



# CHEMIE OVZDUŠÍ

## Přednáška č. 8

# Organizace studia

- Přednášející: Ing. Marek Staf, Ph.D., tel.: 220 444 458  
e-mail: [marek.staf@vscht.cz](mailto:marek.staf@vscht.cz)  
web: <http://web.vscht.cz/~stafm/>  
budova A, ústav 216, č. dveří 162  
e-learning:  
<https://e-learning.vscht.cz/course/view.php?id=105>
- Rozsah předmětu: zimní semestr  
14 přednášek, 14 týdnů, 2 hodiny/týden
- Klasifikace: zkouška - ústní zkouška
- Poznámka: na předmět „Chemie ovzduší“ volně navazuje  
„Technologie ochrany ovzduší“ ⇒ prolínání obsahu  
cca 10 %

# Osnova přednášky 8

## Reakce vybraných polutantů a významných složek atmosféry – látky kysele reagující

- Rozdělení polutantů dle různých kritérií
- Nejdůležitější kysele reagující látky v ovzduší
- Oxidy síry: původ, historický vývoj emisí, účinky na zdraví a životní prostředí
- Kyselá depozice, acidifikace a eutrofizace povrchových vod
- Oxidy dusíku: původ, historický vývoj emisí, účinky na zdraví a životní prostředí
- Základní atmosférické reakce oxidů dusíku

# Rozdělení polutantů

- Polutanty lze dělit do následujících základních skupin:

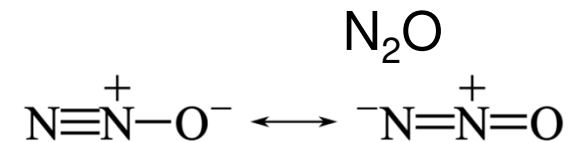
- Látky reagující kyselou - snižující pH atmosféry a následně půdy a vody;
- Látky toxické - chemicky, fyzikálně nebo radioaktivitou poškozující zdraví rostlin a živočichů;
- Látky poškozující O<sub>3</sub> - rozkládající stratosférickou ozonovou vrstvu;
- Skleníkové plyny - látky měnící bilanci absorpce a vyzařování tepla z atmosféry
- Prekurzory - látky, ve výchozí podobě bez nebezpečných vlastností, ale podléhající přeměnám na výše uvedené nebo umožňující jiným látkám se nebezpečně transformovat

# Látky reagující kyselě

- Hlavní kyselě reagující látky:

- Oxidy dusíku (NO<sub>x</sub>)

Oxid dusný (azoxid) Nitrous oxide



Oxid dusnatý

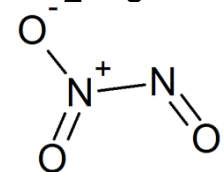
Nitric oxide (nitrogen monoxide)

NO

Oxid dusitý

Dinitrogen trioxide

N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



Oxid dusičitý

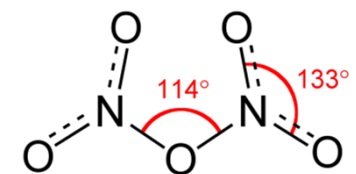
Nitrogen dioxide

NO<sub>2</sub>

Oxid dusičný

Dinitrogen pentoxide

N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>



Pozn. 1: Oxid dusitý vzniká pouze při nízkých teplotách (< 21 °C), a to vratnou reakcí  $\text{NO} + \text{NO}_2 \leftrightarrow \text{N}_2\text{O}_3$ .

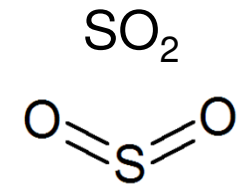
Pozn. 2: Oxid dusičný je krystalická látka, sublimující při  $t > 30$  °C.

# Látky reagující kyselě

- Hlavní kyselě reagující látky:

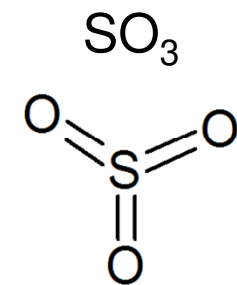
- Oxidy síry ( $\text{SO}_x$ )  
Oxid siřičitý

Sulfur dioxide



- Oxid sírový

Sulfur trioxide



# Původ emisí oxidů síry

- Přírodní emise:

- Sopečné plyny

- Ve formě kyseliny siřičité v minerálních pramenech – uvolňování par

- Antropogenní emise:

- Spalovací procesy

- Především energetika (spalování uhlí, méně pak ropy);

- Ostatní procesy

- Petrochemický průmysl (rafinérie ropy);

- Metalurgie (tavení a spékání rud, např. výroba mědi);

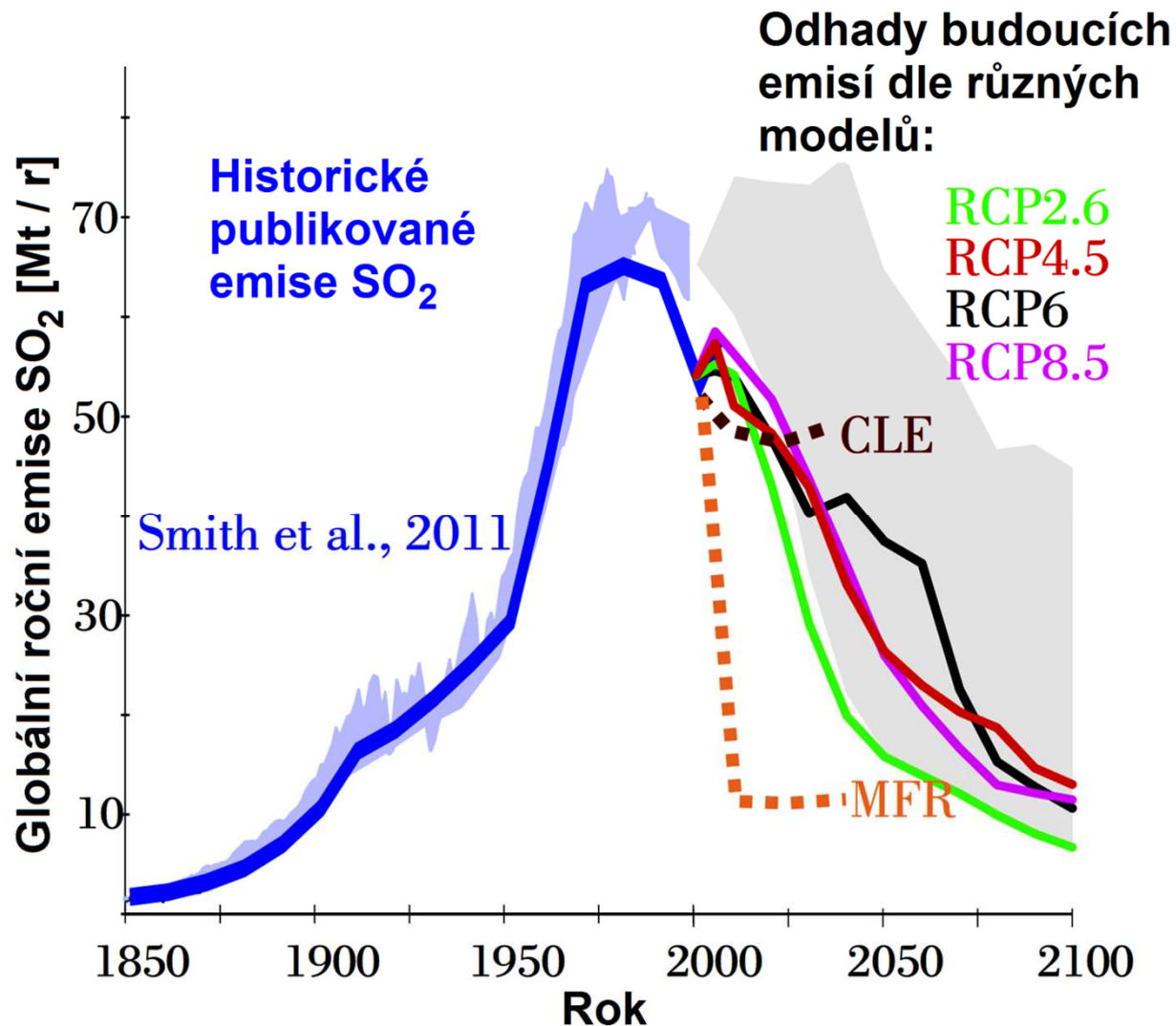
- Chemický průmysl;

- Doprava (spalování vysokosirných kapalných paliv v lokomotivách, velkých lodích apod.)



# Původ emisí oxidů síry

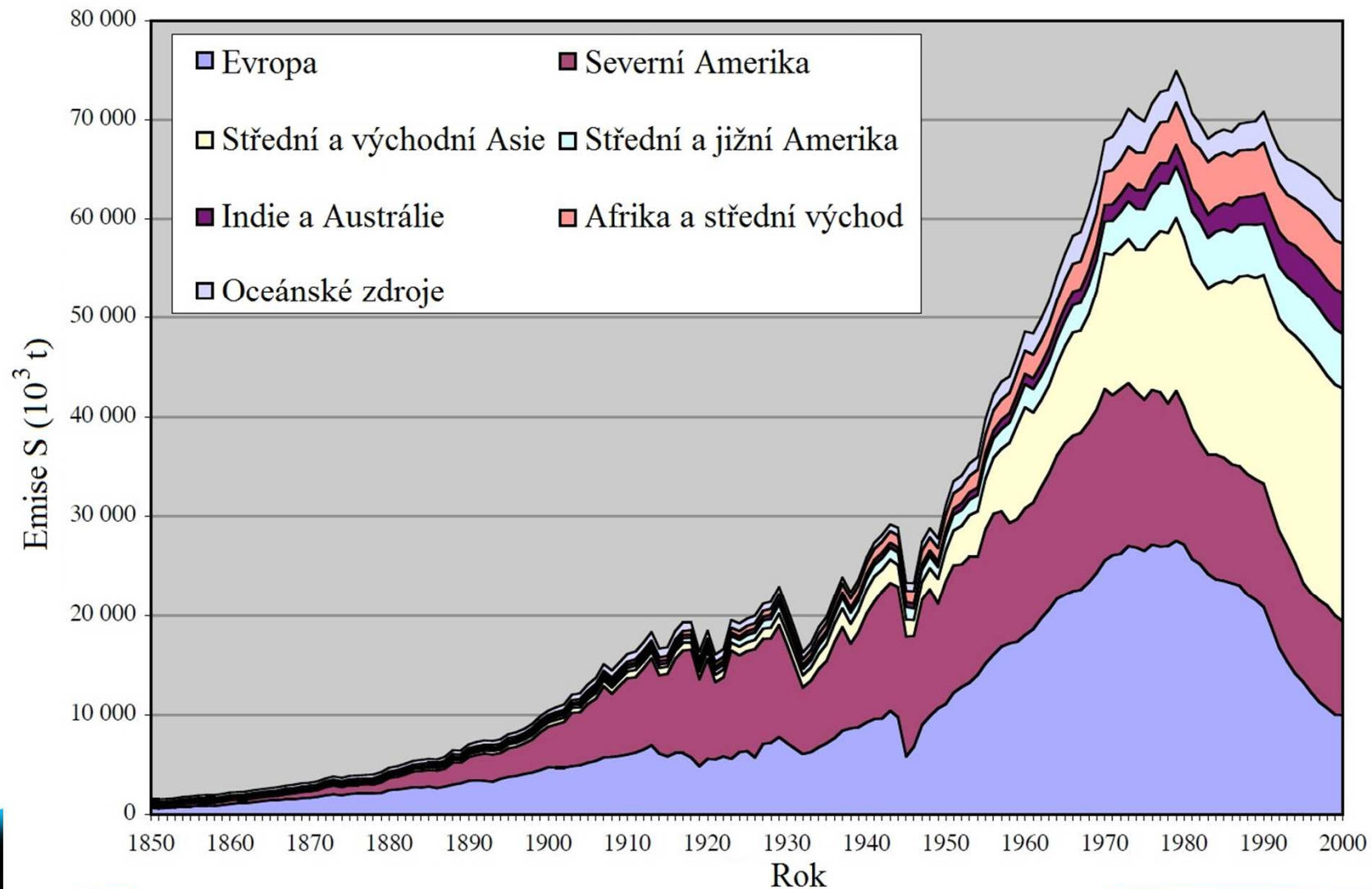
- Předpokládaný vývoj emisí  $\text{SO}_2$  – dle různých modelů (Zdroj: Cofala et al., 2007)





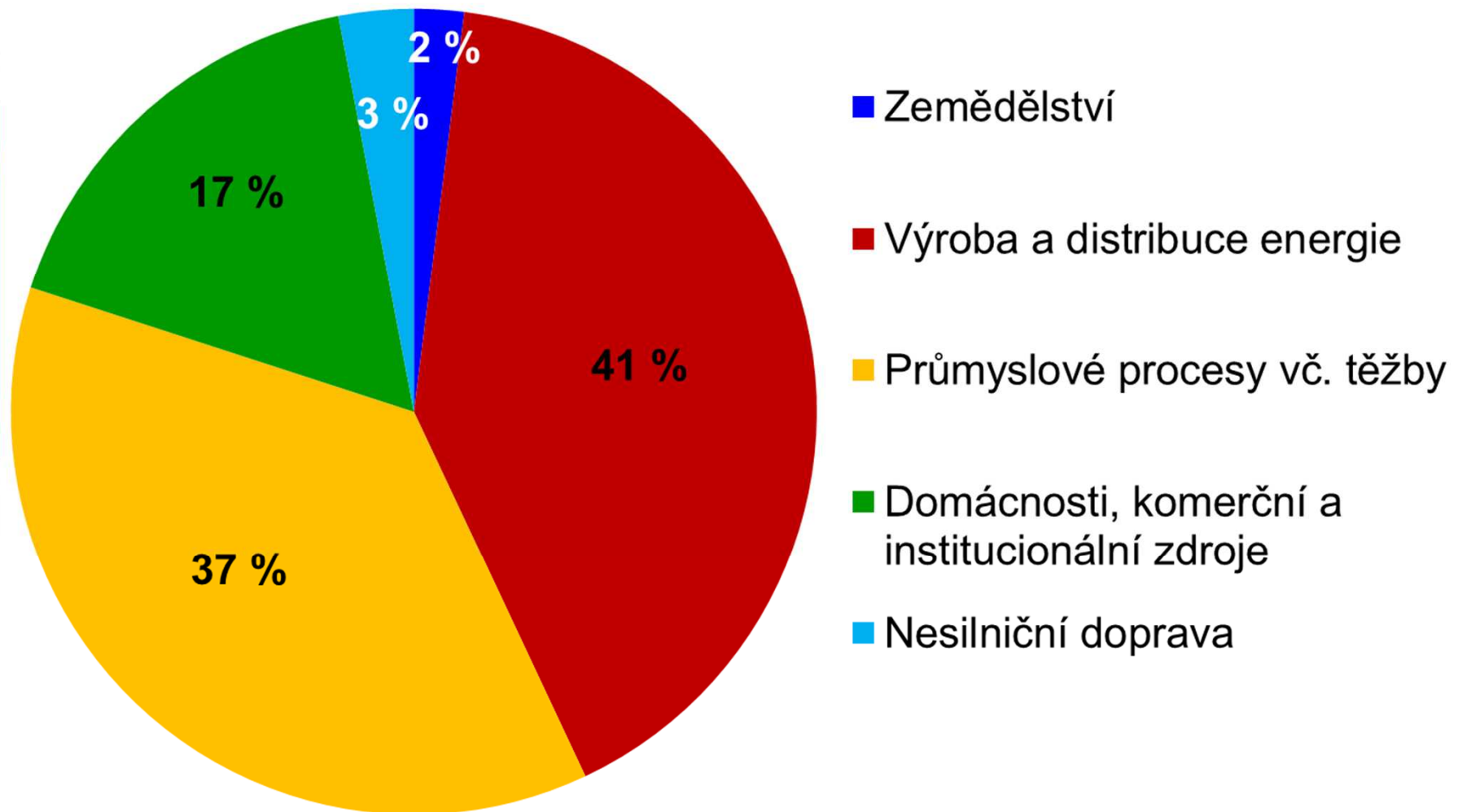
# Původ emisí oxidů síry

- Časový vývoj emisí oxidů síry v přepočtu na S (Zdroj: Pacific Northwest National Laboratory)



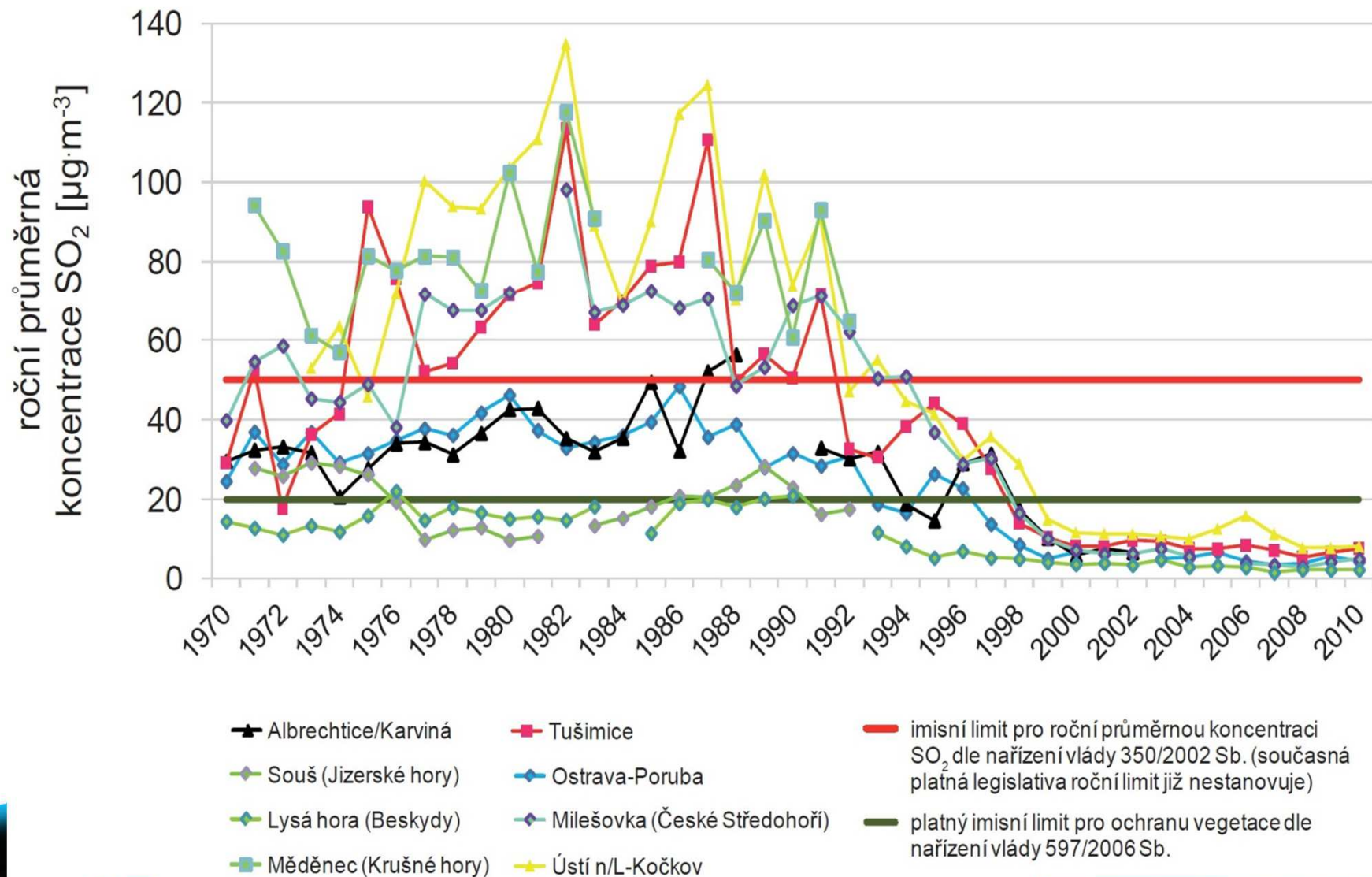
# Původ emisí oxidů síry

- **Distribuce zdrojů v EU v r. 2020** (Zdroj: [www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2022/sources-and-emissions-of-air](http://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2022/sources-and-emissions-of-air))



# Původ emisí oxidů síry

- Imise SO<sub>2</sub> v ČR v období 1971 – 2011 (Zdroj: ČHMÚ Praha, <http://portal.chmi.cz>)



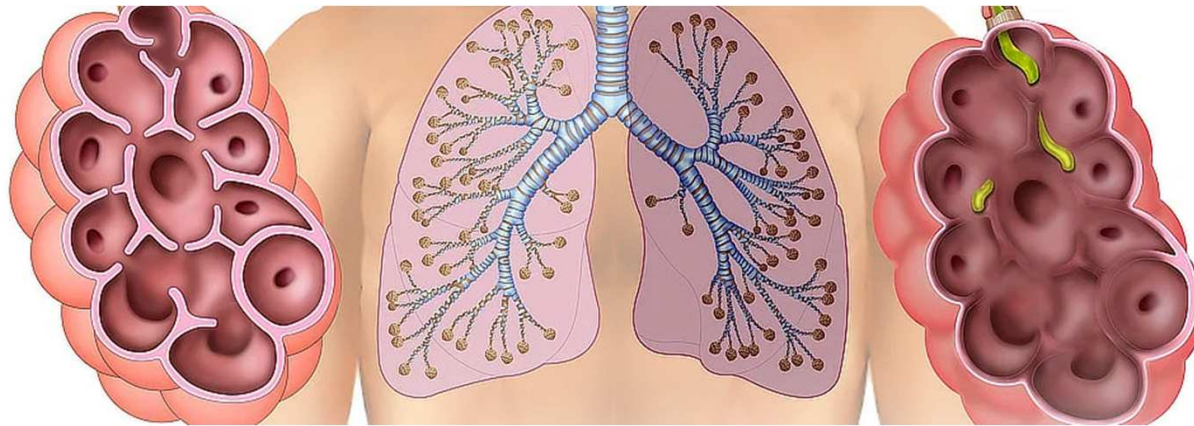
# Účinky oxidů síry

- **Onemocnění v důsledku expozice** (Zdroj: WHO)
  - Krátkodobá expozice imisemi SO<sub>2</sub>, v délce trvání 5 minut až 24 hodin, má negativní vliv na dýchací ústrojí. Akutní následky expozice jsou: bronchokonstrikce (zúžení průdušek), přecházející v astma.
  - Postiženi jsou zejm. diagnostikovaní astmatici, především při zvýšené fyzické zátěži, vyžadující zvýšenou plicní ventilaci.
  - Rizikové skupiny obyvatelstva: děti, staré osoby, těhotné ženy, osoby s chronickým onemocněním dýchacího ústrojí (astma, chronická obstrukční choroba plic) a oběhového ústrojí a také lidé jinak oslabení (kombinace stresu, kouření, oslabená imunita atd.);
  - Studie ukázaly spojení mezi krátkodobou expozicí a zvýšením počtu infekčních respiračních onemocnění, zejm. u rizikových skupin (viz výše).
  - Účinky chronické a opakované expozice: rozedma plic (emphysema pulmonum), poruchy krevetvorby, poškození srdce.



# Chronická expozice oxidu síry

- **Rozdíl: astma x emphysema** (Source: WHO)
  - Emphysema = destrukce přepážek mezi plicními sklípky (viditelný symptom: zvětšený objem hrudníku).



- Astma = permanentní zúžení průdušek



# Účinky oxidů síry

- **Poškození vegetace** (Zdroj: Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i.)
  - Degradace pletiv vlivem rozkladu chlorofylu;
  - Tvorba zředěné kyseliny sírové reakcí s vodním aerosolem;
  - Kritické koncentrace SO<sub>2</sub>, nad nimiž se poškodí rostlinstvo:

Typ vegetace	Kritická koncentrace	Časové období
Lišejníky	10 µg/m <sup>3</sup>	Roční průměr
Lesní ekosystém*	20 µg/m <sup>3</sup>	Roční průměr a měsíce říjen - březen
Přirozená vegetace	20 µg/m <sup>3</sup>	Roční průměr a měsíce říjen - březen
Polní kultury (obilí)	30 µg/m <sup>3</sup>	Roční průměr a měsíce říjen - březen

\* více senzitivní  
jehličnaté porosty



# Účinky oxidů síry

- **Poškození vegetace** (Zdroj: Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i.)



# Účinky kyselá depozice

- Kyselá depozice = mokrá depozice + suchá depozice (plyny + aerosol)
- Přímé účinky
  - Reakce s chlorofylem  $\Rightarrow$  Narušení fotosyntézy  $\Rightarrow$  Defoliace
- Nepřímé účinky
  - Reakce zejm.  $\text{SO}_2$  s  $\text{H}_2\text{O}$  a reakce  $\text{SO}_3$  s  $\text{H}_2\text{O}$  za vzniku kyselých dešťů  $\Rightarrow$  okyselení půd, vodních zdrojů, narušování stavebních materiálů (mramor, vápenec);
- Kyselá dešť = mokrá depozice po rozpuštění kyselých plynů ve vodě
  - Poprvé objeveny r. 1853 a pojmenovány r. 1872;
  - Obecně srážky o  $\text{pH} < 5,6$
  - Tvořeny převážně kyselinami z  $\text{SO}_x$  a  $\text{NO}_x$ , v malé míře i  $\text{HCl}$ ;
  - Hlavní negativní působení na jehličnaté stromy;
  - Účinek slabší na jižní polokouli.



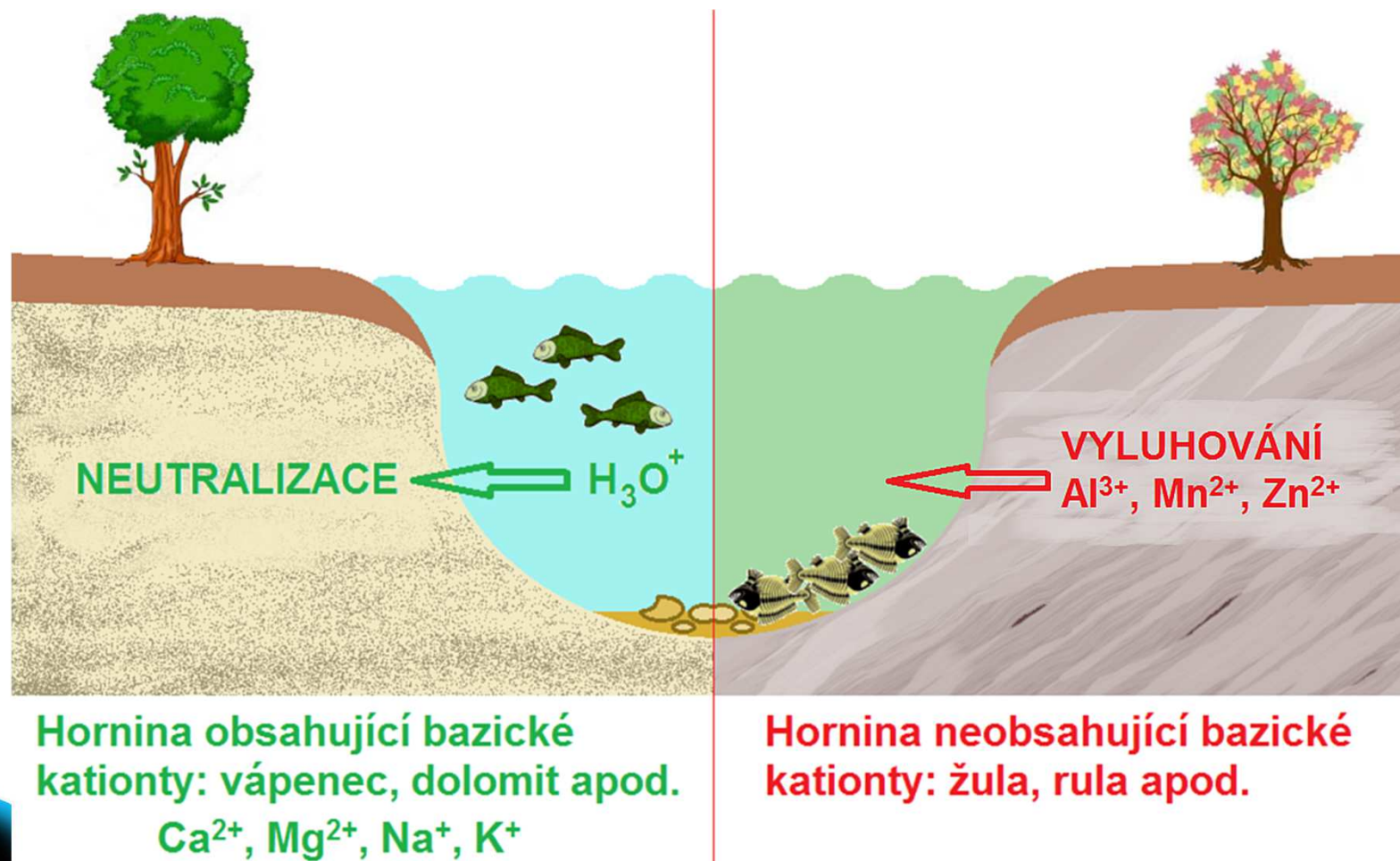
# Účinky kyselá depozice

## ■ Acidifikace vody

- Snížení pH vody v důsledku kyselá depozice a následné negativní procesy poškozující daný biotop;
- Stupeň acidifikace dán množstvím depozice, geologickou stavbou okolních hornin a vlastnostmi půd, zejm. obsahem bazických kationtů ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ )
- Čím větší obsah bazických kationtů, tím větší odolnost lokality proti acidifikaci  $\Rightarrow$  neutralizace kyselá depozice;
- Podloží tvořené rulami a žulami  $\Rightarrow$  malá rezistence vůči acidifikaci
- Rozloha území náchylného k acidifikaci větší, než se předpokládalo v 90. letech, nyní rozsah: USA, Kanada, většina Evropy, rozsáhlé části Asie, Afriky a Jižní Ameriky, tvořené prekambričovými a kambričovými horninami s limitovanou kapacitou záchytu  $\text{SO}_4^{2-}$  a  $\text{NO}_3^-$ ;
- Senzitivní povodí: neúplná neutralizace s následným transportem  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  apod. z půdy do povrchové vody.

# Účinky kyselé depozice

- Acidifikace vody
  - Čím větší obsah bazických kationtů, tím větší odolnost lokality proti acidifikaci  $\Rightarrow$  neutralizace kyselé depozice.



Hornina obsahující bazické kationty: vápenec, dolomit apod.  
 $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$

Hornina neobsahující bazické kationty: žula, rula apod.

# Účinky kyselé depozice

## ■ Acidifikace vody

– Destrukce ekosystému v důsledku:

- Snížení pH;
- Vyluhování toxických kovů (normálně fixovaných v horninách):  
Al, Cd, Pb, Cu;

– Úhyn vodních organismů ⇒ snížení biodiverzity;

– Dominance acidofilních druhů (např. v mokřadech rašeliníky)



– Narušení trofního stupně ⇒ odplavení živin z vody a půdy;

– Vizuálně acidifikované vody vypadají čisté, průzračné ⇒ v důsledku úbytku saprofytických mikroorganismů se rostlinná hmota nerozkládá, ale pouze kumuluje na dně.

# Kyselá depozice – nezaměnit pojmy!

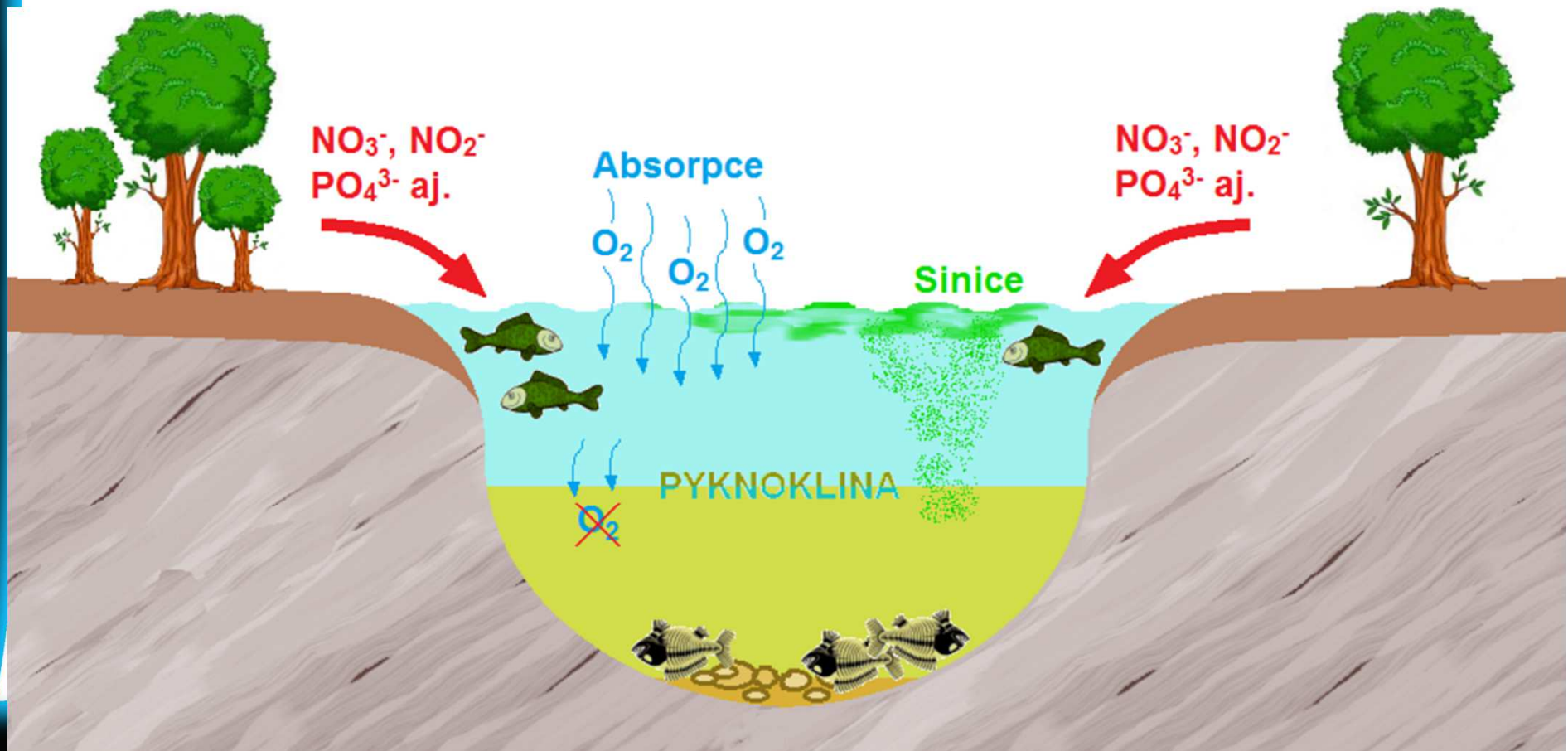
- Eutrofizace vody – pozor často se zaměňuje s acidifikací!
  - Proces obohacování vod o živiny, zejména N a P;
    - Přírozená eutrofizace = výplach těchto živin z půdy a rozklad mrtvých organismů;
    - Nepřírozená, nadměrná eutrofizace v důsledku lidské činnosti;
  - Dusíkaté látky (zejm.  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ) a fosfáty ( $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{P}_2\text{O}_7^{4-}$ ) způsobují nepřirozenou eutrofizaci, původ: hnojiva + některé prací prostředky obsažené v odpadních vodách;
  - Důsledky eutrofizace:
    1. fáze přemnožení planktonu a sinic (vodní květ)
    2. fáze masové odumření výše uvedených
    3. fáze pokles  $\text{O}_2$  ve vodě, zejm. u dna kde probíhá tlení
    4. fáze vymírání ryb a dalších organismů
    5. fáze vymření zejm. populace u dna, odděleného pyknoklinou – vrstvou oddělující vodu s různou hustotou a blokující výměnu  $\text{O}_2$ .





# Dusík a fosfor ve vodě - eutrofizace

- **Zásadní rozdíl mezi acidifikací a eutrofizací!**
  - Eutrofizace = nadměrné obohacování vody živinami, zejm. N a P
  - V terminální fázi rozvrstvení vody dle hustoty tzv. pyknoklinou

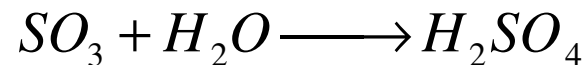
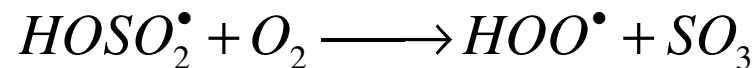
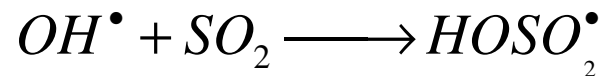


# Reakce oxidů síry

- Oxidy síry převážně antropogenní, síra v redukované formě – převážně biogenní
- Biogenní formy síry emitované do ovzduší (zejména)
  - Sirouhlík                      Carbon disulfide                      CS<sub>2</sub>
  - Sulfan                              Hydrogen sulfide                      H<sub>2</sub>S
  - Karbonylsulfid                      Carbonyl sulfide                      COS
  - Dimethylsulfid                      Dimethyl sulfide                      (CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>S
  - Dimethyldisulfid                      Dimethyl disulfide                      CH<sub>3</sub>-S-S-CH<sub>3</sub>
- Reakce redukováných forem síry
  - První fáze reakce s OH• , další sled reakcí není přesně zmapován, ale vede k oxidaci na SO<sub>2</sub>
  - SO<sub>2</sub> je buď velmi pomalu oxidován: 2SO<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> → 2SO<sub>3</sub>
  - Nebo reaguje opět s hydroxylovým radikálem, posléze až na H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>  
Mechanismus viz dále.

# Reakce oxidů síry

- Oxidace  $SO_2$  hydroxylovým radikálem – nejčastější oxidace síry v atmosféře



- Možnost excitace UV zářením

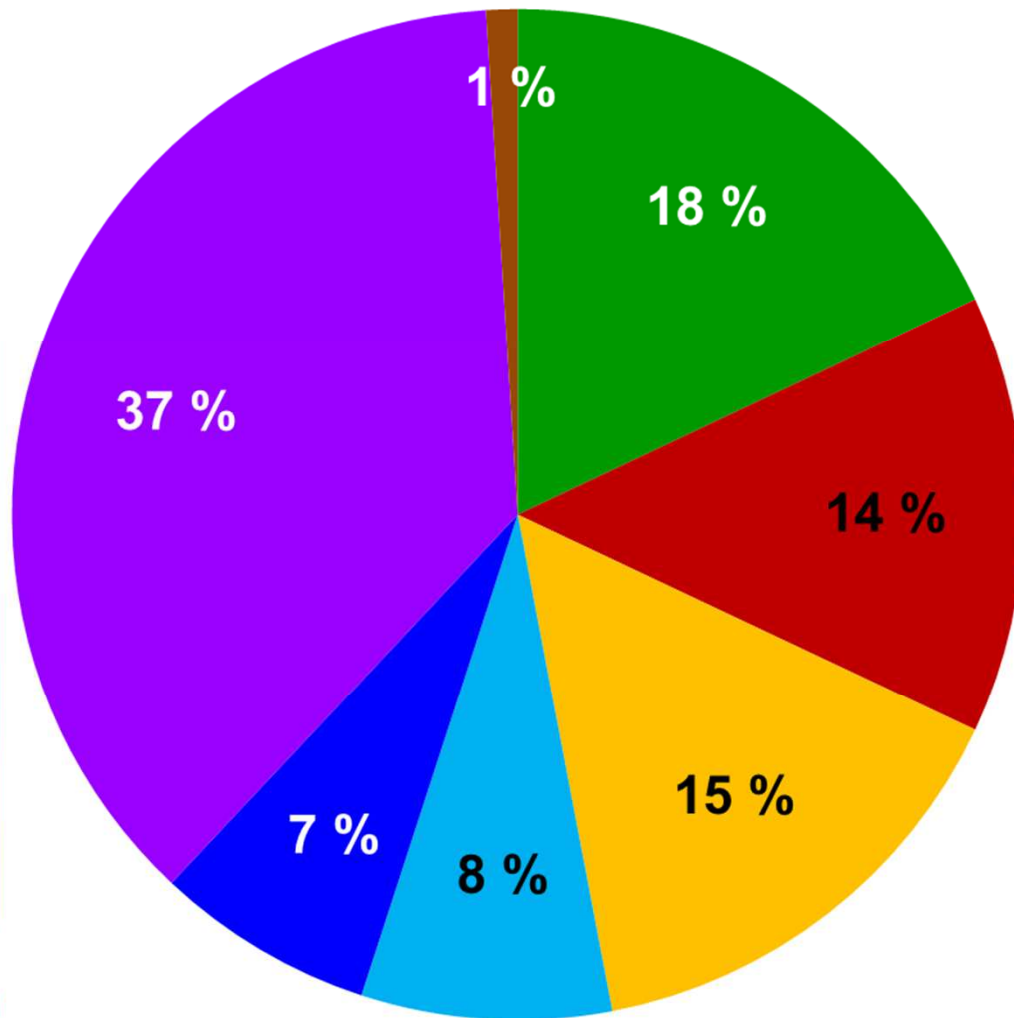
- $SO_2$  je v dolní troposféře pouze excitován, neprobíhá fotodisociace;
- $SO_2^*$  se zbavuje energie předáním inertním látkám  $\Rightarrow$  proto  $SO_2$  nepodléhá fotooxidaci.

# Původ emisí oxidů dusíku

- **Původ emisí NO<sub>x</sub> v Evropě** (Zdroj: EEA)
- **Hlavní zdroje emisí**
  - Pozemní doprava
  - Energetika;
- **Časový vývoj emisí**
  - V letech 1990 – 2011 pokles emisí NO<sub>x</sub> o 44 %;
  - Převažující zdroj emisí v celém období silniční doprava;
  - Největší redukce (1990 – 2011) v oblasti silniční dopravy o 48 % (rychlost poklesu v průměru 3 % ročně);
  - Pozor: koncentrace v městském ovzduší klesaly méně, než ukazuje vývoj emisí ve členských státech (tj. reálné emise jsou vyšší);
  - V energetice pokles v důsledku zavádění nízkoemisních hořáků, skrubrů, SCR, SNCR a částečný přechod z uhlí na plyn;

# Původ emisí oxidů dusíku

- **Distribuce zdrojů v EU v r. 2020** (Zdroj: [www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2022/sources-and-emissions-of-air](http://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2022/sources-and-emissions-of-air))

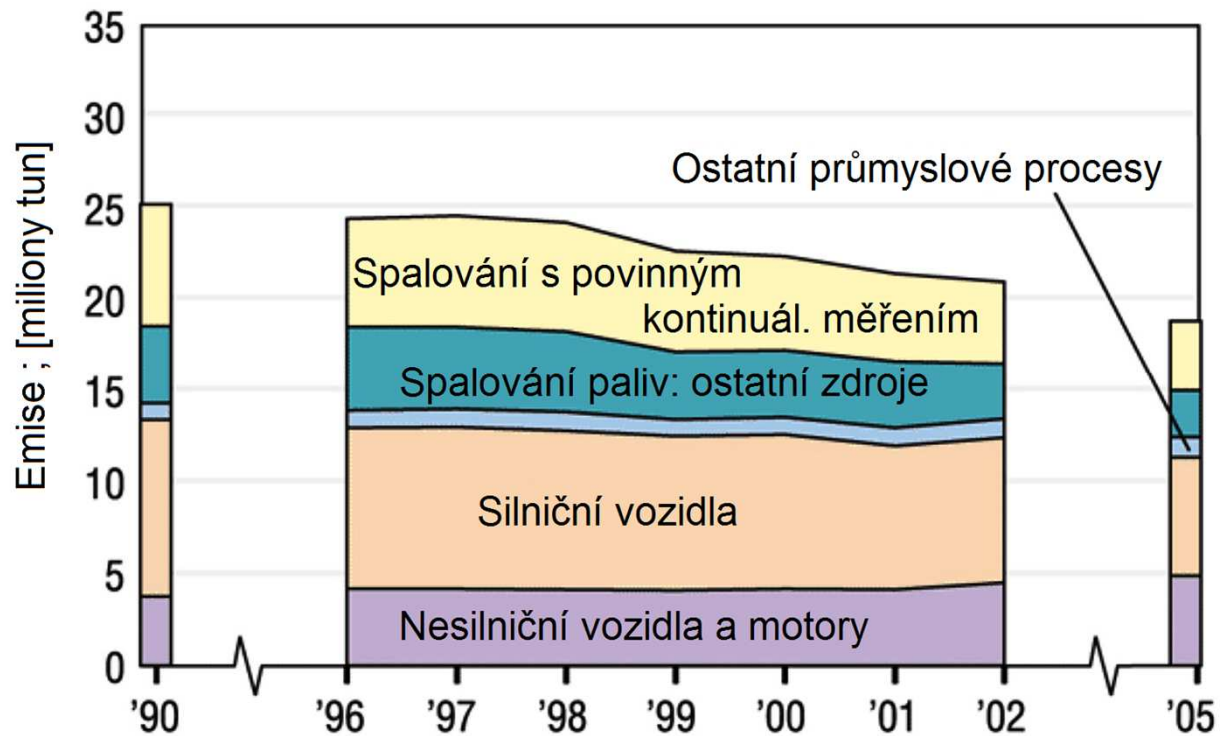
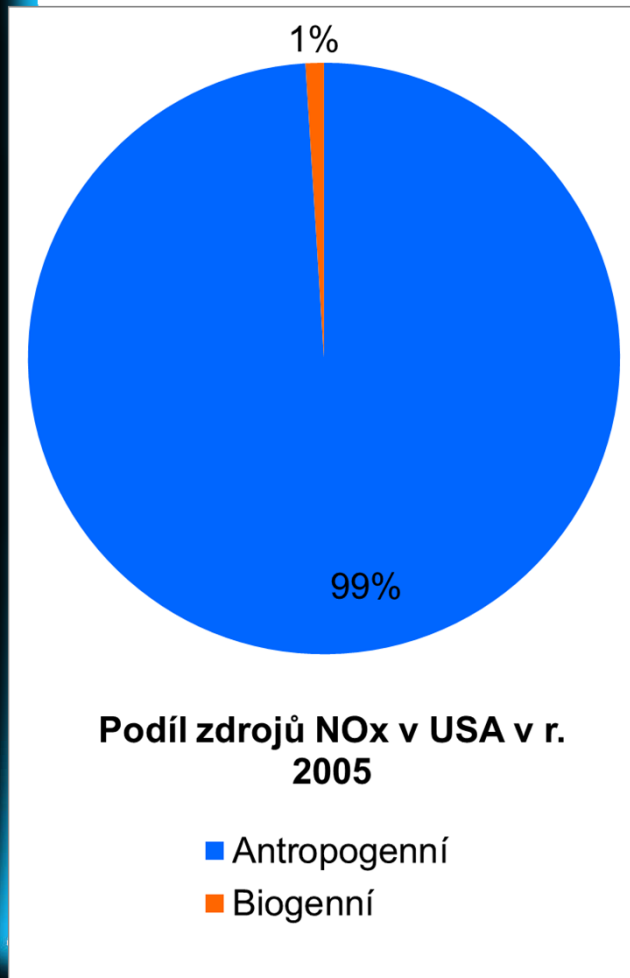


- Zemědělství
- Výroba a distribuce energie
- Průmyslové procesy vč. těžby
- Domácnosti, komerční a institucionální zdroje
- Nesilniční doprava
- Silniční doprava
- Odpady



# Původ emisí oxidů dusíku

- **Distribuce zdrojů v USA** (Zdroj: EPA)





# Původ emisí oxidů dusíku

- **Hlavní rizika emisí NO<sub>x</sub> z pohledu EU** (Zdroj: EEA)
  - NO<sub>x</sub> přispívá ke kyselé depozici a eutrofizaci půdy a vody, přispívá k formaci sekundárních aerosolů TZL a troposférického ozonu;
  - Následné dopady na vodní ekosystémy v řekách a jezerech, poškození lesních porostů, polních plodin a vegetace obecně.
  - Eutrofizace významně snižuje kvalitu vody s následným snížením biodiverzity (vč. změny zastoupení biologických druhů);
  - Lidské zdraví: vyšší koncentrace způsobují kašel, pálení, suchost sliznic až dušnost, záněty dýchacích cest, chronická expozice zvyšuje citlivost na respirační infekce;
  - Vysoké koncentrace NO<sub>2</sub> způsobují až smrtelný edém plic s latencí až 72 hodin. N<sub>2</sub>O snižuje konc. hemoglobinu v krvi.
  - Alterace plicních funkcí (změna vlastností) v důsledku expozice NO<sub>2</sub> u zdravých jedinců > 4 mg/m<sup>3</sup>, u astmatiků ≥ 0,2 mg/m<sup>3</sup>, u dětí s prvními příznaky již v rozsahu 0,09 – 0,5 mg/m<sup>3</sup>.

# Původ emisí oxidů dusíku

## ■ Rozsah pojmu $\text{NO}_x$

- Obecně míněn oxid dusnatý  $\text{NO}$  a dusičitý  $\text{NO}_2$ ;
- Ve směsi významný ještě azoxid  $\text{N}_2\text{O}$ , jako skleníkový plyn, méně významné pak  $\text{N}_2\text{O}_3$  a  $\text{N}_2\text{O}_5$ ;
- V praxi se suma přepočítává na  $\text{NO}_2$ ;
- Vznik zejména v energetických procesech (spalování), při výrobě kyseliny dusičné a při spalování nafty v dieselových motorech;
- Při spalování převažuje formace  $\text{NO}$  (90 – 99 %), na druhém místě pak  $\text{NO}_2$  ( u kapalných paliv 1 – 10 % sumy, u tuhých paliv 1 – 5 % sumy).
- Sekundárně se v kouřové vlečce dle podmínek oxiduje část  $\text{NO}$  na  $\text{NO}_2$
- Při kondenzaci vodní páry vzniká z  $\text{NO}_2$  směs kyselin  $\text{HNO}_3$  a  $\text{HNO}_2$  představující následnou kyselou depozici do ekosystému.

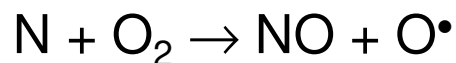
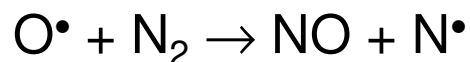
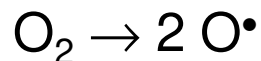
# Původ emisí oxidů dusíku

- **Základní mechanismy vzniku NO<sub>x</sub>**
  - Generování NO<sub>x</sub> je s výjimkou některých chemických výrob podmíněno vysokou teplotou;
  - Při spalování 3 mechanismy vzniku NO<sub>x</sub>:
    - Vysokoteplotní NO<sub>x</sub>
    - Palivové NO<sub>x</sub>
    - Promptní NO<sub>x</sub>
  - Z chemických výrob největší podíl reprezentuje výroba kyseliny dusičné ⇒ viz N<sub>2</sub>O v přednášce o GHGs;

# Původ emisí oxidů dusíku

## ■ Vysokoteplotní mechanismus

- Oxidace vzdušného  $N_2$  za vysoké teploty (především při spalovacích procesech);
- Rychlost reakce závisí na teplotě, koncentraci dusíku, koncentraci kyslíku a době zdržení;
- Podmínkou je dosažení teploty disociace  $O_2$  na  $2O^\bullet$ ;
- Ke zlomu v rychlosti tvorby dochází při dosažení cca  $1200\text{ }^\circ\text{C}$ ;
- Mechanismus oxidace je radikálový a liší se dle konkrétních podmínek;
- Příklad: spalování uhlí v přebytku vzduchu:



# Původ emisí oxidů dusíku

## ■ Vysokoteplotní mechanismus

- Pro stanovení relativní koncentrace oxidu dusnatého při vysokoteplotním mechanismu navrhl Zeldovič vztah:

$$[NO] = k_1 \cdot t \cdot e^{\frac{-k_2}{T}} \cdot [N_2] \cdot \sqrt{[O_2]}$$

- Ve vztahu je:

$k_1$  konstanta charakterizující systém [ $s^{-1}$ ]

$k_2$  konstanta charakterizující systém [K]

T termodynamická teplota [K]

t doba zdržení [s]

- Z uvedeného plynou možnosti omezení tvorby NO:

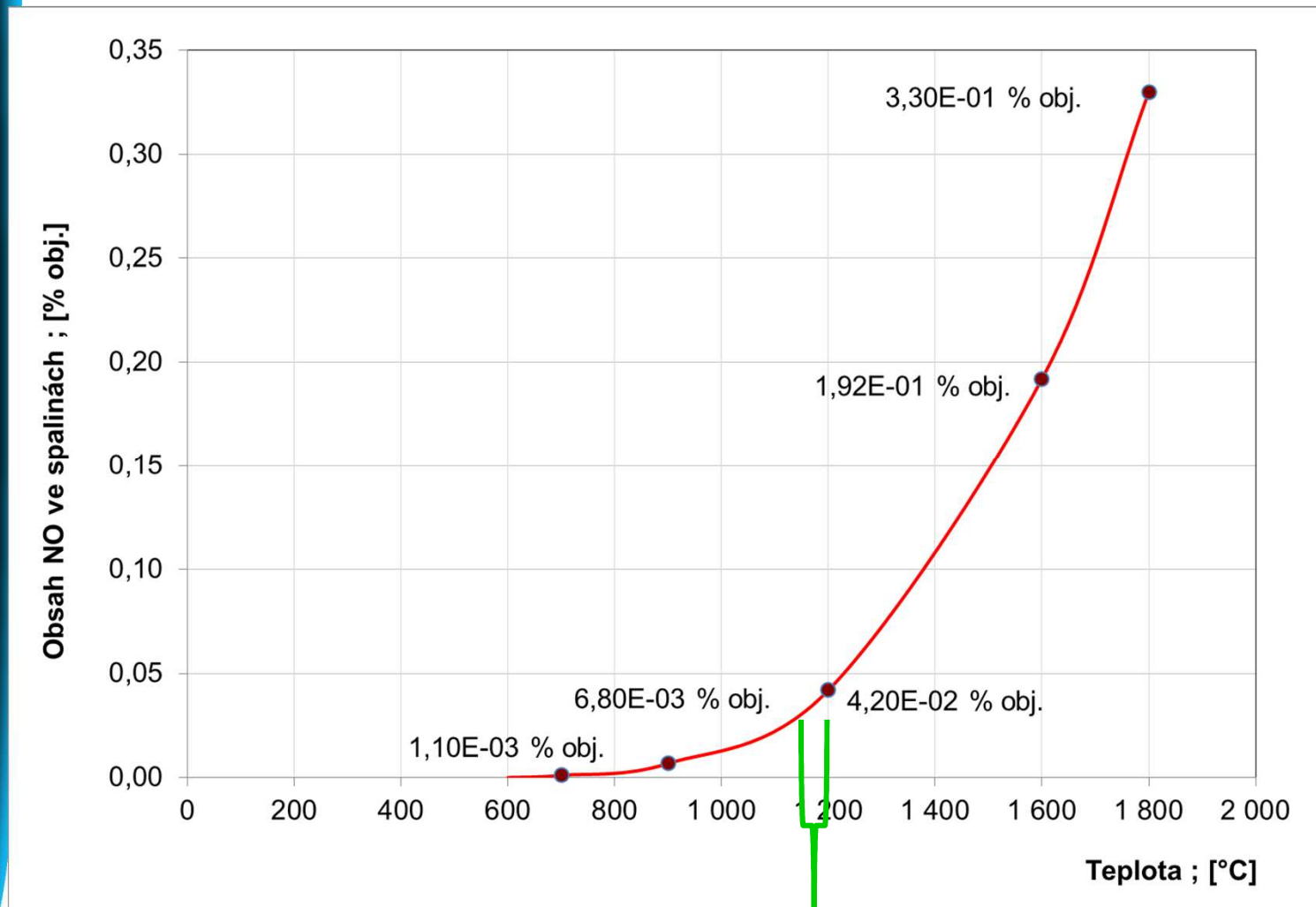
Snížení koncentrace kyslíku (zejm. v pásmu vysoké teploty)

Snížení doby zdržení

Snížení spalovací teploty

# Původ emisí oxidů dusíku

- Závislost tvorby NO na teplotě (příklad spalování uhlí)



1150 – 1200 °C = mez výrazného uplatnění vysokoteplotního mechanismu



# Původ emisí oxidů dusíku

## ■ Palivové oxidy dusíku

- Vznik z dusíku vázaného v palivu;
- Reakce vyžadují vysoké teploty;
- Reakce se účastní jen organicky vázaný dusík;
- Mechanismus spočívá v několika dílčích dějích:
  1. Složitější sloučeniny se rozloží na nízkomolekulární (aminy a nitrily), reakce se dále účastní částice – N–H, N–C a –C≡N;
  2. Oxidace kyslíkem na NO
  3. Reakce s jinými sloučeninami s obsahem N na plynný N<sub>2</sub>;
- Přeměna palivového N na NO jen částečná
- Konverzní poměr nabývá hodnot 0 – 0,85 v závislosti na palivu a podmínkách spalování:

$$\nu = \frac{N_{\text{konvertovaný na NO}}}{N_{\text{celkový organicky vázaný}}}$$

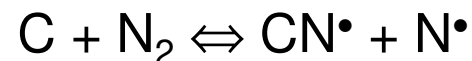
# Původ emisí oxidů dusíku

## ■ Promptní oxidy dusíku

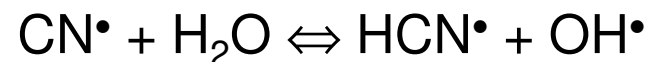
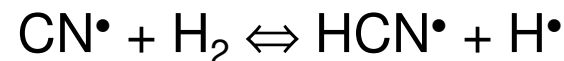
- Nejméně zastoupený mechanismus vzniku NO;
- Oxidace vzdušného N<sub>2</sub> v úzké zóně na hranici plamene;
- Mechanismus podmíněn přítomností plynných uhlovodíků;
- Princip objevil Fenimore:

Iniciace tvorba radikálů uhlovodíků CH•, CH<sub>2</sub>• atd.

Reakce radikálů s dusíkem



Transformace CN•

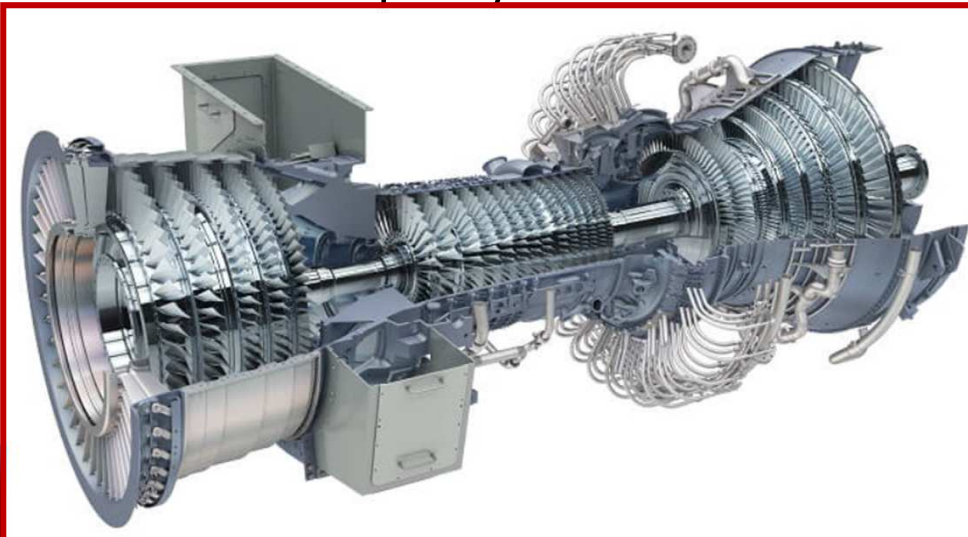


Oxidace HCN• na NO (komplikovaný mechanismus závisející na podmínkách).

# Původ emisí oxidů dusíku

## ■ Primární, sekundární a terciální tvorba NO<sub>2</sub>

- NO<sub>2</sub> vzniká oxidací NO;
- U standardních kotlů představuje NO<sub>2</sub> primárně vzniklý ve spalovacím prostoru jen max. 10 % všech NO<sub>x</sub>;
- Primární vznik je podmíněn skokovým ochlazením spalin;
- Největší podíl primárního NO<sub>2</sub> vzniká v plynových turbinách:  
$$\text{NO} + \text{HO}_2^\bullet \Leftrightarrow \text{NO}_2 + \text{OH}^\bullet$$
- Sekundárně se NO oxiduje na NO<sub>2</sub> v kouřovodu a komínu za teploty < 65 °C a přebytku vzduchu



# Atmosférické reakce oxidů dusíku

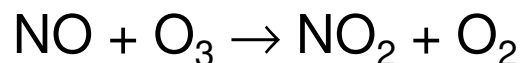
## ■ Homogenní reakce – reakce systému NO-NO<sub>2</sub>-O<sub>3</sub>

– Základ všech denních troposférických reakcí;

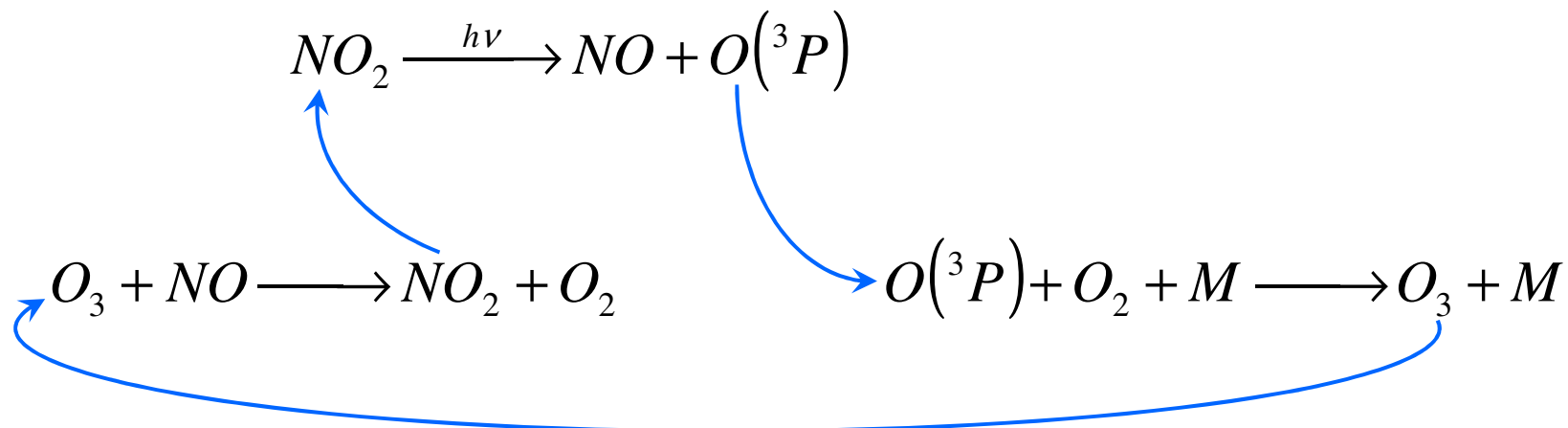
– Zatímco v kouřovodech probíhá oxidace:



ve volné atmosféře kineticky upřednostněna reakce s ozonem:



– Při expozici slunečním zářením probíhá cyklus reakcí:



Pozn. M je molekula odebírající excesivní energii, což je třeba pro stabilizaci ozonu (viz přednáška o reakčních mechanismech).



# Atmosférické reakce oxidů dusíku

## ■ Homogenní reakce – reakce systému NO-NO<sub>2</sub>-O<sub>3</sub>

- Fotodisociace  $NO_2 \xrightarrow{h\nu} NO + O(^3P)$  velmi rychlá  $\Rightarrow$  při zenitovém slunečním svitu 40° je poločas rozpadu NO<sub>2</sub> < 2 min
- kyslíkový atom v základním stavu O(<sup>3</sup>P) reaguje s molekulárním kyslíkem rovněž ihned
- Rovněž rychlá regenerační reakce části NO na NO<sub>2</sub> zvaná „titrační“
- Výsledkem uvedeného cyklu je rovnováha mezi fotodisociací NO<sub>2</sub> a oxidací NO ozonem.
- Vzniká fotostacionární stav, definovaný poměrem rychlostních konstant fotolýzy NO<sub>2</sub> a oxidace NO:

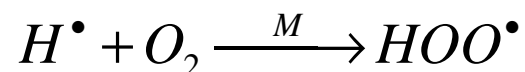
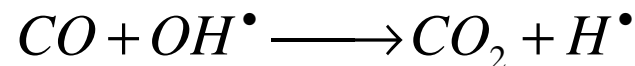
$$\frac{k_{\text{fotolýza}}}{k_{\text{oxidace}}} = \frac{[NO] \cdot [O_3]}{[NO_2]} \quad [O_3] = \frac{k_{\text{fotolýza}}}{k_{\text{oxidace}}} \cdot \frac{[NO_2]}{[NO]}$$

- Rovnovážná koncentrace ozonu dána poměrem koncentrací NO<sub>2</sub> a NO.
  - V noci běží pouze oxidace NO ozonem bez následné fotolýzy NO<sub>2</sub>
- Pozn. Podrobnosti děje viz reakce fotochemického smogu.

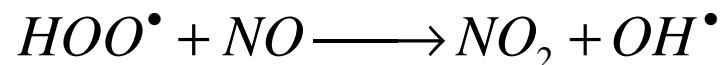
# Atmosférické reakce oxidů dusíku

## ■ Homogenní reakce – reakce systému CO-NO<sub>x</sub>

- CO uvolňován do atmosféry nedokonalým spalováním a oxidací uhlovodíků;
- CO málo reaktivní, ale reakcí s hydroxylovým radikálem tvoří hydroperoxylový radikál:



- Hydroperoxylový radikál reaguje následně s NO (viz terciální vznik NO<sub>2</sub>) a regeneruje hydroxylový radikál.



- NO<sub>2</sub> se poté ve dne účastní opět fotodisociace, jak již bylo uvedeno.
- Terminační reakce všech uvedených cyklů je:

