

## Ekologie obnovy narušených míst III. Cizorodé substráty v krajině

Pokud se o druhu *Homo sapiens* nezřídka mluví jako o novodobém geochemickém činiteli, dokládá to rozměr, v jakém lidská civilizace převrací a rozrušuje zemský povrch, obnažuje horninové podloží a otevírá biogeochemické cykly. Do prostředí se dostávají jednak látky, které v něm sice už kdesi v „klimodovém“ stavu pod vegetací jsou, ale jejich míra expozice transportem mnohokrát vzrostla, jednak látky, které se chemickými procesy při využívání surovin spontánně nebo uměle rozpadají, přeměňují a posléze zamořují atmosféru i biosféru. Některé z nich jsou vyložně toxické. Naše krajina se po desetiletí až staletí plní vnesenými útvary, v moderní době známými nejspíš pod pojmem deponie (odpadních, průmyslových aj.) substrátů. Jejich znovupohlčení přírodou trvá různě dlouho, spíše déle a po etapách. Pokud známe souvislosti a jsme schopni znalosti použít, lze snížit ekonomickou náročnost obnovy a vyhnout se riziku neúspěchu nákladné klasické rekultivace „rychle za každou cenu“.

Pro ekologické studie jsou v mnohém směru modelovým objektem odkaliště (kalozemy), sloužící lidem k navržení předtím zvodnělého, resp. suspendovaného strusko-popílkového materiálu vznikajícího spalováním uhlí v elektrárnách nebo rudného koncentráту jako vedlejšího produktu výroby chemikálií z nerostného výtěžku dolování. Zatímco opuštěné doly, pískovny nebo výsyvky či odvaly po povrchové těžbě jsou blízké procesům primární sukcese v přírodě (časovým řadám ve vývinu vegetace tam, kde nikdy předtím rostlinstvo nebylo), narušené lesní nebo rašeliníšní ekosystémy a orná půda na sebe vážou fenomény spjaté se sukcesí sekundární (předchozí přítomnost vegetace stanovíště „poznamenala“; půdní semenná banka nebo zásoba humusu jsou jedněmi z významných symptomů).

### Technologie vršení

Odkaliště, ať už za provozu anebo až poté, co byla opuštěna, dávají sice možnost studia primární ekologické sukcese, ale substrát přece jen prošel úpravami: zejména textura se homogenizací částic ukládaných v jistém velikostním rozmezí zjednodušila. Hydraulický způsob přemísťování odpadu – tj. vstřikování suspenze do sedimentačního bazénu obehnaného hrází s přírodním potrubím – dále materiál spontánně třídí, takže po sedimentaci vznikají plynulé gradienty v rozložení jak fyzikálních, tak chemických vlastností. To je z hlediska terénního experimentování příznivé: variabilita některých faktorů je lépe předvídatelná. „Rybník na kopci“ se posouvá do výše s tím, jak se sedimentační nádrž plní a nad ní vzniká nová navršením nových hrází (obr. 1). Proces se pak

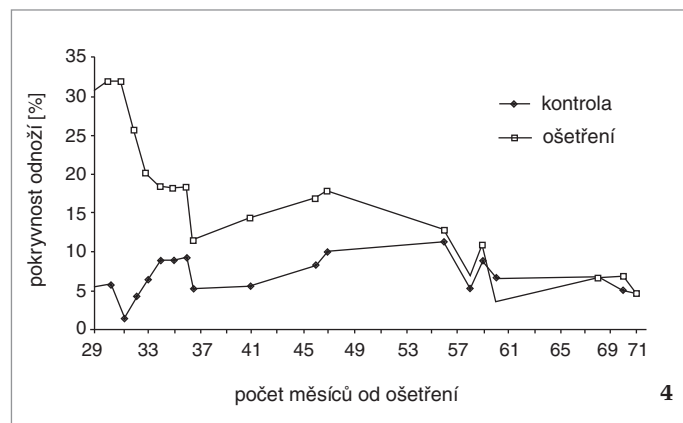
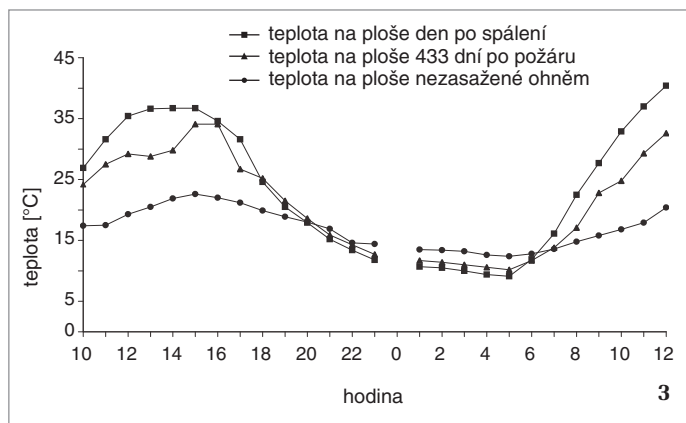
opakuje do technicky povolené míry. Dříve po naplnění kapacity úložišť zůstávaly nějaký čas vodní plochy tak, jak vznikly, doplňovány dešťovou vodou; častější však bylo, že na povrchovou úpravu složiště nastoupila těžká technika a srovnala konkávní i konvexní tvary do jednodolité plochy „náhorního platů“. Pokud zůstalo jen u toho, přerušení započatého zvětrávání materiálu a půdotvorného procesu vedlo k rizikům větrné a vodní eroze často toxického materiálu a jeho roznosu do okolí. Z toho důvodu nařízené meliorace byly vedeny snahou co nejjednodušeji odkaliště po ukončení provozu stabilizovat. Zásahy spočívaly v potažení povrchu kalozemí poblíž shrnutou zeminou a osetím nějakou směsí bylin, zpravidla takovou, která byla zrovna na trhu bez ohledu na lokální podmínky, anebo v lesnickém ozelenění sortimentem sazenic, jež byly právě k dispozici v nejbližší školce. To nemohlo fungovat za podmínek extrémní vysušnosti/zasolování povrchu deponie, případně toxicity v dosahu kořenů rostlin. Po r. 1989 vznikla nová legislativa, která požadavky na sanaci jakýchkoli skládek zpřísnila, ale mechanismy kontroly vhodnosti postupů při takové činnosti stále chybějí, stejně jako dodnes schází zahrnutí přirozených mechanismů a elementárních principů ekologie obnovy.

### Kulturní divočina nebo umělá pustina?

V Živě zazněla možná poprvé kacírská myšlenka o potřebě chránit spontánně vzniklou umělou divočinu – jak z důvodu úspěšného úspěchu v přirozeně dosaženém vegetačním stadiu, tak z důvodů studijních – právě v souvislosti s odkališti (Živa 1982, 4: 124). Můžeme v nich spatřo-

1 Zvyšování hrází na odkališti v Horních Počaplech u Mělníka (blíže v textu)  
2 Pásky substrátu o různé zrnitosti kolem středu sedimentační nádrže vznikly hydraulickou technologií přepravy a vršení materiálu. Jejich koncentrické rozložení kopírují i pásy vegetace s pionýrskými dřevinami (břízy, vrby, topoly) anebo bez nich, pokud kořeny semenáčů narazí na podpovrchové nepropustné krusty a hynou.





3 Denní průběh teplot povrchu půdy na rudném odkališti Chvaletice, srovnání ploch ovlivněných požárem (v různém odstupu), a bez požáru. Orig. M. Štefánek 4 Změny pokryvnosti třtiny křovištní (*Calamagrostis epigejos*) na substrátu odkaliště Chvaletice v průběhu sledování (1996–99). Pokrytí substrátu uschlou trávou (mulčování) výrazně zvýšilo šanci na přežití mladých jedinců třtiny. Tento typ managementu má ale krátkodobý vliv, neboť v průběhu následujících čtyř let dochází k snížení pokryvnosti na úroveň kontroly. Orig. V. Dlouhá

vat terestrické ostrovy „pustin“ vložené do matrice ekosystémů v různé míře ovlivněných člověkem. Strusko-popílková odkaliště vázaná na odpadní produkt tepelných elektráren nebo tepláren tvoří poměrně homogenní skupinu. Rudná odkaliště nejčastěji spojená s úpravou těžebních hornin u povrchových, vzácněji hlubinných dolů oplývají větší heterogenitou, nicméně s ohledem na převládající typ podloží v hercynském masivu jsou pro ně téměř vždy význačným rysem nízké pH a vysoký obsah těžkých kovů. Větší stanovištní extrémy vykazuje druhá skupina opuštěných kalojemů, působená zejména postupným zvětváváním jemného (kalového) horninového materiálu s velkou iontovou dynamikou v průběhu celého ročního cyklu, ale i pouhé vegetační sezony v závislosti na srážkově vydatných nebo suchých obdobích. Kolísá stupeň zasolenosti povrchových vrstev, s tím také pH, a mění se dostupnost prvků pro rostliny.

Vlastnostem povrchu neovlivňovaného a již bezvodého odkaliště (s výjimkou dočasné stagnace srážkové vody v centrální prohlubni) odpovídají selekční tlaky. Větší stres a odtud nižší rozmanitost cévnatých rostlin bývá u rudných odkališť (Chvaletice, Ejovice, Jílové u Prahy, Kaňk, Příbram, Stráž pod Ralskem aj.), zatímco elektrárenské popílkové hostí větší počty druhů (Opatovice, Horní Počápy a mnoho dalších). Navzdory značnému překryvu v druhovém spektru u obou typů substrátů shledáme vyšší zastoupení slanomilných rostlin na rudných odkalištích a píscomilných rostlin na strusko-popílkových deponiích. V pokročilejších sukcesních stadiích se na extrémních substrátech rudných odpadů uplatňují z klonálních (snadno vegetativně obnovujících) dřevin topol osika, případně vrby, a dále bříza (obr. 2), na úložišťích popílků topoly, rovněž vrby, ale i růže, hlohy, javory, dub let-

Tab. Koncentrace prvků v nadzemní biomase vybraných dřevin, trav, mechů, lišejníků a hub na opuštěném rudném odkališti [mg/kg suché biomasy]

	Pb	Mn	Fe	Al	Zn	Cu	Cd	Ag	Hg
bříza bělokorá ( <i>Betula pendula</i> )	0,58	799,1	34,20	37,52	232,73	0,81	0,59	0,29	0,03
topol osika ( <i>Populus tremula</i> )	1,49	1263,42	71,62	106,72	233,40	1,19	1,56	0,25	0,03
třtina křovištní ( <i>Calamagrostis epigejos</i> )	1,15	1835,22	56,00	36,35	19,62	0,39	0,06	0,25	0,02
rákos obecný ( <i>Phragmites australis</i> )	1,33	1845,66	118,80	58,56	25,63	0,58	0,06	0,25	0,02
rohozub nachový ( <i>Ceratodon purpureus</i> )	6,71	213,80	630,60	299,20	28,40	0,60	0,08	0,25	0,09
duťohlávka královská ( <i>Gladonia rei</i> )	3,69	2294,10	3689,8	1053,8	34,40	2,23	0,23	0,25	0,12
ryzec pýřitý ( <i>Lactarius pubescens</i> )	0,23	114,57	87,80	72,32	94,25	2,44	0,17	2,11	0,62

ní, borovice lesní (viz také Živa 2005, 5: 201–204). Většina odkališť se nachází v nížinách, v nivách velkých řek, takže vegetační srovnávání je v tomto směru na místě. Rudná odkaliště se však nacházejí převážně ve vyšších nadmořských výškách a v jejich kolonizaci rostlinstvem se logicky také projevuje zásoba druhů odpovídající těmto polohám.

#### Biologické půdní krusty

V posunu mikroekosystému, jaký představuje povrchová vrstva nere kultivovaného odkaliště, směrem k obyvatelnému prostředí s rostoucí druhovou početností hrají klíčovou roli bezcévné rostliny, houby a mikroorganismy. Roztoči a další rozkladači odumřelé organické hmoty, sinice, řasy, rozsivky, mikromycety, (mikro)lišejníky, mechy, játrovky – ti všichni tvoří primitivní společenstva nebo druhová seskupení a společně s produkty své metabolické činnosti tvoří povrchové biofilmy, resp. biologické půdní krusty (obr. 10). Role takových zpevněných povrchů je známa z aridních oblastí jako přirozená prevence větrné a vodní eroze. Krusty na povrchu odkališť mají svou dynamiku určenou především srážkami a vysycháním. Pokud ještě povrch substrátu není kolonizován organismy, zpravidla je při zvýšení vlhkosti kompaktní a záleží na tom, jaký podíl jemných jílových částic zvyšuje jeho soudržnost. Při vysychání pak puká a odlupuje se různě velké polygony v závislosti na textuře a koncentraci solí, které se při převažujícím výparu přesunou k povrchu. Jakmile dojde ke kolonizaci, zejména sinicemi, řasami, lišejníky a mechorosty, frag-

mentace krusty již do jisté míry přetrvává, její struktura se stává složitější a vzniká tak bohatší nabídka ekologických nik k osídlení dalšími organismy. Také se snižuje extrémita povrchu odkaliště, a to v mnoha parametrech. Nyní se sem spíše dostanou např. roznašeči semen, jako jsou mravenčí, kteří při zastínění zvednutými okraji fragmentů krusty snáze budují své komunikace a hnízda (přímo k této problematice viz Živa 2001, 4: 185).

Obecně lze říci, že biodiverzita drobných a primitivnějších organismů je na nových substrátech v krajině vyšší než rozmanitost taxonomicky výše postavených skupin, ať už jde o cévnaté rostliny nebo obratlovce. Prvními kolonizátory jsou mikroskopické houby – mohou jich být desítky až stovky druhů a mnohé z nich jsou klíčovými podpůrci zúrodnění neúživného substrátu coby rozkladači organické hmoty – např. listí opadaného ze stromů a zaneseného na místo větrem. Kloboukaté houby jsou pro zelené rostliny žijící ve stresu mimořádně důležité – vlákna houbového mycelia žijí v symbióze s kořeny rostlin (jev označovaný jako mykorhiza, Živa 2002, 5: 203–205; 2008, 5: 199–201) a fungují ve vztahu k nim jako dopravní kanály pro jinak těžko dostupné živiny, zejména fosfor. K houbám se v životadárném dekompozičním procesu brzy přidávají další rozkladači, např. půdní roztoči – otázkou může být, zda jejich potravou je nerozložená rostlinná celulóza sama o sobě anebo houbové mycelium, které už ji spolu s další mikroflórou začalo rozkládat. Početnou složku fauny odkališť tvoří hmyz – ať už vodní nebo ten, který využije příznivých





vlastností substrátu (ty mu usnadňují pronikání pod povrch – vosičkám, mravencům aj.). Monofágové vázání na některé rostlinné dominanty, které převládly v určitém sukcesním stadiu (např. můry) lákají predátory (pavouky, mravence, ptáky). Nejen vodních, ale také půdních řas mohou být na popisovaných místech desítky druhů – podílejí se na zlepšení mikroekologických podmínek stanoviště a připravují půdu pro další kolonizátory – např. lišejníky a mechy. Na složitých odpadů již byly objeveny nové druhy mikrolíšejníků pro naše území. Shrňme-li: někdy odpudivé a opuštěné areály paradoxně oplývají neobvykle velkou druhovou rozmanitostí, hlavně vývojově nižších skupin organismů (včetně parazitických), nežli dříve, než jakou nabízí okolní krajina.

#### Výběr zátěží a narušením – nápověda pro řízenou obnovu

Chce-li rehabilitační ekolog pomáhat na svět nejen produkčně užitkovým směskám druhů, ale fungujícím společenstvům, musí ho zajímat následující otázky:

- Vzrůstá při zařazování většího počtu druhů (zvyšování biodiverzity) do konstruovaného společenstva jeho odolnost či pružnost, resp. stabilita?
- Jak ovlivňuje genetická diverzita určitého druhu stabilitu společenstva?
- Jak ovlivňuje věková struktura skladebného druhu celé společenstvo?
- Může být sukcese urychlena přeskočením sukcesních stadií?
- Jakou roli hrají v sukcesí živočichové?
- Jaká je role mutualismu nebo jiných mezidruhových interakcí?

Selekční působení substrátu vůči nabídce celkového spektra rostlin dostupných v území funguje v protisměru vysoké druhové rozmanitosti. Silně přehřívání (v létě přes 50 °C), zasolování a nestabilizovaný povrch obnažených odkališť je bariérou nejdříve pro zachycení a vyklíčení semen, pak pro uchycení semenáčků a další růst rostlin do dospělosti. Pouze nejodolnější z cévnatých rostlin dokážou vyklíčit, přežít stadium semenáčku, vyrůst a ještě na místě vyprodukovat potomstvo. Častější jsou stres-tolerantní rostliny klonální, šířící se v prostoru vegetativně. U těch, které jsou odkázány na semena nebo plody, začínají problémy s fyzikálním charakterem půdního povrchu. Na plochem terénu ho vítr vyhlazuje a žene před sebou jak drobné částice deponovaného materiálu, tak lehká semena. Pokud se nenajde nerovnost, kde by se semeno mohlo zastavit a později zapustit kořeny, je povrch předurčen po dlouhou dobu k setrvání ve stavu, kdy není zpevněn rostlinami.

Namísto nákladné rekvultivace tu však stačí např. nenáročný zásah, který se označuje jako mulčování (obr. 8). Jde o přenesení posečené nadzemní bylinné biomasy na žádoucí plochu a zatížení např. větve-mi. Již v příští vegetační sezoně se může objevit značné množství semenáčků rostlin, jimž zdrsnění povrchu umožnilo se zachytit. Vyrovnávání výkyvů přízemního mikroklímatu nanesenou vrstvou pak dovolilo vyklíčení a rozkládající se biomasa navíc začala uvolňovat živiny a zlepšovat tak vlastnosti substrátu. Neříkáme-li, že se zakrátko objeví i dřeviny, převážně pionýrské, jako jsou břízy, topoly nebo vrby. Na-

5 Využití vypalování k řízení sukcese – podpora raných sukcesních stadií nebo klonálních typů rostlin (u dominant pionýrských dřevin např. osiky na úkor břízy); na rudném odkališti Chvaletice vzrůstá diverzita pionýrských druhů – hub, sinic, řas, lišejníků, mechů.

6 Odumírající porosty třtiny křovištní (*Calamagrostis epigejos*) po 25 letech sukcese poté, co došlo k mechanickému narušení povrchu a vrácení zvětrávacího procesu nově obnažených vrstev na počátek.

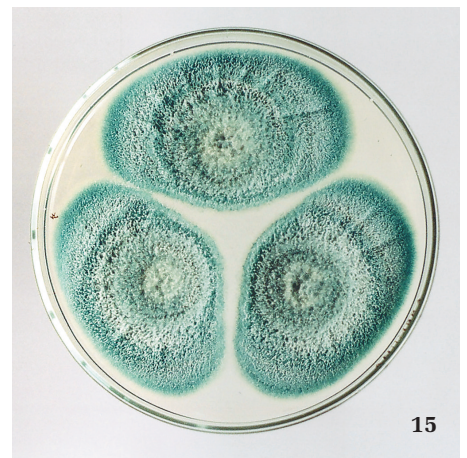
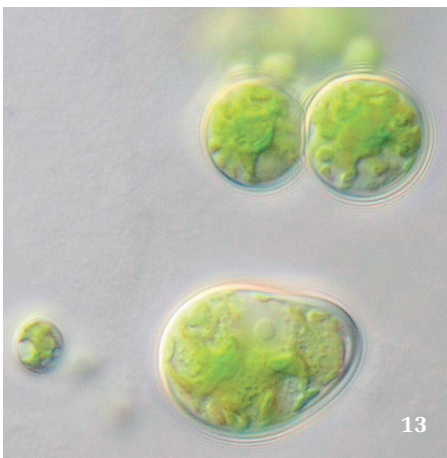
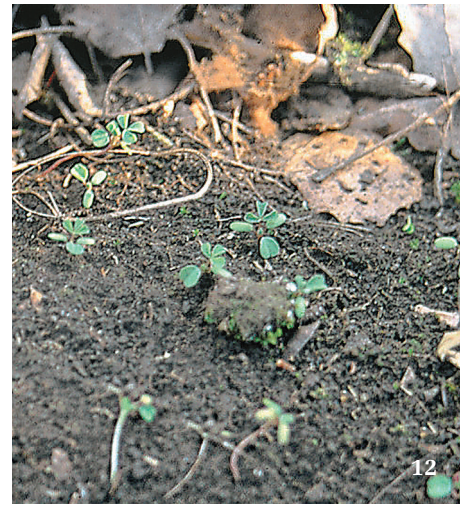
7 Třtina křovištní přežívá i za extrémně nepříznivých podmínek panujících na povrchu někdejšího rudného odkaliště – zbytek jejího „šiku“ (krátkých ramet nahlučených do falangy) udržuje kořeny kužel zasoleného substrátu, z jehož okolí materiál odvál vítr a odplavila voda. Analogii můžeme vidět na sopečných materiálech (viz článek Ekologie extrémů na str. 137).

8 Po třech letech od pokrytí zcela holého substrátu odumřelou nadzemní biomasou trav (mulčování) došlo k urychlení sukcese – zarůstáním mechů a nárůstem počtu semenáčků třtiny křovištní.

9 Detail povrchového zvětrávání substrátu odkaliště ve Chvaleticích po mechanickém narušení předtím již vegetací zarostlé partie. Foto O. Rauch

stává další stadium sukcese, tedy porostního vývoje, v němž můžeme pozorovat a různými způsoby měřit konkurenční ovlivňování skladby dřevinného porostu. Po několika letech lze zjistit, že jakmile semenáče některé z dřevin dorostou jistě





výše (a jisté hloubky prokořenění), odumírají. A za nimi dorůstají mladší, přičemž se jev může opakovat do kvalitativního zlepšení půdních podmínek vymytím toxických látek, změnou kyselosti a vznikem humusu. Retrogresivní vývoj (navracení zpět) se místo od místa liší a vyznačuje mozaikovitost plochy někdejšího odkaliště. Může vést k převaze jedné dominanty na některých místech a jiné dominanty na místech jiných. Na těch nejextrémnějších stanovištích obvykle vítězí klonální druh nad neklonálním, např. topol osika nad břízou, zvláště zasáhne-li vnější faktor, jako je třeba přízemní požár v době letního přísušku. Teprve dlouho po nástupu pionýrských dřevin, které se šíří v náletech (semen větrem), se začínají uchylovat dřeviny klimaxové, tzn. ty, které indikují pozvolné spění porostů k rovnováze s daným makroklimatem, v nížině např. duby. Jejich výskyt souvisí s přítomností semenožravých živočichů, jejichž pomocí se tyto druhy budoucího lesa rozšiřují.

Studium genetické variability potenciálně dominant bylinného patra v zápoji, v našem případě jedinců trávy třtiny křovištní (*Calamagrostis epigejos*, obr. 6 a 7) v extrémně stresujícím prostředí rudného odkaliště, pomocí izoenzymové analýzy elektroforézou ukázalo, že téměř co jedinec třtiny na začátku osidlování substrátu, to geneticky jiný klon. Teprve v průběhu zarůstání (a zastiňování stromovým patrem po desítkách let) se vyselektuje jen několik málo genetických typů přizpůsobivých k daným podmínkám. Na odkališti strusko-popílkovém s mírnějšími poměry prostředí je už na počátku sukcese

díků převažujícímu vegetativnímu rozmnožování populace třtiny křovištní daleko více homogenní a změny probíhají pomaleji a plynuleji. Tyto poznatky mohou promlouvat do výběru nejvhodnějších druhů, tak jejich genotypů, které lze s minimálními náklady uplatnit při revitalizačních zásazích v obnově. Třtina křovištní může být zároveň modelem velké plasticity ve svém chování. Při stanovištních extrémech dosahovaných hlavně na rudních odkalištích ovládá prostor krok za krokem stylem „falanga“, tedy v šiku (hustém, excentricky se rozšiřujícím trsu), zatímco na pískům podobných popílkových odkalištích expanduje dlouhými výběžky taktikou „guerilla“, jakoby partyzánským výsadkem nové sazenice do neobsazeného území.

Ovšem v nově utvářeném ekosystému zatím ještě chybějí některé složky, např. druhově specifictí opylovači. Zachováme-li se jako ekoinženýři, lze po kvalifikovaném posouzení příslušnou funkční složku společenstva introdukovat, tedy uměle ji zavést – zůstane pak předmětem dalšího sledování, jestli přežije, začne se rozmnožovat a pomůže připravit poměry pro další posun rekonstruovaného ekosystému.

*Pro tento text byly použity výsledky získané za podpory grantových projektů č. 206/93/2256 a 526/02/0651 GA ČR, č. 200/1997/B/BIO GA UK v Praze, tří projektů Fondu rozvoje vysokých škol MŠMT ČR, č. G4 1880, č. G4 1792 a č. G4 2348, grantu MŽP VAV-SM/2/90/05 a výzkumného záměru MŠMT ČR č. 31300042.*

**10** V postupujícím oživení substrátu odkaliště je klíčová dynamika svrchní krusty v závislosti na střídání sucha a vlhka, tepla a mrazu, kde hrají velkou roli mechy a lišejníky. Jejich zápoj a rozdíly v morfologii určují velikost a délku trvání fragmentů rozlámané biokrusty a vytvářejí tak mikroprostorové niky pro život dalších organismů. Foto K. Prášil

**11** Hnízdo mravence *Lasius niger* s larvami po odkrytí kusu lepenky na povrchu odkaliště, pod nímž bylo vystavěno. **12** Semenáčky vikev čtyřsemenné (*Vicia tetrasperma*), jejíž semena si nanosil mravenec *L. niger* z periferie odkaliště do hnízda. Mnohá zůstala v nejbližším okolí mraveniště a úspěšně vyklíčila. Snímky P. Kováře, není-li uvedeno jinak

**13** Buňky řasového fotobionta *Asterochloris glomerata* izolované ze stélky lišejníku *Cladonia squamosa*. Foto P. Škaloud **14** *Penicillium janthinellum* – nepohlavně se rozmnožující houba běžná na antropogenních stanovištích. Snáší vysoké obsahy kovů v půdě. Spory vyrůstají na konidiogenních buňkách se štíhlým krčkem. Foto A. Kubátová

**15** Dosud neznámý druh vrčkovýtrusné houby *Paecilomyces* sp. izolovaný ze substrátu opuštěného odkaliště Chvaletice. Je nápadný malachitově zelenými koloniemi. Foto A. Kubátová

**Kolektiv spoluautorů: Ota Rauch, Alena Kubátová, Jiří Neustupa, Zdeněk Soldán, Zdeněk Palice, Petr Dostál, Michal Štefánek.**