

# *Koloběh živin ve vodě a půdě*



**Uhlík (C)**

# **Přeměny uhlíku ve vodě a půdě**

**Fragmentace a vyplavování**

**Mineralizace**

**Příjem roztlinami/baktériemi**

**Srážení a rozpouštění**

**Respirace**

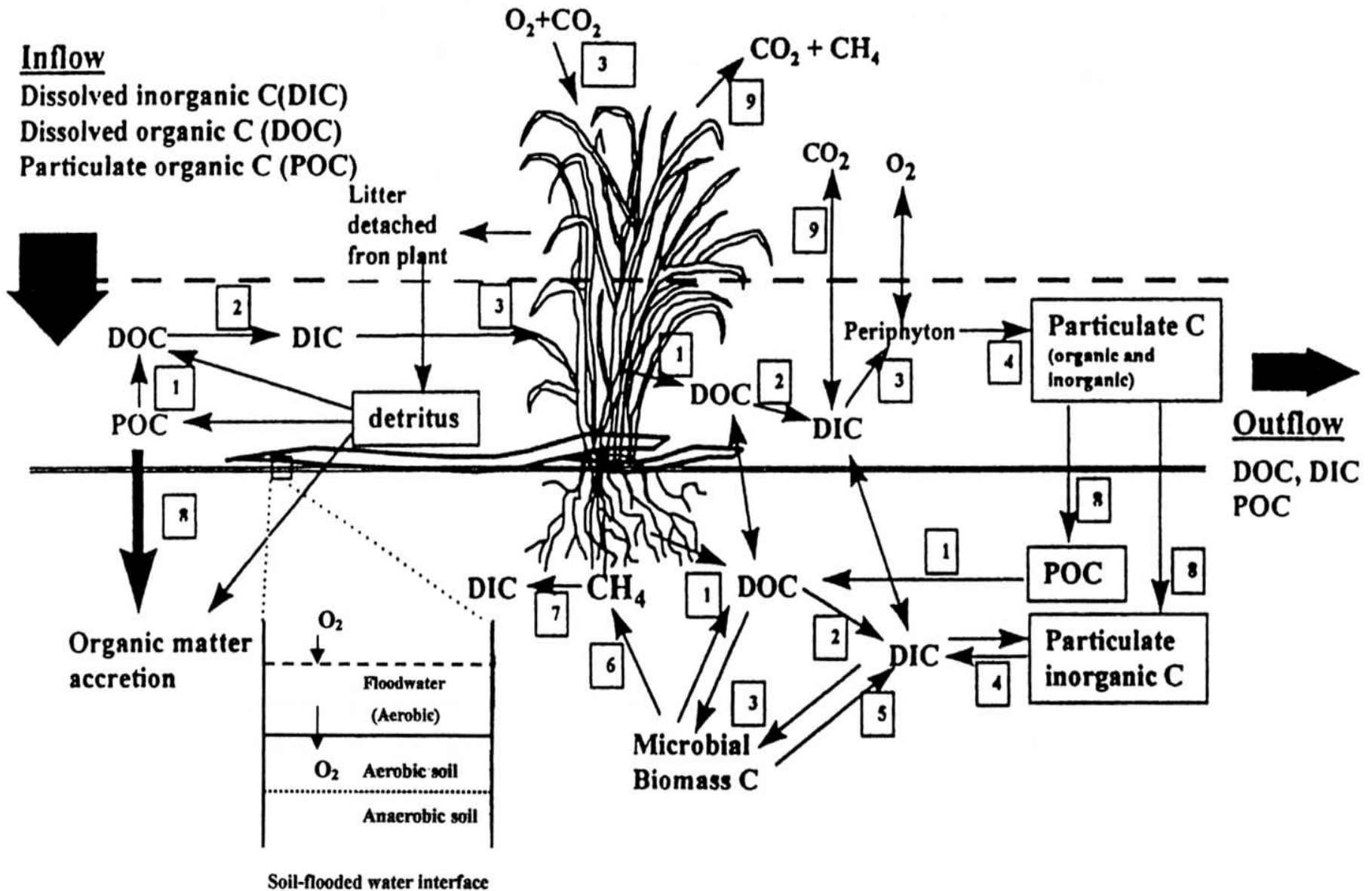
**Methanogeneze**

**Oxidace metanu**

**Ukládání**

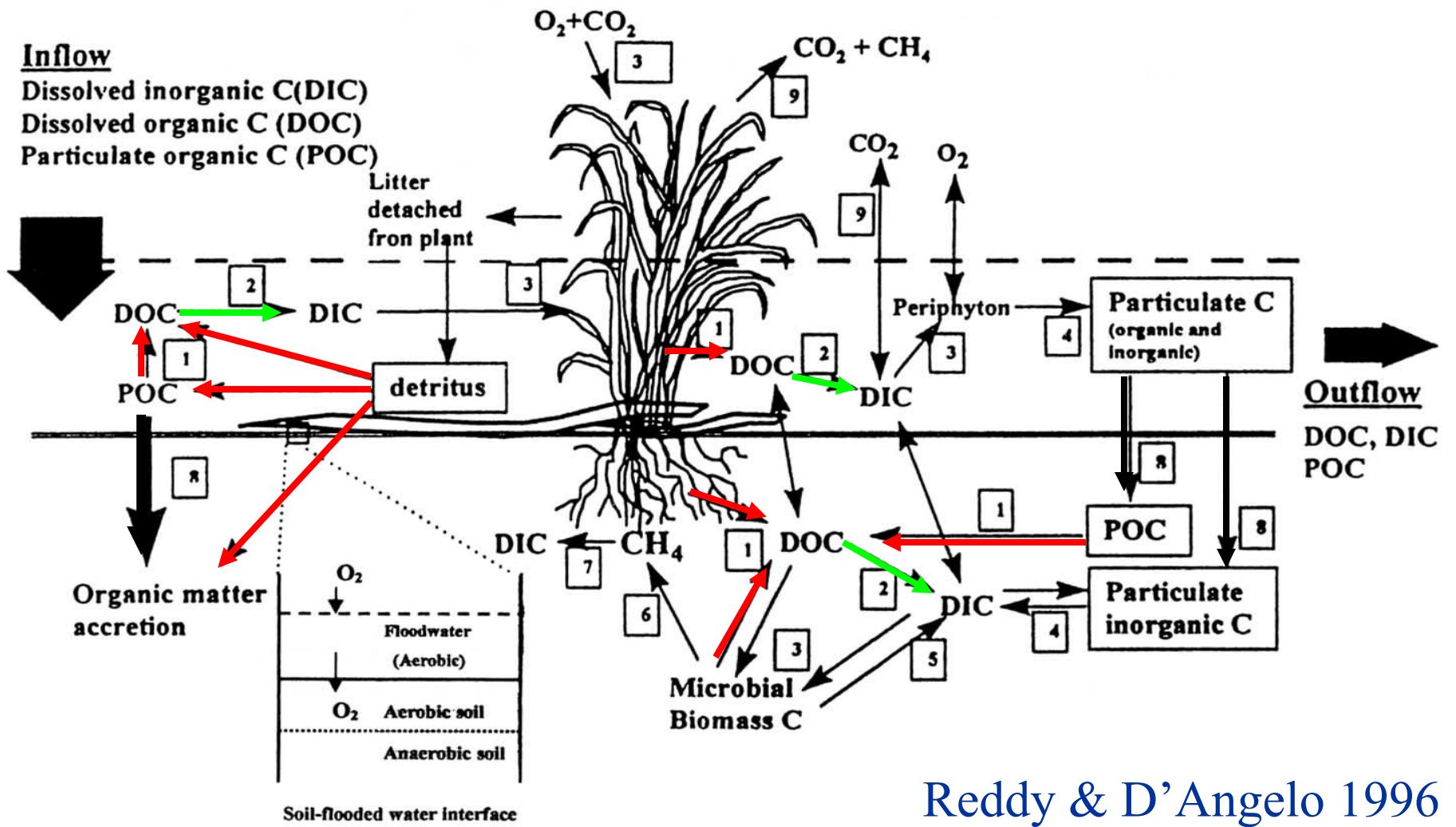
**Těkání**

# Přeměny uhlíku v mokřadních systémech (Reddy & D'Angelo 1996)



# 1. fragmentace & vyplavování

# 2. mineralizace



# Dekompozice rostlinného materiálu

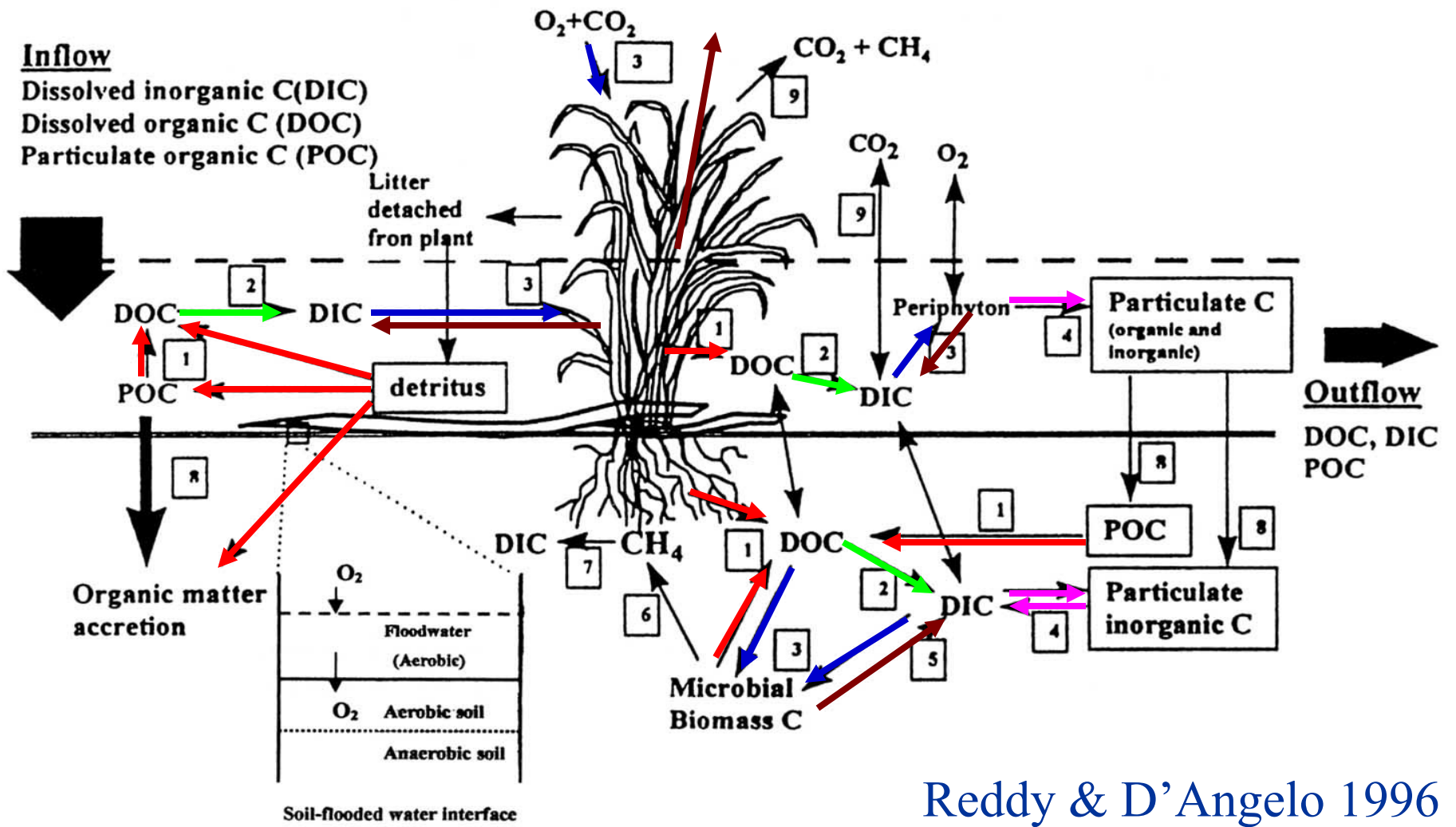
Tři základní procesy, které probíhají současně

1. Fragmentace rostlinného materiálu působením větru, vln, živočichů
2. Vyplavování rozpustných látek (např. Na, K, Ca, Mg, N, P, **labilní organické látky jako cukry, mastné kyseliny nebo aminokyseliny**)
3. Mikrobiální oxidace organických látek bakteriemi a houbami

**Proces 2) je velmi rychlý, způsobuje většinu redukce biomasy během prvních fází dekompozice, přičemž většina rozpustných organických látek je uvolněna v průběhu 6-12 měsíců. U submerzních rostlin a rostlin s plovoucími listy způsobuje vyplavování až 50%ní úbytek biomasy během 2-3 dnů.**

Dekompozice je charakterizována 50% a 95% úbytkem biomasy

50%: fytoplankton (44 dní), submerzní a volně plovoucí (87 dní), listy opadavých stromů (109 dní), emerzní (223 dní), jehličí (142 dní) dřevo (5331 dní)



# Fotosyntéza



## Rozklad organických látek



Aerobní

Anaerobní

**Aerobní rozklad rozpuštěných organických látek:**



(respirace)



# Anaerobní respirace: fakultativně nebo striktně anaerobní bakterie – probíhá ve dvou krocích

1. primární koncové produkty fermentace jsou: a plyny

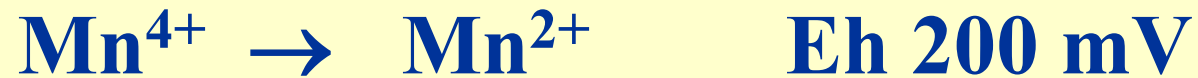
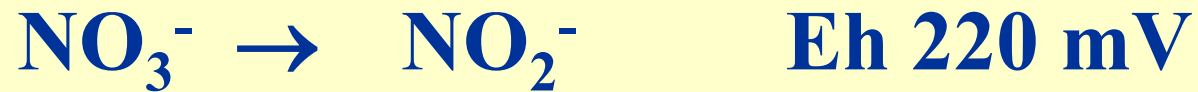


**Kyselina octová je nejčastěji vznikajícím produktem z zaplavených půdách a sedimentech**

2. Koncové produkty jsou využívány striktně anaerobními sulfát-redukujícími a metan-tvořícími bakteriemi:

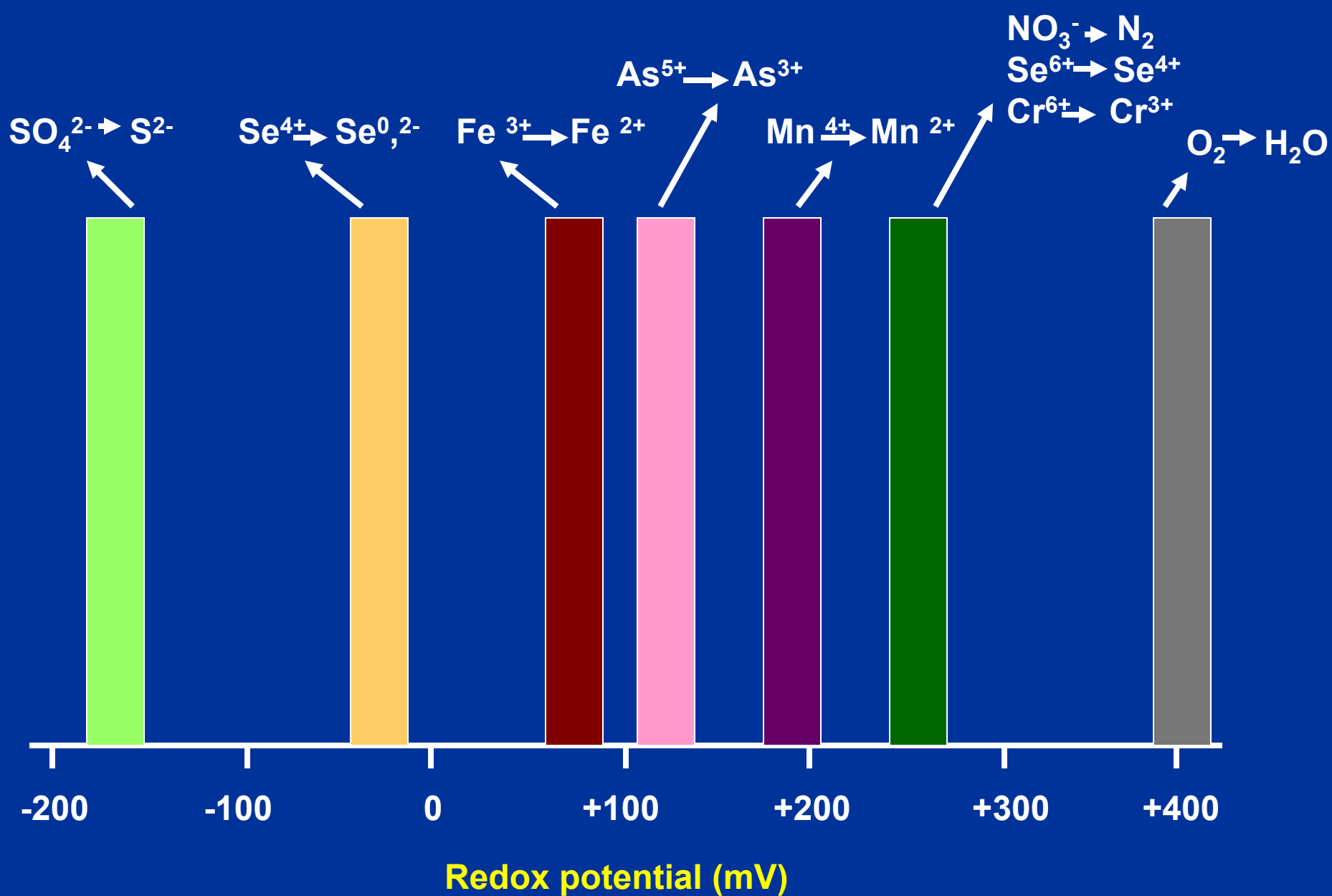


**Oxidované a redukované formy některých prvků a přibližné hodnoty redoxního potenciálu, při kterých dochází ke změně**



**Zatímco předcházející reakce se mohou překrývat, následující reakce nastupují, až když předcházející reakce je ukončena**

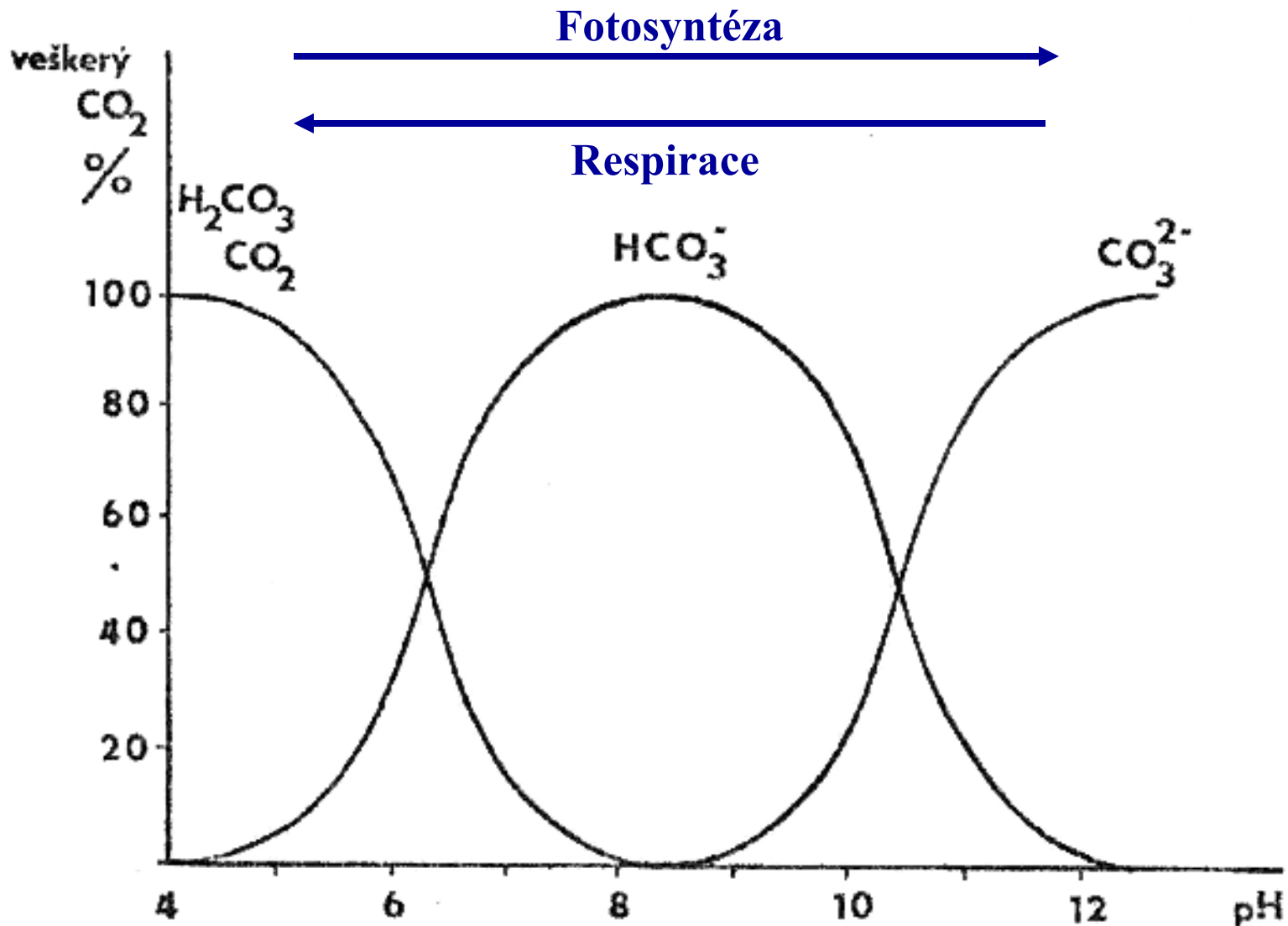






## Oxidace železa

Monastery Run,  
Pennsylvánie

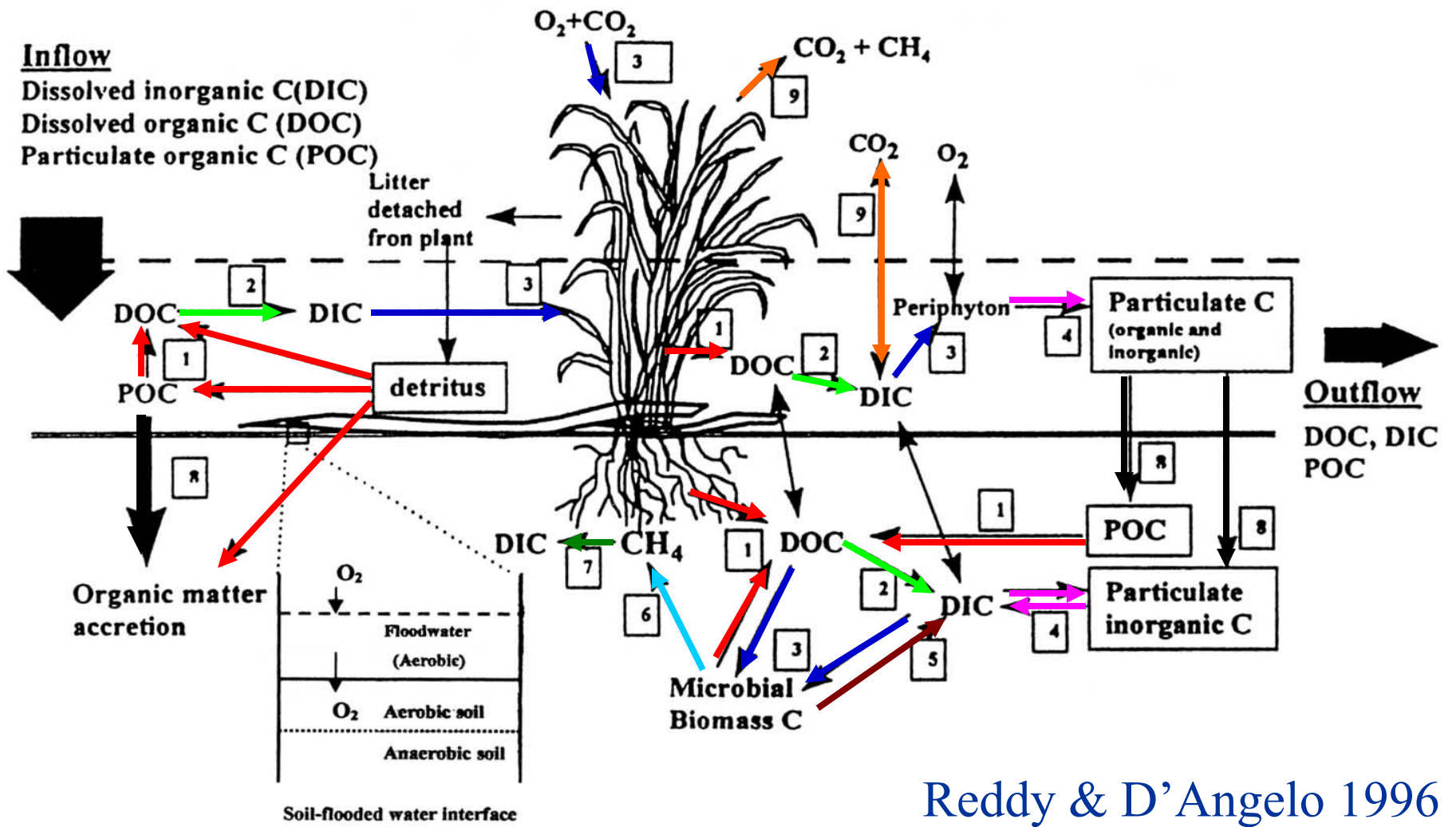


Vztah pH a jednotlivých forem anorganického uhlíku v povrchových vodách

# Řasové nárosty pokryté uhličitanem vápenatým. Florida Everglades



- 1. fragmentace & vyplavování**
- 2. mineralizace**
- 3. mikrobiální/rostlinný příjem**
- 4. Srážení &**
- rozpuštění**
- 5. respirace**
- 6. metanogeneze**
- 7. oxidace metanu**
- 8. ukládání**
- 9. „těkání“**



Reddy & D'Angelo 1996

Metanogeneze je posledním stupněm anaerobního rozkladu organických látek



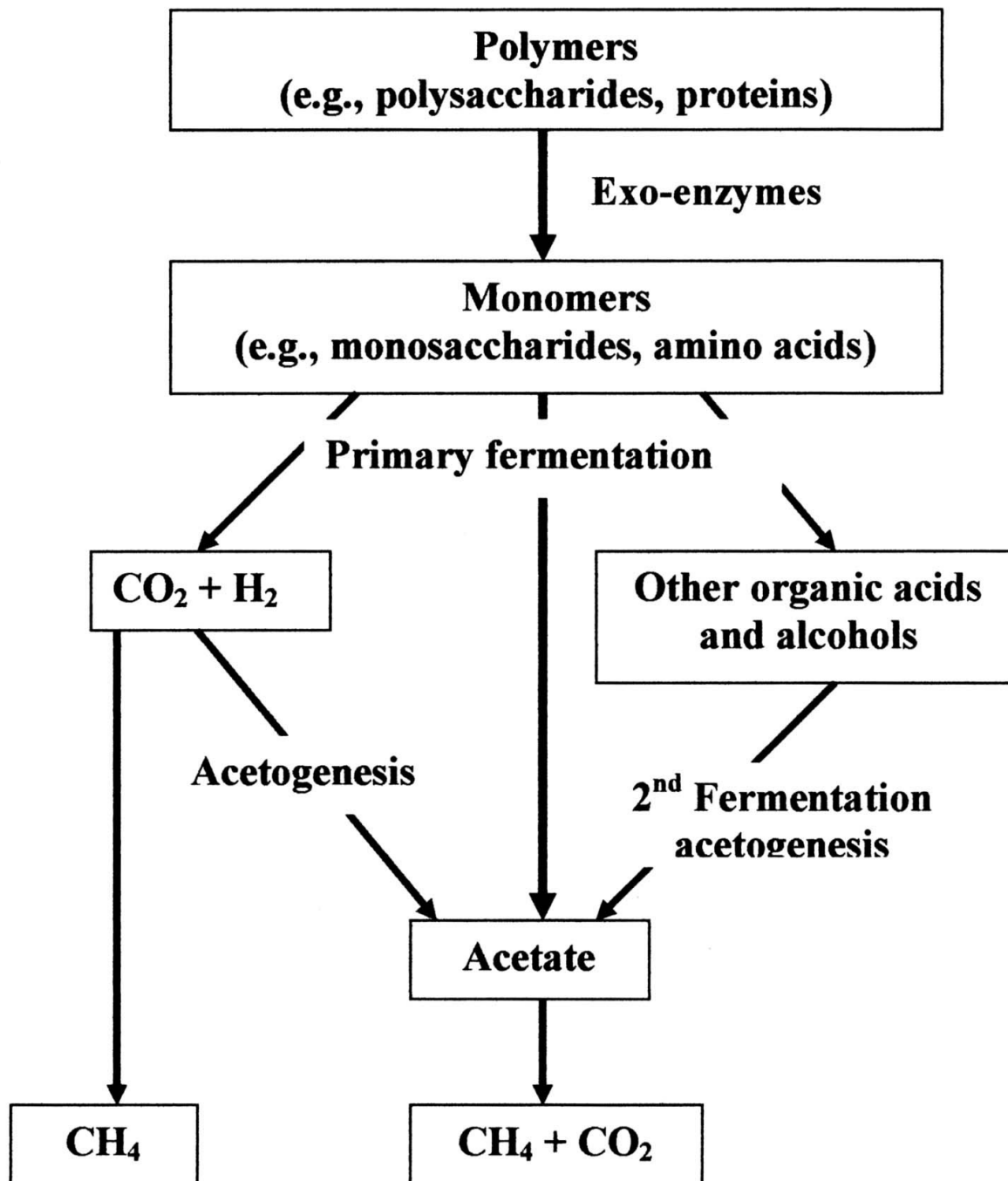
73% metanogenních druhů využívá H<sub>2</sub>

10% (2 druhy, *Methanosarcina*, *Methanosaeta*) využívá acetoklastickou metanogenezi

Anaerobní oxidace metanu:  $\text{CH}_4 + \text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{HS}^- + \text{HCO}_3^- + \text{H}_2\text{O}$

Aerobní oxidace metanu :  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$





**Dusík (N)**

# Transformace dusíku v mokřadech

Těkání

Amonifikace

Nitrifikace

Nitrát-amonifikace

Denitrifikace

Fixace  $N_2$

Asimilace

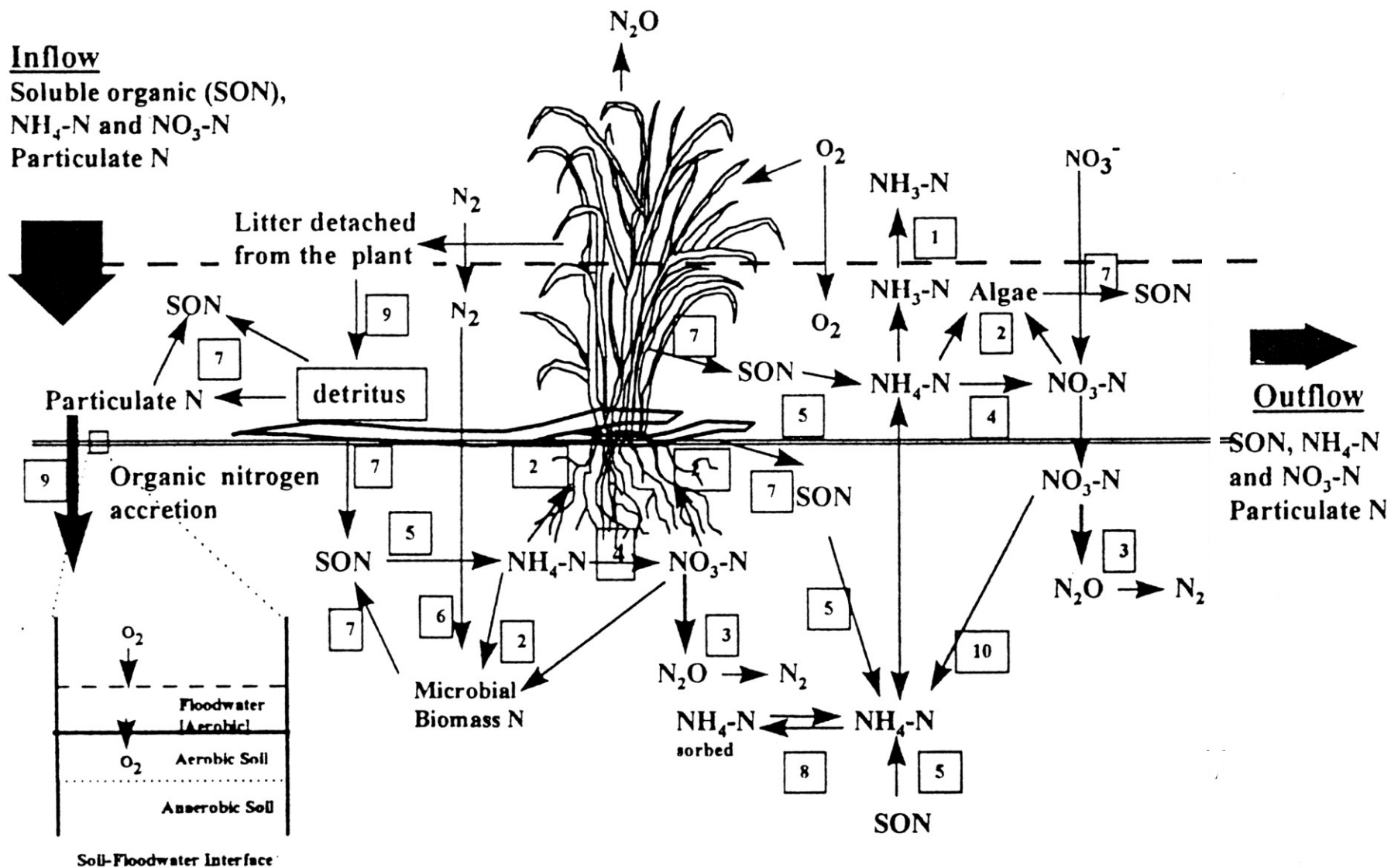
Adsorpce

ammoných iontů

Ukládání oranického dusíku

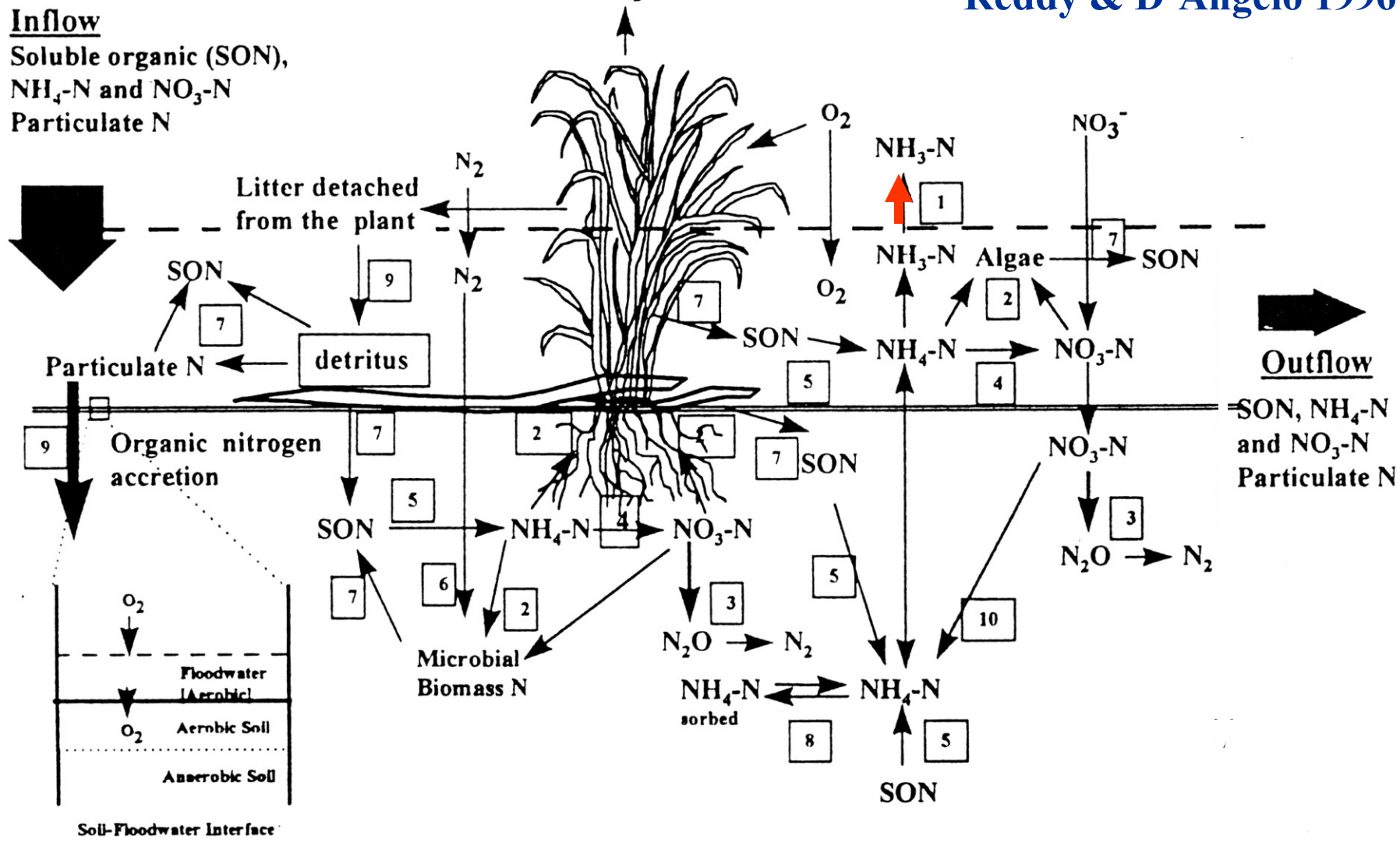
Fragmentace a vyplavování

# Transformace dusíku v mokřadních systémech (Reddy & D'Angelo 1996)



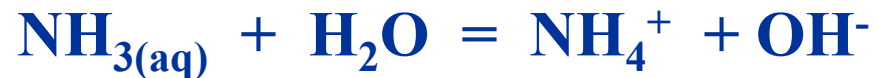
# 1. Těkání $\text{NH}_3$

Reddy & D'Angelo 1996



# Těkání amoniaku

Jde o fyzikálně-chemický proces, při kterém je amoniakální dusík v rovnováze mezi plynnou a vodní (hydroxylovou) formou



Při pH 7.0 je poměr  $(\text{NH}_3):(\text{NH}_4^+) = \text{ca. } 1:99,5$

25°C

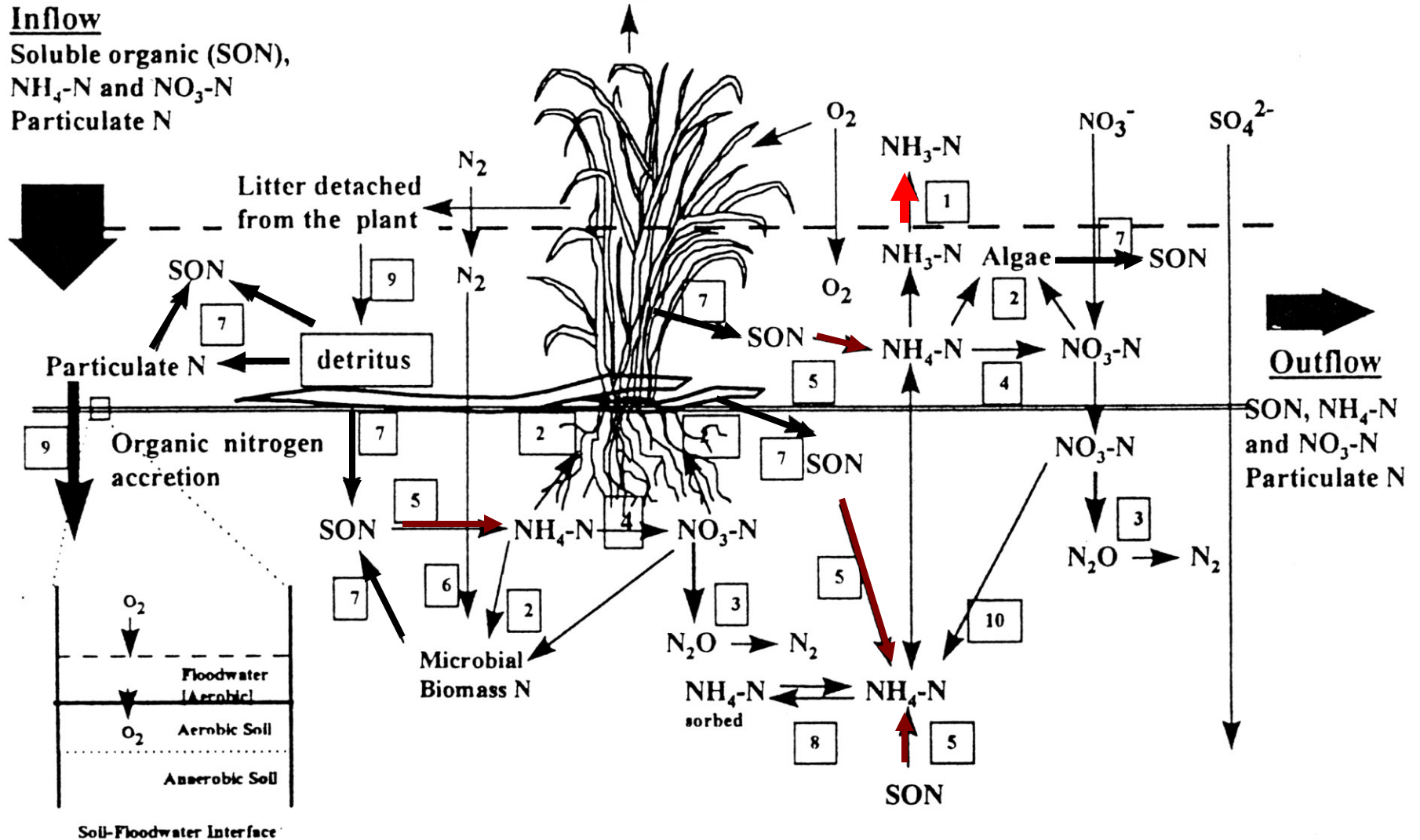
Při pH 8.0 je poměr  $(\text{NH}_3):(\text{NH}_4^+) = \text{ca. } 1:95$

Při pH 9.3 je poměr  $(\text{NH}_3):(\text{NH}_4^+) = \text{ca. } 1:1$

0°C

ca. 1:80





# Mineralizace (amonifikace)

Amonifikace je proces, při kterém je organicky vázaný N přeměněn na amoniak komplexním několikastupňovým biochemickým procesem, při kterém se uvolňuje energie

**Oxidované zóny:**

Aminokyseliny → Iminokyseliny → Ketokyseliny → NH<sub>3</sub>

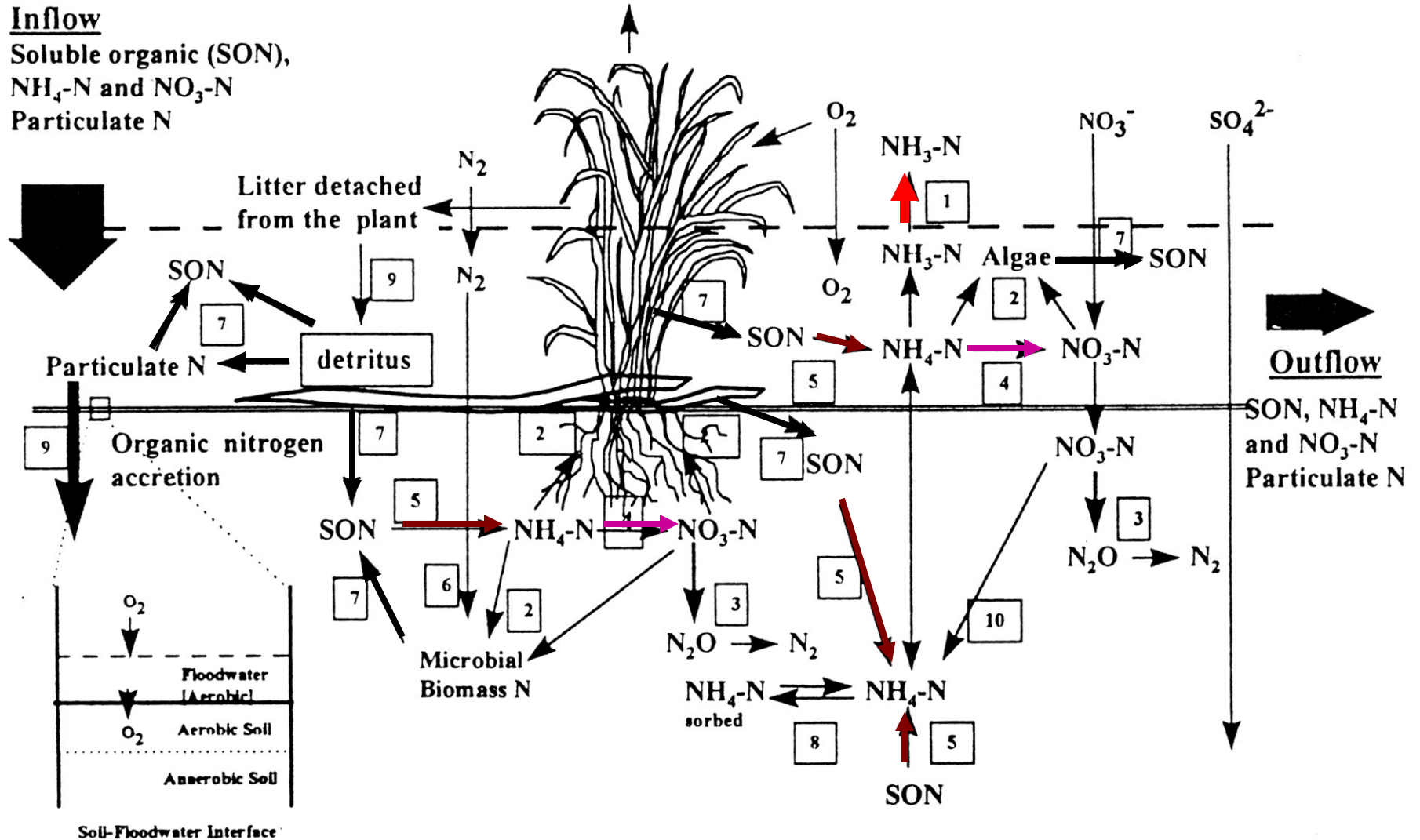
**Redukované zóny:**

Aminokyseliny → Saturevané kyseliny → NH<sub>3</sub>

**Kineticky je amonifikace rychlejší než nitrifikace!!!**

**Mineralizační rychlost je největší v oxidovaných zónách a rychlost mineralizace klesá s přechodem na fakultativně anaerobní a striktně anaerobní mikroflóru**





# Nitrifikace

Nitrifikace je většinou definována jako biologická oxidace amoniaku na dusičnany s dusitany jako mezistupněm v reakční sekvenci

Nitrifikace je typicky spojována s chemoautotrofními baktériemi, ale v současnosti je známa i heterotrofní nitrifikace, která může být za určitých podmínek velmi důležitá.

Nitrifikace je dvoustupňový proces, který byl prokázán již v roce 1878 (Warington). Jednotlivé bakterie byly však izolovány až v roce 1890 (Winogradsky, Franklad a Franklad)



(*Nitrosomonas europaea*, *Nitrosolobus*, *Nitrosococcus*, *Nitrosospira*)





(*Nitrobacter, Nitrococcus, Nitrospira*)

## Výsledná rovnice nitrifikace



# Heterotrofní nitrifikace



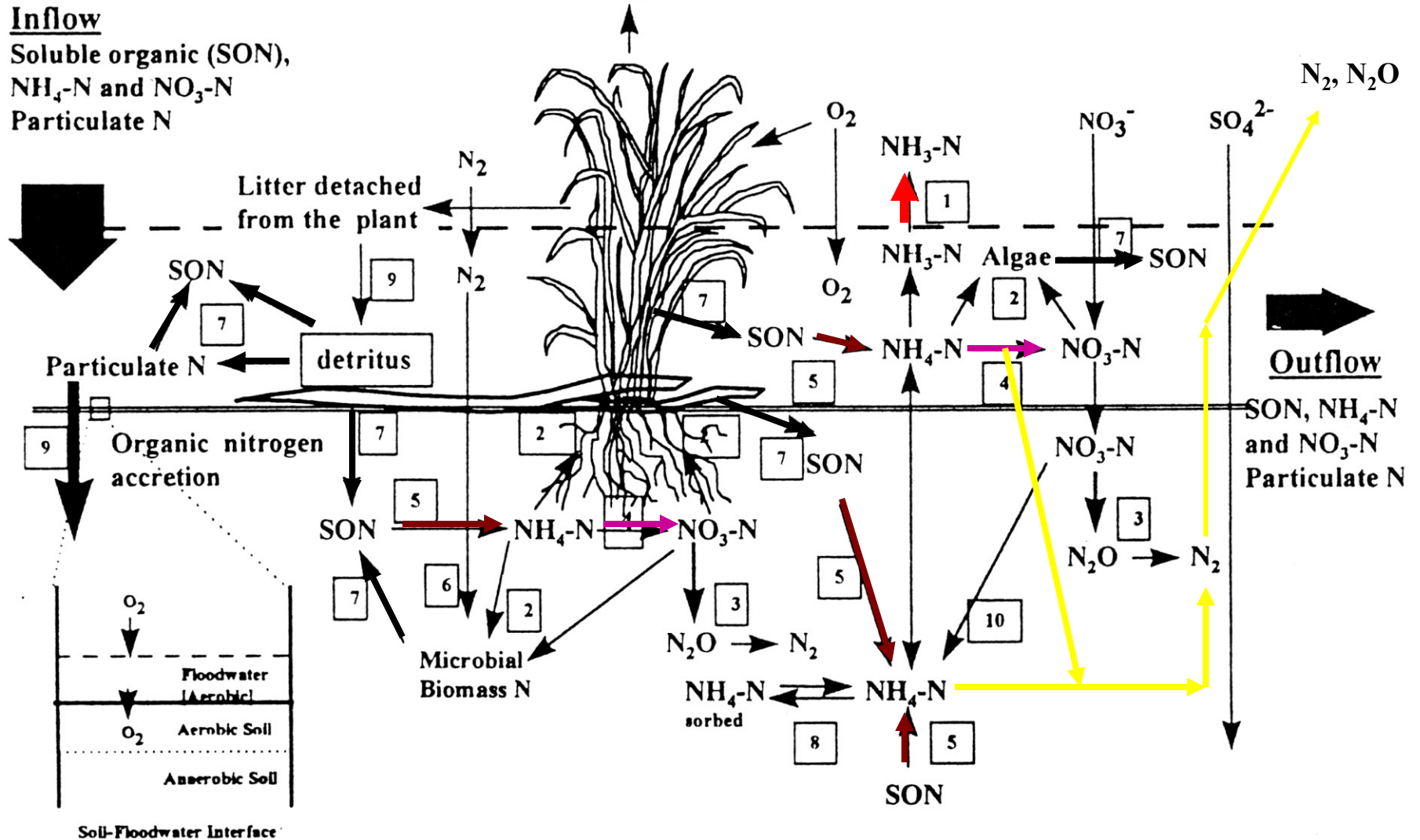
## Baktérie

*Arthrobacter globiformis*  
*Aerobacter aerogenes*  
*Mycobacterium phlei*  
*Pseudomonas* spp.

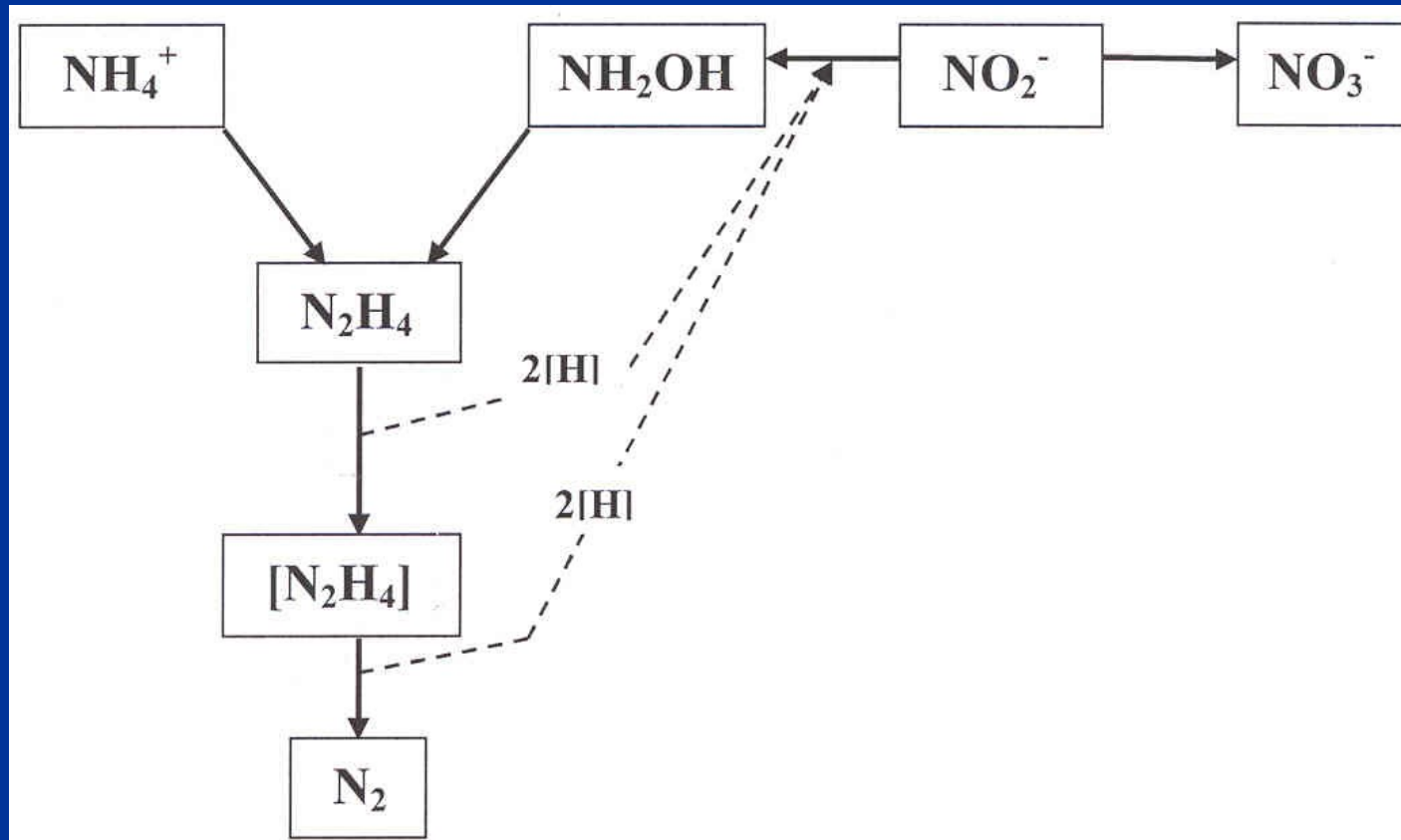
## Houby

*Aspergillus flavus*  
*Penicillium* spp.  
*Cephalosporium* spp.

Většina heterotrofních nitrifikačních bakterií je zároveň denitrifikačními bakteriemi, takže význam tohoto procesu je v přírodě většinou podhodnocen

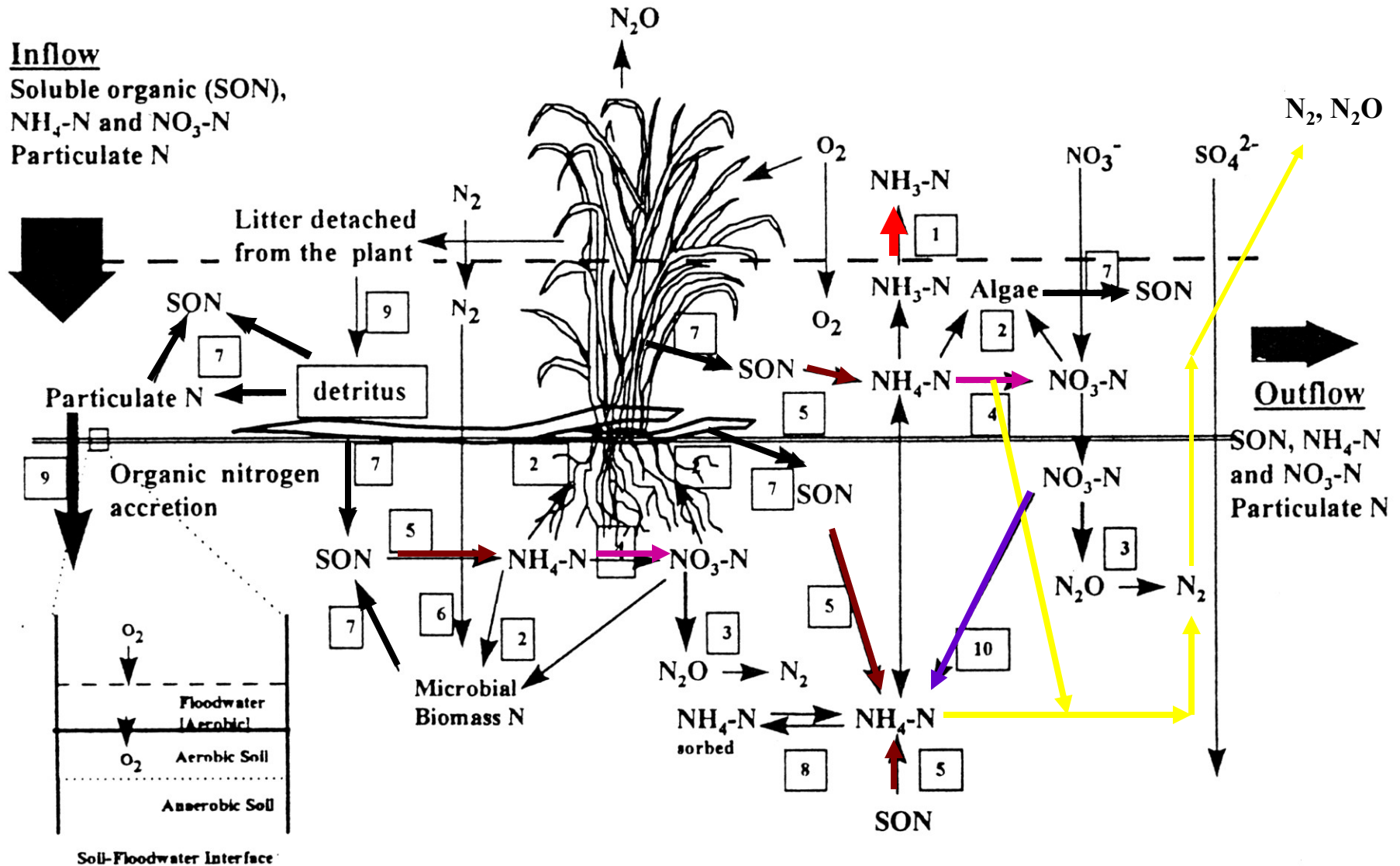


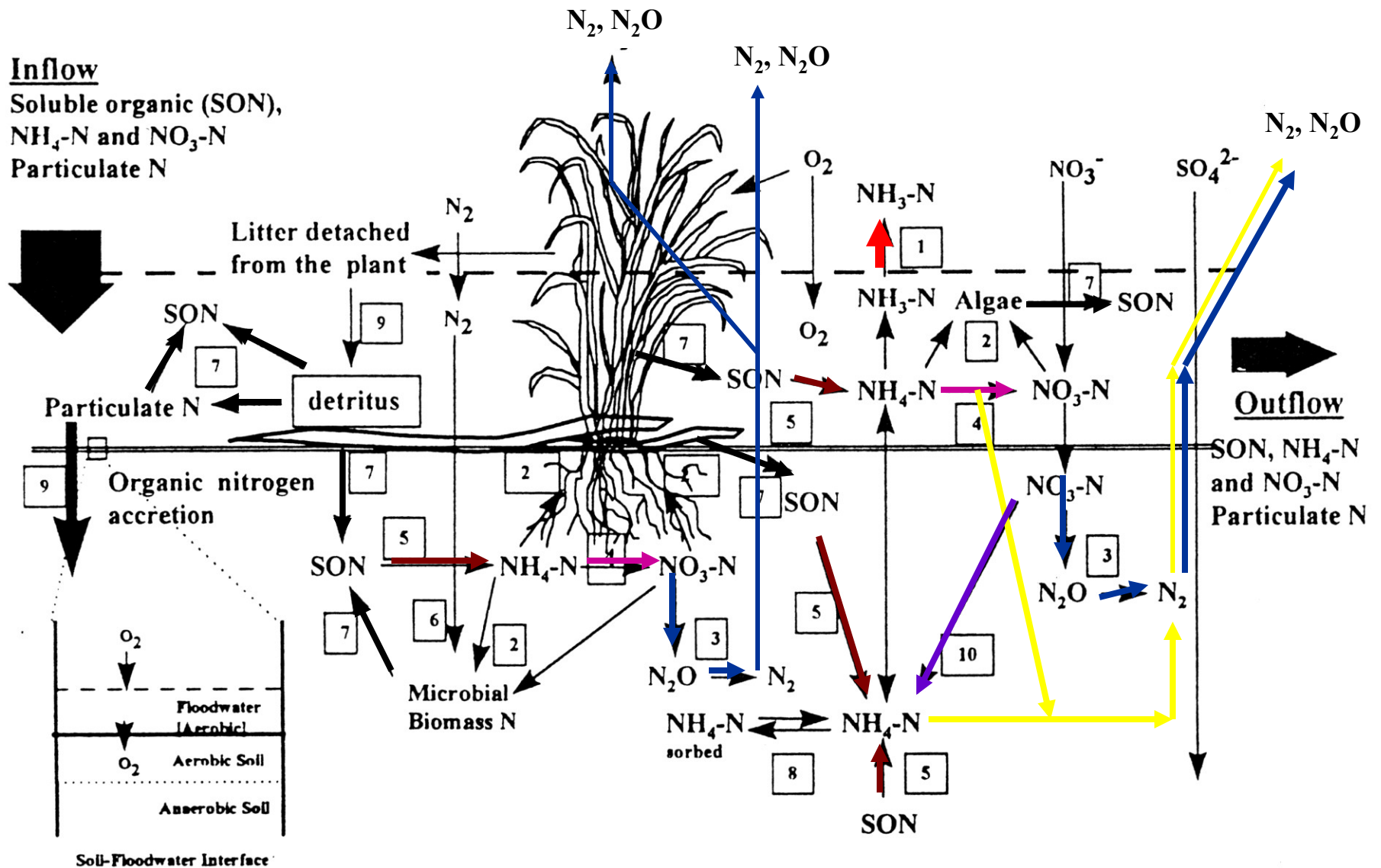
# Anammox – anaerobní oxidace amoniaku



Verstaete and Philips, 1998; Van de Graaf et al., 1996

Nitrát-amonifikace







# Denitrifikace

Denitrifikace je nejčastěji definována jako proces, při kterém jsou nitráty ( $\text{NO}_3^-$ ) redukovány na plynný dusík ( $\text{N}_2$ ) přes dusitany ( $\text{NO}_2^-$ ), oxid dusnatý ( $\text{NO}$ ) a oxid dusný ( $\text{N}_2\text{O}$ ) jako meziprodukty. Proces je znám od roku 1868 (Reiset; Schloessing).



Z biochemického hlediska je denitrifikace bakteriální proces, při kterém oxidy dusíku slouží jako konečný příjemce elektronů pro transport elektronů při respiraci



Reakce je nevratná a probíhá pouze za přítomnosti organického substrátu za anoxických nebo anaerobních podmínek.

Většina denitrifikačních bakterií je chemoautotrofní organismy. Pokud je dostupný kyslík, oxidují tyto organizmy karbohydráty na  $\text{CO}_2$  a  $\text{H}_2\text{O}$

**Nejdůležitější rody:**

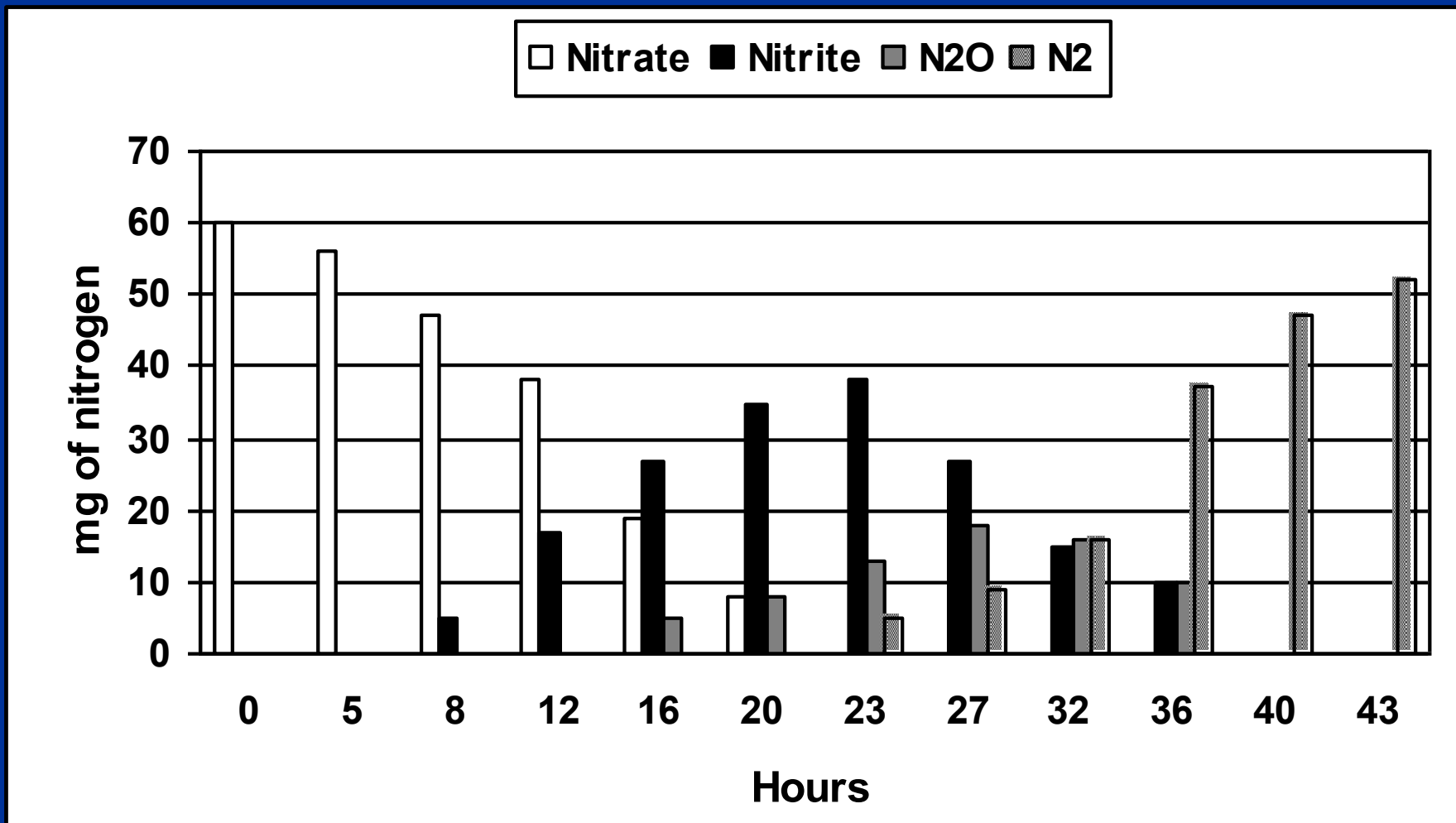
*Bacillus, Micrococcus, Pseudomonas, Alcaligenes, Flavobacterium, Vibrio*

Při  $\text{pH} < 4.5$  je uvolňován jen  $\text{N}_2\text{O}$ , při  $\text{pH} > 5.0$  je hlavním produktem denitrifikace  $\text{N}_2$

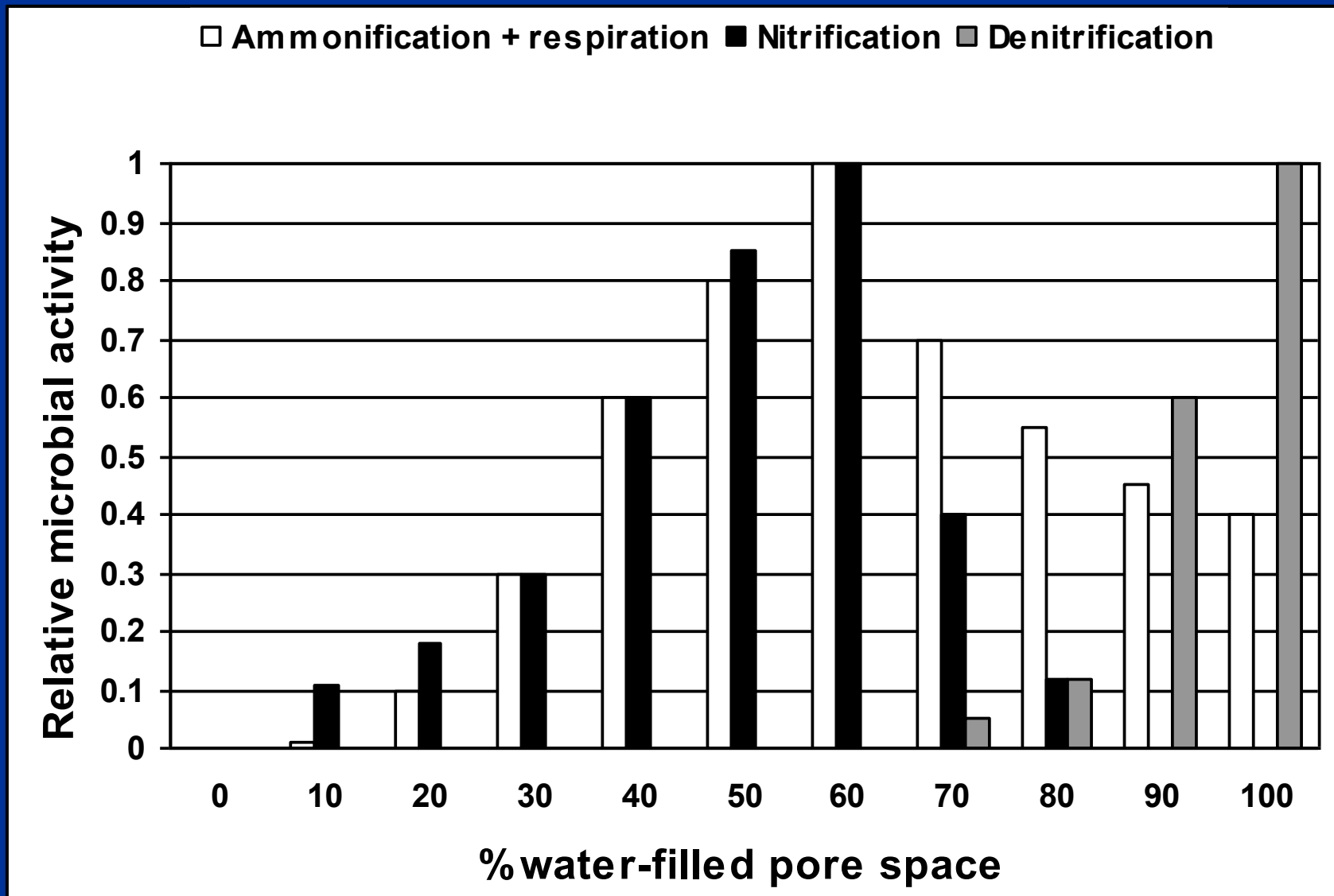
**Nitrifikace a denitrifikace probíhají současně ve vodním prostředí a zaplavených sedimentech v případě, že se vyskytují aerobní i anaerobní zóny.**

**Kombinaci nitrifikace a denitrifikace lze vyjádřit jako: (Patrick & Reddy 1976):**

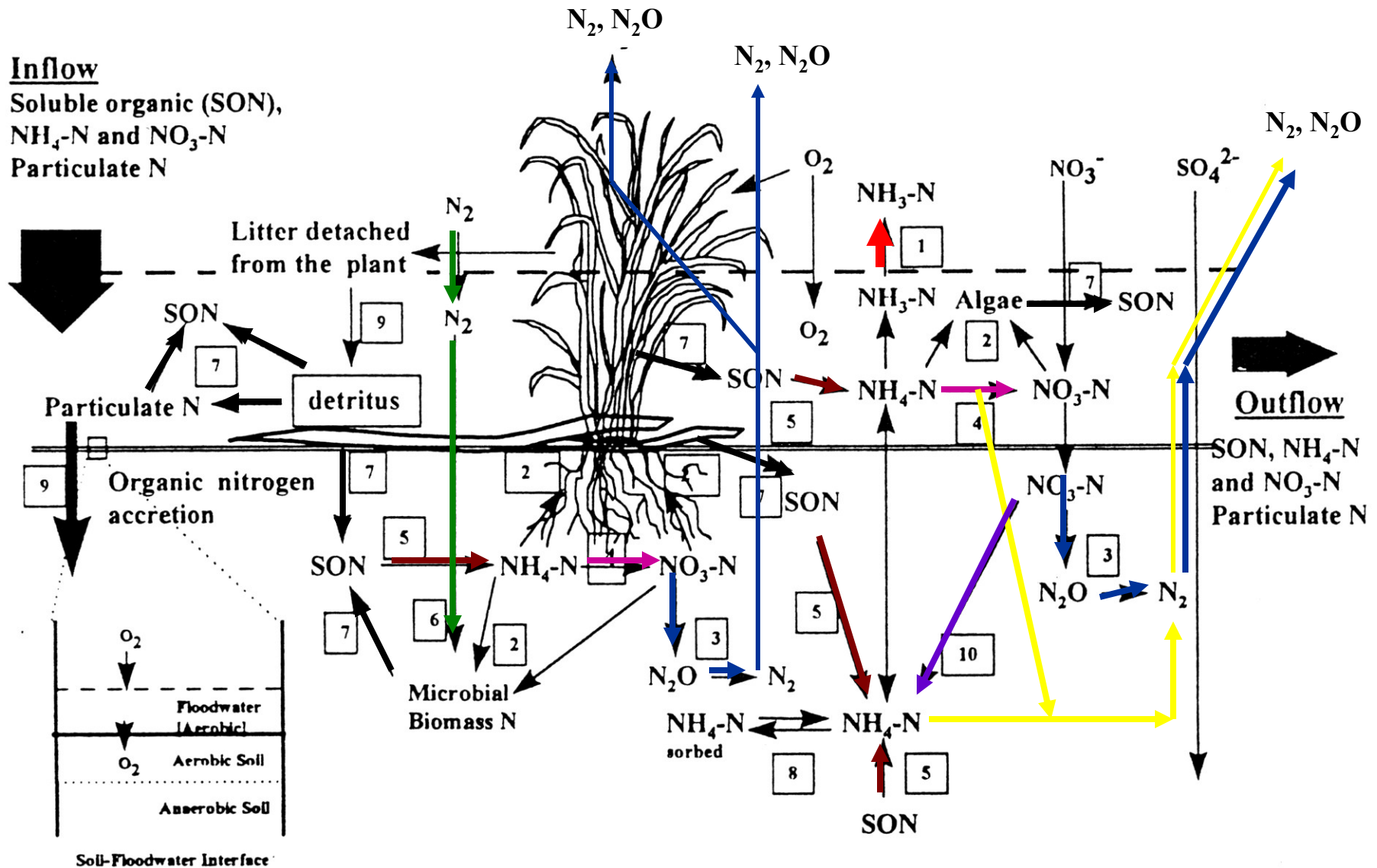




**Množství jednotlivých sloučenin dusíku při denitrifikaci (Cooper a Smith, 1963)**



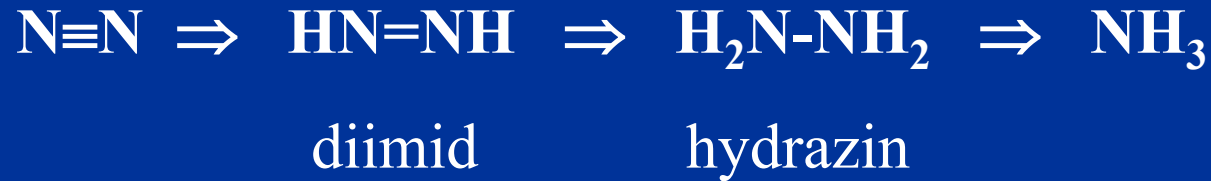
Relativní rychlost půdní denitrifikace a dalších mikrobiálních procesů jako funkce vyplnění půdních pórů vodou (Linn a Doran, 1984)



## Fixace N<sub>2</sub>

Fixace vzdušného dusíku je konverze plynného dusíku na amoniak

Schopnost fixovat dusík mají aerobní, fakultativně anaerobní a striktně anaerobní organizmy, ale fixace v anaerobních podmínkách je vyšší



Volně žijící bakterie (*Bacillus*, *Klebsiella*)

Aktinomycety (*Frankia*) - *Alnus glutinosa*

Cyanobaktérie (*Anabaena*, *Nostoc*, *Scytonema*)



*Nostoc punctiforme*



*Anabaena laponica*

Foto Jan Kaštovský





*Tolypothrix elenkini*

Foto Tomáš Hauer

Těkání  $\text{NH}_3$

Fragmentace a vyplavování

Mineralizace

Nitrifikace

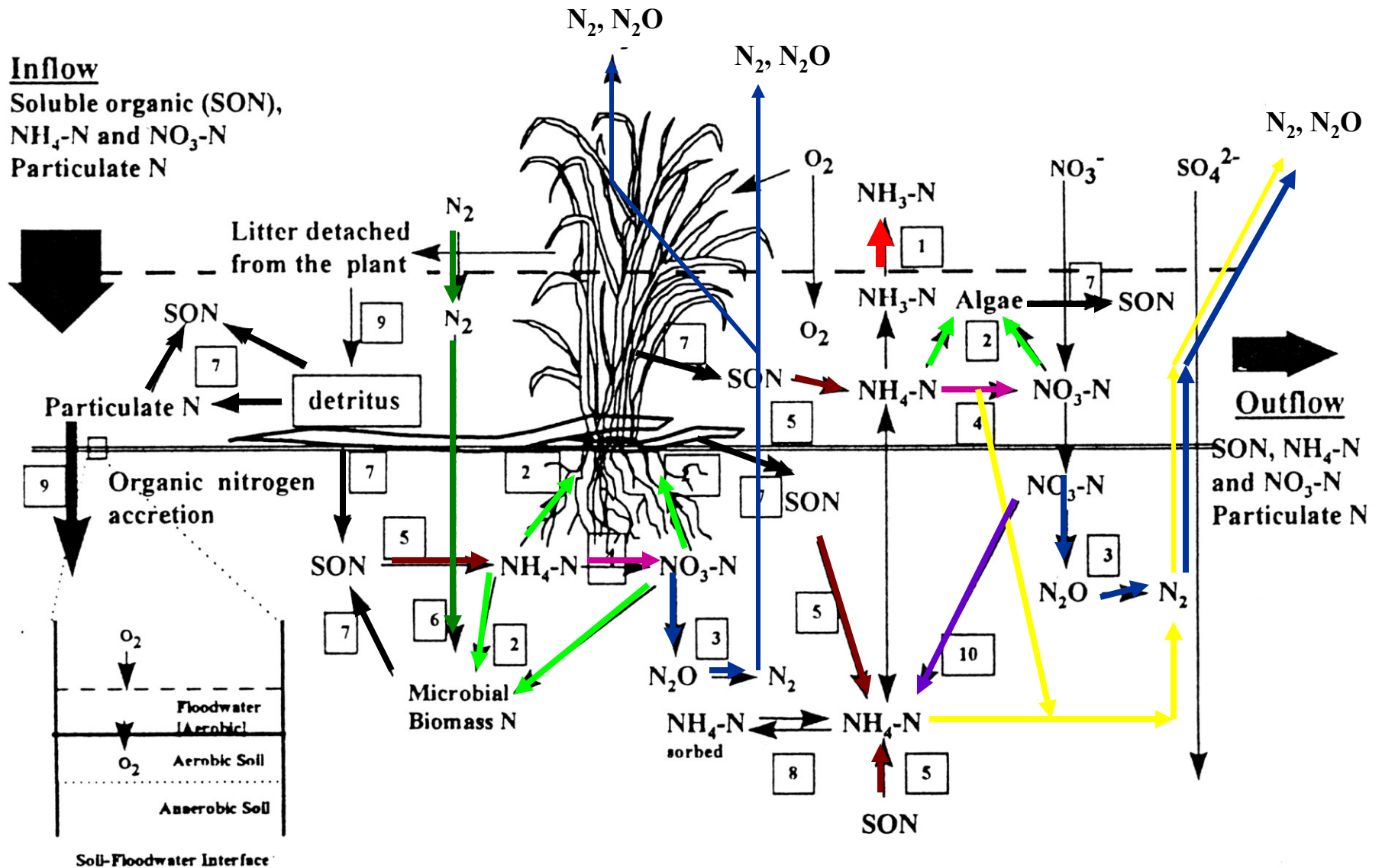
Anamnox

Nitrát-amonifikace

Denitrifikace

Fixace

Příjem rostlinami



**Asimilace dusíku je soubor biologických procesů, kterými se transformují anorganické formy dusíku na organické sloučeniny, které slouží jako stavební bloky pro buňky.**

**Většina vyšších i nižších rostlin je schopna asimilovat jak amoniak tak dusitany a dusičnany. Amoniak jako zdroj dusíku je energeticky výhodnější, protože dusičnany je nutné redukovat (nitrát reduktáza).**

**Po odumření rostlinných tkání se dusík dostává zpět do vodního prostředí**

Těkání NH<sub>3</sub>

Fragmentace a vyplavování

Mineralizace

Nitrifikace

Anammox

Nitrát-amonifikace

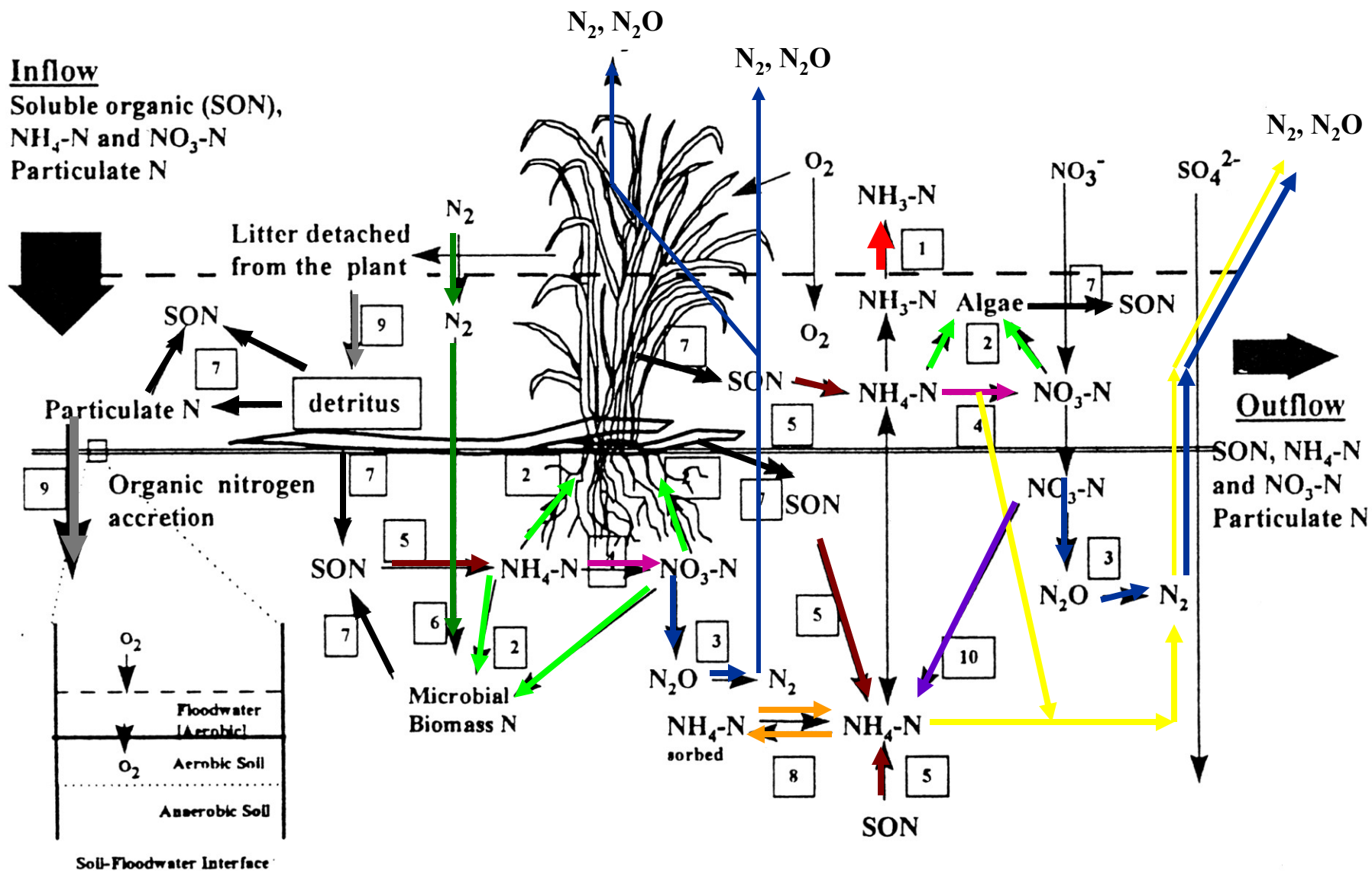
Denitrifikace

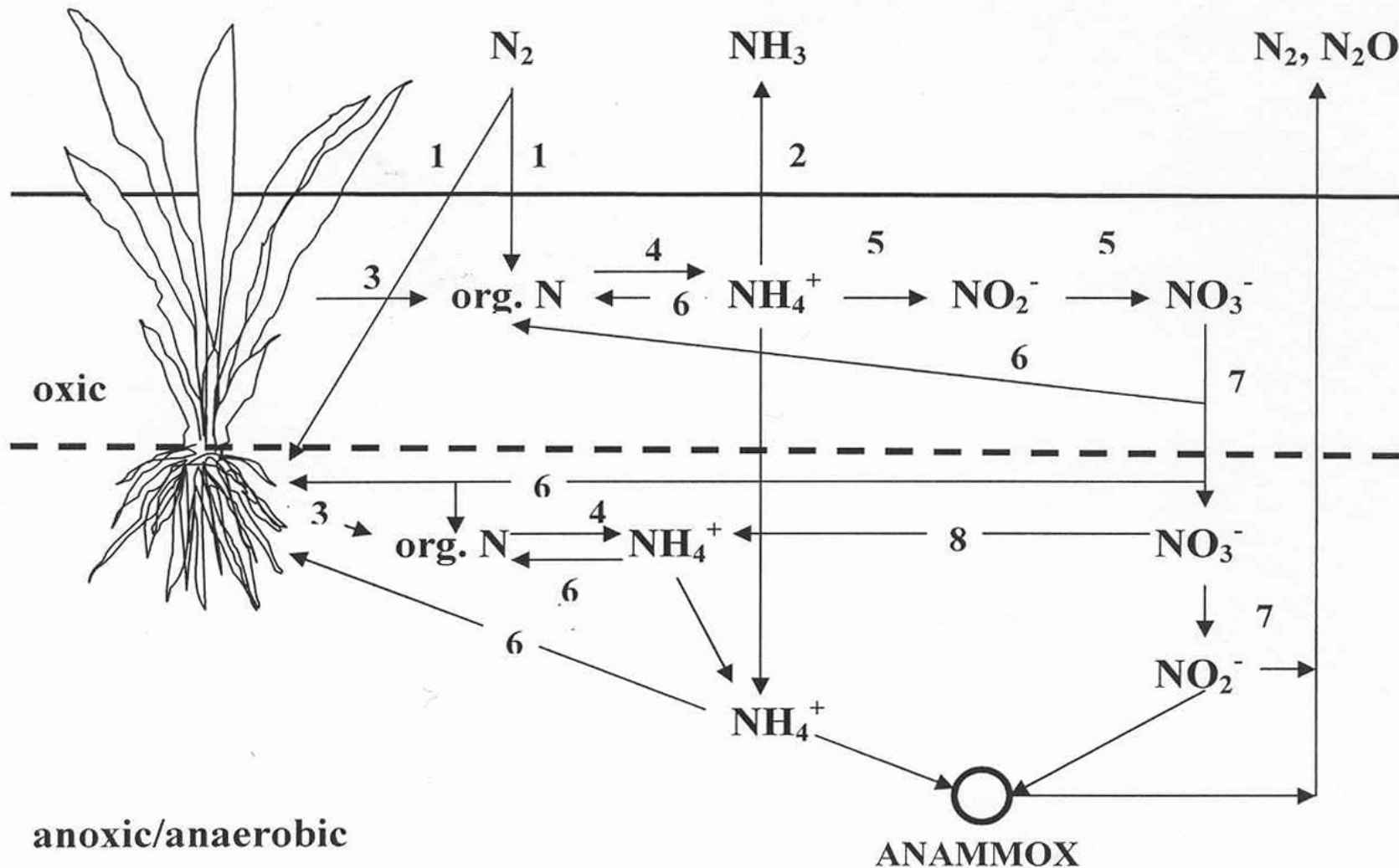
Fixace

Příjem rostlinami

Sorpce a desorpce

Ukládání





Hlavní transformace dusíku v aerobních (oxických) a anaerobních a anoxických zónách akvatického systému. 1-fixace  $N_2$ , 2-těkání amoniaku, 3-vyplavování, 4-ammonifikace (mineralizace), 5-nitrifikace, 6-příjem, 7-difúze nitrátů a následná denitrifikace, 8-nitrát-ammonifikace

# Rychlost jednotlivých transformačních procesů, optimální teplota a pH

Proces	Rozpětí (g N m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	Teplota <sup>1</sup> (°C)	pH <sup>1</sup>
Amonifikace	0.004 - 0.357	40 – 60	6.5 - 8.5
Nitrifikace	0.010 - 0.290	30 - 40	6.6 - 8.0
Denitrifikace	0.003 - 1.020	60 - 75	6.0 - 8.0
Fixace	půda		
	voda		
	rostliny <sup>2</sup>		
Těkání	up to 2.20		> 8.0
Rostl. příjem	0.018 - 0.510		
	emerzní rostliny	0.032 - 0.163	
	volně plovoucí	0.018 – 0.510	
Ukládání org. N	0.04 - 0.093		

<sup>1</sup>optimální, <sup>2</sup>microorganizmy rostoucí na rostlinách

**Fosfor (P)**

# **Transformace fosforu v mokřadech**

**Adsorpce/desorpce**

**Srážení/rozpuštění**

**Asimilace (rostliny/baktérie)**

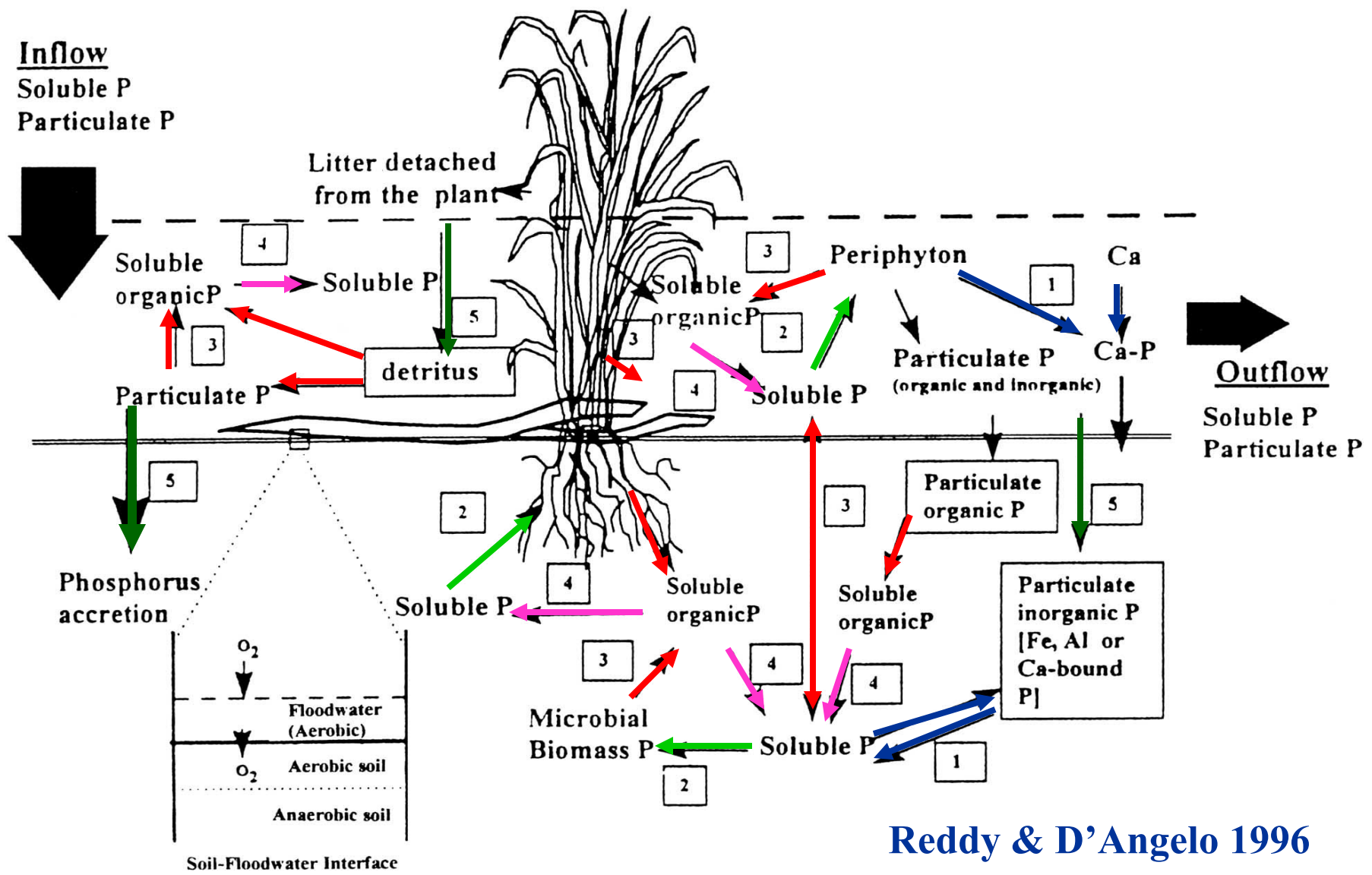
**Fragmentace a vyplavování**

**Mineralizace**

**Sedimentace (nárůst půdního  
profilu)**

**Ukládání**





## **Mechanismy kontrolující dlouhodobé (LT) a krátkodobé (ST) ukládání fosforu v akvatických systémech (Richardson 1999)**

<b>Mechanismus</b>	<b>Míra</b>	<b>Rychlost</b>
<b>Přirůstání půdního profilu (LT)</b>	<b>vysoká</b>	<b>velmi malá</b>
<b>Adsorpce půdy (LT)</b>	<b>nízká/střední</b>	<b>střední</b>
<b>Srážení (LT)</b>	<b>střední</b>	<b>vysoká</b>
<b>Rostlinný příjem (ST)</b>	<b>nízká/střední</b>	<b>malá</b>
<b>Sorpce detritu (ST)</b>	<b>nízká</b>	<b>vysoká</b>
<b>Mikrobiální příjem (ST)</b>	<b>velmi nízká</b>	<b>velmi vysoká</b>

## Krátkodobá a dlouhodobá kapacita ukládání fosforu ve vodních ekosystémech (Houghton Lake, Michigan, USA, Richardson, 1999)

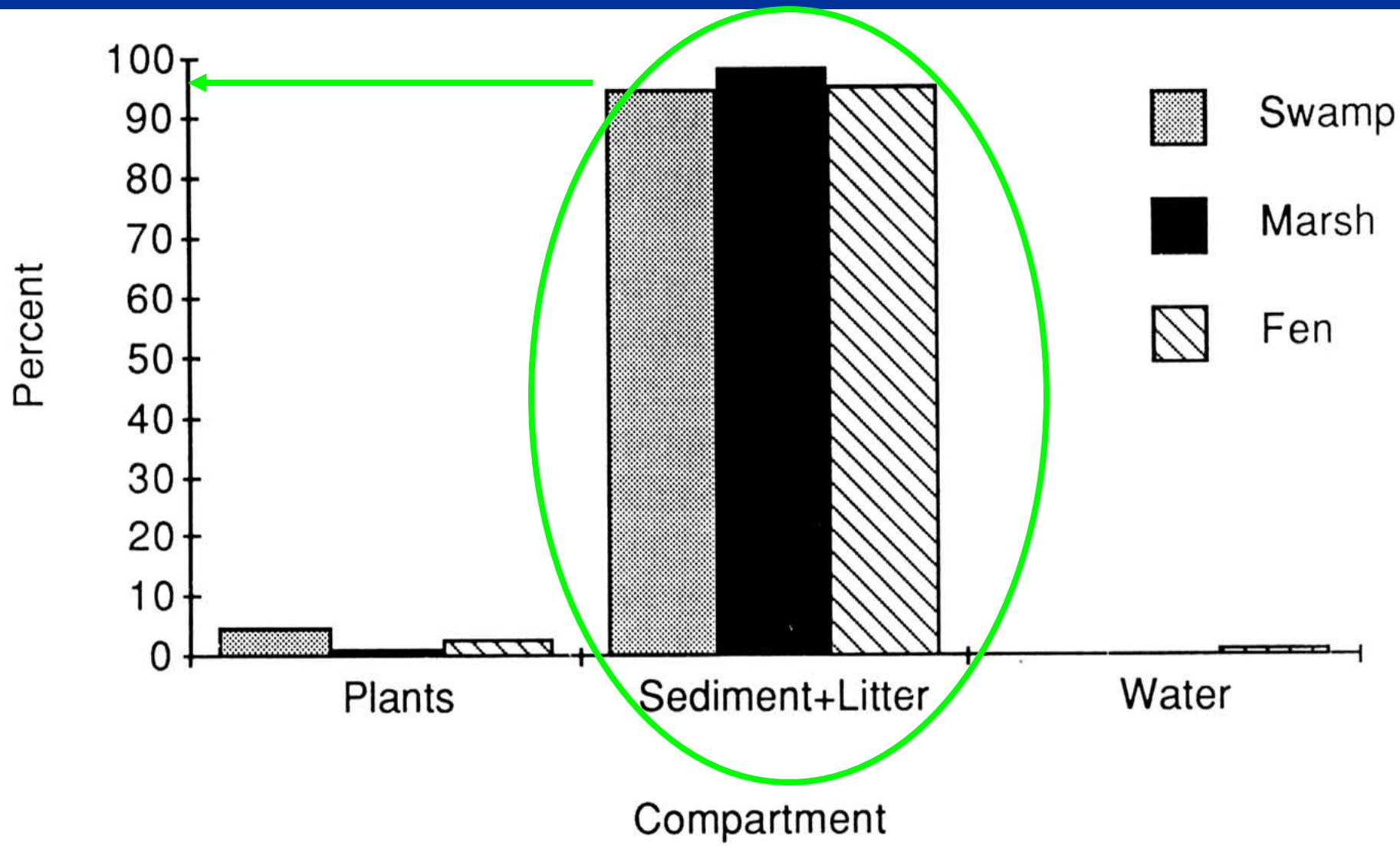
	Rozmezí (g m <sup>-2</sup> yr <sup>-1</sup> )	%
<b>Baktérie</b>	<b>0.5-1.0</b>	<b>12-13</b>
<b>Řasy</b>	<b>1.0</b>	<b>12-25</b>
<b>Makrofyta</b>	<b>1.0-2.5</b>	<b>25-30</b>
<b>Adsorpce půdy</b>	<b>1.5-3.8</b>	<b>38-46</b>

**Krátkodobá kapacita 4.0-8.3**

**Dlouhodobá kapacity (5ti leté sledování)**

**0.92 0.15**

# Ukládání fosforu v různých částech mokřadů (Verhoeven 1986)



# Transformace síry v mokřadech

## Aerobní podmínky

Asimilační redukce sulfátů (rostlinný příjem):  $\text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{org. S}$

Mineralizace:  $\text{org. S} \rightarrow \text{SO}_4^{2-}$

Oxidace siričků:  $\text{H}_2\text{S} + \text{O}_2 \rightarrow \text{S} + 2 \text{H}_2\text{O} + \text{energie}$

*Thiobacillus*

Oxidace elementární S:  $2 \text{S} + 3 \text{O}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{energie}$

## Anaerobní podmínky

Disimilační redukce sulfátů:  $\text{SO}_4^{2-} + \text{mléčnan} \rightarrow \text{H}_2\text{S} + \text{acetát} + \text{CO}_2$

*Desulfovibrio*

$\text{SO}_4^{2-} + \text{acetát} \rightarrow \text{H}_2\text{S} + \text{CO}_2$

Asimilace  $\text{H}_2\text{S}$ :  $\text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{S} \rightarrow 2 \text{S}^0 + \text{H}_2\text{O} + \text{CH}_2\text{O}$

Mikrobiální příjem

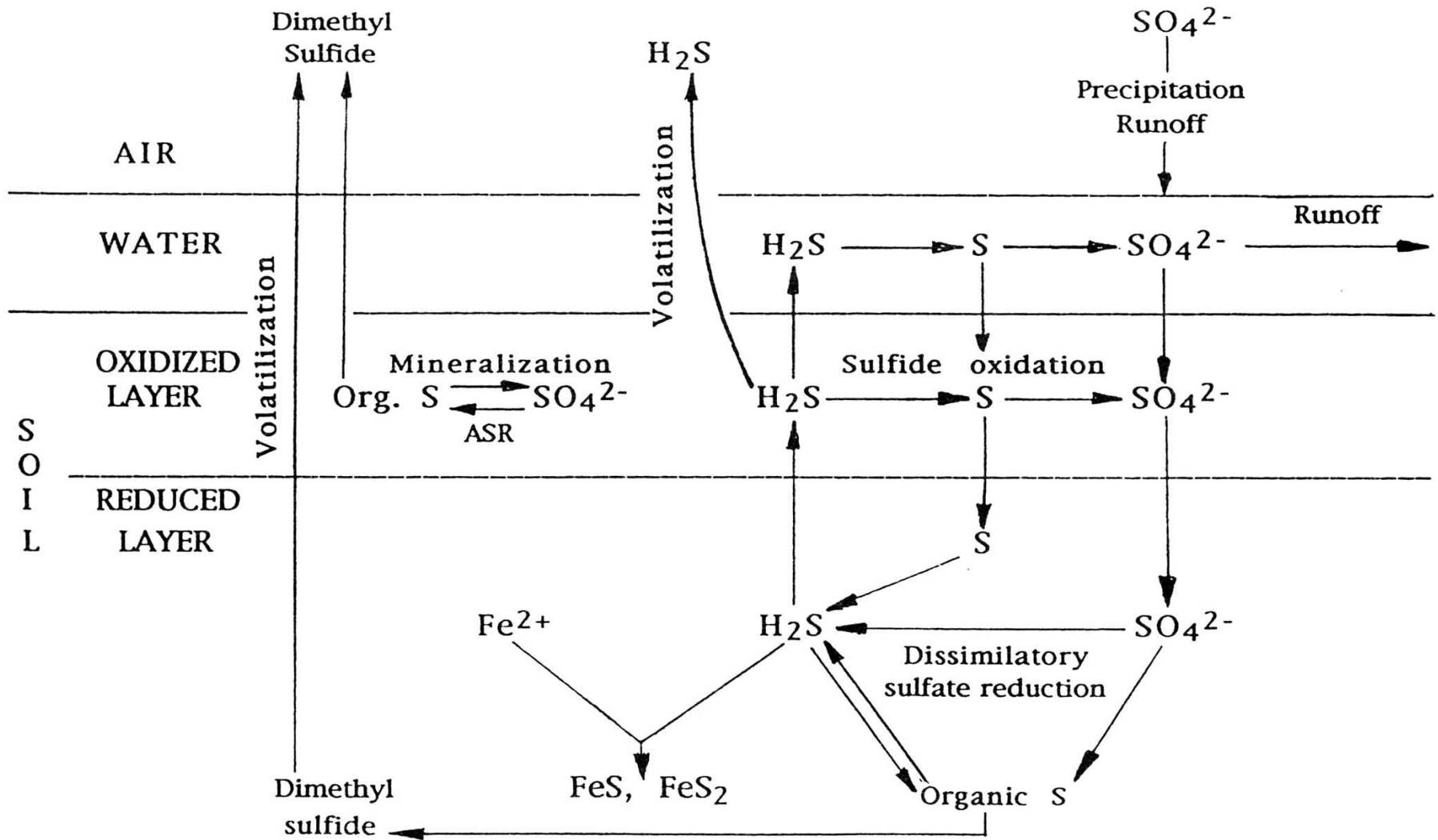
světlo

(Těkání)  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $(\text{CH}_3)_2\text{S}$

Tvorba Fe sulfidů ( $\text{FeS}$ ,  $\text{FeS}_2$ )

Fotosyntetické bakterie: fialové (*Chromatium*), zelené (*Chloribium*)

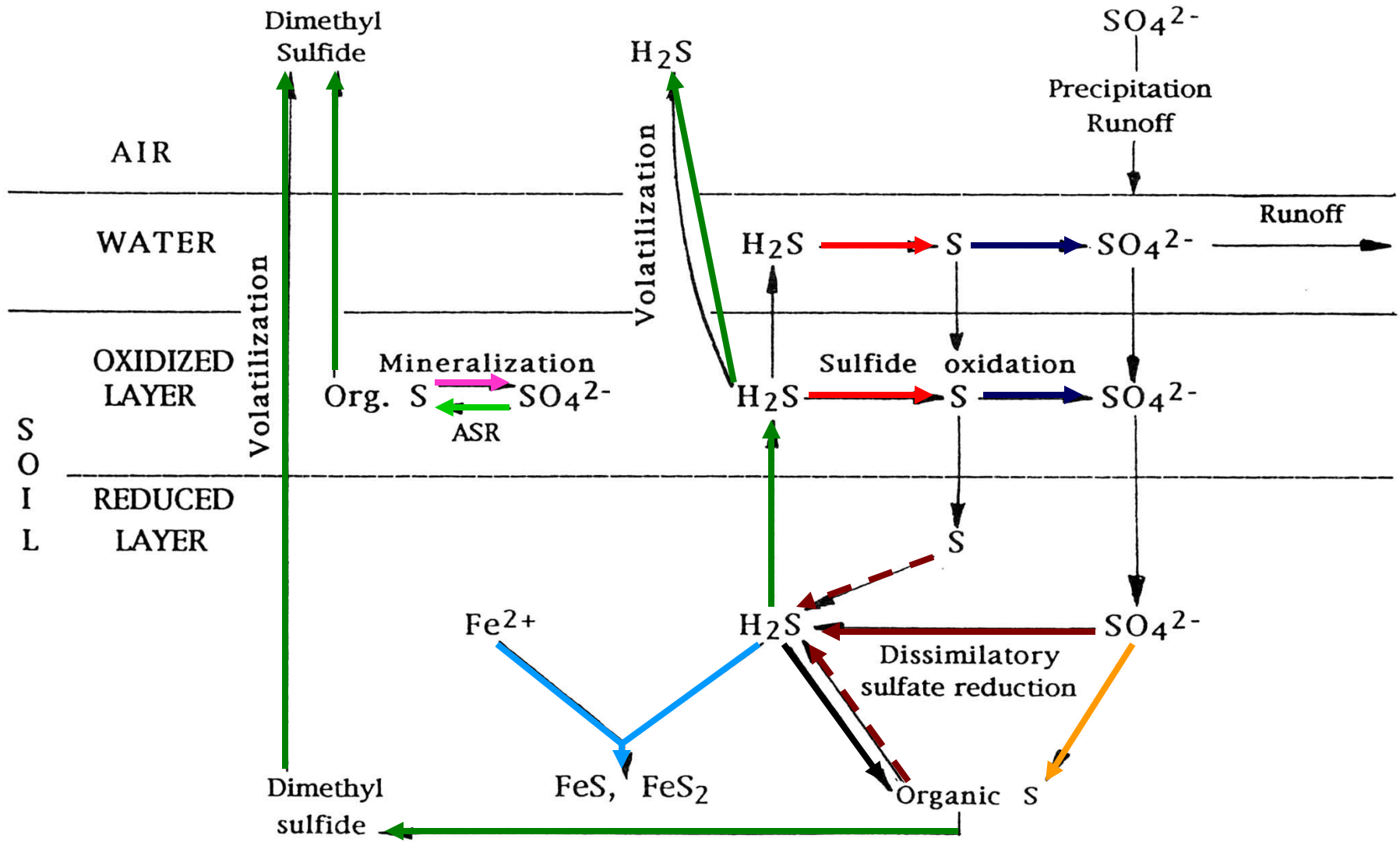
# Transformace síry v mokřadech



**Asimilační redukce síranů**      **Mineralizace**      **Oxidace sulfidů**      **Oxidace elementární S**

**Disimilační redukce sulfátů**      **Microbiální příjem**      **Asimilace H<sub>2</sub>S**      **Těkání**

**Tvorba Fe sulfidů**



**Elementární síra na  
odtoku z ČOV Mořina**





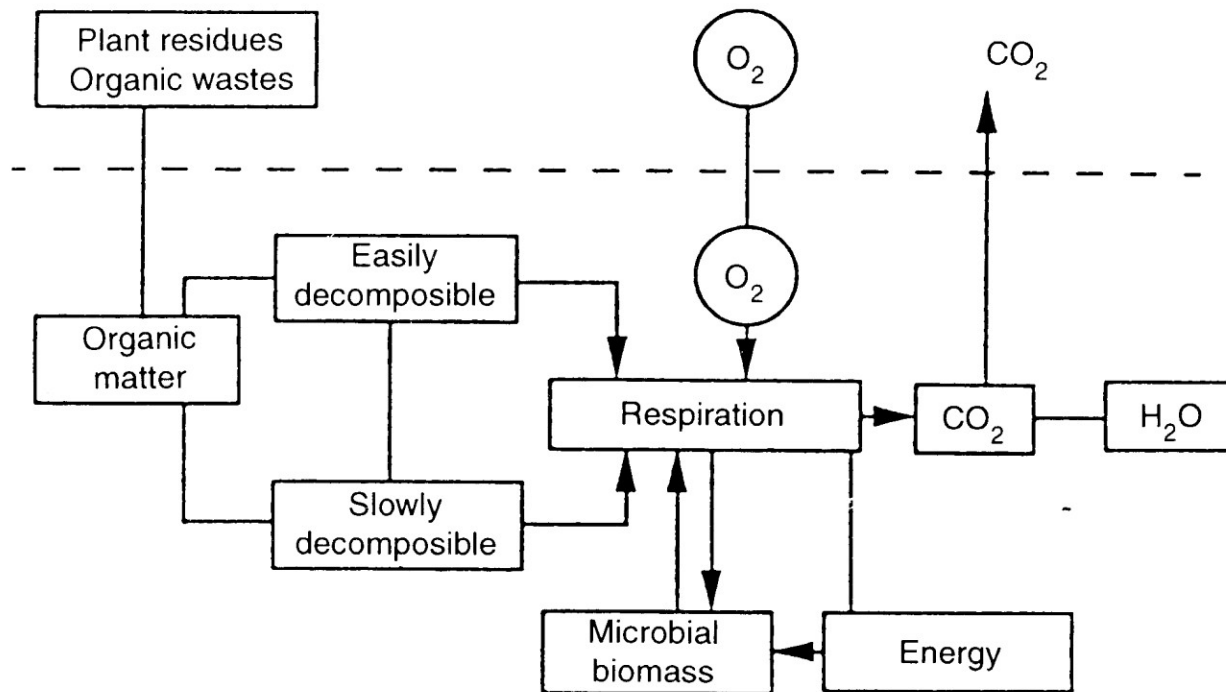
A

Aerobic respiration

O<sub>2</sub> reduction

Eh ≥ 300 mV

Zone I



B

Facultative anaerobic  
respiration

Zone II

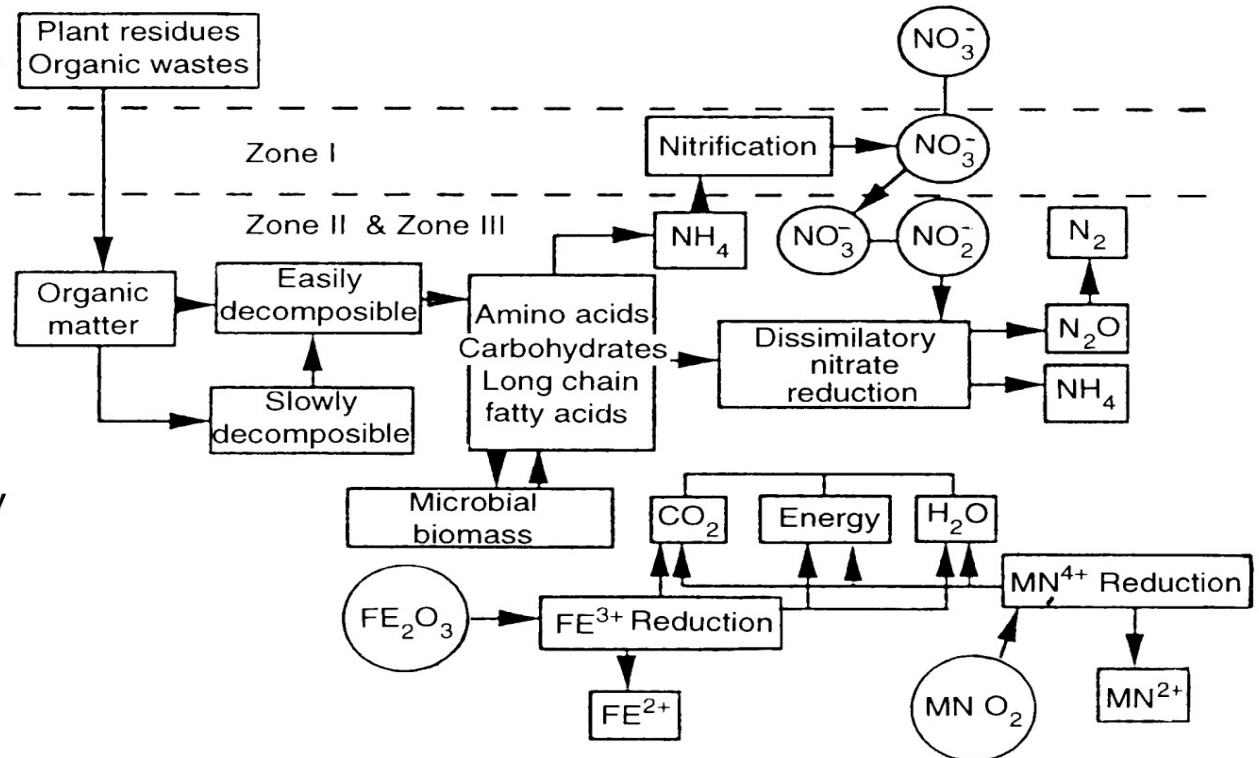
$\text{NO}_3^-$  } reduction  
 $\text{Mn}^{4+}$  }

Eh = 100 to 300 mV

Zone III

$\text{Fe}^{3+}$  reduction

Eh = -100 to 100 mV



C

Anaerobic respiration

Zone IV

Sulfate reduction

Eh = -200 to -100 mV

Zone V

Methane formation

Eh = < -200 mV

