

Prokeš, Lubomír

Posmrtné chemické změny a jejich význam pro interpretaci pohřebního ritu

In: Prokeš, Lubomír. *Posmrtné změny a jejich význam při interpretaci pohřebního ritu : (ke vztahu mezi archeologií a forenzními vědami)*. Vyd. 1. Brno: ÚAM FF MU, 2007, pp. 4-12

ISBN 978-80-239-9599-2

Stable URL (handle): <https://hdl.handle.net/11222.digilib/133184>

Access Date: 22. 02. 2024

Version: 20220831

Terms of use: Digital Library of the Faculty of Arts, Masaryk University provides access to digitized documents strictly for personal use, unless otherwise specified.

2. POSMRTNÉ CHEMICKÉ ZMĚNY A JEJICH VÝZNAM PRO INTERPRETACI POHŘEBNÍHO RITU

I když má studium pohřebního ritu v naší archeologii dlouhou tradici, možné vztahy mezi zachovalostí skeletů v hrobech a pohřebním ritem nebyly zpravidla brány v potaz. Jedním z prvních archeologů, který tuto souvislost rozpoznal, byl J. BÖHM (1941, 258), který upozorňoval na velmi špatně zachované kostry lidu kultury se šňůrovou keramikou a českoalpecké mohylové kultury, a to i v geografických oblastech, kde se kostry jinak velmi dobře zachovávají. Zájem o systematictější sledování této problematiky ožívá v české a moravské archeologii až od 90. let 20. století.

2.1. ROZKLAD MĚKKÝCH TKÁNÍ

Studium rozkladných procesů, prováděné dosud hlavně badateli v oboru soudní medicíny, je z převážné části orientováno na studium těl ležících volně na zemském povrchu či ve vodě, v mnohem menší míře pak těl uložených v zemi (v rakvích či bez rakve) nebo v uzavřených kovových rakvích. Rozklad měkkých tkání, jakkoli se zdánlivě jeví pro archeologii jako nepřilíživě zajímavý a málo důležitý, může mít často zcela zásadní vliv např. na zachovalost skeletu nebo na jeho polohu. Procesy rozkladu měkkých tkání bývají důkladně popisovány v příručkách soudního lékařství (MUELLER 1975; PROKOP 1966; SMOLJANINOV 1982; TESAŘ 1985; aj.).

2.1.1. Fermentativní autolýza

Jakmile nastane smrt, ztrácí tkáň odolnost vůči trávicím šťávám a tyto pak začnou rozkládat vlastní tkáň. Kromě toho dochází i k intracelulární autolýze – rozkladu buněk jejich vlastními enzymy. Nastává také posmrtné prosakování krevní tekutiny do okolních tkání. Je to patrně důsledek zvýšené propustnosti cévních stěn a zvýšení osmotického tlaku následkem štěpení bílkovin.

2.1.2. Hnití

Hnilobné procesy se projevují již záhy po smrti. Hnití zpravidla začíná v tlustém střevě (hlavně díky přítomnosti střevní mikroflóry – některé hnilobné bakterie jsou ještě zaživa přítomny v tlustém střevě, např. *Bacillus putrificus*). Jejich činnost je patrná nejprve v duodenu, ze střeva se pak cévami šíří do celého těla. Hniloba se objevuje nejprve v oblasti břicha a postupuje směrem vzhůru na hrudník, končetiny, krk a hlavu – *ascendentní* (vystupující) typ hniloby. *Descendentní* (sestupující) typ hniloby (hniloba začíná v oblasti hlavy a postupuje směrem dolů) se objevuje výjimečně, např. u mrtvol ležících ve vodě (KNOBLOCH 1958, 147).

Hnilobné bakterie jsou většinou anaerobní grampozitivní tyčinky, štěpící proteiny a glukózu za tvorby páchnoucích plynů.

V tkáních, které svým přežíváním spotřebovaly dostupný kyslík, se pak rychle množí. Zdrojem hnilobného procesu mohou být také chorobná ložiska, v nichž se bakterie usídlily již zaživa (gangréna, infikované rány) (TESAŘ 1985, 236). S ohledem na rychlost rozkladu lze orgány rozdělit zhruba do dvou skupin:

a) rozkládající se rychle (mozek, výstelka průdušnice a hratanu, žaludek a střeva, slezina, játra, děloha v případě těhotenství či po porodu)

b) rozkládající se pomalu (hltan, bránice, srdce, plíce, ledviny, močový měchýř, děloha, prostata)

Orgány tvořené svalovou tkání odolávají hnití déle než parenchymatózní orgány, s výjimkou žaludku a střev, které se, vzhledem k jejich obsahu v čase smrti, mohou rozkládat rychle. Rychlost rozkladu může do určité míry záviset i na obsahu fibrózní tkáně v orgánu.

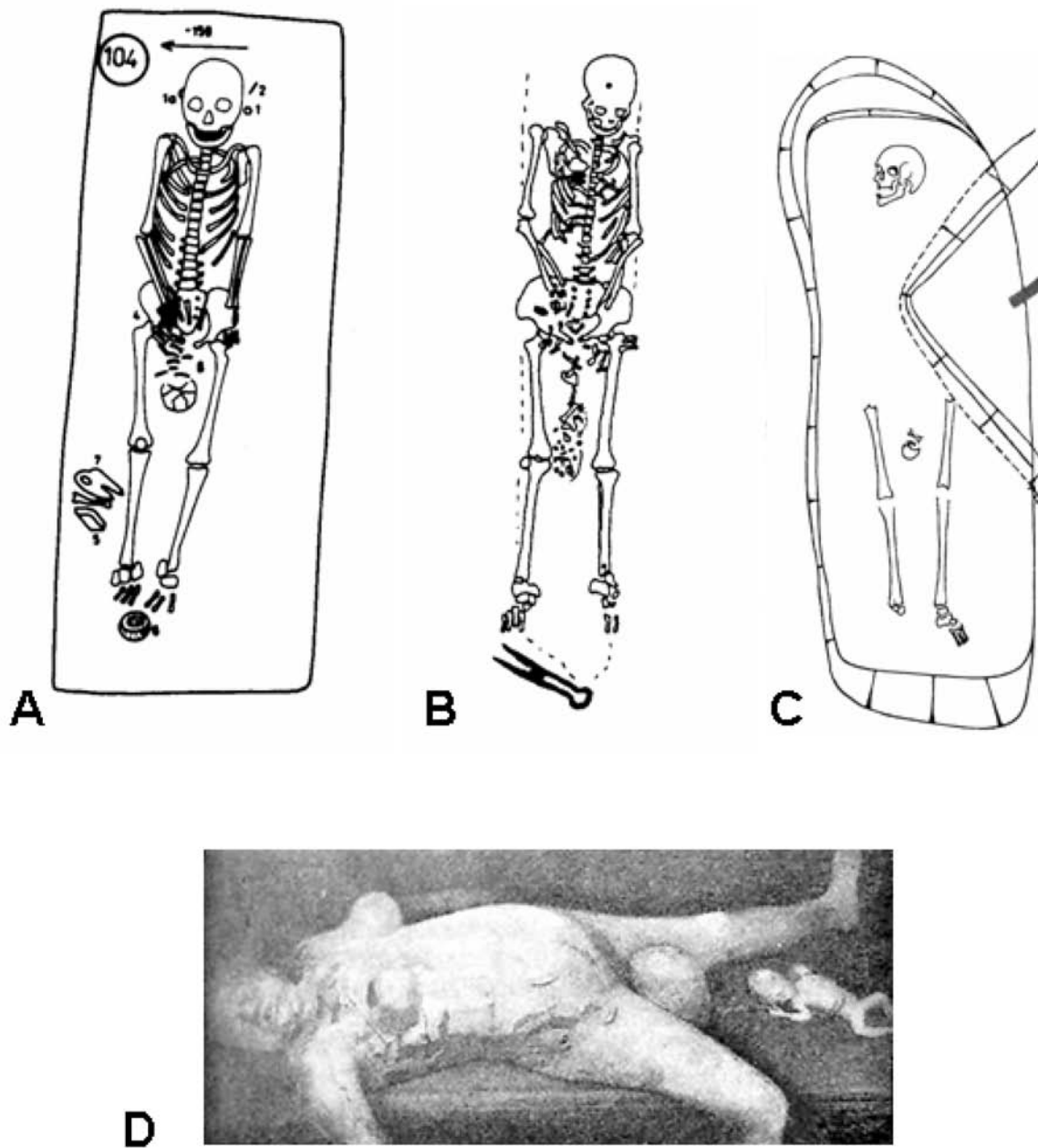
Při hnilobě měkkých tkání dochází působením mikroorganismů k rozkladu za vzniku hnilobných plynů (H_2S , CO_2 , CH_4 , NH_3 , SO_2 , H_2), čímž dochází k nadmutí měkkých částí obličejové a rozšíření opuchlých rtů, obklopujících ústa, dále k rychlému zvětšení obvodu krku a končetin a značnému zvětšení břicha a genitálií. Plyny pronikají do podkožní tukové vrstvy, kterou nadouvají. Vzniká *mrtvolný emfyzém*. V souvislosti s tvorbou emfyzému nabývá mrtvola neobyčejně velikých rozměrů. Tlak hnilobných plynů v břišní dutině, který může dosáhnout i dvou atmosfér (SMOLJANINOV 1982, 51), způsobuje vychlípnutí bránice do hrudní dutiny a vtlačuje rozkladné tekutiny do plic, přes průdušnici do ústního a nosních otvorů a odtud pak ven. Tlakem plynu v tkáních dochází také ke změnám polohy těla, případně pohybům jeho částí (PROKOP 1966, 51; JACHAU–KRAUSE 2002), u juvenilních jedinců lze často pozorovat roztoupení lebečních švů jako důsledek emfyzému mozkové tkáně (KNOBLOCH 1957, 151; ŽUKOV 1984).

U mrtvých těhotných žen může vlivem emfyzému dojít k tzv. „porodu v rakvi“ (Obr. 1), kdy jsou pozůstatky plodu vypuzeny z dělohy a leží mezi koleny mrtvoly (MUELLER 1975, 13). Může k němu dojít dvěma způsoby:

a) Tlakem hnilobných plynů dochází k vypuzení plodu z dělohy a většinou dochází i k její inverzi. Podle některých autorů (KNOBLOCH 1958, 149) však k vypuzení zdravého a donošeného plodu samotný tlak plynů nestačí.

b) Již před smrtí nastává otevírání hrdla a tím vlastně ještě zaživa začne porod, který je dokončen po smrti účinkem posmrtné ztuhlosti děložní svaloviny a hnilobných plynů. Jde vždy o těhotenství vysokého stupně a zpravidla o porod již v chodu.

Doklady „porodu v rakvi“ lze velmi vzácně zjistit i v archeologickém materiálu. Snad by to mohl být hrob ze slovansko-avarského pohřebiště v Šebastovicích (BUDINSKÝ–KRIČKA–TOČÍK 1991, 29, Abb. 9, Taf. XVI), z velkomoravského pohřebiště z Prostějova – Okružní ulice (FOJTÍK–PROKEŠ v tisku) a ze hřbitova u kostela sv. Jana ve Schaafhausenu (UNGER 2002, 85, obr. 60).



Obr. 1. Možné doklady “porodu v rakvi”. A. slovansko-avarské pohřebiště v Šebastovicích (BUDINSKÝ–KRIČKA–TOČÍK 1991), B. středověký hřbitov v Schaafhausenu (UNGER 2002), C. raněstředověké pohřebiště Prostějov – Okružní ulice (FOJTÍK–PROKEŠ, v tisku), D. forenzní případ (MUELLER 1975).

Tvorba plynů je obecně spojena s anaerobní fermentací, především v trávicím ústrojí, za uvolňování produktů bohatých na nižší karboxylové kyseliny, především kyselinu propionovou a máselnou. Díky šíření koliformních bakterií z trávicího ústrojí dochází v extracelulárním prostoru postupně ke změně pH z alkalického na kyselé (WINKLER et al. 1987). Při rozkladu měkkých tkání tak nastává nejprve hemolytické provlhlení tkání a později i jejich „zkapalnění“ za vzniku kapalných rozkladných produktů. Mrtvolné tekutiny se, stejně jako plyny, kumulují v tělesných dutinách a v puchýřích pod kůží. Součástí

mrtvolných tekutin jsou voda a rozkladné produkty s vyšším bodem varu.

Proteiny jsou štěpeny působením enzymů (nejprve enzymy přítomnými v organismu, poté hlavně mikrobiálními), ne však rovnoměrně v celém těle. Rychlost procesu je dána vlhkostí, činností bakterií a teplotou okolí. Vlhkost podporuje rozklad, proteolýza může být zpomalena ochlazením a zrychlena zvyšováním teploty. Proteiny se proteolyticky štěpí na peptony a oligopeptidy, ty pak dále na polypeptidy a poté na aminokyseliny, které podléhají deaminaci a dekarboxylaci. Bakteriální rozklad

proteinů (především svalstva) tak přispívá ke vzniku dalších produktů rozkladu, zejména těkavých aminů (putrescin, kada-verin, aj.) a karboxylových kyselin. Produkty rozkladu proteinů jsou také fenoly (fenol, kresol), indol, 3-methylindol (skatol), aj. (VASS 2001).

Tuková tkáň je ve srovnání se svalovinou a jinými parenchymatózními tkáněmi rezistentnější k rozkladným procesům. Lipidy jsou postupně rozštěpeny v těle přítomnými hydrolázami, esterázami a katalázami na jednotlivé komponenty a ty jsou pak dále metabolizovány mrtvolnou mikroflórou (především bakteriemi) na glycerol a vyšší mastné kyseliny. K hydrolýze tuků je nutná přítomnost vody, které je dostatek i v samotné tukové tkáni. Mastné kyseliny jsou prekurzorem pro tvorbu mrtvolného vosku – *adipociru*.

Ve střevech nahromaděné plyny a tekutiny unikají z kadá-vru tělesnými otvory a poškozenou pokožkou a poté se vsaku-jí do oděvu a do půdy (TESAŘ 1985, 243). U těl pohřbených v uzavřené rakvi se rozkladné produkty akumulují na jejím dně. V rakvích pak bývá v takových případech zjištěna někdy až ně-kolikacentimetrová masa složená z vody a z rozkládajících se měkkých tkání, se silným amoniakálním zápachem. Při jejím vzniku se uplatňují především delší časový úsek mezi smrtí a pohřbem, přítomnost vzduchu v rakvi, zadržování vody na dně rakve (k tomu dochází i v poměrně suchých půdách) a ta-ké přítomnost textilií či hoblin na dně rakve (MANT 1987). Rozklad pozůstatků v takových rakvích byl mnohem rychlejší než těl bez rakve za srovnatelných podmínek.

J. MATIEGKA a J. MALÝ (1934, 13) zjistili porušené zadní strany epi-fýz na kosterních pozůstatcích Albrechta z Valdštejna († 1634). Autoři vysvět-lují tento jev tím, že mrtvola ležící původně na zádech podlehla na místech blíže dnu silnější hnilobě. Analogickou situaci konstatoval J. MATIEGKA (1919) při ohledání pozůstatků, připisovaných Mladé Přemyslovně: nejvíce porušeny byly spodina lebeční a mandibula, obratlové oblouky, kost křížová a zadní částí pánve, loketní kosti; nepoškozeny byly kůstky rukou, patrně proto, že ruce byly původně spjaty na ventrální části trupu.

V bazilice sv. Jiří na Pražském hradě byla v hrobě 111 zjištěna deska s prohlubní pro uložení hlavy mrtvého (obr. 4a). Tato úprava je známa z ra-ného středověku z různých částí Evropy (BORKOVSKÝ 1975; UNGER 2002, obr. 52) a ze středověku a raného novověku Ruska (PANOVA 1987). Kostra byla velmi dobře zachována s výjimkou hlavy, která byla totálně roz-ložena. Lze zcela souhlasit s výkladem I. BORKOVSKÉHO (1975, 104), že příčinou destrukce byly kapalné rozkladné produkty, které se zadržovaly v prohlubni. Analogická situace byla pozorována u pohřbů v Archangel-ském chrámu moskevského Kremlu (Ivan IV. Hrozný, jeho synové Ivan a Fjodor, kniže Skopin-Šujskij) datovaných zhruba do poloviny 16. až po-čátku 17. století (PANOVA 1987).

U kovových rakví mohou agresivní rozkladné zplodiny někdy způsobit i destrukci dna a následně vypadnutí kosterních pozůstatků (BURIAN 1992). Doložen je zvyk plnit rak-ve popelem (např. na londýnském morovém hřbitově v East Smithfieldu), který snad měl absorbovat hnilobné tekutiny. To by mohlo svědčit také o tom, že mezi úmrtím a pohřbem mohla uplynout určitá doba (HAWKINS 1990). V hromadných hro-bech bývaly mrtvolny z hygienických důvodů často zasypávány vápnem, čímž se mohla do určité míry kompenzovat i menší hloubka hrobové jámy (ČIŽMÁŘ–GEISLER 1991). V kostech z těchto hrobů může někdy docházet k vysrážení uhličitanu vápenatého, podobně jako je tomu u kostí z krasových oblastí nebo ze spraší (TESAŘ 1985, 214).

2.1.3. Saponifikace

Saponifikace je vlastně tvorba „mýdla“ z tuků při vysokých hodnotách pH. Vzniklý produkt se nazývá *adipocire* („mrtvolný vosk“) (Obr. 2). Obyčejně se objevuje již při, či krátce po počá-tečnání hnilobě (v teplém a vlhkém prostředí) jako nános žlutobílé, mastné, voskovité substance. Adipocire se tvoří pouze v místech, kde je přítomen tělesný tuk: hlavně v oblasti tváří, hýždí a břicha (MANT 1987). Lidský tuk je za normální teploty kapalný; více než 60 % celkového množství mastných kyselin totiž tvoří lino-lenová a olejová kyselina, které jsou také za normální teploty kapalné. Hydrolýzou tuků a reakcí volných mastných kyselin především s dvojmocnými ionty (Ca^{2+} , Mg^{2+}) se tvoří nerozpust-né mýdlo. Kromě zmýdelnatělé tukové tkáně hrají významnou roli ve stabilizaci adipocire také některé vyšší mastné kyseliny s vysokým bodem tání, především kyselina 10-hydroxystearová a 10-hydroxypalmitová, v menším množství též kyselina 10-oxostearová a 10-oxopalmitová. Tyto kyseliny jsou druhotně syntetizovány různými druhy aerobních i anaerobních bakterií. Např. kyselina hydroxystearová je syntetizována druhy *Bacillus subtilis*, *Micrococcus luteus*, *Staphylococcus aureus* a *Clostridium perfringens* (TAKATORI 2001). Složení adipocire se také liší podle materiálu, na který je vázán a také závisí na rychlosti roz-kladu těla. Rychlá dekompozice je provázena tvorbou hrubého a drobného materiálu, produktu vazby se sodíkem (především z intersticiálních tekutin), při dekompozici pomalé, při vazbě s draslíkem (z rozrušených buněčných membrán) se naopak tvo-ří materiál jemný, pastovitý. Tvorba adipocire je urychlována přítomností některých druhů bakterií, např. clostridií, a může trvat od několika týdnů do několika měsíců (VASS 2001).

Adipocire se tvoří velmi dobře ve vodním prostředí za před-pokladu, že je tělo chráněno před vodní faunou. Jeho tvorba ovšem nevyžaduje velké množství vody. A. K. MANT (1987) pozoroval dobře vytvořený adipocire u těl pohřbených asi sto let v uzavřených olověných rakvích. Tělesný tuk zde byl vymyt vodou z vnitřních tkání, které později zmumifikovaly. Pokud se adipocire tvoří na intaktním těle, na vnitřní straně adipocirové vrstvy mohou být pozorovány proužky dehydra-tované svaloviny. Tuk může prosáknout spolu s rozkladnými tekutinami i do jiných tkání a teprve tam pak může docházet k saponifikaci (JACHAU–KRAUSE 2002). Přítomnost adipo-ciru může mít vliv na zachování textilií: v olověných rakvích (před 1850) se textilie z velké části rozpadly, jejich zbytky však byly dochovány díky kontaktu s adipocirem (JANAWAY 1987).

V raných stádiích tvorby je adipocire měkký a drobný, v případě kompletní saponifikace je tvrdý a tuhý. Na tvorbu adipocire mají rozhodující vliv bakterie (např. *Clostridium wel-chii*) a/nebo jejich enzymy. Laboratorní experimenty ukázaly, že vliv anaerobních podmínek je poměrně malý (rozdíl v rychlosti jeho tvorby v anaerobních a aerobních podmínkách byl pouze asi 20 %). Při experimentálním umístění tuku do vody pokles-lo pH rychle na hodnotu 4,5–5,5. V uzavřených rakvích, kde docházelo k tvorbě adipocire, byl obsah rakve alkalický, hlav-ně díky amoniaku, tvořícímu se rozkladem proteinů těla. Stále není příliš znám mechanismus druhotného rozkladu adipocire, k němuž může docházet během posmrtných změn. Schopnost jej rozkládat byla experimentálně zjištěna např. u gram-pozitiv-ních bakterií (PFEIFFER et al. 1998).



Obr. 2. Adipocire na obličejových partiích lebky.

2.1.4. Suchý rozklad

Po úniku hnilobných plynů a tekutin z těla dochází hlavně za přístupu kyslíku (za aerobních podmínek, např. v kryptách a hrobkách s přístupem vzduchu) a vyšší teploty, k suchému rozkladu, který probíhá především působením bakterií a plísní a postupně vede ke konečné skeletizaci těla. Pokožka se olupuje v hrubých cárech, vlasy i nehty se postupně uvolňují a odpadávají, dochází k pomalému vysychání a rozpadu měkkých částí mrtvolky, především svalstva a některých vnitřních orgánů. Po ztrátě tělesných tekutin a hnilobných plynů se propadá kůže hluboko do břišní dutiny a mezižeberních prostor. Rozpadem žvýkacích svalů dochází v pokročilém stadiu rozkladu k otevření úst, chrup bývá zpravidla obnažen, protože se rty ztratou tekutiny značně zúží a ztenčí. Pokud není kůže rozrušena působením různých organismů, zpravidla zůstává značně dlouho uchována (KNOBLOCH 1958, 149).

Z chemického hlediska je významným dějem oxidace mastných kyselin na aldehydy a ketony a na CO_2 . Vznikají plynné produkty páchnoucí po zatuchlině. Jde o směs aldehydů, ketonů, organických kyselin a jejich esterů a CO_2 . Tento proces probíhá ve větší míře pouze v přítomnosti kyslíku, který ovšem v uzavřené rakvi obvykle chybí (JANAWAY 1987; JACHAU–KRAUSE 2002). Plísně, objevující se ve větší míře až během tohoto stadia, produkují celou řadu kyselých metabolitů (např. *Aspergillus niger* vytváří kyselinu citronovou), které rozrušují zejména kostní tkáň, a také metabolity na bázi teracyklinů s baktericidními účinky, vykazující fluorescenci v UV světle (PIEPENBRINK 1986; WINKLER et al. 1987).

2.1.5. Mumifikace

Voda je důležitým médiem pro všechny chemické i mikrobiální rozkladné procesy. V suchém prostředí se rozklad zastavuje, dochází k inhibici bakteriálního rozkladu a tlení. K mumifikaci může dojít na vzduchu i v zemi, v suchém a teplém klimatu, nebo v prostředí s velmi nízkou vlhkostí. Často vzniká v kryptách a malých místnostech s dostatečnou cirkulací vzduchu. Rychlost vysychání je urychlována silnějším prouděním vzduchu, přítomností oděvu a také horizontální polohou těla (ATURALIYA–LUKASEWYCZ 1999). Mumifikaci podléhá především kůže, která má pro mikroorganismy pouze malou nutriční hodnotu (VASS 2001). Místa, kde se uchovaly zbytky vlhkosti, zpravidla bývají porostlá plísněmi. Vnitřní orgány podléhají po určité době rozkladu; k jejich vysušení dochází až mnohem později (JACHAU–KRAUSE 2002).

I pozdější změny mikroklimatu se mohou projevit změnou ve stavu zachování mumifikovaných pozůstatků. Již krátce po zamezení ventilace dochází v kryptách k celkovému zvýšení vlhkosti a začíná hniloba, zvláště u mumií, které jsou uloženy blízko stěn (GRALLA 1970).

2.2. FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ RYCHLOST A CHARAKTER ROZKLADU

Rozhodujícím faktorem při rozkladu těla je přístup kyslíku, bez něj se rozklad, i když už začal, značně zpomaluje. Hnití těla probíhá rychle na vzduchu, pomaleji ve vodě a ještě pomaleji v půdě; uplatňuje se tzv. Casperovo pravidlo (JACHAU–KRAUSE 2002):

1 týden vzduch = 2 týdny voda = 8 týdnů hrob v zemi

Z hlediska archeologického bádání je nejvýznamnější studium rozkladných procesů v hrobech. Na rozdíl od mrtvol uložených na povrchu zde dochází k menšímu kolísání teploty a omezenému přístupu hmyzu a ostatních mrchožroutů k tělu.

Příčina smrti

Významná ztráta krve zbavuje organismus vody, a proto dochází ke zpomalení rozkladu. Rozkouskování těla vede k úplnému vykrvácení jednotlivých částí těla a také zamezuje šíření mikroorganismů krevním oběhem. Různé části těžé mrtvolky se mohou zachovat v různém stavu. Jsou-li periferní části odděleny od těla, jejich hnití se zpozdí (TESAŘ 1985, 248). Také otrava některými jedy (např. arsenikem) způsobuje zpomalení rozkladu (RENTOUL–SMITH 1973, 123).

Časový úsek mezi úmrtím a pohřbem

Za pokojové teploty začíná proces rozkladu už 36 hodin po smrti, za nižších teplot později, při -5°C se rozklad zastavuje. Z etnografických dokladů je známo, že v době tuhých mrazů se nepohřbívalo a zemřelí byli pohřbíváni až v časných jarních měsících, kdy země rozmrzla a vyhloubení hrobové jámy bylo snadnější (MĚŘÍNSKÝ 1985, 25).

Na žárových pozůstatcích z mladší doby bronzové ze Sommereinu (Dolní Rakousko) byly zjištěny stopy ohlodání kosti myši, k němuž došlo ještě před vlastní kremací. To by mohlo svědčit o tom, že mezi úmrtím a kremací prošlo několik týdnů, případně i měsíců (WINKLER 1992).

Oděv

Přítomnost oděvu má značný vliv na průběh rozkladu těla. Na částech těla krytých oděvem, kde není dostatečný přístup vzduchu, probíhá hniloba pomaleji než na částech oděvem nekrytých (KNOBLOCH 1958, 146). A. K. MANT (1987) uvádí, že u mrtvol pohřbených bez rakve části těla pokryté oděvem často vykazují velmi dobrý stav zachování (kosti, svaly i vazivo bylo velmi dobře zachované, tuková tkáň saponifikovala). Textilie brání do určité míry přístupu hmyzu a také absorbují a zadržují vlhkost, čímž napomáhají tvorbě adipocire (zvláště, jde-li o oděvy z umělých vláken). Tato situace ostře kontrastuje s pohřby v rakvích, kde, díky značnému množství vzduchu uvnitř (a snad též delšímu časovému intervalu mezi smrtí a uložením do země), dochází k pokročilejším rozkladným změnám. U těl pohřbených bez oděvu i bez rakve dochází k poměrně rychlé skeletizaci (MANT 1987; FIEDLER–GRAW 2003).

Rakve

V borovicových a jedlových rakvích probíhá rozklad rychleji než v dubových. Ve smrkových rakvích dochází spíše k mumifikaci. Dubové a kovové rakve také podporují tvorbu adipocire (TESAŘ 1985, 247; FIEDLER–GRAW 2003). Druh dřeva, z něhož byly vyrobeny rakve či hrobové konstrukce, lze v některých případech určit rovněž na základě archeobotanické analýzy zbytků zachovaných v hrobech. Druhy použitého dřeva souvisely s jejich použitelností, případně s jejich dostupností v jednotlivých regionech (MĚŘÍNSKÝ–UNGER 1990, 363).

V jihoskandinávských mohylách ze starší doby bronzové (cca 1400–1300 let př. Kr.) byly zjištěny velmi dobře zachované dubové rakve dlabané z kmene, jejichž obsah, včetně pozůstatků mrtvého, byl výjimečně dobře zachován. Konstrukce těchto mohyl znemožnila přístup kyslíku k pohřbu, což záhy vyvolalo vznik anoxických (anaerobních) podmínek a výrazné zpomalení rozkladu organických látek (BREUNING–MADSEN et al. 2003). Podobná situace je známa z lokality Mawangtui (provincie Hunan, jižní Čína): kolem rakve byla 0,4–0,5 m mocná vrstva uhlíků a okolo ní 0,6–1,3 m mocná vrstva jílu. Vrstva uhlíků absorbovala vlhkost, vrstva jílu zabraňovala přístupu vody a kyslíku k pohřbu (LEE et al. 1986).

Významnou roli může hrát i vlastní konstrukce rakve: u rakví z nekvalitního dřeva či pouze ledabyly sbitých dochází k brzkému porušení nebo dokonce i propadu víka. Rakve s rombickým víkem v sobě zase uchovávají poměrně veliký objem vzduchu (MANT 1987), který může hrát významnou roli při rozkladu: pro průběh chemický rozklad je třeba jen asi 150–200 g kyslíku (DENT et al. 2004). K mnohem intenzivnějšímu rozkladu těla dochází, je-li mrtvý obklopen organickým materiálem (větvičky stromů, kompost, apod.). Tento působí jako izolace zabráňující odvodu tepla produkovaného rozkladem mrtvol i jako producent tepla díky vlastnímu rozkladu (MANT 1987). Také přítomnost slámy, pilin či hoblin, kterými bývá vyloženo dno rakve, může urychlit rozklad těla a omezit tvorbu adipocire (FIEDLER–GRAW 2003). Mimořádně rychle hnijí mrtvol v hnoji, hlavně díky bohatému zastoupení mikroorganismů v exkrementech (TESAŘ 1985, 248).

Hloubka hrobu

Hloubka uložení těla v zemi úzce souvisí s rychlostí jeho rozkladu (RODRIGUEZ–BASS 1985). Podle současných norem je předepsaná hloubka hrobové jámy 200 cm, hygienickým požadavkům však dostačuje hloubka 80–180 cm (MAREŠOVÁ 1983, 15–16), případně 150–200 cm (SANTARSIERO et al. 2000). Dostatečná délka hrobu je nutná k ochraně před hnilobným pachem a proti vyhrabání mrtvol zvířaty.

Z archeologického hlediska je vhodné sledovat také kubaturu hrobových jam, která může odrážet sociální poměry na pohřebišti (MĚŘÍNSKÝ 1985, 15–18). Tato veličina umožňuje odhadnout, kolik úsilí a času je potřeba k vyhloubení hrobové jámy. Obtížnost kopání jámy zhruba roste v posloupnosti:

písek, štěrk → spraš → slínovitá půda → zvětralá skála

K. MAREŠOVÁ (1983, 16) uvádí pro těžké hlinité a slínovité půdy rychlost 2,45 hod/m³ pro moderní pracovní nástroje (krumpáč, rýč, lopata), pro staroslovanské období lze počítat s dobou asi dvojnásobnou. Obecně však lze předpokládat, že pro sprašové a písčité půdy byla doba potřebná na 1 m³ ve srovnání s těžkými půdami mnohem kratší. V úvahu je nutno vzít také roční období, ve kterém je hrob hlouben. Jámu, kterou v létě vykope ve spraši či jílu jeden člověk za 6 hodin, kopou v zimě tři lidé nejméně celý den (WALDHAUSER et al. 1999, 174).

Poloha těla

Pokud leží mrtvola obličejem k zemi, krev se hromadí v hlavě, krku a hrudi a hniloba začíná v těchto místech. Pokud je tělo v „supinační poloze“, zvláště jsou-li hlava a hrudník lehce zdviženy, změny začínají především na břiše a horních částech stehů (TESAŘ 1986, 249).

Hromadné hroby

Pozůstatky pohřbené v hromadných hrobech, kde jsou jednotlivá těla navzájem v blízkém kontaktu, vykazují zpravidla lepší zchovalost než pozůstatky z hrobů samostatných. Také těla pohřbená v centrální části hromadného hrobu jsou lépe zachovaná než těla na okrajích (MANT 1987). V hromadných hrobech s několika vrstvami těl nad sebou byl pozorován častější výskyt adipocire u mrtvol ze spodních vrstev, ke kterým neměl dostatečný přístup vzduch a kde celé prostředí bylo prosáklé hnilobnými tekutinami, vytékajícími z mrtvol ve vyšších vrstvách (KNOBLOCH 1958, 156).

Spodní voda

Podmáčené půdy jsou vhodné pro tvorbu adipocire. U pohřbů v rakvi může vlivem spodní vody docházet k dislokaci součástí skeletu, vymývání prvků z kostí může urychlit rozklad kostry.

Teplota

Časový průběh rozkladu závisí na teplotě okolí, je závislý na zeměpisné šířce, ročním období a hloubce hrobu. Zvýšením teploty o 10 °C se rychlost rozkladu zvýší na dvojnásobek (JACHAU–KRAUSE 2002). Optimální teplota okolí pro hnití těla je 30–40 °C. Vyšší teplota urychluje hnití, ale negativně ovlivňuje tvorbu adipocire. Při teplotách 0–1 °C a 50–60 °C se proces hnití již značně zpomaluje a na suchém vzduchu může přejít v přirozenou mumifikaci (SMOLJANINOV 1982, 50).

Vrstva půdy představuje dobrou izolační bariéru vůči slunečnímu záření. Teplota půdy a také její kolísání klesají s rostoucí hloubkou pohřbu. Průměrná teplota v hloubce kolem 150 cm je 4–5 °C, v nejteplejších obdobích maximálně 10 °C (TESAŘ 1986, 248). Dříve se předpokládalo, že tělesná teplota kadávrů je v rovnováze s teplotou okolí. Experimenty však prokázaly, že proces rozkladu těla způsobuje její zvýšení asi o 3–10 °C, v závislosti na hloubce pohřbu. V mělkých hrobech je zvýšení teploty způsobené rozkladem vyšší, objevuje se dříve a odeznívá později (RODRIGUEZ–BASS 1985). Toto zvýšení teploty může mít také pozitivní vliv na tvorbu adipociru (FIEDLER–GRAU 2003).

Propustnost půdy

Přístup kyslíku je závislý na typu a hloubce pohřbu. Rozklad bývá urychlen v porézních, lehkých půdách, zatímco kompaktní, jílovité půdy jej mohou zpomalovat (LÖTTERLE et al. 1982; TESAŘ 1986, 248). Také intenzita rozkladu kostí ubývá od hrubých písků k jílu (KUČERA 1927). V kamenitých půdách mohou kosti podléhat mechanické destrukci (KUNTER 1988).

Při otevření hromadného hrobu obětí nacismu v Bohosudově, kde byla půda složena téměř výhradně z popela, byly po 8 měsících nalezeny v hrobě jen kosti beze zbytků měkkých tkání, šlach a chrupavek (KNOBLOCH 1958, 152).

Kyselost půdy

V počátečním stadiu rozkladu těla v zemi dochází ke zvýšení pH půdy (RODRIGUEZ–BASS 1985). Proto bývá v půdě zjištěn zvýšený obsah NH_4^+ (konzistentní s růstem celkového dusíku a pH), organického uhlíku a celkového dusíku. Vysoký obsah S^{2-} (rozpuštěného v alkáliích) indikuje redukční podmínky v hrobě (HOPKINS et al. 2000). Obecně lze říci, že primární je rovnováha mezi rozkladnými produkty těla a hrobovou výstavou (to se týká především pH). K tvorbě acidobazické rovnováhy mezi kostí a půdním prostředím dochází až později, po kompletním rozkladu měkkých tkání.

2.3. ROZKLAD TĚLA A HROBOVÁ VÝBAVA

Rozklad těla má výrazně modifikující vliv na bezprostřední okolí pohřbu tak, že v uzavřených rakvích a v těžkých půdách (s omezenou výměnou plynů mezi půdou a atmosférou) převládají redukční podmínky. Rozkladné produkty těla a organických materiálů mají vliv na krátkodobou korozi artefaktů. K tvorbě rovnováhy mezi půdním prostředím a artefaktem dochází mnohem později, až po kompletním rozkladu organické složky těla (JANAWAY 1987).

Kovy

Koroze kovových artefaktů v zemi závisí na množství různých faktorů: vlhkosti, porositě a kyselosti půdy, přítomnosti rozpustných solí a teplotě. Z hlediska korozního chování lze kovy rozdělit do několika skupin:

- 1) kovy odolávající korozi ve všech prostředích (zlato)
- 2) kovy, které jsou zpočátku snadno atakovatelné, ale vytvářející si povrchový film odolný vůči korozi a stávají se rezistentní vůči dalšímu ataku (slitiny mědi)

- 3) kovy korodující rychle, nevytvářející si povrchový film odolný vůči další korozi (železo)

Slitiny mědi obvykle nekorodují extenzivně a mají poměrně velké kovové jádro pokryté tenkou vrstvou korozních produktů. Železo vykazuje obecně vyšší stupeň koroze, tak jak několik oxidačních stavů způsobuje menší pravděpodobnost dosažení stabilní rovnováhy s okolním prostředím. Obvykle je přítomno větší množství korozních produktů než železného jádra. Elektrochemická koroze je možná pouze za přítomnosti vody v prostředí pohřbu. Podmáčené půdy s malým přístupem kyslíku nebo redukční podmínky v uzavřené kovové rakvi zpomalují korozi. Zde však budou patrně rozdíly mezi korozi kovů v kontaktu s kapalnými rozkladnými produkty a předměty na povrchu těla, kde je sice vysoká vlhkost, ale kde není bráněno proudění plynu. Tyto rozdíly budou méně markantní v případech uzavřených rakví, vyplněných redukčními plyny.

Dřevo

Rozklad organických materiálů je dán zejména přítomností rozkladných bakterií a především dřevokazných hub (STAŠŠÍKOVÁ–ŠTUKOVSKÁ 1993a, b, STAŠŠÍKOVÁ–ŠTUKOVSKÁ 1994). Dekompozici rostlinných zbytků, především ligninu a celulózy, vznikají huminové kyseliny, které je možné využít k detekci rozložených předmětů ze dřeva (PELIKÁN 1954). V půdním prostředí může docházet k mineralizaci dřeva – zvyšuje se hlavně podíl oxidů křemíku, železa a manganu (CENGEL 2000).

Textilie

- 1) srst/vlna, keratin
- 2) hedvábí, fibroin a sericin
- 3) lýko/vláknarostlinných stonků (sklerenchym), celulóza se silně lignifikovanými buněčnými stěnami
- 4) rostlinná vlákna, celulóza /bavlna

Ačkoliv rostlinná vlákna mohou být snadno denaturována a rozkládána chemickými složkami půdy (celulóza se snadno rozkládá v kyselém prostředí, proteiny jsou atakovány silnými bázemi), hlavní činitelé rozkladu jsou biologického původu. Hrob je vhodným prostředím pro mikroorganismy rozkládající přírodní vlákna. Jsou-li půdní podmínky takové, že nedovolují rozvoj daného mikroorganismu, textilie se zachovává. V anaerobním a neutrálním nebo bazickém prostředí nejsou přítomny mikroorganismy jednoduše rozkládající keratin, sericin a fibroin. Celulóza se zachovává pouze v anaerobním prostředí s vysokým pH.

V měděné rakvi maršála Jeana Louise Raduita de Souches (1608–1682) v hrobce kostela sv. Jakuba byly nalezeny hnilobou silně poškozené a rozpadávající se zbytky vnitřní dřevěné rakve, korálky dřevěného růžence, zbytky oděvu (brokátový kabátec, čepec, šerpa, vlněné punčochy) a bot a téměř úplně zetlelé a rozpadlé kosterní pozůstatky (NOVOTNÝ 1967). Rozložené kosterní pozůstatky a zachovaná vlněná textilie ukazují na přítomnost silně kyselého prostředí v rakvi.

Zachování organických materiálů za přítomnosti kovových artefaktů je závislé na dvou rychlostech rozkladu:

- 1) rychlosti degradace organického materiálu
- 2) rychlosti koroze, transportu a ukládání iontů kovu na a do organického materiálu

Pokud je první proces rychlejší než druhý, organický materiál se nedochová. V systému měď/textil mají měďnaté ionty biocidní účinky, v systému železo/textil obalují korozní produkty železa vlákna, která se však později rozloží. „Obal“ pak přesně odráží rozměry a morfologii povrchu již rozložených vláken.

2.4. DETEKCE ROZKLADNÝCH PRODUKTŮ TĚLA

Znalost chemických procesů, ke kterým dochází po smrti organismu, má řadu praktických důsledků. Původní přítomnost těl (rozložených i druhotně přemístěných) lze v archeologii a ve forenzních vědách indikovat sledováním některých látek v půdních vzorcích:

Aminy a ptomainy. Methylamin, dimethylamin, trimethylamin a ethylamin vznikají dekarboxylací z aminokyselin, produktů hydrolýzy proteinů. Dostí nízký bod varu těchto sloučenin (asi $-6,3$ – $16,6$ °C) umožňuje v případech kamenných tumb či kovových rakví (teplota cca 12 – 18 °C) prokázat jejich přítomnost i v plynné fázi (ARAI 1990).

Dalším plynným produktem rozkladu těla je **methan**, který lze, během probíhajícího rozkladu v zemi, detekovat v půdním vzduchu v těsné blízkosti pohřbeného těla (DAVENPORT 1992).

Nižší karboxylové kyseliny (Volatile Fatty Acids, VFA). Jsou to organické kyseliny s krátkým řetězcem, produkty aerobního i anaerobního mikrobiálního rozpadu svalstva a tukové tkáně. V půdních vzorcích se obvykle stanovují kyseliny propionová, máselná a valerová, mohou se ovšem vyskytnout také kyseliny isomáselná, isovalerová a kapronová. Obsah VFA v hrobové výplni je ovlivněn dobou uložení pozůstatků (lze je použít pouze ve forenzní archeologii), pohřebními zvyklostmi, klimatem, poměrem písku a jílu v půdě a její kyselostí a vlhkostí (VASS et al 1992; TULLER 2001).

Cholesterol. Stanovení cholesterolu je perspektivní metodou detekce pohřbu v silně kyselých půdách s nízkým obsahem hliníku, železa a manganu, v nichž se obtížně fixuje fosfát (DAVIES–POLLARD 1988). Jeho výhodou je, že se ve větší míře nachází pouze v živočišných organismech (tělo člověka o hmotnosti 70 kg obsahuje cca 145 g cholesterolu), v rostlinách a v mikroorganismech je jeho obsah nepatrný. V těle se cholesterol nachází jako volný nebo v esterech s vyššími mastnými kyselinami. Díky své nerozpustnosti ve vodě není cholesterol nijak významně vymýván srážkovou vodou, může ovšem podléhat rozkladu působením půdních mikroorganismů (zejména *Proactinomyces*). Degradace může být omezena jeho adsorpcí na jílové částice. Ideálním prostředím pro uchování cholesterolu jsou tedy silně kyselé, anaerobní, vlhké půdy (DAVIES–POLLARD 1988). Kromě nejčastěji používaných chromatografických metod byl ke stanovení cholesterolu v sedimentech vypracován i postup spektrofotometrický, použitelný přímo v terénu (ROTTLÄNDER 1970).

Vyšší mastné kyseliny. V hrobových výplních v alkalických půdách lze často zjistit také přítomnost vyšších mastných kyselin, především palmitové, stearové, myristové, olejové a palmitolejové, případně i zbytků adipocire, vzniklého reakcí těchto kyselin s půdním vápníkem (FORBES et al. 2002). Jeho barva

bývá často tmavá, patrně v důsledku působení ostatních rozkladných produktů. Také zde se projevují rozdíly mezi suchými a vlhkými půdami: pouze ve vzorcích z vlhkých půd byla zjištěna 10-hydroxystearová kyselina a je pro ně charakteristický také vyšší obsah kyseliny palmitové a nižší obsah kyseliny stearové (FORBES et al. 2002). Je ovšem třeba brát ohled na fakt, že vyšší mastné kyseliny mohou být obsaženy i v kořnicích rostlin pronikajících do hrobové výplně.

Krevní proteiny. Obecně indikují přítomnost krve v sedimentu. Vysoký obsah jílu a písku v půdě zřejmě chrání proteiny adsorbované na křemičitou matici před mikrobiálním atakem. Vysokomolekulární proteiny mohou také tvořit ve vodě špatně rozpustné agregáty nebo se mohou vázat na nerozpustné vyšší mastné kyseliny (např. z tuku mrtvého). Krevní proteiny tak mohou v půdě přetrvat i poměrně dlouhou dobu (TULLER 2001).

Myoglobin. Dalším perspektivním organickým biomarkerem by mohl být myoglobin, protein specifický pro kosterň a srdeční svalstvo. Na rozdíl od krevních proteinů by mohl být lidský myoglobin specifickým markerem lidské mrtvolky původně přítomné v objektu (ostatní biomarkery, s výjimkou krevních proteinů, nejsou druhově specifické). Dosud byl myoglobin použit pouze k prokázání vaření lidského masa v keramických nádobách a také k detekci jeho zbytků v koprolitech (MARLAR et al. 2000).

Celkový obsah organické složky. Jde o nespecifický marker, který může být produktem rozkladu živočišných i rostlinných zbytků a může zahrnovat lipidy, proteiny, pryskyřice, uhliky, humus, apod. (DAVIES–POLLARD 1988). Některé moderní metody termické analýzy (např. diferenční skenovací kalorimetrie, WANG et al. 2000) umožňují určitou diferenciaci složek (např. uhliky od ostatních složek).

Fosfor. V okolí kosterních pozůstatků bylo zjištěno, ve srovnání s okolní půdou, obohacení hrobové výplně fosforem (STOYE 1950), pocházejícího pravděpodobně z rozkladu měkkých tkání (svaly 0,0034 %, nervová tkáň 0,035 %; HOMOLKA 1971, 268). Fosfát v oblasti skeletu zůstává zpravidla stabilní a není vymýván: vertikální migrace fosforu je zanedbatelná (STOYE 1950; JAKOB 1955; NÚÑEZ 1975). Tohoto poznatku lze využít při identifikaci hrobů s totálně rozloženými pozůstatky: hloubkový profil vykazuje v určité hloubce ostré maximum koncentrace fosforu (Leichenhorizont), které umožňuje u totálně rozložených skeletů zjistit hloubku uložení pohřbu. Aby se fosforem obohatila i půda nad tímto horizontem, musí být hrob narušen dalšími pohřby, při nichž dojde k promíchání půdy z různých vrstev. Tento proces a/nebo eroze, při níž může dojít až k odkrytí fosfátem obohaceného horizontu, dokáže umožnit vytyčit pohřebiště pomocí fosfátové analýzy pouze na základě povrchového vzorkování (JAKOB 1955).

V průběhu anaerobního rozkladu těla v hrobě dochází ke vzniku **sulfidových iontů** S^{2-} , případně změnám v poměru Fe^{3+}/Fe^{2+} (DENT et al. 2004). Tyto změny lze indikovat přímo v terénu pomocí jednoduchých chemických reakcí (BARTLETT–JAMES 1995). Ke sledování změn Fe^{3+}/Fe^{2+} lze využít i měření magnetické susceptibility hrobového sedimentu (LINFORD 2004).

Tab. 1. Transformace hydroxyapatitu v kyselém prostředí (HERRMANN – NEWSELY 1982; HERRMANN et al. 1990, 9)

pH	7,0 – 7,5 (fyzilogické)	6,0 – 7,0	4,5 – 6,0
Minerál	hydroxyapatit	oktalciumfosfát	brushit
Chemický vzorec	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$	$\text{Ca}_4\text{H}(\text{PO}_4) \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$	$\text{CaHPO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$
Součin rozpustnosti	$5 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-4}$

2.5. CHEMICKÉ ZMĚNY KOSTNÍHO MINERÁLU

Chemické změny kostního minerálu lze rozdělit do tří skupin (PIEPENBRINK 1989): homoionická/heteroionická substituce, isomorfní/heteromorfní rekrystalizace hydroxyapatitu a kombinace heteroionické substituce a heteromorfní rekrystalizace.

Homoionická / heteroionická substituce

Jde o iontovou výměnu mezi kostí a vnějším prostředím, makroskopicky ani mikroskopicky ji prakticky nelze zjistit.

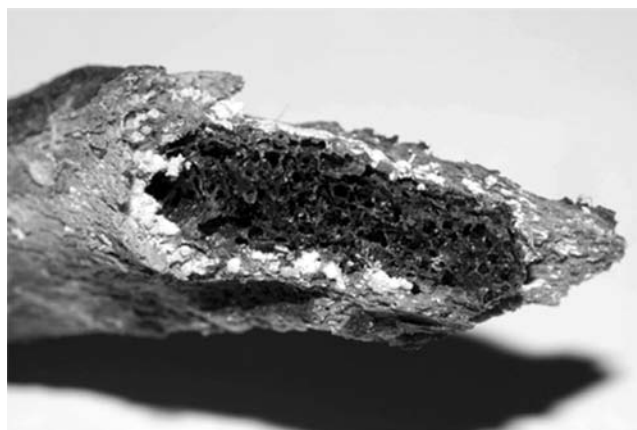
Isomorfní / heteromorfní rekrystalizace hydroxyapatitu

Vlivem nízké hodnoty pH a vysoké vlhkosti prostředí dochází k rekrystalizaci hydroxyapatitu na minerál **brushit** (Obr. 3) v sekvenci hydroxyapatit → oktalciumfosfát → brushit (Tab. 1).

Tvorba brushitu je doprovázena mikroskopickou dezintegrací kosti, protože laminární krystaly brushitu jsou podstatně větší než krystaly hydroxyapatitu. To následně vede k rozpraskávání kostní tkáně a rozpadu osteonů, což je patrné na mikroskopickém výbrusu kosti. Protože kyselé prostředí často vzniká během hnití měkkých tkání, lze brushit často nalézt už v ranném stadiu rozkladu kostí. Rozpustnost brushitu ve vodě vede k progresivnímu rozkladu rozpadlé kostry a někdy téměř k totálnímu rozkladu kostry za vzniku půdny siluety.

V kryptě, zbudované pod kněžským v chrámu sv. Jakuba v Kutné Hoře koncem 17. století, byly zjištěny pohřby z let 1720–1784 (podle cínových tabulek s nápisy) v rozpadlých dřevěných rakvích. Kostry byly téměř kompletně rozpadlé na sypkou hmotu (VEPŘEK 1943–44).

K částečnému i totálnímu rozkladu kosterních pozůstatků může docházet i ve vysoce alkalických půdách (např. ve spráších). Příčinou jsou úzce lokální změny pH způsobené anaerobním rozkladem měkkých tkání a působením saprofytních mikroorganismů na mrtvolu (HERRMANN–NEWSELY 1982), na předměty z organických materiálů v hrobové výbavě a také na rakve. Celý tento proces lze charakterizovat jako kombinaci řady biogenních a abiogenních faktorů, které jsou podmíněny určitými pohřebními praktikami (STAŠŠÍKOVÁ–ŠTUKOVSKÁ 1993 a, b). Typickým projevem těchto procesů je významný rozdíl v zachovalosti jednotlivých partií skeletu.



Obr. 3. Krystalky brushitu na kosti z rodinné hrobky Dietrichsteinů z Mikulova (foto autor).

Na pohřebišti v Borovcích (STAŠŠÍKOVÁ–ŠTUKOVSKÁ 1993a, b) byly kromě rozložených a velmi poškozených (stupeň 1 a 2, odpovídají zhruba kategoriím 5 a 4 podle GORDON–BUIKSTRA 1981) skeletů zjištěna také dekompozice pouze horní části skeletu (stupeň 3a), obratlů, žebek a kloubů některých končetin (stupeň 3b), částí pánve, os sacrum, levý humerus a radius (stupeň 4), nebo jsou rozrušeny lebka a klouby končetin (stupeň 4). Hroby byly zahlobeny do spráše nebo alkalické černozemě.

Na pohřebišti v pískovně u Lanžhota (DOSTÁL 1962) byly laténské hroby daleko hůře zachovány ve srovnání s hroby pozdně únětickými a slovanskými. Zdá se, že hůře jsou zachované kostry z jam, kde byly zjištěny zbytky rakve či dřevěné konstrukce (hroby laténské a část hrobů slovanských). Bohužel malý počet hrobů nedovoluje rozsáhlejší zobecnění.

Na pohřebišti na Levém Hradci byly raně středověké kostry dokonale zachovány, kostry ze 16. století byly rozpadlé na bílou sypkou hmotu, tvořenou převážně brushitem. Kostra kněze z 18. století v poměrně dobře zachované rakvi byla celá rozpadlá, horní část kostry byla rozložena více než dolní (NOVÁČEK 1940).

Brushit ovšem vzniká také na kostnicovém materiálu (SEKANINA 1935; SEKANINA 1937; KRUŽA 1948), a to i na zvířecích kostech, které byly k lidským pozůstatkům sekundárně přimíšeny (SEKANINA 1935). Všechny objekty, v nichž byl tento minerál zjištěn, byly chladné, nevětrané krypty s podlahou pod úrovní spodní vody.

Kyselé prostředí v hrobě může být v některých případech navozeno také uměle, například působením koncentrované kyseliny sírové („vetriol oleum“), používané občas k dezinfekci hrobek (MOLIN et al. 2002).

Kombinace heteroionické substituce a heteromorfní rekrystalizace

V případech středověkého a raně novověkého materiálu se mohou častěji vyskytnout dva případy:

Anaerobním rozkladem organických látek v uzavřených kovových rakvích vznikají organické kyseliny, které kromě transformace hydroxyapatitu na brushit (LACROIX 1897) mohou indukovat také rozpouštění kovu (zejména olova) ze stěn rakve. Ionty kovu, uvolněné ze stěn rakve, se zabudovávají do kostního minerálu a masivní substituce vápníku jinými ionty může někdy vést i ke změně krystalické struktury kosti. Celková záměna původních atomů jiným prvkem (prvky), při níž se zachovává tvar a forma původního vzorku, se nazývá pseudomorfní výměna (pseudomorphic replacement). Např. na kostrách z olovených rakví z Christ Church (Spitalfields, Lonýn), datovaných mezi polovinu 18. a polovinu 19. století, byl identifikován minerál *pyromorfit* $Pb_3(PO_4)Cl$ (MOLLESON et al. 1998). Olovo z rakví může také působit toxicky na mikroorganismy a tak významně zpomalit rozklad těla (VASS 2001).

V anaerobním a kyselém prostředí (např. podmáčené půdy, hluboká voda) a v přítomnosti zdroje železa (půda, železné předměty) může jako produkt rekrystalizace kostí vznikat minerál *vivianit* $Fe_3(PO_4)_2 \cdot 8 H_2O$. Je to původně bezbarvý a průsvitný minerál, který se následnou oxidací na vzduchu ($Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$) zbarvuje světle modře, případně až indigově. Kromě změny zbarvení prakticky nedochází k výrazným změnám v krystalické struktuře. Výskyt vivianitu byl pozorován na pleistocenních kostech (SEKANINA 1937) i na kosterním materiálu středověkém (KRUŤA 1946; PIEPENBRINK 1989) a forenzním (MANN et al. 1998).

Vivianit na lidských kostech byl zjištěn při výzkumu kostnice na hřbitově ve Starém Městě a při stavbě protiletceckých krytů na Masarykově a Mariánském náměstí v Uherském Hradišti. Zdrojem železa zde byly místní limonitické pískovce (KRUŤA 1946).

2.6. SILUETY/PSEUDOMORFY

Siluety/pseudomorfy („stíny“, „duchové“) jsou posledním vizuálně rozeznatelným stupněm rozkladu skeletu. Sestávají se ze směsi pozůstatků z vlastního pohřbu (zejména fosforu z kostí) a přídavné biofilní složky získané z okolní půdy, které se mohou vázat i na organické rozkladné produkty těla (BETHELL 1989). V siluetách byly zjišťovány tyto prvky a jejich poměry:

Fosfor. Je to hlavní složka kostního minerálu a nejlepší indikátor přítomnosti kostí: obsah fosforu v siluetě by měl být mnohem větší než v okolní půdě. Fosfor má tendenci se slučovat s kationty jako jsou železo a hliník nebo dokonce s půdními micelami, s rostoucí kyselostí půdy. Pravděpodobně je to proto, že se zvyšuje mobilita fosfátových iontů s klesajícím pH půdy. Fosfor se vymývá především v mírně kyselých půdách (pH 6–7), vymývání fosforu se s klesajícím pH snižuje. Retence fosforu je komplexní jev, zahrnující chemickou vazbu, iontovou výměnu a adsorpci.

Mangan. Mangan pochází z okolní půdy a hromadí se v siluetě během dekompozice (jeho obsah v siluetě je ve srovnání s koncentrací v kosti vyšší). Je odpovědný za tmavé zbarvení

skvrny zbylé po rozložení těla. Byla také pozorována korelace mezi obsahem fosforu a manganu.

Měď. Obecně lze sledovat vymývání mědi z kosti a poté její kumulaci v siluetě (vyšší koncentrace ve srovnání s okolní půdou). K indikaci přítomnosti silně degradovaných pohřbů v půdách s vysokým obsahem fosforu se osvědčil také poměr Zn/Cu (BEARD et al. 2000). Výrazně se projevuje vliv přítomnosti měděných a bronzových předmětů. Přítomnost významného zdroje mědi může způsobit i inhibici rozkladu.

Železo. Koncentrace železa není v siluetách výrazně zvýšena ani snížena. Pro jeho interakci s fosforem je patrně nutný významný zdroj železa, např. z hrobové výbavy.

2.7. TOTÁLNĚ ROZLOŽENÉ SKELETY

Totálně rozložené skelety lze indikovat stanovením fosfátů ve výplni hrobu nebo na úrovni dna. J. TUREK a A. MAJER (1999) a M. ERNÉE (2000) považují vysoký obsah fosforu a absenci kostí v hrobových jamách v alkalických půdách (půdy s vysokým obsahem uhličitanu a vysokými hodnotami pH) za doklad vyzvednutí a přemístění kosterních pozůstatků po rozkladu měkkých tkání. Nepřítomnost kostry a nízký obsah fosforu v alkalických půdách lze zase pokládat za doklad kenotafu. Přítomnost kostí v neanatomické poloze a nízký obsah fosforu ve výplni hrobové jámy indikují sekundární uložení kosterních pozůstatků, tj. již bez měkkých částí. V takovém případě je třeba sledovat i uspořádání těchto kostí v hrobové jámě, které může naznačovat např. přítomnost schránky z organického materiálu, v níž byly pozůstatky znovu pohřbeny. V souvislosti s fosfátovou analýzou je vhodné sledovat i obsah hliníku, manganu a železa (pro silně kyselé půdy), které vážou fosfor do obtížně rozpustných sloučenin a tím jej fixují v půdě (CROWTHER 2002). Jsou-li v hrobové jámě přítomny železné předměty, může být fosfor fixován i jejich korozními produkty (BARKER 1950). Výzkumy ukázaly, že s klesajícím pH půdy roste podíl přístupného fosforu (available phosphorus, easily exchangeable phosphate) a fosforu vázaného na hliník a železo (pokud jsou tyto prvky v půdě přítomny), podíl fosforu vázaného na vápník (včetně kostního minerálu) se s klesajícím pH zpočátku snižuje pomalu, asi od pH 4,5 nastává prudký pokles (TYLER 2002). Frakcionace fosforu bývá v archeologii využívána při výzkumu sídlišť (např. EIDT 1977; LEONARDI et al. 1999), pokusy o aplikaci na výzkumy nekropolí jsou dosud pouze ojedinělé (FARSWAN–NAUTIYAL 1997).

K detekci totálně rozložených kosterních pozůstatků v hrobových jamách je možné přímo v terénu aplikovat semikvantitativní murexidový test, využívající barevné reakce roztoku murexidu s *vápníkem*, uvolněným do půdy během rozkladu skeletu (ROTTLÄNDER 1970). Tento test nelze samozřejmě použít v případech půd s vyšším obsahem vápníku.