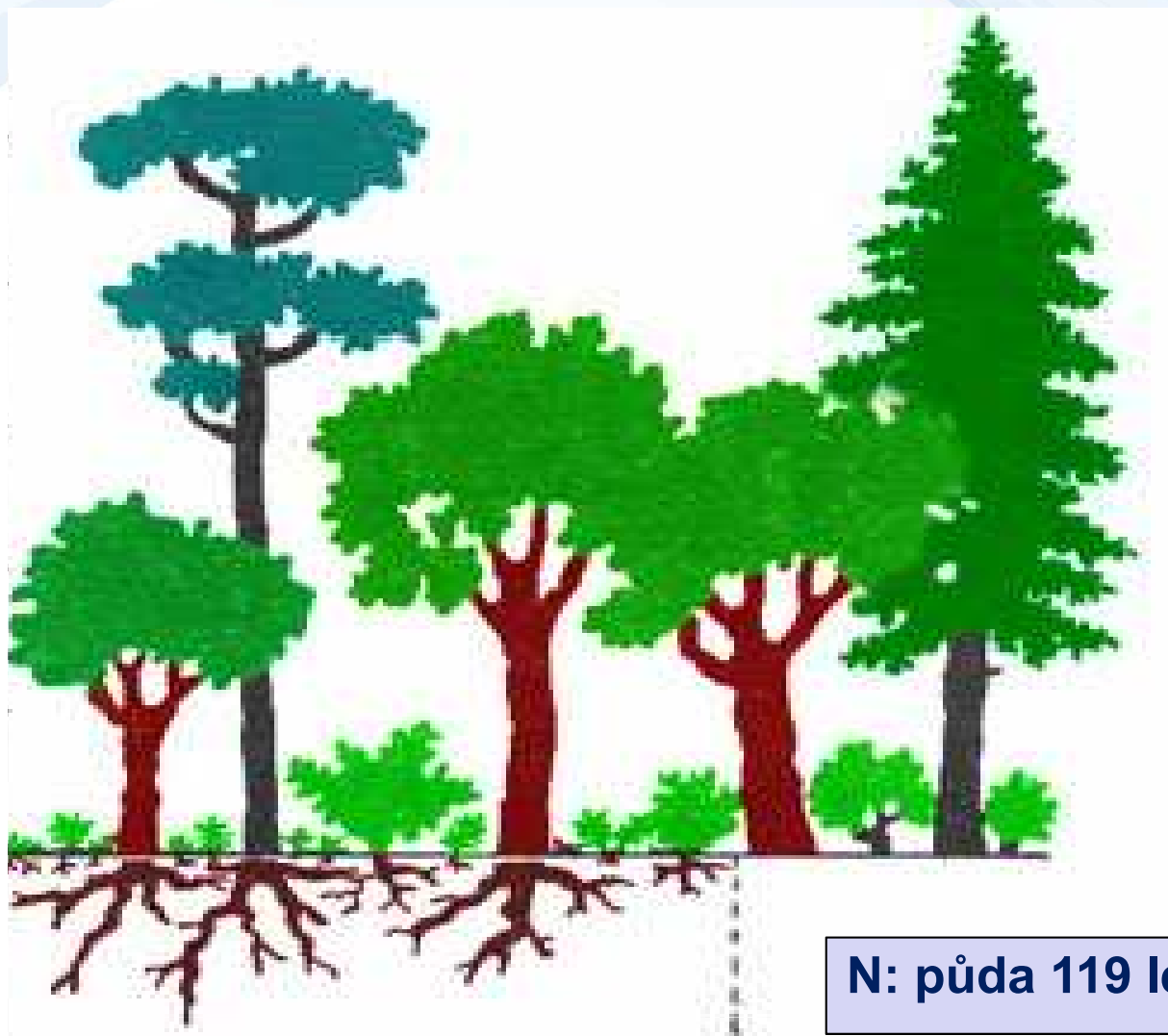
bakterie fixující dusík spotřebují téměř 20% ATP vytvořeného rostlinou, s níž žijí v symbióze



cyklus dusíku



před nástupem průmyslové revoluce byl dusík pro mnoho ekosystémů v prostředí střední Evropy limitujícím prvkem, a proto se v ekosystému v průběhu sukcese vyvinuly mechanismy jeho záchytu



**N: celý ekosystém
1815 let**

**N: biomasa
porostu 88 let**

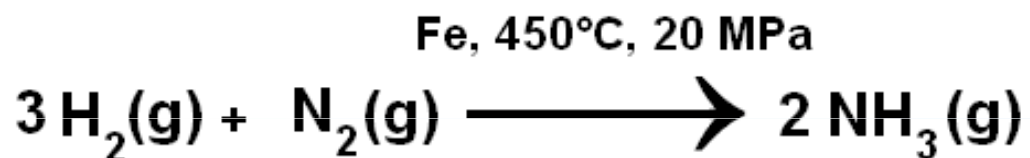
**N: biomasa
opadu 5 let**

N: půda 119 let



Co se změnilo s nástupem průmyslové revoluce?

Haber-Boschova syntéza: v současnosti 12 % globální fixace atmosférického N



spalování fosilních paliv

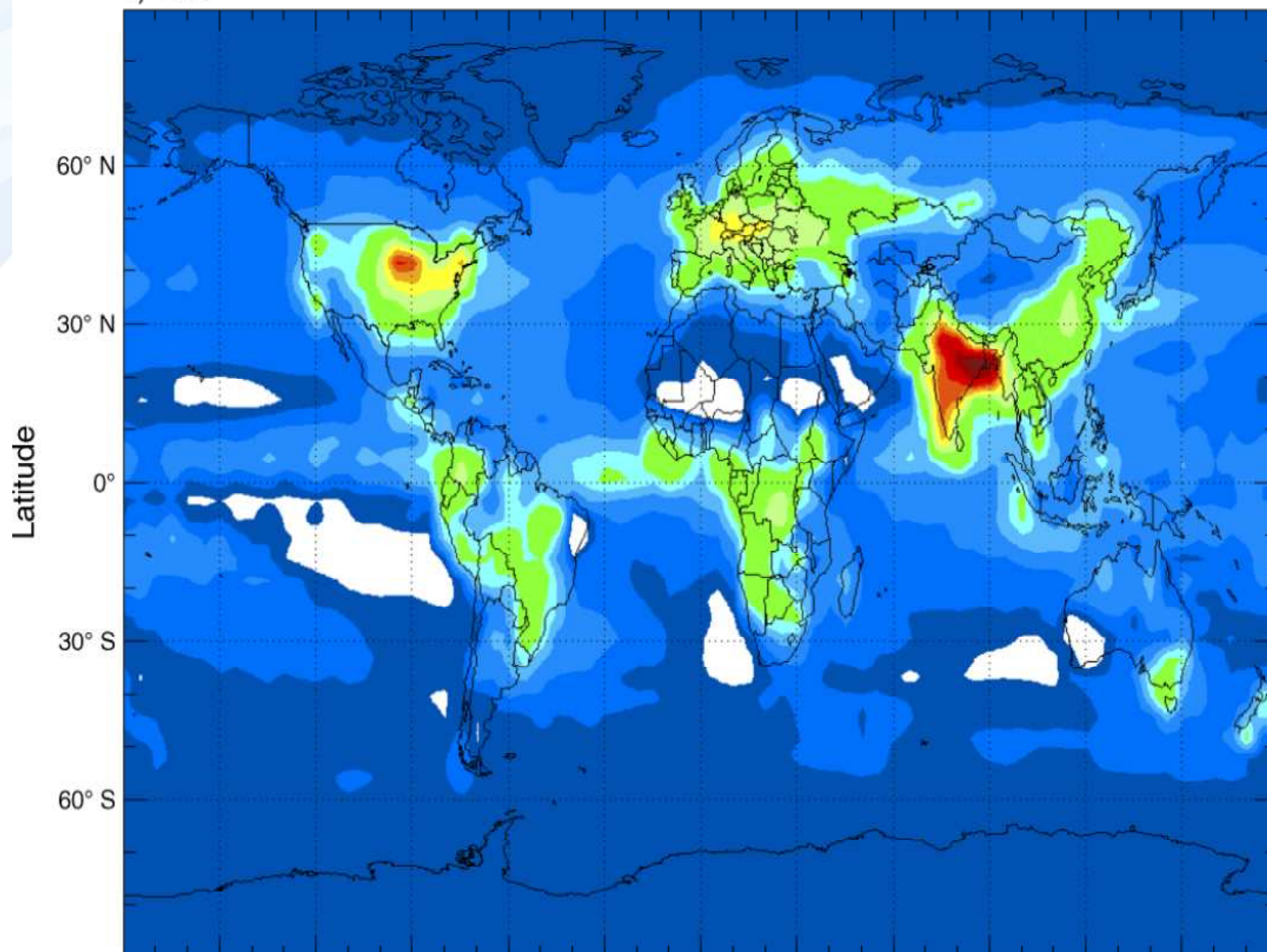


0,1 - 0,7 kg
N.ha⁻¹.rok⁻¹

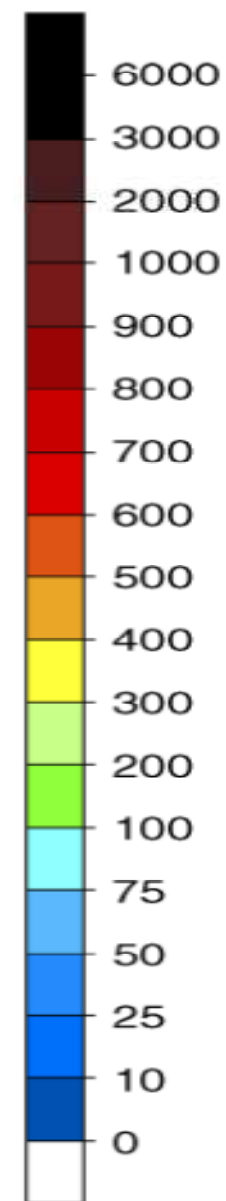
13 - 59 kg
N.ha⁻¹.rok⁻¹



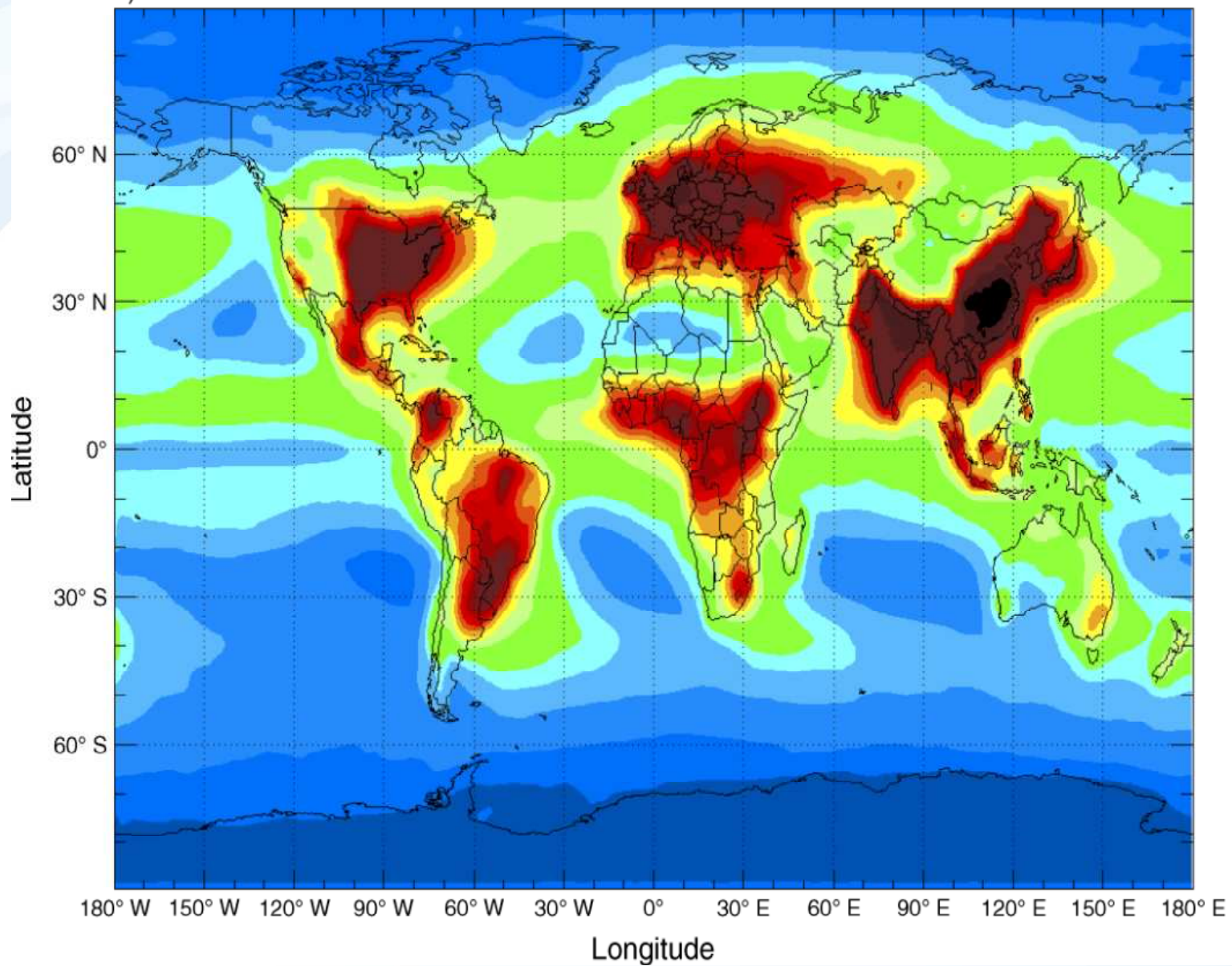
a) 1860



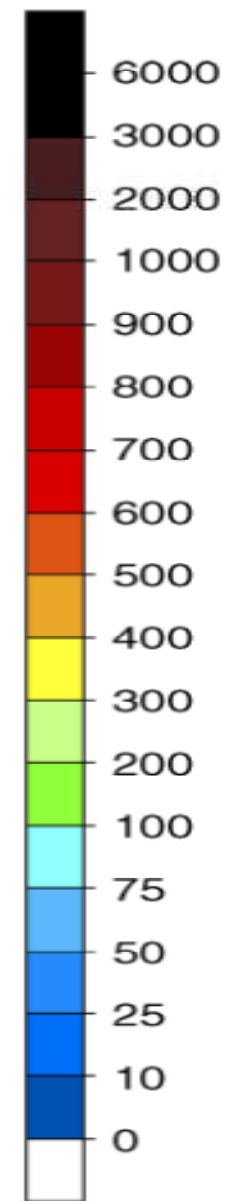
N deposition
($\text{mg N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$)

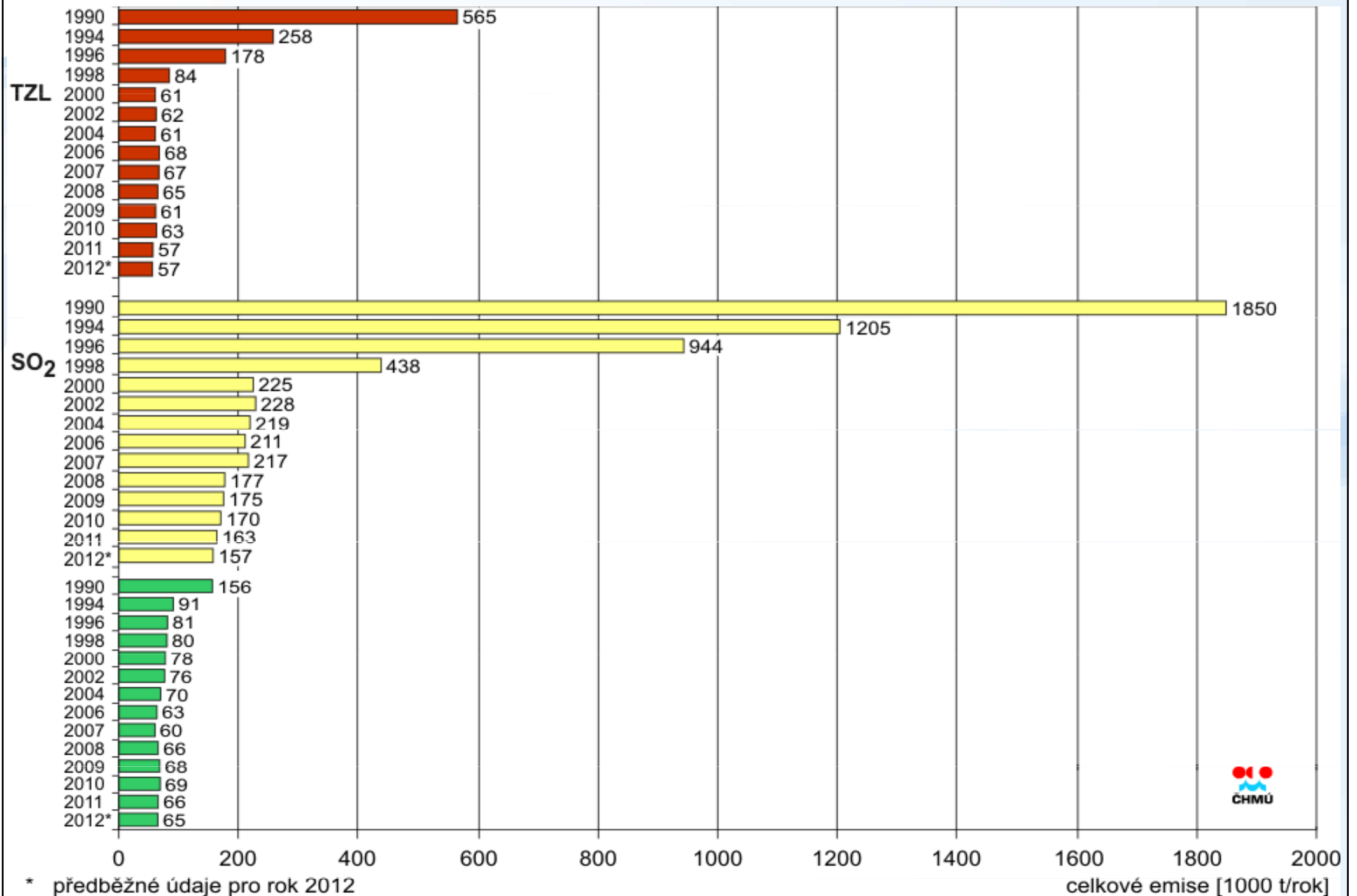


b) 2000

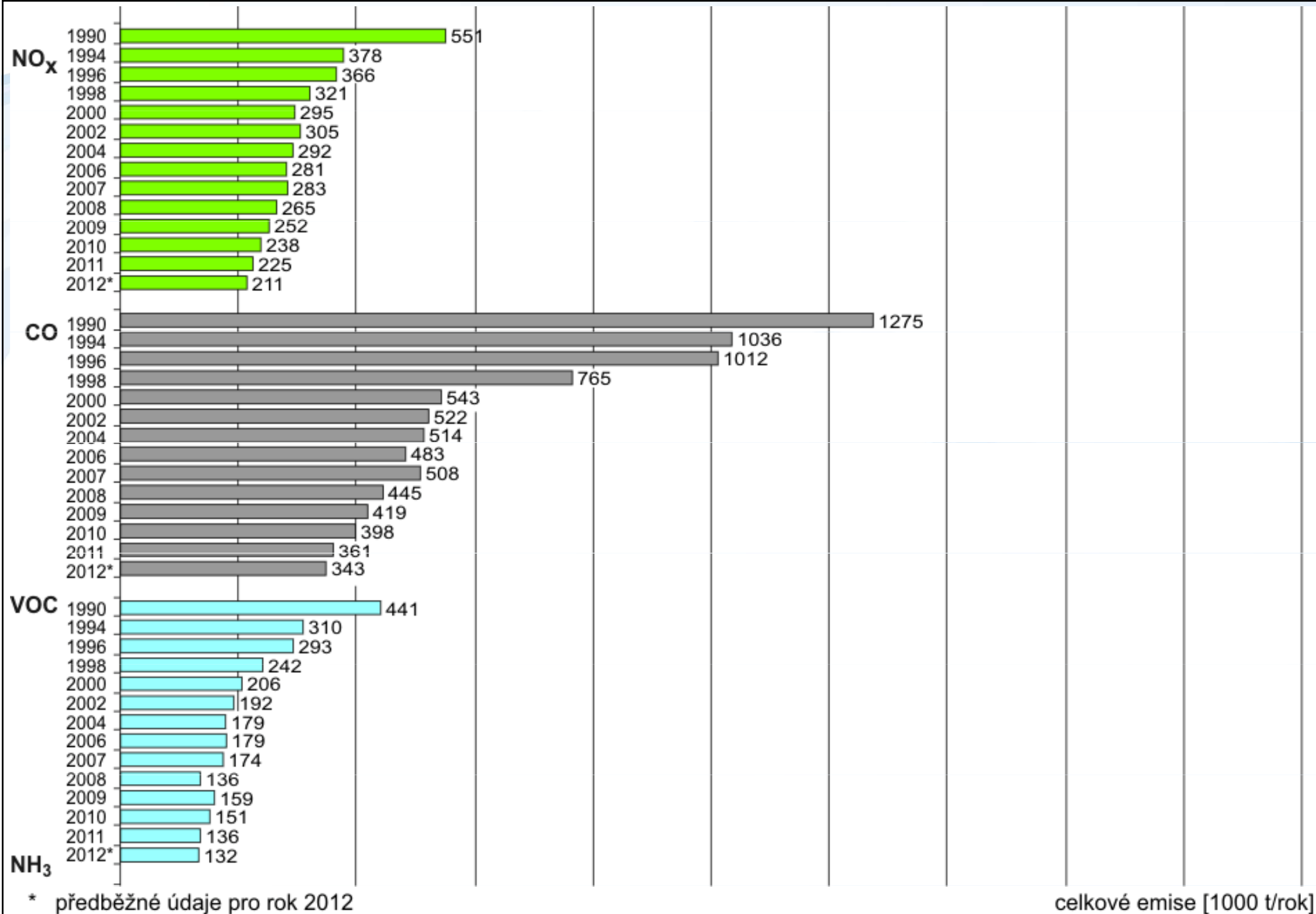


N deposition
(mg N·m⁻²·yr⁻¹)





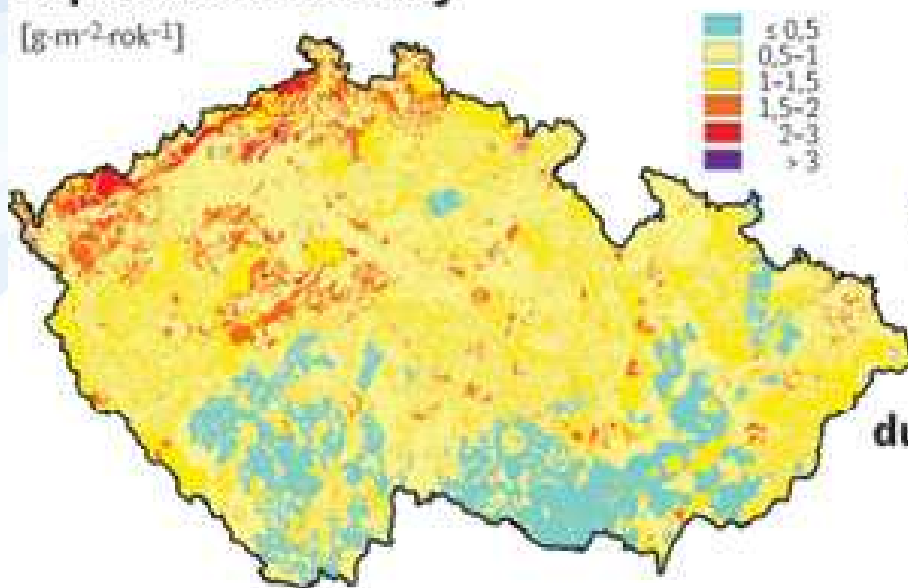
Obr. I.1.1 Celkové emise základních znečišťujících látek v České republice, 1990–2012



Obr. I.1.1 Celkové emise základních znečišťujících látek v České republice, 1990–2012

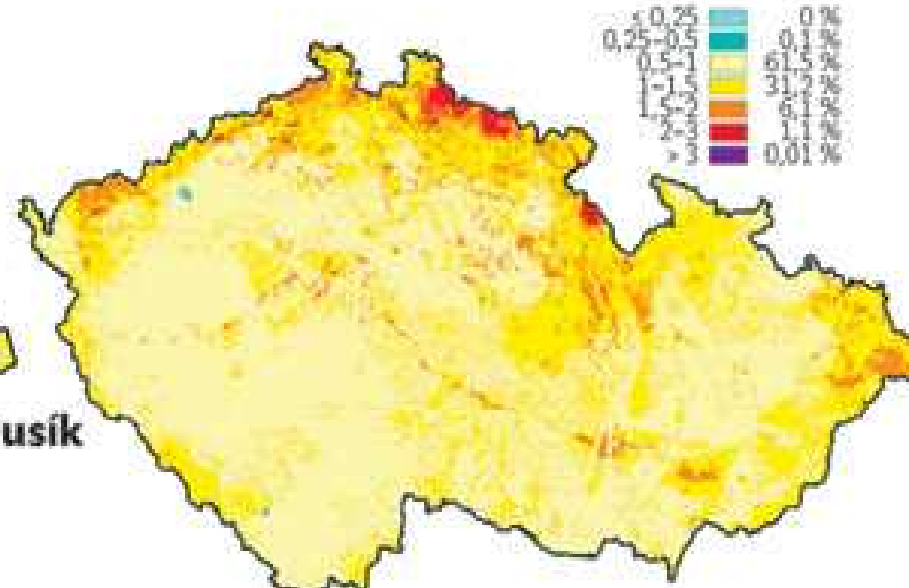
depozice dusíku a síry

[g·m⁻²·rok⁻¹]

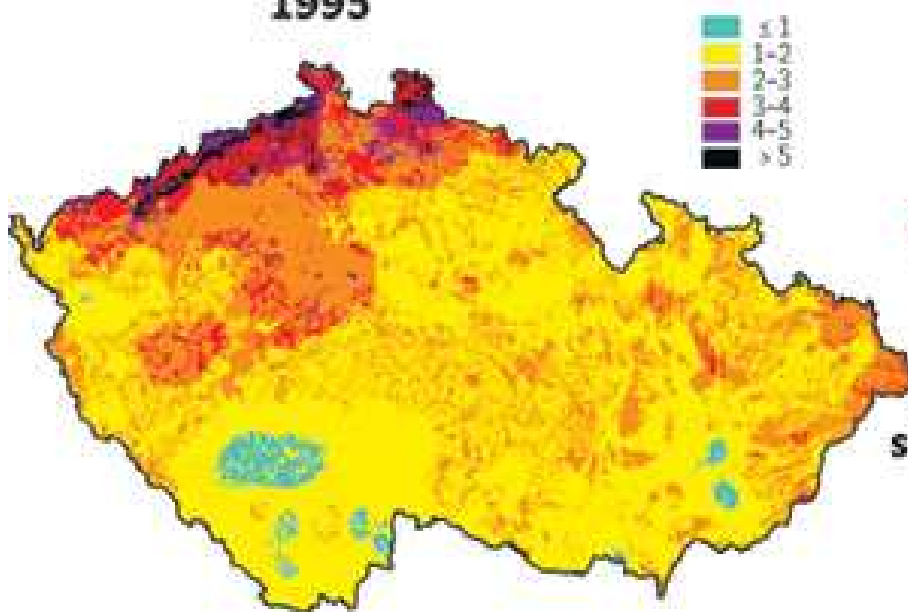


1995

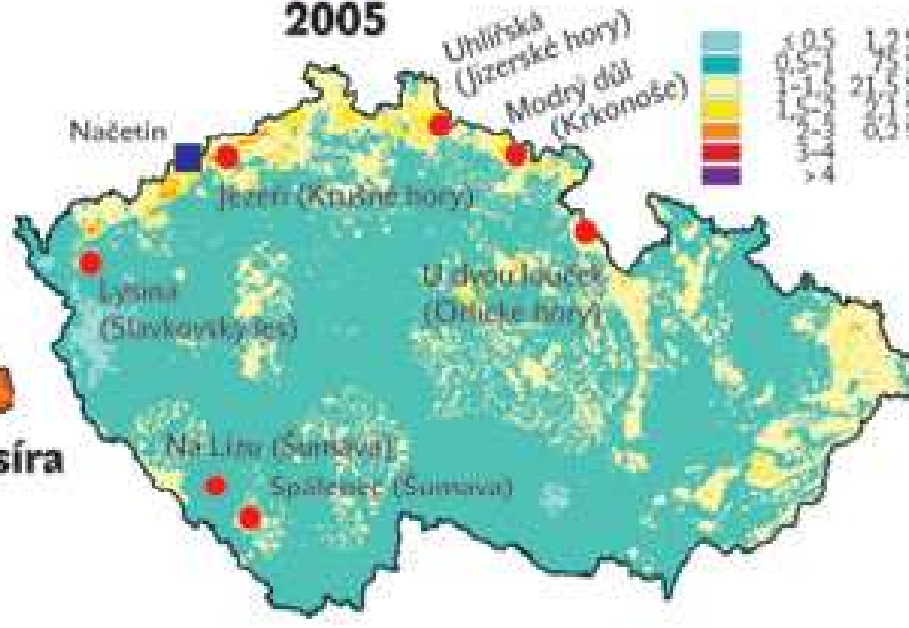
dusík



2005



síra



Jak zvýšené vstupy dusíku (a fosforu) principiálně škodí ekosystémům ?

„ekosystémová globalizace“



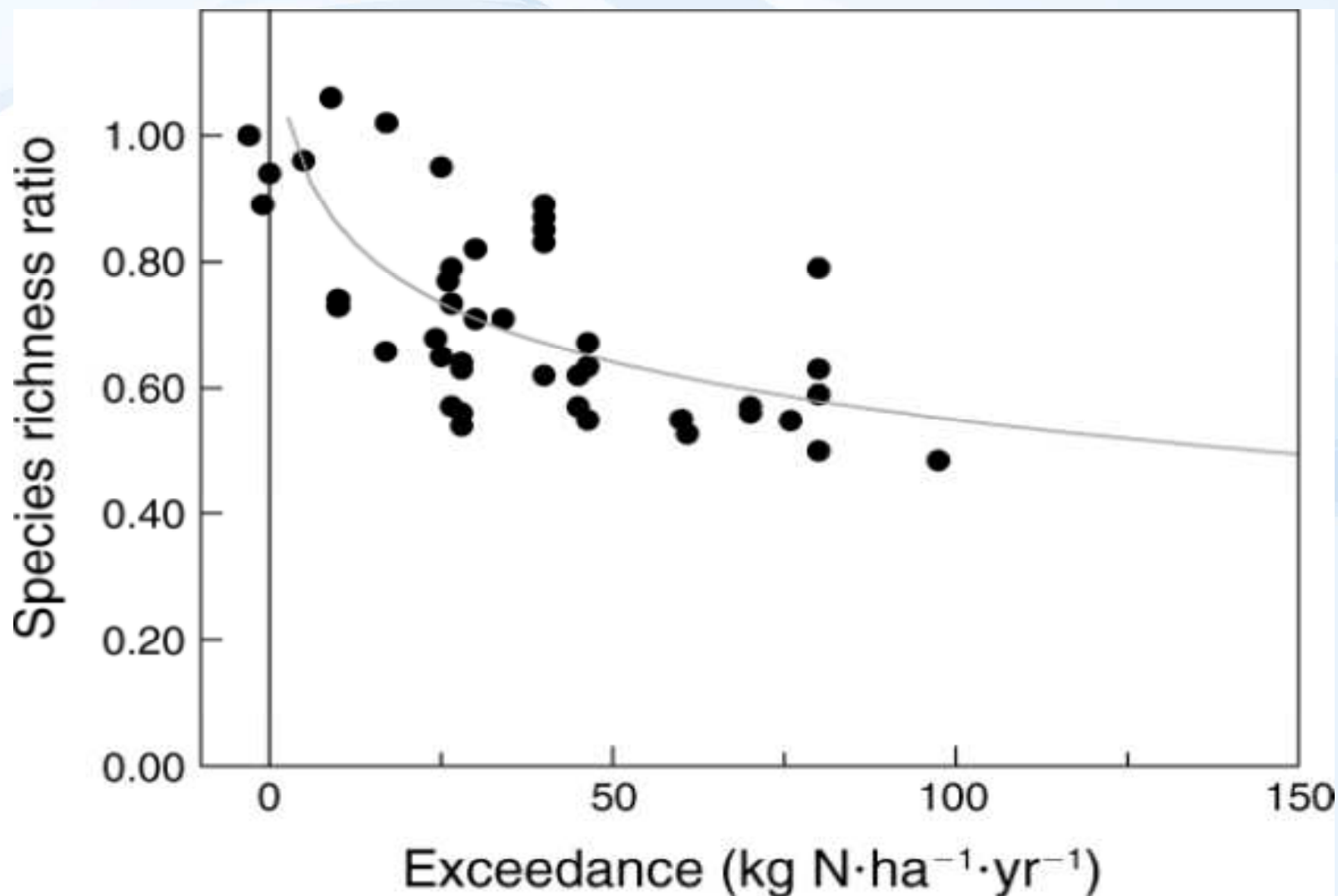
eutrofizace během velmi krátké doby „popřela“ význam vztahů mezi primárními producenty a symbiotickými fixátory atmosférického dusíku

náhlý přísun dusíku v podstatě zvýhodnil r-stratégy a znevýhodnil druhy úzce specializované...

to se projevuje v poklesu exergie ekosystému (hlavně informační a komplexní) a odklonem od dlouhodobé udržitelnosti...



Pokles biodiverzity s překročením kritických zátěží dusíku



(Bobbink, 2004)



Situace v ČR

v podmínkách středoevropských lesních ekosystémů eutrofizace probíhá v součinnosti s acidifikací

stabilita velké části lesních ekosystémů na území ČR je tak ohrožena a mnohé již zkolabovaly

i přes snižování emisí SO_2 a NO_x je problém poškozování lesních porostů na území České Republiky stále aktuální

V ČR je 89% poškozených nebo nemocných lesů, což je v rámci Evropy 3. místo (za Polskem (92%) a Slovenskem (90%))

ICP forest: podle hodnoty defoliace mezi jednotlivými státy Evropy zaujala ČR v roce 2003 první místo s 54,4% stromů, u kterých je defoliace korun větší než 25%

v ČR velké množství různě narušených ekosystémů: „velkoplošné experimenty“



Poměr organického C k N v půdě

C_{org}

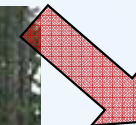
CO_2

mineralizace odumřelé organické hmoty

Převod N_{org} na NH_4^+ a NO_3^-



forma humusu: mull
mineralizace: rychlá
poměr C/N: nízký



forma humusu: moder
mineralizace: pomalá
poměr C/N: vysoký





C/N: 10 – 20



C/N >30

nižší teplota, více
fenolických látek
inhibujících činnost
mikroorganismů

z velikosti poměru C/N můžeme usuzovat, zda je v daném ekosystému dusík deficientní

ovšem musíme uvážit, o jaké stanoviště se jedná: horská smrčina/umělá smrčina v nižší nadmořské výšce

v klimaxových smrčinách našich zeměpisných šířek či boreálních jehličnatých lesích bývá vzhledem k převládající formě humusu (mor) dusík často limitující živinou

ale ze šetření smrkových lesů v rámci Evropy vyplývá, že tyto lesy mají menší schopnost zadržovat zvýšené vstupy dusíku (v souvislosti s antropogenně indukovanou depozicí), ve srovnání s listnatými či smíšenými lesy



Listnaté a jehličnaté lesy reagují na zvýšený vstup dusíku rozdílně:

listnaté porosty pod vlivem vysokého vstupu dusíku zvyšují intenzitu růstu, jehličnany reagují opačně

v jehličnatých porostech bylo zaznamenáno podstatné zvýšení růstu v důsledku vyloučení vysokého vstupu dusíku ($> 35 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$)

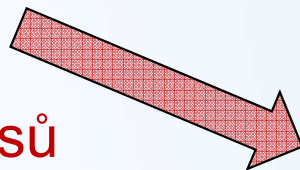
naproti tomu mírně zvýšená atmosférická depozice dusíku ve Švédsku a Norsku může být příčinou v posledních letech zaznamenaného zvýšení růstu lesních porostů včetně jehličnatých, ale...

Snížení poměru C/N u smrkových lesů

snížení tohoto poměru pod 25 indikuje u smrkových lesů zvýšené vyplavování NO_3^- z ekosystému

skutečně byla nalezena silná negativní korelace mezi poměrem C/N a růstem výstupu NO_3^- z ekosystému pro jehličnaté lesy

oproti tomu listnaté porosty vykazují vysokou retenci dusíku ze zvýšeného vstupu



Riziko vyplavování NO_3^- ve smrkových porostech

Poměr C/N (organický hor.)	<25	25-30	>30
N stav ekosystému	saturace N	střední stav	limitace N
Riziko vyplavování NO_3^-	vysoké	střední	nízké



Interference zvýšených vstupů N s obsahy ostatních živin

míra zvýšení produkce ekosystému jako odpověď na zvýšený vstup dusíku je ovšem ovlivněna i dostupností ostatních živin – hlavně fosforu (P), hořčíku (Mg), vápníku (Ca) a draslíku (K), popř. jiných esenciálních prvků

mnohé z výše uvedených bazických prvků jsou v acidifikovaných ekosystémech silně deficientní

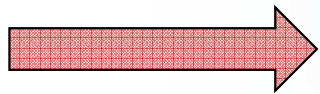
zvýšený vstup dusíku do takto oslabených porostů je příčinou dalšího zvýšení jejich náchylnosti k rozpadu

destabilizující a nepředvídatelné jsou rovněž důsledky vápnění degradovaných lesních ekosystémů (vápenec CaCO_3 , dolomit $\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2$, sádrovec $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)... bazické prvky se totiž stávají živinami limitujícími produkci ekosystému... **ale**

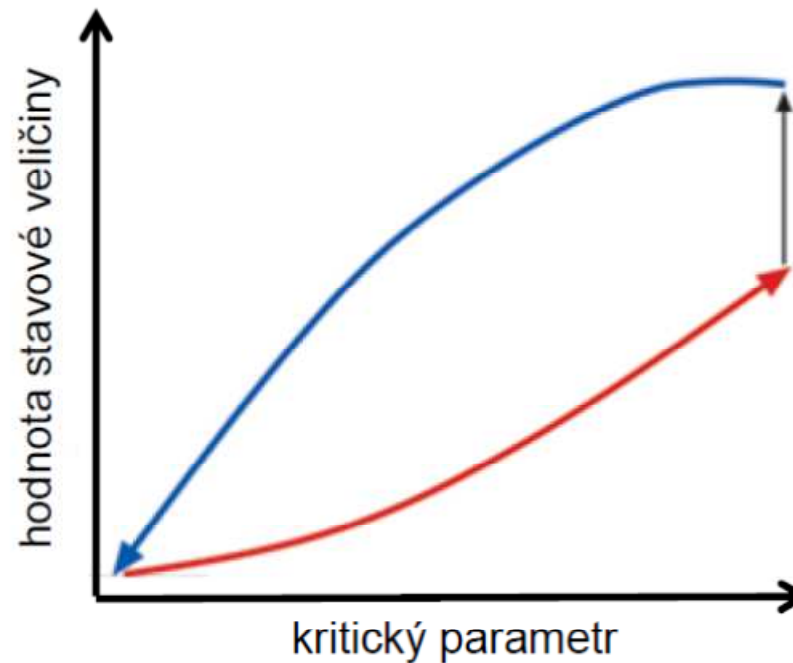


náhlý přísun většího množství bazických kationtů tedy může vést k nastartování růstu nadzemní biomasy,

oslabený kořenový systém a degradované mikrobiální prostředí (třeba i spoludepozicí těžkých kovů) nemusí náhlý nárůst produkce kapacitně unést



kolaps

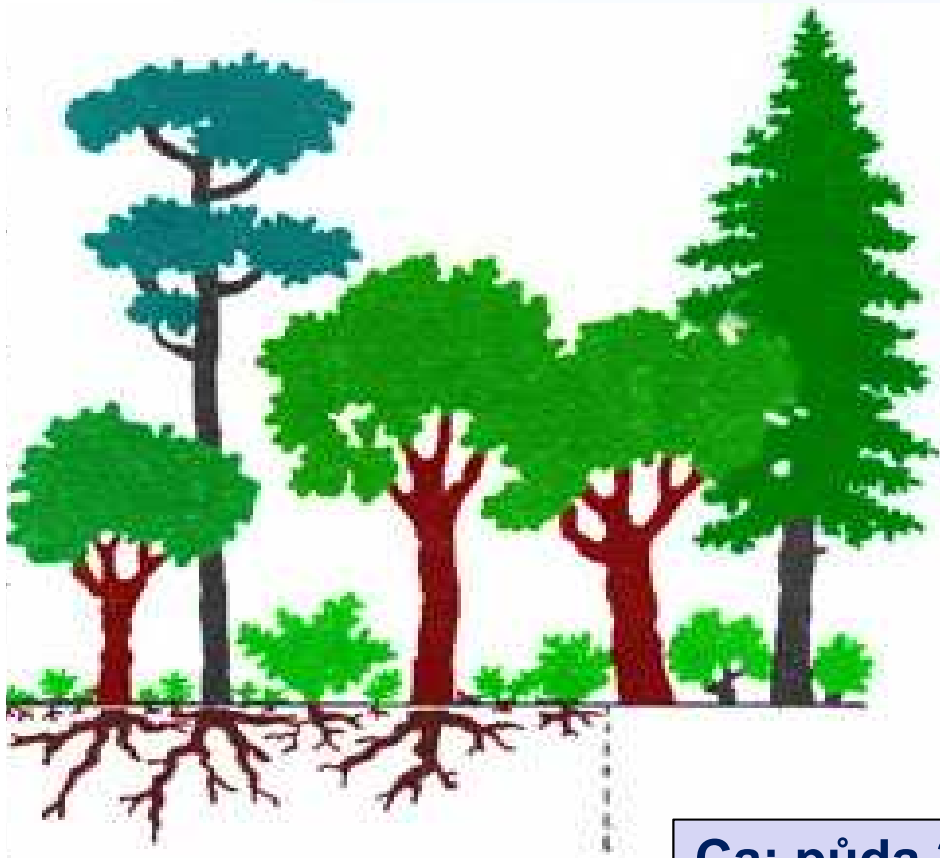


navíc snížení pH aplikací bazických kationtů může zvýšit nitrifikační potenciál a tedy přeměnu NH_4^+ na NO_3^- , což může vést ke zvýšenému vyplavování dusíku z ekosystému



Bazické ionty jako limitní faktor rozvoje ekosystémů

podobně jako v přirozeně fungujícím lesním ekosystému nacházíme mechanismy pro retenci dusíku, nalézáme zde i mechanismy zajišťující retenci bazických prvků



**Ca: celý ekosystém
445 let**

**Ca: biomasa
porostu 8 let**

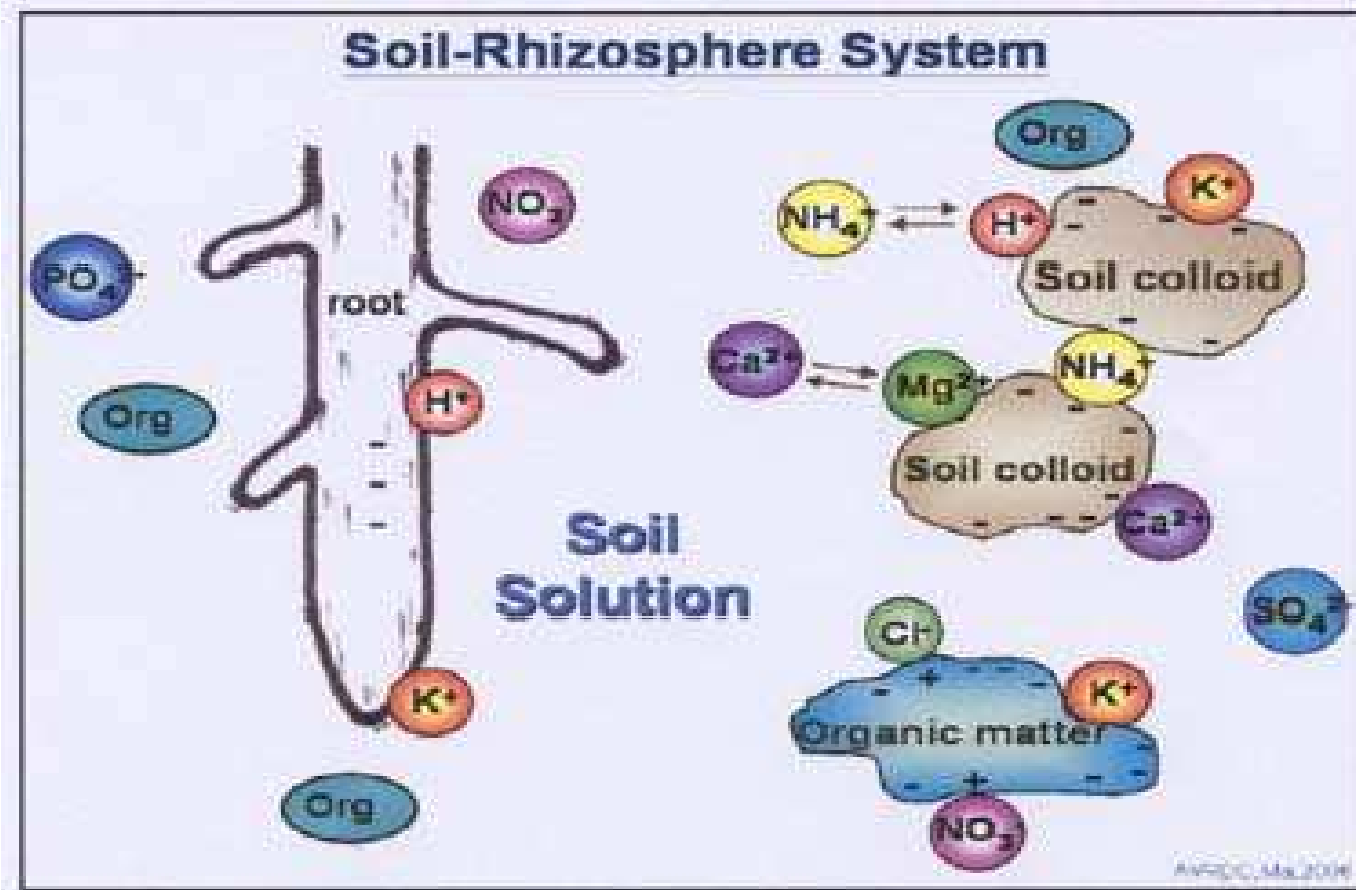
**Ca: biomasa opadu
5 let**

Ca: půda 32 let

**bazické ionty: Ca^{2+} ,
 Mg^{2+} , K^+ , Na^+**



Humuso-jílový sorpční komplex

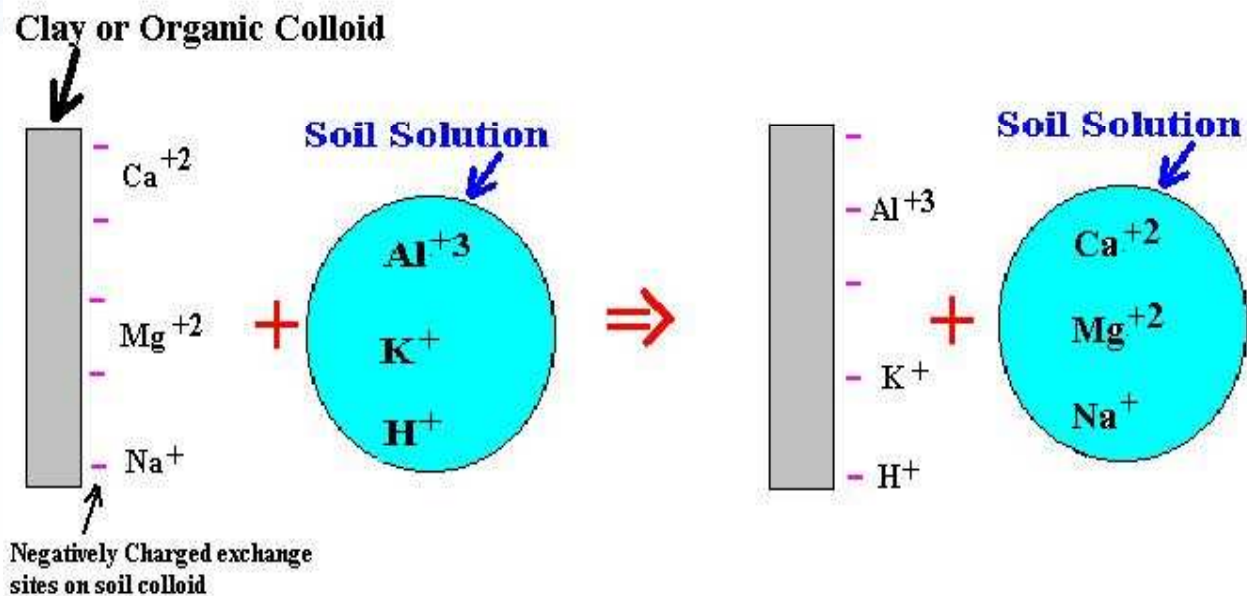


- humusové látky + jílové minerály
- výměnný mechanismus
- rovnovážný proces

uvolňuje postupně nutričně významné prvky...



Cation Exchange Illustrated



kationtová výměnná kapacita KVK

stupeň nasycení sorpčního komplexu

kationtovou výměnou kapacitu stanovíme například promýváním půdy přebytkem $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ a následným vytěsněním amonných iontů (které obsadily téměř všechna volná sorpční místa) KCl

stupeň nasycení stanovujeme na základě informace a množství výměnného vodíku, množství výměnného vodíku určujeme s použitím roztoku KCl



Pufrační mechanismus HJ komplexu a acidifikace

humuso-jílový komplex má rovněž schopnost tlumit změny půdního pH způsobené například kyselým opadem nebo kyselými dešti a to právě výměnným mechanismem

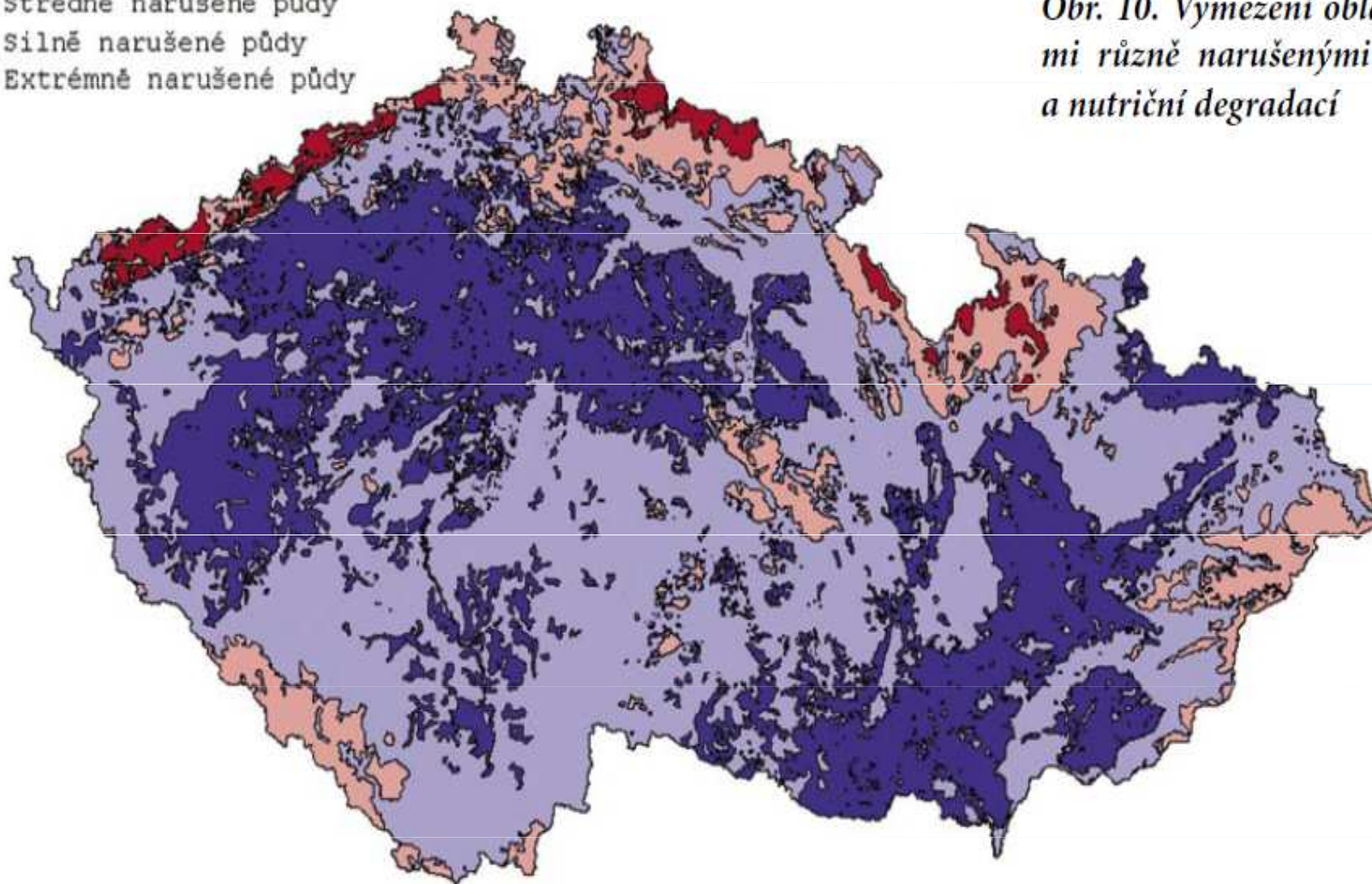


jsou-li do půdního prostředí importovány protony, dochází k vyplavování bazických iontů z humuso-jílového komplexu do půdního roztoku a tyto bazické ionty pak mohou být snadno vyplaveny i z ekosystému

acidifikace, palčivý problém zvláště ve Středoevropském prostoru, byl především jako důsledek enormně vysokých emisí NO_x a SO_2 popsán v mnoha odborných a popularizačních pracích



- Mírně narušené půdy
- Středně narušené půdy
- Silně narušené půdy
- Extrémně narušené půdy



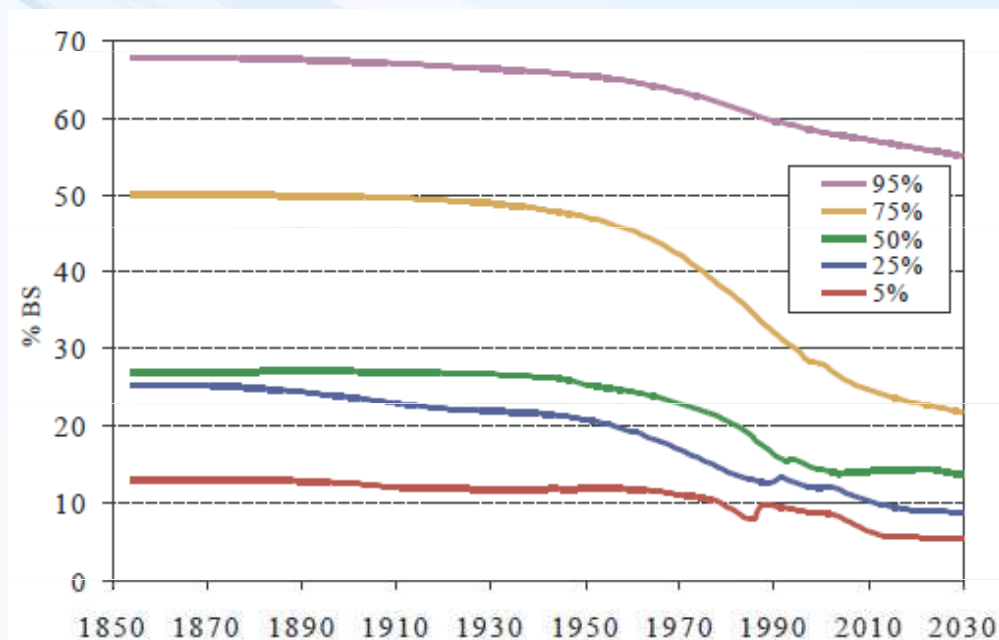
Obr. 10. Vymezení oblastí s půdami různě narušenými acidifikací a nutriční degradací



změny v prostředí: několik příkladů

pokles pH Čertova jezera na Šumavě: (Šumava je přitom považována za relativně acidifikací méně zasažené území) 6,5 až 7,0 v roce 1936, 4,5–4,8 v roce 1976

v pramenech Krušných hor byl v letech 1980-1990 zaznamenám 10-ti násobný vzestup koncentrace NO_3^- oproti rokům 1955 – 1959



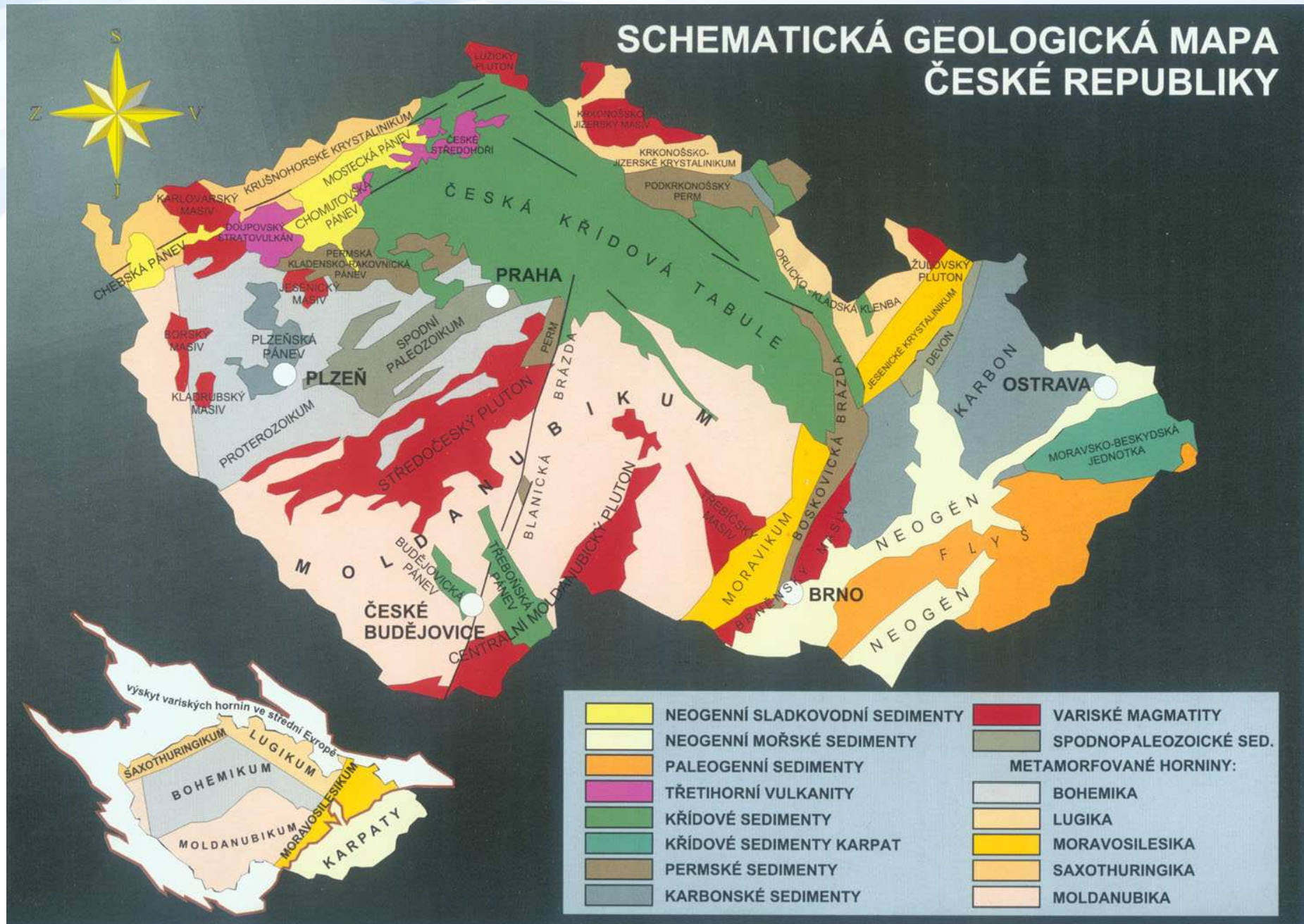
Obr. 11. Pokles bazické saturace lesních půd v ČR mezi lety 1850 – 2030 modelovaný modelem MAGIC na základě sledování v letech 1993 – 2004. 50% percentil je medián (nejčetnější hodnota) všech hodnot, 5% kvantil reprezentuje podíl půd, jejichž zastoupení v souboru je 5% nejnižších hodnot. Naopak 95% percentil reprezentuje nejvyšší hodnoty v celém souboru.



stabilita půdního prostředí je důležitým
předpokladem stability daného
ekosystému



Náchylnost půd k acidifikaci



Pufrační mechanismy v půdách

humuso-jílový sorpční komplex není v půdě jediným pufrujícím (hodnotu pH uchovávajícím) mechanismem

dalšími pufračně významnými komponenty pro udržování hodnot pH jsou uhličitany, hlinito-křemičitanový sorpční výměnný systém, hydratované oxid-hydroxidy hliníku a železa

s ohledem na schopnost půdy tlumit výkyvy pH, rozlišujeme dvě důležité veličiny:

pufrační kapacita

odráží celkové množství pufrujících sloučenin
 $\text{kmol}\cdot\text{ha}^{-1}$

pufrační rychlost

je definována jako maximální možná rychlost reakce mezi „okyselující“ sloučeninou a příslušnou pufrující sloučeninou
 $\text{kmol}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$

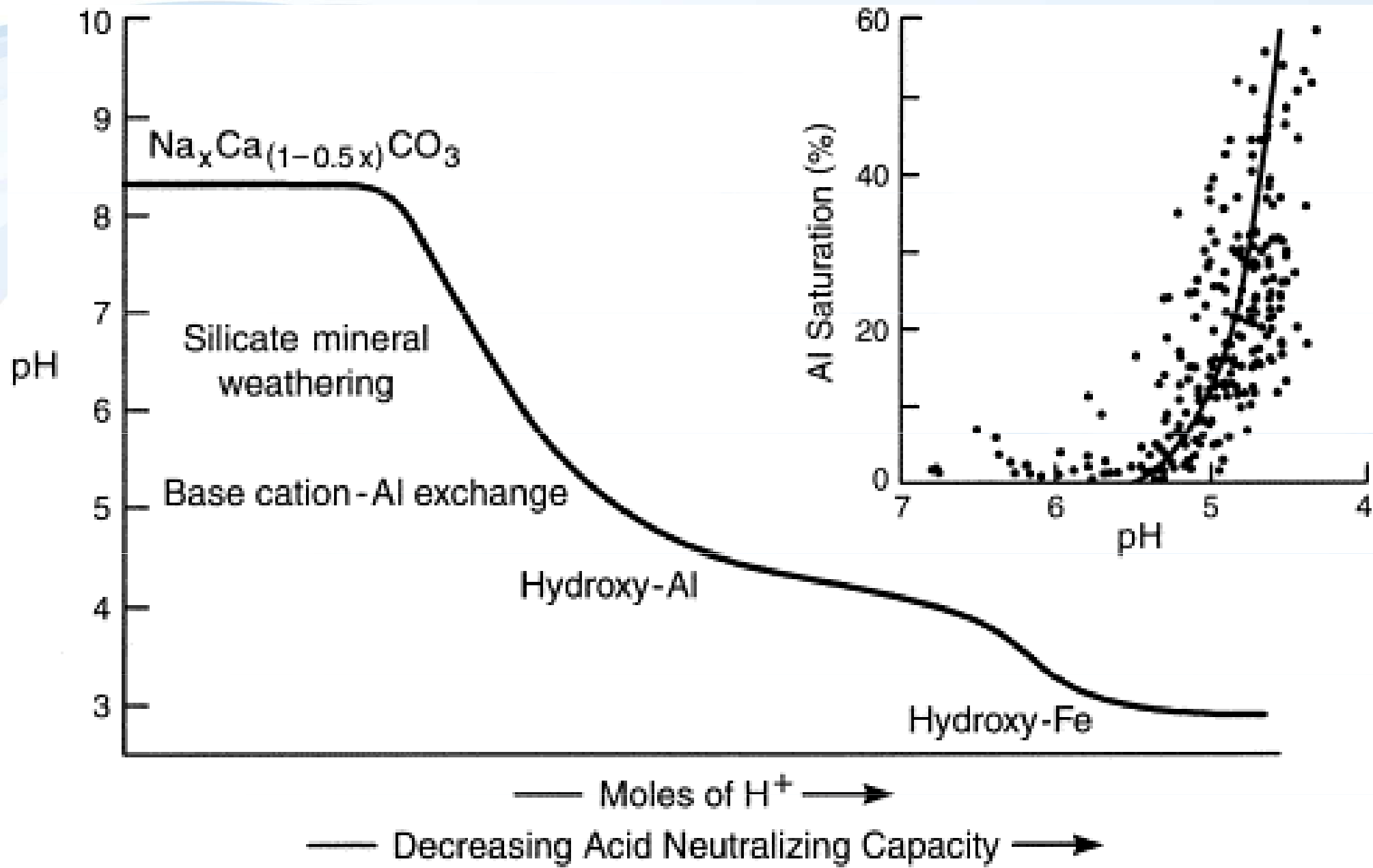


Přehled důležitých puфраčních komplexů v půdě

Table 1: Classification of the acid buffering reactions in forest soils (Ulrich, 1981,1983b)

Buffer range	pH range	Base saturation	Buffer reaction
Carbonate	8.0-6.2	1.00	$\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$
Silicate	6.2-5.0	0.70-1.00	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 + 2\text{H}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- + \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
Cation exchange	5.0-4.2	0.05-0.70	clay mineral=Ca + 2H^+ \rightarrow H-clay mineral-H + Ca^{2+}
Aluminum	4.2-3.0	0.00-0.05	$\text{AlOOH} + 3\text{H}^+ \rightarrow \text{Al}^{3+} + 2\text{H}_2\text{O}$
Iron	<3.8	0.00	$\text{FeOOH} + 3\text{H}^+ \rightarrow \text{Fe}^{3+} + 2\text{H}_2\text{O}$





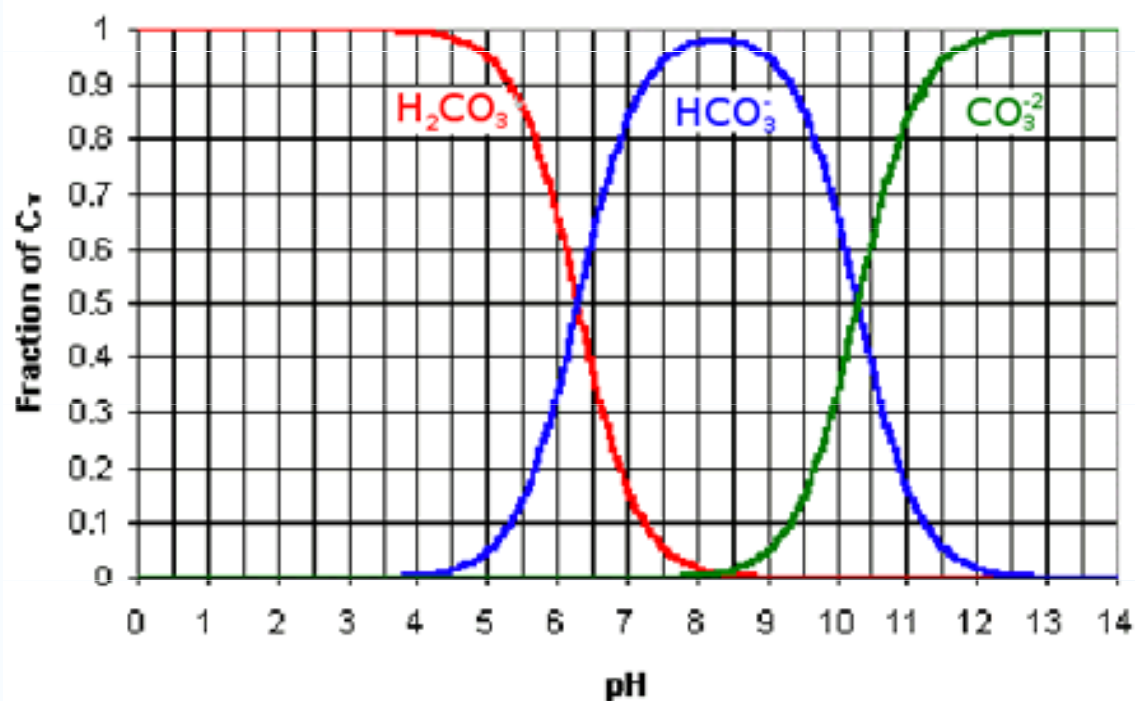
Uhličitanový pufrací systém (pH 8,0 – 6,2)

tento mechanismus převládá v půdách obsahujících podíl jemného uhličitanu vápenatého nebo jiných uhličitanů

v půdním roztoku je hlavní částicí Ca^{2+} nebo Mg^{2+}

kapacita tohoto pufracího systému závisí na množství uhličitanů přítomných v půdě

pokud je matečnou horninou přímo vápenec nebo dolomit neprobíhá acidifikace půd ani při kyselých deštích, jelikož rychlost pufrací reakce s uhličitanem je dostatečná a pufrací kapacita tohoto mechanismu je obrovská

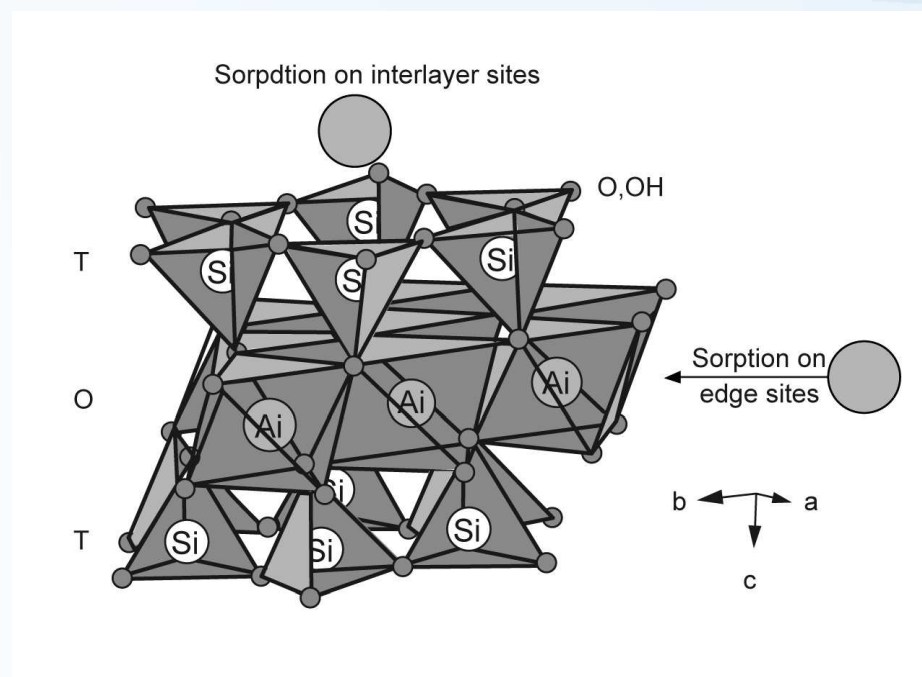
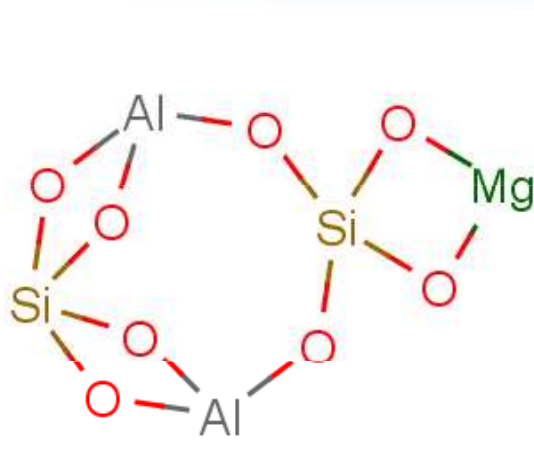


Silikátový puфраční systém (pH 6,2 – 5,0)

pokud půdotvorný substrát neobsahuje bazické složky jako vápenec nebo dolomit je u okyselovaných půd zprvu vyčerpáván silikátový puфраční mechanismus, při něm jsou z hlinitokřemičitanů uvolňovány bazické kationty a vyplavovány z ekosystému

při pH vyšším, než 5 ještě ve větší míře neprobíhá vyplavování sloučenin hliníku

vyuhování hlinito-křemičitanů probíhá při všech hodnotách pH, ovšem puфраční rychlost těchto procesů je velmi nízká, proto bývají souběžně zapojeny i další puфраční mechanismy

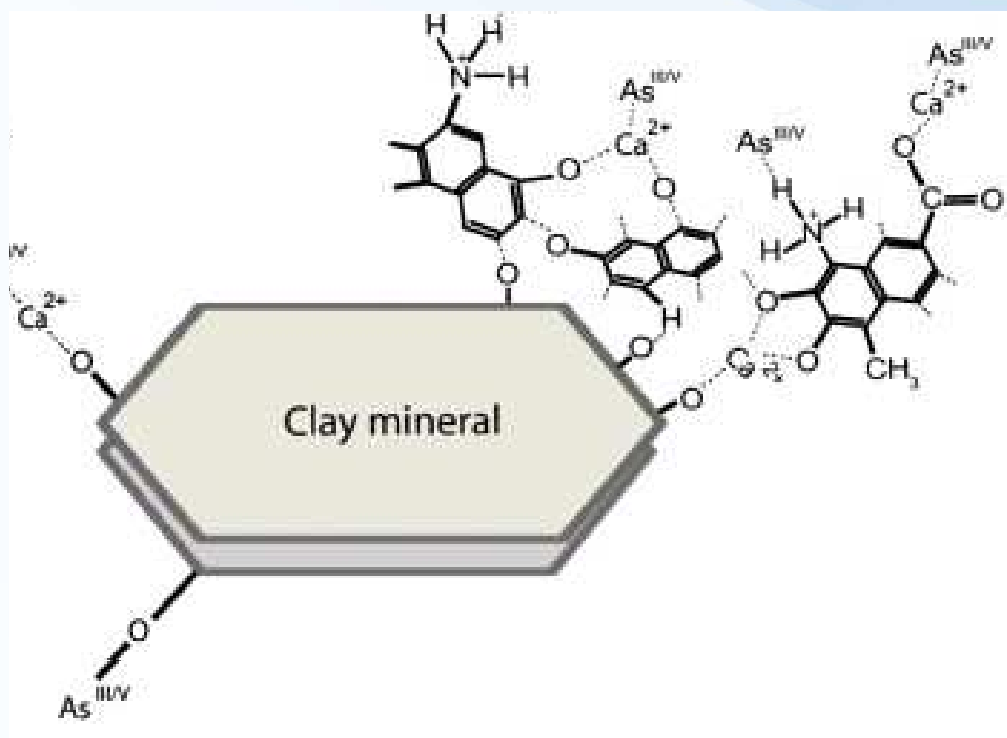


Kationtově-výměnný puфраční mechanismus (4,2 – 5,0)

základní mechanismy náležející k tomuto puфраčnímu mechanismu byly popsány předešle

tento puфраční mechanismus je velmi významný, jelikož výměnná reakce mezi adsorbovanými ionty a oxoniovými kationty probíhá velmi rychle

celkovou puфраční kapacitu této reakce určuje KVK a stupeň nasycení sorpčního komplexu bázemi (rozmezí 0,05 – 0,70)

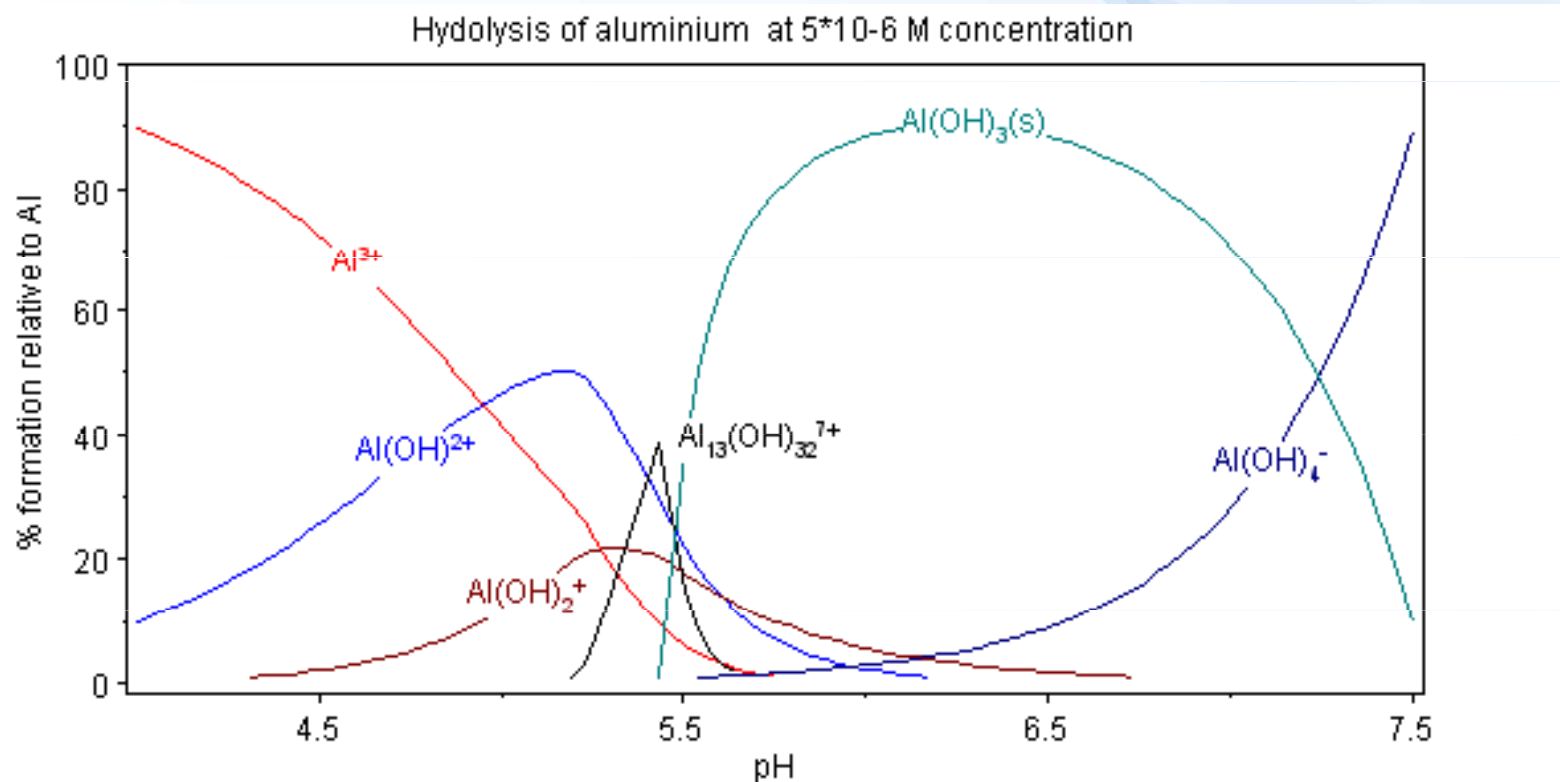


Pufrační oblast hliníku a železa (4,2 a níže)

v tomto případě oxoniové kationty mobilizují volný hliník Al^{3+}

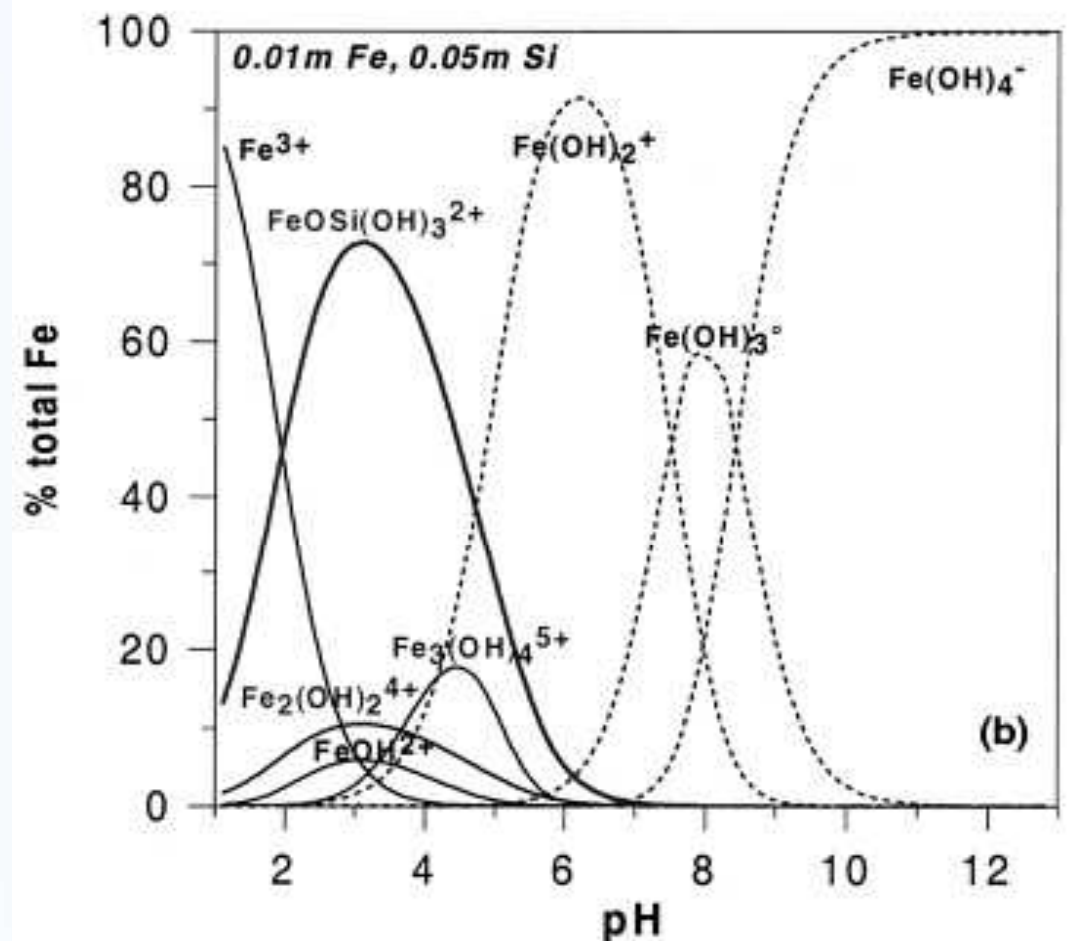
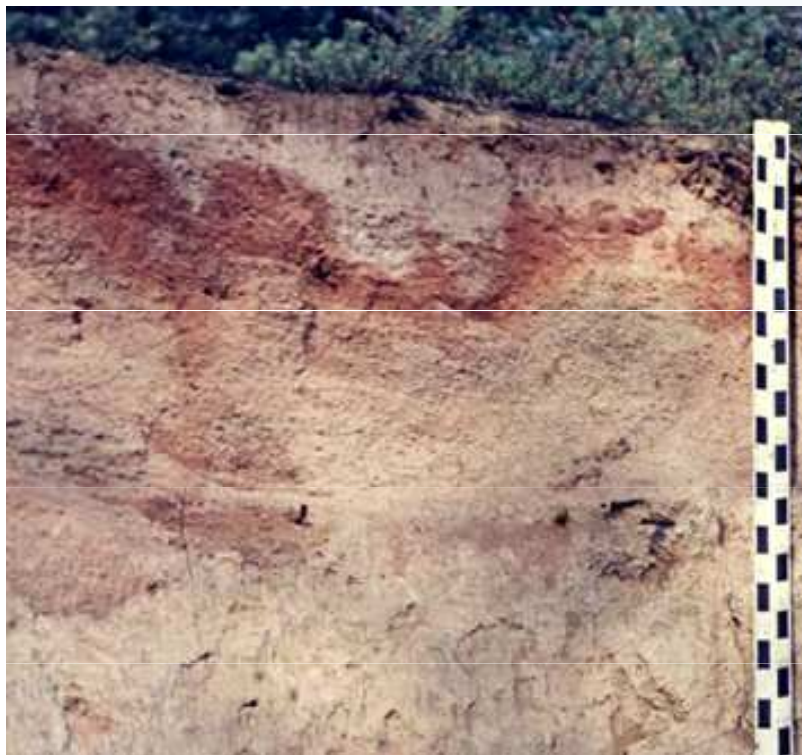
hliník je přirozeně přítomen ve velkém množství v hlinitokřemičitanech a dalších půdních komponentách, ovšem v neškodné formě

volný hlinitý iont Al^{3+} má naproti tomu celou řadu negativních účinků, zvláště na půdní bakterie a kořenové systémy rostlin



pokud půdní pH klesne pod hodnotu 3,8, nastává aktivace pufrčního mechanismu železa, započne rozpouštění hydroxysloučenin železa a migrace volných železitých Fe^{3+} iontů půdním profilem, to se projeví viditelnými změnami v půdním profilu (vznik ortšteinů)

pH nižší, než 3,8 značí velmi silný nedostatek minerálních živin a toxické účinky pro organismy



Indikátory pro určení nedostatku bazických iontů v lesních ekosystémech

degradace lesních půd a následné narušení stability lesních ekosystémů má ve středoevropském prostoru tři hlavní příčiny:

- nedostatek bazických kationtů dostupných členům ekosystému
- pokles pH
- zvýšená koncentrace Al^{3+} (hliníkový stres)

je zřejmé, že všechny tyto procesy jsou provázány, protože půdy s přirozeně nízkou zásobou bazických kationtů jsou náchylné jak k poklesu pH, tak k mobilizaci volného Al^{3+}

tyto mechanismy působí součinně s eutrofizací



Mechanismus hliníkového stresu

Při nízkém poměru bazických kationtů k hliníku (Bc/Al), jsou výměnná místa na buněčných membránách obsazována ionty Al^{3+} a je tak znesnadněn příjem důležitých bazických iontů jako Ca^{2+} , K^+ a zvláště Mg^{2+}

Al^{3+} tedy narušuje elektrostatickou rovnováhu na membránách, čímž dochází k odumírání zasažených orgánů, zvláště jemných kořínků s následným špatným příjmem živin, vody a celkovým oslabením rostliny

tento mechanismus je typický pro B-horizonty lesních půd v celé střední Evropě a jižní Skandinávii

rovněž dochází k blokování některých enzymů

je zajímavé, že dvě hlavní hospodářské dřeviny střeoevropských lesů: smrk a buk se ve své citlivosti vůči hliníkovému stresu značně liší:

smrk je relativně odolný proti vysoké koncentraci oxoniových kationtů, naopak velmi citlivý k nízkému poměru **Bc/Al**

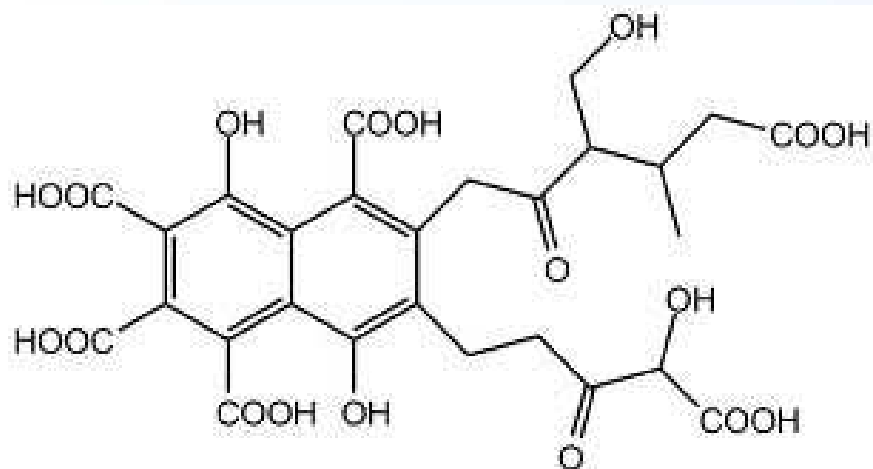
buk je relativně odolný proti hliníkovému stresu, naopak hůře snáší pokles pH

Bc = Ca, Mg, K



proč se neseťkáváme s hliníkovým stresem v neznečištěných horských smrčínách či boreálních lesích?

...humínové kyseliny a fulvokyseliny vážou Al^{3+} do komplexu...



naproti tomu anorganické kyseliny (především H_2SO_4 a HNO_3 z atmosférické depozice) jsou velmi špatná komplexační činidla pro kovové ionty, a proto uvolňují Al v jeho toxické formě Al^{3+}

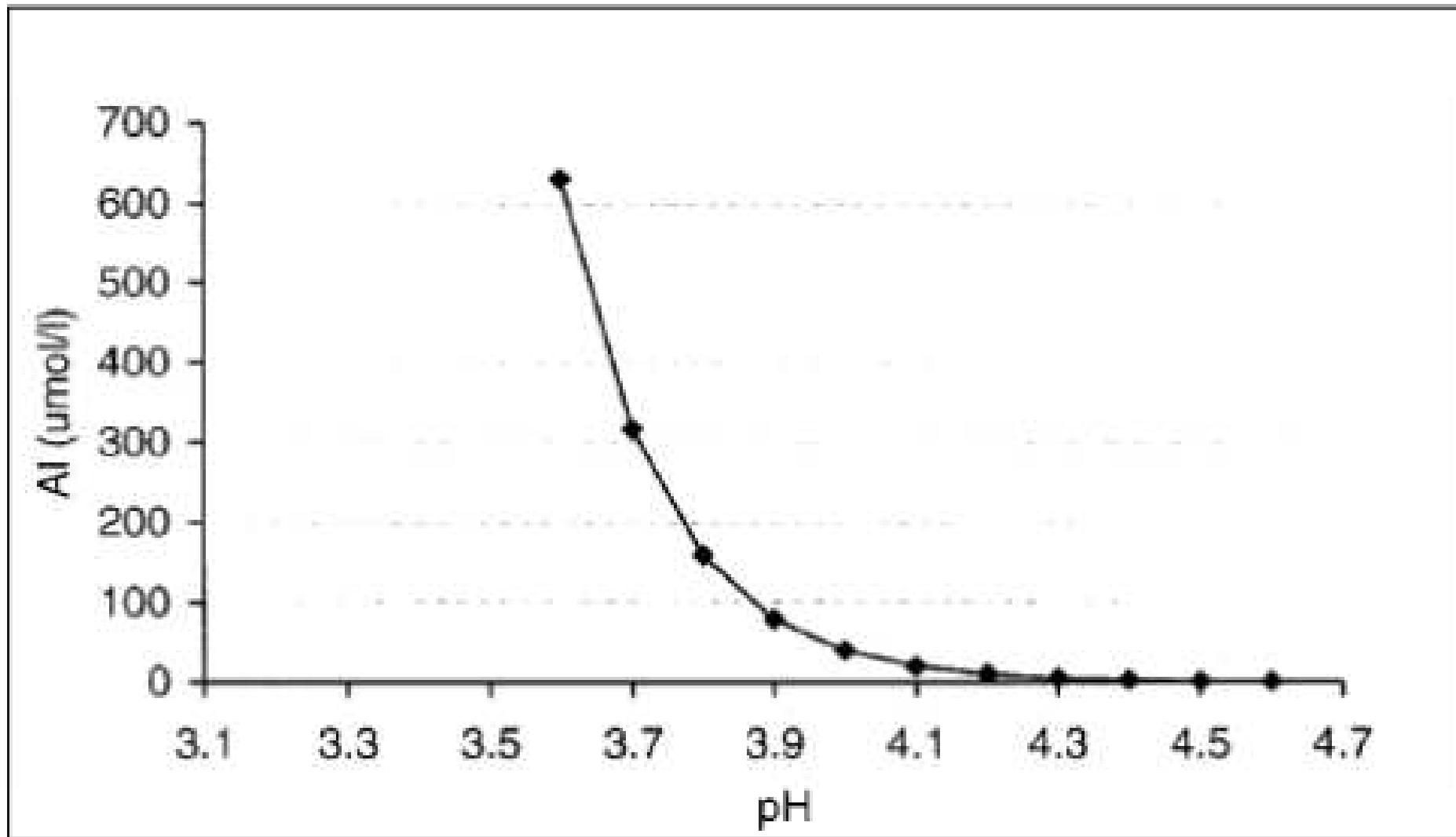


PŮDNÍ SONDA



Centrum pro výzkum
toxických látek
v prostředí

nárůst koncentrace volného Al^{3+} je s klesajícím pH
exponenciální



Poměr **Bc/Al** jako indikátor stability lesních ekosystémů

pouhé určení pH prostředí (půdního, vod) je nedostatečným popisným nástrojem acidifikace degradovaných ekosystémů, je však důležitým doplňkovým údajem

u poměru Bc/Al byla nalezena dobrá negativní korelace s mírou poškození stromové koruny (stupeň defoliace asimilačního aparátu v procentech) a počtem sekundárních výhonů

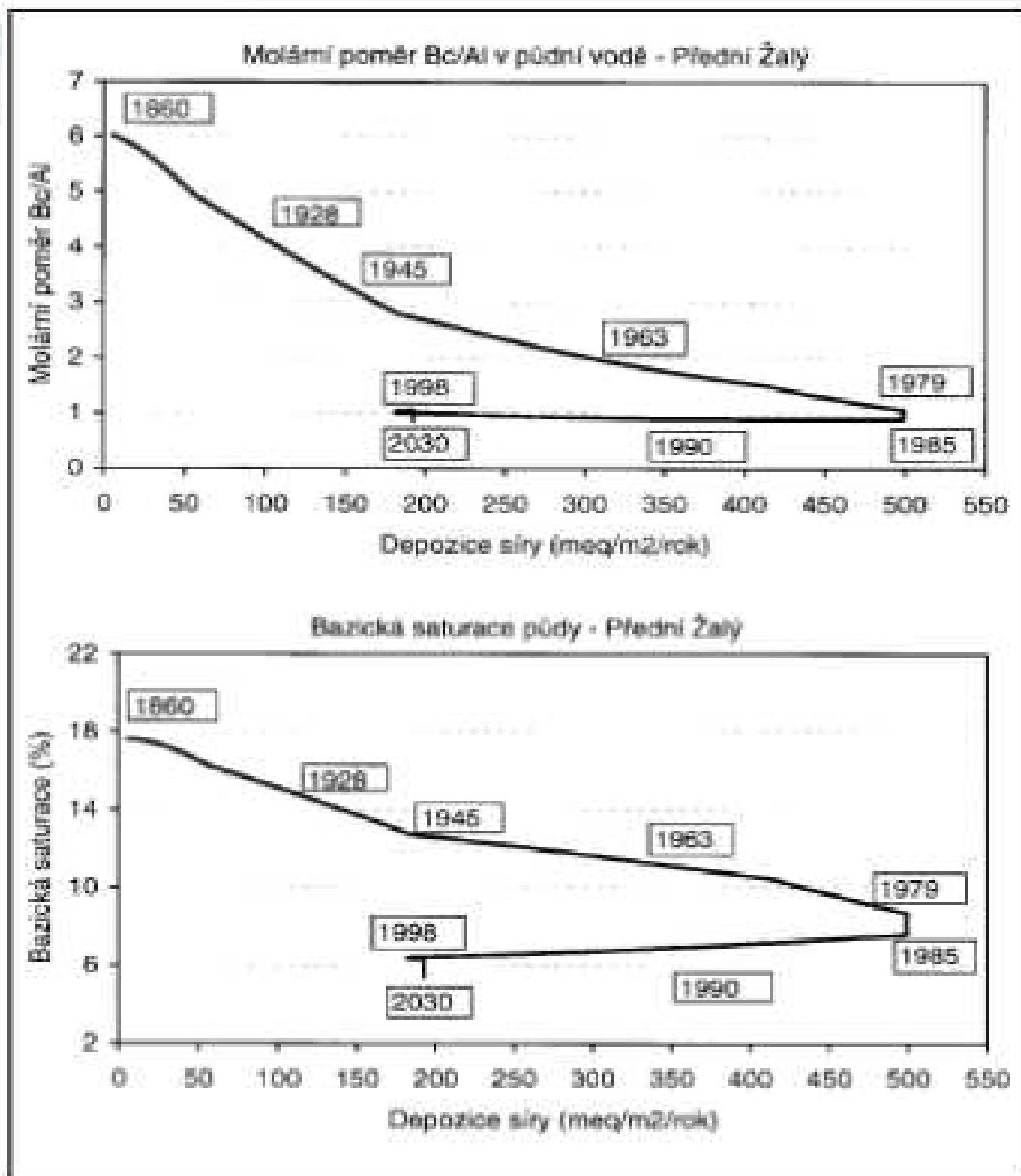
kritická hodnota parametru Bc/Al je 1, klesne-li poměr pod touto hodnotou je stabilita ekosystému již extrémně narušena

tato hodnota se používá při výpočtech kritických zátěží acidifikujícími emisemi pro lesní ekosystémy

například bylo publikováno (Cronan, 1996), že při poměru $Ca/Al = 1$ bylo pozorováno významné poškození v 50% studovaných případů, při poměru $Ca/Al = 0,5$ už to bylo 90% případů



poměr Bc/Al a depoziční toky S



Závěr

změny způsobené v půdách v souvislosti s eutrofizací a acidifikací se dají plným právem označit za degradační, tyto změny jsou dlouhodobé a výrazně snižují stabilitu terestrických i aquatických ekosystémů

tyto změny se zrcadí ve změně půdního nebo vodního chemismu, která má neblahé účinky na zdraví ekosystému, zvláště pokud se ony změny chemismu odehrávají v uzlových místech ekosystému: tzn. v místech s intenzivní výměnou energie-látek a informace mezi ekosystémem a jeho prostředím



Hlavní příčiny degradace lesů v Evropě

Oblast	Pravděpodobné nebo možné příčiny
Střední Evropa	odumírání jedle, dobře zdokumentovaný historický vývoj, který znovu kulminoval v 70. letech ve spojitosti se suchými léty
Severní Německo, střední Rusko, Rumunsko, část Itálie, Španělsko	odumírání různých druhů dubu, často spojování s kumulativním a společným vlivem žíru hmyzu, extrémního počasí (silné mrazy a letní sucha) a jiným biotickým faktorům
Harz, Solling, Hills v severním Německu	různé druhy dřevin hlavně smrk a buk. Suchá a mokrá depozice S a N, acidifikace půd, vymývání bazických kationtů, mobilizace hliníku, poškození kořenů a narušení výživy
Krušné hory	působení SO ₂ , těžké kovy, fluor, ostatní vzdušné polutanty a mráz
Fichtelgebirge	mokrá depozice S a N, SO ₂ , Ca/Al, Mg/Al v půdě a následné vlivy na výživu zvláště Mg a N
Black Forest a Vosges	mokrá depozice a depozice s vertikálními srážkami (v menším měřítku O ₃ , SO ₂ , NO _x , a NH ₃). Vymývání Mg a Ca z půdy. Nedostatek Mg, K, a Mn ve výživě, sucho, václavka a kůrovec
Lesy vnitřního Bavorska	kyselá námraza, nárazy mrazu, nevhodný výběr proveniencí
Holandsko	vstup N (NH ₃ a NO ₃), sucho a možný vliv O ₃ , vstup N zvyšuje citlivost k ostatním stresům
Oblast Atén	poškození Pinus pinaster O ₃ a jinými oxidanty

