

# Hyporeální zóna – neviditelná součást řeky

Při pohledu na řeku plynoucí krajinou málokdo tuší, že to, co z ní vidíme, je pouze jedna její část. Ta druhá, neméně podstatná, zůstává trvale skryta a nachází se pod povrchem dna. Je představována různě mocnou vrstvou sedimentů (od nejjemnějších částic po balvany), prostoupených tzv. intersticiální (vmezeřenou) vodou, která je v neustálém pohybu. Jde o jakousi podzemní řeku, která věrně provází téměř každý povrchový tok a odborně se nazývá hyporeální nebo také hyporheickou zónou – hyporeálem. Oproti prostředí pode dnem vodních nádrží voda v hyporeálu řek a potoků proudí a je v častém kontaktu s vodou povrchovou, přičemž hojně dochází k jejich vzájemné výměně. Díky tomu bývá hyporeální voda alespoň lokálně částečně prokysličená. Říční hyporeál je prostředím dynamickým, nejen co se týče pohybů vody, ale i v řadě biologických a chemických procesů, které v něm probíhají. Pro fungování ekosystému vlastního vodního toku má zcela nezastupitelný význam.

Intersticiální vodu v hyporeálu nesmíme zaměňovat s vodou podzemní, která se v menší či větší hloubce vyskytuje prakticky všude, přičemž v oblasti vodních toků bývá její hladina situována relativně nejměleji. V prostoru pod vlastním korytem toku a v jeho nejbližším okolí je od něj oddělena právě hyporeální zónou (obr. 1). I mezi hyporeální a podzemní vodou dochází k výměně, přičemž směr přesunu závisí především na vzájemné poloze hladiny toku a hladiny okolní podzemní vody, proto se může měnit podle aktuální hydrologické situace. Prostřednictvím hyporeální zóny tak řeka okolní podzemní vodu doplňuje, nebo jí může být naopak zásobována.

## Hyporeál je nedílnou součástí toku.

### Lze ho nějak prostorově vymezit?

Přesnou horní hranici hyporeálu není snadné definovat. U dna tvořeného jemným pískem či jílem můžeme za hyporeální prostředí považovat už nejsvrchnější milimetry těchto sedimentů, kdežto u hr-

bozrného dna představuje jeho svrchní horizont stále jen povrchovou vodu proudící mezi šterkem a valouny. Skutečný hyporeál zde často začíná až o mnoho centimetrů hlouběji – tam, kde je prostor mezi hrubými částicemi zanesenější jemnou frakcí sedimentů a voda zde jednak proudí již ve vlastním režimu, jednak se svými parametry (např. teplotou nebo množstvím rozpuštěných látek) od povrchové vody odlišuje.

Ani spodní hranice hyporeálu nemusí být zcela jednoznačná. Za hyporeál lze považovat tu zónu, kde je pohyb intersticiální vody svázán s pohybem vody v korytě řeky, fyzikálně-chemické parametry jsou spjaty s děním v toku a převládá zde interakce s vodou povrchovou nad interakcí s vodou podzemní.

Půdorysně hyporeál nekopíruje pouze koryto toku a může jeho obvyklou šíři značně přesahovat. Zvláště v širokých říčních nivách, kde je směřování koryta v čase proměnlivé, bývá cesta hyporeální vody značně složitá. Hyporeální tok může



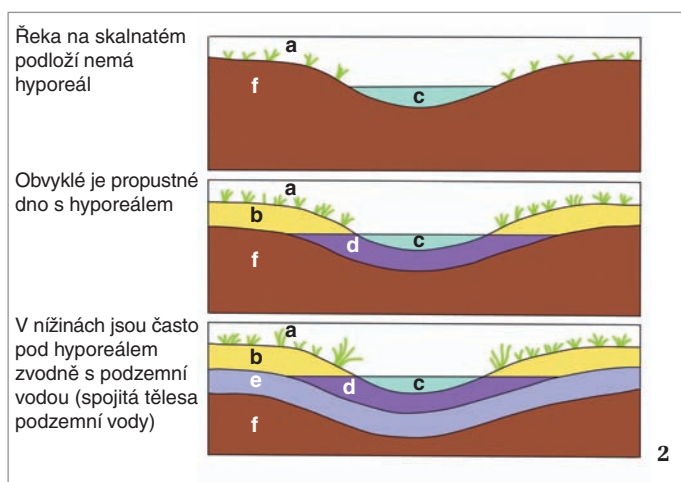
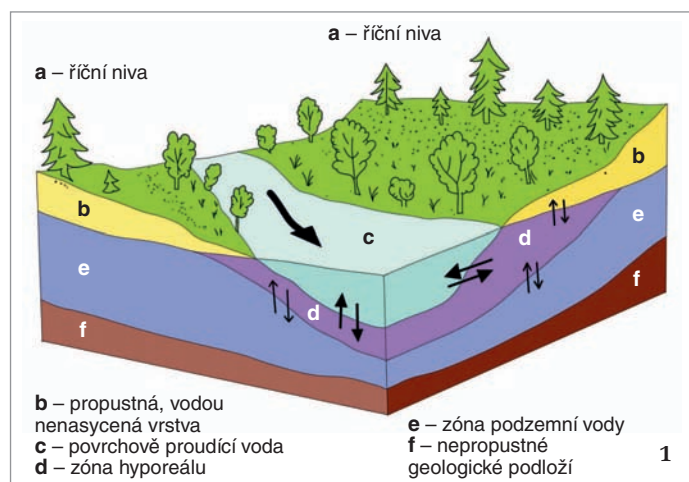
1 Schéma umístění hyporeální zóny ve vztahu k okolním horizontům

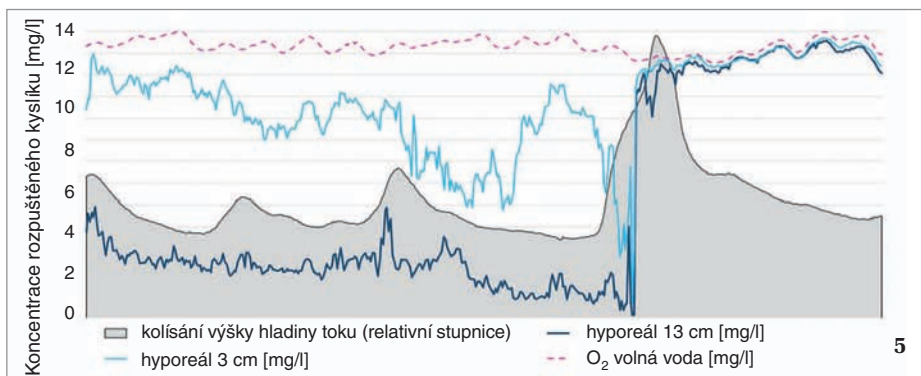
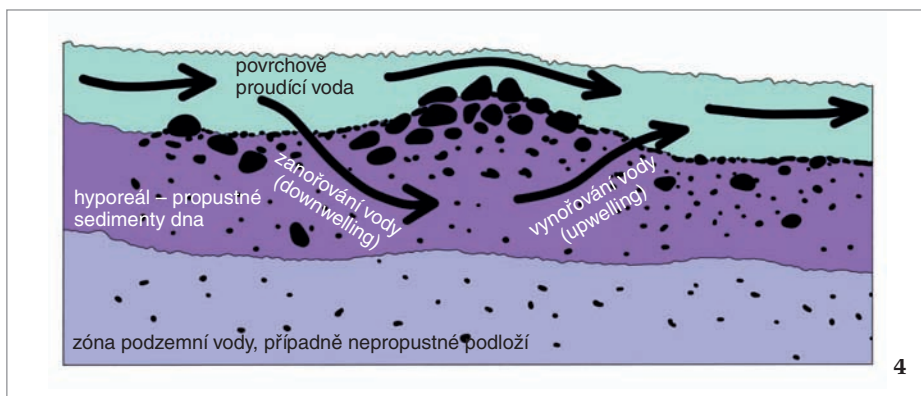
2 Propojení řeky s podzemní vodou v nivě. V závislosti na objemu deponovaného sedimentu, po kterém řeka teče, lze rozlišit tři potenciální interakce mezi povrchovou a podzemní vodou. Označení a–f viz obr. 1

3 Jeden z možných způsobů vzorkování intersticiální vody pomocí speciální raznice a nasávacího zařízení. I v takto mělkém toku může hyporeální zóna zasahovat do hloubky mnoha desítek centimetrů. Foto M. Bílý

4 Schéma průtoku vody hyporeálem. Nejvyšší interakce povrchové a intersticiální vody se vyskytuje v zónách, kde se střídá hlubší voda se šterkopískovými náplavy. Podle M. Bílého kreslila R. Bošková (obr. 1, 2 a 4).

5 Kontinuální záznam změn koncentrace rozpuštěného kyslíku v povrchové vodě a dvou hloubkách hyporeálu (3 a 13 cm) ve vybraném mikrohabitatu Teplé Vltavy, národní park Šumava. Zobrazené období zahrnuje 11.–29. února 2020. Jde o příklad úseku dobře prokysličeného říčního dna. Náhlá změna, kdy koncentrace O<sub>2</sub> v obou horizontech dosáhla hodnot povrchové vody, proběhla v řádu hodin a byla indukována povodňovou vlnou. Následoval opět několikátý denní stabilizovaný stav. Orig. O. Simon





např. kopírovat již neexistující trasu koryta, spojovat povrchově dosud nepropojené meandry nebo napájet tůň a mrtvá ramena z hlavního toku.

Hyporeál se nevyskytuje ve stejné míře všude. V úzkých údolích se skalnatým podkladem je vyvinut jen velmi slabě nebo skoro vůbec, naopak v širokých nivách může představovat jak značný podíl vody, kterou řeka transportuje, tak prostor pro její retenci (obr. 2). Průtok hyporeálu v určitém příčném profilu toku lze nicméně spočítat jen velmi obtížně. Přesun intersticiální vody mezi částicemi dna je přirozeně vždy mnohem pomalejší než ničím nebrzděný proud povrchové vody. Pokud je však hyporeál dostatečně hluboký a dobře průtočný, může zahrnovat i většinu vody transportované tokem. Hyporeální zóna může být totiž podstatně hlubší, než je výška vodního sloupce v toku. Potůček, v němž sahá voda sotva po kotníky, může mít hyporeální zónu i přes metr hlubokou (obr. 3). To je významné především u dnes tolik zmiňovaných vysychavých toků. V případě dočasného vymizení vody z koryta se voda i nadále udržuje v hyporeálu, a ten se tak stává zcela zásadním refugiem pro řadu bentických živočichů, žijících jindy na povrchu dna (blíže na str. 254–257).

### Dolů a zase nahoru

Pro vzájemnou výměnu vody mezi oběma částmi řeky jsou klíčové dva směry proudění. Tím prvním je zanořování neboli průnik volně proudící říční vody pod povrch dna (v angličtině se používá termín downwelling), druhým naopak vynořování hyporeální vody ze sedimentů do říčního koryta (upwelling). Pro alespoň částečnou prokysličenost hyporeálu v určitém úseku řeky je tedy nezbytné, aby na něm docházelo především k hojnému zanořování. To se nejčastěji děje na návodní straně dun a příčných prahů, které říční sedi-

ment často vytváří, přes něž proudí voda velkou rychlostí a jimiž jsou od sebe odděleny „tůňové“ zóny. Na opačné straně duny se pak voda vynořuje (obr. 4). K této výměně vody však může docházet i na relativně vodorovném dně, v závislosti na lokálním přísunu nebo odtoku hyporeální vody. To souvisí nejen s režimem proudění povrchové i hyporeální vody v úseku toku předcházejícím danému místu. Roli zde hraje rovněž přestup hyporeální vody do zóny vody podzemní, nebo naopak její doplňování z tohoto zdroje.

### Stabilita i proměnlivost

Pozorování a experimenty ukazují, že v řadě toků je struktura dna překvapivě stabilní. Máme-li více let po sobě v hledáčku určitý metr čtvereční říčního dna, zůstává často na pohled stejný a minimální změny potvrdí i granulometrická analýza vzorku sedimentu z tohoto místa. Voda v řece s sebou sice neustále unáší i část materiálu dna, ale pokud nedojde např. vlivem velké povodně ke změně tvaru koryta nebo působením eroze k transportu zvýšeného množství substrátu, sedimentují částice určitých velikostních frakcí zpravidla na stejných místech. Lokalizace určité duny či šterkové lavice tak bývá neměnná až po řadu let. Naproti tomu i v mechanicky stabilním hyporeálním substrátu může intenzita a směr proudění velmi rychle zakolísat nebo se změnit.

Vše záleží na hydrologické situaci a aktuálním průtoku vody. Uvažujeme-li větší řeku, v jejíž nivě se hladina podzemní vody nachází až pod úrovní říčního dna, nemusí vzestup ani pokles hladiny v řádu až desítek centimetrů režim zanořování a vynořování v určitém místě nijak ovlivnit. Naopak v jiném místě, kde pokles hladiny řeky třeba o pouhý 1 cm způsobí proměnu proudícího mělkého úseku na ostrůvek, rozdělující proud vody náhle na dvě ramena, může dojít v režimu proudění hypo-

reální vody ke skokové změně. Změnu proudění mohou vyvolat i takové nepředvídatelné jevy, jako je zanesení malé části dna jemnými sedimenty nebo přehrazení toku padlým kmenem. Ve všech případech se část dna může náhle octnout bez přísunu prokysličené vody.

### Bez kyslíku to nejde

I když je řada hyporeálních organismů a dějů spjata s nízkými koncentracemi rozpuštěného kyslíku až úplnou anaerobií, představuje míra prokysličenosti hyporeálu jeden z hlavních faktorů ovlivňujících jeho komplexní fungování. Rozpuštěný kyslík se do hyporeálu dostává přirozeně vždy z vody povrchové. Jeho koncentrace a doba setrvání v hyporeální vodě jsou tedy dány jak mírou zanořování vody, tak rychlostí průtoku vody hyporeálem, a hlavně intenzitou aktivity organismů rozkládajících organickou hmotu, především drobné částice detritu. Jeho množství v řece je tedy, v kombinaci s typem říčního dna, pro kyslíkový režim hyporeálu klíčové. V rychlých horských tocích se šterkovým dnem většinou alespoň částečně prokysličený hyporeál vždy někde najdeme, naopak tomu v nížinných bahnitých řekách bývá velmi vzácný. I hloubka prokysličenosti se může výrazně lišit. Existují toky, kde ve vodě získané z půlmetrové hloubky pod povrchem dna naměříme až 80% saturaci rozpuštěným kyslíkem, jinde kyslík mizí několik centimetrů pod povrchem. Nejsou vzácné ani případy, kdy je povrchová vrstva hyporeálu vlivem slepenosti sedimentu v určitém místě dna téměř neprůtočná, a proto bez kyslíku, kdežto hlubší, shodou okolností průtočnější zóna je jím zásobovaná dobře.

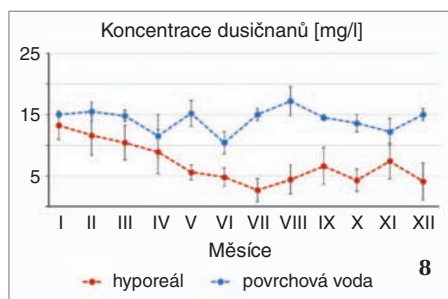
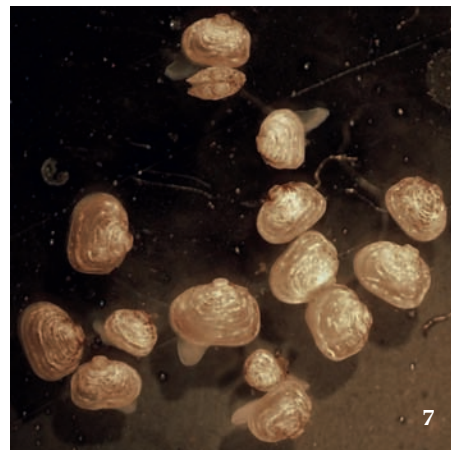
Obsah kyslíku v hyporeální vodě do jisté míry kopíruje jeho kolísání v průběhu dne ve volné vodě, dané fotosyntézou sinic, řas a vodních rostlin. Z výše zmíněných příčin však jeho koncentrace může neočekávaně zakolísat (obr. 5). A právě přítomnost rozpuštěného kyslíku je klíčová pro živočišné obyvatele hyporeálu.

### Hyporeální fauna

Drobní bentičtí živočichové, na hranici viditelnosti pouhým okem, tvoří společenstvo tzv. meiofauny. Vyskytuje se v intersticiální vodě mezi částicemi sedimentu prakticky všude na říčním dně a hojně proniká i do hyporeálu. Vedle různých máloštětnatců (Oligochaeta), lasturnatek (Ostracoda) nebo hlístic (Nematoda) je třeba jmenovat dosud málo probádaný řád plazivek (Harpacticoida) ze skupiny klanonohých koryšů (Copepoda). Z větších bezobratlých živočichů se v povrchové vrstvičce hyporeálu setkáme především s larvami různého vodního hmyzu, např. některých dvoukřídlých (Diptera).

V sedimentech mělkého hyporeálu nacházejí úkryt i někteří živočichové žijící jinak v povrchové vodě, příkladem mohou být blešivci rodu *Gammarus*. Hyporeál hostí i takové živočichy, kteří jsou primárně obyvateli podzemních vod, odkud se dostávají do hyporeálu, často i nedobrovolně. Jde zvláště o různé koryše, včetně populární bezkrunýčky slepé (*Bathynella natans*) nebo podzemních blešivců rodu *Niphargus* (obr. 6).

Asi nejnámějšími hyporeálními živočichy jsou minohy – larvy mihulí (Petromyzontidae). Obývají písčité nánosy a lavičky s vysokým podílem jemných sedimentů s detritem nebo v čistých tocích i bahnitě náplavy, a plní dokonce jistou roli ekosystémových inženýrů. Podobně jako žížaly v půdě mohou podporovat prostupnost substrátu a tím i průtočnost a prokysličenost hyporeálu. Najdeme zde též konzumenty jemné organické hmoty neboli detritu. Významnými živočichy říčního dna jsou také mlži. Kromě těch drobných, jako jsou okružanky a hrachovky z čeledi okružankovití (Sphaeriidae), jde o zástupce skupiny Unionida, v našich vodách představovaných hlavně škeblemi a velevrubu. Jako dospělí sice hyporeál neobývají (žijí jen částečně zapuštěni do dna), avšak jejich juvenilní stadia, vývojově navazující na glochidie, které parazitují na rybách, jsou vázána na nejsvrchnější vrstvu hyporeálu, kde setrvávají chráněna před odnosem. O životě těchto stadií mlžů dosud víme jen málo. Soustředěný výskyt do hloubky sedimentu zhruba 3 cm byl nedávno ověřen u juvenilů našeho nejvýznamnějšího velkého mlže, perlorodky říční (*Margaritifera margaritifera*, obr. 7).



### Gradienty podmínek

V důsledku změn koncentrace kyslíku v podélném i hloubkovém profilu hyporeálu existují v intersticiálním prostředí fyzikálně-chemické gradienty, umožňující souběžný výskyt širokého spektra metabolických procesů na relativně malé ploše. Obecně v hyporeálním prostředí chybí typická posloupnost procesů, které známe např. z jezerních sedimentů, kde můžeme výskyt metabolických dějů ve vertikálním profilu poměrně dobře odvodit podle hodnoty redox potenciálu nebo koncentrace rozpuštěného kyslíku a finálních elektro-nových akceptorů. Důvodem je přítomnost mikrobiálních biofilmů na povrchu zrn sedimentu (o biofilmu blíže v Živě 2012, 3 a 5). Tloušťka biofilmů ovlivňuje např. difuzi kyslíku do nitra biofilmových nárostů – starší a silnější vrstvy vykazují nápadnou stratifikaci, kde mladší buňky na povrchu rostou v dostatku kyslíku, naopak k buňkám na bázi biofilmu se již žádný kyslík nedostane a vykazují proto převážně anoxický či anaerobní metabolismus, např. metanogenezi nebo denitrifikaci. I když je tedy okolní intersticiální voda dobře zásobená kyslíkem, uvnitř biofilmů mohou převládat redukční procesy a jejich produkty i meziprodukty se difuzí dostávají do okolního prostředí. V intersticiální vodě z jednoho místa se pak mohou ve stejnou dobu vyskytovat společně např. rozpuštěný kyslík, oxid uhličitý (CO<sub>2</sub>), oxid dusný (N<sub>2</sub>O), sulfan (H<sub>2</sub>S) i metan (CH<sub>4</sub>), což je v sedimentech stojatých vod těžko představitelné.

### Říční biochemická laboratoř

Hyporeál plní klíčovou roli v samočisticích procesech toku. Je třeba zdůraznit, že veškeré procesy využívané v běžných typech čištění odpadních vod, tedy sedimentace, filtrace, koagulace, provzdušňování, mikrobiální rozklad organických látek, nitrifikace a denitrifikace, nejsou ničím novým. Jde pouze o prostorově oddělené

6 V hyporeální zóně se mohou vyskytnout i zástupci podzemní fauny, např. slepých korýšů. Podzemní blešvec rodu *Niphargus*. Foto O. Simon

7 Skupina juvenilních jedinců perlorodky říční (*Margaritifera margaritifera*), obývající jako největší vzácnost některé z nejčistších toků a osídlující v tomto životním stadiu mělkou hyporeální vrstvu. Foto M. Bílý

8 Sezonní změny koncentrace dusičnanů během šestiletého období (1997–2002) na experimentální lokalitě toku Sitka (Olomoucko). Svislé úsečky značí směrodatné odchylky pro každý z měsíců. K největšímu úbytku oproti povrchové vodě docházelo v hyporeální zóně během letní sezony. Orig. M. Rulík

a zintenzivněné děje, které všechny běžně probíhají ve vodních tocích, a z velké části jsou situovány právě do hyporeálu.

Každá pevná částice tvořící dno řeky má potenciál být kolonizována vrstvičkou živých organismů – především bakterií, ale i hub, nálevníků a dalších protist. V nejsvrchnějších vrstvách sedimentu, kde může být v nevelké míře přítomno i světlo, se mohou vyskytovat rovněž rozsivky a sinice. Celé toto společenstvo zvané biofilm je velmi výkonným činitelem biochemických přeměn, a to jak syntézy, tak rozkladu. I díky biofilmům je prostředí hyporeálu jednou velkou biochemickou laboratoř, v níž probíhá až 80 % procesů transformace hmoty a energie v rámci daného vodního toku.

Přírodní organické látky, např. detrit nebo odumřelé řasové buňky, ale také řada nejrůznějších polutantů, jako jsou těžké kovy, pesticidy a mikroplasty, které se při zanořování říční vody dostávají do intersticiálního prostředí hyporeálu, se zde mohou dlouhodobě akumulovat i podléhat rozkladu. Podle toho, zda se koncentrace určité látky po průchodu vodou skrz hyporeální sedimenty sníží, či zvýší, můžeme

mluvit o tom, že hyporeál funguje jako propad (z anglického sink), nebo naopak zdroj (source) dané látky. Jak rychle bude degradace probíhat, v jakých podmínkách a které metabolické procesy se budou při rozkladu uplatňovat, záleží na množství vody, která se v daném místě zanořuje, na množství rozpuštěného kyslíku a také na charakteru a koncentraci dané látky. Při pomalém proudění vody skrz hyporeální sedimenty (někdy jen pouhé metry za den ve srovnání s metry za sekundu v povrchovém toku) a akumulaci nejrůznějších organických látek je kyslík v hyporeálu záhy vyčerpán a aerobní rozklad je nahrazen respirací anaerobní, při které mikroorganismy využívají jiné finální akceptory elektronů než kyslík, např. oxidované železo, dusičnany nebo sírany. Přestože tekoucí vodu potoků a řek považujeme obvykle za dobře prokysličenou, v jejich hyporeálu převládá spíše anaerobní prostředí a probíhají zde procesy, které bychom nečekali.

V případě malého toku Sitka u Olomouce jsme např. zjistili, že anaerobní respirace má vyšší podíl (asi 65 %) na oxidaci organických látek než aerobní respirace. Velmi běžná v hyporeálu je např. denitrifikace, tedy redukce dusičnanů na plynný dusík či oxid dusný, nebo metanogeneze, jejímž produktem je metan. Společně s CO<sub>2</sub> pak tyto plyny nejčastěji difuzí, méně často v podobě bublin, unikají z hyporeálních sedimentů do povrchové vody a odtud dále do ovzduší. Hyporeální sedimenty jsou tak zdrojem plynů považovaných za významné z hlediska globálního oteplování (N<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>). Naproti tomu funguje hyporeální prostředí jako důležitý propad živin. Např. v případě dusičnanů, které vstupují s povrchovou vodou do sedimentů, může během letního období, kdy má voda vyšší teplotu, proces denitrifikace odstranit bez jakéhokoli lidského přispění až 90–95 % dusičnanů (obr. 8) – to je obrovský příspěvek hyporeálu k samočištění, který brání mimo jiné eutrofizaci vodních systémů dusíkem. Hyporeální sedimenty mohou fungovat jako propad i v případě rozpuštěných fosforečnanů – ty mohou být z okolní intersticiální vody odnímány nejčastěji bioticky přítomným biofilmem, či se mohou abioticky adsorbovat nebo srážet např. s uhličitánem vápenatým. Obecně ale o chování fosforu v hyporeální zóně víme zatím daleko méně než v případě dusíku.

Použitá literatura uvedena na webu Živý.