

Nadesłano 4.11.2015 r.; zaakceptowano 4.03.2016 r.

OCHRONA, KONSERWACJA I RESTAURACJA KAMIENNYCH OBUDÓW WYROBISK PODZIEMNYCH

Wojciech PREIDL¹
Andrzej J. WÓJCIK²
Grzegorz DYDUCH¹

¹ Wydział Górniczy, Politechnika Śląska, Gliwice

² Instytut Historii Nauki Polskiej Akademii Nauk, Warszawa

*historia górnictwa, obudowa wyrobisk,
konserwacja zabytków górniczych*

Ochrona wyrobisk podziemnych przed negatywnym oddziaływaniem czynników środowiskowych jest zagadnieniem nadzwyczaj złożonym. Obudowa, która może być wykonana z kamienia naturalnego lub sztucznego, będzie ulegać destrukcyjnym wpływom w stopniu zależnym od rodzaju i jakości materiału, z którego została wykonana. Również oddziaływanie środowiska na obudowę może być bardzo zróżnicowane. Rodzaj i intensywność działań są uzależnione od takich czynników jak: rodzaj skał w których wykonano wyrobisko, głębokość lokalizacji wyrobiska, stosunki wodne na powierzchni terenu i w skałach otaczających wyrobisko. Również sposób przewietrzania jak i skład chemiczny powietrza doprowadzanego do wyrobiska wpływa na intensywność i rodzaj korozji materiału obudowy.

Omawiając tak skomplikowane zagadnienie trudno podać jednoznaczną diagnozę i metodologię postępowania przy rozwiązywaniu problemu zabezpieczenia obudów kamiennych przed destrukcyjnym oddziaływaniem czynników środowiskowych. Każde wyrobisko należy traktować indywidualnie, uwzględniając nie tylko warunki środowiskowe i rodzaj obudowy ale również jego przyrodnicze i historyczne walory. W artykule podano również najważniejsze czynniki środowiskowe mające wpływ na destrukcję oraz podano metodologię ograniczenia ich wpływu na stan zachowania konstrukcji murowych wyrobisk podziemnych. Podkreślono także, że zabiegi zmierzające do zabezpieczenia wyrobiska i jego obudowy, choćby najskuteczniejsze, nie mogą doprowadzić do zniszczenia jego specyfiki i walorów historycznych.

1. Wstęp

Zagadnienie ochrony wyrobisk podziemnych przed negatywnym oddziaływaniem czynników środowiskowych jest nadzwyczaj złożone. Obudowa, która może być wykonana z kamienia naturalnego jak i sztucznego, będzie ulegać destrukcyjnym wpływom w stopniu zależnym od rodzaju i jakości materiału z którego została

wykonana. Na jej odporność będą również miały wpływ takie czynniki jak: czas wykonania, sposób wykonania i jakość użytych materiałów. Dodatkowe czynniki środowiskowe oddziałujące na obudowę również mogą być bardzo zróżnicowane. Ich rodzaj i intensywność działania są uzależnione od: rodzaju skał, w których wykonano wyrobisko, głębokości wyrobiska, stosunki wodne na powierzchni terenu, i w skałach otaczających. Sposób przewietrzania, i skład chemiczny powietrza doprowadzanego do wyrobiska wpływają na intensywność i rodzaj korozji materiału obudowy (Chudek i in., 2001; Mikoś i in., 2014). W przypadku prowadzenia prac z zakresu rewitalizacji obiektów podziemnych, pomocnym jest korzystanie z metod wypracowanych przy zabezpieczeniu i konserwacji obiektów zabytkowych powierzchniowych. Bogata literatura z tego zakresu, np. prace: (Domasławski, 2011; Domasławski i in., 2000; Niemcewicz, 2005; Penkala, 1966; Tajchman, 1995, 2005), (Agnew & Bridgland, 2006; Ashurst & Ashurst, 1988; Doehne & Price, 2010; Flynn, 2011; Shadmon, 1996; Siegesmund & Snethlage, 2014; Siegesmund i in., 2002; Verges-Belmin, 2008) pozwala na przeprowadzenie studiów porównawczych i wybranie rozwiązań optymalnych dla analizowanego przypadku zabezpieczenia budowli podziemnej wykonanej w obudowie kamiennej.

2. Rodzaje obudów kamiennych w wyrobiskach podziemnych

Obudowa górnicza to ogół środków technicznych zapewniających stabilność i trwałość wyrobiska. Obudowa chroni przestrzeń wyrobiska między innymi, przed: odspajaniem się skał i zasypywaniem, zmniejszaniem przestrzeni wyrobiska na skutek oddziaływania naprężeń górotworu, wdarciami i zalaniem wodą (Chudek i in. 2001).

Wśród obudów kamiennych możemy wyróżnić monolityczne i kompozytowe. Za obudowy monolityczne, w świetle niniejszego opracowania, uważa się obudowy wykonane zasadniczo z jednego rodzaju materiału. Komponenty wchodzące w skład materiału obudowy mają podobne właściwości. Materiał obudowy, w tym przypadku np. beton, tworzy wokół konturu wyłomu szczelny pierścień, o określonych parametrach wytrzymałościowych, osłaniający przestrzeń wybraną przed skutkami przemieszczania się skał otaczających.

Natomiast obudowy kompozytowe składają się z co najmniej dwóch materiałów konstrukcyjnych, z których jeden charakteryzuje się wysokimi parametrami wytrzymałościowymi, natomiast drugi spełnia jedynie rolę spoiwa łączącego elementy wykonane z materiału o wysokiej wytrzymałości. Typowym rodzajem takiej obudowy są obudowy murowe wykonane z kamienia naturalnego lub sztucznego, połączonych zaprawą np.: wapienną, gipsową, cementową lub stanowiącą mieszaninę wymienionych komponentów. Do tej grupy obudów zalicza się również obudowy kamienne, w których szczeliny pomiędzy elementami obudowy nie zostały wypełnione żadnym lepiszczem ani zaprawą. Mur tworzą mniej lub bardziej dokładnie dopasowane do siebie bloki kamienne np. mury cyklopowe.

3. Materiały wykorzystywane do wykonania obudów kamiennych

Do wykonania obudów kamiennych wykorzystywano różnego rodzaju materiały naturalne (skały), jak i sztuczne (ceramika, beton). Opis i charakterystyka poszczególnych materiałów przedstawiany jest w wielu opracowaniach i podręcznikach z których można wymienić np. (Flynn, 2011; Komarnicki, 1988; Kosmala & Suski, 1994; Shadmon, 1996; Siegesmund i in., 2002; Szymański, 2004).

3.1. Skały

Kamień naturalny, pozyskiwany podczas procesów drążenia, jest najstarszym materiałem stosowanym do wznoszenia obudów wyrobisk podziemnych. W tym celu były używane wszystkie podstawowe typy skał tworzące skorupę ziemską: magmowe, osadowe i metamorficzne.

Skały magmowe są najbardziej odporne, na działanie czynników środowiskowych, ze wszystkich skał wykorzystywanych do wznoszenia obudów wyrobisk kamiennych. Charakteryzują się dużą wytrzymałością i niską nasiąkliwością. Jako materiał do wykonywania obudowy stosowane są rzadko, ale często tworzą kontury wyrobisk w kopalniach rudnych. Procesy niszczenia zachodzą w nich powoli, najczęściej na skutek wietrzenia oraz gwałtownych zmian temperatury. W skałach magmowych najbardziej podatne na korozję chemiczną są glinokrzemiany i skalenie np. biotyt $K(Mg,Fe)_3(AlSi_3O_{10})(OH,F)_2$ – zasadowy glinokrzemian potasu, magnezu, żelaza i manganu (Bolewski & Parachoniak, 1982; Mackenzie i in., 1982).

Wśród skał osadowych, w budownictwie podziemnym, rozpowszechnione było stosowanie różnych odmian piaskowców i wapieni. Piaskowce są najczęściej używanym materiałem do wznoszenia obudów wyrobisk podziemnych. Są bardzo zróżnicowaną grupą skał, ich własności mechaniczne są uzależnione od składu mineralogicznego, struktury i tekstury. Najbardziej odporne na działanie czynników chemicznych jak i fizycznych są piaskowce o lepszczu krzemionkowym. Piaskowce o lepszczu wapiennym są bardziej narażone na oddziaływanie czynników środowiskowych. Najbardziej podatne na korozję chemiczną i wietrzenie są piaskowce o lepszczu ilastym (Kozłowski, 1986).

Skały wapienne są również bardzo zróżnicowane pod względem własności wytrzymałościowych jak i odporności na działanie czynników środowiskowych. Ich cechy mechaniczne w bardzo dużym stopniu uzależnione są od sposobu w jaki powstały; czy są organo-, czy chemogeniczne. Duży wpływ na ich odporność na czynniki środowiskowe mają również procesy chemiczne, fizyczne jak też geologiczne jakie towarzyszyły ich procesom formowania (Adams & Mackenzie, 1988; Niemcewicz, 2005). Generalnie są mało odporne na działanie czynników chemicznych i wody. Do najbardziej odpornych należą wapień zbite i krystaliczne. Najmniej odporne są wapień margliste i zawierające wtrącenia skał innych, na przykład krzemieni i rogowców (Bolewski & Parachoniak, 1982; Kozłowski i in., 1986).

Skały metamorficzne powstały z różnych skał na skutek przeobrażenia pod wpływem wysokich temperatur i wysokiego ciśnienia oraz związanych z nimi procesów

chemicznych. Metamorfizm powoduje zmiany składu mineralnego, czasami też chemicznego skał oraz ich struktury i tekstury. Przeobrażenie skał następuje w różnych warunkach np: sąsiedztwo gorącego ogniska magmowego (metamorfizm kontaktowy), duże naciski ścinające (metamorfizm dynamiczny). (Kozłowski i in., 1986). Z danego protolitu (skały pierwotnej) mogą w różnych warunkach metamorficznych (tzw. facjach) powstać różne skały metamorficzne. (Yardley i in., 1998). Skały tego typu najczęściej tworzą ociosy wyrobisk podziemnych w kopalniach rudnych. Ta grupa skał jest najbardziej zróżnicowana pod względem własności wytrzymałościowych i odporności na korozję.

3.2. Ceramika i beton

Z materiałów ceramicznych najczęściej stosowana w budownictwie podziemnym jest cegła, produkowana z glin ilastych, morenowych, wstęgowych, łupków, mułków oraz lessów (Augustinik, 1980; Skalmowski, 1971). Surowcami pomocniczymi przy ich produkcji są piasek kwarcowy i złom suszarniowy. Cegły ze względu na stopień wypalenia w procesie produkcji można podzielić na (Domasławski i in., 2000):

- niedopałkę – cegła niedostatecznie wypalona,
- wiśniówkę – cegła mocno wypalona, której kolor jest intensywnie czerwony,
- zendrówkę – cegła wypalona do granicy zeszklenia,
- kopciałkę – cegła okopcona sadzami w czasie wypalania.

W suchym gorącym klimacie można spotkać również cegły tylko suszone na słońcu, które w budownictwie podziemnym miały bardzo ograniczone zastosowanie. Cegły charakteryzują się stosunkowo odpornością na czynniki chemiczne (Gimpel, 1968; Tokarski & Wolfkes, 1969). Ich nasiąkliwość jest uzależniona od stopnia wypalenia. Specjalną odmianą cegły, otrzymywaną przez wypalenie glin wapienno-żelazistych i wapienno-magnezjowych, są cegły klinkierowe. Charakteryzują się one małą nasiąkliwością (do 6%), są w wysokim stopniu mrozo odporne i posiadają dużą wytrzymałość mechaniczną (Szymański, 2004; Świechowski, 1961). Cegły wypalane po raz pierwszy stosowano w Asyrii (IV w. p.n.e.), natomiast w czasach rzymskich w budownictwie stosowano ją już powszechnie. W Polsce rozwój budownictwa murowanego z cegły datuje się dopiero na początek XIII w.

Drugim, obecnie bardzo rozpowszechnionym materiałem w budownictwie jest beton (sztuczny kamień), który powstaje ze zmieszania spoiwa (cementu) i wypełniacza (kruszywo), ewentualnych domieszek nadających pożądane cechy oraz wody. Betony wytwarzane są na bazie cementu portlandzkiego, otrzymywanego w wyniku zmieszania klinkieru cementowego z gipsem w stosunku 95% do 5%. Klinkier cementowy otrzymuje się przez wypalenie w temperaturze 1450°C mieszaniny zmieszanych surowców zawierających węglan wapnia i glinokrzemiany.

3.3. Zaprawy

Przez zaprawę rozumie się mieszaninę wody i spoiwa z drobnym kruszywem lub innym wypełniaczem, mającą na celu wiązanie, czyli przejście ze stanu płynnego lub plastycznego w stały. Zaprawy w budownictwie używane są przede wszystkim do

łączenia elementów np. cegieł w murze. Rodzaj i wytrzymałość zaprawy ma bardzo duże znaczenie w wytrzymałości muru jako całości. Zaprawa ma za zadanie, przede wszystkim, wypełnienie spoin, a przez to zapewnienia równomiernego przenoszenia obciążeń przez konstrukcję murową oraz uszczelnienie elementów budowli (Skalmowski, 1971, 1972; Szymański, 2004; Wirska-Parachoniak, 1972).

Cechą charakterystyczną zapraw jest to, że ich właściwości zmieniają się wraz z upływem czasu. Świeże zaprawy charakteryzują się konsystencją plastyczną i urabialnością, stwardniałe cechuje przede wszystkim wytrzymałość mechaniczną, wysoka mrozoodporność, wodoszczelność itp. Do zapraw, jako wypełniacza, najczęściej używa się piasku. W zależności od rodzaju użytego spoiwa rozróżnia się zaprawy: wapienne, gipsowe, cementowe, cementowo-gliniaste i magnezjowe.

Na przestrzeni dziejów najczęściej stosowano zaprawy, wytwarzane na bazie wapna palonego. Charakteryzują się one bardzo długim czasem twardnienia, który w przypadku grubych murów może dochodzić do 3 lat. Zaprawy wapienne z dodatkami hydraulicznymi były stosowane w budownictwie wodnym. Obecnie zaprawy wapienne są stosowane raczej rzadko.

W obiektach historycznych były używane także zaprawy gipsowe, ze względu na szybki czas wiązania i stosunkowo dużą wytrzymałość. Ponieważ są mało odporne na działanie wody, zostały wyparte przez zaprawy cementowe (Osiecka, 2002). W budownictwie podziemnym zaprawy gipsowe, nie znalazły szerszego zastosowania.

Zaprawy cementowe są obecnie najczęściej stosowanymi zaprawami w budownictwie podziemnym. Szeroko są wykorzystywane przy murowaniu ścian i innych elementów „mocno” obciążonych, do wykonywania posadzek, osadzania stalowych elementów, łączenia prefabrykatów, wypełniania pustek pomiędzy konturem wyłomu a obudową, wypraw ochronnych, zwłaszcza mających kontakt z wodą lub wilgocią, produkcji prefabrykatów cementowych i cementowo-wapiennych.

Zaprawy cementowo-wapienne najczęściej stosowane są przy wykonywaniu robót murarskich i tynkarskich zewnętrznych i wewnętrznych. Rzadko stosuje się je do murowania ścian i innych elementów poddanych dużemu obciążeniu.

Zaprawy cementowo-gliniane, wykorzystywano do robót murarskich budynków mieszkalnych i gospodarczych, wypraw tynkarskich, izolacji pionowej ścian piwnicznych i zbiorników w budownictwie wiejskim. Używane są w budownictwie szkieletowym.

Zaprawy magnezjowe, które otrzymywane są z wapieni dolomitowych poddanych wypalaniu w temperaturze od 800°C do 900°C, z dodatkiem chlorku lub siarczku magnezowego (Skalmowski, 1971, 1972; Wirska-Parachoniak, 1972). W wyniku wypalania wapieni dolomitycznych otrzymywany jest tlenek magnezu MgO, który w połączeniu z rozpuszczonym w wodzie chlorkiem magnezu ($MgCl_2$) tworzy mieszaninę mającą własności wiążące. Związek ten na cześć wynalazcy nazywany jest cementem Sorela. Spoiwo magnezjowe, po związaniu, tworzy twardszą i bardziej odporną na czynniki zewnętrzne powłokę niż inne spoiwa powietrzne. Stosowany był do wykonywania tynków oraz, po połączeniu z trocinami lub wiórami z drewna

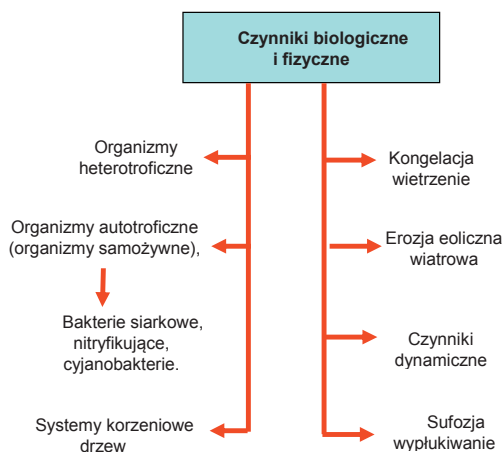
– posadzek bezspoinowych, płytek okładzinowych, podokienników i różnych detali architektonicznych. Materiał otrzymany z połączenia cementu Sorela z trocinami nazywano *skalodrzewem* lub *ksylolemem*. Wadą spoiwa magnezowego jest sprzyjanie korozji stali. W budownictwie podziemnym, ze względu na swoje właściwości zaprawy tego rodzaju nie są stosowane.

4. Wpływ czynników środowiskowych na obudowy kamienne

Wszystkie materiały pod wpływem czynników zewnętrznych ulegają korozji (korozja: z łac. *corrosio* – zżeranie) rozumianej jako proces stopniowego niszczenia materiałów, zachodzący między ich powierzchnią i otaczającym środowiskiem (Doehne & Price, 2010; Verges-Belmin, 2008). Zależnie od rodzaju materiału dominujące procesy mają charakter reakcji chemicznych, procesów elektrochemicznych, mikrobiologicznych lub fizycznych (np. topnienie i inne przemiany fazowe, uszkodzenia przez promieniowanie). Należy zaznaczyć, że nie tylko korozja może negatywnie wpływać na obudowę wyrobiska podziemnego. Działalność gospodarcza człowieka prowadzona w bezpośrednim otoczeniu wyrobiska może również negatywnie wpływać na jego stan techniczny i możliwości bezawaryjnego użytkowania. Tego typu czynniki zostały zaliczone do czynników antropogenicznych (ryc. 1).

4.1. Czynniki chemiczne

Woda jest najbardziej uniwersalnym rozpuszczalnikiem w przyrodzie. Aktywność wody wzrasta w miarę jak woda zostanie nasycona związkami chemicznymi np.: gazem, wodorotlenkami lub solami itp. (Domasławski, 2011; Duży i in., 2006; Sieniawska-Kuras & Potocki, 2012; Tyrowicz, 1967; Verges-Belmin, 2008). Wodne roztwory



Ryc. 1. Podział czynników biologicznych i fizycznych mających wpływ na wyrobiska podziemne

Fig. 1. Partition of biological and physical factors that have an influence on underground excavations

substancji chemicznej często powodują przyspieszenie procesów dezintegracyjnych w materiale obudowy. Woda może występować w skale (wody juwenilne) ale również może być dostarczana do skały jako woda pochodząca z deszczu, śniegu, lodu, lub mgły (wody meteoryczne). Woda osadzając się na materiale obudowy infiltrowuje w głąb materiału przez pory lub jest podciągana kapilarnie. Wewnątrz materiału, woda może zarówno wymywać jego składniki, jak też powodować ich pęcznienie.

W kontakcie z gazami zawartymi w atmosferze lub przesączając się przez skały otaczające wyrobisko, woda, tworzy roztwory słabych kwasów lub zasad, które znacznie przyspieszają korozję murów obudowy.

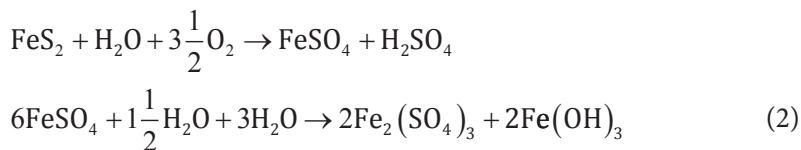
Najbardziej typowym przykładem może być działanie tzw. „kwaśnej” wody, tj. wody w której został rozpuszczony tlenek węgla, na wapień i kamienie zawierające ten związek w swoim składzie:



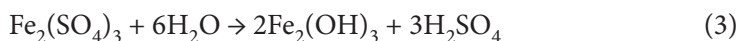
Powstały w wyniku tej reakcji kwaśny węglan wapnia jest stukrotnie bardziej rozpuszczalny niż czysty wapień. Powyższa reakcja może zachodzić również w drugą stronę, gdyż kwaśny węglan wapnia po wyschnięciu, na skutek karbonizacji przechodzi w węglan wapnia, a więc związek który jest stosunkowo odporny na działanie wody. Ze zjawiskiem tym mamy do czynienia przede wszystkim w jaskiniach.

Oprócz dwutlenku węgla zmiany w minerałach skałotwórczych wywołują również inne składniki powietrza takie jak tlen, azot oraz związki, które stanowią zanieczyszczenia powietrza powstałe najczęściej w procesie spalania. Możemy do nich zaliczyć: tlenki siarki, związki azotu, siarkowodór, chlorowodór i inne. Pod ich wpływem przebiegają reakcje utleniania, redukcji, hydratacji, dehydratacji, hydrolizy i karbonatyzacji, które w efekcie powodują rozkład kamienia tworzącego mur obudowy.

Tlen, również może negatywnie wpływać na materiał obudowy. Jako przykład można podać przebieg procesu utleniania pirytu lub markasytu, związków siarki często spotykanych w skałach. Piryt (FeS_2) na skutek utleniania przechodzi w siarczan żelaza, co pokazuje reakcja:



W dalszej kolejności siarczan żelaza ulega hydrolizie, w wyniku czego powstaje wodorotlenek żelaza:

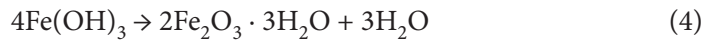


Następnie wodorotlenek żelaza ulega częściowej dehydratacji i przechodzi w limonit widoczny na obudowie w postaci rdzawych nacieków (ryc. 2):



Ryc. 2. Nacieki żelaziste na obudowie betonowej (fot. W. Preidl)

Fig. 2. Ferruginous dripstone on the concrete mining casing (photo W. Preidl)



Powstały w wyniku reakcji utleniania pirytu kwas siarkowy może się łączyć z wapniem tworząc gips który osadza się na murze obudowy.

4.2. Czynniki biologiczne

Czynniki biologiczne mają duży udział w procesie niszczenia skał budujących górotwór w otoczeniu wyrobiska podziemnego oraz kamienia, z którego wykonano obudowy. W skałach magmowych i metamorficznych najczęściej ulegają niszczeniu warstwy przypowierzchniowe natomiast w skałach osadowych procesy niszczenia obejmują również warstwy głębsze, co związane jest z dużą ich porowatością (ryc. 3). W skałach porowatych zniszczenia wywołane czynnikami biologicznymi mogą sięgać od kilku centymetrów do kilkunastu metrów w głąb struktury skalnej (Guzow, 1977; Ważny & Karyś, 2001).



Ryc. 3. Zniszczenie struktury kamienia przez system korzeniowy drzew (fot. W. Preidl)

Fig. 3. Destruction of stone structure by trees' roots (photo W. Preidl)

Wszystkie organizmy żywe, ze względu na sposób odżywiania się, generalnie, można podzielić na dwie grupy (Ważny & Karyś, 2001):

- organizmy heterotroficzne (cudzożywne) odżywiają się związkami organicznymi których same nie potrafią wytworzyć. Do grupy tej zaliczamy większość bakterii, grzybów, śluzowców, niektóre rośliny oraz zwierzęta; w wyrobiskach podziemnych i na ich obudowach spotykane są raczej rzadko; najczęściej występują w otoczeniu organizmów autotroficznych i żerują np. na ich resztkach;
- organizmy autotroficzne (samożywne), które swoje ciało budują przetwarzając związki organiczne wytwarzane przez siebie na drodze redukcji atmosferycznego tlenu węgla lub na drodze fotosyntezy; organizmy z grupy autotrofów można podzielić na dwie grupy – do pierwszej zaliczamy bakterie siarkowe i nitryfikujące, a do drugiej cyjanobakterie.

W wyrobiskach podziemnych rola zarówno organizmów autotroficznych jak i heterotroficznych jest dość ograniczona. Wynika to z specyficznych warunków jakie w tych wyrobiskach występują. Jednak tam gdzie dociera światło lub występują szczątki organiczne można spotkać skupiska glonów i grzybów zasiedlających skały wylomu jak i obudowę kamienną. Ich wpływ na korozję materiału obudowy jest stosunkowo niewielki ale mogą powodować powstanie drobnych wżerów i kanałków w strukturze muru. Kanałki i wżery mogą być powiększane poprzez oddziaływanie innych czynników takich jak np. zmiany temperatury czy też krystalizacja soli wewnątrz struktury muru obudowy.

Bardziej destrukcyjne oddziaływanie na mury w wyrobiskach podziemnych, zlokalizowanych płytko pod powierzchnią ziemi, mają systemy korzeniowe drzew. Głębokie systemy korzeniowe (8–10 m) wykształcają takie drzewa jak dąb, modrzew, lipa, topola, jodła, robinia akacjowa, kasztanowiec biały. Korzenie roślin oddziałują na kamień:

- bezpośrednio – korzenie wydzielając kwasy organiczne (chelatory), które reagując z kamieniem ułatwiają jego penetrację początkowo włosowatym korzeniom, które w miarę wzrostu rozsadzają go;
- pośrednio – substancje wydzielane przez system korzeniowy pobudzają wzrost drobnoustrojów przyczyniających się do chemicznego niszczenia kamienia.

Badania wykazały, że wydzieliny korzeniowe roślin wyższych mogą zawierać cukry (około 10 rodzajów), aminokwasy, kwasy organiczne (około 10 rodzajów), a także nukleotydy i enzymy. Na powierzchniach kamienia gromadzi się specyficzna mikroflora, zwana mikroflorą ryzosfery, która toruje korzeniom dostęp do coraz głębszych warstw kamienia. Tam też zachodzą wszystkie już opisane zjawiska biochemiczne (Ważny & Karyś, 2001).

4.3. Czynniki fizyczne

Z czynników fizycznych, mających negatywny wpływ na stan zachowania elementów kamiennych obudowy wyrobisk podziemnych, można wymienić między innymi wiatr, zmiany temperatury, wilgotność, wzrosty obciążenia konstrukcji i wstrząsy skał otaczających wyrobisko. Najczęściej na efekt końcowy uszkodzenia

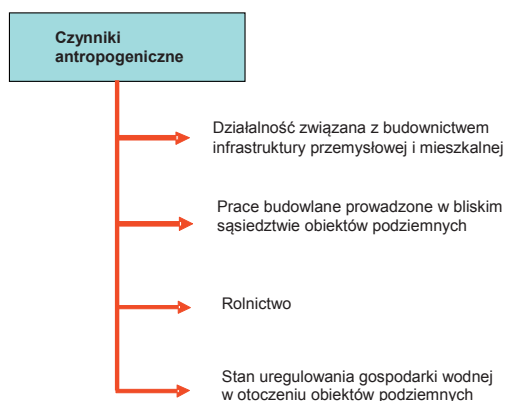
murów składa się oddziaływanie kilku lub jednocześnie wszystkich z wymienionych czynników (Ashurst & Ashurst, 1988; Ashurst & Dimes, 1998; Domaślawski, 1971, 1993; Lehmann, 1974; Tokarski & Wolfkes, 1969).

Przepływ powietrza w wyrobisku powoduje nanoszenie na mur drobnych osadów mechanicznych, drobin pyłu, które w warunkach dużej wilgotności mogą wchodzić w reakcje chemiczne z materiałem obudowy, w efekcie których powstają związki chemiczne powodujące jej destrukcję. Intensywne przepływy powietrza i unoszone przez nie drobiny np. kwarcu mogą mechanicznie uszkadzać obudowę, powodując zjawisko erozji eolicznej. Przepływ powietrza również przyczynia się do zmiany wilgotności obudowy, jej osuszenie. W tym przypadku może wystąpić zjawisko krystalizacji soli powstałych w murze. Ciśnienie powstałe podczas krystalizacji jest tak duże że może powodować rozsadzanie wewnętrznej struktury elementów kamiennych murów obudowy jak i samych skał w otoczeniu wyrobiska. Z wilgotnością ściśle wiąże się zjawisko przemarzania muru. Z tym zjawiskiem mamy do czynienia zwłaszcza w rejonach wlotów do wyrobisk podziemnych. W temperaturze poniżej 0°C woda zawarta w porach kamienia zamara, krystalizujący lód rozsada strukturę materiału obudowy.

Typowym czynnikiem mechanicznym niszczącym mury są wstrząsy i drgania jakim może być poddana obudowa wyrobiska podziemnego. Obciążenia zmienne w czasie, dynamiczne, mogą wywoływać naprężenia znacznie większe od naprężeń wywołanych obciążeniem statycznym obudowy, a tym samym mogą powodować uszkodzenia konstrukcji obudowy.

4.4. Czynniki antropogeniczne

Działalność związaną z budownictwem infrastruktury przemysłowej i mieszkalnej oraz rolnictwem, możemy zaliczyć do czynników antropogenicznych, mających negatywny wpływ na zachowanie i użytkowanie wyrobisk podziemnych (ryc. 4). Z tego typu zjawiskami mamy do czynienia zazwyczaj w przypadku wyrobisk



Ryc. 4. Podział czynników antropogenicznych mających wpływ na wyrobiska podziemne
Fig. 4. Partition of anthropogenic factors that have an influence on underground excavations

płatko zlokalizowanych. Prace budowlane, prowadzone w bliskim sąsiedztwie i powodujące zmiany naprężeń w skałach otaczających wyrobisko, negatywnie wpływają na stateczność jego obudowy, przyczyniając się do powstawania uszkodzeń mechanicznych (Duży i in., 2012, 2014; Penkala, 1966; Przedpeński, 1957; Sieniawska-Kuras & Potocki, 2012).

Intensywnie prowadzone rolnictwo, wpływa pośrednio na stan obudowy wyrobisk, powodując wprowadzenie do środowiska substancji chemicznych, które w połączeniu z wodą gruntową lub atmosferą tworzą związki chemiczne aktywne względem materiału obudowy wyrobiska. Również nieuregulowana gospodarka wodno-ściekowe może w konsekwencji doprowadzić do uszkodzenia obudowy kamiennej wyrobiska. Należy zwrócić uwagę, że wody gospodarcze dostające się w głąb struktur gruntu, powodują takie negatywne zjawiska jak sufozja, wypłukiwanie składników z materiału obudowy i zaprawy oraz zwiększona migracja wodnych roztworów związków chemicznych (Duży i in., 2014; Skalmowski, 1971; Tyrowicz, 1967). W gruntach gliniastych i ilastych przenikająca w głąb struktur gruntu woda powoduje ich pęcznienie, a tym samym wzrost obciążenia obudowy wyrobiska. Podobny może być, również, wpływ niewłaściwie prowadzonych prac budowlanych na powierzchni. (ryc. 5).

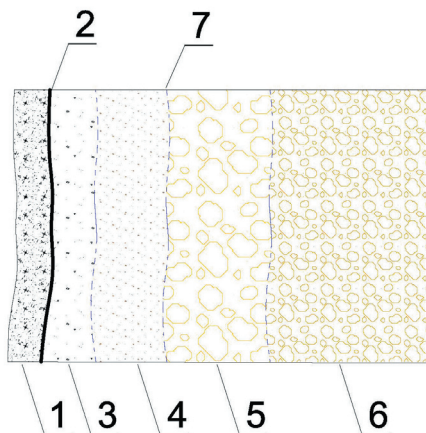
5. Destrukcja obudów kamiennych

Czynniki środowiskowe przyczyniają się w dużym stopniu do intensyfikacji procesu niszczenia materiału obudowy. Mechanizm destrukcji można przedstawić na przykładzie obudów kamiennych wykonanych kamienia naturalnego lub sztucznego o strukturze porowatej zawierającego w swoim składzie wapń. (Domasławski 2011; Lehmann, 1974; Niemcewicz, 2005; Verges-Belmin, 2008).



Ryc. 5. Destrukcja obudowy wyrobiska spowodowana pracami budowlanymi na powierzchni terenu (fot. W. Preidl)

Fig. 5. Destruction of mining casing caused by construction works carried out on the surface (photo W. Preidl)



Ryc. 6. Strefowy obraz zniszczeń w porowatym kamieniu o lepiszczu wapiennym; 1 – nawarstwienia zewnętrzne, 2 – pierwotna powierzchnia kamienia, 3 – nawarstwienia wewnętrzne, 4 – warstwa kamienia ulegającego dezintegracji, 5 – warstwa częściowo pozbawiona lepiszcza, 6 – kamień niezmienny, 7 – granica pomiędzy strefą kamienia ulegającego dezintegracji a strefą gdzie kamień został częściowo pozbawiony lepiszcza

Fig. 6. Pictures of damages in porous stone with limestone binder; 1 – external stratum, 2 – initial surface of the stone, 3 – internal stratum, 4 – stone layer undergoing degradation, 5 – layer with partially destroyed binder, 6 – unaffected stone

W przypadku obudowy kamiennej tego rodzaju wykształca się zewnętrzna warstwa (nr 1 na ryc. 6), składająca się z naskorupień powstałych przede wszystkim na skutek osadzania się zanieczyszczeń stałych np. z powietrza (sadza, substancje smoliste, substancje mineralne itp.). Wskutek migracji wody zawierającej węglan wapnia w strukturze kamienia, pod warstwą naskorupień, tworzy się np. gips. Na powierzchni kamienia jest ona widoczna jako „narastające” zgrubienie koloru szarego. Grubość tej warstwy może wynosić od kilku do kilkunastu milimetrów. Pod jej powierzchnią następuje niszczenie struktury pierwotnej kamienia. Dochodzi do powstania stref wewnętrznych, utworzonych głównie przez węglan wapnia ale również mogą to być produkty rozkładu krzemianów i glinokrzemianów.

Związki chemiczne powstałe w warstwie nr 3 powodują dezintegrację struktury kamienia (warstwa nr 4). Na skutek nawarstwień zewnętrznych zniszczenia w rejonie warstwy nr 4 nie są widoczne z zewnątrz. Jednak kiedy grubość nawarstwień osiągnie wielkość krytyczną (specyficzną dla każdego rodzaju skały), odpadają one odsłaniając ukryte zniszczenia kamienia. Cykl ten się powtarza doprowadzając po dostatecznie długim czasie do całkowitej destrukcji elementów obudowy kamiennej.

W przypadku skał nieporowatych możemy wyróżnić tylko trzy strefy rozkładu. Pierwszą stanowią nawarstwienia z osiadających substancji pelitowych oraz tworzącego się gipsu, druga to warstwa ulegająca dezintegracji, a trzecia to strefa

niezmienionego kamienia. W przypadku gdy jedną z głównych warstwowtórnych substancji jest gips, zniszczenia wywołane są przede wszystkim przez to, że objętość powstającego gipsu jest znacznie większa niż objętość por w których krystalizuje.. (Domasławski, 2011; Frazik, 1968; Tyrowicz, 1967).

Również w piaskowcach o lepiszczu ilastym i krzemionkowym, pozbawionych lepiszcza wapiennego, można wyróżnić trzy strefy zmian. Przy powierzchni znajdują się nawarstwienia, w skład których wchodzi zanieczyszczenia z powietrza oraz wylugowane lepiszcze. Drugą strefę, którą można traktować jako nawarstwienia wewnętrzne, tworzy migrujące lepiszcze. Trzecią strefę stanowi warstwa, z której następuje lugowanie lepiszcza, wykazująca mniejszą wytrzymałość mechaniczną i większą porowatość. Strefa ta ulega dezintegracji, wskutek czego zachodzą zniszczenia podobne jak w przypadku porowatych wapieni i piaskowców o lepiszczu wapiennym (ryc. 7). W piaskowcach o lepiszczu krzemionkowym procesy te następują w znacznie wolniejszym tempie.

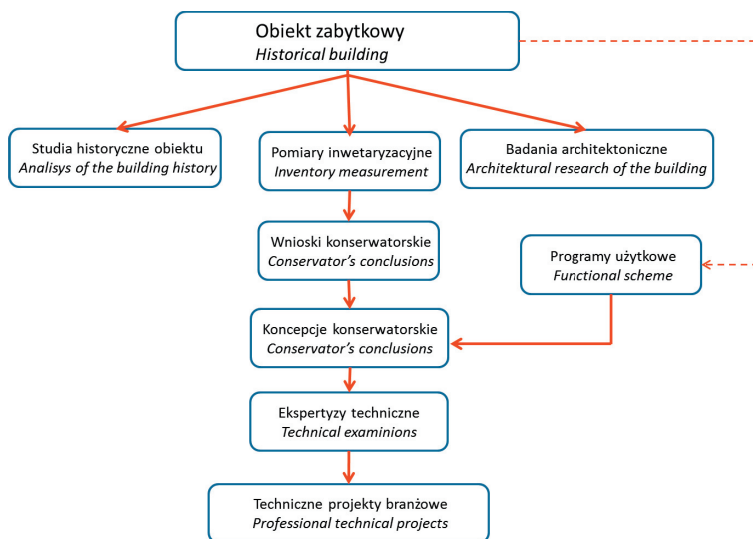


Ryc. 7. Przykład zespolonego oddziaływania fizycznych, chemicznych i antropogenicznych czynników destrukcyjnych w wyrobisku podziemnym (fot. W. Preidl)

Fig. 7. Example of joint influence of physical, chemical and anthropogenic destructive factors in underground excavation (photo W. Preidl)

6. Ochrona obudów kamiennych

Niestety nie można podać jednej, optymalnej metody ochrony obudowy kamiennej przed destrukcyjnym oddziaływaniem czynników środowiskowych. Każde wyrobisko jest umiejscowione w swoistych skałach, ma inny mikroklimat, a jego obudowa wykonana jest z odmiennych materiałów, również czynniki środowiskowe nie są identyczne dla każdego wyrobiska. Można tylko określić pewne ogólne wytyczne postępowania w celu ochrony i zabezpieczenia obudowy kamiennej wyrobiska (Chmura & Wieja, 2010; Wieja & Chmura, 2009).



Ryc. 8. Algorytm zabezpieczenia i ochrony zabytkowego obiektu podziemnego
Fig. 8. Protection and conservation of underground historical building – algorithm

Jedną z propozycji może być także przedstawiony poniżej algorytm postępowania przy realizacji ochrony obudowy kamiennej (ryc. 8) (Duży i inni 2014) oraz podział przedsięwzięć związanych z konserwacją na poszczególne etapy prac. Przy wyborze metody ochrony obudowy wyrobiska podziemnego należy uwzględnić nie tylko materiał z którego obudowa została wykonana ale również skały otaczające wyrobisko, górotwór oraz mikroklimat w wyrobisku. Należy również starać się w jak największym stopniu nie ingerować w autentyzm historyczny wyrobiska. Wskazaniem jest również skorzystanie z szeregu sprawdzonych już metod wykorzystywanych w konserwacji i zabezpieczaniu powierzchniowych budowli zabytkowych (Agnew & Bridgland, 2006; Ashurst & Ashurst, 1988; Ashurst & Dimes, 1998; Doehne & Price, 2010; Domaśławski, 1971, 2011; Niemcewicz, 2005; Penkala, 1966; Przedpeński, 1957; Siegesmund & Snethlage, 2014; Siegesmund i in., 2002; Sieniawska-Kuras & Potocki, 2012; Winkler, 1994).

Prace związane z zabezpieczeniem wyrobiska podziemnego o znaczeniu historycznym można podzielić na cztery etapy.

Etap I – obejmuje prace związane z uregulowaniem stosunków wodnych w wyrobisku i jego otoczeniu. Woda jako najbardziej aktywny rozpuszczalnik migrując przez warstwy skalne doprowadza do obudowy związki chemiczne, które mogą być agresywne względem kamienia obudowy i jej zaprawy.

Etap II – ustabilizowanie mikroklimatu w wyrobisku powinno sprowadzić się do podjęcia starań zapewniających stałą temperaturę i wilgotność w wyrobisku. Najbardziej niekorzystne dla obudowy są duże wahania temperatur oraz zmienna wilgotność.

Etap III – uzupełnienie ubytków w obudowie i wypełnienie pustek za obudową jakie mogły powstać np. pod wpływem wody. Należy zapewnić dobre powiązanie obudowy z otaczającą skałą.

Etap IV – Trwałe zabezpieczenie obudowy przed dalszą korozją.

Dodatkowym elementem mającym bardzo duży wpływ na wybór środków prewencyjnych są koszty jakie w związku z powyższym należy ponieść. Należy też rozpatrzyć wpływ podjętych działań na autentyzm zabezpieczanego wyrobiska i jego obudowy. Jak już to przedstawiono woda, a tym samym wilgotność murów i ociosów skalnych, ma decydujący wpływ na przebieg i intensywność procesów destrukcyjnych. W tym aspekcie należy dążyć do ustabilizowania poziomu wilgotności murów obudowy. Najważniejszym jest ograniczenie migracji wody z górotworu do wyrobiska i w kierunku przeciwnym. W krańcowych przypadkach należy wytworzyć na zewnętrznej powierzchni obudowy warstwę wodoszczelną ograniczającą dopływ wody do wyrobiska.

Po uregulowaniu stosunków wodnych w skałach otaczających i ograniczeniu migracji wody przez obudowę do wyrobiska, należy przystąpić do zabezpieczenia muru obudowy. Po oczyszczeniu go z nawarstwień biologicznych, chemicznych i mechanicznych należy uzupełnić najbardziej uszkodzone kamienie muru i przeprowadzić jego spoinowanie (Ashurst, 1994; Domaśławski, 1971; Lehmann, 1974; Sieniawska-Kuras & Potocki, 2012).

Podczas rewitalizacji starych murów bardzo ważnym jest dostosowanie, użytego; podczas napraw, spoiwa do rodzaju kamienia z którego obudowa została wykonana oraz wilgotności i temperatury w wyrobisku. Stosowane zaprawy powinny być zbliżone swoimi właściwościami do zapraw użytych podczas stawiania muru obudowy (Duży i in., 2006, 2012, 2014).

Do łączenia elementów kamiennych i spoinowania cegieł lub kamieni używano niegdyś zapraw wapiennych z dodatkiem kruszyw powodujących wprawdzie spadek jej wytrzymałości ale zwiększających porowatość zaprawy. Zaprawa ta zapewniała odprowadzenie wody z kamienia, gdyż odgrywała rolę drenażu ściągającego wilgoć z mniej porowatego kamienia lub cegły. Stosowanie do spoinowania zapraw cementowych, które charakteryzują się znacznie mniejszą porowatością od zapraw wapiennych może powodować dodatkowe uszkodzenia kamienia obudowy. Utrudnia to odpływ wilgoci z muru, która w związku z powyższym zbiera się na zewnętrznych jego powierzchniach. W następstwie obserwuje się wykruszanie krawędzi na obwodzie lica kamienia i cegieł. Niszczeniu ulega więc kamień, a nie jak w przypadku zapraw wapiennych – spoina, którą można stosunkowo łatwo i niskim kosztem uzupełnić.

Używanie zapraw o niższej nasiąkliwości, lecz o większej wytrzymałości mechanicznej i współczynniku rozszerzalności cieplnej odmiennym, niż kamień z którego wykonano mur, również może być przyczyną zniszczeń. Objawami tego są rozkruszanie się, osypywanie, pęknięcie bądź złuszczenie się warstw kamienia na granicy z zaprawą. Stosowanie zapraw bardziej nasiąkliwych i o mniejszej wytrzymałości mechanicznej chroni kamień przed destrukcją. Zaprawy takie spełniają rolę buforu,

chłoną agresywne roztwory z kamienia i pod ich wpływem oraz w wyniku zmian temperatury i wilgotności ulegają zniszczeniu.

Ważnym elementem zabiegów ograniczających destrukcyjny wpływ środowiska na obudowę jest zapewnienie odpowiedniej wentylacji wyrobisku. Przepływ powietrza przez wyrobisko powinien być stabilny niezależnie od pory roku. Uwaga ta dotyczy zwłaszcza wyrobisk płytkich, gdzie często obserwuje się zmianę kierunku ruchu powietrza w zależności od pory roku. Intensywność przepływu powietrza nie powinna doprowadzać do nadmiernego przesuszania obudowy.

7. Podsumowanie

Omawiając zagadnienie ochrony wyrobisk podziemnych zabezpieczonych obudową kamienną nie można podać jednoznacznej metodologii postępowania. Każde wyrobisko należy traktować oddzielnie, uwzględniając jego specyficzne warunki środowiskowe, rodzaj obudowy ale również jego przyrodnicze i historyczne walory. Zabiegi zmierzające do zabezpieczenia wyrobiska i jego obudowy, choćby najskuteczniejsze, nie mogą doprowadzić do zniszczenia jego specyfiki i walorów historycznych. Nie można np. wyrobiska XVII-wiecznego wykonanego w skałach kruszonośnych, wskutek prowadzenia prac prewencyjnych, zamienić w suchy betonowy chodnik. Jeszcze bardziej skomplikowane jest zagadnienie prowadzenia prac zabezpieczających w wyrobiskach podziemnych gdzie np. prace zabezpieczające mogą tak diametralnie zmienić mikroklimat, że wyrobisko stanie się „martwe”. Zabiegi uszczelniania konturów wyłomu mogą doprowadzić do zahamowania procesów naturalnych np. tworzenia się „stalaktytów” i „draperii” na ścianach wyrobiska. Tak jak już wspomniano w przypadku wielu prowadzonych prac i analiz pomocnym będzie skorzystanie z metod wypracowanych dla obiektów zabytkowych powierzchniowych. Nie do przecenienia są tu także zalecenia i sugestie wypływające z postanowień Karty Weneckiej (*Międzynarodowa Karta Konserwacji i Restauracji Zabytków i Miejsc Zabytkowych*), która to została przyjęta w 1964 r. przez II Międzynarodowy Kongres Architektów i Techników Zabytków w Wenecji (Hardy, 2008). Warto na zakończenie przytoczyć jej fragment.

1. *Pojęcie zabytku obejmuje zarówno odosobnione dzieło architektoniczne, jak też zespoły miejskie i wiejskie, oraz miejsca, będące świadectwem poszczególnych cywilizacji, ewolucji o doniosłym znaczeniu, bądź wydarzenia historycznego. Rozciąga się ono nie tylko na wielkie dzieła, ale również na skromne obiekty, które z upływem czasu nabrały znaczenia kulturowego*
2. *Konserwacja i restauracja zabytków stanowią dyscyplinę, która odwołuje się do wszystkich gałęzi nauki i techniki, mogących wnieść wkład do badań i ochrony dziedzictwa zabytkowego [...]*
4. *Konserwacja zabytków zakłada przede wszystkim obowiązek ciągłości ich należytego utrzymania.*
5. *Konserwacji zabytków zawsze sprzyja ich użytkowanie na cele użyteczne społecznie; użytkowanie takie jest zatem pożądane, nie może wszakże pociągać za sobą zmian układu bądź wystroju budowli. Są to granice, w jakich należy pojmować*

- i można dopuszczać zagospodarowanie, wymagane przez ewolucję zwyczajów i obyczajów.*
6. *Konserwacja zabytku zakłada konserwację otoczenia w jego skali. Jeżeli otoczenie dawne przetrwało, będzie ono podlegać ochronie i wszelka dobudowa, wszelka rozbiórka i wszelka przeróbka, która mogłaby zmienić stosunki brył i barw, zostanie zakazana [...]*
 9. *Restauracja jest zabiegiem, który powinien zachować charakter wyjątkowy. Ma ona za cel zachowanie i ujawnienie estetycznych i historycznych wartości zabytku oraz polega na poszanowaniu dawnej substancji i elementów stanowiących autentyczne dokumenty przeszłości [...]*
 10. *Kiedy techniki tradycyjne okazują się niewydolne, wzmocnienie zabytku można zapewnić sięgając do wszelkich nowoczesnych technik konserwatorskich i budowlanych, których skuteczność wykazałyby dane naukowe i zapewniało doświadczenie.*
 11. *Wartościowy wkład każdej epoki do dziejów budowy zabytku powinien zostać uszanowany, jako że jedność stylowa nie jest celem, do którego należałoby zmierzać w toku restauracji.*

Literatura

- ADAMS A. E., MACKENZIE W. S., 1998. *A colour atlas of carbonate sediments and rocks under the microscope*. Manson, London.
- AGNEW N., BRIDGLAND J. (red.), 2006. *Of the past, for the future. Integrating archaeology and conservation*. Proceedings of the Conservation Theme at the 5th World Archaeological Congress, Washington, D.C., 22–26 June 2003. The Getty Conservation Institute, Los Angeles.
- ASHURST N., 1994. *Cleaning Historic Buildings*. Donhead Publishing. Londyn.
- ASHURST, J., ASHURST N., 1988. *Practical Building Conservation. English Heritage Technical Handbook*. Halsted Press. Nowy Jork.
- ASHURST J., DIMES F. G. (red.), 1998. *Conservation of Building and Decorative Stone*. Butterworth-Heinemann Series in Conservation and Museology. Butterworth-Heinemann. Oxford.
- AUGUSTINIK A. I., 1980. *Ceramika*. Arkady. Warszawa.
- BOLEWSKI A., PARACHONIAK W., 1982. *Petrografia*. Wyd. Geol. Warszawa.
- CHMURA J., WIEJA T., 2010. *Górnictwo zabezpieczania i rewitalizacji podziemnych obiektów zabytkowych*. Ochr. Zabytków, 1-4: 245–254.
- CHUDEK M., JANICZEK S., PLEWA F., 2001. *Materiały w budownictwie geotechnicznym. T. 1. Materiały w budownictwie podziemnym*. Wyd. Polit. Śl., Gliwice.
- DOEHNE E., PRICE C. A., 2010. *Stone conservation. An overview of current research*. The Getty Conservation Institute. Los Angeles.
- DOMASŁAWSKI W., 1971. *Sposoby usuwania nawarstwień powierzchniowych z kamiennych obiektów zabytkowych*. Przed. Państw. Pracow. Konserw. Zabyt. Warszawa.
- DOMASŁAWSKI W., 1993. *Profilaktyczna konserwacja kamiennych obiektów zabytkowych*. Wyd. Uniw. M. Kopernika. Toruń.
- DOMASŁAWSKI W. (red.), 2011. *Zabytki kamienne i metalowe, ich niszczenie i konserwacja profilaktyczna*. Wyd. Uniw. M. Kopernika, Toruń.
- DOMASŁAWSKI W., KĘSY-LEWANDOWSKA M., KRAUSE J., ŁUKASZEWICZ J., 2000. *Badania nad konserwacją murów ceglanych*. Wyd. Uniw. M. Kopernika. Toruń.

- DUŻY S., DYDUCH G., PREIDL W., BĄCZEK A., CZEMPAS A., 2014. *Problematyka ochrony i zabezpieczenia podziemnych wyrobisk w obudowie kamiennej*. Hereditas Minariorum, 1: 187–196.
- DUŻY S., PREIDL W., BĄCZEK G., DYDUCH Ł., PAWLAS Ł., 2012. *Ocena niezawodności i bezpieczeństwa konstrukcji obudowy kamiennej wyrobisk Kopalni Ćwiczebnej Muzeum Miejskiego „Szttygarka” w Dąbrowie Górniczej poddanych niekorzystnemu oddziaływaniu środowiska*. Górn. i Geol., 1: 47–58.
- DUŻY S., PREIDL W., RÓŻACKI R., 2006. *Wpływ czynników środowiskowych na trwałość i walory użytkowe obudowy kamiennej Głównej Kluczowej Sztolni Dziedzicznej w Zabrze*. Pr. Nauk. Inst. Górn. Polit. Wr., 32: 53–62.
- FLYNN B., 2011. *The complete guide to building with rocks & stone. Stonework projects and techniques explained simply*. Atlantic Publishing Group Inc. Ocala.
- FRAZIK J. T., 1968. *Megaskopowa analiza materiału, techniki i stratygrafii murów zabytkowych budowli*. Czasopismo Techniczne, 3: 1–8.
- GIMPEL J., 1968. *Jak budowano w średniowieczu*. PWN. Warszawa.
- GUZOW B., 1977. *Porosty a zabytki*. Ochr. Zabyt., 4: 395–398.
- HARDY M. (red.), 2008. *The Venice Charter Revisited: Modernism, Conservation and Tradition in the 21st Century*. Cambridge Scholars Publishing. Newcastle upon Tyne.
- KOMARNICKI E., 1988. *Materiały budowlane*. Akad. Roln. im. H. Kołłątaja, Kraków.
- KOSMAŁA M., SUSKI Z., 1994. *Materiały budowlane w architekturze krajobrazu*. Wyd. SGGW. Warszawa.
- KOZŁOWSKI S., 1986. *Surowce skalne Polski*. Wyd. Geol. Warszawa.
- KOZŁOWSKI K., ŻABA J., FEDIUK F., 1986. *Petrologia skał metamorficznych*. Wyd. Uniw. Śl. Katowice.
- LEHMANN J., 1974. *Brudzenie i niszczenie materiałów kamiennych w architekturze zabytkowej oraz sposoby ich czyszczenia*. Ochr. Zabyt., 3: 193–206.
- MACKENZIE W. S., DONALDSON C. H., GUILFORD C., 1982. *Atlas of igneous rocks and their textures*. Longman Scientific & Technical. Harlow.
- MIKOŚ T., CHMURA J., TAJDUŚ A., 2014. *Górnictwo-geotechniczne metody adaptacji i rekonstrukcji zabytkowych podziemi: 80 lat doświadczeń Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie w dziele ratowania najcenniejszych wyrobisk*. Wyd. AGH. Kraków.
- NEVILLE A. M., 2012. *Właściwości betonu*. Polski Cement Sp. z o.o. Kraków.
- NIEMCEWICZ P., 2005. *Konserwacja wapienia dębnickiego*. Wyd. Uniw. M. Kopernika. Toruń.
- OSIECKA E., 2002. *Materiały gipsowe w budownictwie – dawniej i dziś*. Cement-Wapno-Gips, 5: 203–205.
- PENKALA B., 1966. *Konserwacja kamienia w budownictwie*. PWN. Warszawa.
- PREIDL W., 2008. *Ocena jakości wykonania obudowy górniczej w świetle uregulowań prawnych w Polsce. Cz. 1: Definicja obudowy górniczej*. Budownictwo Górnicze i Tunelowe, 4: 12–16.
- PREIDL W., 2009. *Ocena jakości wykonania obudowy górniczej w świetle uregulowań prawnych w Polsce. Cz. 2: Materiały używane do obudów górniczych; obudowa kamienna*. Budownictwo Górnicze i Tunelowe, 2: 35–48.
- PRZEDPEŁSKI Z., 1957. *Konserwacja kamienia w architekturze*. Budow. i Arch. Warszawa.
- SHADMON A., 1996. *Stone. An introduction*. Intermediate Technology. Londyn.
- SIEGISMUND S., SNETHLAGE R. (red.), 2014. *Stone in architecture. Properties, durability*. Springer. Heidelberg.

- SIEGSMUND S., WEISS T. N., VOLLBRECHT A. (red.), 2002. *Natural stone, weathering phenomena, conservation strategies anbed case studies*. Geol. Soc. Special Publication 205. The Geological Society. London.
- SIENIAWSKA-KURAS A., POTOCKI P., 2012. *Renowacja elementów architektury*. Wyd. KaBe. Krosno.
- SKALMOWSKI W., 1971. *Chemia materiałów budowlanych*. Arkady. Warszawa.
- SKALMOWSKI W., 1972. *Technologie materiałów budowlanych*. Arkady. Warszawa.
- SZYMAŃSKI E., 2004. *Materiały budowlane*. Wyższa Szk. Ekologii i Zarządzania. Warszawa.
- ŚWIECHOWSKI Z., 1961. *Wczesne budownictwo ceglane w Polsce*. Studia i Mat. z Historii Kultury Materialnej, 10, Studia z dziejów rzemiosła i przemysłu, 1: 83–124.
- TAJCHMAN J., 1995. *Konserwacja zabytków architektury – uwagi o metodzie*. Ochrona Zabytków, 2: 150–159.
- TAJCHMAN J., 2005. *Konserwacja ruin historycznych. Uwagi o metodzie*. Ochrona Zabytków, 4: 27–46.
- TAJCHMAN J., NAJDER T., 2006. *Cement, beton i żelbet w zabytkach architektury: wady i zalety. Naprawy i wzmocnienia konstrukcji budowlanych – konstrukcje żelbetowe*. XXI Ogólnop. Konf. Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji, Szczyrk 8–11 marca 2006 r., III: 145–213.
- TOKARSKI Z., WOLFKE S., 1969. *Korozja ceramicznych materiałów budowlanych*. Arkady. Warszawa.
- TYROWICZ T., 1967. *Rodzaje kamieni budowlanych i ich odporność na działania czynników atmosferycznych*. Bibl. Muzeal. i Ochr. Zabyt. 19: 53–70.
- VERGES-BELMIN V. (red.), 2008. *ICOMOS-ISCS: Illustrated glossary on stone deterioration patterns*. Monuments and Sites, XV. ICOMOS International Scientific Committee for Stone (ISCS). Paryż.
- WAŻNY J., KARYŚ J., 2001. *Ochrona budynku przed korozją biologiczną*. Arkady. Warszawa.
- WESTFAL L., 2003. *Beton czyli sztuczny kamień*. Renowacje i Zabytki, 2: 87–100.
- WIEJA T., CHMURA J., 2009. *Metodologia prac projektowych i organizacyjnych przy adaptacji zabytkowych wyrobisk na podziemne trasy turystyczne*. Górn. i Geoinż., 3/1: 445–454.
- WINKLER E. M., 1994. *Stone in architecture. Properties, durability*. Springer-Verlag. Berlin.
- WIRSKA-PARACHONIAK M., 1972. *Wybrane zagadnienia z historii materiałów wiążących*. Wyd. AGH. Kraków.
- YARDLEY B. W. D., MACKENZIE W. S., GUILFORD C., 1998. *Atlas of metamorphic rocks and their textures*. Addison Wesley Longman Ltd. Harlow.

PROTECTION, MAINTENANCE AND RENOVATION OF STONE CASINGS OF UNDERGROUND EXCAVATIONS

*history of mining, mining excavations,
preservation of mining heritage*

Protection of underground excavations against the negative impact of environmental factors is an extremely complicated and complex issue. The construction, which may be made of natural or artificial stone, undergoes destructive influence depending on the type and quality of the material from which it was made. Other factors such as execution time, the manner of execution and quality of materials used in construction will also influence its resistance. Environmental factors affecting the underground

constructions can be very diverse as well. The nature and intensity of their activities depend on the type of rock, the depth of the excavation, water conditions on the surface and in the rocks surrounding the excavation. The way of ventilation and the chemical composition of air entering the pit determine the intensity and type of material corrosion. There is neither one clear diagnosis nor the methodology on solving the issue on protection and maintenance of underground constructions. Each pit needs to be examined individually, taking into account special environmental conditions, type of construction but also its natural and historical values. Even the most effective activities aimed at protecting excavations cannot lead to the destruction of their outlook and historical assets.