

SEDIMENTY POHLEDEM ENVIRONMENTÁLNÍ MIKROBIOLOGIE

Unikátní místo výskytu mikroorganismů a obří potenciál využít jejich schopnosti v technické ochraně životního prostředí

Jiří Mikeš, EPS, s.r.o.
V Pastouškách 205, 686 04 Kunovice

klíčová slova: sedimenty, mikrobiální populace, kontaminace, biotechnologie životního prostředí

Obsahem příspěvku je poukázání na velmi zajímavou součást životního prostředí, již sedimenty bezesporu představují. Zvolená forma logickým způsobem reflektuje potřebu popsat toto prostředí, charakterizovat ho z hlediska abiotického i biologického, poskytnout rámcový přehled metodických aparátů využívaných k jejich studiu a v neposlední řadě podtrhnout roli mikroorganismů v přirozených i kontaminovaných sedimentech, s důrazem na možnosti pramenící z jejich metabolických a fyziologických dispozic. Text si neklade za cíl vyčerpávající postihnoutí tématu, nýbrž široké, mezioborové pojetí, které je vymezené společným jmenovatelem, jež představují mikrobiální příslušníci existující v těchto podmínkách, jejichž vlastnosti determinuje nízká koncentrace vzduchu, vysoký podíl anorganické matrice a téměř anoxický režim.

Geologická a hydrogeologická teorie sedimentů

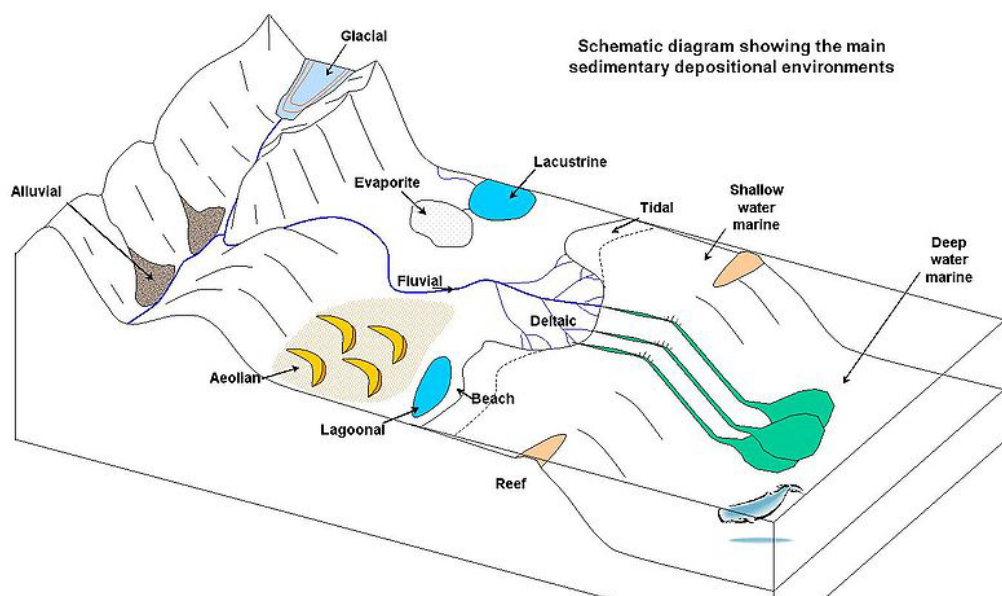
Sedimenty bývají v učebnicích geologie charakterizovány jako útvary, jejichž společnými vlastnostmi jsou způsob, jakým vznikaly a vznikají, jak se transformují v důsledku přirozených i negativních dopadů a jaká je jejich role v prostředí obecně. Kombinací chemických, biologických a geologických procesů dochází ke vzniku uspořádání hmot po celou historii země. Právě míra přeměny, chemické vlastnosti a stáří přeměny jsou klíčové pro utváření konkrétních forem sedimentů. V širším myšlenkovém kontextu musí být zdůrazněno, že právě transformace usazenin sehrály klíčovou roli jak z geografického hlediska (formování dílčích složek neživých součástí životního prostředí v kontextu místa jejich vzniku), tak z hlediska petrografického (determinace podmínek utváření sedimentárních hornin). Na tomto místě je potřeba zdůraznit nemalý vliv mikrobiálních procesů, který bude zmíněn v následujících částech textu. V rámci mikrobiologie existuje její část, předmětem jejíhož zájmu jsou objekty označované v anglosaské literatuře jako *microbial sediments*¹, tedy sedimenty utvořené, změněné a transformované právě v důsledku jejich osídlení konkrétními formami mikrobiálních, zejména bakteriálních společenstev adaptovaných na minimální dostupnost organických substrátů a využívajících rozmanité anorganické materiály jako svoje akceptory a donory elektronů, popř. figurující v jejich metabolických pochodech i jako stavební komponenty. Sedimentologie (geologická disciplína studující podstatu sedimentů) operuje s termínem sedimentární fácie, jejímž prostřednictvím postihuje znak nebo skupinu znaků, za nichž konkrétní sediment vznikal. Švýcarským geologem Amanzem Gresslym (1838) zavedený termín fácie významným způsobem napomohl k rozvoji stratigrafie. Obecně se sedimentární fácie rozlišují na

¹ Riding RE, Awramik SM: Microbial Sediments, Springer (2000) ISBN-10: 3540618287.

kontinentální, přechodné a oceánské. Tabulka I. přehledným způsobem vytváří přehled míst, kde v průběhu geologických dějin Země docházelo k depozici hmoty formou sedimentace konkrétních částic a vzhledem k potřebám tohoto textu vymezuje vhodným způsobem oblasti, které jsou v kontextu řešení environmentálních problémů spojených s kontaminací životního prostředí v důsledku antropogenních aktivit předmětem zájmu příslušných řešení nejenom inženýrské (technické) povahy, ale rovněž socioekonomické, legislativní a výzkumně-vědecké. Doprovodným ilustrativním materiálem je schematický obrázek 1, který dotváří představu komplexním způsobem, kde ke kumulacím sedimentů v profilu vývoje zemského povrchu docházelo a kde je možné vymezit oblasti případných environmentálních problémů.

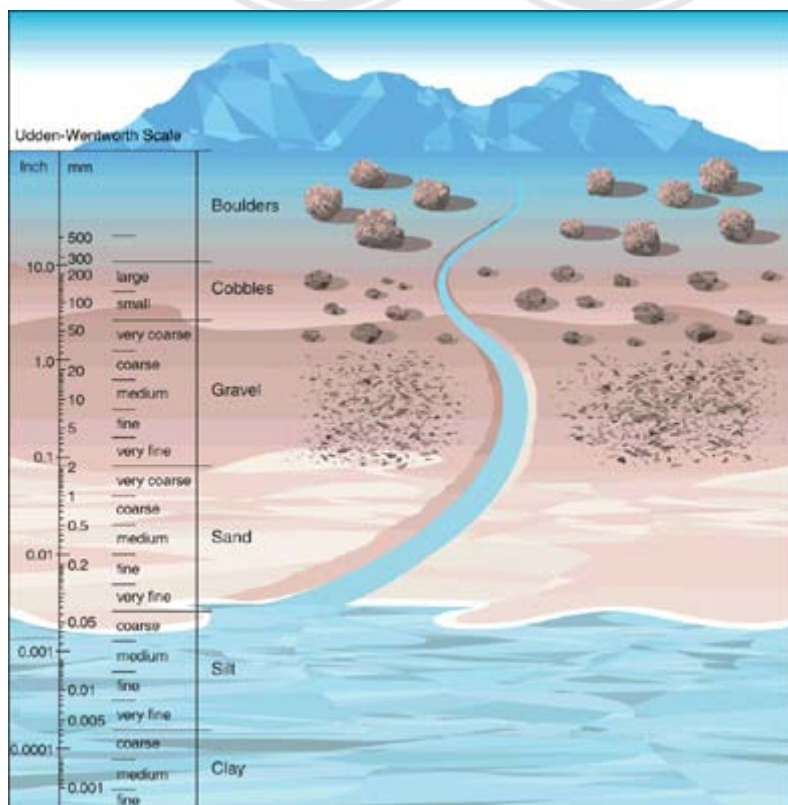
Tabulka I. Typy sedimentů (geologicky)

Skupiny sedimentů	typ depozice	charakterizace místa depozice
Kontinentální	subaerické	sedimenty vzniklé v důsledku glaciálních, vulkanicko-terestriálních, eolických (vzdušné proudy) a reziduálních procesů
	subakvální	sedimenty vzniklé činností fluviaální (proudění vodních toků) a limnickou (např. v jezerech a podobných vodních rezervoárech)
Přechodné	deltové	sedimenty formované v oblasti ústí vodních toků do moří, jezer a oceánů, pro které je vysoká sedimentární aktivita jednou z typických vlastností
	lagunické	často i sedimenty oddělené části moře s charakteristickou sedimentární aktivitou
Oceánské	rifové	sedimentární procesy, které souvisí s tvorbou podkladů pobřežních mělčin
	pelagické	široomořské sedimenty deponované ve velkých vzdálenostech na mořském dně, daleko od kontinentů



Obr.1 Sedimentární prostředí depozice hmoty

Z technického hlediska je rovněž důležité ustavit konkrétní přístupy charakterizace sedimentů, které reflektují jak jejich chemismus, ale také morfologii. Vedle chemického složení je důležitým parametrem také granularita (hydrogeologický aspekt), velikost částic, které se podílejí na stavbě sedimentu, tvorby gradientů plynů, stratifikace nutrientů apod. V sedimentologii se pro potřeby klasifikace granularity používá tzv. *Udden-Wentworthova škála*, která je znázorněna na obrázku 2.



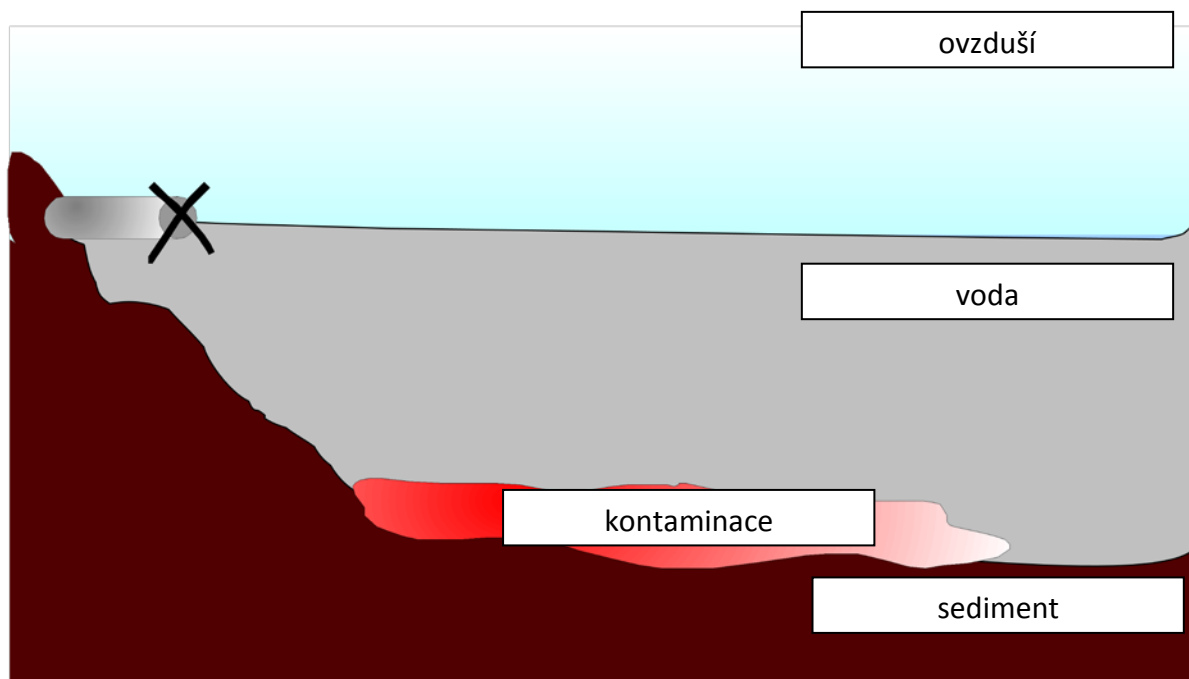
Obr. 2 *Udden-Wentworthův diagram*

Uvedený diagram klasifikuje částice, jež vlastní sedimenty vytvářejí, z hlediska jejich velikosti. Pro vyjádření chemismu sedimentů jsou klíčové tři oblasti: Role mateční horniny (lithologie), minerální skladba a chemický vznik.

Otázka tzv. organogenních sedimentů spadá rovněž do tématických okruhů příspěvku. Posmrtnou depozicí živočišné a rostlinné hmoty na dnech vodních rezervoárů vzniká materiál významně bohatý na uhlík. Na dnech moří probíhá relativně nedávno objevený proces chemosyntézy, jenž je urychlován teplem pocházejícím z hydrotermálních pramenů. Dlouhé řetězce organických polymerů jsou dekomponovány na jednodušší fragmenty a cyklické molekuly, jež jsou nedílnou součástí sedimentů. Později byly transformovány na metan a stávaly se klíčovými prvky v tvorbě zemního plynu. Organogenní sediment ukládaný v svrchních vrstvách sedimentárních struktur na kontinentu a pobřeží sehrává důležitou úlohu spojenou s činností mikroorganismů v rovině spotřeby kyslíku rozpuštěného ve vodě, nastolování anoxických zón a významně koriguje procesy dalších transformačních procesů.

Z hlediska technických řešení ochrany životního prostředí je však mnohem důležitější zaměřovat pozornost na sedimenty z hlediska času a přeměny výrazně mladší. Pro tyto účely se hodí definice sedimentů používaná např. organizací EPA. Na sedimenty nazírá jako na

částice písku, jílu a jiných forem hmoty (vznikajících erozí a zvětráváním) vodních rezervoárů, zdrojů a toků v důsledku jejich transportu vodními proudy, vzduchem a smýváním ze zemského povrchu. Významný je rovněž příspěvek antropogenní činnosti v podobě zemědělských aktivit, stavební činnosti a hornictví. Takto generované částice v sobě často již nesou i složku kontaminantu, jenž tímto vstupuje do prostředí. Čerstvě vytvořené sedimenty se stávají v důsledku nezodpovědné lidské činnosti předmětem znečištění látkami do životního prostředí nenáležícími. Schématicky znázorňuje ukázkou kontaminovaného sedimentu obrázek 3, který ilustruje příklad závažného kontaminantu, jímž je únik rtuti do prostředí.



Obr.3 Kontaminovaný sediment životního prostředí

Mikrobiologie sedimentů

Biologickou složku sedimentů (kontaminovaných i nedotčených) představují zejména prokaryotní organismy je osídlující. Jejich role spočívá v katalýze biogeochemických procesů přeměny hmoty tvořící vlastní podstatu sedimentů. Svými metabolickými nástroji, fyziologií a zejména adaptabilitou osídlit tyto ekosystémy jsou velmi dobře předurčeny ke své úloze klíčového transformačního prvku. Vertikální chemismus sedimentů je determinován právě mikroorganismy a jejich schopností transformovat konkrétní nutriční zdroje (uhlík, dusík, fosfor), využívat je formou asimilace i formou svých energetických zdrojů (akceptory a donory elektronů). Pochopení mechanismů změn představuje klíčový informační soubor, jakým způsobem je hmota v sedimentech transformována. Tyto skutečnosti nabývají na svém ještě větším významu právě v situacích, kdy do sedimentů v důsledku antropogenních aktivit vstupují látky nepřírodní, tedy konkrétní formy kontaminantů. Má-li být pochopena problematika dějů, jimiž jsou sedimenty transformovány, musí být pozornost zaměřena na

rezidentní skupiny přítomných mikrobiálních společenstev. Konvenčně dostupným metodologickým rámcem však bývají k dispozici pouze kusé informace, které mnohdy ještě trpí inflací v důsledku nevhodné interpretace. Pro mikrobiologii sedimentů proto podobně jako pro jiné typy matric životního prostředí bylo klíčové zavedení metod nespojených s kultivacemi zájmových mikrobiálních populací – tedy techniky postavené na principech molekulární biologie, které budou v kontextu sedimentů krátce uvedeny v další části textu.²

Uchopit problematiku mikrobiálního osídlení sedimentů není snadný úkol. Existuje bezpočet způsobů, jak je možné na tuto oblast nahlížet. Lze se oprávněně domnívat, že velmi vhodným způsobem, jenž v sobě nese i určité didakticko-edukační hledisko, je vystihnutí paralel souvisejících s biogeochemickými procesy na Zemi, kde úloha mikroorganismů je klíčová. Mikroorganismy výrazně ovlivňují Zemi zřejmě již od dob, kdy se začalo utvářet životní prostředí. Teorie o organizaci organických sloučenin a jejich jednoduchých přeměnách, role prvotně reduktivní atmosféry Země, heterotrofní anaerobní metabolismus prvních organismů, kumulace oxidu uhličitého, postupné obohacování o kyslík a s tím související evoluce jsou stručným vystihnutím základů transformačních procesů. Role v koloběhu prvků jako esenciální podmínky zachování života se týká rovněž sedimentů. Nezastupitelnost mikroflóry v mineralizaci organické hmoty a participace na klíčových cyklech základních prvků živé hmoty se zásadním způsobem odráží i ve formování usazenin a je navíc ovlivněna i přísunem pro životní prostředí netypických látek (polutantů).

Mikroorganismy jsou schopné katalyzovat reakce, které zásadním způsobem ovlivňují fyzikální vlastnosti sedimentů, půdy a vody. Mikrobiální metabolismus může rezultovat jak v procesy rozpouštění, tak precipitace anorganických látek a je prvotním nástrojem oxidace organické hmoty v těchto prostředích přítomné. Tím je rovněž zajištěn významný vliv mikrobiálních společenstev na osud a mobilitu toxických látek dodaných v důsledku lidských aktivit do těchto typů prostředí. Mikroorganismy žijící v hlubších vrstvách Země jsou zodpovědné za bezpočet důležitých geochemických fenoménů. Teprve v nedávné minulosti se prokázalo, že rozmanité komunity mikroorganismů v podpovrchových systémech se do těchto zón nedostaly ze zemského povrchu, ale jsou zde původním osídlením. Poznatky o vlivu těchto organismů na formování geochemismu sedimentárních struktur v kontextu s uvedeným předchozím zjištěním potvrzují důležitost těchto populací i v procesech inženýrsky koncipovaných, jejichž smyslem je kontrola geochemie organických i anorganických látek v znečištěných sedimentech (přirozená atenuace a její technologické využití). Za účelem zužitkování potenciálu, který se v sedimentech prostřednictvím mikroorganismů skrývá (a na který bohužel v řadě aspektů bývá nahlíženo jako na *blackbox*), je nezbytné intenzivní úsilí pochopit podstatu mikrobiálních procesů, interpretovat je v rovině geologického prostředí a včlenit do standardních přístupů používaných v technické ochraně prostředí.

Mikroorganismy disponují několika důležitými typy metabolismu, které jsou velmi frekventovaně se vyskytujícími v prostředí sedimentů. Vynikajícím informačním zdrojem pro pochopení této problematiky, jenž lze doporučit k dalšímu studiu, jsou učebnice *Ehrlichova Geomicrobiology* a *Zehenderova Biology of Anaerobic Microorganims*. Obecně vzato, společným charakteristickým jmenovatelem sedimentů je nedostatek světla, tedy absence fotosyntézy a nutnost využívat pouze ty energetické zdroje, které jsou v sedimentech přítomné nebo ty, které se do nich dostanou v důsledku styku s vodou. Zdroje energie potenciálně využitelné mikroorganismy v jejich metabolismu lze rozčlenit do dvou velkých

² Keneth Nealson: SEDIMENT BACTERIA: Who's There, What Are They Doing, and What's New? Annual Review of Earth and Planetary Sciences Vol. 25: 403-434 (1997) ISBN-10: 3540618287

skupin: organická hmota a skupina redukovaných anorganických látek (dvojmocné oxidy manganu a železa, amonné ionty a sulfidy). V rámci evoluce se mezi mikroorganismy vyvinulo mnoho strategií, jak konzervovat energii uvolněnou procesy využití těchto látek. Využitelnost těchto látek v energetickém metabolismu je podmíněna přítomností vhodných enzymových systémů, které umožňují proces oxidace těchto látek (tedy využití elektronového toku z těchto látek pro svůj vlastní růst a další fyziologické projevy). Z hlediska životního prostředí je pak stěžejní tzv. finální elektronový transfer na vhodný elektronový akceptor, jenž je tohoto prostředí nedílnou součástí nebo do něho byl dodán. Lovley a Chapelle pro označení tohoto děje obecně zavedli termín *terminal electron accepting process* (TEAP)³ – koncový proces akceptace elektronu. V sedimentárním prostředí supluje jeho roli několik látek a podle nich se i příslušný TEAP označuje. Jejich výčet je obsahem tabulky II., která přehledným způsobem sumarizuje, jaké akceptory elektronů poskytuje mikroorganismům specifické prostředí usazenin.

Tabulka II.: Terminální akceptory

TEAP	terminální akceptor elektronů	charakteristika
aerobní respirace	kyslík	marginální proces z hlediska sedimentů
nitratová redukce	dušičnan	denitrifikace a disimilační redukce nitrátu
redukce Mn(IV)	manganičité sloučeniny	důlní vody a jejich sedimenty
redukce Fe(III)	železité sloučeniny	spojené s vysokým bioremediačním potenciálem
sulfátová redukce	sířany	cyklus síry
redukce oxidu uhličitého	oxid uhličitý	methanogeneze

Centrálním intermediátem řady metabolických procesů v sedimentech je acetát, jedna z nejjednodušších molekul figurujících v mikrobiálních látkových přeměnách. Logicky se nabízí otázka, jaká je úloha těchto látek? Mikroorganismy mohou růst, rozmnožovat se a vyvíjet své další aktivity pouze za předpokladu, že k těmto procesům budou mít energii. Zisk energie z metabolického hlediska je třeba vnímat jako redoxní proces, při kterém se jedna ze složek v tomto sledu dějů zainteresovaná redukuje (tzn., že se snižuje její oxidační číslo, např. nitrát se ze stavu III redukuje na nitrit, tedy na stav II) a zároveň musí existovat zdroj elektronů, který dodává elektrony potřebné k této redukci. Vzhledem k tomu, že jedna látka se redukuje (terminální akceptor elektronů), jiná se musí oxidovat (např. zmíněný acetát, jenž se transformuje do podoby oxidu uhličitého). Nicméně organickou část ukrytou nebo dodávanou do sedimentů nereprezentuje pouze acetát, ale dominantní zastoupení má celá škála biopolymerů (bílkoviny, tuky, polysacharidy a nukleové kyseliny), které však musí být před vstupem do vlastních metabolických mikrobiálních cyklů dekomponovány na

³ Mulligan CN, Yong RN: Natural attenuation of contaminants in soils Lewis Publishers (2004) ISBN-10: 1566706173

jednodušší složky. Proces, který generuje využitelné látky, se nazývá hydrolýza. Mikroorganismy jsou schopné i v podmínkách sedimentů exkretovat do prostředí tzv. hydrolasy, což jsou enzymy, které katalyzují štěpení vazeb mezi atomy v přítomnosti vody. Menší fragmenty jako cukry, mastné kyseliny a aminokyseliny pak již mohou prostřednictvím transportních mechanismů vstupovat do buněk a zapojovat se do metabolických dějů. Hydrolýze a oxidaci podléhající látky mohou představovat rovněž různé typy antropogenních polutantů (ropné látky, chlorované uhlovodíky, aromatické sloučeniny), jež do prostředí sedimentů vstoupily v důsledku antropogenní činnosti nebo ekologické havárie. Tímto byl definován proces zvaný jako biodegradace xenobiotik.

Energeticky nejvýhodnějším dějem jsou procesy spojené s využitím kyslíku. Nicméně frekvence jejich výskytu v sedimentech je marginální. Vzhledem k vysoké kompetici tzv. aerobních mikroorganismů bývá tento TAE záhy vyčerpán a v prostředí se trvale udržují podmínky anoxické, resp. podmínky stavu vyčerpání kyslíku. Případné dodávky prostřednictvím vody jsou velmi omezené a v rámci inženýrských řešení by musely být realizovány jeho externí dodávkou v podobě vzdušnění. Ke slovu se tak dostává respirace anaerobní, ve které zastupují kyslík sloučeniny jiné. Aerobnímu metabolismu nejvíce podobným dějem je redukce dusičnanu na plynný dusík. Tento děj je znám jako denitrifikace. Řada denitrifikačních mikroorganismů je schopná existovat i v přítomnosti kyslíku, který z hlediska využití preferuje. Na tomto místě je dobré uvést jeden příklad z problematiky bioremediací. Denitrifikační bakterie jsou schopné využívat jako svůj substrát benzen pouze za přítomnosti kyslíku, v případě, že zásoba kyslíku je vyčerpána, benzen přestává figurovat v procesu jako zdroj elektronů a je nahrazen jinými. Disimilační redukce nitrátu konkuruje denitrifikaci, neboť existuje určitá skupina mikroorganismů, které dovedou redukovat dusičnany až na amonné ionty, nicméně je nejsou schopné využívat v rámci inkorporace této formy dusíku do své buněčné hmoty. Podobně jako aerobní respirace i denitrifikace a disimilační redukce dusičnanu jsou spíše okrajové děje z důvodu nedostatku dusičnanu v hlubších vrstvách sedimentů a v hlubších vrstvách země i z důvodu neexistence vhodného minerálu, který by saturoval potřebu po tomto akceptoru elektronů, děj sporadicky se vyskytující. V případě vyčerpání kyslíku a zdrojů dusičnanů (tedy taxony, které dovedou oxidovat poměrně široké spektrum organických látek) se navozují podmínky vyhovující dalším typům anaerobních respirací. Z hlediska bioremediace se však objevuje problém, jenž způsobuje výrazné omezení okruhu potenciálně využitelných organických látek těmito populacemi. Železo redukující bakterie dovedou bezproblémově oxidovat jednoduché organické kyseliny, dlouhé řetězce mastných kyselin a některé monoaromáty do podoby oxidu uhličitého. Z těchto důvodů jsou velmi závislé na tzv. fermentujících bakteriích. Tyto mikroorganismy přeměňují organické biopolymery, nicméně pouze parciálně. V sedimentárních prostředích jsou typickými fermentativními produkty vodík a acetat, v menších množstvích vzniká i propionát a butyrát. Ačkoliv jejich oxidace organických látek je nekompletní, sehrávají významnou roli prostředníka pro jiné anaerobně respirující bakterie v těchto prostředích, které jejich konečné metabolické produkty jsou schopné dále zpracovávat. Je-li v sedimentech přítomné železo v podobě železitých iontů, dochází k aktivizaci železo redukujících bakterií, které využívají jednoduché organické kyseliny a vodík jako zdroje elektronů, jimiž do prostředí uvolňují ionty železnaté. Obdobně, je-li dostupný mangan ve vyšších oxidačních stupních, ujímá se u konkrétních mikrobiálních populací role akceptoru elektronů. Teoreticky by takto mohly být transformovány i jiné ionty kovů ve vyšších mocenstvích, nicméně většinou k těmto dějům nedochází z důvodů nízké koncentrace těchto látek v prostředí sedimentů. Příkladem transformovatelných kovů a

metaloidů mohou být uran, selen, chrom, molybden a zlato. Toto zjištění je klíčové pro technologické procesy spojené s bioremediací a s biometalurgií (biologická dotěžba zlata). V ještě více reduktivních podmínkách slouží pro řadu mikrobiálních populací jako vhodný akceptor elektronů síranový anion, který je přeměňován v sulfan. Tyto procesy jsou v režii tzv. sulfát redukujících bakterií. Konverze organické hmoty do podoby směsi methanu a oxidu uhličitého není pouze technologickým procesem v rámci anaerobní digesce, nicméně je procesem přirozené se vyskytující. Limitujícím faktorem těchto dějů je ještě více omezené spektrum využitelných organických látek. Nejsou schopné využít aromatické látky a maximálně mastné kyseliny se dvěma atomy uhlíku. Pro potřeby přirozené methanogeneze je žádoucí přítomnost proton oxidujících bakterií, které konvertují aromáty a organické kyseliny do podoby vodíku a acetátu, jež dovedou využívat producenti methanu. Ve specifických podmínkách sedimentů s ohledem na existenci gradientů redox potenciálu dochází k segregaci vrstev predominantně osídlovaných výše popsány skupiny bakterií se specifickými typy metabolismu.

Stať o přirozených procesech v prostředích podobných sedimentům nyní uzavře stručný přehled o paralelní podobnosti masivních i okrajových biogeochemických cyklů, s nímž je možné v usazeninových strukturách počítat. Díky tomuto shrnutí se vytvoří vhodný prostor pro stručnou diskuzi o kultivovatelnosti uvedených mikrobiálních zástupců, jejich roli v bioremediačních procesech a zejména jejich technologickému spřažení s bioprocesy koncipovanými k nápravě škod představovaných kontaminovanými sedimenty. Z důvodu vyšší názornosti jsou tyto skutečnosti shrnuty do tabulky III., která je určitým procesem komplexností dějů, jež mohou v sedimentech probíhat, a je vyzdvížen technologický potenciál.

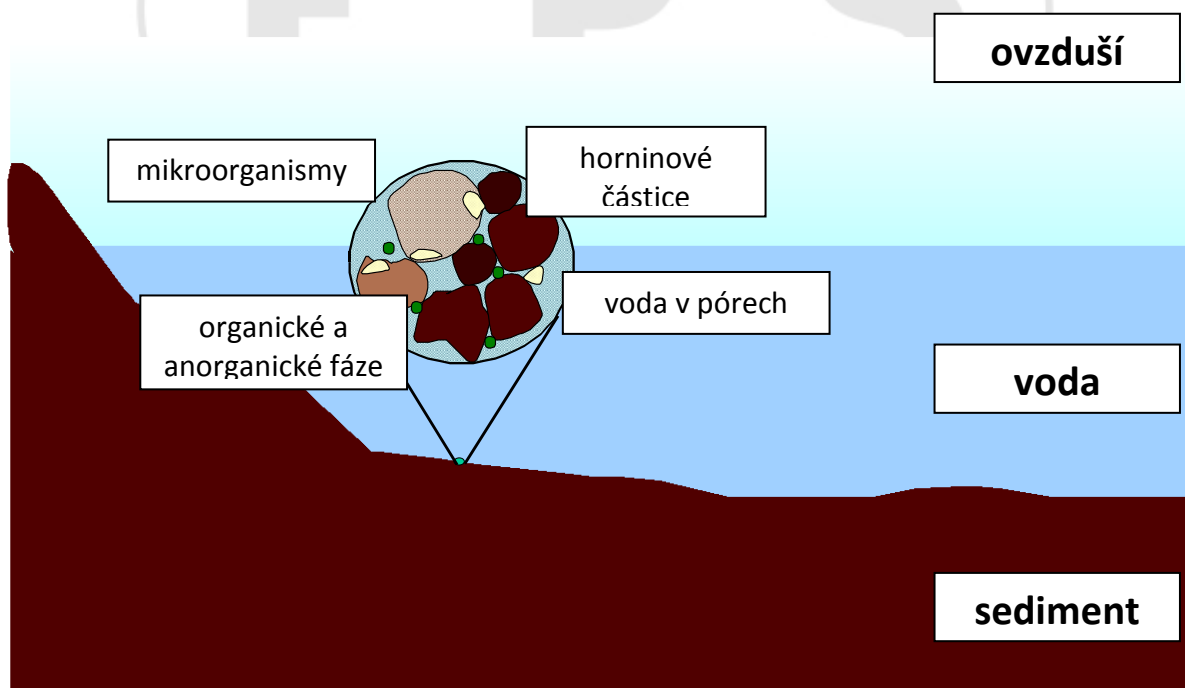
Tabulka III.: Biogeochemické cykly

Prvek biogeochemického cyklu	Mikrobiální role
uhlík, vodík, kyslík	stěžejní asimilace a degradace organické hmoty, respirace, syntéza biopolymerů, degradace ropných uhlovodíků, oxidace xenobiotik, oxidace vodíku, jeho produkce, vodní režim
dusík	disilace, asimilace a transformace mezi přeměnami organických forem a anorganických forem sloučenin dusíku (nitrifikace, denitrifikace, fixace dusíku)
fosfor	přeměny anorganických a organických forem fosfátu jak jejich uvolňováním, tak akumulací do buněčných struktur
síra	obousměrná přeměna síry v jejích maximech a minimech z hlediska oxidačních stupňů
železo	biokoroze
mangan	obousměrná participace na přeměnách oxidačních stupňů i změnách rozpustnosti
chrom	reduktivní transformace
halogeny	dehalorespirace
zlato	biometalurgie

rtuť	methylace rtuti, její precipitace
toxické kovy	bioakumulace, imobilizace pomocí exopolymerů, srážení metabolity

Bioremediace antropogenně znečištěných sedimentů

Přítomnost organických polutantů a toxických kovů v akvatických sedimentech (struktura na obrázku 4) se stala v uplynulých desetiletích závažným environmentálním problémem. V závislosti na biogeochemických procesech se vlivem adsorpce, desorpce a jiných forem transformace se sedimenty staly rezervoárem zejména nepolárních (hydrofobních) látek s vysokým rizikem ohrožovat ekosystémy v závislosti na jejich mobilitě a dostupnosti vstupovat do potravních řetězců. Již řadu let figurují rozmanité polutanty v sedimentech v projektech hledání vhodných řešení, jak je z těchto typů prostředí eliminovat. Nalezení vhodných způsobů dekontaminace je odvislé na chemismu těchto látek, jejich chování v prostředí a množství, v jakém se do těchto matric životního prostředí dostaly. Vedle konvenčních technologií odstraňování kontaminace ze sedimentů se intenzivně rozvíjí i přístupy, které jsou založené na možnostech biologických činitelů hrát aktivní roli v jejich transformaci do podoby méně toxických látek.



Obr. 4 Struktura sedimentu

Technologické přístupy osvědčené a používané při čištění usazenin představuje bagrování a uzavírání v původní matici tak, aby se minimalizovala možnost jejich úniku. Mezi konvenční strategie lze dnes již také řadit procesy spojené s monitorovanou přirozenou atenuací. Velký rozmach zaznamenávají technologie konstruované na principech

bioremediace. Sedimenty mohou být ošetřovány biostimulačními přístupy (včetně aplikace povrchově aktivních látek), bioaugmentací a v případě *ex situ* technologií také fytoředičnými technikami. Otázkou volby zůstává efektivnost technického řešení ve smyslu dosažení sanačních limitů a také ekonomický aspekt procesu.

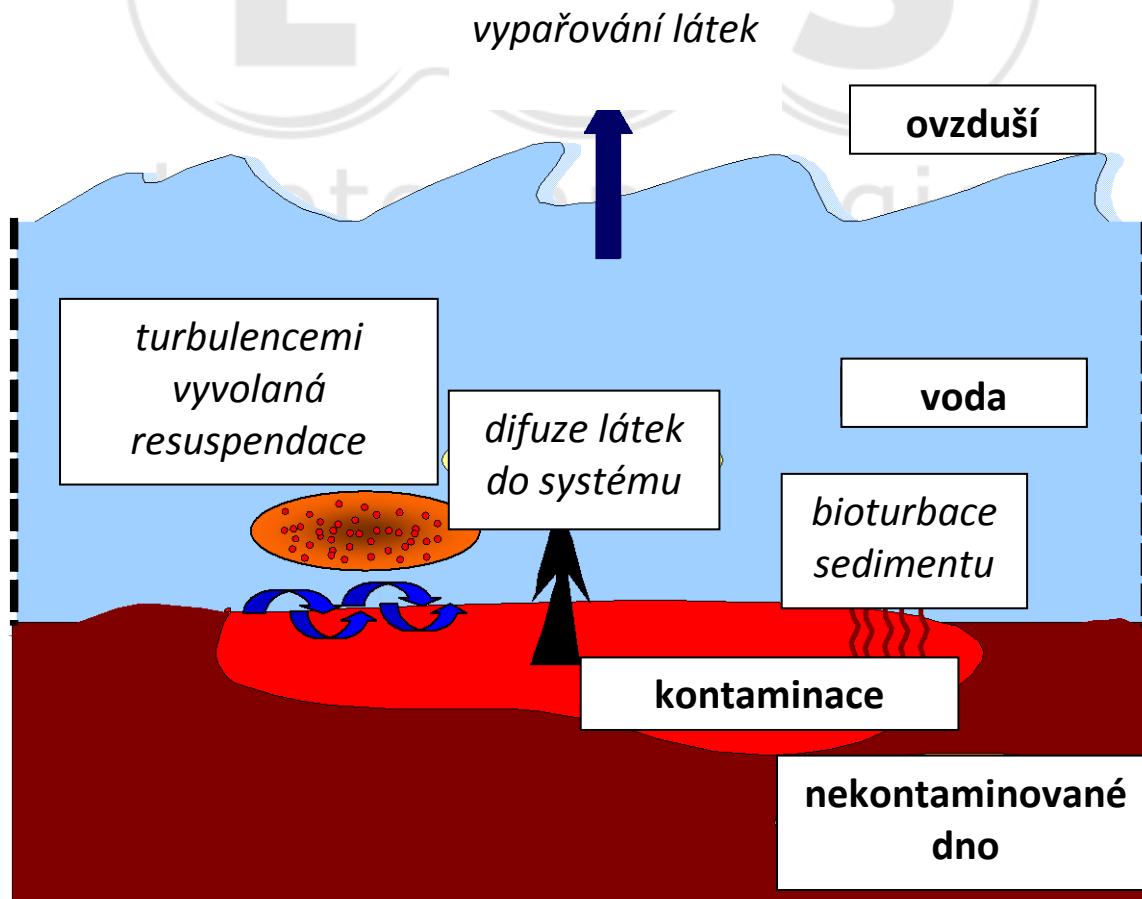
Recentní literární zdroje shrnují přístupy používané k dekontaminaci sedimentů do dvou skupin, oblast technologií konvenčních a soubor technologických přístupů na inovativní bázi. Předělovým přístupem je monitorovaná přirozená atenuace, u které je záleží na míře vlivu sanačně-inženýrského řešení. Abiotické technologie principiálně vycházejí buď z odstranění sedimentu z prostředí např. bagrováním (*dredging*), popř. z jejich imobilizace v prostředí uzavřením do nepropustného systému (*capping*). Ve druhém případě se rozvinuly technické přístupy založené na aplikaci geotextilií. Monitorovaná přirozená atenuace je velmi frekventovaným přístupem v technologiích dekontaminace sedimentů. Zároveň soubor informací nashromážděný touto cestou otevřel nové možnosti pro aktivní zákroky koncipované na biotechnologických základech nápravy škod na životním prostředí (biostimulace, bioaugmentace). S ohledem na skutečnost, že dekontaminace sedimentů neprobíhá pouze v *in situ* režimu, ale bagrování kontaminovaných usazenin je stále velmi rozšířená praxe, je třeba zohlednit i potřebu aktivního přístupu k nakládání s touto formou kontaminované matrice v životním prostředí.

C. N. Mulligan a R. N. Yong ve své práci z roku 2004 zkonstatovali, že v porovnání s využitím procesů na bázi přirozené atenuace v kontaminovaném horninovém prostředí a podzemní vodě, je téma environmentální zátěže v kontextu přirozené atenuace v sedimentech řešeno menším objemem publikací. Nicméně již tehdy se jim z dostupného množství informací podařilo sestavit koncepty protokolů, jak přirozeně atenuační mechanismy v kontaminovaných sedimentárních systémech uchopit a prostřednictvím monitoringu a vnější podpory zužitkovat ku prospěchu dekontaminace této složky životního prostředí. S ohledem na potřeby tohoto příspěvku je možné zužitkovat jejich práci jako klíčový základní kámen pro další pochopení a využití biogeochemických dějů k nápravám vedoucím k redukcí koncentračních hladin v maticích na bázi sedimentů. Přirozená atenuace kontaminantů přítomných v sedimentech je postavena na tzv. 3 liniích důkazů, jejichž přítomnost opravňuje k prohlášení, že tyto mechanismy se aktivně podílejí na transformaci přítomného polutantu. Z hlediska objektivity, transparentní interpretace, supervize a prokázání jsou podstatné zmíněné 3 linie důkazů (*three lines of evidence*):

- 1 Klesá koncentrace polutantu ve směru proudění podzemní vody
- 2 Snižuje se koncentrace potenciálních akceptorů elektronů (NO_3^- , SO_4^{2-} , O_2) ve srovnání s neznečištěnou oblastí
- 3 Biologická aktivita v podzemní vodě je doložitelná mikrobiologickou analytikou

Před uchýlením se k tvrzení, že na lokalitě proces přirozené atenuace probíhá, je klíčové provést následující rozhodovací postup. V první řadě znát druh polutantu, jeho koncentrace a celkové množství, dále být obeznámen s geochemickými poměry v horninovém prostředí, vystihnout oxidačně redukční podmínky ve zvodni a jejich horizontální a vertikální změny, stanovit druh a množství konečných akceptorů elektronů pro biologické odbourávání a v neposlední řadě za pomoci vhodných nástrojů určit rychlost difuze, tékání, ředění a dalších fyzikálních parametrů majících přímý vliv na rychlost a účinnost přirozené atenuace. Odbouratelnost polutantu za podmínek ve zvodni determinuje rychlost proudění podzemní vody a rychlost šíření kontaminačního mraku a mikrobiologická aktivita.

Na obrázku 5 jsou znázorněny některé děje, které participují na vzniku environmentální hrozby v důsledku přítomnosti kontaminace v sedimentech. Za pozornost stojí zejména tzv. bioturbace, která představuje uvolnění kontaminantu v důsledku pohybových aktivit biologických činitelů.



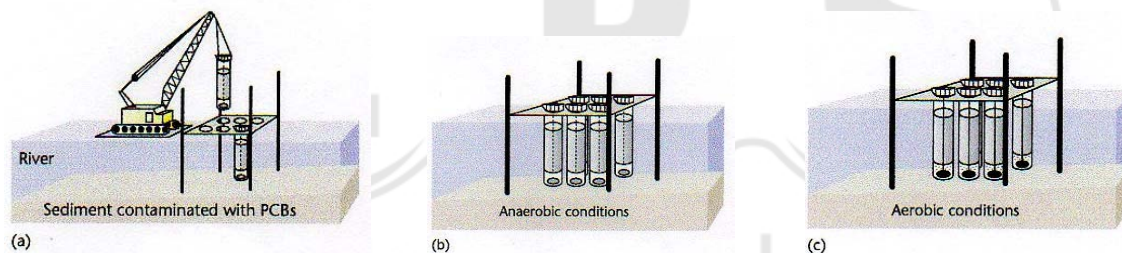
Obr. 5 Mechanismy ovlivňující osud kontaminantu v systému sediment – voda - ovzduší

Z hlediska přirozené atenuace je klíčové pochopit sedimenty jako strukturu zahrnující organickou a anorganickou fázi ve smyslu přítomné hmoty, která přichází do kontaktu s abiotickými, ale především biologickými ději. Vícefázový charakter vnáší do řešení problému řadu proměnných a minimum konstant. Z hlediska (jakéhokoliv) řešení aktivní dekontaminace stojí na prvním místě poznání charakteru míry mobility sledovaného polutantu. Právě pevnost vazby na hmotu v případě znečišťující látky může sama o sobě znamenat výrazně snížení rizik vůči ekosystémům a životnímu prostředí obecně.

Z hlediska vazby polutantu v sedimentu je žádoucí zohledňovat u organických polutantů jejich hydrofobitu, polaritu a schopnost tvořit fázové rozhraní, v případě anorganických polutantů oxidační stav. U potenciálního vazebného materiálu dále způsob, jakým je distribuován, zda jde o kondenzovanou (sedimentovanou) formu nebo dispergovanou hmotu. Pro odhad míry osídlení mikrobiálními metodami se dnes již jako nedostatečné ukazují metody spojené s kultivací sledovaných a stanovovaných

mikroorganismů. S ohledem na enormní podíl tzv. nekultivovatelných mikroorganismů⁴ získávají stále více na významu metody, jež s růstem spojené nejsou, jedná se zejména o metody vyšetření spojených s využitím poznatků molekulární biologie. Ruku v ruce s počtem mikrobiálních zástupců jde samozřejmě také míra jejich biodegradčních schopností vztážená na sledovaný polutant. Hmotový transfer reprezentuje stanovení difuzních koeficientů, odhad míry bioturbace, koeficient míry povrchového transportu hmoty a advekční parametry.

S biologickými ději se počítá i v případě využití abiotických technologií ošetření kontaminovaných sedimentů. I prostá metoda odtěží ze dna (*dredging*) vyžaduje design série kroků, jak naložit s kontaminovanou matricí deponovanou na zabezpečené skládce. V současnosti již metody *ex situ* bioremediace patří k dominantním součástem portfolia aktivního nakládání s takto znečištěnými typy matric životního prostředí. Aplikace metod na bázi převrstvení (*capping*) zase nabízí možnost intenzifikovat pod prostředím uměle ohraničeným vrstvami (geotextil, písek) pomocí *in situ* anaerobních bioremediačních procesů. Velmi sofistikovaným přístupem znázorněným na obrázku 6 je přeměna anaerobního charakteru prostředí v kontaminovaném sedimentu pomocí inženýrského zákroku, který kombinuje možnost biostimulace a bioaugmentace přímo v podmínkách lokality s environmentální zátěží. Konstrukce reaktorových tubusů nabízí vznik distribučních cest pro uskutečnění vlastního zákroku.



Obr. 6 *In situ* zákrok na bázi aerobní bioremediace (PCB)

Současný stav poznání nabízí bezpočet kombinací sanačních kroků, v řadě případů i zohledňující velmi aktuální trend současnosti, tedy spojování biologických a abiotických metod v kontextu faktorů možnosti aplikace konkrétní metody (vysoká koncentrace polutantu vs. míra toxicity vůči biologickému činiteli). Tato koncepce se označuje jako *train technologies*.

Závěr

Smyslem příspěvku je přiblížit čtenáři očima environmentální mikrobiologie pohled na kontaminované sedimenty jako na objekty, jež lze aktivně ošetřovat bioremediačním inženýrstvím. Nicméně na druhou stranu je silně akcentována skutečnost, že sedimenty samy o sobě jsou z velké části dílem mikrobiálního metabolismu a jejich fyziologických projevů. Právě tato skutečnost je studnicí poznání, jak si osvojit a plně zužitkovat obřímí potenciál přirozených procesů pro nápravu škod na životním prostředí. Příspěvek si neklade

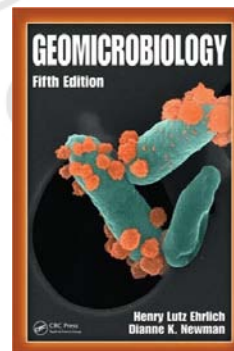
⁴ Madsen EL: Environmental Microbiology From Genomes to Biogeochemistry Blackwell Publishing (1998) ISBN-10: 1405136472

za cíl poskytnout vyčerpávající materiál ke studiu, ale především nabídnout text, jenž se stane vodítkem pro další zpracovávání datové základny v podobě publikovaných studií, technických konceptů a myšlenek spojených s řešením problémů environmentálních škod.

Literatura

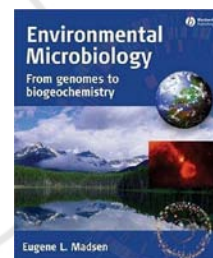
Ehrlich HL, Newman DK: **Geomicrobiology**, CRC (2008) ISBN-10: 0849379067

Bezkonkurenčně nejobsáhlejší zdroj recentních informací o biogeochemii, tedy i o mikrobiální roli v transformaci hmoty na Zemi. Kniha se dotýká i problematiky xenobiotik a antropogenních polutantů. Díky své nadčasovosti nahlíží na tyto látky jako na (bohužel) integrální součást životního prostředí, nicméně ukazuje cestu, kdy prostřednictvím biologicky koncipovaných metod lze napomoci k dekontaminaci horninového prostředí cestou výrazně šetrnější k přírodě, bez sekundárních negativních aspektů (přirozená atenuace). V neposlední řadě je publikace zdrojem metodologických vodítek.



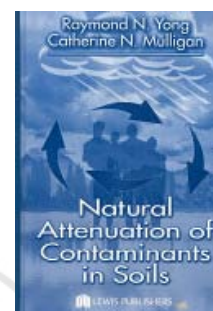
Madsen EL: **Environmental Microbiology From Genomes to Biogeochemistry** Blackwell Publishing (1998) ISBN-10: 1405136472

*Kniha díky své integritě postihuje vše, co se týká procesů v životním prostředí spojených s aspektem (mikro)biologie, chemie a geologie. Stěžejním důvodem její přítomnosti v seznamu použité a doporučené literatury je vyčerpávající pohled na **mikrobiologické metody nespojené s kultivací**, díky kterým lze vnést objektivitu a pravdu do posouzení míry role mikrobiálních procesů v transformaci hmoty na Zemi, tedy i v rovině transformace antropogenních polutantů*



Mulligan CN, Yong RN: **Natural attenuation of contaminants in soils** Lewis Publishers (2004) ISBN-10: 1566706173

Kniha poskytuje ucelený pohled na přirozenou atenuaci a vedle jejího monitoringu v půdě věnuje prostor i problematice atenuačních mechanismů v sedimentech velmi obsáhlých a podrobným způsobem. Dobré technologické penzum pro konstrukci sanačních zákroků s využitím NA.

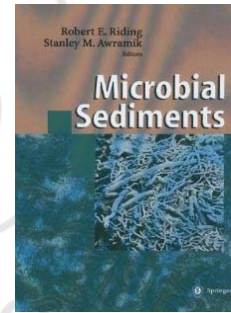


Nealson KM: **SEDIMENT BACTERIA: Who's There, What Are They Doing, and What's New?** Annual Review of Earth and Planetary Sciences Vol. 25: 403-434 (1997) ISBN-10: 3540618287

Review, ve kterém autor poskytuje vyčerpávající pohled na bakterie jako hybatele procesy odehrávající se v sedimentárních strukturách, a dotýká se zároveň i problematiky antropogenních polutantů jako substrátů pro metabolismus konkrétních mikrobiálních společenstev. Řada odkazů je užitečným ukazatelem vývoje přístupů k technické ochraně životního prostředí. Z didaktického hlediska je cenným pomocníkem pro pochopení mikrobiálních procesů v nutričně chudých prostředích, jímž horninové systémy bezesporu jsou.

Riding RE, Awramik SM: **Microbial Sediments**, Springer (2000) ISBN-10: 3540618287.

Vynikající učebnice shrnující dosavadní stav poznání v rovině procesů, jimiž zejména mikroorganismy formovaly a dosud aktivně utváří systémy, které vznikly sedimentací hmoty. Pro sanačního inženýra je rezervoárem informací, jak zužítkovat nepřeberné množství biologicky katalyzovaných dějů pro transformaci kontaminace, aniž by se kniha zjevně těmito tématy zabývala konkrétně.



Zehender JB: **Biology of Anaerobic Microorganisms**, Wiley (1988) ISBN-10: 0471882267

Pionýrský počín zdůraznit roli anaerobního metabolismu jako klíčového nástroje transformace jakékoliv hmoty. Kniha s bezpočtem informací, jak se látky proměňují v důsledku mikrobiálních aktivit, tedy i látky pro prostředí cizí nebo vyvolávající svou vysokou koncentrací ekologickou zátěž.

