

M5: SúčasnÉ požiadavky na prevádzku a užívanie historických budov

Biotické poškodenie v interiéri a exteriéri historických objektov

Zuzana Machatová

Katedra reštaurovania, Vysoká školaýtvarných umení v Bratislave
Odbor Konzervačnej vedy, PÚ SR

2. august 2026, Academia Istropolitana Nova, Svätý Jur



Funded by
the European Union

Osnova

- Základné pojmy
- Biodeterioranty
- Sukcesia
- Mechanizmy degradácie substrátu
- Možnosti intervencie – biocídne látky
- Riziká spojené s využitím biocídov
- Stratégie
- Hygrotermálne modely

Bioderianty

- Mikroorganizmy – baktérie, cyanobaktérie, nitrifikačné, síru-oxidujúce druhy, mikroskopické huby, riasy
- Nižšie rastliny – machy, lišajníky, pečeňovky (marchantiophyta)
- Vyššie rastliny a hmyz
- Živočíchy
- Antropogénne faktory

Biodeterioranty

- Osídlenie povrchu závisí od bioreceptivity povrchu (kameň, omietková vrstva, murivo,...)
 - porozita, minerálne zloženie, mikroklima, RV, a i.
- Výsledok: **biofilm**
 - **Syntrofické** spoločenstvo mikroorganizmov (najmä baktérií a húb), ktoré si vytvára štruktúry zabezpečujúce **adhéziu, komunikáciu a ochranu**. Môže byť faktorom patogenity a virulencie
- Podľa konkrétnych podmienok nastáva **sukcesia** a rozvoj zložitejšieho ekosystému, kde sa uplatňujú rôzne, často symbiotické vzťahy

Sukcesia

Skupina	Radiácia (svetlo)	RV	Nutrienty	pH
Cyano baktérie	Vysoká tolerancia voči expozícii slnečnému, i UV žiareniu. Dobrá tolerancia voči absencii žiarenia	Vysoká tolerancia voči desikácii (EPS)	Fotoautotrofné (viažu CO ₂ fotosyntézou, alebo N ₂)	Vápence (neutrálne až alkalické pH 7,5 – 9,5)
Baktérie	Nevyžadujú žiarenie/ UV-senzitivita. Často osídľujú fisúry, endolitické póry, alebo využijú polohu v biofilme	Vyžadujú vysokú RV a_w > 0,85	Veľmi variabilné (od autotrofných po heterotrofné (EPS, organické látky z prostredia, príp. z odpadových látok) Chemolitotrofné	Variabilné (nitrifikačné a síru oxidujúce prežívajú aj vo veľmi znečistenej atmosfére)



Sukcesia

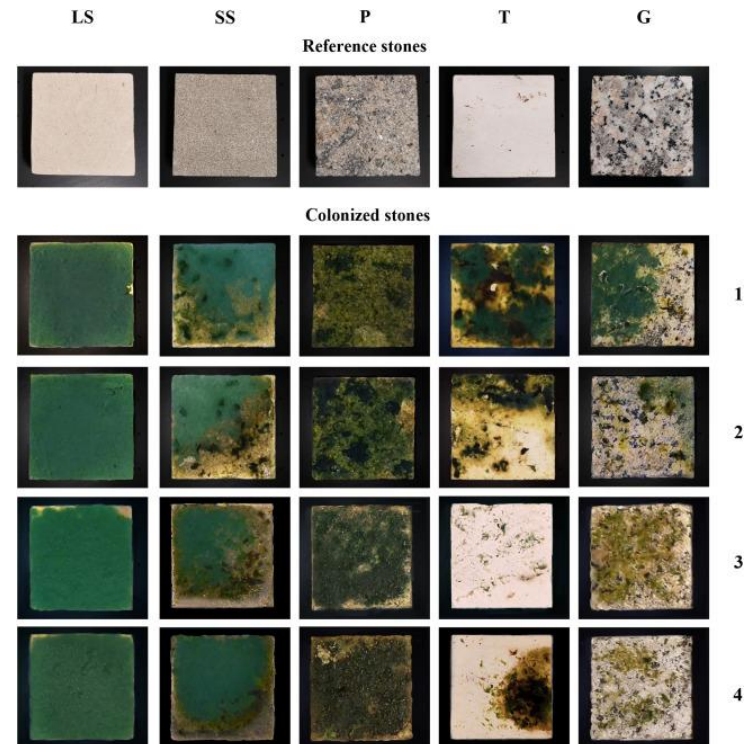
Skupina	Radiácia (svetlo)	RV	Nutrienty	pH
Huby (mikroskopické huby)	Nezávislé od žiarenia. Melaninizované huby sú rezistentné voči UV-žiareniu a teplotným výkyvom	Xerotoleratné až xerofilné $a_w \geq 0,65 - 0,75$)	Heterotrofné (aj organické polutanty z prostredia)	Neutrálne až kyslé
Nižšie rastliny (machy, lišajníky a iné)	Vyžadujú skôr nižšiu úroveň žiarenia	Vyžadujú vysokú RV (stály prísun a retencia vody) $a_w \approx 1$	Fotoautotrofné, absorbujú minerály priamo cez rhizoidy	Neutrálne až mierne kyslé



Cyanobaktérie

- Autotrofné prokaryoty, G- baktérie
- Fotopigmenty: chlorofyly, fykobilín, karotenoidy
- genera *Scytonema*, *Chroococcus*, *Gloeothecae*, *Leptoyngbya*,
- Diatoma: genus *Diadesmis*,
- Chlorofyty: genera *Chlorella*, *Apatococcus*

Zdroj: Francesco Gabriele et al. 2023 Biodeterioration of stone monuments: Studies on the influence of bioreceptivity on cyanobacterial biofilm growth and on the biocidal efficacy of essential oils in natural hydrogel, Science of The Total Environment, Volume 870, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161901>.



Baktérie

- Exteriér:
Bacillus, Sporosarcina, Pseudomonas, Micrococcus, Streptomyces, Staphylococcus
- Interiér (tzv. muzeálne druhy):
- *Bacillus* sp. (*B. subtilis, licheniformis, megaterium*), *Paenibacillus* sp. – vytvárajú spóry a šíria sa vo forme bioaerosolov. Degradujú organické substráty (vrátane syntetických polymérov)
- Actinobacteria (vláknité baktérie) – produkujú VOC (geosmin), degradujú organické aj anorganické materiály, produkujú koloranty
- *Staphylococcus* sp. (*S. epidermidis, S. aureus*) - do prostredia sa dostáva z mikroflóry človeka/ bioaerosolmi (napr. manipuláciou bez rukavíc). Spôsobuje degradáciu organických materiálov

Huby (mikroskopické huby)

- Mnohé sú (na rozdiel od baktérií) xerofilné (postačuje RV 60 – 65 %)
- **Exteriér:**
genera *Acremonium*, *Cladosporium*, *Alternaria*, *Humicola*, *Penicillium*, *Chaetomium*
- **Interiér:** *Aspergillus* sp. (*A. niger*, *A. flavus*, *A. versicolor*)
 - Produkujú celulózy a glukozidázy (organické materiály, zvlášť rastlinné vlákna)
 - Produkujú organické kyseliny, ktoré môžu mať korozívny vplyv na substrát (citrát a oxalát)

Huby (mikroskopické huby)

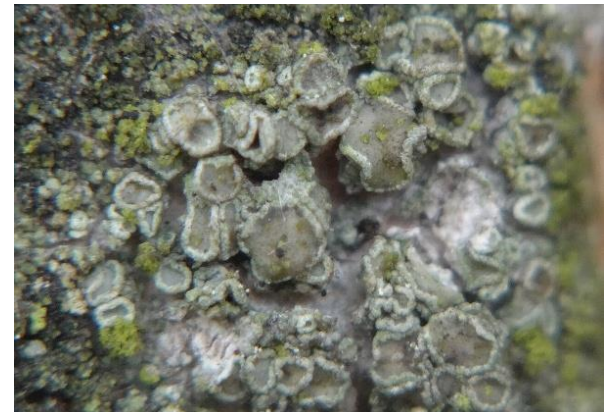
- Penicillium sp. (P. chrysogenum, P. citrinum)
 - Aktívne aj pri nízkych teplotách (ideálny substrát - pergamen, papier, plátno, textílie)
- Trichoderma sp. (T. viride, T. harzanium)
 - Najmä celulózolytická aktivita, mimoriadne rýchly rast (ideálny substrát – drevná hmota, papier, plátno)
- Melaninizované huby (dematiálne)
 - Produkujú melaníny, veľmi rezistentné voči UV žiareniu, chemickým činidlám, xerotolerantné
 - Cladosporium sp. (C. herbarum, C. elatum) – nástenné maľby, kameň, štukové prvky, papier, fotografie a i.
 - Alternaria (tiež Ulocladium) – textílie, koža, archívne materiály, farebné vrstvy
 - Produkujú celulázy a endoglukanázy

Huby (mikroskopické huby)

- *Cheatomium* sp. (*Ch. globosum*) – napáda proteínové zložky (knižné väzby, kožu, adhezíva)
 - Produkuje celulázy a endoglukanázy
- *Aureobasidium* sp. (*A. pullulans*) – kvasinka, napáda olejové médium (olejomaľby), lakové vrstvy, drevo a sklo.
 - Vytvára EPS, ktoré veľmi účinne adheruje a zachytáva depozitné znečistenie. Produkuje lipázy a esterázy

Nižšie rastliny

- Lišajníky: Candelariella, Caloplaca, Lecanora, Lecidea, Lepraria, Physcia, Protoparmeliopsis,
- Bryophyta: genera Bryum, Ceratodon, Marchantia, Tortula
 - Častí pôvodcovia hygromechanického poškodenia exteriérových kamenných prvkov



Zdroj: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lecanora_conizaeoides_3_a1.jpg

Degradácia

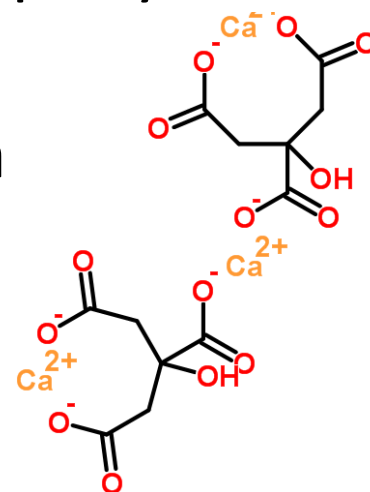
- Biomechanická degradácia
 - rast stielky vo fisúrach kamennej hmoty/ póroch omietky
 - cykly zmrazovania a roztápania voľnej a viazanej vody
- Biochemická degradácia
 - Pôsobenie enzýmov
 - Sekrécia organických kyselín
- Produkcia pigmentov (staining)
- Biomineralizácia

Biochemická/ biogeochemická degradácia

- Acidolýza – sekrécia a pôsobenie kyselín
- Nitrifikačné a síru oxidujúce baktérie produkujú kyselinu dusičnú/ sírovú z atmosferických polutantov (NO_x a SO_2). Tieto kyseliny **rozpúšťajú uhličitan vápenatý** za vzniku dusičnanu/ síranu vápenatého
 - *Desulfovibrio vulgaris* je možné využiť na odstraňovanie tzv. sadrovcových krúst
- Huby (*Aspergillus*, *Penicillium*) a niektoré baktérie produkujú organické kyseliny (oxálová, citrónová, mliečna a glukónová). Kyselina oxálová reaguje s vápenatými zložkami za vzniku oxalátových krúst (whewellit alebo weddelitu), prípadne oxalátovej patiny na závesnom obraze

Biochemická/ biogeochemická degradácia

- Chelatácia – organické kyseliny môžu pôsobiť ako účinné chelatanty katiónov Fe(III), Al(III), Mg(II), Ca(II), čím narúšajú kryštalickú mriežku minerálov a spôsobujú postupný rozpad povrchových štruktúr
- Nielen organické kyseliny, ale aj lipopeptidy z EPS. Napr. surfactin – mimoriadne účinný surfaktant, komplexón Fe(II) ale aj iných divalentných katiónov



Biomechanická degradácia

- **Napučiavanie a desikácia EPS** – cyanobaktérie a heterotrofné baktérie produkujú EPS, ktorá veľmi účinne adheruje k povrchu. Hydratáciou a desikáciou vzniká hydraulický a mechanický stres (mikro-fisúry → odlúčenie zrna minerálu → strata materiálu)
- Rast meristému a hýf – hýfy filamentóznych húb, mikroskopických húb a nižších rastlín vyplňajú póry a spôsobujú endolytickú biodeterioráciu (expanziou pletív). U nižších rastlín môže rast rhizoidov spôsobovať exfoliáciu

Produkcia pigmentov

- Cyanobaktérie a huby produkujú na svoju ochranu proti žiareniu veľmi odolné pigmenty (melaníny, scytonemín, karotenoidy)
- Pigmenty (farbivá) sú chemicky natoľko stálie, že perzistujú v póroch kameňa dlho po odumretí mikroorganizmov a odstránení biofilmu
- Melanínotvorné huby sú rezistentné voči väčšine dostupných bieliacich prostriedkov (fyzikálnych, aj chemických). Niektoré druhy, napr. *Cladosporium sphaerospermum* je schopné rádiosyntézy

Biomineralizácia a kryštalizácia solí

- Enzymatická činnosť mikroorganizmov solubilizuje pôvodne nerozpustné súčasti nosiča na rozpustné soli (napr. dusičnany)
- Roztoky týchto solí následne perkolujú v póroch a počas cyklov zmáčania a vysušenia zvyšujú kryštalizačný tlak a spôsobujú narúšanie povrchu

Intervencia – použiteľné látky

- Biodeteriorácia vs. protektívne biofilmy (patina)
- Riziko štrukturálneho poškodenia
- Väčšinou krátkodobé riešenia – nemajú dlhodobý profylaktický účinok (na úrovni dezinfekcie, ani na úrovni sterilizácie)
- Dlhodobé riešenia?
 - Skôr experimentálne
 - TiO_2 nanočastice (vznik ROS)
 - Fluoropolyméry a alkoxysolány – biocídny účinok a zároveň hydrofobizačný (= problematické)

Intervencia – použiteľné látky

- Kvartérne amóniové soli
 - Benzalkonium chlorid, didecyldimetylamónium chlorid (DDAC)
 - Mechanizmus: kationové surfaktanty narúšajú bunkové membrány (lýza)
 - Riasy, cyanobaktérie, mikroskopické huby, nelichenizované baktérie
 - Materiály: neutrálne pH (kameň, tehla, ...)
 - Benzododecíniumbromid = dimetyldodecylbenzylamónium bromid = Ajatín
 - Účinný voči G+ a G- baktériám, riasam, cyanobaktériám, mikroskopickým hubám a zeleným biofilmom, nie však voči mikroflóre s rozvinutou sukcesiou (lišajníkom)
 - c = 0,5 – 2 % vo vode alebo etanole (roztok alebo obklad). Pomerne silná väzba s negatívne nabitými substrátmi (pieskovec, granit)

Intervencia – použiteľné látky

- Izotiazolíny

- Oktyl-izotiazolín (OIT), metylchlóroizotiazolín (metylchlóroizotiazolinón MIT/ MCI), benzizotiazolinín (BIT)
- Mechanizmus: reaguje s tiol. skupinami proteínov - inhibícia bunkovej respirácie a metabolizmu
- Širokospektrálne, dobrá účinnosť na mikroskopické huby
- Materiály: exteriérové kamenné prvky (0,05 – 0,1 %)
- Environmentálna záťaž

Intervencia – použiteľné látky

- Redoxné činidlá

- Peroxid vodíka (resp. jeho stabilizované formy)
- Mechanizmus: oxidatívne poškodenie bunkových štruktúr a pigmentov

(odstraňuje škvrny po karotenoidoch a melanínoch, ale môže spôsobiť dekoloráciu farebnej vrstvy)

- Biofilmy, aktívne kolónie húb a baktérií, reziduálne škvrny
- Materiály: bez farebných vrstiev, u celulóзовých materiálov môže v kyslom prostredí spôsobiť blistering

Intervencia – použiteľné látky

- V prípade potreby vykonania dezinsekcie
 - **permetrín** (*Anobium punctatum*, *Xestobium rufovillosum*, *Lyctus linearis*, ale aj *Tineola Bisselliella*, *Anthrenus* spp. a i.)

Intervencia – použiteľné látky

Inovatívne/ environmentálne šetrné metódy

- Enzymatické čistenie
 - Hydrolázy (proteázy, lipázy, ...) môžu narušiť EPS bez atakovania filmov uložených pod nimi
- Esenciálne oleje
 - Tymol (tymián), eugenol (klinček), carvacrol (oregano)
 - Odparovanie sa môže spomaliť cyklodextrínmi alebo viazaním na silikagél

Intervencia – problematické látky

- Zlúčeniny chlóru (chlornany sodné)
 - Omietky a murivá: kontaminácia vodorozpustnými soľami (halit)
 - Drevná hmota: štiepenie β -(1 $\rightarrow$ 4) glykozidovej väzby celulózy (depolymerizácia), žltnutie
 - pH 11 – 13 = alkalická hydrolýza a okamžitá dekolórácia/diskolorácia farebnej vrstvy
 - Chemické poškodenie povrchu zvyšuje porozitu – riziko efektívnejšej re-kolonizácie. Do dezinfekcií povrchu sa rýchlejšie presadia rýchlo rastúce baktérie a huby (chýba kompetitívna zložka)

Intervencia – pôsob aplikácie

- Podľa požiadaviek na expozičný čas
 - Obklady (hlinky, gély, celulózové nosiče)
 - Nátery
 - Aerosoly (spray)
- Vždy je nutné mechanické očistenie (rezíduá EPS), aj po sterilizačných procesoch na hnutelných pamiatkach a zbierkových predmetoch. EPS môže obsahovať spóry, ktoré prečkajú kým sa nevytvoria podmienky pre germináciu

Riziká spojené s aplikáciou

- Vznik vodorozpustných solí (zlúčeniny chlóru)
- Diskolorácia farebnej vrstvy, poškodenie spojív
- Hydrofobizácia

Preventívne stratégie

- Prostredie objektu – kontrola vegetácie (s rešpektom k historickej zeleni)
- Zdroje vlhkosti – strechy, okná, podlažie
- Mikroklimatické podmienky (cirkulácia vzduchu, kondenzácia)
- Monitoring – obhliadka (VIS, UV), testovanie mikrobiálnej aktivity s využitím dostupných metód

Predikcia biodeteriorácie v interiéri (biohygrotermálne modely)

- Bioreceptivita vs. hygrotermálne činitele (aktivita, povrchová relatívna vlhkosť, rozdiely teplôt vs. koncept kritických hodnôt)
- Väčšina modelov využíva pojem **aktivita vody** (water activity, a_w)

$$a_w = \frac{RV}{100}$$

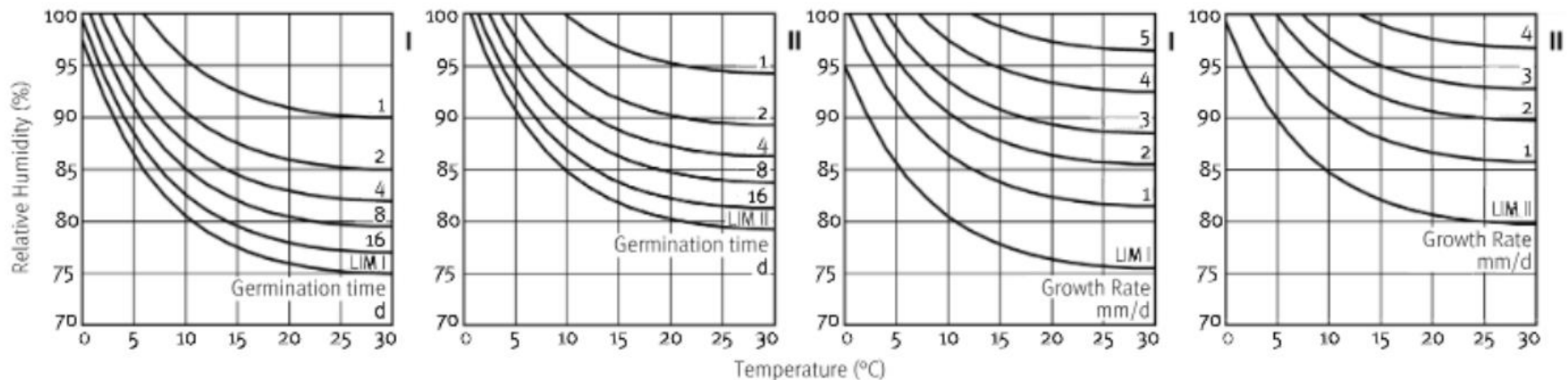
- Systém **izoplét** – kriviek na diagrame závislosti teploty (x-os) od RV alebo a_w (y-os). Krivky ohraničujú kritické hodnoty
- **Bioizochróna** – špecifická krivka, ktorá označuje čas potrebný na germináciu spór pri konštantných podmienkach

Sedlbauerov model (2001)

- Fraunhofer-Institute of Building Physics
- LIM – krivky (Lowest Isopleth for Mold)
- Germinačný čas
- Rýchlosť rastu mycélií (mm/ deň)
- Rozlišuje medzi substrátmi
 - Substrát kategórie 0 – médium pre kultiváciu (optimum)
 - Substrát kategórie I. – biodegradovateľný (kartón, niektoré izolácie, drevná hmota), LIM ~80 % RV
 - Substrát kategórie II. – porózne anorganické materiály (omietka, ložná malta), vyššie LIM (~85 % RV)
 - Substrát kategórie III. – anorganické materiály (kov), ktoré neobsahujú nutrične významné zložky

Sedlbauerov model (2001)

- Koncept prerušovaného vysychania (fluktuácie RV, kedy sa germinácia spór prerušuje)
- „funghi common in buildings“ – 150 druhov, vrátane *Aspergillus niger*, *Strachybotrys*



Iné modely

- VTT Model
 - Hukka a Viitanen (Fínsko)
- Empirický model pre výpočet Mold Index (M) s hodnotami v intervale od (0 – 6), pri fluktuácii RV a T
- MRD Model (Mold Resistance Design)
 - Thelandersson a Isaksson
 - Vhodný najmä pre drevené konštrukcie

Diagnostika a odhad rizika

- Základný predpoklad: neinvazívny charakter
- Kultivačne závislé a kultivačne nezávislé metódy
- Prakticky:
 - ATP bioluminiscenčné metódy
 - Médiá
 - Sedimentačné metódy (vyžadujú čistú zónu v laboratóriu)
 - Mikrobiologické metódy: kultivácia, DNA analýza, vzorkovanie vzduchu (je možné objednať)

ATP luminometria

- Využíva enzým luciferázu pre stanovenie množstva ATP na skúmanom povrchu (vzniká luciferín). Výsledok sa udáva v RLU (relative light units)
- Vyššie obstarávacie a prevádzkové náklady (jednorázové odberové sady)
- Rýchly výsledok (15 s.)
- Nie je možné rozlíšiť medzi zdrojmi ATP
- Žiaden univerzálny štandard, je potrebné si vytvoriť svoj protokol
- < 20 RLU veľmi čistý povrch
- > 60 RLU kontaminovaný povrch



Zdroje obrázkov:

<https://www.hygiena.com/hygiene-monitoring/atp-cleaning-verification/ensure-touch/>hygiena-ensure-touch

<https://www.yili-bio.com/product/128.html>

Kultivácia s využitím médií

- Médiá na nosičoch určené na kontaktnú inokuláciu alebo ponor (pre kvapaliny)
- Nutná inkubácia 1 – 3 dni (podľa protokolu)
- Porovnanie so škálou (približné stanovenie CFU/ cm²)
- Sada testov pre bakteriálnu kontamináciu a kontamináciu kvasinkami a hubami
- Nižšie obstarávacie náklady
- Možnosť využiť vykultivované mikroorganizmy na mikroskopickú identifikáciu



Ďakujem za pozornosť