



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**



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

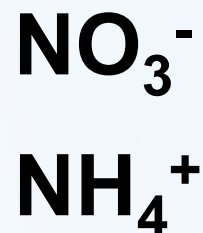
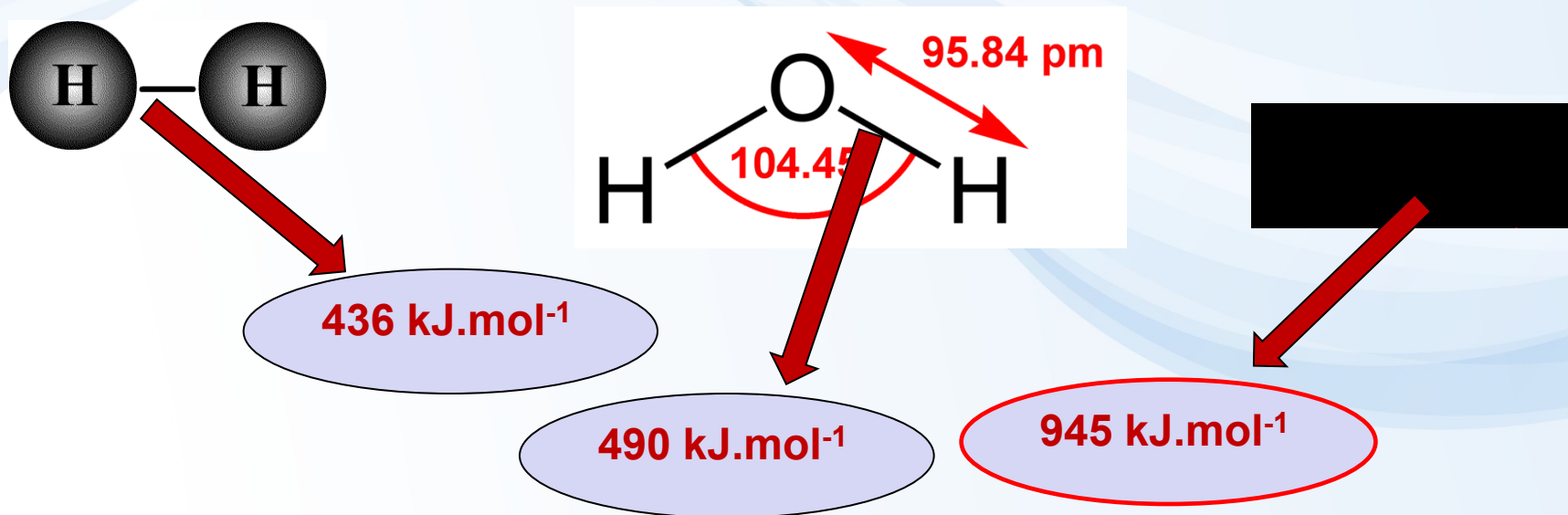
# Indikátory stability založené na biogeochemických cyklech prvků ?

Charakter hlavních biogeochemických cyklů živé hmoty

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



# 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

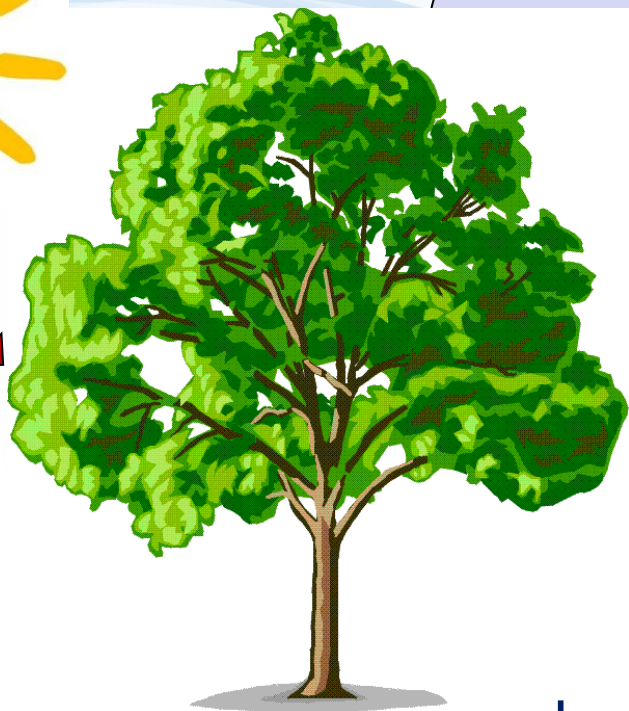
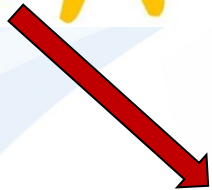


*Azotobacter*, *Clostridium*, *Rhizobium* (žijí v symbióze s kořínky luštěnin), aktinomycety rodu *Frankia* (půdní symbiotická bakterie více než 200 druhů rostlin, například olše), sinice rodů *Nostoc*, *Anabaema*

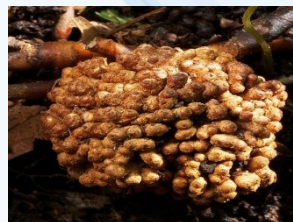
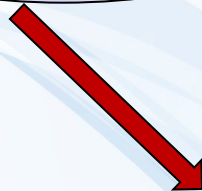


nutné  
anaerobní  
prostředí



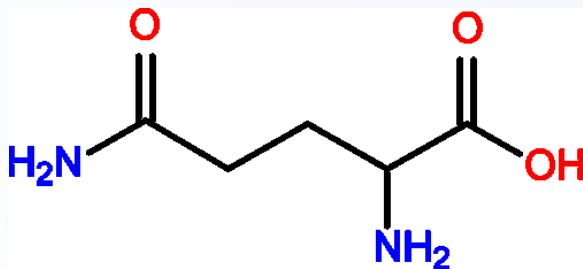
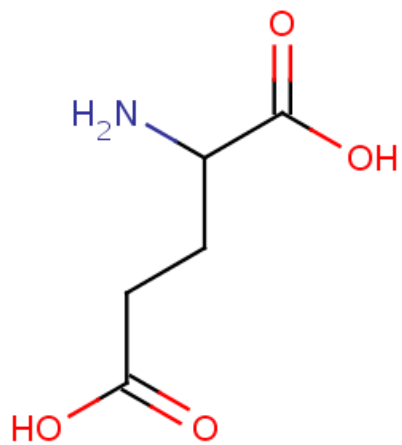


12 g  
hnilovaného  
C



fixace 1 g N

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



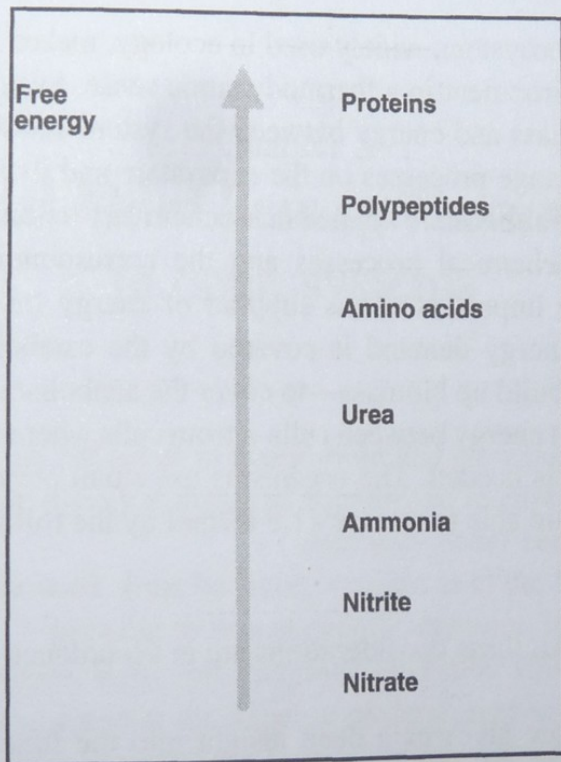
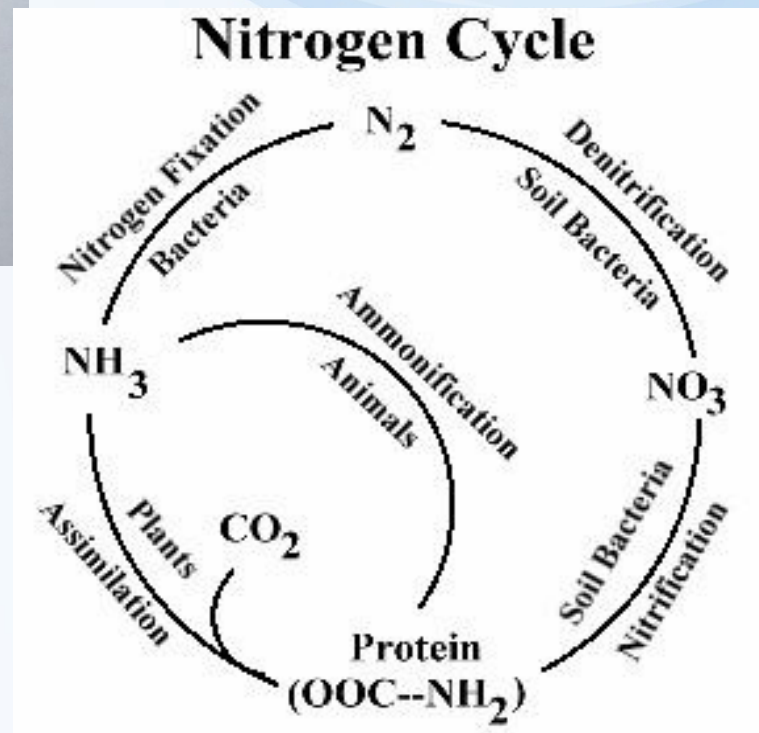
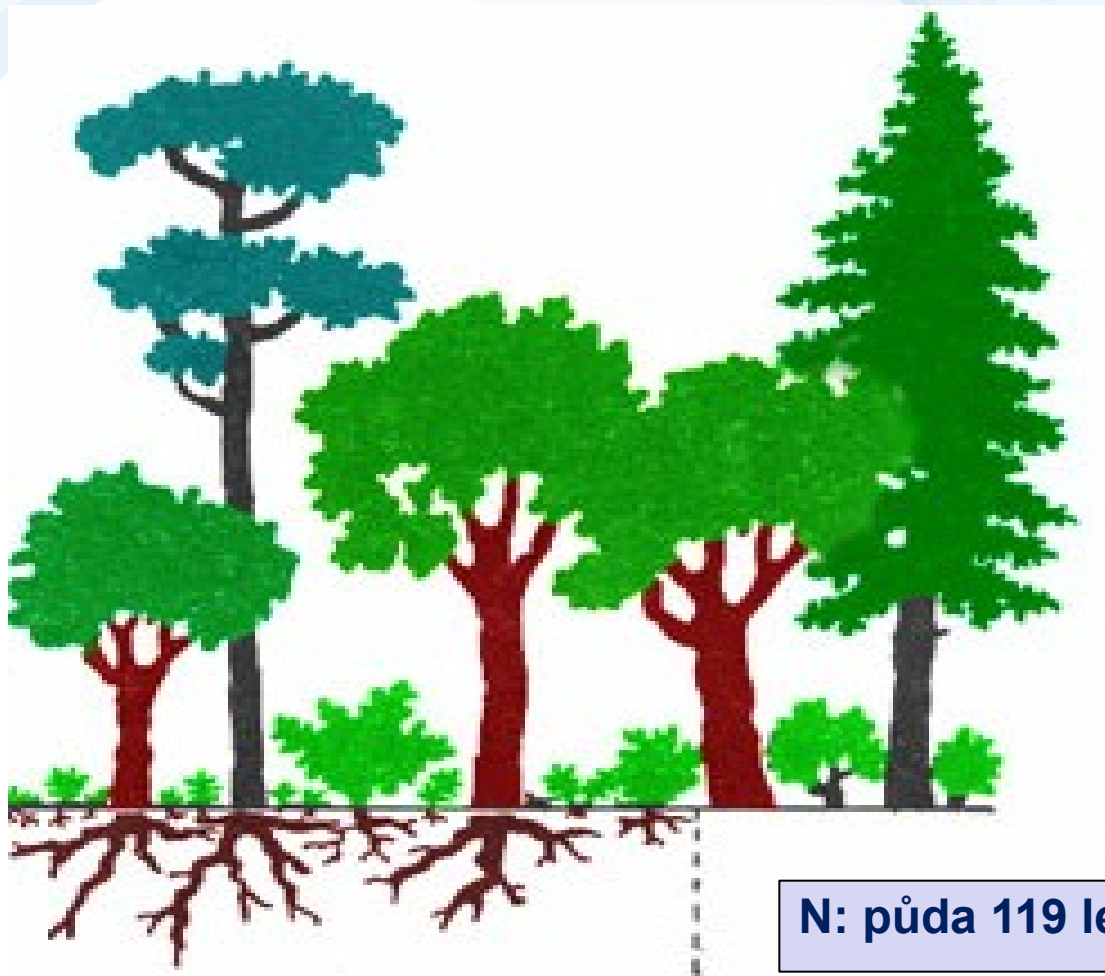


Fig. 2.6. The level of free energy for some biologically important nitrogen compounds.



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**

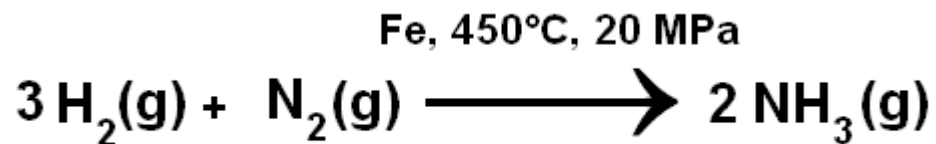
**N: půda 119 let**





# Co se změnilo s nástupem průmyslové revoluce?

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



spalování fosilních paliv

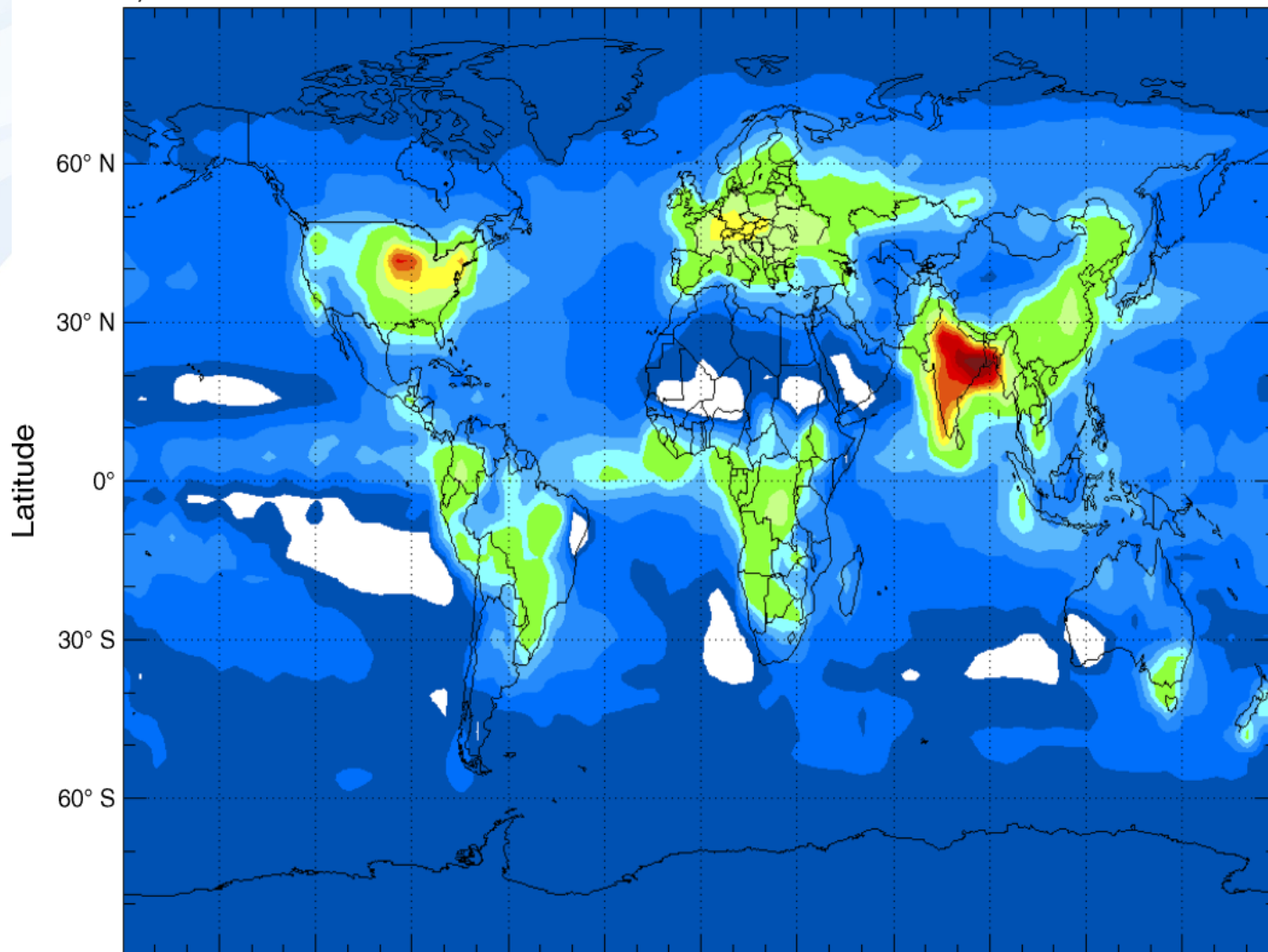


0,1 - 0,7 kg  
N.ha<sup>-1</sup>.rok<sup>-1</sup>

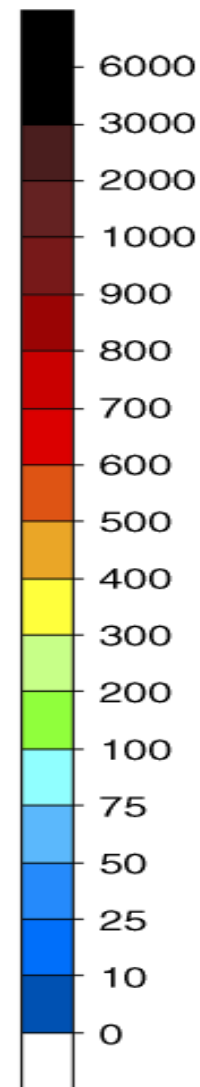
13 - 59 kg  
N.ha<sup>-1</sup>.rok<sup>-1</sup>



a) 1860

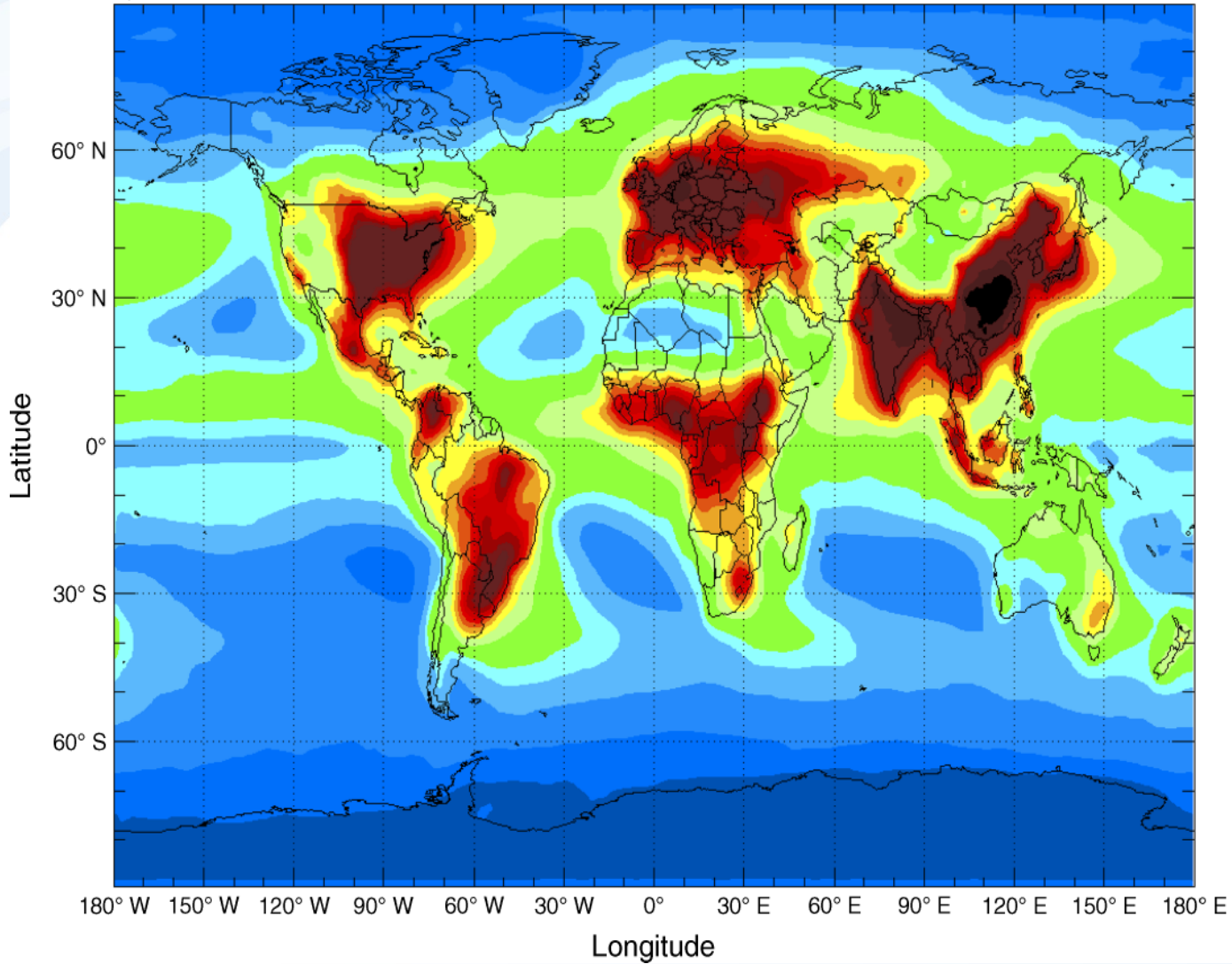


N deposition  
(mg N·m<sup>-2</sup>·yr<sup>-1</sup>)

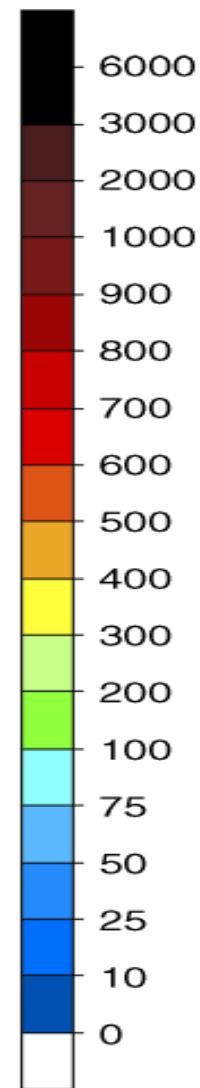


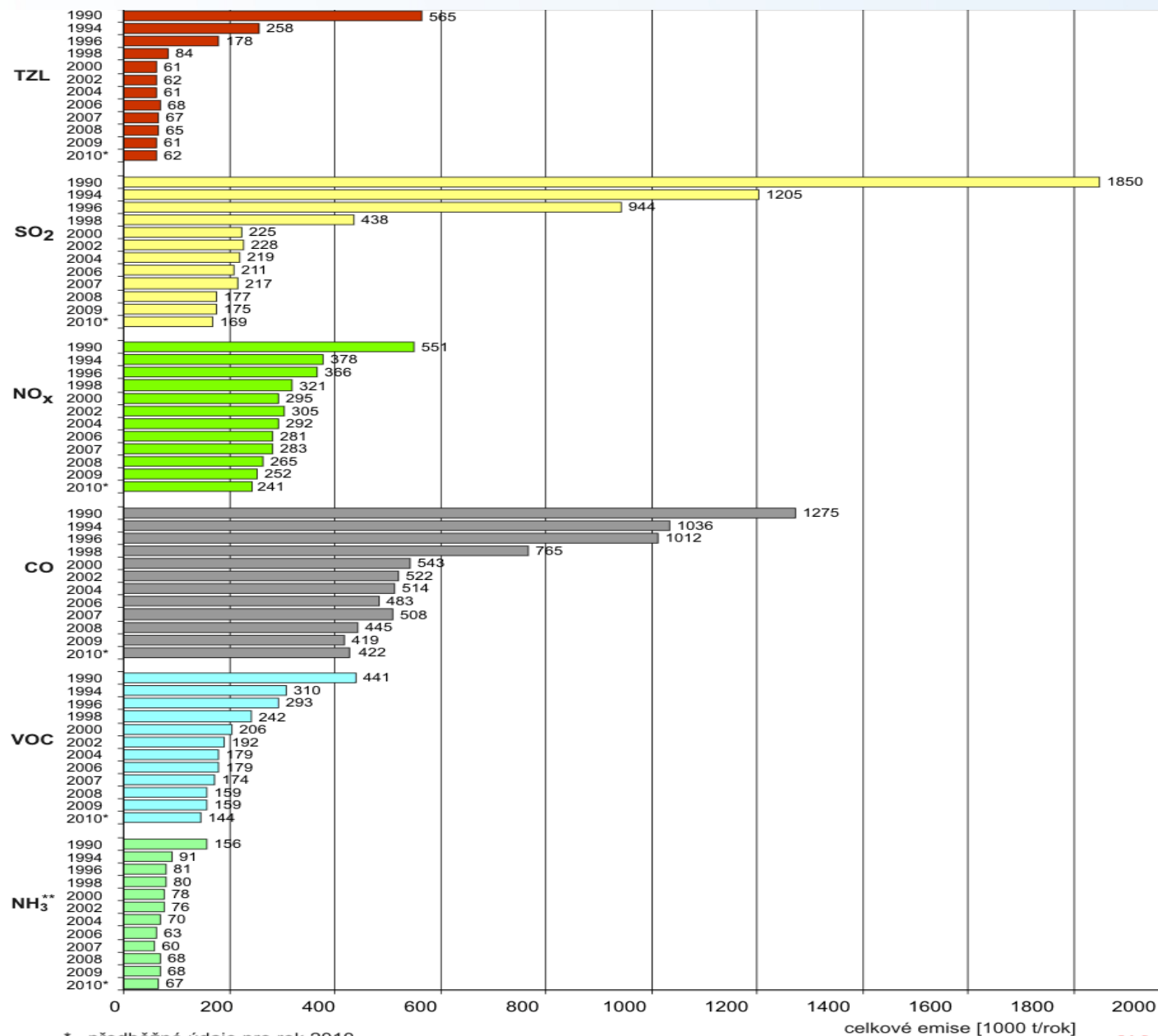
Centrum pro výzkum  
toxických látek  
v prostředí

b) 2000



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





\* předběžné údaje pro rok 2010

\*\* v r. 2008, 2009 a 2010 včetně emisí NH<sub>3</sub> z aplikace minerálních hnojiv

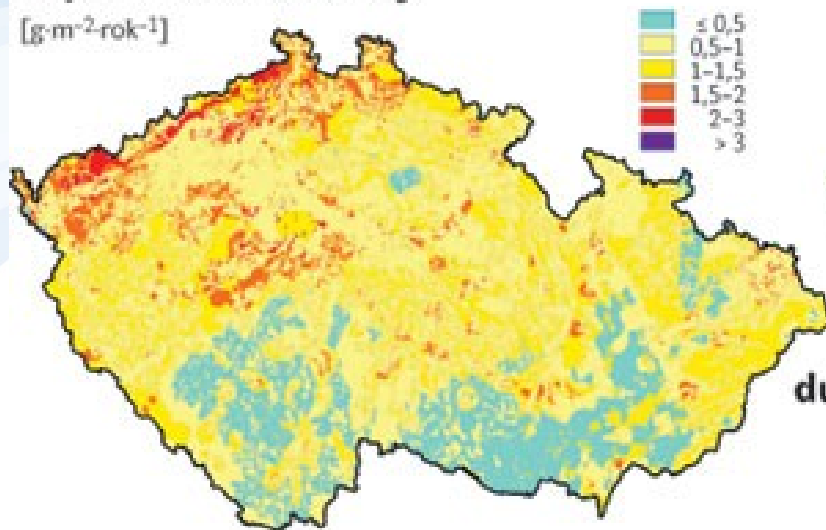
celkové emise [1000 t/rok]



## Celkové emise základních druhů látek znečišťujících ovzduší v České republice, 1990–2010

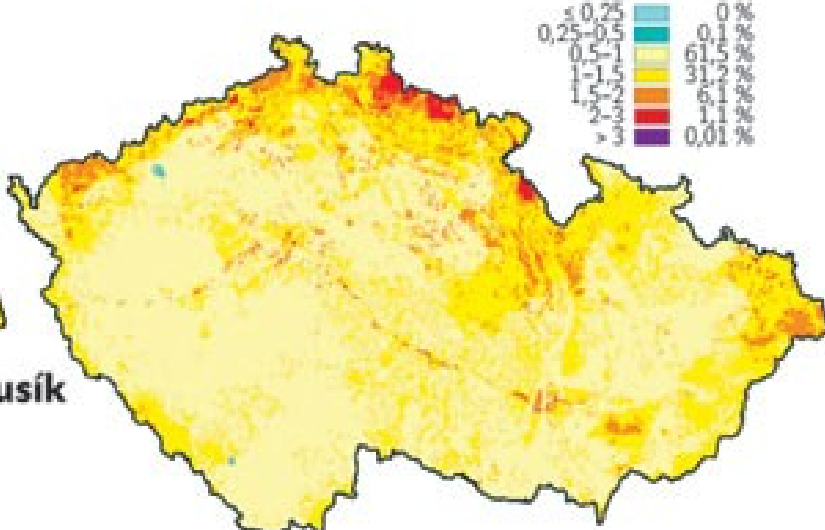
# depozice dusíku a síry

[g·m<sup>-2</sup>·rok<sup>-1</sup>]

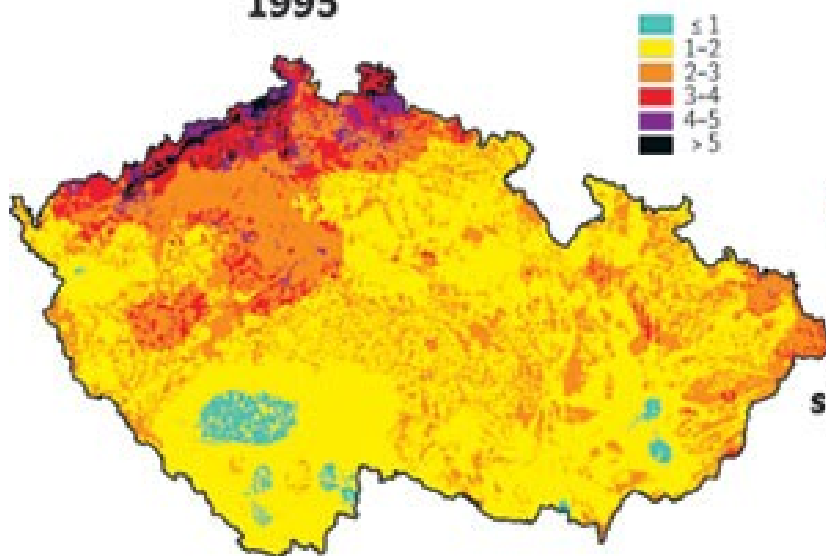


1995

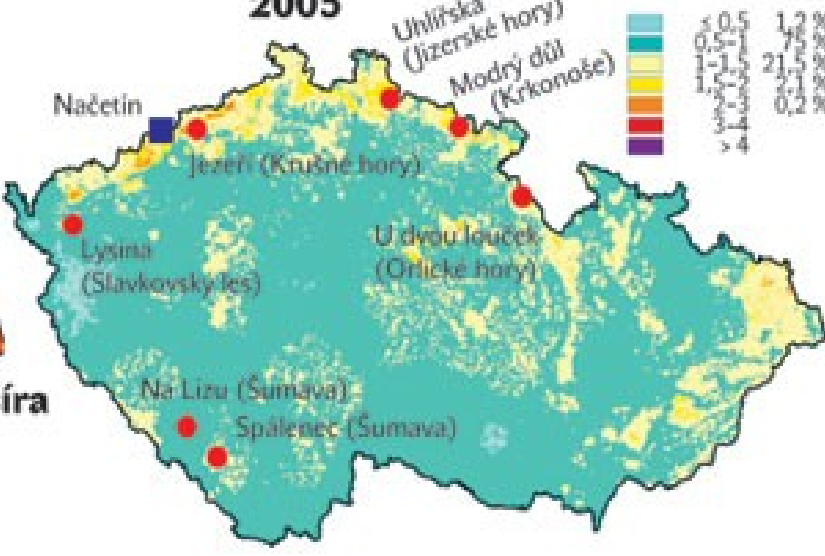
dusík



2005



síra



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

„ekosystémová globalizace“



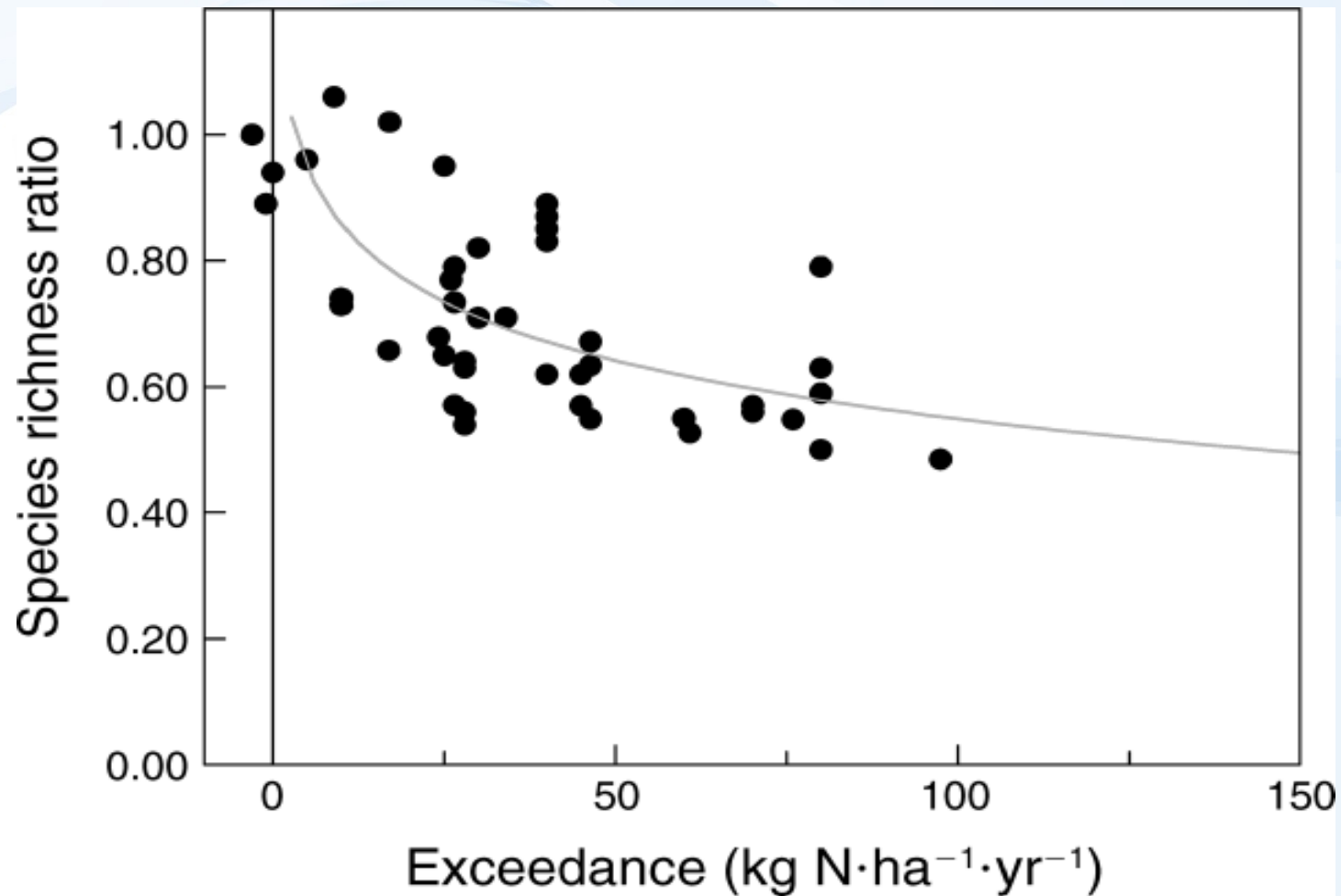
eutrofizace během velmi krátké doby „popřela“ význam vztahů mezi primárními producenty a symbiotickými fixátory atmosférického dusíku

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 nadbytkem 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  $\text{SO}_2$  a  $\text{NO}_x$  je problém poškozování lesních porostů na území České Republiky stále aktuální Německý spolkový

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

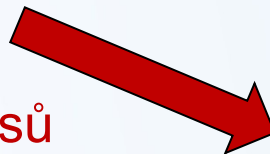
## Listnaté a jehličnaté lesy reagují na zvýšený vstup dusíku rozdílně:

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  $\text{NO}_3^-$  z ekosystému

skutečně byla nalezena silná negativní korelace mezi poměrem C/N a růstem výstupu  $\text{NO}_3^-$  z ekosystému pro jehličnaté lesy

oproti tomu listnaté porosty vykazují vysokou retenci dusíku ze zvýšeného vstupu



## Riziko vyplavování $\text{NO}_3^-$ ve smrkových porostech

Poměr C/N (organický hor.)	<25	25-30	>30
N stav ekosystému	saturace N	střední stav	limitace N
Riziko vyplavování $\text{NO}_3^-$	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

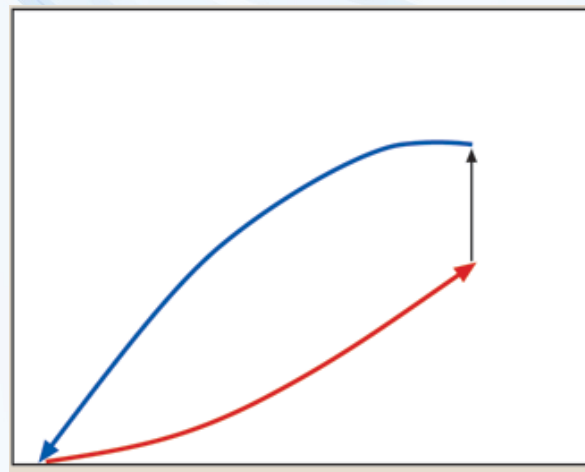
destabilizující a nepředvídatelné jsou rovněž důsledky vápnění degradovaných lesních ekosystémů (vápenec  $\text{CaCO}_3$ , dolomit  $(\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2$ , sádrovec  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )... bazické prvky se totiž stávají živinami limitujícími produkci ekosystému... **ale**



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

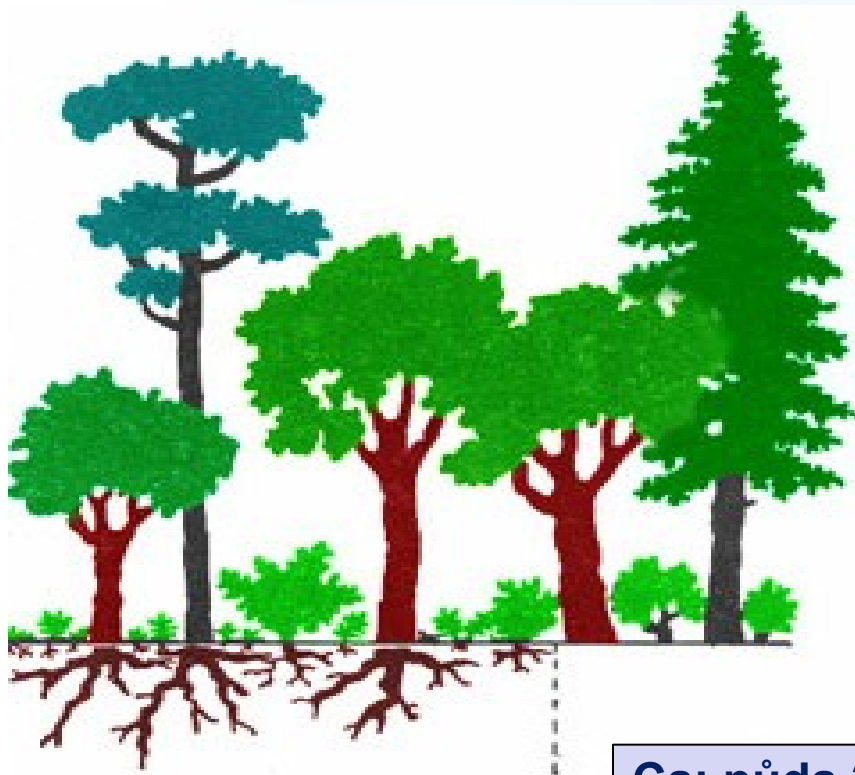


navíc snížení pH aplikací bazických kationtů může zvýšit nitrifikační potenciál a tedy přeměnu  $\text{NH}_4^+$  na  $\text{NO}_3^-$ , což může vést ke zvýšenému vyplavování dusíku z ekosystému



# 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

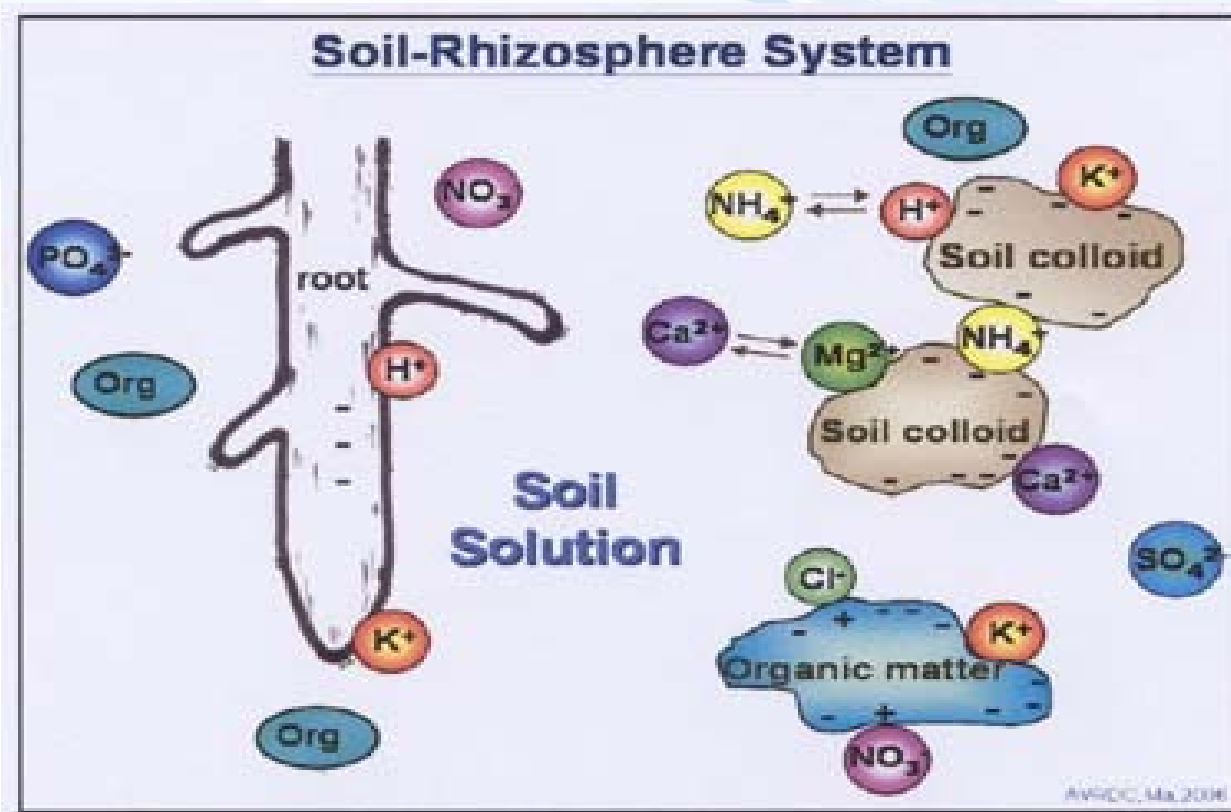
Ca: biomasa opadu  
5 let

Ca: půda 32 let

bazické ionty:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  
 $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$



# Humuso-jílový sorpční komplex

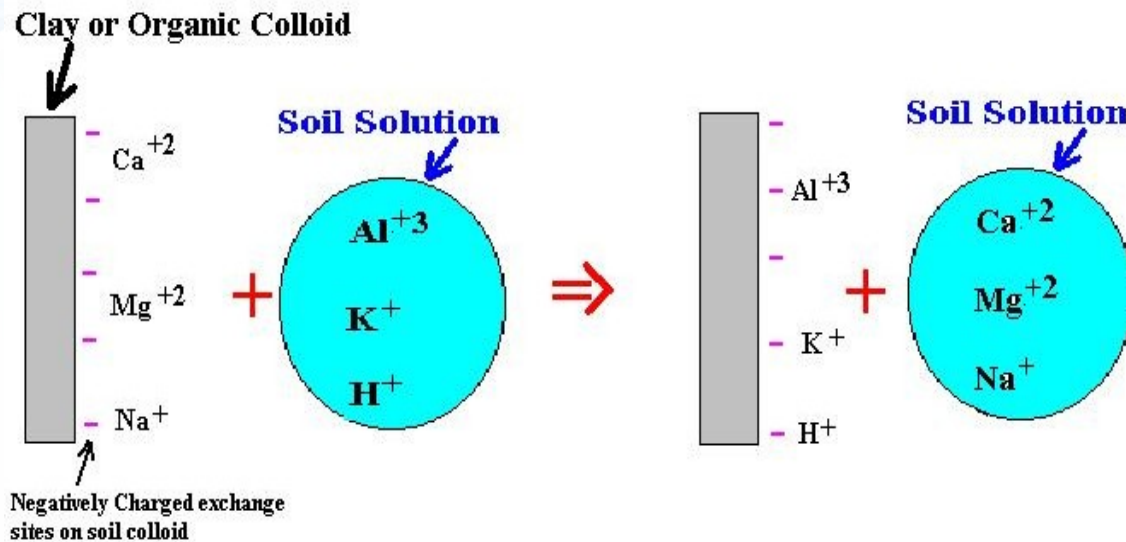


- humusové látky + jílové minerály
- výměnný mechanismus
- rovnovážný proces

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 určíme 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

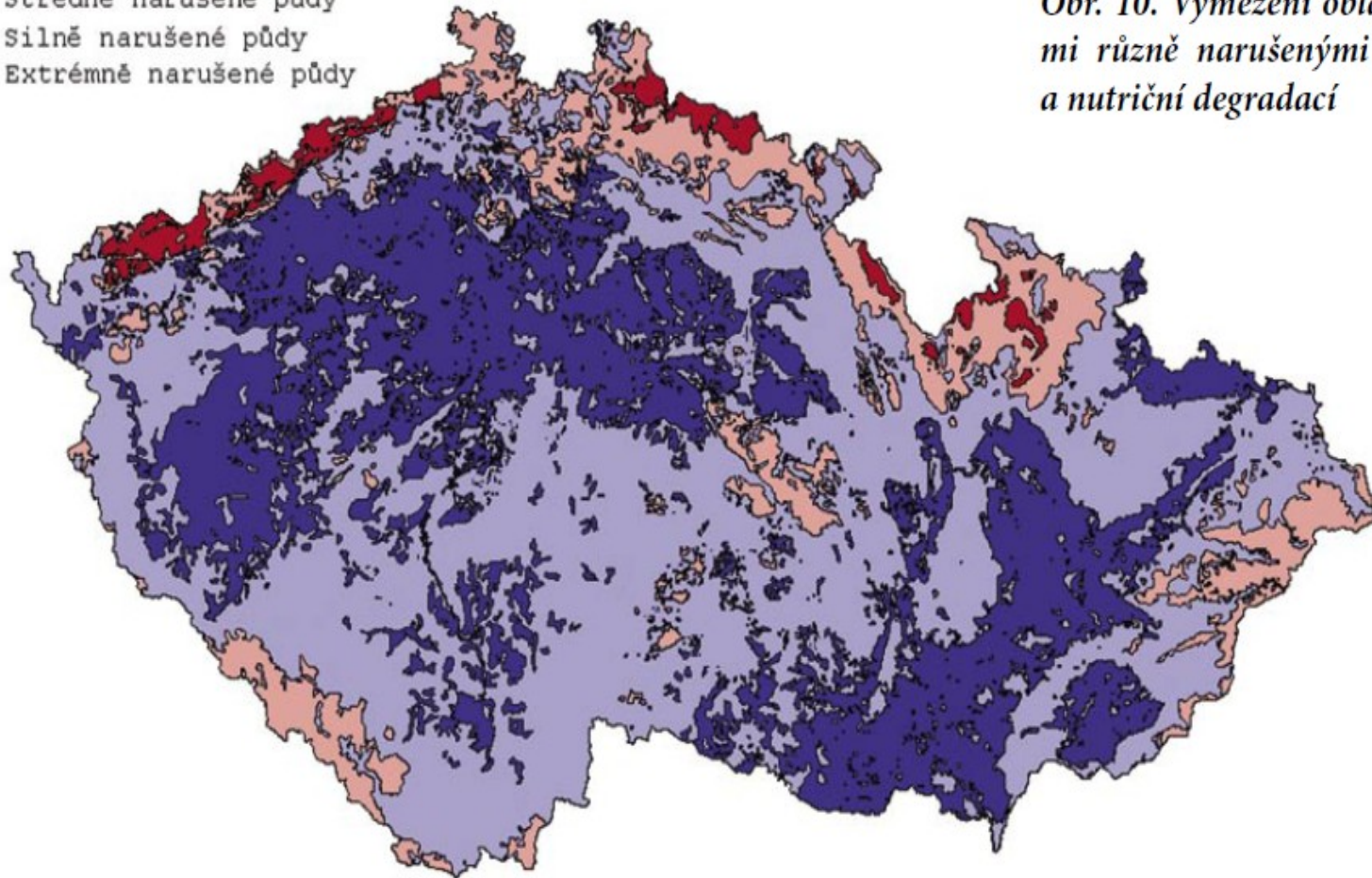


jsou-li do půdního prostředí importovány protony, dochází k vyplavování bazických iontů z humuso-jílového komplexu do půdního roztoku a tyto bazické ionty pak mohou být snadno vyplaveny i z ekosystému

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



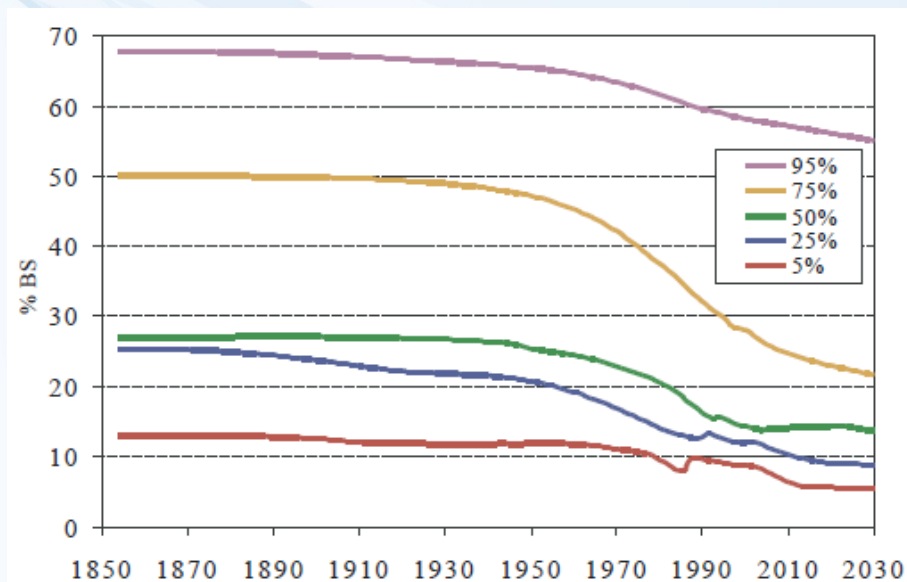
*Obr. 10. Vymezení oblastí s půdami různě narušenými acidifikací a nutriční degradací*



## 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  $\text{NO}_3^-$  oproti rokům 1955 – 1959



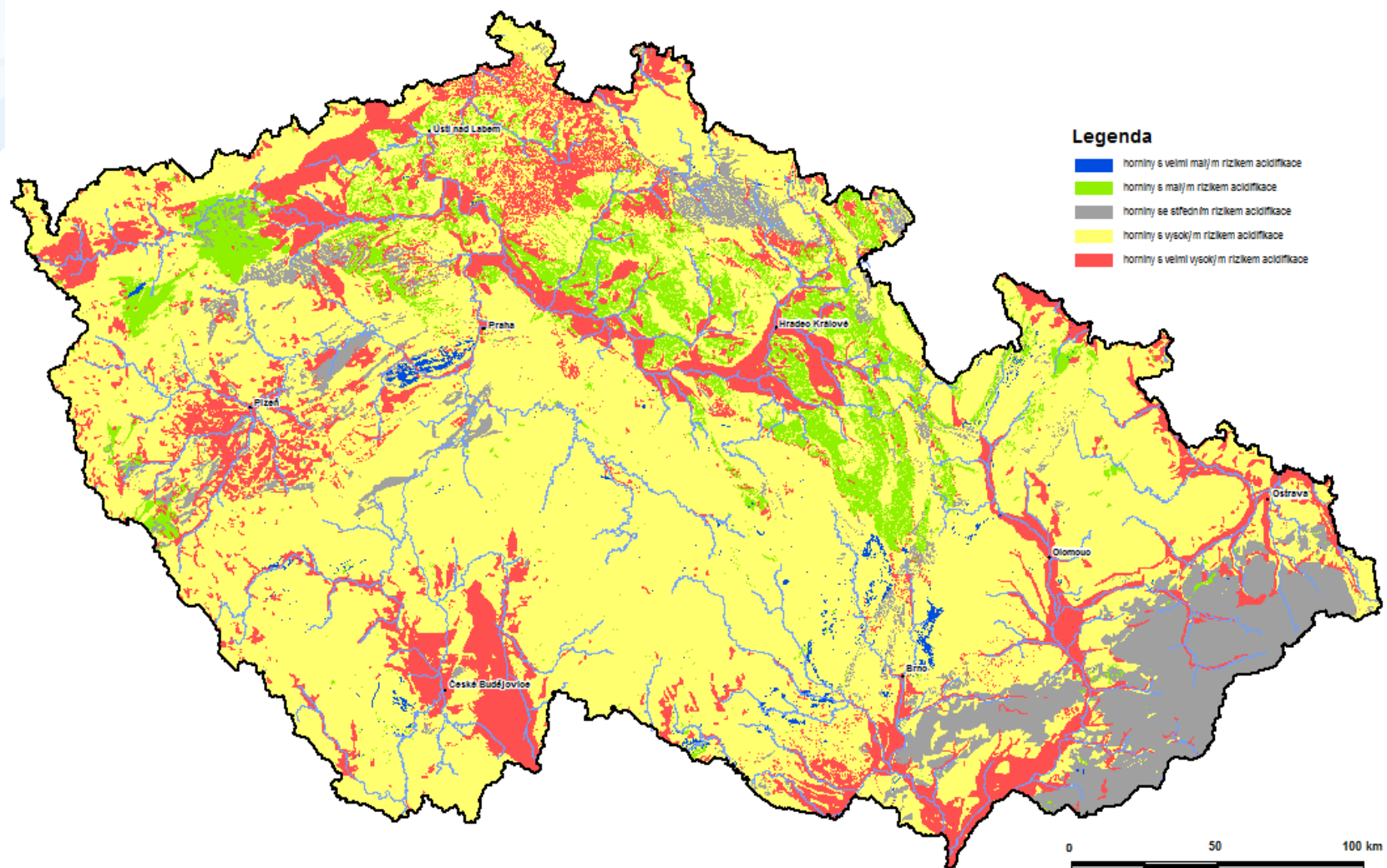
Obr. 11. Pokles bazické saturace lesních půd v ČR mezi lety 1850 – 2030 modelovaný modelem MAGIC na základě sledování v letech 1993 – 2004. 50% percentil je medián (nejčtenější hodnota) všech hodnot, 5% kvantil reprezentuje podíl půd, jejichž zastoupení v souboru je 5% nejnižších hodnot. Naopak 95% percentil 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  
 $\text{kmol}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$



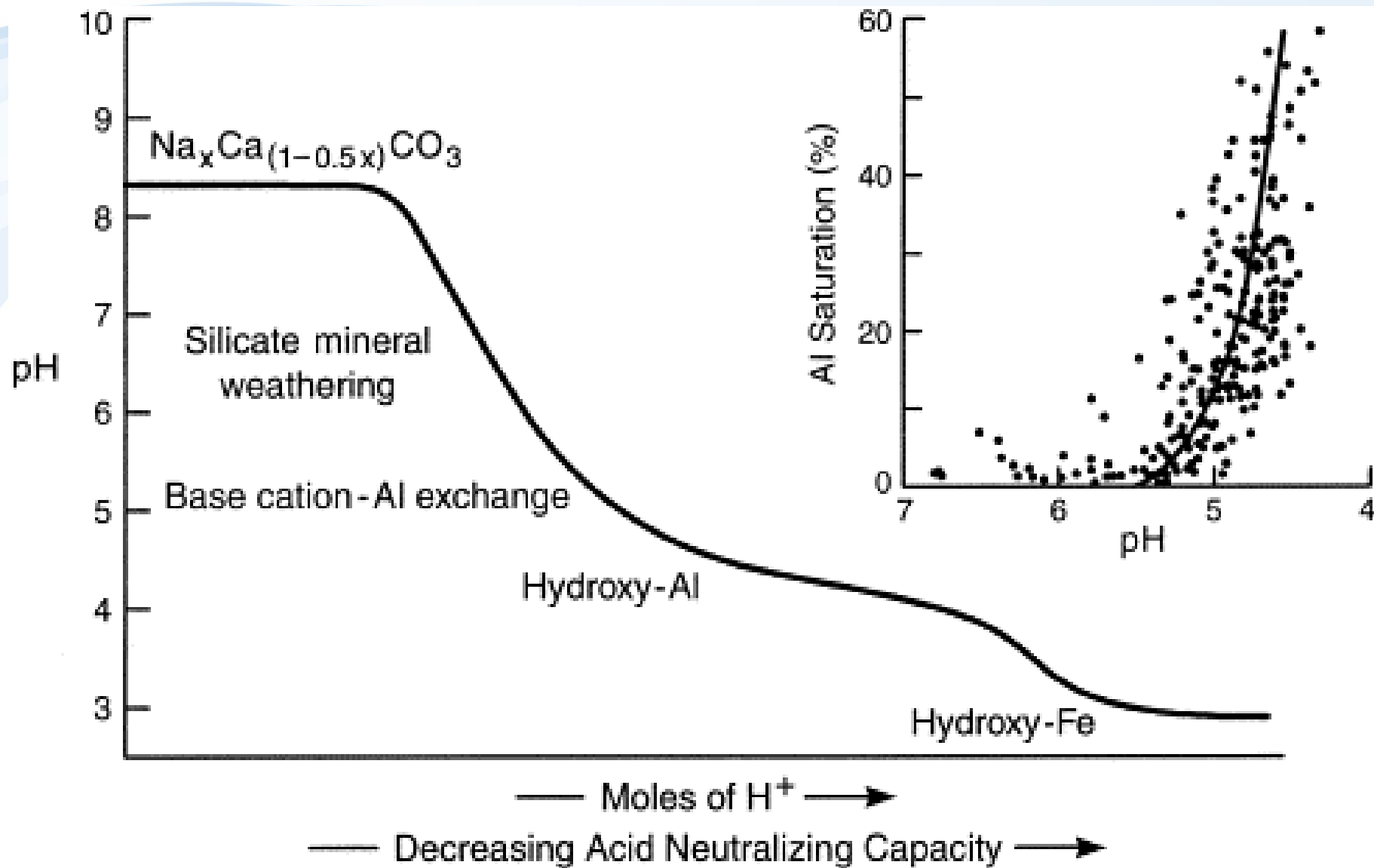
# Přehled důležitých puфраčních komplexů v půdě

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	$\text{clay mineral}=\text{Ca} + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{H-clay mineral-H} + \text{Ca}^{2+}$
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	$\text{FeOOH} + 3\text{H}^+ \rightarrow \text{Fe}^{3+} + 2\text{H}_2\text{O}$







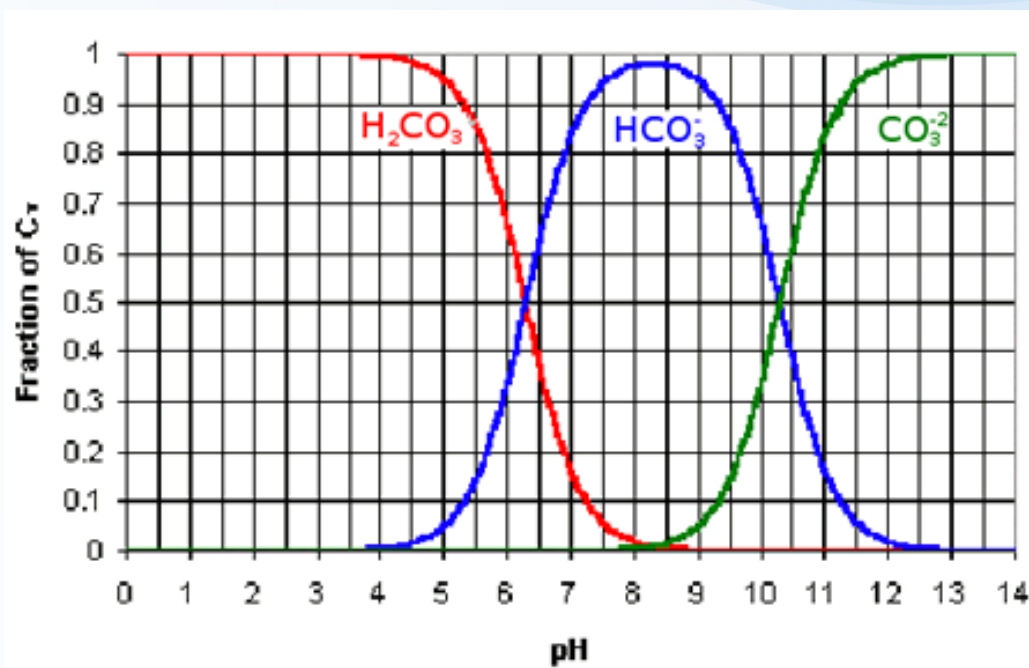
## Uhličitanový pufrací systém (pH 8,0 – 6,2)

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

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

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

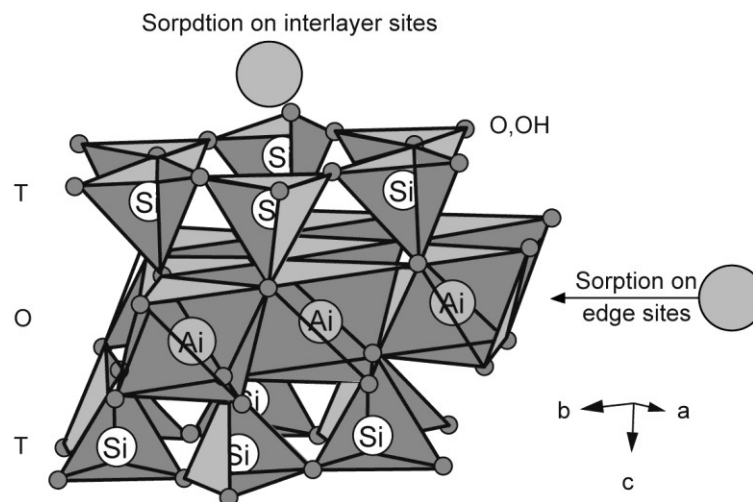
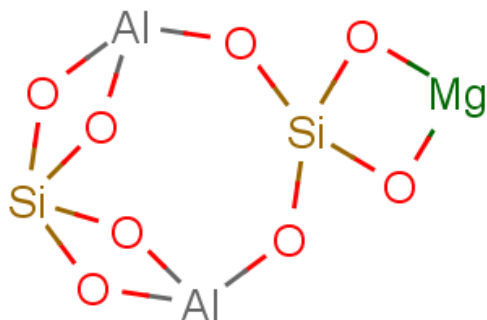


## Silikátový pufrací systém (pH 6,2 – 5,0)

pokud půdotvorný substrát neobsahuje bazické složky jako vápenec nebo dolomit je u okyselovaných půd zprvu vyčerpáván silikátový pufrací 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 pufrací rychlost těchto procesů je velmi nízká, proto bývají souběžně zapojeny i další pufrací mechanismy

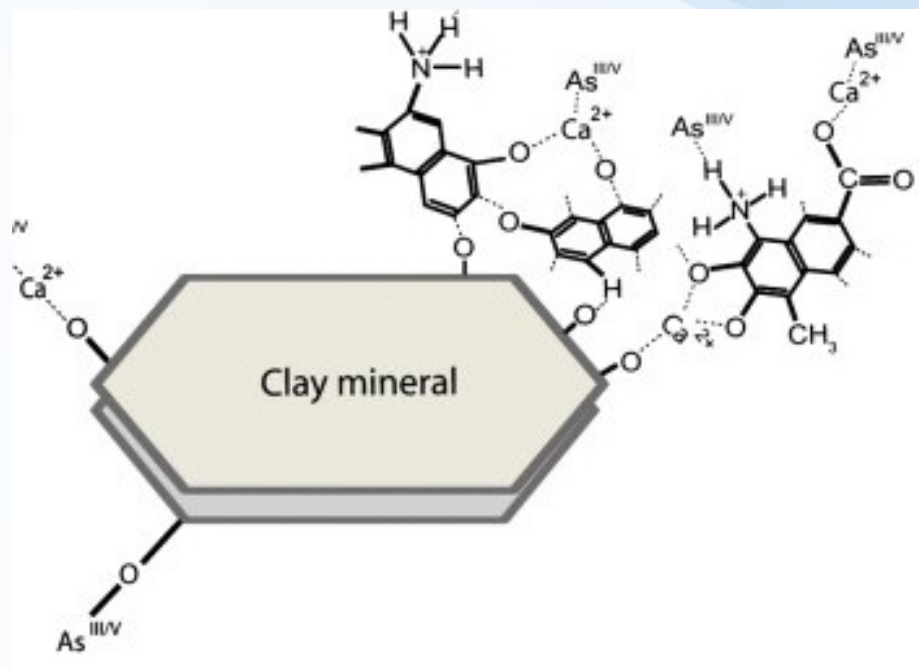


## *Kationtově-výměnný puфраční mechanismus (4,2 – 5,0)*

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)

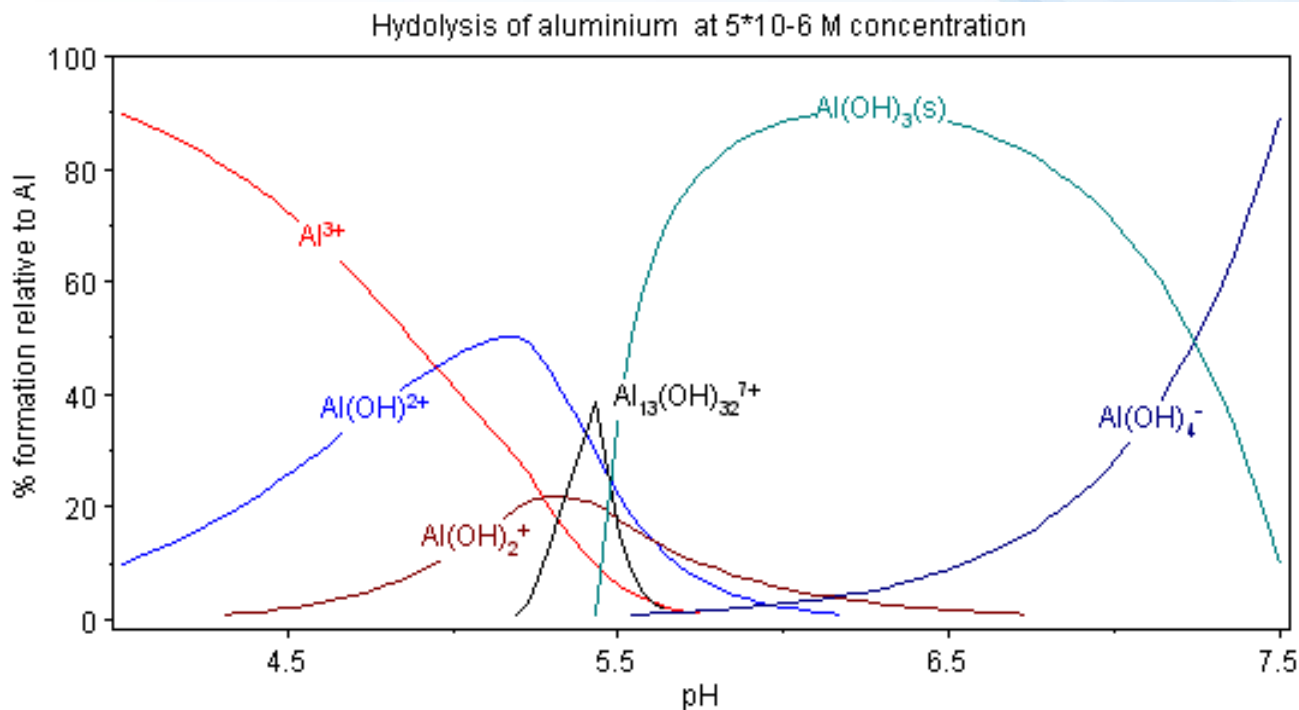


## *Pufrační oblast hliníku a železa (4,2 a níže)*

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

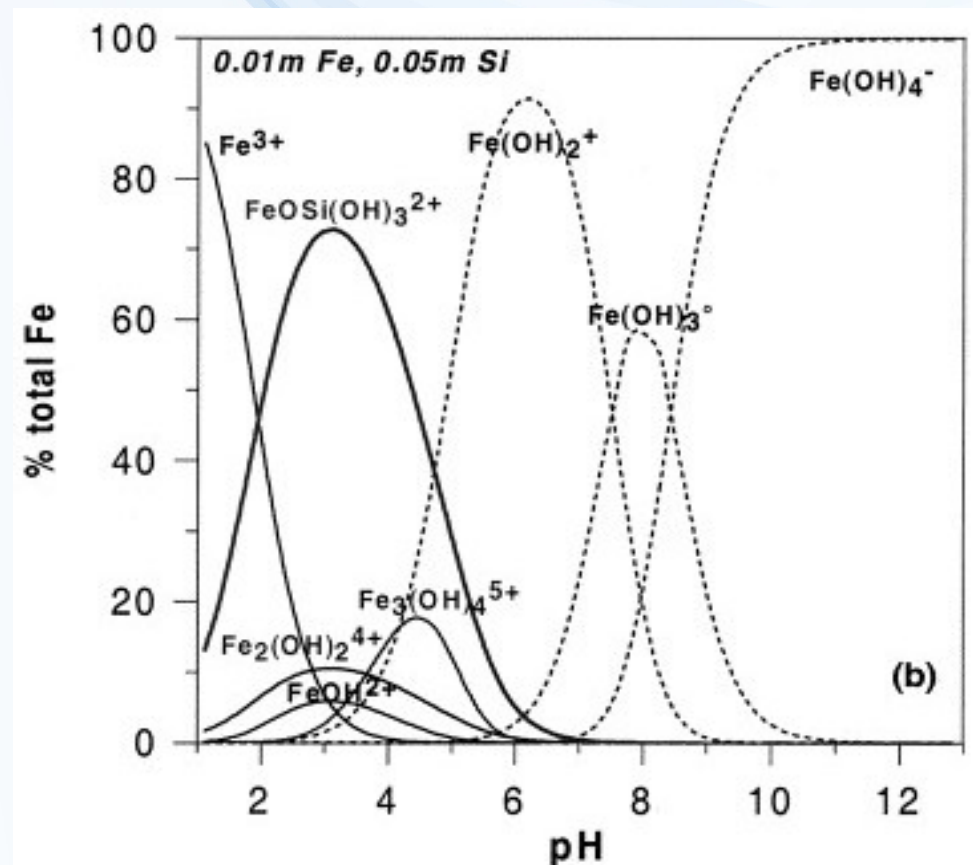
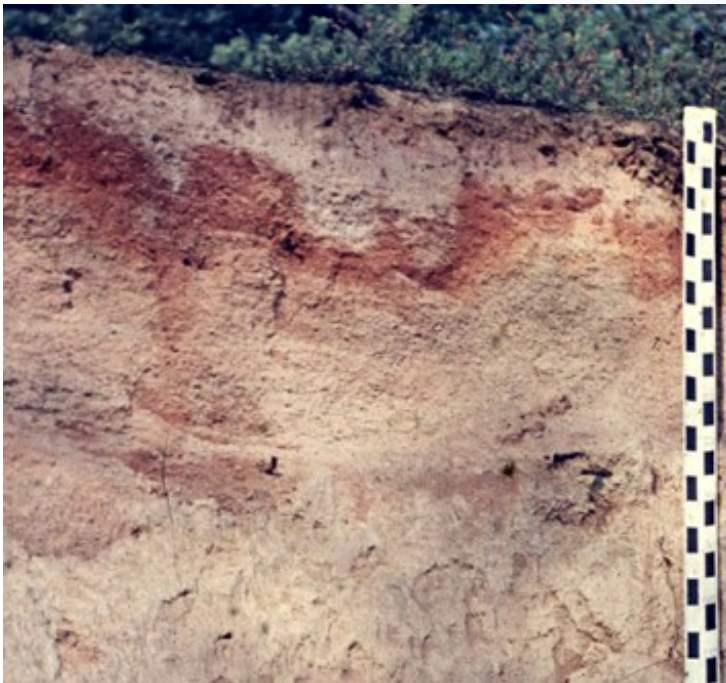
hliník je přirozeně přítomen ve velkém množství v hlinitokřemičitanech a dalších půdních komponentách, ovšem v neškodné formě

volný hlinitý iont  $\text{Al}^{3+}$  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  $\text{Fe}^{3+}$  iontů půdním profilem, to se projeví viditelnými změnami v půdním profilu (vznik ortěejnů)

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



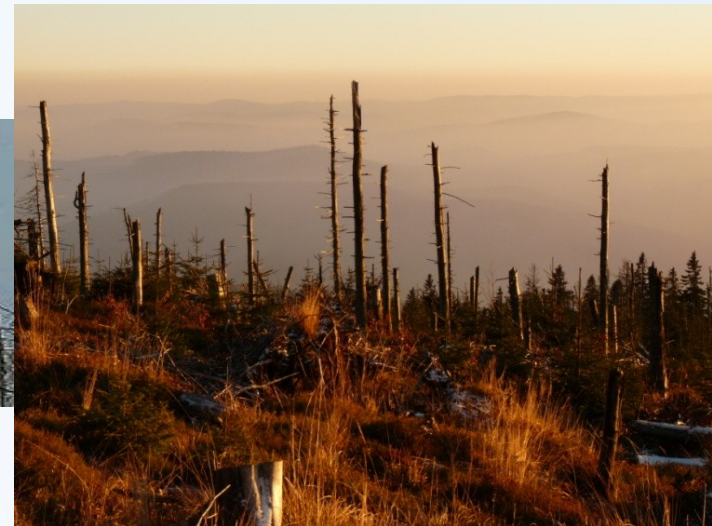
# Indikátory pro určení nedostatku bazických iontů v lesních ekosystémech

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  $\text{Al}^{3+}$  (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  $\text{Al}^{3+}$

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 středoevropských 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  **$Bc/Al$**

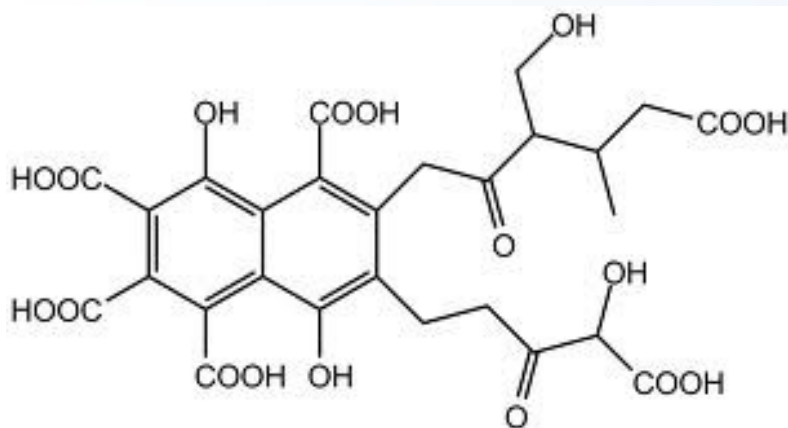
buk je relativně odolný proti hliníkovému stresu, naopak hůře snáší pokles pH

$Bc = Ca, Mg, K$



# proč se nesetkáváme s hliníkový stresem v neznečištěných horských smrčínách či boreálních lesích?

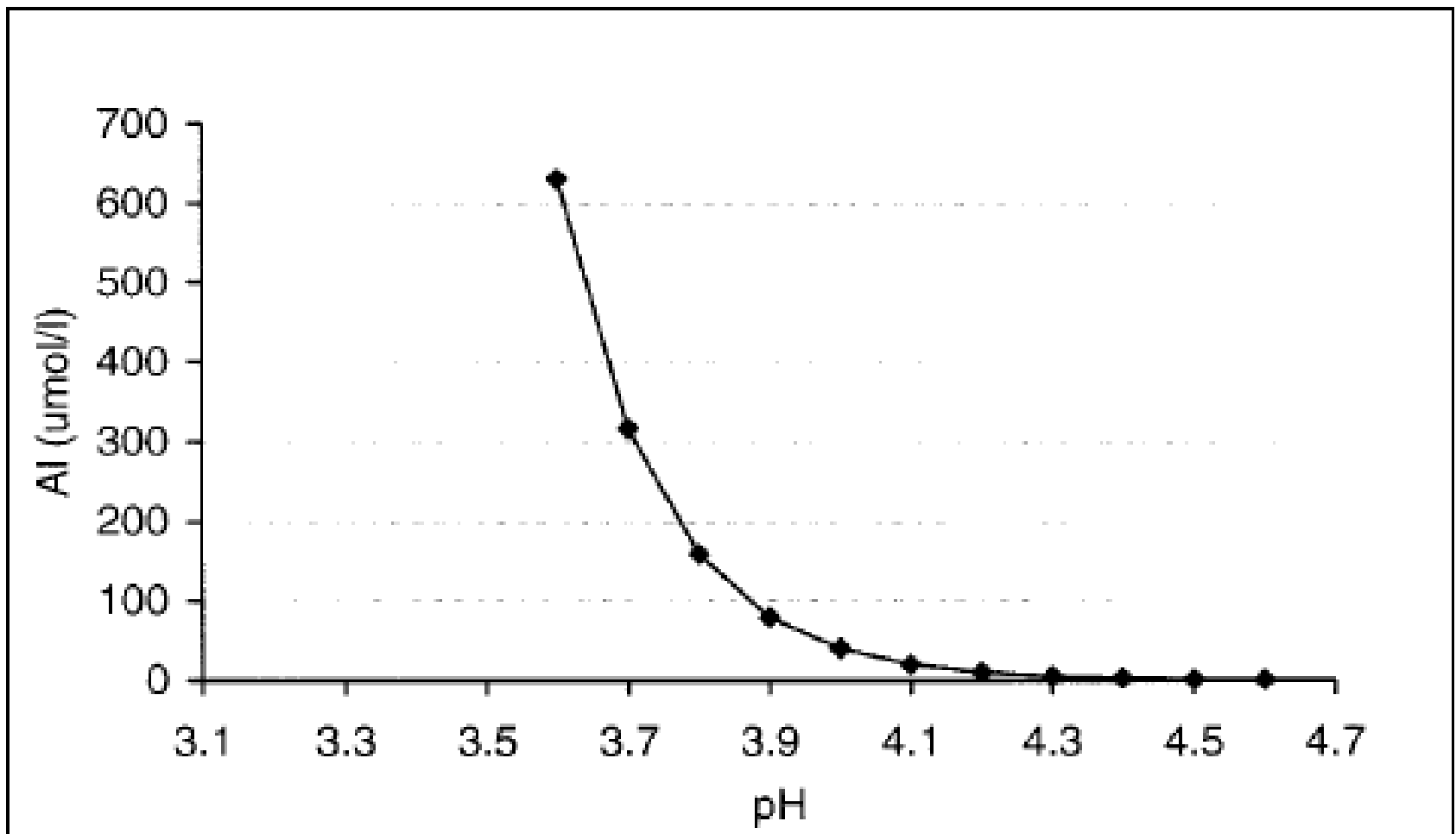
...humínové kyseliny a fulvokyseliny  
vážou  $\text{Al}^{3+}$  do komplexu...



naproti tomu anorganické kyseliny (především  $\text{H}_2\text{SO}_4$  a  $\text{HNO}_3$  z atmosférické depozice) jsou velmi špatná komplexační činidla pro kovové ionty, a proto uvolňují Al v jeho toxické formě  $\text{Al}^{3+}$



nárůst koncentrace volného  $\text{Al}^{3+}$  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

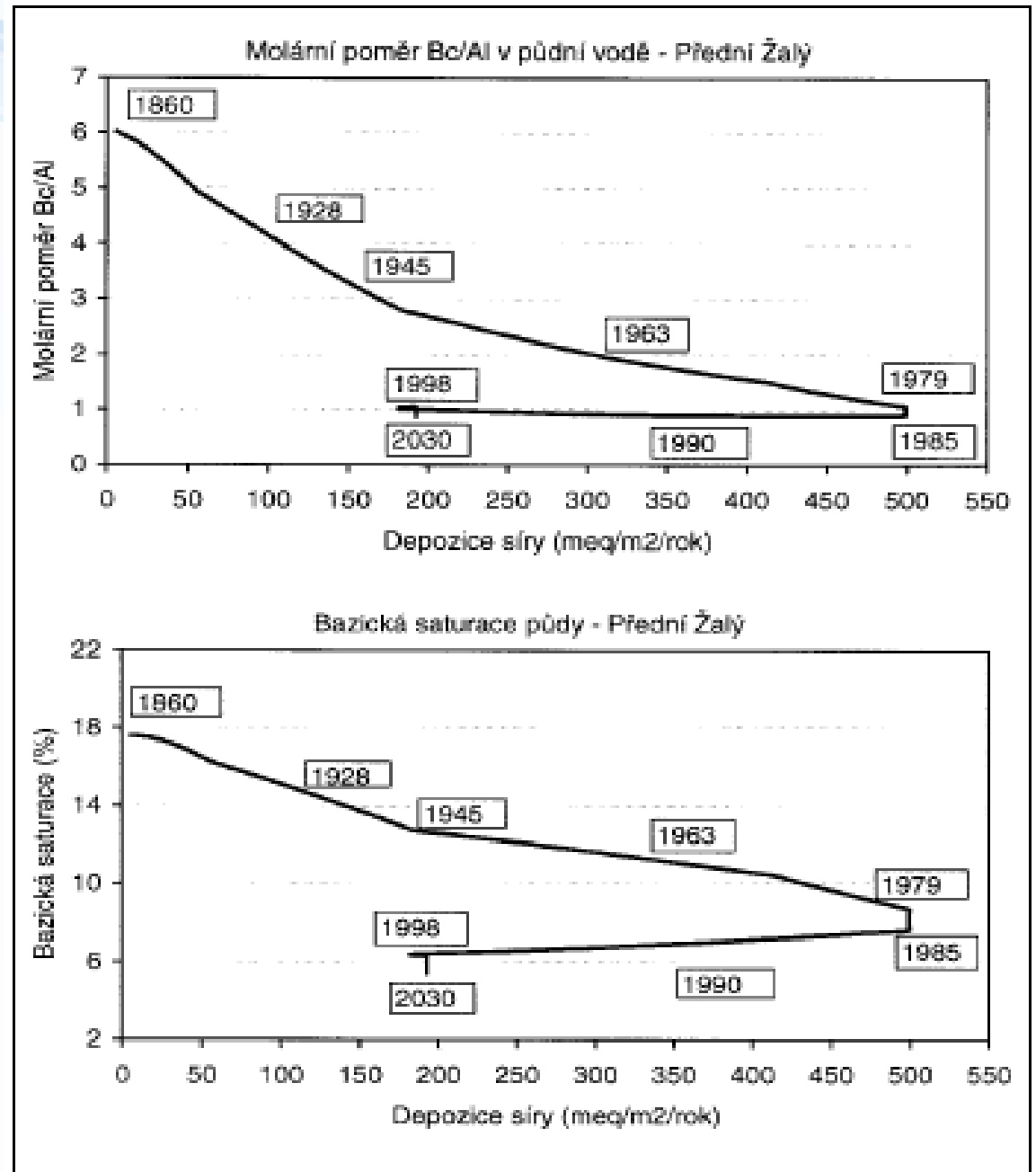
u poměru  $Bc/Al$  byla nalezena dobrá negativní korelace s mírou poškození stromové koruny (stupeň defoliace asimilačního aparátu v procentech) a počtem sekundárních výhonů

**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 případech, 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 zrcadlí 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 žiru 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 <sub>2</sub> , těžké kovy, fluor, ostatní vzdušné polutanty a mráz
Fichtelgebirge	mokrá depozice S a N, SO <sub>2</sub> , 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 <sub>3</sub> , SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , a NH <sub>3</sub> ). Vymývání Mg a Ca z půdy. Nedostatek Mg, K, a Mn ve výživě, sucho, václavka a kůrovec
Lcsy vnitřního Bavorska	kyselá námraza, nárazy mrazu, nevhodný výběr proveniencí
Holandsko	vstup N (NH <sub>3</sub> a NO <sub>3</sub> ), sucho a možný vliv O <sub>3</sub> , vstup N zvyšuje citlivost k ostatním stresům
Oblast Atén	poškození Pinus pinaster O <sub>3</sub> a jinými oxidanty



### **Případ 1:**

horská smrčina: půdotvorný substrát flyšové horniny, poměr C/N  $\approx$  25, půdní pH 5,7, celková koncentrace hliníku v roztoku (bez speciace) 150  $\mu\text{mol/l}$

### **Příklad 2:**

umělá smrčina (750 m.n.m.): půdotvorný substrát žula, poměr C/N  $\approx$  30, půdní pH 4,0, celková koncentrace hliníku v roztoku (bez speciace) 100  $\mu\text{mol/l}$

### **Příklad 3:**

hospodářská bučina: půdotvorný substrát pískovec, poměr C/N  $\approx$  15, půdní pH 3,5, celková koncentrace hliníku v roztoku (bez speciace) 150  $\mu\text{mol/l}$

**Jaký je hlavní stresor v konkrétních případech?**

**Jaký očekáváte v jednotlivých případech poměr Bc/Al?**

**Jak se projeví příslušný stres na stavu ekosystému?**