

## **Pomiary wilgotności murów z kazimierskiej opoki wapiastej przy zastosowaniu metody TDR**

Zbigniew Suchorab<sup>1</sup>, Danuta Barnat-Hunek<sup>2</sup>, Henryk Sobczuk<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Wydział Inżynierii Środowiska, Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska,  
e-mail: Z.Suchorab@fenix.pol.lublin.pl

<sup>2</sup> Wydział Inżynierii Budowlanej i Sanitarnej, Instytut Budownictwa,  
e-mail: d.barnathunek@op.pl

<sup>3</sup> Wydział Inżynierii Środowiska, Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska,  
e-mail: H.Sobczuk@fenix.pol.lublin.pl

**Streszczenie:** W referacie przedstawiono badania obejmujące monitoring parametrów fizycznych i analizę składu mineralogiczno – petrograficznego opoki wapiastej z regionu Kazimierza Dolnego. Wykorzystano między innymi techniki reflektometryczne TDR (Time Domain Reflectometry) jako jedno z badań wilgotnościowych. Badaniom poddano kamień z Zamku w Janowcu nad Wisłą, którego mury najlepiej odzwierciedlają postępującą korozję zależną od ekspozycji zewnętrznej i wieku murów oraz kamień z kamieniołomu w Kazimierzu Dolnym. Badania porozymetryczne opoki wapiastej z elewacji południowej i północnej Zamku w Janowcu oraz kamienia z kamieniołomu wykazały różnice w zakresie zmian struktury kamieni. Różnice te przyczyniają się do odmiennego zachowania opoki w procesach podciągania kapilarnego wody i roztworów soli. Związane jest to z odpowiednim doбором ochrony konserwatorskiej, preparatów zabezpieczających mur, których rodzaj i aplikacja zależą m. in. od cech porozymetrycznych podłoża. W referacie przedstawiono technikę pomiarową TDR jako dobrą alternatywę do pomiarów transportu wody w porowatych materiałach budowlanych oraz innych parametrów wodnych charakteryzujących dany materiał.

**Słowa kluczowe:** opoka wapiasta, destrukcja murów, wilgotność, techniki reflektometryczne

### **1. Wstęp**

Istotnym problemem konserwatorskim i technologicznym jest ochrona obiektów wystawionych na działanie czynników atmosferycznych, zwłaszcza wody. W wyniku oddziaływań środowisk korozyjnych na kamienne mury następują zmiany własności fizycznych i mechanicznych kamienia i zapraw. Bardzo niekorzystną cechą opoki wapiastej z regionu Kazimierza Dolnego i Nasiłowa jest porowata struktura, która przekłada się na jej niską odporność na działanie wody. W praktyce wyrażone jest to przede wszystkim niską mrozoodpornością oraz dużą nasiąkliwością. Tak nieodporny na wodę i mróz kamień ulega przyspieszonej destrukcji zwłaszcza, gdy znajdują się w nim sole rozpuszczalne w wodzie, które dodatkowo potęgują procesy jego niszczenia. W znacznym stopniu cechy te obecnie eliminują wykorzystanie opoki jako materiału konstrukcyjnego i wykończeniowego o ekspozycji zewnętrz-

nej, choć w praktyce była ona od wieków szeroko stosowana w budownictwie i architekturze Lubelszczyzny. Opoka wapnista jest kamieniem o niejednorodnej, porowatej strukturze w związku z tym źródło pochodzenia kamienia, jego ekspozycja w budynku, wiek wbudowania mogą mieć istotny wpływ na skuteczność przeprowadzanych zabiegów konserwatorskich tj. odsalanie, wzmacnianie, hydrofobizację kamienia.

Przed przystąpieniem do prac remontowych należałoby wykonać gruntowną ocenę stanu technicznego obiektu oraz poznać charakterystykę materiału, z jakiego został wzniesiony.

W artykule przedstawiono badania obejmujące monitoring parametrów fizycznych i analizę składu mineralogiczno – petrograficznego kamienia.

W artykule zaproponowano między innymi technikę reflektometryczną TDR (Time Domain Reflectometry) jako perspektywiczną alternatywę w badaniach wilgotnościowych.

Do tego celu zakwalifikowano Zamek w Janowcu, którego mury najlepiej odzwierciedlają postępującą korozję zależną od ekspozycji zewnętrznej i wieku murów poza tym istnieje możliwość pobrania odpowiedniej ilości próbek z charakterystycznych miejsc, co nie zawsze jest możliwe na innych obiektach zabytkowych.

## 2. Wpływ warunków zewnętrznych na stan murów

### ***Woda***

W literaturze polskiej i zagranicznej bardzo często sygnalizowany jest problem zawilgocenia i zasolenia obiektów zabytkowych i coraz częściej współczesnych.

Murowane obiekty zabytkowe i współczesne narażone są na oddziaływanie wilgoci, a w wyniku braku odpowiedniej izolacji przeciwwilgociowej charakteryzują się nadmiernym zawilgoceniem. Skutki występowania podwyższonej wilgotności są widoczne szczególnie na obiektach zabytkowych, starych, w których brak zabezpieczeń przeciwwodnych. Niemniej jednak współcześnie spotykamy obiekty, przy wznoszeniu, których nie zachowano zasad sztuki budowlanej, czy też eksploatowano niezgodnie z przeznaczeniem. Następstwem tego jest obniżenie trwałości murów spowodowane między innymi dużym zawilgoceniem i zasoleniem. W Niemczech oraz Austrii przyjmuje się, że około 80% [1] uszkodzeń zabytkowych obiektów powstało w wyniku stałego lub okresowego zawilgocenia ścian.

Woda jest bezpośrednią przyczyną postępującej dezintegracji kamiennych murów. Zwłaszcza wapienie są bardzo nieodporne na działanie wody. Wskutek rozpuszczającego działania wody zwłaszcza kwaśny węglanu wapnia  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  wytrącany jest z materiału, następuje przemieszczanie lepiszcza kamienia z partii wewnętrznych i jego akumulacja w warstwie powierzchniowej, wskutek czego powierzchnia staje się nierówna, chropowata z licznymi zagłębieniami [3].

Niezależnie od źródła pochodzenia wilgoci w budynku, skutki nadmiernego zawilgocenia są następujące:

- obniżenie właściwości fizyko – mechanicznych materiałów budowlanych, co powoduje zmniejszenie trwałości murów, spadek wytrzymałości na ściskanie nawet o 50% (w przypadku opoki wapnistej), pogorszenie parametrów termoizolacyjnych przegród, co powoduje wzrost zapotrzebowania na energię do ogrzania budynku,

- degradacja strukturalna przegród wywołana korozją mechaniczną, biologiczną, chemiczną. Podwyższona wilgotność materiałów budowlanych powoduje erozję, czyli wymywanie składników mineralnych, z których składa się materiał, a także przyczynia się do rozwoju grzybów domowych i pleśniowych oraz do porażenia elementów drewnianych przez mikroorganizmy i owady. Korozja mechaniczna przyspieszana jest głównie przez mróz i nadmierną insolację. Przyczyną postępujących procesów korozji chemicznej są sole rozpuszczalne w wodzie, które powodują powolną destrukcję murów, a zwłaszcza tynków,

- pogorszenie warunków higieniczno – sanitarnych poprzez nadmierną wilgotność powietrza w pomieszczeniach mieszkalnych oraz wadliwą wentylację, co stwarza niekorzystny mikroklimat w pomieszczeniach. Powstające grzyby i pleśnie uniemożliwiają dalszą eksploatację pomieszczeń ze względu na szkodliwy wpływ na zdrowie użytkowników.

Za transport wody przez mur kamienny odpowiadają m. in.:

- podciąganie kapilarne wody, które jest tym większe, im większy stopień zwilżania materiału i mniejsze napięcie powierzchniowe cieczy. Jeśli napięcie powierzchniowe materiału stykającego się z wodą jest zbliżone do wartości napięcia powierzchniowego wody, wówczas materiał ten jest dobrze zwilżalny. Tak jest w przypadku materiałów krzemianowych, gdyż ich napięcie powierzchniowe wynosi około 73 – 74 mN/m, a wody około 72 mN/m.

- infiltracja wód gruntowych do muru spowodowana przez brak lub nieszczelności izolacji przeciwwilgociowej pionowej. Infiltracja wód gruntowych jest proporcjonalna do naporu wody, który zwiększa się ze wzrostem poziomu wód gruntowych lub ze wzrostem ilości opadów atmosferycznych.

- kondensacja pary wodnej na powierzchni muru w porach i kapilarach otwartych jest związana ze strukturą materiału tj. porowatością, wielkością i kształtem porów. Materiały drobnoporowate tj. opoka wapnista charakteryzują się tym, iż para wodna i woda długo utrzymują się w ich porach i odparowują powoli. Im kapilary mają większe średnice, tym woda szybciej odparowuje.

Intensyfikacja oddziaływania wody na kamień uzależniona jest od wielu czynników. Przede wszystkim związana jest ze składem mineralnym kamienia, jego teksturą, strukturą.

Domasłowski podaje, że kalcyt i krzemionka obecne w opoce wapnistej jako ciała polarne o właściwościach hydrofilnych łatwo otaczają się błonkami solwacyjnymi wody i roztworów soli. Błonki te zmniejszają siły przyciągania między cząstkami skałotwórczymi. Jeżeli siły adhezji między wodą, a składnikami kamienia są większe niż adhezja między samymi składnikami kamienia, to kamień ulega dezintegracji [3].

Podsumowując, niszczące działanie wody zależy od: stopnia wypełnienia przez nią porów, wielkości porów, kształtu porów, składu mineralnego i nasiąkliwości kamienia.

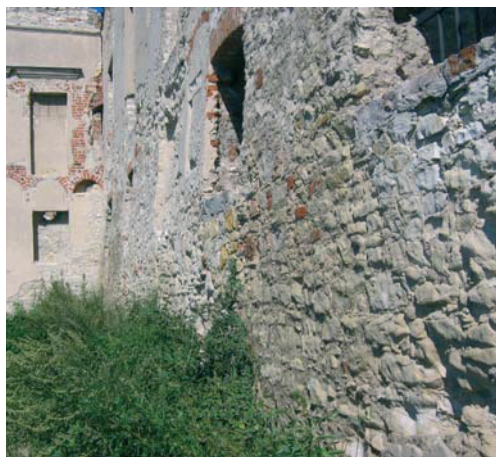
### ***Zmiany temperatury***

Wody opadowe mogą niszczyć mury w sposób mechaniczny, czego dowodem są szkody mrozowe, szczególnie widoczne na elewacjach południowych, gdyż tam częstotliwość cykli zamarzania i odmarzania jest największa. Wraz z obniże-

niem temperatury, wzrasta ciśnienie rozsadzające lodu, które wynosi  $21,15 \text{ kN/cm}^2$  w temperaturze  $-22^\circ\text{C}$ . Mechanicznej korozji ulegają też kamienie zawierające minerały ilaste, które pęcznieją pod wpływem wody i stają się plastyczne. Powoduje to duży spadek wytrzymałości. Najmniej odporne na działanie mrozu są kamienie drobnoporowate wykazujące dużą nasiąkliwość, ponieważ kapilary o małych średnicach wypełniają się całkowicie wodą. Ciśnienie lodu wzrasta wraz z obniżeniem temperatury np. przy temperaturze  $0^\circ\text{C}$  wynosi  $60 \text{ N/cm}^2$ , a przy  $-20^\circ\text{C}$  wynosi  $19700 \text{ N/cm}^2$ .

Temperatura dodatnia również może powodować uszkodzenia powierzchni kamienia. Prężność pary wodnej wzrasta w kapilarach nasyconych wodą w wyniku ogrzania wody. Wywołuje ona ciśnienie na ścianki kapilar, wskutek czego niszczy materiał. Jednak do takich uszkodzeń dochodzi rzadko. Gwałtowne zmiany temperatury, w których woda nie uczestniczy, mogą wywoływać intensywne zniszczenia. Główną przyczyną jest duża rozszerzalność termiczna minerałów, niejednorodność ich budowy, niska przewodność cieplna. Skutki szczególnie widoczne są na południowych elewacjach budynków. Ulegają one szybszemu zniszczeniu. Pod wpływem naprężeń termicznych następuje dezintegracja strukturalna, powstają naprężenia ścinające między warstwami o różnej temperaturze np. między tynkiem a podłożem. Od intensywności insolacji, a więc i wahań temperatury zależą mechanizmy zniszczeń.

Przykładem zniszczeń spowodowanych przez wahania temperatury, naprężenia termiczne, wielokrotne cykle zamarzania i odmarzania są chociażby przypory zabytkowego XVI – wiecznego Spichlerza Ulanowskich w Kazimierzu Dolnym nad Wisłą [4], czy mury omawianego w artykule Zamku w Janowcu (Rys. 1, 2). Wieloletni efekt procesów korozyjnych porowatej opoki wapnistej jest odmienny w zależności od ekspozycji w stosunku do stron świata, co przedstawiają Rys. 1 i 2. XVI-wieczny mur od strony południowej wykazuje liczne zniszczenia kamienia i zaprawy, ubytki kamienia, brak zespolenia zaprawy z kamieniem. Natomiast mur od strony północnej jest jednolity, stabilny, z licznymi szarymi nawarstwieniami.



Rys. 1 Skorodowany mur na elewacji południowej. Zamku w Janowcu. Miejsce pobrania kamienia K2.

Fig. 1. Corroded wall on the southern elevation of the Janowiec Castle. Place of K2 stone sampling.



Rys. 2. Elewacja północna Zamku w Janowcu. Miejsce pobrania kamienia K3  
Fig. 2. Northern elevation of the Janowiec Castle. Place of K3 stone sampling.

### ***Sole rozpuszczalne w wodzie***

Niszczący wpływ wilgoci w murze jest tym większy, im transportowana woda zawiera więcej szkodliwych związków chemicznych, soli rozpuszczalnych w wodzie. W warunkach zmiennego zawilgocenia, gdy dochodzi do przemiennego wysychania i zawilgocenia obiektu, mogą powodować duże uszkodzenia elementów budowli. Procesy korozyjne objawiają się wykwitami, nalotami, zmianą zabarwienia materiału, krystalizacją soli na powierzchni murów.

Destrukcyjne działanie rozpuszczonych soli polega na tym, iż podczas zawilgocenia i wysychania murów tworzą się hydraty i substancje wtórne, których objętość przewyższa pierwotną objętość rozpuszczonych produktów [8]. Substancje te powstają w wyniku rozkładu minerałów, korozji chemicznej i biologicznej kamienia, w których główną rolę odgrywa woda. W wyniku odparowania wody z powierzchni kamienia następuje stężenie roztworu soli, przesylenie i w fazie końcowej krystalizacja soli w strefie parowania. Ponieważ w porach drobnoporowatej opoki wapnistej woda utrzymuje się długo i odparowuje zbyt wolno, sole krystalizują w ich wnętrzu. Podczas krystalizacji sole zwiększają swoją objętość, co związane jest z ciśnieniem krystalizacyjnym, które rośnie wraz ze wzrostem temperatury [9].

Podobne zniszczenia, a nawet większe jak cykle zamarzanie – odmarzanie powodują procesy krystalizacja – rozpuszczanie. W związku z tym zjawisko to zauważalne jest przede wszystkim na południowych elewacjach, na których częstotliwość wysychania i zawilgocenia jest duża. Tam też występują duże amplitudy temperatur, podczas których sole krystalizują w formie bezwodnej, a następnie w niższej temperaturze uwadniają się i zwiększają swoją objętość. Jedną z najgroźniejszych soli w budynku jest siarczan sodu  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , którego objętość wzrasta około 5 –cio krotnie podczas przejścia z postaci bezwodnej do dziesięciowodnej.

Analizując agresywność czynników środowiskowych, dochodzi się do wniosku, iż ekspozycja kamienia w murze ma istotny wpływ na jego trwałość. Od intensywności i częstotliwości procesów nawilżania - wysychania, zamarzania - odmarzania, hydratacji – dehydratacji soli, czy innych mechanizmów zniszczeń zależą zmiany

struktury kamienia tj, porowatości otwartej, rozmiarów, kształtu i powierzchni wewnętrznych porów.

Badania parametrów wilgotnościowych kamieni przy wykorzystaniu technik reflektometrycznych TDR pozwalają na głębszą analizę wpływu powyższych czynników na stan zawilgocenia i transport wody w murach z opoki wapińskiej.

### 3. Charakterystyka opoki wapińskiej

W celu poznania charakterystyki kamienia oraz wpływu powyższych czynników wykonano badania, które objęły:

- kamień z kamieniołomu w Kazimierzu Dolnym – zwany dalej *K1*,
- kamień z XVI-wiecznego muru Zamku w Janowcu z elewacji południowej – *K2*,
- kamień z XVI-wiecznego muru Zamku w Janowcu z elewacji północnej – *K3*.

Należy zaznaczyć, iż kamienie z murów charakteryzowały się niskim stopniem zasolenia, który oznaczono przy użyciu zestawu firmy Merck.

#### 3.1. Analiza mineralogiczno – petrograficzna

Analizy mineralogiczne pobranych materiałów pozwoliły na porównanie składu i wykazanie ewentualnych różnic pomiędzy kamieniami. Oznaczenie składu mineralnego wykonano wykorzystując mikroskopię optyczną w świetle spolaryzowanym, skaningową mikroskopię elektronową (SEM) oraz dyfraktometrię rentgenowską (XRD). Badania mineralogiczne kamienia uzupełniono oznaczeniami teksturalnymi, wykorzystując porozymetrię rtęciową.

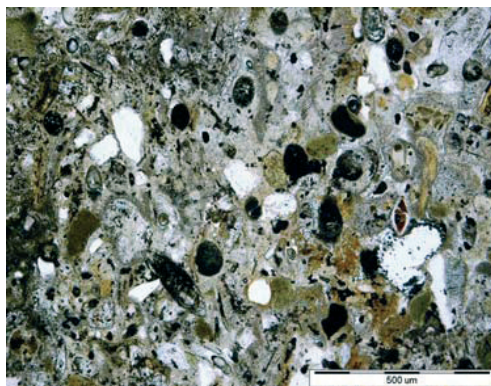
Kamieniem użytym do budowy Zamku w Janowcu była opoka wapińska potocznie zwana wapieniem kazimierskim. Niejednorodny wapień kazimierski reprezentuje skałę o strukturze bioorganicznej, w której mocno pokruszone fragmenty igieł gąbek i znacznie rzadziej otwornic są scementowane mikrytowo – krzemionkowym spoiwem o charakterze masy wypełniającej. Tekstura badanego wapienia jest beładna, a obserwacje w mikroskopie skaningowym potwierdzają jej porowaty charakter (Rys. 3).

Ziarniste składniki mineralne to kwarc, glaukonit, wodorotlenki żelaza i minerały nieprzezroczyste [2] reprezentowane między innymi przez piryty (Rys. 4).



Rys. 3. Tekstura opoki wapińskiej (*K2*) w obrazie mikroskopii elektronowej (SEM).

Fig. 3. Chalk rock texture (*K2*) in the SEM (Scanning Electron Microscopy).



Rys. 4. Skład mineralny kamienia (K2) – mikroskopia optyczna.

Fig. 4. Mineral content of the K2 stone – optic microscopy.

Na dyfraktogramach składu mineralnego badanych kamieni stwierdzono obecność kalcytu (związanego ze spoiwem mikrytowym), kwarcu, glaukonitu i opalu, z którego zbudowane są igły gąbek i pancerzyki okrzemek (Rys. 3).

### 3.2. Badania porozymetryczne

Na wysokość podciągania kapilarnego w murze ma wpływ struktura materiału, czyli promień porów, kapilar oraz gęstość transportowanej cieczy. Im kapilary mają większą średnicę, a ciecz posiada mniejszą gęstość, tym podciąg jest większy. Należy podkreślić fakt, iż ruch kapilarny zachodzi tylko w kapilarach o określonej średnicy.

Według Klemma [6] transport wody następuje jedynie w porach w zakresie 0,1 mm -  $10^{-4}$  mm. Poniżej tej średnicy zachodzi wyłącznie dyfuzja par i gazów. Powyżej 1 mm następuje swobodny przepływ cieczy, nie występują już zjawiska kapilarne.

Badania porozymetrii rtęciowej wykonano na 3 próbkach dla każdego rodzaju kamienia. Badania wykazały zbliżoną porowatość kamieni, której średnia wartość wynosi odpowiednio: K1 – 36,87%; K2 – 39,26%; K3 – 37,27% (Tab. 1). Gęstość właściwa wynosi od 2,36 do 2,72 g/cm<sup>3</sup>, zaś gęstość pozorna od 1,52 do 1,63 g/cm<sup>3</sup>. W kamieniu K2 dominująca średnica porów to  $1,961 \cdot 10^{-3}$  mm, która uczestniczy w intensywnym ruchu kapilarnym. Zgodnie z klasyfikacją IUPAC są to wielkości charakterystyczne dla makroporów. W kamieniach K1 i K3 nie można jednoznacznie określić dominującej średnicy porów, gdyż waha się ona od  $6 \cdot 10^{-6}$  mm do  $1,26 \cdot 10^{-3}$  mm. W porach o średnicach do  $10^{-4}$  mm, zwanych mikro i mezoporami, następuje tylko [9] dyfuzja par i gazów oraz kondensacja kapilarna pary wodnej.

Tabela 1. Wyniki badań porozymetrycznych opoki wapnistej.

Table 1. Results of the porosimetric measurement on chalk rock.

Rodzaj kamienia	Porowatość [%]	Całkowita objętość porów [cm <sup>3</sup> /g]	Gęstość pozorna [g/cm <sup>3</sup> ]	Gęstość właściwa [g/cm <sup>3</sup> ]	Dominująca średnica porów [nm]
K1	36,87	0,2319	1,594	2,533	3,8; 28
K2	39,26	0,2477	1,591	2,626	1961
K3	37,27	0,2340	1,592	2,540	6; 28; 805

Na podstawie wyników badań porozymetrii ręciowej można wnioskować, że kamień K2 będzie wykazywać większą tendencję do podciągania kapilarnego wody niż kamień z kamieniołomu i elewacji północnej. Potwierdziły to wyniki badań zaprezentowane w punktach 4.2.1 i 4.2.2 artykułu. Kamień ten charakteryzuje się największą porowatością, w jego strukturze dominują makropory właściwe (39,26%,  $0,2477\text{cm}^3/\text{g}$ ,  $1,961 \cdot 10^{-3}\text{mm}$ ), które biorą udział w procesach nasączenia i wysychania kamienia.

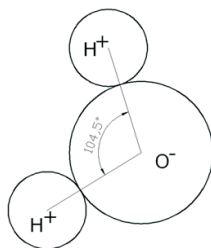
Nasuwa się przypuszczenie, że struktura kamienia uległa zmianie pod wpływem długotrwałego działania czynników korozyjnych, tj. wielokrotne zamarzania i odmarzania, naprężenia termiczne w wyniku intensywnego nasłonecznienia. Właściwości fizyczne kamienia z elewacji północnej (K3) nie różnią się istotnie od parametrów kamienia K1, pomimo iż od XVI wieku stanowił on element muru Zamku w Janowcu.

## 4. Badania wilgotnościowe opoki wapnistej przy wykorzystaniu technik reflektometrycznych i tradycyjnych

### 4.1. Opis metody stosowanej w badaniach

Opoka wapnista poddana analizie laboratoryjnej jest materiałem charakteryzującym się dużą porowatością, która z kolei ma znaczny wpływ na właściwości wodne tego ośrodka. Tak jak każdy ośrodek porowaty opoka zbudowana jest z trzech faz – stałej, gazowej oraz ciekłej. Traktując ją jako dielektryk należy zauważyć, iż największy wpływ na zewnętrzne pole elektryczne wykazuje woda, co wynika z jej niesymetrycznego rozkładu ładunków (Rys. 5).

Taka cząsteczka ma charakter dipola elektrycznego o wartości momentu dipolowego  $6,216 \cdot 10^{-30}$  C·m.



Rys. 5. Niesymetryczna budowa cząsteczki wody.

Fig. 5. Asimetric character of water molecule.

Parametrem mierzonym techniką TDR jest przenikalność dielektryczna  $\epsilon$ , będąca miarą zachowania cząstek materii po przyłożeniu zewnętrznego, zmiennego pola elektrycznego [10]. Na skutek przyłożenia zmiennego pola elektrycznego cząsteczki wody obracają się zgodnie z kierunkiem przyłożonego pola. Konsekwencją takiego porządkowania dipoli jest gromadzenie energii, która zostaje wyzwolona, gdy pole elektryczne znika. Energia ta jest wyrażona w postaci rzeczywistej części względnej przenikalności elektrycznej ośrodka  $\epsilon'$  i stanowi ona podstawę przy pomiarach wilgotności ośrodków porowatych. Z kolei urojona część zespolonej przenikalności dielektrycznej ( $\epsilon''$ ) reprezentuje straty energii zewnętrznego pola elektrycznego wywołane przewodnictwem jonowym ośrodka zależnym od koncentracji soli. Przenikalność



dielektryczna takiego ośrodka o niezerowym przewodnictwie elektrycznej wyraża się równaniem zespolonym:

$$\varepsilon_{\omega} = \varepsilon'_{\omega} - i \left( \varepsilon''_{\omega} + \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0 \omega} \right), \quad (1)$$

gdzie:  $\varepsilon'_{\omega}$  – rzeczywista część przenikalności dielektrycznej ośrodka w danej częstotliwości  $\omega$ ,  $\varepsilon''_{\omega}$  – urojona część przenikalności dielektrycznej w danej częstotliwości  $\omega$ ,  $i$  – jednostka urojona,  $\sigma_0$  – przewodnictwo elektryczne,  $\varepsilon_0$  – przenikalność dielektryczna próżni ( $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  F/m),  $\omega$  – częstotliwość kołowa zewnętrznie przyłożonego pola elektrycznego. Straty energii pola związane z jonowym przewodnictwem elektrycznym (urojona część przenikalności dielektrycznej) obserwuje się przy niskich częstotliwościach. Biorąc pod uwagę zakres częstotliwości stosowanych dla techniki TDR, uważa się, że nie mają one znacznego wpływu na wartość całkowitą przenikalności dielektrycznej i w pomiarach mogą być pomijane.

Ze względu na polarną budowę cząsteczki wody jej przenikalność dielektryczna zasadniczo różni się od przenikalności dielektrycznej fazy stałej oraz gazowej (Tabela 2).

Tabela 2. Wartości przenikalności dielektrycznej w zależności od rodzaju ośrodka.  
Table 2. Values of dielectric permittivity in dependence on the medium kind.

Ośrodek	Przenikalność dielektryczna (20°C)
Powietrze	1
Woda	80
Bazalt	12
Granit	7-9
Piaskowiec	9-11

Dla wody wynosi ona około 80, dla powietrza 1, zaś dla szkieletu fazy stałej waha się ona w przedziale od kilku do kilkunastu w zależności od materiału.

Należy podkreślić, iż przenikalność dielektryczna jest wartością zależną od wielu parametrów (pomimo, iż powszechnie określa się ją mianem stałej dielektrycznej – jest niezależna od natężenia pola). Zależy natomiast od temperatury, gęstości, składu chemicznego i co najistotniejsze w pomiarach dielektrycznych od częstotliwości przyłożonego pola [12].

Dla częstotliwości poniżej 10 GHz, w tym w zakresie częstotliwości właściwym dla techniki TDR (ok. 1 GHz), wartość przenikalności dielektrycznej jest w zasadzie stała i jak to wynika z tabeli 2 wynosi 80.

Wartości przedstawione w tabeli 2 dla minerałów tworzących szkielet fazy stałej, jak i dla powietrza świadczą o tym, iż przenikalność dielektryczna materiału powietrznie suchego lub o niewielkiej zawartości wolnej wody jest niska, zaś przenikalność dielektryczna ośrodka o dużej zawartości wody (na przykład w stanach całkowitego nasycenia, kiedy faza gazowa jest całkowicie wyparta przez wodę) jest duża. Zatem mierząc wartość stałej dielektrycznej takiego trójfazowego ośrodka można przy zastosowaniu właściwej kalibracji empirycznej określić wilgotność badanego ośrodka, w opisywanym przypadku opoki wapnistej.

W technice TDR stałą dielektryczną wyznacza się w oparciu o prędkość propagacji impulsu elektromagnetycznego wzdłuż falowodu jakim są pręty sondy TDR, a wynosi ona:

$$\varepsilon = \left( \frac{c}{V} \right)^2, \quad (2)$$

gdzie  $\varepsilon$  – względna stała dielektryczna ośrodka porowatego,  $c$  – prędkość światła w próżni ( $3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $V$  – prędkość propagacji impulsu wzdłuż prętów sondy TDR (m/s), przy czym  $V = 2L/t_p$  ( $t_p$  – czas propagacji sygnału wzdłuż prętów sondy oraz  $L$  – długość prętów sondy wprowadzonych w ośrodek porowaty).

Zestaw badawczy TDR zbudowany jest z trzech podstawowych elementów (Rys. 6, 8) – miernika, sond oraz komputera PC funkcjonującego jako stacja sterująca oraz jako magazyn danych.



Rys. 6. Stanowisko pomiarowe TDR.

Fig. 6. TDR set.



Rys. 7. Przebieg badania - próbki z sondami.

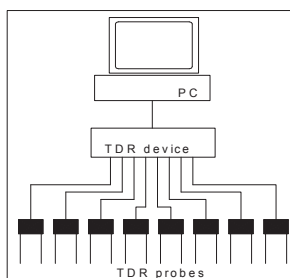
Fig. 7. Samples with TDR probes.

Miernik TDR generuje szpilkowy impuls elektromagnetyczny o prędkości narastania i opadania ok.  $300 \cdot 10^{-12} \text{ s}$  (Skierucha, Malicki, 2004). Propaguje on następnie wzdłuż kabla koncentrycznego o określonej, stałej impedancji do sondy pomiarowej, będącej falowodem z materiałem dielektrycznym o stałej dielektrycznej, która jest w tym przypadku parametrem mierzonym. Wskutek zmian impedancji na granicy koncentryk - sonda oraz na końcu sondy do miernika powraca echo wysłanego impulsu, które jest następnie odbierane przez rejestrator monitorujący, a uzyskany sygnał powrotny wyrażany jest w postaci zmiany napięcia w czasie, w formie tzw. reflektogramu. Interpretacja reflektogramu, a konkretnie odbicie impulsu elektromagnetycznego w sondzie jest podstawą pomiaru wilgotności metodą TDR. Można jej dokonać metodą wizualną przy pomocy oscyloskopu, lub co jest powszechnie wykorzystywane w badaniach monitoringowych – automatycznie przy pomocy

właściwych algorytmów, dzięki którym możliwe jest jednoznaczne określenie stałej dielektrycznej ośrodka.

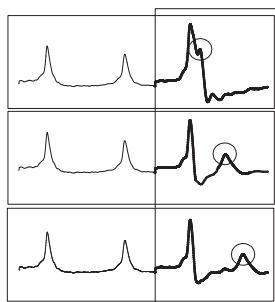
Przy założeniu automatycznej interpretacji powracającego echa (na czym opiera się idea funkcjonowania techniki TDR) cykl badawczy powtarzany jest wielokrotnie z częstotliwością żądaną przez użytkownika. Umożliwia to ciągły pomiar wilgotności przegrody lub materiału budowlanego w różnych punktach i różnym czasie, dzięki czemu zapewniona jest możliwość ciągłego monitoringu stanów wilgotnościowych jak i obserwacji ich zmian.

Sondy TDR są właściwie zakończeniem kabla koncentrycznego, różniącym się od niego nie tylko kształtem, ale również materiałem, z którego wykonano dielektryk pomiędzy przewodami. Dla kabla koncentrycznego materiałem dielektrycznym jest polietylen natomiast dla sond jest to badany materiał. Stała dielektryczna polietylenu jest znana i w zasadzie niezmienna na całej długości kabla i nie ma wpływu na uzyskany wynik pomiaru. Stała dielektryczna badanego materiału zależy od jego budowy oraz, co tutaj najbardziej istotne, od zawartości wody w ośrodku. Każda zmiana impedancji w układzie przewód-sonda wywołuje częściowe, bądź całkowite odbicie sygnału. Stąd jedno odbicie pojawia się w miejscu przejścia kabla w sondę, własności ośrodka gwałtownie się zmieniają, co pociąga za sobą zmiany impedancji. Kolejne odbicie pojawia się na końcu falowodu, gdzie impedancja zmierza w kierunku impedancji wolnej przestrzeni i fala jest odbijana.



Rys. 8. Typowy zestaw pomiarowy TDR.

Fig. 8. Typical TDR set.



Rys. 9. Reflektogramy TDR w zależności od zawartości wody w układzie. Linia pogrubioną pokazano przebieg impulsu w sondzie TDR. Górny reflektogram wskazuje na materiał suchy, środkowy stany nienasycone, a dolny jest charakterystyczny dla wody (kółkiem oznaczono odbicie powracające z badanego materiału).

Fig. 9. TDR waveguides representing dry, moist and saturated materials (from upstairs), circle represents the echo returning from the measured material.

Rys. 9 przedstawia reflektogramy TDR dla trzech układów różniących się między sobą zawartością wody (stałą dielektryczną). Dwa pierwsze piki w każdym reflektogramie posiadają kontrolny charakter i są pomijalne z punktu widzenia realizowanych pomiarów. Są one rezultatem celowego zaburzenia ciągłości przewodu i są niezależne od warunków, w jakich wykonywane są pomiary, służą zatem za wzorzec czasu.

Znając prędkość propagacji impulsu elektromagnetycznego (lub jego czas) można wyznaczyć wartość stałej dielektrycznej ośrodka porowatego w oparciu o fundamentalną formułę (2) dla techniki TDR.

W oparciu o zmierzoną przy pomocy techniki TDR, wartość stałej dielektrycznej ośrodka trójfazowego można określić jego wilgotność. Istnieje wiele modeli umożliwiających określenie tego parametru. Ogólnie dzielą się one na fizyczne oraz empiryczne modele mieszanin materiałów dielektrycznych [10, 12]. Do modeli fizycznych zaliczamy głównie modele  $\alpha$  oraz model de Loor. Z kolei z modeli empirycznych najbardziej znane są modele wyprowadzone dla ośrodków porowatych takich jak grunty – model Toppa [14] i Malickiego [7]. Na podstawie badań reflektometryczno-grawimetrycznych określono również krzywe kalibracyjne dla niektórych materiałów budowlanych takich jak betony komórkowe [13].

W realizowanych badaniach do ustalenia wartości wilgotności materiału wykorzystano empiryczną formułę Malickiego, która poza stałą dielektryczną uwzględniła również gęstość materiału w stanie suchym, dzięki czemu możliwe jest uzyskanie większej precyzji wyników:

$$\theta = \frac{(\epsilon^{0,5} - 0.819 - 0.168\rho - 0.159\rho^2)}{7.17 + 1.18\rho}, \quad (3)$$

gdzie  $\rho$  jest gęstością fazy stałej w stanie suchym [ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ].

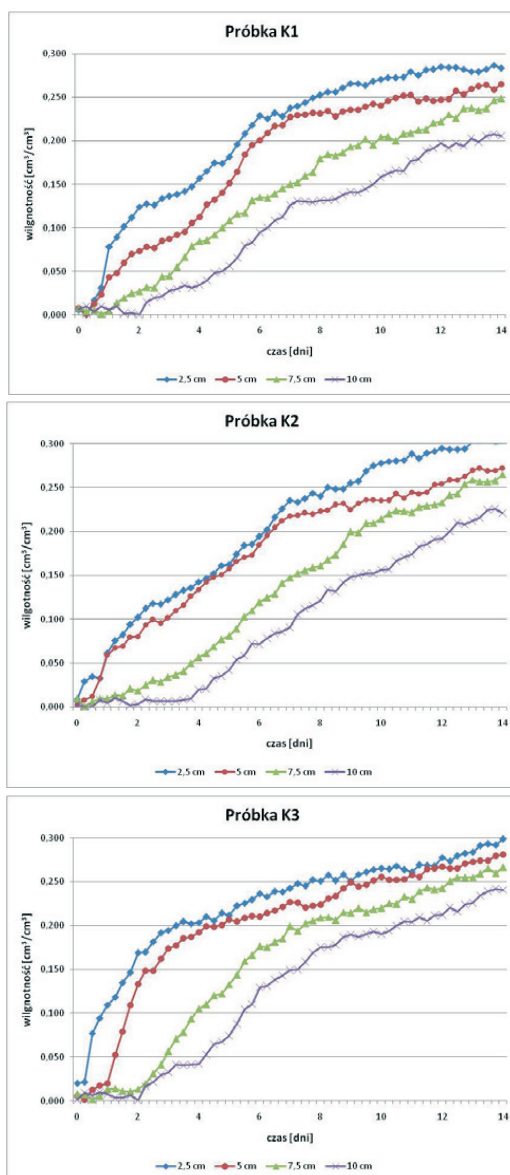
## 4.2. Przeprowadzone badania

### 4.2.1. Techniki reflektometryczne pomiaru przyrostu wilgotności kamienia

W celu zbadania właściwości wodnych opoki wapnistej wykorzystano miernik TDR produkcji polskiej firmy Easy Test. Do pomiarów wykorzystano sondy laboratoryjne LP/ms, które wprowadzono w porowatą strukturę materiału poprzez nawiercane otwory. W celu minimalizacji nieszczelności na granicy falowód-ośrodek porowaty pustki wypełniono pyłem wiertniczym.

Badania laboratoryjne przeprowadzono na trzech próbkach w kształcie prostokątów wyciętych z odpowiednich kamieni. Wymiary próbek – 5cm x 12cm x 12cm. próbki wysuszono do stałej masy w temperaturze 65°C (temperaturę obniżono ze 105°C ze względu na możliwość wystąpienia gipsu w kamieniu), a następnie sezonowano w warunkach laboratoryjnych przez okres jednego miesiąca. Wszystkie powierzchnie próbek, które nie podlegały badaniu uszczelniono przed wodą, nakładając dwie warstwy żywicy epoksydowej. próbki umieszczono na ruszcie w kuwecie z czystą wodą wodociągową o temperaturze 23°C, tak, aby badana powierzchnia znajdowała się 1cm poniżej lustra wody (Rys. 7). Sondy TDR (LP/ms) zainstalowano odpowiednio na wysokościach 2,5; 5; 7,5 oraz 10 cm nad powierzchnią wody. Odczytane wartości rejestrowane były na właściwych kanałach z odstępem czasowym 6 godzin (0,25 doby).

Na podstawie pomiarów wilgotnościowych metodą TDR wykonano wykresy przedstawiające proces podciągania kapilarnego wody w badanych próbkach w czasie. Wykresy przedstawiają jak zmieniała się wilgotność objętościowa [ $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ] próbki wyznaczana techniką TDR. Wilgotność wyznaczono w oparciu pomiar czasu propagacji impulsu wzdłuż falowodu, jaki stanowiły pręty sondy LP/ms. Następnie na podstawie pomiarów czasu propagacji obliczono względną stałą dielektryczną badanego ośrodka wg formuły (2), zaś wilgotność oszacowano wg empirycznej formuły Malickiego (3) [7].



Rys. 10. Proces podciągania kapilarnego w kamieniach z kazimierskiej opoki wapińskiej zbadany techniką TDR.

Fig. 10. Capillary rise process in Kazimierz chalk rock determined with TDR method.

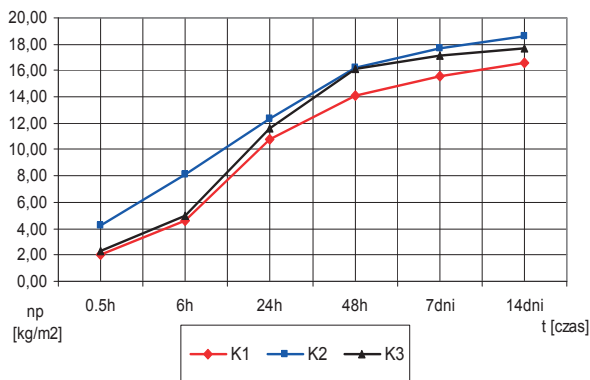
Pomiary przebiegu podciągania kapilarnego wody przez opokę wapienistą zbadaną metodą TDR wykazuje największe powinowactwo do wody przez skorodowany kamień z elewacji południowej (K2). Kamień ten charakteryzuje się największą zdolnością kapilarną, która jest widoczna już w pierwszym dniu, zaś po upływie dwóch tygodni wilgotność jego jest największa z wszystkich analizowanych próbek i przekracza  $30\%_{vol}$  zmierzone na wysokości 2,5cm nad lustrem wody. Natomiast na wysokości 10cm jego wilgotność wyznaczona metodą TDR wynosi po 14 dniach ok.  $22\%_{vol}$ .

Z kolei kamień K3 z elewacji północnej wykazuje zbliżoną dynamikę podciągania kapilarnego wody, lecz jego maksymalna wilgotność zmierzona sondą TDR na wysokości 2,5cm nad lustrem wody po upływie 14 dni jest mniejsza od kamienia K2 i nie przekracza  $30\%_{vol}$ . Na 10cm powyżej zwierciadła wody wilgotność jest większa od odpowiedniej w kamieniu K2 i wynosi ponad  $24\%_{vol}$ .

Kamień K1 pochodzący bezpośrednio z kamieniołomu charakteryzuje się natomiast najmniejszą zdolnością do podciągania kapilarnego, proces ten przebiega najwolniej i po upływie okresu pomiarowego (14 dni) maksymalna wilgotność zmierzona techniką TDR nie przekracza w nim wielkości  $28\%_{vol}$  w odległości 2,5cm od zwierciadła wody oraz  $23\%_{vol}$  w odległości 10cm od powierzchni wody.

#### 4.2.2. Nasiąkliwość powierzchniowa

Na próbkach przeznaczonych do badań TDR wykonano równorzędnie oznaczenia nasiąkliwości powierzchniowej wg PN-EN 1925:2001. Próbkę ważono po upływie 0,5; 6h i 1, 2, 7 i 14-stu dobach. Wyniki przedstawia Rys. 11.



czas badania po	0,5h	6h	24h	48h	7 dni	14 dni
$n_p$ [kg/m <sup>2</sup> ]						
K1	2,01	4,65	10,81	14,10	15,54	16,56
K2	4,20	8,15	12,34	16,27	17,68	18,63
K3	2,27	5,00	11,58	16,14	17,14	17,67

Rys. 11. Nasiąkliwość powierzchniowa kamieni.

Fig. 11. Surface water absorbability of the stones.

Analiza nasiąkliwości opok, pochodzących z trzech różnych źródeł wykazała, że kamienie te charakteryzują się innymi właściwościami wilgotnościowymi. Kamienie można uszeregować według nasiąkliwości powierzchniowej wodą w następujący sposób:  $K1 \leq K3 \leq K2$ . Największą nasiąkliwość powierzchniową posiada kamień K2 ( $18,63 \text{ kg/m}^2$ ) z południowej elewacji zamku, charakteryzujący się największym stopniem destrukcji.

## 5. Podsumowanie

Przeprowadzone badania porozymetryczne i wilgotnościowe opoki wapnistej z elewacji południowej i północnej Zamku w Janowcu oraz kamienia z kamieniołomu wykazały różnice w zakresie zmian struktury kamieni. Wpływ oddziaływań środowisk korozyjnych najmniej widoczny jest w miejscach o ustabilizowanych warunkach mikroklimatycznych, czyli na murach północnych.

Natomiast różnice te przyczyniają się do odmiennego zachowania opoki w procesach podciągania kapilarnego wody i roztworów soli. Ma to znaczący wpływ na trwałość budowli oraz dalszy proces korozji. Znajomość właściwości wodnych umożliwia dobór ochrony konserwatorskiej tj. preparatów zabezpieczających mur, których rodzaj i aplikacja zależą w głównej mierze od cech porozymetrycznych podłoża.

Niejednorodność cech fizycznych badanych opok tj. gęstości objętościowej, gęstości, porowatości, podciągania kapilarnego opoki wynika między innymi z różnych źródeł pochodzenia, z ekspozycji w stosunku do stron świata, co wiąże się z insolacją i cyklami zamarzania i odmarzania, korozją chemiczną itp.

W artykule przedstawiono możliwość pomiaru wilgotności przy zastosowaniu techniki TDR. Technika ta posiada duży potencjał pomiarowy, a w szczególności monitoringowy w odniesieniu do ośrodków porowatych. Obecnie jest w fazie wdrażania w przodujących laboratoriach zajmujących się fizyką budowli.

Zaletą tej metody jest jej niska czułość na zasolenie ośrodka (w zakresie częstotliwości, w których pracuje nie uwzględnia ona urojonej części stałej dielektrycznej) w rezultacie czego pomiar nie jest obciążony błędem wywołanym przewodnictwem elektrycznym spowodowanym koncentracją jonów zawartych w materiałach budowlanych.

Metoda jest obecnie w fazie rozwoju i trwają prace nad przeniesieniem jej w warunki polowe. Umożliwi ona prowadzenie badań na obiektach rzeczywistych, dzięki czemu wyeliminuje ona konieczność pobierania próbek z badanych obiektów w celu wykonania badań termo-grawimetrycznych. Pozwoli ona na długoterminowy monitoring zmian wilgotności przegród budowlanych i może się przyczynić do minimalizacji negatywnych skutków oddziaływania wody na budowlę.

## Literatura

- [1] Adamowski J., *Powłoki i wyprawy elewacyjne na obiektach zabytkowych*, Wybrane problemy projektowo – technologiczne. Maszynopis.
- [2] Barnat – Hunek D., Franus W., *Stan zachowania murów zabytkowego Spichlerza Ulanowskich w Kazimierzu Dolnym nad Wisłą*, Konf. Naukowa: Postęp i nowoczesność w konserwacji zabytków. Problemy, perspektywy. Politechnika Lubelska, Lublin, 2005. 49-53.
- [3] Domaśłowki W., *Profilaktyczna konserwacja kamiennych obiektów zabytkowych*, UMK skrypty i teksty pomocnicze. Toruń 1993.
- [4] Franus W., Barnat – Hunek D., *Przyczyny niszczenia zabytkowych budynków z opoki wapnistej w Kazimierzu Dolnym*, Świat Kamienia, Vol. 35 (2005), pp. 32-34.
- [5] Garecki M., *Znaczenie diagnostyki w robotach izolacyjno – renowacyjnych budynków poddanych działaniu wilgoci*, Renowacje i Zabytki, Vol. 4 (2005), pp. 127-137.
- [6] Klemm P., praca zbiorowa., 2005: *Budownictwo ogólne. Tom 2. Fizyka budowli*, Arkady. Warszawa 2005.
- [7] Malicki M.A., Plagge R., Roth. C.H., *Reduction of soil matrix effect on TDR dielectric*

- moisture determination by accounting for bulk density or porosity*, European J. of Soil Science, vol. 47(3), 1996, pp. 357-366.
- [8] Rydz Z., Turowski R., *Hydrofobizacja strukturalna mas tynkarskich i zapraw budowlanych za pomocą Hydrolitu*, Materiały Budowlane, Vol. 3 (1989), pp. 14-15.
- [9] Skibiński S., *Udział soli rozpuszczalnych w wodzie w procesach niszczenia kamiennych obiektów zabytkowych oraz konserwatorskie sposoby ograniczania ich działania*, Ochrona Zabytków, Vol. 3-4 (1985), pp. 244-257.
- [10] Skierucha W., *Wpływ temperatury na pomiar wilgotności gleby metodą reflektometryczną*, Rozprawy i Monografie Instytutu Agrofizyki im. Bohdana Dobczańskiego PAN w Lublinie, Lublin 2005(5)
- [11] Skierucha W., Malicki M.A., *TDR Method for the Measurement of Water Content and Salinity of Porous Media*, Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences, Lublin 2004
- [12] Sobczuk H., Plagge R., *Time Domain Reflectometry Method in Environmental Measurements*, Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, Vol. 39, Lublin 2007
- [13] Sobczuk H., Suchorab Z., *Calibration of TDR instruments for moisture measurement of aerated concrete, Monitoring And Modelling the properties of soil as porous medium*, Institute of Agrophysics Polish Academy of Sciences, Lublin 2005, pp. 158-165
- [14] Topp G.C., Davis J.L., Annan A.P., *Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines*, Water Resources Research, vol. 16, 1980, pp. 574-582.

## Moisture measurements of the chalk rock walls from Kazimierz Dolny with the application of TDR method

*Zbigniew Suchorab, Faculty of Environmental Engineering, Institute of Environmental Protection Engineering e-mail: Z.Suchorab@fenix.pol.lublin.pl*  
*Danuta Barnat-Hunek, Faculty of Civil and Sanitary Engineering, Institute of Buildings mail: d.barnathunek@op.pl*  
*Henryk Sobczuk, Faculty of Environmental Engineering, Institute of Environmental Protection Engineering e-mail: H.Sobczuk@fenix.pol.lublin.pl*

**Abstract:** The article presents monitoring measurements of the physical parameters and mineralogical-petrographical composition analysis of the chalk rock from the Kazimierz Dolny region. The experiments involve the reflectometric techniques TDR (Time Domain Reflectometry) as a perspective alternative in moisture determinations. The investigation domain was the stone from the Castle of Janowiec by the Vistula river, which walls indicate the progressive corrosion depending on external exposition and age. Other object of investigations was the stone from quarry in Kazimierz Dolny. Porosimetric examinations of the chalk rock from the southern and northern elevation of the castle indicate differences in structure changes of the stones. These differences influence different behaviour of the chalk rock during capillary rise of water and salt solutions. It is connected with the suitable matching of the conservation protection, wall protecting preparations which kind and application depend on porosimetric parameters of the material. The TDR method is applied as a good alternative of water transport measurement in porous building materials and other water parameters characterising described material.

**Keys words:** chalk rock, walls destruction, moisture, reflectometric measurement, TDR.