Skupnost
muzejev
Slovenije

NARAVNI KAMEN 2.5

Avtorici: Sabina Kramar in Breda Mirtič

Vsebina

1. Uvod
2. Klasifikacija kamnin
3. Lastnosti naravnega kamna
4. Tehnologija obdelave
5. Propadanje naravnega kamna
6. Oblike propadanja
7. Zaključek
8. Literatura

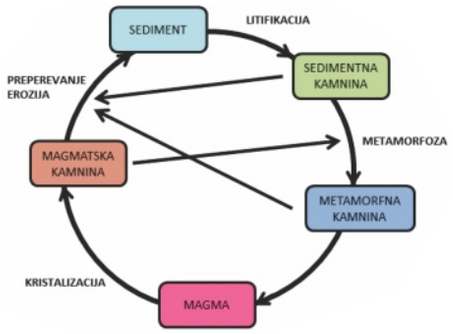
1. Uvod

Naravni kamen je ena prvih surovin, ki jo je človek uporabil za različne namene. Iz njega je že v starejši in mlajši kameni dobi najprej izdelal različno kamnito orodje, napisne kamne in nagrobnike pa štejemo med najstarejše spomenike. Kasneje so ga uporabljali predvsem za gradnjo. V začetku 20. stoletja se je po odkritju portlandskega cementa pomen naravnega kamna začel manjšati, vendar se danes spet uveljavlja.

Arhitekt, kamnosek ali umetnik izbere kamen, ki ga želi uporabiti pri izdelavi svojega objekta, glede na njegove estetske (dekorativne) značilnosti ter mehansko uporabnost in obstojnost na mestu, na katerem naj bi čim dalj služil svojemu namenu. Izbira kamnine je ne nazadnje odvisna tudi od njene ekonomske dostopnosti, predvsem v preteklosti pa je bila pogosto omejena predvsem na dostopnost oz. pojavljanje v nekem kraju. Vrstni red naštetih izločitvenih dejavnikov se morda od primera do primera spreminja, na vsak način pa je treba poznati lastnosti kamnine, ki jo želimo uporabiti, da bo objekt na koncu kar najbolj izpolnil vse naštete zahteve. Lastnosti kamnin, predstavljene v nadaljevanju, vplivajo na vrsto in moč propadanja v okolju, ki so mu izpostavljene. Če jih poznamo, lahko na poškodovanem kamnitem objektu že predvidimo, zakaj in kako je začel propadati. Poznavanje lastnosti kamnine nam v nadaljevanju pri konservatorsko-restavratorskih posegih in kasnejši zaščiti kamnitega objekta pomaga optimizirati nadaljnje posege.

2. Klasifikacija kamnin

Po nastanku ločimo kamnine na tri skupine, na sedimentne, magmatske in metamorfne. Kot je razvidno iz kamninskega kroga, lahko vsaka kamnina nastane zaradi spreminjanja druge kamnine, če je ta zaradi delovanja različnih sil vržena iz ravnovesja z okoljem, v katerem je nastala (**skica 1**). Kamninski krog se lahko ponovi, vendar ni nujno, da gredo vse kamnine skozi vse stopnje v ciklu. Sedimentna kamnina na površini Zemlje prepereva in tako tvori material za nove sedimente.



Skica 1: *Kamninski krog – shematski prikaz nastanka kamnin*

Sedimentne kamnine

Sedimentne kamnine nastajajo zaradi fizikalnih, kemičnih in bioloških procesov, ki potekajo na Zemljinem površju. Glede na to, kakšna skupina procesov prevladuje med nastajanjem teh kamnin, jih delimo v klastične, biokemične, kemične (**tabela 1**). Na Zemljinem površju je okoli 70 % kamnin sedimentnega nastanka.

Tabela 1: *Klasifikacija sedimentnih kamnin*

SEDIMENTNE KAMNINE					
MEHANSKE ali KLASTIČNE					**KEMIČNE in BIOKEMIČNE**
sediment	GRUŠČ, PROD	PESEK	MELJ	GLINA	
velikost zrn	2 mm		0,063 mm	0,002 mm	
sedimentna kamnina	**BREČA**	**PEŠČENJAK**	**MELJEVEC**	**GLINAVEC**	**APNENEC**
	KONGLOMERAT		**MULJEVEC**		**DOLOMIT**
			LAPOROVEC		**KREDA**
					LEHNJAK
					ROŽENEC

Mehanske ali klastične sedimentne kamnine so sestavljene iz preperelih zrn starejših kamnin, ki izvirajo daleč od mesta usedanja in so produkt daljšega transporta. Delimo jih izključno na osnovi velikosti sedimentiranih zrn. Klastične sedimentne kamnine so v glavnem terigenega nastanka, kar pomeni, da so bila zrna na mesto nastajanja kamnine prinesena od drugod.

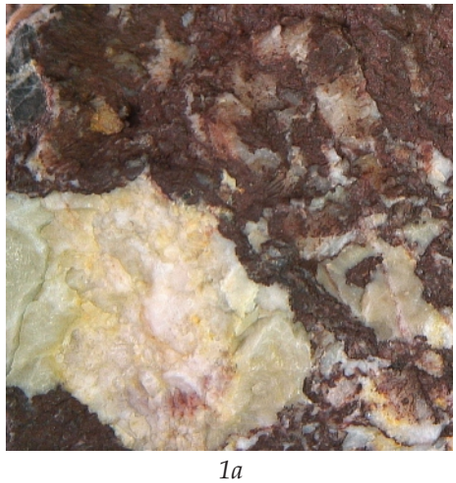
Tabela 2: *Klasifikacija piroklastičnih kamnin*

PIROKLASTIČNE KAMNINE		
nevezani material	VULKANSKE BOMBE	VULKANSKI PEPEL
velikost zrn	2 mm	
kamnina	TUFSKA BREČA TUFSKI KONGLOMERAT	TUF

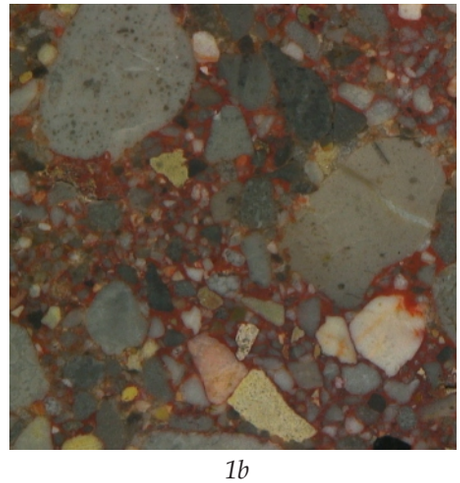
Biokemične in kemične sedimentne kamnine so kamnine, ki so nastale blizu mesta akumulacije (usedanja). Večina materiala je biogenega izvora. Biokemične sedimentne kamnine delimo na osnovi bistvenega minerala, ki sestavlja posamezno kamnino (npr. kalcit, dolomit, kremenica). Biokemične in kemične kamnine nastajajo v glavnem v zaprtih sedimentacijskih bazenih, kot so jezera, morja in oceani. Med klastične kamnine sodijo breče (**slika 1a**), konglomerati (**slika 1b**), peščenjaki (**slika 1c**) ter skrilavi glinavci. Biokemične sedimentne kamnine vključujejo apnence (**slike 1d–1f**) in lehnjake (**slika 1g**), med kemične sedimentne kamnine pa spada npr. kalcitna siga.

Piroklastične kamnine so po izvoru magmatske, po nastanku pa sedimentne. Nastanejo ob vulkanskih izbruhih. Glede na velikost zrn jih delimo na tufsko brečo, tufski konglomerat in tuf (**slika 1h; tabela 2**).

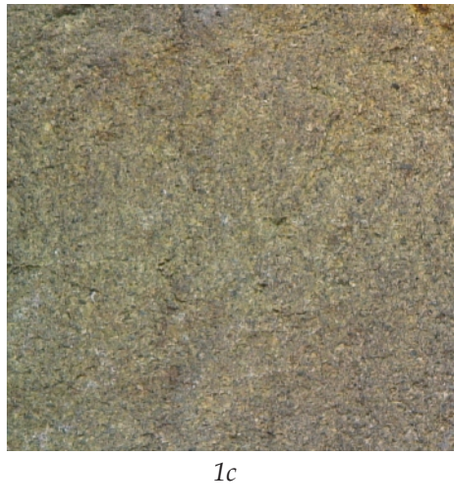
Slika 1: *Vrste sedimentnih kamnin: (a) breča, (b) konglomerat, (c) peščenjak, (d) hotaveljski apnenec, (e) apnenec z Drenovega Griča, (f) podpeški apnenec, (g) lehnjak, (h) tuf*



1a

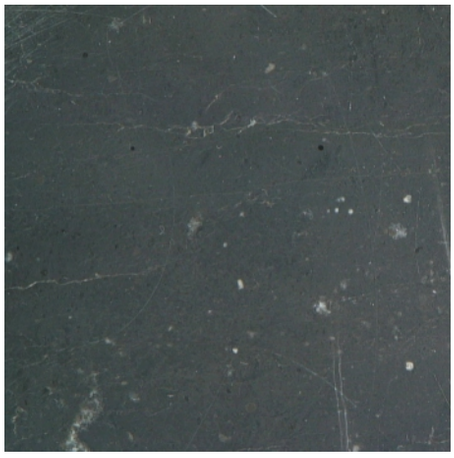


1b

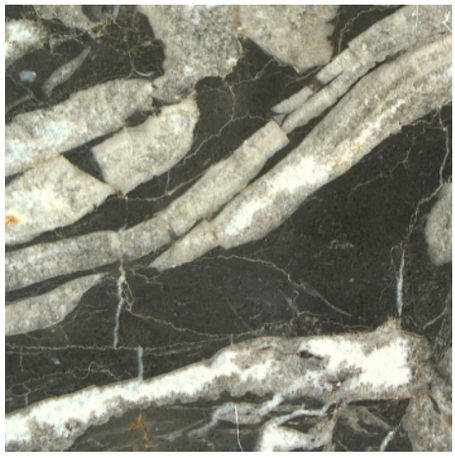


1c

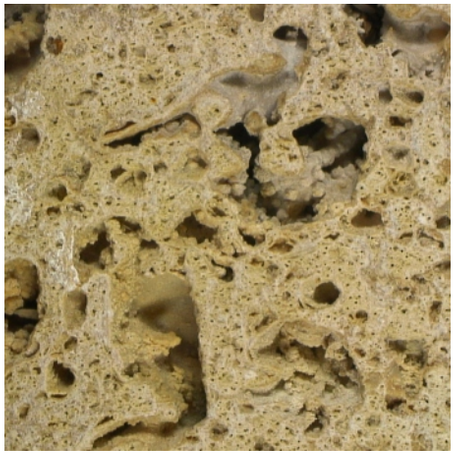
1d



1e



1f



1g

1h

Med vsemi skupinami kamnin so sedimentne kamnine v Sloveniji daleč najbolj razširjene, saj pokrivajo skoraj 90 % površine. V vzhodni in osrednji Sloveniji prevladujejo drobnozrnate klastične sedimentne kamnine (razni peščenjaki, laporovci in muljevci). Biokemične kamnine so količinsko podrejene. Zahodna Slovenija je v glavnem zgrajena iz karbonatnih kamnin (apnencev in dolomitov), na območju Istre in Goriške pa prevladujejo flišne kamnine. Karbonatne kamnine zavzemajo skoraj polovico ozemlja Slovenije, samo apnenci okoli 35 %. Zaradi velike dostopnosti se pogosto uporabljajo tudi kot gradbeni material. Tuf najdemo v okolici Peračice in Smrekovca.

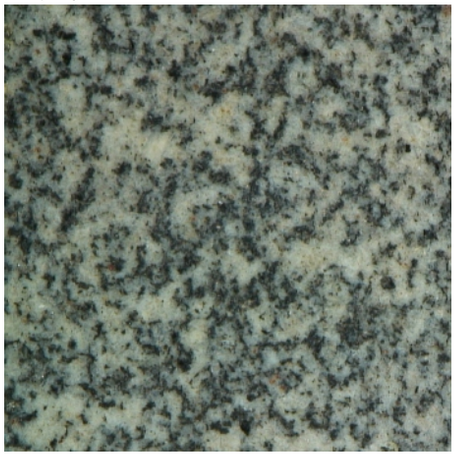
Magmatske kamnine

Magmatske kamnine nastajajo iz magme, ki se na poti proti površini Zemlje hladi in kristalizira. Glede na način nastanka ločimo ***globočnine***, ki kristalizirajo globoko v Zemljini notranjosti, ter ***predornine***, ki kristalizirajo blizu Zemljinega površja ali na njem (**tabela 3**). Glede na mineralno sestavo delimo magmatske kamnine na granitsko, sienitsko, granodioritsko, gabrsko, dioritsko in peridotitsko skupino. **Granit** je magmatska kamnina, ki jo sestavljajo kremen, kisli glinenci in plagioklazi. Preostale magmatske kamnine imajo zelo drugačno mineralno in kemično sestavo, kar določa tudi njihove lastnosti, ki so prav tako zelo drugačne od lastnosti pravega granita, zato teh kamnin ne smemo poimenovati granit. V Sloveniji so magmatske kamnine razširjene na Pohorju, v Karavankah in v ozkem pasu osrednje Slovenije od Idrije, severno od Ljubljane, proti Celju, na Kozjanskem in Bohorju ter v okolici Grada na Goričkem. **Granodiorit** (**slika 2a**) s Pohorja je magmatska kamnina globočnina, ki pripada granodioritski skupini. Predornina granodioritske skupine se imenuje dacit. Čizlakit s Pohorja je magmatska kamnina, ki pripada gabrski skupini (**slika 2b**). Keratofir (**slika 2c**) in porfir (**slika 2d**) spadata v sienitsko skupino magmatskih kamnin predornin.

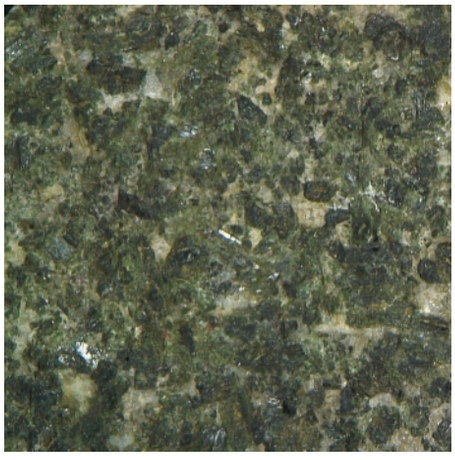
Tabela 3: *Klasifikacija magmatskih kamnin*

Glede na način nastanka Glede na mineralno sestavo	**GLOBOČNINE**	**PREDORNINE**	**ŽILNINE**
GRANITSKA SKUPINA kremen, kalijevi glinenci, kisli plagioklazi	GRANIT	RIOLIT KREMENOV PORFIR KREMENOV KERATOFIR OBSIDIJAN PLOVEC	GRANITPORFIR PEGMATIT APLIT
SIENITSKA SKUPINA kalijevi glinenci, kisli plagioklazi	SIENIT	TRAHIT PORFIR KERATOFIR	
GRANODIORITSKA SKUPINA kremen, srednji plagioklazi, kalijevi glinenci	GRANODIORIT	DACIT	
DIORITSKA SKUPINA srednji plagioklazi	DIORIT TONALIT	ANDEZIT	
GABRSKA SKUPINA bazični plagioklazi	GABRO ČIZLAKIT	BAZALT DIABAZ	
PERIDOTITSKA SKUPINA pirokseni, amfiboli, olivin	PERIDOTIT		

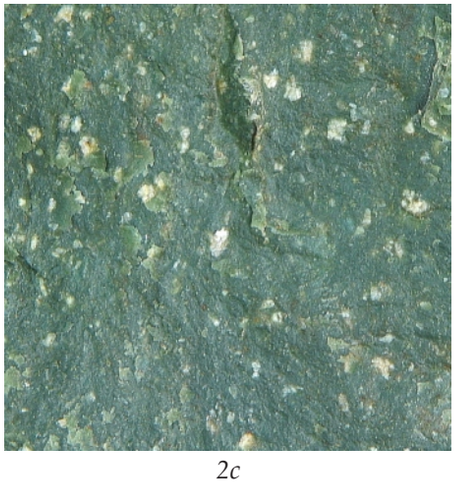
Slika 2: *Vrste magmatskih kamnin: (a) granodiorit, (b) čizlakit, (c) keratofir, (d) porfir*



2a



2b



2c

2d

Metamorfne kamnine

Metamorfne kamnine nastanejo z metamorfozo magmatskih, sedimentnih ali že obstoječih metamorfnih kamnin. Proces metamorfoze obsega številne fizikalno-kemične spremembe že obstoječih kamnin; te spremembe so posledica povišane temperature in tlaka, prisotnosti vode in drugih tekočin ter plinov. Pri tem prvotne kamnine z nastajanjem novih struktur in novih mineralov delno ali popolnoma rekristalizirajo. Metamorfne kamnine ločimo glede na strukturo v ***masivne*** in ***skrilave*** (**tabela 4**).

Skrilave kamnine so tiste, ki so nastale zaradi usmerjenih pritiskov in imajo jasno izraženo skrilavost (**slike 3a–3c**). Skrilave metamorfne kamnine delimo po mineralni sestavi in stopnji kristaliničnosti. Masivne so tiste, ki nimajo izražene skrilavosti (**sliki 3d, 3e**). Masivne metamorfne kamnine delimo glede na bistvene minerale. **Marmor** je metamorfna kamnina, sestavljena večinoma iz minerala kalcita ali dolomita (**slika 3d**). Apnenec je sedimentna kamnina in je ne smemo imenovati marmor; vanj preide šele s procesom metamorfoze. V Sloveniji najdemo metamorfne kamnine v severnem in severovzhodnem delu, na Koroškem in na Pohorju.

Tabela 4*: Klasifikacija metamorfnih kamnin*

METAMORFNE KAMNINE		
SKRILAVE	**MASIVNE**	
SKRILAVEC	MARMOR	AMFIBOLIT
FILIT	KVARCIT	EKLOGIT
BLESTNIK		SERPENTINIT
GNAJS		

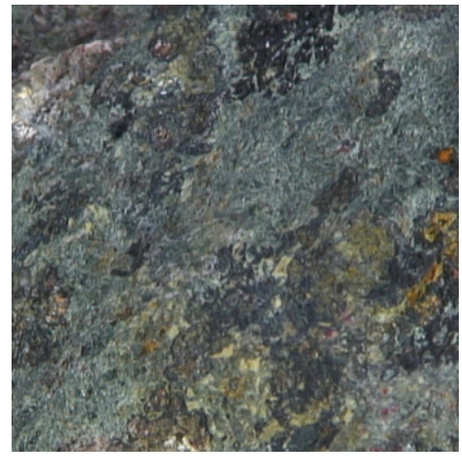
Slika 3: *Vrste metamorfnih kamnin: (a) skrilavec, (b) blestnik, (c) gnajs, (d) marmor, (e) eklogit*

3a

3b

3 c

3d



3e

3. Lastnosti naravnega kamna

Petrografske lastnosti

Vsako kamnino v splošnem sestavljajo zrna, vezivo in prazen prostor med njimi – pore. Količina, vrsta in razmerje med njimi se spreminjajo glede na vrsto kamnine. Preperevanje kamnine poteka pri različnih vrstah kamnin različno hitro in se odraža na različne načine. Odvisno je od lastnosti posamezne kamnine in od zunanjih dejavnikov.

Kamnino sestavljajo različni minerali. **Mineral** je anorganska homogena snov, ki ima definirano kemično sestavo in strukturo. Najpogostejši kamninotvorni minerali so glinenci, kremen, sljude, amfiboli, pirokseni, olivin, kalcit, dolomit, kaolinit in illit ter železovi minerali (hematit, magnetit, goethit). Obstojnost kamnine v okolju, ki mu je izpostavljena, pogojuje tudi njena mineralna sestava. Stopnja spremembe kamnine je odvisna od obstojnosti mineralov v aktualnih razmerah, od homogenosti mineralne sestave in specifične površine izpostavljene kamnine (Amoroso in Fassina, 1983).

Strukturo kamnine določajo velikost, oblika, usmerjenost, zgoščenost in način povezovanja sestavin kamnine (zrna, veziva, pore). Poznamo take, v katerih so mineralna zrna povezana med sabo z vezivom (peščenjaki) ali pa med njimi obstaja direktna vez (marmor). Za magmatske kamnine globočnine je npr. značilna zrnata struktura, za predornine pa porfirska (veliki kristali v drobnozrnati ali steklasti osnovi). Manj ko je praznega prostora med zrni, večja je kontaktna površina in bolj trdna je kamnina. Moč vezi je torej odvisna od velikosti kontaktne površine med sestavnimi delci kamnine.

Teksturo kamnine predstavljajo vse značilnosti v njeni zgradbi, pogojene z medsebojnimi odnosi, prostorsko razporeditvijo in usmerjenostjo posameznih sestavin. Ločimo homogeno teksturo, za katero je značilna enakomerna razporeditev mineralnih zrn in pornega prostora v kamnini, in usmerjeno teksturo, pri kateri so mineralna zrna in morebitne pore razporejene v določeni smeri. Tako lahko v magmatskih kamninah opazujemo teksture tečenja, pri sedimentnih plastnatost in postopno zrnavost, pri metamorfnih pa npr. masivno teksturo.

Teksturne značilnost kamnine vplivajo na njene mehanske lastnosti. Kamnine z usmerjeno teksturo imajo zato anizotropne fizikalno-mehanske lastnosti, npr. tlačno trdnost, kar pomeni, da se njihove lastnosti spreminjajo glede na smer v kamnini.

Razpokanost kamnine je posledica napetosti, ki jim je bila izpostavljena v času diageneze (v procesu nastanka kamnine) ter kasnejših tektonskih deformacij. Te mehanske diskontinuitete predstavljajo prelome in razpoke, ki so lahko odprte, zaprte ali zapolnjene (Bland in Rolls, 1998). Razpoke, ki so bile kasneje zapolnjene z novonastalimi minerali, se imenujejo žile (**slika 4a**).

Stilolitski šivi (**slika 4b**) nastajajo zaradi usmerjenih pritiskov. Pri tem se kamnina neenakomerno raztaplja, stilolitski šivi pa se zapolnijo z netopnimi ostanki. Razpokanost vpliva na mehanske lastnosti kamnine in na njeno obstojnost v okolju.

Slika 4: *(a) Žilice v apnencu. (b) Primer stilolitskih šivov v apnencu.*

4a

4b

Fizikalne lastnosti

Med fizikalne lastnosti kamnin spadajo vse merljive količine, ki posredno in neposredno vplivajo na obstojnost kamnine v okolju, ki mu je izpostavljena, prav tako pa z njimi določamo njeno uporabno vrednost v določenem okolju. Kvantitativna sprememba teh lastnosti odraža stanje kamnine zaradi vplivov okolja.

O **barvi** kamnine govorimo takrat, ko jo obsevamo z vidno svetlobo. Barva je njena značilnost in vpliva na njeno atraktivnost. Kamnino značilno obarva njen vodilni mineral, to je tisti, ki ga je največ. Razlikujemo enobarvne in večbarvne kamnine, pa kamnine z enakomerno obarvanostjo in tiste, pri katerih so različno velike površine različno obarvane – gre za neenakomerno obarvanost. Obarvanost kamnine je torej odvisna od njene mineralne sestave, na barvo minerala pa vpliva njegova kemična sestava. Obarvani so tisti minerali, ki vsebujejo barvajoče prvine (prvine prehoda v periodnem sistemu, npr. železo, baker, krom). S preperevanjem se obarvanost kamnine začne spreminjati, kar se lahko dogaja zaradi raztapljanja barvajočega minerala, s tem pa se mesto obarvanja v kamnini spreminja (**slika 5a**). Zaradi preperevanja se povečuje tudi poroznost kamnine, zaradi česar izgublja intenziteto barve (**slika 5b**).

Slika 5: *(a) Sprememba barve zaradi oksidacije železovih mineralov na površini kremenovega peščenjaka. (b) Izguba intenzitete črne barve apnenca zaradi povečanja poroznosti kamnine.*

5a

5b

Gostota kamnine je neposredno odvisna od njene mineralne sestave in poroznosti. Gostota namreč pove, kakšen je odnos med maso in volumnom danega vzorca kamnine. Kamnine z zaprto poroznostjo imajo manjšo gostoto, kot bi jo glede na mineralno sestavo teoretično morale imeti. Na gostoto torej vpliva tudi poroznost kamnine. Gostota karbonatne kamnine je odvisna od stopnje diageneze, posredno pa kaže tudi na tlačno trdnost, saj ima gostejša in manj porozna kamnina večjo tlačno trdnost.

Poroznost materiala je definirana kot razmerje med porami in celotnim volumnom poroznega materiala. Vrednosti se ponavadi gibljejo med 10 in 20 %, čeprav je poroznost lahko manjša od 1 % ali večja od 40 % (**tabela 5**).

Tabela 5: *Razdelitev kamnin glede na poroznost*

KATEGORIJA	POROZNOST (%)
kompaktna	< 1
malo porozna	1–2,5
srednje porozna	2,5–5
zmerno porozna	5–10
zelo porozna	10–20
izredno porozna	> 20

Na podlagi poznavanja parametrov poroznosti (količina, oblika, velikost, porazdelitev in povezanost por) lahko ocenimo vsebnost in gibanje vlage in soli v kamnini, ki sta med glavnimi povzročitelji propadanja. Genetsko poroznost delimo na primarno, ki je nastala med diagenezo, in sekundarno, ki je nastala pri kasnejših geoloških procesih, kot so preperevanje in

tektonske deformacije. Glede na medsebojno povezanost por ločimo odprto poroznost, pri kateri so pore med seboj povezane, in zaprto poroznost, pri kateri pore med seboj niso povezane. V pore z odprto poroznostjo vstopa voda med vpijanjem pri atmosferskih razmerah. Pore z zaprto poroznostjo ostanejo zapolnjene z zrakom. Poroznost kamnine se lahko spremeni zaradi obdelave in pri procesih preperevanja, ko nastajajo pritiski na okolna zrna. Pritiski nastanejo zaradi raztezanja mineralov pri temperaturnem nihanju, kristalizacije sekundarnih mineralov, ki rahljajo medzrnske vezi, ter raztapljanja mineralov.

Trdoto kamnine določa njena odpornost proti delovanju mehanske sile. Odvisna je od strukture in velikosti zrn mineralov ter od moči vezi med minerali, ki kamnino sestavljajo. Trdoto podajamo kot relativno po Mohsu ali kot absolutno, ki jo merimo s sklerometri (npr. Vickersova, Knoppova, Brinellova trdota), poznamo pa tudi trdoto glede na obrabo pri brušenju s prahovi znane trdote (Rosiwalova trdota).

Vsebnost vode v kamninah

Vse kamnine na Zemljini površini vsebujejo določeno količino vode, načini zadrževanja te tekočine v njih pa so različni. ***Kemijsko vezana voda*** je voda, ki jo posamezni kamninotvorni minerali vsebujejo v svoji strukturi. Pri tem ločimo dva tipa. Prvi tip je *kristalizacijsko vezana voda.* V strukturi kristala je voda v obliki nevtralne molekule, pri ogrevanju pa izpari v ozkem temperaturnem intervalu. Struktura minerala se pri tem popolnoma spremeni (npr. sadra). *Voda, vezana v zeolitih*, ki izpareva v širokem temperaturnem intervalu ogrevanja, je značilna prav za minerale skupine zeolitov. Pri tem se struktura minerala ne spremeni. V stiku z vodo jo zeolit lahko ponovno veže v svojo strukturo. Drugi tip kemijsko vezane vode je *koordinacijsko vezana voda* (v strukturi kristala vodnega minerala OH– zaseda anionska mesta, npr. v kaolinitu). ***Fizikalno vezana voda*** je vezana na površini mineralnih delcev kamnine – to je adsorbirana in absorbirana voda. ***Prosto vodo*** vsebuje kamnina v obliki kapilarne ali gravitacijske vode.

Naravna vlažnost. Vsaka kamnina pred pridobivanjem v naravi vsebuje določeno količino vlage, ki zapolnjuje pore. V odvisnosti od vrste kamnine in njene poroznosti lahko masni delež naravne vlage doseže vrednosti preko 20 %. Po pridobivanju kamnine se vsebnost naravne vlage s časom praviloma manjša. Pri tem se npr. spremeni barva (kamnina postaja vse svetlejša). Pri karbonatnih kamninah se hkrati s sušenjem na površini kamnine odlaga bolj ali manj tanka plast sekundarnega kalcita. S sušenjem se spremenijo tudi mehanske lastnosti kamnine (spremeni se njena sposobnost za obdelavo). Pri nekaterih kamninah spremlja sušenje postopna dezintegracija kamnine po plasteh.

Sposobnost vpijanja vode. Vpijanje vode je sposobnost kamnine, da če je potopljena v vodo, sprejme v svoje pore določeno količino vode in jo v njih tudi obdrži. To je pojav, ki ga poznamo z imenom absorpcija in adsorpcija vode. Količina in hitrost vpijanja vode sta odvisni od količine pornega prostora in oblike por. Toda podatek o poroznosti še ne pove, koliko vode bo kamnina vpila.

Kapilarno vpijanje vode. Kapilarnost je lastnost materiala, da absorbira tekočine v porah s kapilarnim dvigom. Pogojujeta jo poroznost in porazdelitev velikosti por. Pore, katerih premer ne preseže 1 mm, imajo sposobnost vpijanja in zadrževanja vode zaradi kapilarnih sil. Večje pore te lastnosti nimajo. Kapilarni dvig je omejen na kapilarne pore, katerih premer je večji od 0,01 μm in manjši od 1 mm. V porah s premerom, večjim od 1 mm, voda potuje gravitacijsko (vode pore ne zadržujejo), medtem ko je v porah s premerom < 0,2 μm voda vezana na površino mineralnih delcev z molekulskimi in elektrostatičnimi silami. Kamnina, ki ima več manjših por, bo vodo vpila hitreje kot kamnina z enako poroznostjo, toda večjimi porami.

Raztezanje zaradi vpijanja vode je sprememba volumna materiala, ki nastane zaradi ogrevanja in ohlajanja kamnine ali močenja z vodo. To naj bi bil odločujoči parameter pri razumevanju načina obnašanja kamnine. Raztezanje je odvisno od strukture in mineralne sestave kamnine. Povzročata ga dva neodvisna dejavnika, in sicer nabrekanje glinenih mineralov in kapilarne sile med mineralnimi zrni. Je sorazmerno s stopnjo nasičenja v kamnini.

Vodoprepustnost. S tem pojmom razumemo lastnost kamnine, da je sposobna prepuščati vodo. Kamen je prepusten za vodo, ko ima dovolj velike pore in so te med seboj povezane.

Paroprepustnost. Ločimo dva tipa gibanja plinov skozi trdne snovi: efuzijo, ki pomeni gibanje plinov skozi porni prostor trdne snovi, ter difuzijo, ki pomeni gibanje plinov skozi trdno snov (mineralno substanco). Plini se lahko skozi kapilare gibajo z efuzijo le pri povišanem tlaku. Za kamnine je značilno difuzno gibanje vodne pare, ki je prisotna v atmosferi. Kamnine lahko glede na poroznost prepuščajo manjšo ali večjo količino vodne pare.

Termične lastnosti

Toplotna prevodnost je zmožnost prevajanja toplote skozi telo kamnine. Odvisna je od toplotne prevodnosti mineralov, ki kamnino sestavljajo, od velikosti mineralnih zrn in njihove usmerjenosti v kamnini, od poroznosti, velikosti in povezanosti por ter od količine vlage v kamnini. Toplotna prevodnost je torej anizotropna lastnost kamnine. Bolj ko je kamnina drobnozrnata, manj je toplotno prevodna. Kamnine so v splošnem slabi prevodniki toplote, vendar vseeno nekaj boljši od drugih pogostih gradbenih materialov (beton, gradbena keramika). Bolj ko je kamnina toplotno prevodna, hladnejša je na otip, zato se na njeni površini lahko kondenzira atmosferska vlaga.

Toplotni raztezek. Kamnine so združbe različnih mineralov, ki so različno obarvani, zato tudi različno hitro in močno absorbirajo toploto ter se različno raztezajo. Spremembo dimenzije kamnine v odvisnosti od spremembe temperature podajamo kot koeficient toplotnega širjenja in je značilnost kamnine oz. mineralov, ki jo sestavljajo. Na velikost toplotnega raztezka poleg mineralne sestave vplivata še poroznost kamnine in velikost mineralnih zrn. Bolj ko je kamnina drobnozrnata, manjši raztezek ima. Kot vsa trdna telesa se tudi naravni kamen širi z naraščanjem temperature.

Specifična toplota. Dovajanje toplote nekemu telesu povzroči povišanje temperature. Za določen temperaturni gradient pri neki masi je treba dovesti različne količine toplote. Specifična toplota je količina toplote, ki je potrebna, da se enota mase ogreje za 1 stopinjo (J/kg °C). Z nižanjem gostote materiala se specifična toplota povišuje. Vlažnost kamnin povečuje specifično toploto. Najvišja je, ko je kamnina zasičena z vodo.

Mehanske lastnosti

Mehanske lastnosti kamnine se odražajo kot posledice, vidne na kamnini, ko nanjo delujemo s silo. S kvantitativnim vrednotenjem teh lastnosti določamo uporabno vrednost posamezne kamnine oz. ugotavljamo, v kakšen namen, kje in kako jo lahko uporabimo. Tako je npr. gosta in malo porozna kamnina, ki ima večjo trdnost, uporabna kot nosilni gradbeni element, medtem ko ima porozna, manj gosta kamnina tudi manjšo trdnost, je pa zato boljši toplotni in zvočni izolacijski gradbeni element, praviloma pa se ga tudi laže obdeluje. Med merjenimi mehanskimi lastnostmi, katerih merjenje je predvideno tudi s standardi, so najpomembnejše napetost, deformacija in trdnost.

Napetost in deformacija. Napetost v kamnini nastane kot posledica delovanja sile nanjo. To je vektorska količina, odvisna pa je od vrste in moči vezi med delci v kamnini, od zunanje oblike kamna in moči zunanjih sil. Napetost lahko povzroči deformacijo, zaradi katere kamnina na koncu razpade ali pa tudi ne. V drugem primeru govorimo o elastični deformaciji. Merimo jo z modulom elastičnosti kamnine – Joungov modul elastičnosti.

Trdnost kamnine je lastnost, ki jo merimo kot silo, pri kateri kamnino prelomimo. Na trdnost vplivajo mineralna sestava, moč vezi med delci v kamnini, poroznost, velikost zrn, ki jo sestavljajo, vlaga v njej, njene teksturne značilnosti, npr. plastnatost, ter prisotnost razpok, zaradi česar je trdnost kamnine odvisna od določene smeri v njej. Trdnost kamnine je lahko tlačna ali upogibna.

4. Tehnologija obdelave

Pridobivanje kamna

Naravni kamen je kamnina, ki se uporablja v nespremenjeni, z obdelavo le poudarjeni obliki. Naravnega kamna ne predelujemo, pač pa ga le obdelujemo.

Naravni kamen pridobivamo v naravi v kamnolomu. Kamnolom odpremo v nahajališču naravnega kamna, tam, kjer so za to primerne geološka zgradba, sestava, lega, zaloge ter tehnična kakovost kamnine. Uporabno vrednost naravnega kamna opredeljujejo štiri vrste meril: geološka, tehnološka gospodarska, tehnična in estetska. Z njihovo pomočjo razvrščamo in vrednotimo nahajališča naravnega kamna (Mirtič idr., 1999). Kamnina je v nahajališču heterogena (barva, zrnatost, poroznost, razpokanost), kar omejuje velikost blokov, ki jih lahko pridobimo. Merila pa določajo tudi izkoristek nahajališča. Videz, fizikalne in kemijske lastnosti ter petrografske značilnosti vplivajo na uporabno vrednost kamnine. Kamnolom je praviloma obremenitev za okolje, zato je takrat, ko ga odpiramo, poleg naštetih dejavnikov treba upoštevati tudi njegove vplive na okolje. Kamnolome delimo glede na zaloge kamnine z enakomernimi (stalnimi) fizikalnimi in petrografskimi lastnostmi na velike, v katerih pridobivajo več kot 1200 m^3 kamnitih blokov na leto, srednje, v katerih pridobijo med 400 in 1200 m^3 kamnitih blokov na leto, in majhne, v katerih pridobijo manj kot 400 m^3 blokov letno.

Danes v slovenskih kamnolomih pridobivajo apnenec v Lipici, Dolinah, Povirju, Hotavljah in na Lesnem Brdu. Na Jezerskem je kamnolom lehnjaka. Peščenjak pridobivajo v kamnolomih Jelarji in Poljane - Puče, trši kamnini granodiorit in gabro pa v Cezlaku.

V preteklosti so Slovenci pridobivali naravni kamen v neposredni bližini mesta, kjer so ga potrebovali, zato je bilo po Sloveniji raztresenih veliko majhnih priložnostnih kamnolomov. V kamnitih objektih ali delih objektov ter spomenikih lahko prepoznamo nekaj sto različnih vrst ali različkov naravnega kamna iz slovenskega prostora (Ramovš, 1995; Ramovš, 2000; Ramovš, 2002; Ramovš, 2005; Ramovš, 2008). Mnogi kamnolomi so sedaj opuščeni ali zaščiteni kot naravna dediščina.

Pri konservatorsko-restavratorskem posegu na kamnitem spomeniku je ena prvih zahtev obnoviti spomenik s kamnom enakih lastnosti (iz istega nahajališča), zato morajo restavratorji v plan obnove takega spomenika vključiti tudi dovoljenje za začasno pridobivanje potrebnih količin kamna (iz kamnoloma), ki ga sicer ne pridobivajo več. Kot primer lahko navedemo obnovo kamnitih delov na domačiji v Sedovcu in objektov križevega pota v Šmarju pri Jelšah. Za kamnite dele na vseh objektih je bil uporabljen peščeni apnenec iz neposredne bližine kmetije na Sedovcu. Kamnolom je bil ponovno odprt, da so lahko pridobili potrebne količine avtohtonega kamna za obnovo kamnitih delov na naštetih objektih.

Pridobivanje naravnega kamna pomeni ločevanje monolitnih blokov od kamnite stene in nato zvračanje na etažo. Mehkejše kamnine (npr. apnenec) režejo oz. žagajo z diamantnimi žičnimi žagami. Trše kamnine, kot je npr. granit, pa vrtajo vzdolž odlomne ploskve. Dobljeni blok homogene kamnine nato razkosajo v bloke standardnih (predpisanih) velikosti.

Ločimo tri načine pridobivanja naravnega kamna:

– na klasičen način pridobivajo bloke v etažah na površini eksploatacijskega prostora,
– podzemno pridobivanje poteka v podzemnih prostorih, zato ni degradacije ozemlja na površini,
– pri t. i. sanacijskem pridobivanju pa takoj za odvzemom kamnine sledi zasipavanje nastale jame, da preprečijo dalj časa trajajočo degradacijo okolja.

Obdelava kamna

Z izrazom obdelava površine kamna razumemo vrsto različnih postopkov, s katerimi dosežemo želeni videz površine in lahko tudi spremenjeno obstojnost kamnine na vplive okolja. Način obdelave površine najbolj vpliva na spremembo barve kamnine, kar arhitekti s pridom izkoriščajo. Restavratorji pa prav z obdelavo površine poskušajo doseči enak učinek, kot ga ima kamnina, ki jo restavrirajo.

Bolj ko je površina kamnine gladka, intenzivnejša je njena barva. Gladka površina pomeni tudi manjšo stično površino z okoljskimi (atmosferskimi) vplivi, kar posledično povečuje obstojnost kamnine. Toda pri bolj gladki površini so lahko izrazitejše tudi napake oz. značilnosti v kamnini, ki bi jih sicer želeli skriti.

Tehnologija obdelave naravnega kamna se začne z izkopavanjem in rezanjem kamnitih gmot v kamnolomu. Nato se kamniti bloki razrežejo na tanjše plošče, ki pa se v specifičnih kamnoseških obratih obdelajo v končni izdelek: kamniti tlak, ploščice iz naravnega kamna, stopnice, okenske police, nagrobni spomeniki ...

Površina kamna ima lahko naravni videz, ki nastane brez strojne obdelave. Govorimo o naravni in prelomni površini. Oblika površine (hrapavost) je odvisna od načina njenega nastanka, ki je pogojen s strukturo in teksturo kamnine. Površino kamnine lahko obdelamo tudi strojno, pri čemer lahko uporabljamo različne vrste orodja in različne postopke. Glede na način nastanka in obdelave površine kamna razlikujemo naslednje vrste površin:

– ravna naravna površina, ki jo dobimo že v kamnolomu, ko blok ločimo od kamnite stene;
– ravna površina, ki nastane, ko kamnino lomimo – prelomna površina;
– ravna površina, ki nastane pri rezanju in žaganju kamnine;
– površina, ki jo dobimo, ko jo obdelujemo z različnimi vrstami ostrorobega orodja; hrapavost je odvisna od oblike uporabljenega orodja; sem spada tudi obdelava površine s curkom peska – peskanje;
– površina, ki jo dobimo z brušenjem (bolj hrapava površina) in poliranjem (bolj gladka površina);
– toplotno obdelana površina.

Kamen danes obdelujemo s sodobno tehnologijo, kot so stroji za brušenje in poliranje, rezanje in žaganje, izdelovanja profilov, izrezovanje. V preteklosti so kamen obdelovali predvsem ročno. Tehnologija ročnega oblikovanja – odstranjevanja materiala in površinskih obdelav zajema več načinov (Bilbija in Matović, 2009):

– odbijanje je mehanska obdelava površine kamna, s katero dobimo želeno obliko kamnitega izdelka;
– špičenje je obdelava površine s koničastim dletom; gostota in globina nastalih vdrtin vplivata na nastali relief – hrapavost površine kamna;
– štokanje je postopek, s katerim dobimo grobo hrapav videz površine; ročno se opravlja z nazobčanim kladivom, ki ima lahko različno število zobcev;

– brazdanje je postopek, s katerim se po površini zarezujejo medsebojno vzporedne zareze (brazde ali zareze), ki so lahko različno globoke (2–5 mm) in različno razmaknjene (8–15 mm).

5. Propadanje naravnega kamna

Obstojnost kamnine v atmosferskih razmerah je obstojnost, ki jo ima kamnina v odnosu do delovanja fizikalnih in kemičnih dejavnikov v okolju glede na čas. Ko kamnino vzamemo iz naravnega okolja, v katerem so prevladovale kolikor toliko stabilne razmere, jo izpostavimo novemu okolju, v katerem delujejo različni, predvsem pa drugačni fizikalni in kemični dejavniki (Siegesmund idr., 2002; Přykril in Smith, 2007; Bilbija in Matović, 2009). V preperevanje so vključeni številni procesi in reakcije, ki potekajo v zaporedju ali sočasno. Po krajšem ali daljšem času začne kamnina kazati prve znake propadanja (**slika 6**). Ti so v osnovi identični s procesi, ki se dogajajo na odkritih površinah kamnin v njihovem naravnem okolju. Poškodbe na spomenikih so se drastično povečale na začetku prejšnjega stoletja oz. po začetku industrijske revolucije, katere posledica je bila tudi občutno povečanje onesnaženosti ozračja. Propadanje pred tem je bilo bistveno manjše.

Določitev vzrokov in vrst poškodb je prva faza in prvi pogoj za vsak konservatorsko-restavratorski poseg na objektih iz naravnega kamna. Če se želimo problematike ohranjanja kulturne dediščine lotiti na pravilen način, je osnovnega pomena ugotavljanje vzrokov, ki določajo neki proces propadanja, tako da lahko v fazi restavriranja posegamo na najprimernejši način. Procese propadanja povzročajo fizikalni, kemični in biološki dejavniki, ki delujejo in kompleksno medsebojno vplivajo na kamnino, s tem pa spreminjajo njeno sestavo in strukturo; vodijo do oslabitve vezi med zrni in v zadnji stopnji tudi do izgube materiala.

***Slika 6**: Kip iz apnenca na Mislejevem portalu je močno poškodovan.*

Obstojnost kamnine je v glavnem odvisna od njene narave, tj. lastnosti, kot so mineralna in kemična sestava, tekstura in struktura, ter od okolja, ki mu je izpostavljena. Kot zunanje dejavnike v procesih propadanja kamnin opisujemo podnebje oz. atmosferske razmere, predvsem vpliv vode in kristalizacijo topnih soli ter onesnaženost ozračja.

Povzročitelji so atmosfera, deževnica ali talna vlaga, ki lahko vsebuje soli. Pomemben dejavnik so še različni organizmi (Winkler, 1997). Stopnja propadanja kamnine je odvisna tudi od načina obdelave, mesta in načina postavitve ali vgradnje ter stika z drugimi materiali (ometi, malte, kovinske vezi) na objektu. Naravni kamen najpogosteje propada zaradi:

– razdiralnih sil, ki nastajajo pri rasti kristalov sekundarnih mineralov bodisi na površini ali pod površino kamnine,
– raztapljanja mineralov in s tem povečevanja poroznosti kamnine zaradi delovanja vode ali kislih in bazičnih vodnih raztopin,
– mehanskih pritiskov pri zmrzovanju vode v porah in razpokah kamnine,
– razdiralnih sil, ki nastajajo pri raztezanju in krčenju kamninotvornih mineralov zaradi temperaturnih sprememb,
– fizikalnih in kemičnih posledic delovanja organizmov.

Hitrost preperevanja oz. obstojnost kamnine v odvisnosti od časa določa njeno uporabno vrednost za vgradnjo na danem mestu. Vgrajena kamnina lahko znatno razpade že po nekajletni izpostavljenosti vplivom okolja.

Fizikalno preperevanje

To je proces, pri katerem se kamnina mehansko drobi v manjše fragmente brez občutne spremembe v kemični sestavi. Drobljenje se pojavi zaradi izgube kohezijske sile, ki veže kamninotvorne minerale ali njihova zrna v kamnino. V zelo hladnih ali suhih podnebnih razmerah je to glavna oblika propadanja. Fizikalno preperevanje v vlažni klimi je v primerjavi s kemičnim veliko manj pomembno. Kakšni bodo njegovi učinki na kamnino oz. kamniti izdelek, pa je odvisno od delovanja vode, ki ji je kamnina izpostavljena, ter od oblike, števila in razporeditve por. Preperevanje je počasno, vendar zelo učinkovito. Predvsem gre za raznovrstne napetosti in pritiske, ki rahljajo vezi med zrni ali zrna sama.

Kristalizacijski pritisk. Rast kristalov sekundarnih mineralov – soli in ledu v porah povzroča pritiske, ki rahljajo vezi med zrni (**slika 7**). Topne soli so poleg atmosferilij eden najpomembnejših vzrokov za propadanje kamnin.

Hidratacijski pritisk. Škoda, ki jo povzroča sol, je posledica dveh pomembnejših mehanizmov, in sicer obarjanja soli iz raztopine in hidratacije soli. V glavnem je vsaka sol zmožna s kristalizacijo povzročiti razpadanje kamnine, pri hidrataciji pa lahko povzročijo škodo le soli, ki so obstojne v več hidratacijskih stanjih – modifikacijah (npr. monohidrati, dihidrati, pentahidrati). Posledica prehoda iz ene modifikacije v drugo je sprememba molskega volumna, kar lahko poveča pritisk na stene por.

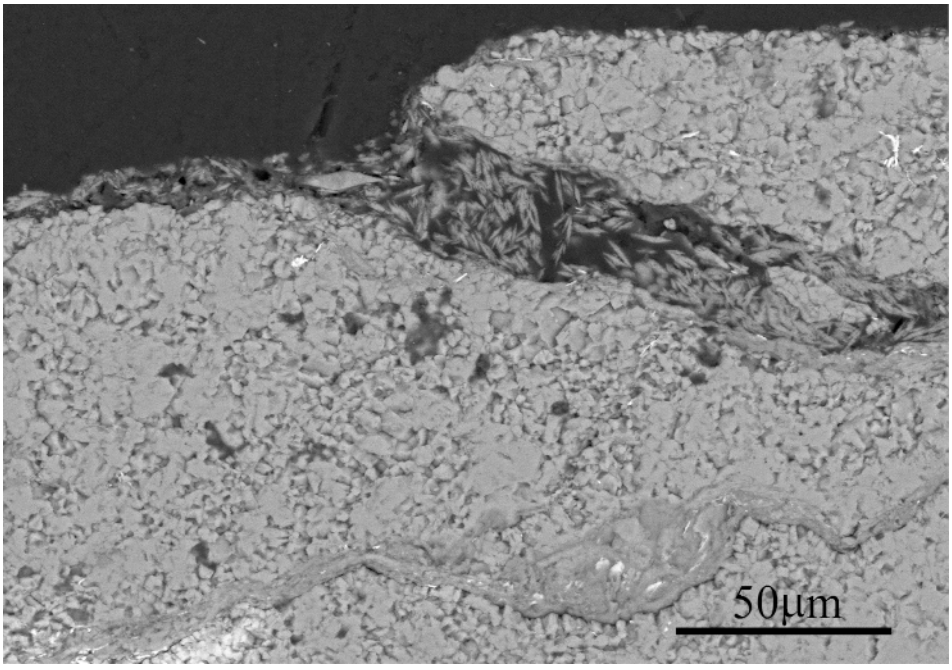
Kemično preperevanje

Kemično preperevanje je proces, pri katerem skušajo sestavine v sistemu kamnina – voda – zrak doseči ravnotežje. Kamnine preperevajo na površini ali blizu nje najpogosteje zaradi verige kemijskih reakcij, v katere je večinoma vključena voda. Prisotnost vlage močno pospeši proces preperevanja. Prisotnost kisika vodi do oksidacije, prisotnost vlage do hidratacije in raztapljanja. Kemično preperevanje poruši kemično ravnovesje v kamnini, tako da se spremeni koncentracija posameznih kemičnih prvin, te pa se spreminjajo v druge minerale.

Raztapljanje je ponavadi prva stopnja kemičnega preperevanja. Poteka lahko v gibajoči se vodi ali v tankem filmu vode okoli trdnih delcev kamnine. Če voda vsebuje raztopljen CO_2 in/ali SO_2, intenzivno raztaplja karbonatne kamnine (Gauri idr., 1999). Raztapljanje je glavna reakcija pri preperevanju apnencev, marmorja in mineralov evaporitov.

Hidroliza je kemijska reakcija, ki poteče med minerali in vodo, tj. med ioni vode H^+ ali OH^- in ioni mineralov. Vzrok za preperevanje je privlačnost med vodnim dipolom in ioni, ki se nahajajo na površini kristalne strukture. Pri procesu kovinski kationi (K^+, Na^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}), ki sestavljajo kamnino, nadomeščajo vodikove ione iz vode. Primer so feromagnezijevi silikati. Iz npr. biotita poteka izluževanje železovega iona zelo hitro (v nekaj letih). Pri tem železov ion tvori železov hidroksid, ki povzroči nastanek rjavega obroča okrog zrn biotita.

Reakcije hidrolize pogosto spremlja **karbonatizacija**, če voda vsebuje tudi šibko ogljikovo kislino. Ogljikov dioksid v vodi je močno topilo mineralov karbonatov in je pomemben tudi pri raztapljanju kamnin z alumosilikatnimi minerali. Toda proces raztapljanja kalcijevega karbonata zaradi CO_2 v vodni raztopini ne vodi nujno do preperevanja kamnine v smislu slabšanja njenih uporabnih lastnosti. Raztopljeni kalcijev karbonat lahko voda odnese na površino kamnine, kjer ponovno kristalizira v sekundarni drobnokristalni kalcit, ki tvori gosto patino na površini karbonatne kamnine in povečuje njeno trdnost.



***Slika 7**: Kristali sadre v apnencu, kar povzroča luščenje. Posnetek poliranega vzorca z elektronskim mikroskopom.*

Oksidacija v splošnem pomeni odvzemanje elektronov iz atomov druge prvine ali spojine. Kisik, raztopljen v vodi, oksidira minerale, ki vsebujejo železo, pri čemer se tvorijo novi minerali oksidov, ki imajo ponavadi večjo površino. Oksidacija je glavni proces preperevanja za večino nesilikatnih mineralov, npr. pirita, pri čemer so novonastali produkti hematit ali limonit in topni sulfati. Pri oksidaciji sulfidnih mineralov nastaja tudi žveplova kislina, ki razkraja obdajajočo mineralno snov, predvsem karbonate. Posledica delovanja žveplove kisline na apnenec je nastanek plasti sadre. Pirit v stiku z vodo limonitizira, kar obarva kamnino rjavorumeno.

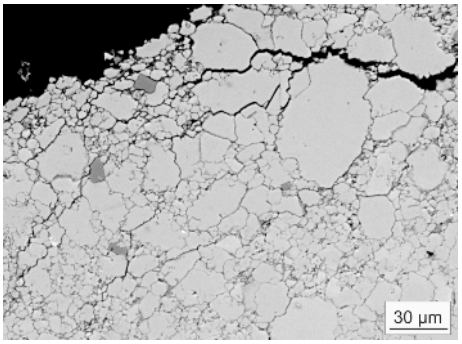
Produkti preperevanja. Pri procesih preperevanja lahko minerali v kamnini prehajajo v raztopine, ostanejo na mestu preperevanja kot netopni ostanek ali pa iz njih nastajajo novi, sekundarni minerali. Minerali kamnine kot **netopni ostanek** so kamninotvorni minerali in delci kamnine, ki so ostali po koncu preperevanja kamnine. **Sekundarni minerali** so večinoma glineni minerali in različni oksidi ali hidroksidi, ki so nastali kot posledica reakcije med prvotnimi minerali in vodno raztopino. Nastali so zaradi kemičnih dejavnikov preperevanja, ki prvotno kamnino kemično, strukturno in mineraloško spremenijo. V vodi topni minerali se iz kamnine, ki prepereva, izlužujejo. Nato jih voda odnaša v obliki prave **raztopine** od mesta preperevanja. Obarjajo se kot sekundarni minerali – evaporiti (različne soli) in karbonati na mestu, na katerem je bil presežen njihov prag topnosti.

Okoljski dejavniki propadanja naravnega kamna

Kot zunanje dejavnike opisujemo podnebje oz. atmosferske razmere, predvsem vpliv vode in kristalizacijo topnih soli, temperaturnega nihanja ter onesnaženosti ozračja. Pomembni dejavniki so še različni organizmi, umetna svetloba in prisotnost človeka. Najpomembnejši dejavnik propadanja je voda. Njeno delovanje je natančneje opisano v posebnem poglavju.

Atmosferski dejavniki. Na spomenike iz naravnega kamna, ki so izpostavljeni atmosferskim dejavnikom, delujejo kisli plini in aerosoli. Najpomembnejši polutanti so žveplov, dušikov in ogljikov oksid. Vsi se v vodi topijo in vežejo z vodikovimi ioni v kisline, ki so zmožne raztapljati karbonatne kamnine, kot sta apnenec in marmor. To so naravni procesi, človeška dejavnost pa je povečala količine teh snovi in pospešila propadanje. Trdni delci (npr. saje) se usedajo na površino kamnine in spreminjajo njeno obliko (Schaffer, 2004). Če je kamnina izpostavljena dežju, se produkti reakcij spirajo z njene površine, kamen pa postopoma izginja (**slika 8**). Če je kamnina v dokaj zavetrnem predelu, se produkti reakcij akumulirajo in na površini tvorijo kompaktno črno skorjo (Price, 1996). Pomemben je način obdelave površine, saj se na grobo obdelani površini delci laže usedajo kot na gladki.

Temperaturna nihanja. Postopno rahljanje vezi med sosednjimi mineralnimi zrni je lahko posledica širjenja in krčenja zlasti usmerjenih mineralov v nekaterih marmorjih (kalcit) ter minerali različnih soli, ki zapolnjujejo razpoke v kamnini, kadar se v njej z insolacijo spreminja temperatura (**slika 9**).



***Slika 9**: Nastanek razpok med zrni apnenca. Posnetek poliranega vzorca z elektronskim mikroskopom.*

***Slika 8.** Spiranje črnih oblog na kamniti površini*

Temperatura, do katere se posamezna kamnina ogreje zaradi sončnega obsevanja, je odvisna od barve kamnine. Bolj se ogrejejo temno obarvane kamnine, manj svetle. Voda v kamnini pri ogrevanju načeloma lahko poruši strukturo tistih kamnin, ki imajo majhno tlačno trdnost (Winkler, 1997). Poroznost kamnine se zaradi nastajanja mikrorazpok povečuje. Pri tem se povečuje dostopnost vode, ki vsebuje topne soli, poleg tega pa v notranjost kamnine lahko prodrejo tudi polutanti (Amoroso in Fassina, 1984). Proces je posledica dejstva, da so kamnine slabi prevodniki toplote, zato hitreje propadajo tisti deli kamnitih površin, ki so izpostavljeni soncu. Posledice preperevanja so vidne v obliki krožnih tvorb, po katerih se kamnina lušči, odvisno od vrste kamnine. Zaradi tega se ukrivljajo tudi npr. kamnite fasadne plošče (**slika 10**).

Slika 10: *Ukrivljanje fasadnih plošč*

Vpliv vode na propadanje kamnin

Voda je v različnih agregatnih stanjih (trdno, tekoče, plinasto) dejansko povezana z vsemi procesi in vrstami spreminjanja, ki jim je podvržen naravni kamen, torej s kemičnimi, fizikalnimi in biološkimi. Nastopa kot agresivno topilo – reaktant, hkrati pa deluje kot transportni medij.

Voda vstopa v kamnino v plinasti ali tekoči fazi, in to skozi površino kamnine ali iz tal. Prenos vode v plinasti fazi je povezan s procesi kondenzacije in difuzije ter je odvisen od higroskopičnosti kamnine, prenos v tekoči fazi pa je odvisen od kapilarnosti, osmoze in difuzije. Poleg tega, da je kemična dejavnost možna le ob prisotnosti vode, je voda tudi osnovni dejavnik pri nastanku notranjih pritiskov. Najpomembnejše je fizikalno delovanje, ki nastane zaradi povečanega volumna vode pri zmrzovanju.

Brez prisotnosti vode ne bi bilo kemičnih reakcij, transporta topnih soli, kristalizacije in rekristalizacije, atmosferski polutanti se ne bi raztapljali, ne bi bilo naseljevanja mikroorganizmov ali poškodb zaradi zmrzali. To pomeni, da so kamnine v suhi aridni klimi veliko bolj obstojne kot enake kamnine v okoljih, v katerih se kamnina lahko omoči ali vsaj navlaži. Vir vlage, ki je prisotna v naravnem kamnu na objektu, so dež, relativna vlažnost v atmosferi, talna in kondenzacijska vlaga, pa tudi puščajoče pipe, strehe in žlebovi (Winkler, 1997).

Količina vodne pare, ki jo kamnina absorbira, je odvisna od relativne vlažnosti zraka in jo imenujemo higroskopska vlaga. Različne kamnine vežejo različno količino vodne pare pri enaki relativni vlažnosti glede na vsebnost higroskopske vlage, ki je v glavnem odvisna od poroznosti kamnine.

Kondenzacija vode omogoči absorpcijo vodne pare v porno telo. Ko vodna para doseže maksimalno možno koncentracijo pri dani temperaturi, se nabere na površini kamnine. Voda nato lahko potuje v notranjost kamnine s kapilarno sukcijo. Kondenzacija se pojavi pri nizki temperaturi površine kamnine in visoki relativni vlažnosti zraka.

Najvišja raven kapilarnega dviga, ki jo lahko vidimo v vgrajeni kamnini po nekaj letih, je velikokrat zaznamovana z eflorescenco ali temnim vlažnim robom, ki ostane vlažen zaradi koncentracije soli na tem nivoju in zadržuje vlago dalj časa (**slika 11**).

Slika 11: *Posledice kapilarnega dviga v poroznem peščenjaku*

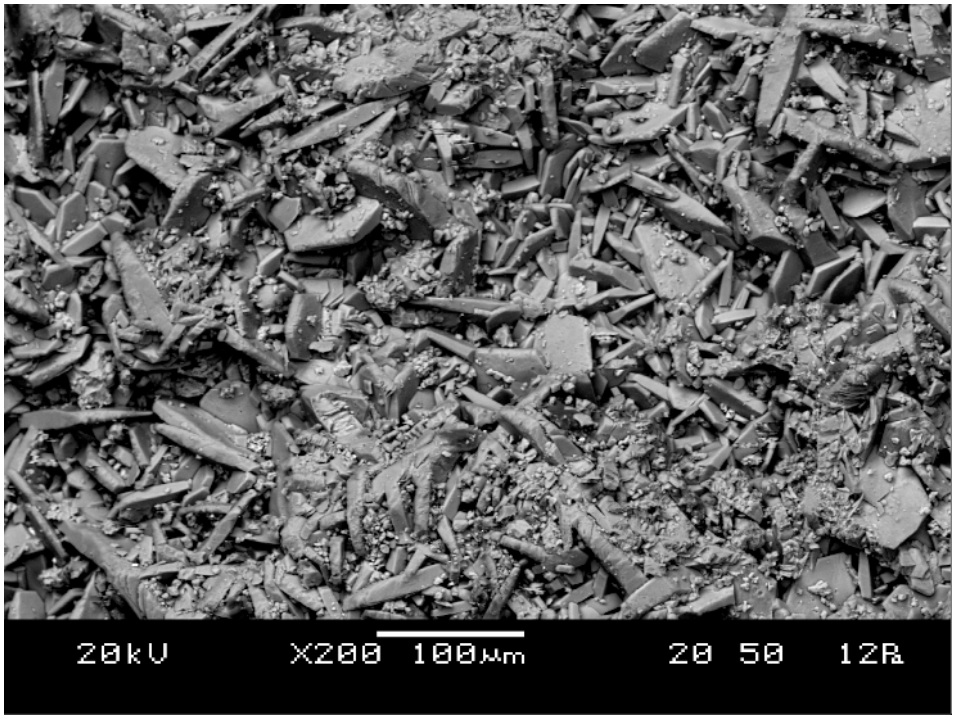
Izmenično vlaženje in sušenje. Večina poškodb na objektih iz naravnega kamna ne nastane zaradi absorpcije vode, temveč med osuševanjem oz. evaporacijo. Hitrost evaporacije je odvisna od stanja okolja in načina prehajanja vode proti površini. V vlažnih in nevetrovnih razmerah je hitrost majhna in površina kamnine ostaja vlažna, v vetrovnih razmerah pa se poveča, voda se mora pomikati

proti površini tako hitro, da kompenzira izgube zaradi evaporacije. Ko relativna vlažnost pade pod določeno vrednost (pod prag topnosti minerala v vodi), se začne kristalizacija soli (Amoroso in Fassina, 1983). Ob absorpciji vode se kamnina razteza, ob osuševanju pa krči. Ta cikel povzroča notranje pritiske na mejah med zrni ter nabrekanje ali krčenje hif ali drugih delov raznih organizmov, hidratacijo ali dehidracijo in kristalizacijo ali raztapljanje soli.

Preperevanje kamnine zaradi zmrzali je odvisno od več dejavnikov, kot so mineralna sestava in poroznost kamnine ter klimatske razmere, ki jim je kamniti predmet ali element izpostavljen. Povečanje volumna pri prehodu vode v led je navadno v intervalu med 8 in 11 %, pri tem se razvije pritisk od 14 do 16 MPa. Ta pritisk je mnogo večji kot natezna trdnost kamnine, ki je redko večja od 10 MPa. Povečanje notranjega pritiska zaradi ponavljajočih se ciklov zmrzovanja in odtajanja povzroča nastanek mikrorazpok, razpok, drobljenje ter luskanje kamnine. V času relativno toplih ur podnevi voda prodira v notranjost kamnine, pri padcu temperature pod zmrzišče pa nastajajo kristali ledu z velikim mehanskim pritiskom. Ta zmanjša ali popolnoma poruši povezavo med mineralnimi sestavinami in deli kamnine, zaradi česar lahko kamnina popolnoma razpade že v nekaj letih.

Kristalizacija soli. Kristalizacija topnih soli v porah je pomemben povzročitelj propadanja kamnin (Goudie in Viles, 1997). Topne soli lahko kristalijo na površini kamnine (eflorescenca) in tvorijo prevleke ali precipitirajo v porah iz nasičene raztopine. Stopnja poškodbe, ki je posledica ponavljajočih se skrčkov in pritiska v stenah por, ki ga povzročajo migrirajoče vode in kasneje kristalizacija soli, je odvisna od hidratacijskega oz. kristalizacijskega pritiska. Pri subflorescenci (kristalizaciji soli pod površino kamnine) topne soli potujejo proti površini, kjer tik pod njo (do nekaj cm v globino) tvorijo tanke skorjice. Zaradi tega se kamnina lušči. Subflorescenca nekaterih sulfatnih soli ter njihova hidratacija in dehidratacija, ki lahko potekata med dnevnim toplotnim ciklusom, utegnejo povzročiti lažje fizikalne poškodbe kapilarno poroznih kamnin.

Najpogostejše soli so sulfati, kloridi, nitrati in karbonati alkalijskih prvin in magnezija. Med njimi je najpogostejša sol sadra – kalcijev sulfat dihidrat (**slika 12**).



***Slika 12**: Kristali sadre v črni oblogi na carrarskem marmorju Robbovega vodnjaka. Posnetek poliranega vzorca z elektronskim mikroskopom.*

Kloridi so ponavadi pogostejši v obalnih regijah, saj so večinoma morskega izvora (Amorosso in Fassina, 1983). So izredno škodljivi, ker so zelo topni in higroskopni, med kondenzacijo vlage iz okolnega zraka pa so prve soli, ki se ponovno raztopijo. Kloride najdemo tudi v objektih, postavljenih v neposredni bližini cest, ki jih v zimskem času solijo. Nitrati so v manjših količinah dokaj pogosti pri skoraj vsaki eflorescenci, kot glavna komponenta pa se nahajajo le v okoljih, v katerih se razkraja organska snov. V stavbah jih najdemo v starih grobnicah ali v objektih, ki stojijo blizu kmetijskih dejavnosti.

Biološki dejavniki propadanja. Ne moremo zanemariti dejstva, da so kamniti elementi, izpostavljeni zunanjemu okolju, podvrženi tudi spremembam, ki jih povzročajo organizmi, prisotni v biosferi (St. Clark in Mark, 2004). Pojem biorazgradnja označuje vse neželene in škodljive učinke na lastnosti kamnine zaradi delovanja mikroorganizmov, tj. bakterij, alg, gliv, lišajev, in makroorganizmov, tj. višjih rastlin in živali. Na kamnitih elementih so sposobne rasti in se razvijati številne skupine

organizmov. Vzroki za biogeofizikalno propadanje so v glavnem penetracija hif lišajev in korenin višjih rastlin v mikrorazpoke in medzrnske prostore, kar pospeši drobljenje kamnine. Biogeokemično propadanje pa je posledica delovanja mikroorganizmov bodisi zaradi vgrajevanja elementov iz substrata v svoje metabolične procese bodisi zaradi nastajanja različnih škodljivih snovi, kot so organske in anorganske kisline in encimi, ki raztapljajo kamnito podlago – mineralno osnovo. Običajni biogeokemični procesi, kot sta biokorozija in biooksidacija, lahko oslabijo strukturo kamnine, lahko pa sodelujejo tudi pri bogatenju s solmi in kristalizaciji leteh.

Dovzetnost kamnine za naselitev mikroorganizmov je odvisna od okoljskih dejavnikov, kot so prisotnost vode, pH, izpostavljenost vremenskim vplivom, prisotnost nutrientov in petroloških parametrov kamnine same (mineralna sestava, vrsta cementa, poroznost in permeabilnost kamnine). Velika poroznost (> 14%) omogoča penetracijo vlage in s tem mikrobiološko kontaminacijo materiala do globine 3–5 cm. Pri tem manjše pore z daljšo dobo zadrževanja vode ustvarijo ugodnejše razmere za ustalitev mikroorganizmov. Kamnine, ki vsebujejo minerale z večjo nagnjenostjo k preperevanju (glinenci, minerali glin, železovi minerali), so še posebej občutljive za rast mikroorganizmov.

Avtotrofne bakterije igrajo pomembno vlogo v začetnem stadiju propadanja kamnin – so primarni kolonizatorji kamnin, heterotrofne bakterije pa za svoj obstoj potrebujejo organsko snov, ki je na površini kamnine že prisotna zaradi delovanja višjih organizmov, npr. odmrli deli lišajev. Alge rastejo predvsem tam, kjer niso izpostavljene direktnim sončnim žarkom, kjer je povišana stopnja vlage in majhna dostopnost organske snovi (Kumar in Kumar, 1999). Delovanje lišajev na kamnino (**slika 13**) je pogojeno predvsem s penetracijo hif v strukturo kamnine, zaradi česar v njej nastanejo razpoke.

***Slika 13**: Lišaji na stebru iz tufa*

Te razpoke se povečujejo z rastjo lišajev in zaradi nabrekanja v vlažnih obdobjih. Poleg raznih organskih kislin lahko nastaja tudi oksalna kislina, ki v reakciji s kovinskimi ioni v mineralih povzroča nastanek oksalatov. Glive so kemoheterotrofni organizmi, torej ne morejo naseljevati kamnin, če na njih že ni organskih snovi (produkti alg in bakterij ter mrtvi organizmi) – delujejo tako kemično kot fizikalno. Mahovi povzročajo biokemično propadanje kamnin, njihovo fizikalno delovanje pa je manj pomembno, saj nimajo pravih korenin. Rastejo v vlažnih okoljih, ponavadi so prisotni na delu zidov, ki so tik nad tlemi. Pri višjih rastlinah je pomembno predvsem fizikalno delovanje na kamnino (**slika 14**). Med živalmi so zlasti ptice tiste, ki povzročajo škodo z gnezdenjem in iztrebki na kamnitih skulpturah in elementih. Z iztrebki, ki vsebujejo nekatere fosforjeve in natrijeve kisline, kvarijo površino naravnega kamna.

***Slika 14**: Drevo z rastjo ruši kamniti vodnjak.*

Drugi dejavniki propadanja

Propadanje zaradi teksturnih značilnosti kamnine. Poleg same mineralne sestave kamnine vpliva na njeno obstojnost še prisotnost raznih diskontinuitet, ki so posledica razmer ob nastanku kamnine ali poznejših tektonskih dogajanj oz. deformacij in so ploskve šibkosti kamnine, kjer se preperevanje pogosto tudi začne. Vsaka oblika diskontinuitete je v kamnini potencialna ploskev šibkosti, kjer bo kamnina hitreje preperevala.

Plastnatost in laminacija kamnine sta posledici samega nastanka kamnine. Plastnate oz. laminirane kamnine preperevajo po teh ploskvah diskontinuitet, tam se pojavi luščenje kamnine oz. t. i. delaminacija ali eksfoliacija. Eksfoliacija se ponavadi pojavlja samo v kamninah, ki vsebujejo sljudo. Večja ko je vsebnost sljude, laže se kamnina lušči. Posamezne mehansko bolj in manj odporne plasti kamnine se lahko menjavajo po ploskvah diskontinuitet, kar je bolj izrazito po vgradnji kamnine.

Žile, razpoke, stilolitski šivi so posledice tektonskih dogajanj in so tiste ploskve šibkosti, na katerih začne kamnina prej preperevati ali pa je nagnjena k lomu. Te mehanske diskontinuitete vplivajo na preperevanje mineralov oz. propadanje kamnin na tri načine: povečajo površino kamnine, ki je izpostavljena vodi in preperevanju, poslabšajo odpornost kamnine na različne mehanske obremenitve (npr. zmrzovanje vode v razpokah) ter v primerih, ko so razpoke zapolnjene z minerali glin kot posledico preperevanja mineralov, ki ob stiku z vodo nabrekajo in pritiskajo na stene razpok (Bland in Rolls, 1998).

Način pridobivanja, obdelave in vgradnje naravnega kamna.

Napake se lahko pojavijo tudi zaradi pomanjkljivega poznavanja kamnine pri njenem pridobivanju in vgradnji. Vzrok za propadanje kamnine so včasih lahko **metode pridobivanja** (Amorosso in Fassina, 1983), pri čemer so manj sporne tradicionalne. Blok, pridobljen s pnevmatskim kladivom, vsebuje več mikrorazpok kot tisti, pridobljen ročno. Izplenjen kamen bi moral vsaj tri leta odležati v kamnolomu (Schaffer, 2004). Nastanek mikrorazpok povzroča tudi miniranje v kamnolomu. Če je bila kamnina **obdelana** s štokanjem, ima večjo specifično in s tem tudi reaktivno površino kot npr. polirana površina. Če je plastnata oz. laminirana kamnina vgrajena pravokotno na plastnatost, lahko nepravilna **vgradnja** (usmerjenost plastnatosti) privede do razslojevanja. Plastnato kamnino lahko vgradimo na tri načine: v naravni legi, pri čemer so plasti horizontalne, plasti so vertikalne in paralelno na vgrajeno površino ali pa so vertikalne in pravokotno na vgrajeno površino (**slika 15**).

*Slika **15**: Peščenjak je vgrajen pravokotno na plastnatost.*

Neustreznost izbire ali kombiniranja materialov. Natančno preračunanje povečanja volumna pri pretvorbi železa v rjo (železne vezi) je zelo težavno, ker je nastala rja ponavadi mešanica amorfnih in kristalnih železovih oksidov/hidroksidov v različnih hidratacijskih stanjih. Pri železnih vezeh se kamnina lahko poruši.

Propadanje kot posledica napak pri izvajalskih in vzdrževalnih delih. Gre predvsem za nekompatibilnost med uporabljenimi materiali. Propadanje se začne, ko so bili materiali, ki so nekompatibilni, vgrajeni skupaj ali pa so bili uporabljeni neustrezni premazi (**slika 16**).

***Slika 16:** Neustrezen sanacijski material povzroča propadanja kamnine.*

6. Oblike propadanja naravnega kamna

Pojav posameznih oblik propadanja na določenem objektu oz. spomeniku iz naravnega kamna je odvisen od zunanjih dejavnikov ter lastnosti kamnine. Določene poškodbe so vezane izključno na lastnosti kamnine in so posledica njenega nastanka in geološke zgodovine. Pojem »oblika propadanja« uporabljamo za vidno

propadanje kamnin v območju velikostnega reda cm–m (Fitzner in Heinrichs, 2002). Dokumentiranje makroskopskih sprememb, tj. karakterizacija, kvantifikacija in interpretacija oblik propadanja naravnega kamna, je eden ključnih korakov pred konservatorsko-restavratorskim posegom, saj je osnova za konservatorsko-restavratorske smernice. Natančna analiza oblik propadanja je prvi pogoj za razumevanje vzrokov, procesov in karakteristik poškodb naravnega kamna ter celostnega ohranjanja spomenikov.

Učinkovit nedestruktivni postopek za *in situ* preiskave oz. proučevanje poškodb naravnega kamna na objektih kulturne dediščine je metoda kartiranja oblik propadanja. Na podlagi prepoznanih oblik propadanja lahko ugotovimo vzroke ter stopnjo in procese. Objektiven opis, prepoznavanje in dokumentiranje oblik propadanja zahtevajo natančno klasifikacijsko shemo. Skupine in glavne oblike propadanja naravnega kamna klasificiramo v posamezne oblike propadanja (Fitzner in Heinrichs, 2002; ICCOMOS-ISC, 2008).

Klasifikacija oblik propadanja naravnega kamna

Osnovno klasifikacijsko shemo sestavljajo **štiri skupine propadanja**, ki so dalje razdeljene **v glavne oblike**, te pa v **posamezne oblike propadanja**. Klasifikacija omogoča, da na objektu kartiramo posamezne oblike propadanja, ki jih označimo z ustreznim grafičnim simbolom in razdelimo po glavnih oblikah in po skupinah. Razdelitev oblik propadanja v štiri skupine poda pregled nad različnimi načini propadanja in s tem prvo informacijo o določeni obliki propadanja in njenem mestu na objektu.

Grafični prikaz zato omogoča takojšnjo oceno stopnje poškodb na določenem objektu. V naslednji fazi lahko izdelamo načrt o vrsti in količini preiskav, katerih rezultati nam nato omogočajo določiti potrebne konservatorsko-restavratorske posege. Iz kartiranja oblik propadanja je razvidno, na katerih delih kamnitega objekta prevladuje izguba materiala (prva skupina), kje so prisotne barvne spremembe in nalaganje materiala (druga skupina), kje material odstopa (tretja skupina) in kje gre za poškodbe v obliki razpok in deformacij (četrta skupina). Na podlagi litološkega kartiranja na objektu lahko točno razberemo, kateri tipi oblik propadanja se pojavljajo na posamezni kamnini. Poleg tega lahko vidimo, kje je največja stopnja poškodb in kateri del kamnitega objekta je najbolj poškodovan.

Oblike propadanja naravnega kamna so razdeljene v štiri glavne skupine, znotraj katerih je izvedena dodatna delitev glede na prevladujočo obliko propadanja.

- *1. skupina*, »odpadanje delov kamnine«, se deli na tri glavne oblike propadanja:

  a. odpadanje površinskih plasti kamnine

Debelina odpadle površinske plasti je odvisna od globine, na kateri je nastala dekohezija kamnine. Glavne oblike propadanja lahko glede na način propadanja delimo na posamezne oblike, kot so odpadanje lusk (**slika 17**), drobcev, plasti, skorij in kosov kamnine.

b. nastanek reliefa

Nastanek reliefa na površini lahko povzročijo različni dejavniki in se odraža kot površinsko odpadanje. Odpadajo manjši, bolj izpostavljeni deli površine objekta – erozija, zaradi česar se na objektu pojavi relief. Pomembnejše posamezne oblike propadanja so zaobljevanje in dolbenje (**slika 18**), alveolizacija (**slika 19**), izbirno propadanje (**slika 20**) in luknjičasto razpadanje.

c. odlom

To je odpadanje delov kamnine zaradi kratkotrajnega delovanja

Slika 17: *Odpadanje lusk pri peščenjaku*

***Slika 18**: Zaobljevanje stebra iz peščenjaka*

***Slika 19**: Alveolizacija peščenjaka*

***Slika 20:** Izbirno propadanje manj in bolj odpornih delov kamnine*

mehanske sile na kamniti objekt (zunanja mehanska sila). Velikost in oblika odlomljenega dela kamnine ter smer, po kateri se je kamnina odlomila, so odvisne od vrste sile, tipa kamnine, njene usmerjenosti pri gradnji ter tehnologije izdelave kamnitega elementa. Poznamo odlom zaradi antropogenih dejavnikov, odlom zaradi konstrukcijskih razlogov, odlom zaradi naravnih vzrokov itd.

- *2. skupina*, »sprememba barve in odlaganje materiala«, se deli na:

a. sprememba barve

Zajema spremembo tona, čistosti in kromatičnosti (intenzitete) barve na površini kamnine. Številne vrste propadanja naravnega kamna spremlja tudi sprememba njegove barve (obarvanje in razbarvanje).

b. površinsko nalaganje

Te plasti so posledica odlaganja aerosolov, atmosferskih delcev, ptičjih iztrebkov itd.

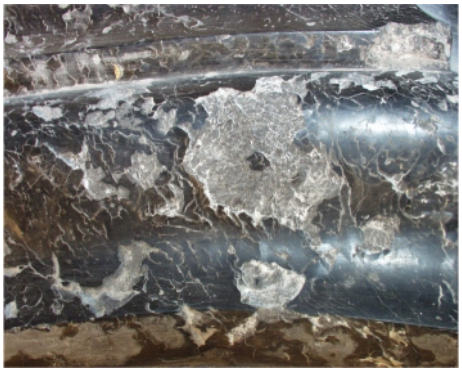
c. nevezane usedline soli na površini kamnine

Trdni delci soli, ki se odlagajo na površini in s tem spremenijo osnovno barvo kamnine, imajo svoj izvor v kamnini, na katere površini so se odlagali. Nastanek soli in njihova migracija na površino kamnine sta posledici drugih vrst propadanja kamnine. Posamezni obliki propadanja sta eflorescenca (**slika 21**) in subflorescenca (**slika 22**).

***Slika 21:** Kristalizacija soli na površini kamnine – eflorescenca*

d. obloge

Oblogo sestavlja material, ki se je usedel na površino kamnine in nanjo



***Slika 22:** Kristalizacija soli pod površino kamnine – subflorescenca*

vezal s procesi mineralizacije. Vzroki za nastanek materiala, ki tvori skorjaste prevleke, so različni. Izvor imajo lahko v kamnini sami ali pa je bil material prinesen od drugod (polutanti). Obloge so lahko slabo ali dobro vezane. Posamezne oblike propadanja predstavljajo barvne, temne ali svetle obloge (**slika 23**), ki sledijo površini kamnine ali pa jo spreminjajo.

***Slika 23**: Bela obloga na površini apnenca*

e. otrdevanje površine

Površinsko plast kamnine utrjujejo sekundarni minerali, ki so se odlagali v njej in imajo izvor v kamnini sami. Plast je gostejša in ima večjo trdnost od kamnine v notranjosti, zato odstopi od nespremenjenega dela kamnine.

f. zaraščanje površine kamnine z vegetacijo

Na površini kamnine se lahko naselijo mikroorganizmi in višje rastline.

- *3. skupina,* »odstopanje površine kamnine«, se deli na:

a. zrnato razpadanje materiala na površini kamnine

S površine kamnine lahko odpadajo posamezna mineralna zrna, lahko pa tudi večji kosi kamnine. Vzrok je zmanjšanje kohezijskih sil v kamnini. Posamezne oblike propadanja so razpadanje v prah, zrna ali zrnate agregate.

b. drobljenje

Površina kamnine se drobi, ker se je zmanjšala kohezijska sila v površinski plasti primarno razpokane kamnine. Zdrobljeni deli kamnine sicer niso mineraloško in kemično spremenjeni.

c. luščenje

Material, ki odpada s površine kamnine, je v obliki tankih kosov kamnine – lusk, pri čemer luska ne sledi teksturi kamnine. Luščenje je lahko enoplastno ali večplastno. Vzroki za nastanek lusk so različni.

d. napihovanje

Površinska plast se zaradi napihovanja loči od kamnine, kasneje pa lahko v celoti odpade. Vzroki za napihovanje so različni. Ločimo napihovanje, ki je odvisno od teksture kamnine, in napihovanje, ki ne sledi teksturi kamnine (**slika 24**).

e. konturno luščenje

Je luščenje površinske plasti kamnine v obliki lusk, ki sledi konturam kamnitega objekta. Lahko se lušči v eni – enoplastno luščenje ali v več plasteh – večplastno luščenje.

f. razplastitev

To je odstopanje površinskega dela kamnine, ki sledi teksturi kamnine.

g. odstopanje skorij

Na kamnini, ki ima skorjo, lahko ta odstopa. Ponavadi odstopa skorja skupaj s kamnino. Če je kohezivna sila med skorjo in kamnino večja kot

Slika 24: *Napihovanje kamnine*

med delci kamnine, skorja odstopi tako, da s sabo povleče še stično plast kamnine. Ta je zaradi dejavnikov preperevanja v odnosu do matične kamnine fizikalno, kemično in mineraloško spremenjena. Skorjo lahko tvorijo tudi samo sekundarni minerali, nastali kot posledica dejavnikov preperevanja iz okolja.

- *4. skupina,* »razpoke in deformacije«, se deli na:

a. razpoke

Razpoke so posledica različnih vzrokov in lahko sledijo teksturi kamnine ali pa ne. Nastanejo izključno zaradi delovanja zunanje mehanske sile na kamnino. Ob razpoki se lahko premakneta dela kamnine na obeh straneh.

b. zlomi

Po razpoki se oba dela kamnine ločita (kamnina razpade vsaj na dva dela).

c. deformacije

Deformacija je sprememba profila kamnitega objekta. Izražena je predvsem na kamnitih objektih v obliki plošč oz. tam, kjer je močno izražena geometrijska anizotropnost kamnine. Ločimo konveksno in konkavno deformacijo.

7. Zaključek

Konservator - restavrator se sreča z naravnim kamnom, ko je vgrajen v objekt ali stoji kot spomenik, ki je že dalj časa izpostavljen naravnim in antropogenim dejavnikom. Ti praviloma negativno vplivajo na njegovo obstojnost. Kamnina kamnitega spomenika je že spremenjena (preperela) ali poškodovana, zaradi česar lastniki spomenika konservatorja - restavratorja tudi potrebujejo. Kamniti spomenik ima spremenjeno površino, spremenjena je barva, površina ni več gladka, morda tudi nima več primerne trdnosti, manjkajo lahko posamezni deli. Zato je včasih težko prepoznati, s kakšno kamnino imamo opravka. Prva naloga konservatorja - restavratorja torej je, da prepozna vrsto kamnine, iz katere je spomenik narejen. Drugi pomemben podatek je podatek o vrsti in načinu propadanja kamnine, ki je vplivala na spremenjeni videz kamnine in na funkcionalnost spomenika. S prepoznavanjem načina propadanja lahko to v nadaljevanju z ustreznimi postopki preprečimo ali spomenik zaščitimo pred nadaljnjim propadanjem. Nič manj pomembna pa ni restavratorjeva naloga, da v postopku konservatorsko-restavratorskih del pridobi dovoljenje za enkratni odvzem kamnine iz kamnoloma, v katerem je bila odvzeta tudi kamnina za izvirni spomenik. Najpomembnejše pravilo, ki naj bi ga upošteval vsak konservator - restavrator kamnitih objektov in spomenikov, ki sestavljajo kamnito kulturno dediščino, je, da konservatorsko-restavratorske posege izvaja z izvirno kamnino povsod tam, kjer je to le mogoče.

8. Literatura

1. G. Amoroso, V. Fassina, *Stone decay and conservation: Atmospheric pollution, cleaning, consolidation, and protection,* Amsterdam, 1983, 453 str.
2. N. Bilbija, V. Matović, *Primenjena petrografija : svojstva i primene kamena*, Beograd, 2009, 417 str.
3. W. Bland, D. Rolls, *Weathering, An introduction to the Scientific Principles,* London, 1998, 271 str.
4. B. Fitzner, K. Heinrichs, *Damage diagnosis on stone monuments – weathering forms, damage categories and damage indices, Understanding and managing stone decay, Proceeding of the International Conference »Stone weathering and atmospheric pollution network (SWAPNET 2001)«,* ur. R. Prikřyl in H. A. Viles, Charles University in Prague, 2002, str. 11–56.
5. K. L. Gauri, J. K. Bandyopadhyay, *Carbonate Stone, Chemical, Behaviour, Durability, and Conservation,* New York, 1999, 284 str.
6. A. Goudie, H. Viles, *Salt weathering hazards,* Chichester, 1997, 235 str.
7. R. A. Kumar, V. Kumar, *Biodeterioration of Stone in Tropical Environments*, Los Angeles, 1999, 88 str.
8. B. Mirtič, A. Mladenović, A. Ramovš, A. Senegačnik, J. Vesel, N. Vižintin, *Slovenski naravni kamen,* Ljubljana, 1999, 131 str.
9. S. A. Price, *Stone conservation. An Owerview of Current Research*, Los Angeles, 1996, 73 str.
10. R. Přikryl, B. J. Smith, *Building Stone Decay: From Diagnosis to Conservation,* London, 2007, 330 str.
11. A. Ramovš, *Hotaveljčan skozi čas*, Hotavlje, 1995, 128 str.
12. A. Ramovš, *Podpeški in črni ter pisani lesnobrdski apnenec skozi čas*, Ljubljana, 2000, 115 str.
13. A. Ramovš, *Barviti trogkofelski apnenec Dovžanove soteske : lepotni spev narave*, Tržič, 2002, 75 str.
14. A. Ramovš, *Pisani kamen s Kodrastega vrha na Jelovici : Vurnikove umetnine v cerkvah na Gorenjskem in Štajerskem*, Ljubljana, 2005, 70 str.
15. A. Ramovš, *Peračiški zeleni kamen : pomnik mnogih gorenjskih cerkva in domačij*, Ljubljana, 2008, 147 str.
16. R. J. Schaffer, *The weathering of natural building stones*, Shaftesbury, 2004, 149 str.
17. L. L. St. Clair, M. R. D. Seaward, *Biodeterioration of stone surfaces : lichens and biofilms as weathering agents of rocks and cultural heritage*, Dordrecht, 2004, 292 str.
18. S. Siegesmund, T. Weiss, A. Vollbrecht, *Natural stone, weathering phenomena, conservation strategies and case studies*, London, 2002, 448 str.
19. E. M. Winkler, *Stone in Architecture : Properties, Durability*, Berlin, 1997, 313 str.
20. *Illustrated glossary on stone deterioration patterns*, Champigny/Marne ICOMOS-ISC (International Council on Monuments and Sites-International Scientific Committee for Stone), 2008, 86 str.

Avtorji fotografij

Vanja Kastelic: sliki 18, 24.

Sabina Kramar: slike 5a–5b, 6, 8, 14, 15, 17, 19, 21, 22, 23.

Lidija Korat: sliki 13, 16.

Alenka Mauko: slika 10.

Breda Mirtič: sliki 11, 20.

Ana Mladenović: slike 7, 9, 12.

Miran Udovč: slike 1a–1g, 2a–2d, 3a–3e.