

Krystian OCHWAT  
Zollern Institut  
Bohum RFN

## METODYKA I NIEKTÓRE WYNIKI BADAŃ STOPNIA DESTRUKCJI KAMIENNYCH OBIEKTÓW BUDOWLANYCH NA PRZYKŁADZIE KATEDRY W KOLONII (RFN)

**Streszczenie.** Na przykładzie katedry w Kolonii przedstawiono wpływ zanieczyszczeń powietrza na stopień i formy destrukcji różnorodnego, odmiennie odpornego na wietrzenie kamiennego materiału budowlanego. Wieloletnie pomiary emisji przeprowadzone za pomocą stacji IRMA zlokalizowanych na katedrze w Kolonii, a także analiza zwietrzelin wykazały, że główny wpływ na destrukcje ma przede wszystkim  $\text{SO}_2$ . W wyniku badań laboratoryjnych wyselekcjonowano środki konserwujące ochraniające skałę przed wtargnięciem w jej strukturę agresywnych "kwaśnych deszczów". Pomiary nasiąkliwości wodą przeprowadzone na obiekcie w dwanaście lat po przeprowadzonych zabiegach konserwujących potwierdziły trwałość hydrofobizacji.

## METHODS AND SOME RESULTS OF INVESTIGATIONS ON THE GRADE OF DESTRUCTION OF STONE MONUMENTS ON THE EXAMPLE OF COLOGNE CATHEDRAL (FRG)

**Summary.** At the Cologne Cathedral the extent of stone destruction caused by airborne pollution is demonstrated with various types of stone with different weathering resistance. Long term IRMA-measurements and analyses of the corrosion products showed  $\text{SO}_2$

as the main cause for the damage. Protective coatings to secure the natural stone from penetration by acidic rain have been chosen by laboratory tests. The results of water absorption measurements proved the stability of conserving treatments applied to the building twelve years ago.

## МЕТОДИКА И НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СТЕПЕНИ ДЕСТРУКЦИИ КАМЕННЫХ ПОСТРОЕК НА ПРИМЕРЕ КАФЕДРАЛЬНОГО СОБОРА В КЁЛЬНЕ (ФРГ)

**Резюме.** На примере кафедрального собора в Кёльне показано влияние загрязнения воздуха на степень и формы деструкции разнородного с неодинаковым сопротивлением выветриванию каменного строительного материала. Многолетние измерения выбросов, сделанные при помощи станций IRMA, размещенных на соборе в Кёльне, а также анализ продуктов выветривания показали, что главной причиной деструкции является  $SO_2$ . В результате лабораторных исследований были отобраны защитные средства, предохраняющие породу от вторжения в ее структуры агрессивных "кислых дождей." Измерения водопоглощения сделанные на объекте 12 лет спустя после проведения защитных мер, подтвердили устойчивость гидрофобизации.

### 1. WPROWADZENIE

Pytaniem, czy i w jakim rozmiarze człowiek sam, np. przez emisje zanieczyszczeń, przyczynia się do niszczenia swojego dorobku kulturalnego, jakimi są budowle ze skał budowlanych, zostało postawione już przed przeszło stu laty. Jednakże dopiero w drugiej połowie tego stulecia, w związku ze wzrastającym zainteresowaniem ochroną środowiska, a także wzmocnionym dążeniem do zachowania spuścizny kulturowo-historycznej, problematyka ochrony zabytków znalazła szerokie uznanie i poparcie społeczeństwa.

Głównymi zagadnieniami w tej dziedzinie było poznanie zależności pomiędzy emisją (szkodliwych związków zawartych w powietrzu) a postępującą destrukcją budowli kamiennych, jak i również zastosowanie środków konserwujących, które zahamowałyby tę destrukcję.

Do obiektów zasługujących na szczególną uwagę, i zbudowanych wyłącznie ze skał naturalnych, których destrukcja w ostatnich dziesięcioleciach uległa zwielokrotnieniu, należy zbudowana w stylu gotyckim, znana na całym świecie, katedra w Kolonii. Z tych też powodów jest ona obiektem wnikliwych badań wielu niemieckich placówek naukowych.

## 2. WIETRZENIE SKALNYCH MATERIAŁÓW BUDOWLANYCH

Rozróżnić można naturalne wietrzenie oraz wietrzenie wywołane czynnikami antropogenicznymi, w których szczególną rolę odgrywa zanieczyszczenie powietrza.

Tabela 1  
Zanieczyszczenie powietrza w wybranych miastach Zagłębia Ruhry<sup>1)</sup> i Górnego Śląska<sup>2)</sup> w 1987 i 1990 r.

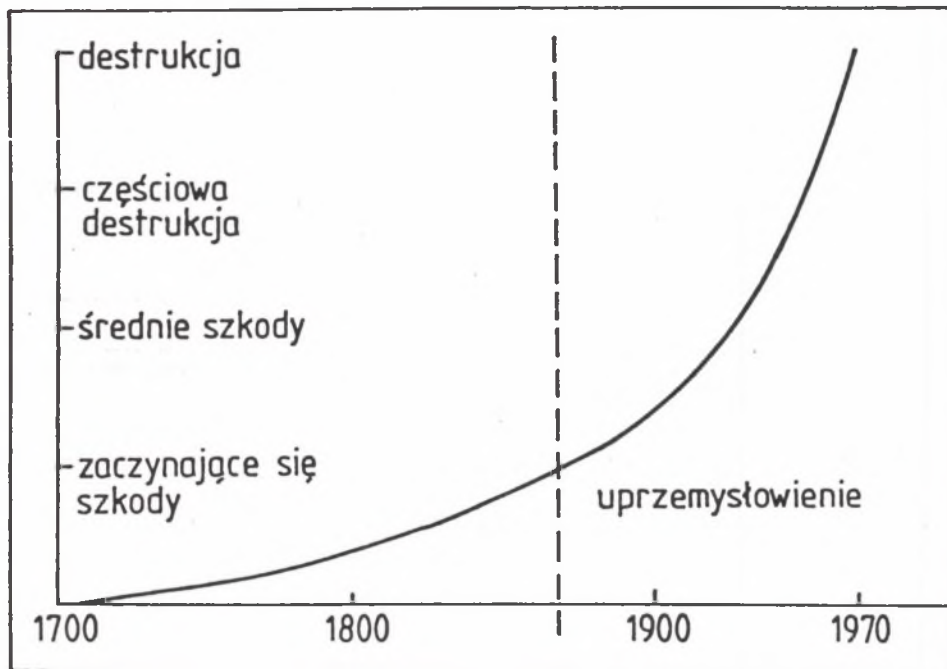
Miasta	Wielkość emisji w $\mu\text{g}/\text{m}^3$					
	zapylenie		dwutlenek siarki $\text{SO}_2$		dwutlenek azotu $\text{NO}_x$	
	1987	1990	1987	1990	1987	1990
Dortmund	83	60	55	22	55	47
Bottrop	87	59	73	43	52	44
Duisburg	68	62	61	35	52	48
Kolonia	56	42	44	22	47	50
Dąbrowa						
Górnicza	232	146	121	65	103	85
Katowice	251	157	77	69	114	90
Chorzów	260	169	93	82	116	100
Gliwice	216	116	62	50	94	64

Materiały źródłowe:

- 1) Berichte Über die Luftqualität in Nordrhein-Westfalen, TEMES-Jahresbericht 1987 oraz TEMES-Jahresbericht 1990, wyd. Landesanstalt für Immissionsschutz Nordrhein-Westfalen, Essen.
- 2) Zanieczyszczenie atmosfery w województwie katowickim w latach 1985-1987 oraz Zanieczyszczenie atmosfery w województwie katowickim w latach 1988-1990, wyd. Wojewódzka Stacja Sanitarno-Epidemiologiczna w Katowicach, Katowice.

Niszczanie skalnych materiałów budowlanych stosowanych w budowlach kulturowych jest uzależnione od trzech zasadniczych czynników:

- od własności fizykochemicznych materiału skalnego, wynikających z budowy i składu mineralnego oraz jego genezy (petrologii),
- od sposobu obróbki i rodzaju materiałów wiążących,
- od czynników środowiskowych (warunki klimatyczno-meteorologiczne), które inicjują procesy wietrzenia.



Rys.1. Obserwowany postęp wietrzenia kamiennych obiektów zabytkowych w Zagłębiu Ruhry [1]

Fig.1. Weathering progress of the stone monuments observed in Ruhr District.[1].

Niszcząca działalność tego typu wietrzenia najbardziej uwidacznia się w regionach silnie uprzemysłowionych, gdzie zanieczyszczenie powietrza polutantami, takimi jak reaktywne  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{F}^-$  tworzące z opadami kwaśne deszcze, a także pyły i związki organiczne, jest bardzo duże (tabl.1). Niedawne badania potwierdziły bezpośrednią zależność możliwości rozwoju biomasy (porostów, glonów, grzybów oraz bakterii) na

powierzchni bądź też w warstwie przypowierzchniowej materii skalnej, od emisji powyższych polutantów [2], [3], [4]. Obserwowany postęp wietrzenia kamiennych obiektów zabytkowych w Zagłębiu Ruhry (rys.1) wskazuje, że na zjawisko to w dużej mierze ma wpływ emisja szkodliwych związków związana z rozwojem przemysłu zapoczątkowanym w drugiej połowie XIX w.

### 3. KATEDRA W KOLONII A CZYNNIKI ANTROPOGENICZNE

Pierwsze wzmianki historyczne o istnieniu świątyni w miejscu obecnie stojącej katedry sięgają początków tego tysiąclecia. W roku 1248 arcybiskup Konrad von Hochstaden położył kamień węgielny pod budowę katedry, która trwała aż do 1880 roku [5]. Zmieniająca się sytuacja finansowa inwestorów, ciągnąca się latami budowa, a także zniszczenia wojenne stały się przyczyną użycia różnorodnego, odmiennie odpornego na wietrzenie, materiału skalnego. W niektórych przypadkach nieodpowiednia obróbka kamieniarska czy też nieuwzględnienie warstwowania skał (bloków) przy stawianiu murów jeszcze bardziej obniżyły ich odporność na wietrzenie [6].

#### 3.1. Destrukcja skały budowlanej katedry

Do budowy katedry użyto trachitów, andezytów, latytów, piaskowców, wapieni i law bazaltowych.

Najmniej odporną na wietrzenie skałą, a tym samym wykazującą największe szkody, okazał się, użyty do budowy w latach 1845 do 1865, górnotriasowy (środ. kajper) piaskowiec ze Schlaitdorfu (Wirtembergia). Głównymi przyczynami wpływającymi na silnie postępującą, w odróżnieniu od innych rodzajów skał, destrukcję tego piaskowca jest jego dolomitowe spoiwo reagujące z "kwaśnymi deszczami", głównie związkami siarki, tworząc siarczany Mg i Ca (chemiczny efekt destrukcji) oraz gruboziarnista i porowata więźba. Piaskowiec ze Schlaitdorfu w miejscach nie bezpośrednio poddanych oddziaływaniu "kwaśnych deszczów" (nieekspozowanych) wykazuje zwietrzenia w formie zbitych, bardzo silnie wzbogaconych w siarczany (w znacznej części w gips) zaczernionych skorup. W miejscach ekspozowanych, często zraszanych deszczem powstają porowate powierzchnie, a piaskowiec rozsypuje się. Zawartość siarczanów w warstwie przypowierzchniowej jest wskutek wymycia przez deszcze dużo mniejsza [7]. Badania mikrobiologiczne zwietrzałego piaskowca wykazały, że bogate w gips czarne skorupy zawierają wiele heterotroficznych (cudzożywnych) bakterii, autotroficznych (samożywnych) bakterii nitryfikujących, grzybów oraz zielenic, powodujących

jego destrukcję biologiczną [8]. Nierzadko sięga ona głębokości 10 cm. Szczególnie niebezpieczne, zagrażające statyce katedry, są szkody występujące w obrębie przypór, luków przyporowych oraz pinakli (strzelistych wieżyczek).

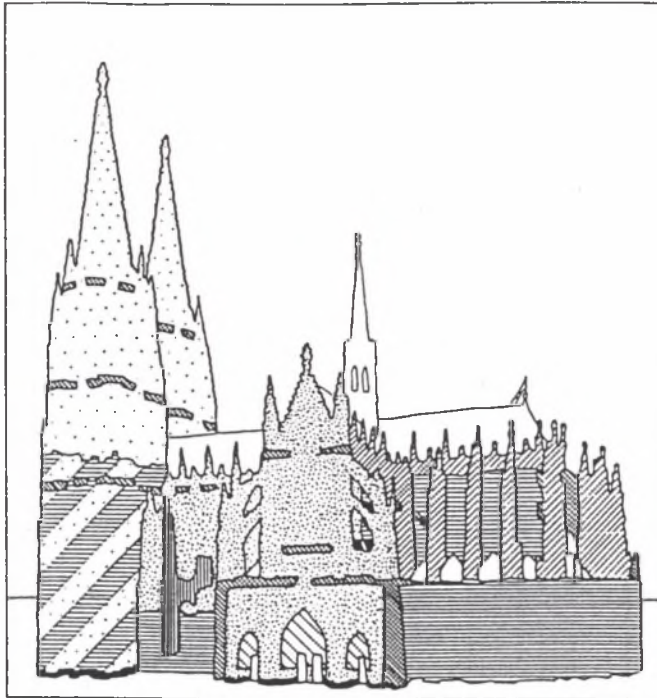
Przyczyną destrukcji miocenińskiego trachitu z Drachenfels (Eifel, Reńskie Góry Łupkowe) są powstałe na kontakcie fenokryształów (sanidynu) z drobnokrystalicznym ciastem skalnym mikrorysy, w które infiltrują roztwory soli, głównie łatwo rozpuszczalny w wodzie siarczan wapnia, powstały w wyniku reakcji kwasu siarkowego ("kwaśne deszcze") ze spoiwem węglanowym bądź z wapieniem, powodujące przy krystalizacji rozsadzanie skały (mechaniczny efekt destrukcji). Trachit kruszy się tworząc drobno- lub gruboziarnisty granulat. Szczególnie duży stopień destrukcji wykazują bloki trachitowe, którym towarzyszą elementy budowlane z wapienia muszlowego, np. w systemach przyporowych w obrębie prezbiterium.

W latach 1925 do 1944 w pracach renowacyjnych zastosowano środkowotriasowy wapień muszlowy z Krensheimu (Wirtembergia) zastępując w wyżej wspomnianych elementach budowlanych trachit z Drachenfels. Szkody powstałe w wyniku reakcji silnie reaktywnych polutantów (przede wszystkim związków  $\text{SO}_2$ ) z wapieniem objawiają się w postaci mikrokrasowych form przypowierzchniowych, zmian zabarwienia skały (wypłowienia i zmatowienia) oraz przypowierzchniowego wypreparowania skamielin (muszli). Rzeźby i baldachimy wykute z jurajskich wapieni z Savonnières (depart. Meuse/Francja) oraz Caen (Normandia/Francja) i poddane bezpośredniemu i wieloletniemu oddziaływaniu wilgoci i polutantów wykazują duży stopień destrukcji, natomiast w miejscach nieekspozowanych (portale) destrukcji skał nie zaobserwowano.



Podobnie nie zaobserwowano prawie żadnych objawów destrukcji na dolnokredowym (weald) piaskowcu z Obernkirchen (płd. Dolna Saksonia), albowiem charakteryzuje się on obecnością spoiwa krzemionkowego oraz brakiem minerałów reagujących z agresywnymi polutantami. Wyjątek stanowią jedynie bloki i elementy budowlane występujące w płn. i płd. galerii dachowej nawy głównej, którym towarzyszą skały słabo odporne na wietrzenie, np. piaskowiec ze Schlaitdorfu. W tym przypadku głównym czynnikiem wpływającym na destrukcję piaskowca z Obernkirchen są roztwory "soli obcych".

Najbardziej odporną na destrukcję skałą budowlaną katedry w Kolonii jest miocenińska lava bazaltowa z Londorfu (okol. Giessen, Hesja). Od 1952 roku do dnia dzisiejszego stosuje się ją zastępując silnie zwietrzałe elementy budowlane katedry.



Zestawienie wybranych właściwości fizykomechanicznych, a także form destrukcji najważniejszych rodzajów materiałów skalnych, jak i ich lokalizację na płd. fasadzie katedry przedstawiono w tabl. 2 i na rys.2.





**Trachit i andezyt**

- 1  z Drachenfels (1248 do 1560), rozkrusza się powoli, średni stopień zagrożenia
- 2  ze Stenzelbergu, z Wäikenburga, Berkum (i 1226 do 1275), łuszczy się, średni stopień zagrożenia



**Piaskowiec**

- 3  ze Schleitdorfu (1842 do 1863), mocno się rozsypuje, bardzo duży stopień zagrożenia
- 4  z Obernkirchen (1845 do 1880), obecnie nie zagrożony

**Wapień**

- 5  Wapień muszlowy z okolic Menu (1904 do 1939), pierwsze ślady wietrzenia
- 6  z Savonieres, Caen i inne (1845 do 1875), w miejscach ostrońietych (portale) nie zagrożony, w nieostrońietych już zniszczony

**Lawa bazaltowa**

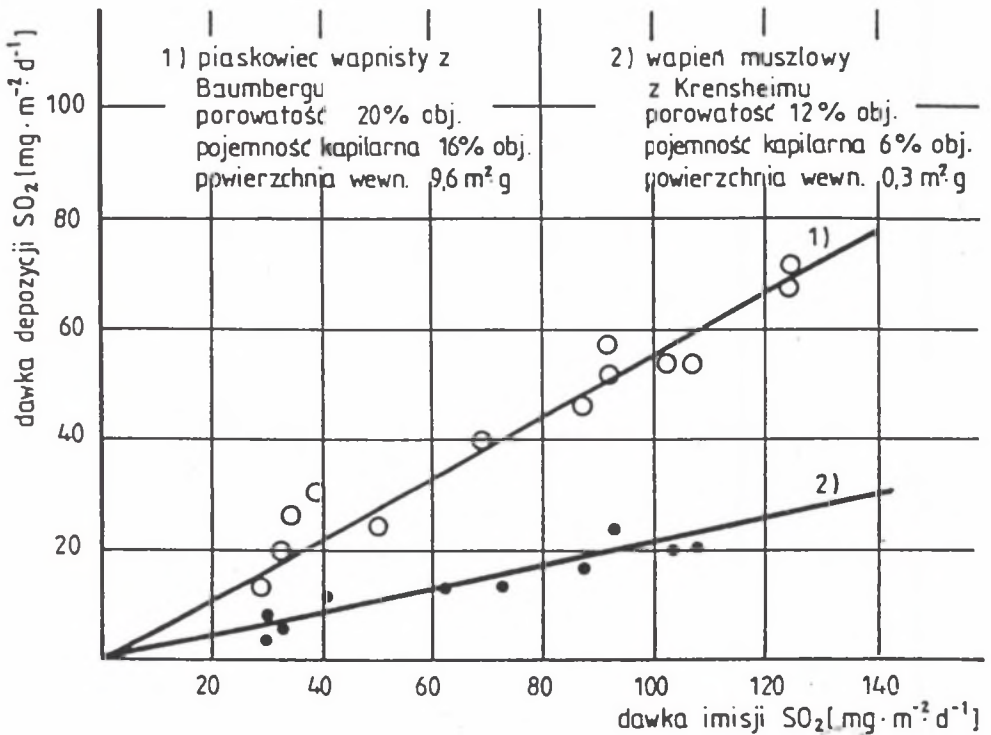
- 7  z Mayen, Niedermendig (1826 do 1972), nie jest zagrożony
- 8  z Londorf (od 1952), niezagrożony

Rys.2. Schematyczne przedstawienie południowej fasady katedry w Kolonii z uwzględnieniem najważniejszych rodzajów skał budowlanych [16]

Fig.2. Schematic representation of the south facade of Cologne Cathedral indicating the distribution of the major stone materials [16]

### 3.2. Warunki imisyjne katedry w Kolonii

Niekorzystny mikroklimat w miejscu lokalizacji katedry - słabe wiatry, częste inwersje stanu pogody (utrudnienie w pionowym i poziomym ruchu powietrza) - a także lokalizacja w centrum wielkiego miasta z relatywnie wysokim stopniem zanieczyszczenia powietrza, w niewielkiej odległości od dworca kolejowego, są głównymi przyczynami destrukcji materii skalnej.



Rys.3. Korelacja pomiędzy dawką emisji SO<sub>2</sub> a dawką depozycji tego związku w wapieniu muszlowym z Krensheimu oraz w piaskowcu wapnistym z Baumbergu [12]  
Fig.3. Correlation between SO<sub>2</sub> immission and SO<sub>2</sub> deposition for Baumberger Sandstein and Krensheimer Muschelkalk [12]



Tabela 2

Zestawienie wybranych właściwości fizykomechanicznych skał użytych do budowy katedry w Kolonii [8]

Nazwa skały	Porowatość (% obj.)	Nasiąkliwość wodą (% mas.)	Ocena odporności na wietrzenie	Formy destrukcji
Wapień muszlowy z Krensheim (Krensheimer Muschelkalk)	13,83	2,44	na ogół dobra	powstawanie mikrokrasowych form przypowierzchniowych oraz wyraźnych wypreparowań skamielin
Piaskowiec z Schlaitdorfu (Schlaitdorfer Sandstein) <sup>1)</sup>	18,77	4,96	słaba do średniej	często silne proszkowanie, złuszczenia, tworzenie się rozwarstwień i skupień gipsu
Piaskowiec z Obernkirchen (Obernkirchener Sandstein) <sup>2)</sup>	20,56	5,12	dobra do b. dobrej	rzadko występ. rozwarstwienia oraz zwietrzenia w formie wgłębień
Piaskowiec z Baumbergu (Baumberger Sandstein) <sup>1)</sup>	19,08	6,42	słaba do średniej	proszkowanie, powstawanie skorup i skupień gipsu
Lawa bazaltowa z Londorfu (Londorfer Bazaltlava)	18,01	3,03	bardzo dobra	
Trachit z Drachenfels (Drachenfels-Trachyt)	13,38	3,92	średnia, częściowo dobra	rozluźnienie i wypadanie sanidynu, powstawanie rozwarstwień, złuszczeń; rozsypywanie się
Latyt ze Stenzelbergu (Stenzelberger-Latit)	4,15	1,42	średnia do dobrej	powstawanie rozwarstwień, złuszczeń; rozsypywanie się, wypadanie prakryształów (skupień minerałów maficznych)

1) Spoiwo przeważnie dolomitowe, miejscami krzemionkowe i ilaste (kaolinit, illit).

2) Spoiwo krzemionkowe, miejscami kaolinitowe.

3) Mikrytowa matryks z niewielką ilością peloidów, podrzędnie - kaolinit i chalcedon jako wypełnienie porów.

Problem ten zauważono już na początku tego stulecia [9], ale konkretne kroki w celu zbadania procesów wietrzenia, jak też przetestowania znajdujących się na rynku środków konserwujących materię skalną podjęto dopiero na zlecenie Centralnego Stowarzyszenia Budowy Katedry (Zentral-Dombau-Verein) na początku lat siedemdziesiątych.

W tym celu zainstalowano w różnych miejscach katedry urządzenia pomiarowe IRMA (Immissions-Raten-Meß-Apparaten), mierzące dawkę emisji  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{F}^-$ . Pomiaru te prowadzone są w sposób ciągły od roku 1980 do dnia dzisiejszego przez Zollern-Institut przy Niemieckim Muzeum Górnictwa w Bochum (Zollern-Institut beim Deutschen Bergbau-Museum) i są częścią prac naukowych tego instytutu, finansowanych przez Związkowe Ministerstwo ds. Badań i Technologii (Bundesministerium für Forschung und Technologie).

Wieloletnie pomiary dawki emisji przeprowadzone na różnych wysokościach przez ww. instytut wykazały, że:

- wielkość dawki emisji  $\text{SO}_2$  i  $\text{Cl}^-$  jest uzależniona od pór roku, osiągając maximum w miesiącach zimowych, minimum w miesiącach letnich, zależności tej nie zaobserwowano przy pomiarach  $\text{NO}_2$  oraz  $\text{F}^-$ .
- przez ostatnie dwadzieścia lat zarysowała się wyraźna tendencja spadkowa dawki emisji powyższych polutantów (tab.3) [10],
- wraz z wysokością stanowiska pomiarowego zwiększa się dawka emisji i wynosi dla:
 

$\text{SO}_2$	85,4	(20m)	oraz	111,5	$\text{mg/m}^2 \cdot \text{d}$	(65m),
$\text{Cl}^-$	4,7	(20m)	oraz	6,7	$\text{mg/m}^2 \cdot \text{d}$	(65m),
$\text{F}^-$	0,41	(20m)	oraz	1,24	$\text{mg/m}^2 \cdot \text{d}$	(65m) [11],
- istnieje zależność pomiędzy dawką emisji a dawką depozycji  $\text{SO}_2$  w formie gipsu w skale, świadcząca o znaczącym wpływie tego związku na destrukcję skalnych materiałów budowlanych [12]. Korelację tą przedstawiono na rys.3.
- obciążenie imisyjne polutantami Katedry w Kolonii osiąga takie wartości, jakie stwierdzono w Duisburgu, wysoko uprzemysłowionym mieście Zagłębia Ruhry.

Tabela 3

Średnie roczne wartości dawki emisji  $\text{SO}_2$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{F}^-$  i  $\text{NO}_2$  w latach 1972/1973, 1980/1981 oraz 1989/1990

Okres pomiaru	Dawka emisji ( $\text{mg/m}^2 \cdot \text{d}$ )			
	$\text{SO}_2$	$\text{Cl}^-$	$\text{F}^-$	$\text{NO}_2$
1972/73	121,0	8,8	1,7	n.o.
1980/81	68,4	3,7	0,5	5,3
1989/90	29,5	3,8	0,4	1,9

#### 4. METODY BADAŃ LABORATORYJNYCH SKALNEGO MATERIAŁU BUDOWLANEGO

Równocześnie z pomiarami emisji przeprowadzono badania laboratoryjne budulca skalnego, przed i po nasyceniu różnymi środkami konserwującymi, użytego do budowy katedry (testy rozsadzania skały przez krystalizującą sól; oraz przez kolejne zamrażanie i rozmrażanie). Badania te miały na celu sprawdzenie przydatności danego preparatu do konserwacji poszczególnych rodzajów skał. Spośród 15 środków konserwujących wyselekcjonowano tą metodą pięć [13]:

1. Tegovakon H (fa. Th. Goldschmidt AG, Essen) - ester kwasu krzemowego zawierający komponent hydrofobowy (system dwuskładnikowy). Środek ten powoduje wzmocnienie skały w wyniku reakcji kwasu krzemowego, który zostaje uwolniony przy hydrolizie estru. Preparat ten nadaje się do konserwacji zwietrzałych elementów z gruboziarnistego piaskowca ze Schlaitdorfu oraz piaskowca z Baumbergu.

2. Wacker Sandsteinverfestiger H (fa. Wacker - Chemie GmbH, Monachium) - działanie środka polega na wytrąceniu kwasu krzemowego w wyniku hydrolizy estru (system jednoskładnikowy). Środek ten skutecznie utwardza i wzmacnia zwietrzały, gruboziarnisty piaskowiec ze Schlaitdorfu.

3. Środek ochrony budowli (Bautenschutzmittel) LP-C 3631/2 (fa. Dynamit Nobel AG, Troisdorf) - związki krzemowo-organiczne, które hydrolizują po wsiąknięciu w skałę, działając hydrofobizująco i utwardzająco. Nadaje się do konserwacji grubo- i drobnoziarnistego piaskowca ze Schlaitdorfu, piaskowca z Obernkirchen, wapienia muszlowego z Krensheimu oraz trachitu z Drachenfels,

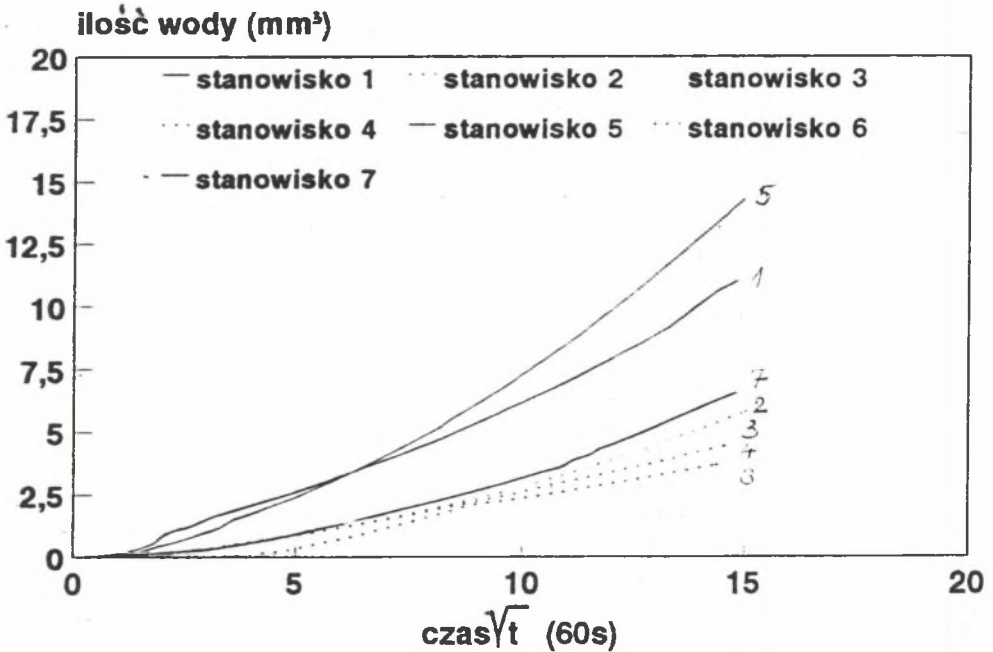
4. Środek ochronny budowli (Bautenschutzmittel) LP-C 3631/3 (fa. Dynamit Nobel AG, Troisdorf). Preparat impregnuje skutecznie grubo- i drobnoziarnisty piaskowiec ze Schlaitdorfu, piaskowiec z Obernkirchen oraz wapień muszlowy z Krensheimu,

5. Preparat JMC-MMA (fa. JMCHEMIE Kunststoff GmbH, Wermelskirchen) - środek na bazie metakrylanu metylu. Nadaje się do konserwacji tylko małych elementów architektonicznych, albowiem technologia przy użyciu tego preparatu wymaga całkowitego w nim zanurzenia.

#### 5. POMIARY TRWAŁOŚCI HYDROFOBIZACJI

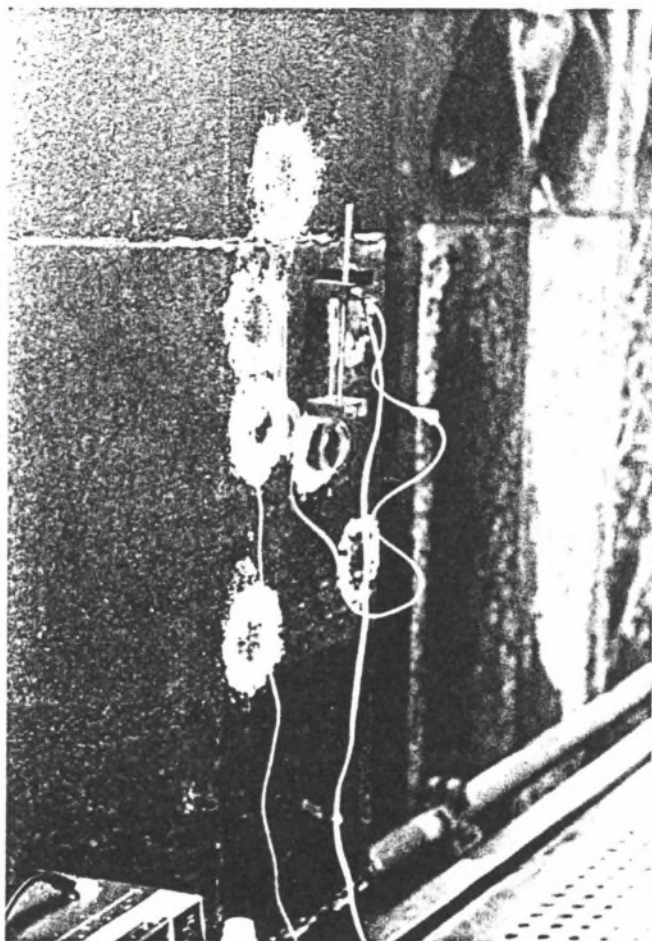
W latach 1972-1984 zastosowano powyższe środki do konserwacji elementów budowlanych katedry, np. ściany szczytowej północnej nawy poprzecznej, niektórych przepór, południowej fasady nawy poprzecznej i in. W celu sprawdzenia skuteczności

prac konserwatorskich przeprowadzono w latach 1986-1989 serię pomiarów nasiąkliwości wodą przez skałę poddaną, jak i też w celach porównawczych, nie poddaną konserwacji. Pomiary te przeprowadzono za pomocą rurki Karstena przylepionej kitem do powierzchni bloku skalnego (fot.1) [14]. Zestawienie pomiarów, przedstawionych w formie krzywych, przeprowadzonych w różnych punktach piaskowca ze Schlaitdorfu, który nie został nasączony środkiem konserwującym, wskazuje na dużą rozpiętość w ilości pochłoniętej przez skałę wody, co świadczy o niejednorodności bloku skalnego (rys.4).



Rys.4. Pomiary nasiąkliwości wodą, nie nasączonego środkiem konserwującym piaskowca ze Schlaitdorfu, określane metodą rurki Karstena, mierzone w siedmiu punktach tego samego bloku [15]

Fig.4. Water absorption measurements of untreated Schlaitdorfer Sandstein measured at seven places at the same stone block by Karsten's test tube method

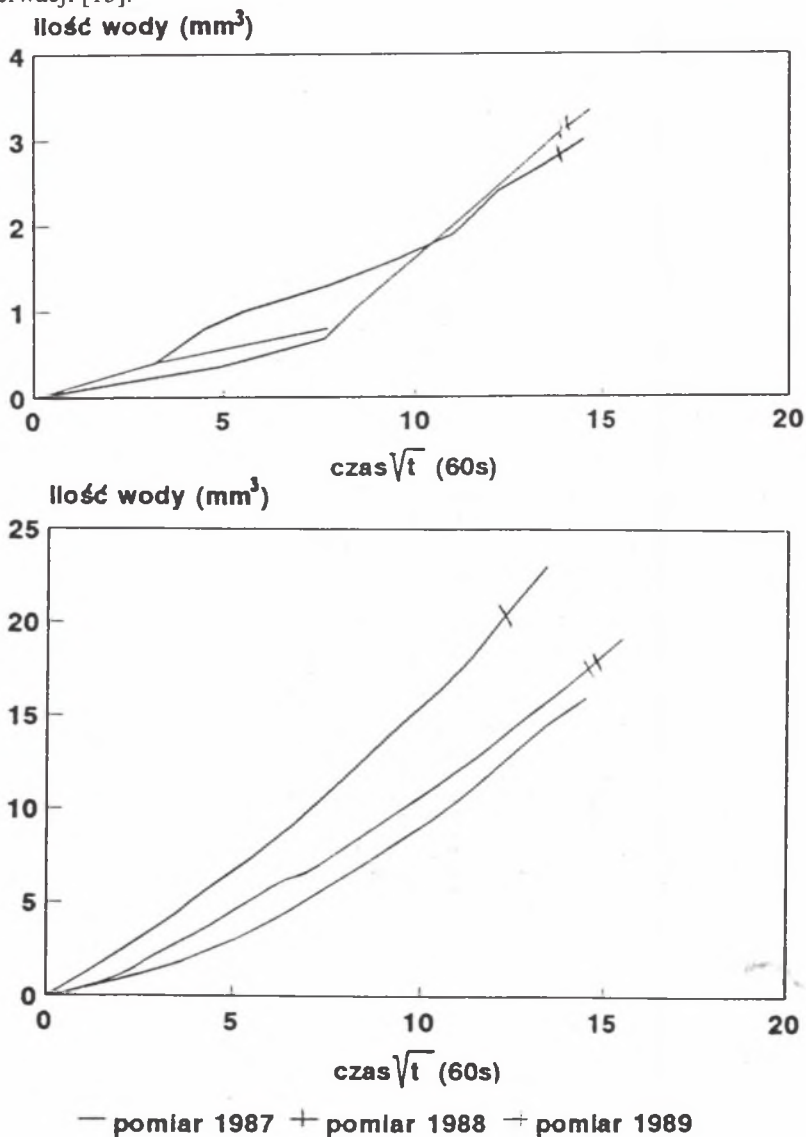


Fot. 1. Pomiary nasiąkliwości wodą przeprowadzane za pomocą rurki Karstena, przyklepionej do bloku skalnego galerii dachowej Katedry w Kolonii

Photo 1. Water absorption measurements realized by Kersten's test tube method. Test tube stuck on the stone block of the roof gallery of Cologne Cathedral

Na rys. 5 przedstawiono wyniki przeprowadzonych w latach 1987-1989 pomiarów nasiąkliwości wodą nasączonego w 1977 r. środkiem hydrofobowym Dynasytan BSM 40 S oraz środkiem wzmacniającym Funosil OH (fa. Remmes-Chemie,

Lönningen) piaskowca ze Schlaitdorfu. Ilość wody pochłoniętej przez skałę w ciągu 4 godzin wyniosła ok. 3,5 ml (w przypadku skały nie nasączonej środkiem hydrofobowym, dolna część rys.5, ok. 20 ml) co świadczy o trwałości przeprowadzonej konserwacji [15].



Rys.5. Pomiary nasiąkliwości wodą, nasączonego oraz nie nasączonego środkiem konserwującym piaskowca ze Schlaitdorfu, określane metodą rurki Karstena w latach 1987, 1988, i 1989 [15]

Fig.5. Water absorption measurements of Schlaitdorf sandstone untreated (top) and treated with a preservative treatment (bottom), determined by Karsten's test tube method in 1987, 1988 and 1989

## 6. WNIOSKI

Destrukcja budowli ze skał budowlanych, obserwowana w regionach uprzemysłowionych oraz w aglomeracjach miejskich, jest ściśle związana z zanieczyszczeniami powietrza - emisją  $\text{SO}_2$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{NO}_2$  oraz pyłów i związków organicznych.

Pomiary imisji tych związków przeprowadzone za pomocą stacji IRMA zlokalizowanych na katedrze w Kolonii, a także analiza zwietrzelin skał budowlanych katedry wskazują, że główny wpływ na destrukcję ma przede wszystkim  $\text{SO}_2$ , reagujący z węglanami (wapienie bądź spoiwo węglanowe) tworząc gips, który krystalizując rozsadza skałę.

Istnieją dwie możliwości uchronienia zabytkowych, kamiennych obiektów budowlanych przed niszczącą działalnością zanieczyszczeń powietrza:

- 1) maksymalne zmniejszenie emisji polutantów (co uczyniono w ostatnich latach w Niemieckiej Republice Federalnej),
- 2) zastosowanie odpowiednich środków konserwujących, które zapewniłyby, przez dziesiątki lat, ochronę skały przed wtargnięciem w jej strukturę agresywnych "kwaśnych deszczów".

W celu wyselekcjonowania odpowiedniego dla poszczególnego rodzaju skał (piaskowiec, wapienie, trachity itp.) środka konserwującego, konieczne jest przeprowadzenie wielu testów laboratoryjnych.

Po przeprowadzonych na obiekcie zabiegach konserwujących skałę celowe jest sprawdzenie skuteczności hydrofobizacji, np. metodą pomiarów nasiąkliwości wodą, mierzonej za pomocą rurki Karstena.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Winkler E.M.: Stone - Properties, Durability in Man's Environment. Wien/New York 1973.
- [2] Blaschke R.: Schleimbildende Mikroorganismen und nitrifizierende Bakterien als Helfer der Gipsbildung in Naturstein. "Bautenschutz & Bausanierung", Sonderausgabe zum 1. Statusseminar des BMFT-Projektes "Bausubstanzerhaltung in der Denkmalpflege". Mainz 1987, s.38-41.
- [3] Bock E.: Biologisch induzierte Korrosion von Naturstein - starker Befall mit Nitrifikanten. "Bautenschutz & Bausanierung", Sonderausgabe zum 1. Statusseminar des BMFT-Projektes "Bausubstanzerhaltung in der Denkmalpflege". Mainz 1987, s. 42-45.

- [4] Krumbein W.E.: Biogene Krusten - Schaden - Schutz - Sanierung. "Bautenschutz & Bausanierung", Sonderausgabe zum 1. Statusseminar des BMFT-Projektes "Bausubstanzerhaltung in der Denkmalpflege". Mainz 1987, s. 61-64.
- [5] Schulten W.: Der Dom zu Köln. Greven Verlag, Köln 1988.
- [6] Eickelberg U., Herppich S., Zallmanzig J.: Die Dokumentation in der Bestandsaufnahme - Untersuchung, Bewertung und Restaurierung denkmalpflegerischer Objekte, Statusbericht der Arbeitsgruppe "Bestandsaufnahme" des BMFT-Projektes "Steinzerfall". "Bautenschutz & Bausanierung", Sonderheft. Mainz 1992.
- [7] Knöfel D.: Chemisch-mineralogische Profiluntersuchungen an Natursteinen des Kölner und des Regensburger Domes. "Bautenschutz & Bausanierung", Sonderausgabe zum 1. Statusseminar des BMFT-Projektes "Bausubstanzerhaltung in der Denkmalpflege". Mainz 1987, s. 33-37.
- [8] Grim W.-D.: Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine der Bundesrepublik Deutschland. Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, Arbeitsheft 50, München 1990.
- [9] Kisky W.: Aus der Geschichte der Dombaus. Zeitschrift des Rheinischen Vereins für Denkmalpflege und Heimatschutz 1927. H.3, 34.
- [10] Kipp S., Zallmanzig J.: Fortführung der Immissionsraten-messungen am Kölner Domblatt", 55, Folge, Köln 1990, s. 233-242.
- [11] Luckat S.: Die Einwirkung von Luftverunreinigungen auf die Bausubstanz des Kölner Domblatt" 38/39. Folge, Köln 1974, s. 95-106.
- [12] Mirwald P.W.: Umweltbedingte Gesteinszerstörung untersucht mittels Freiland - Verwitterungsexperimenten. "Bautenschutz & Bausanierung", Sonderausgabe zum 1. Statusseminar des BMFT-Projektes "Bausubstanzerhaltung in der Denkmalpflege", Mainz 1987, s. 25-27.
- [13] Luckat S.: Die Einwirkung von Luftverunreinigungen auf die Bausubstanz des Kölner Domes 4. "Kölner Domblatt" 42. Folge, Köln 1977, s. 151-188.
- [14] Noll W. (1968): Chemie und Technologie der Silicone. Weinheim/Bergstr. 1968. s. 528-532.
- [15] Ochwat K.: Versuche zur Messung der Wasseraufnahme an verschiedenen Steinarten des Kölner Domes. Nicht veröffentlicht. Ergebnisse, Archiv des Zollern-Institutes in Bochum, Bochum 1989.
- [16] Zollern-Institut: Grundlagenforschung zur Erhaltung von Kulturdenkmälern. "Der Anschnitt" 2-3, 32., Bochum 1980, s.147-154.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Wiesław GABZDYL

Wpłynęło do Redakcji w lipcu 1993 r.



## Abstract

The Cathedral of Cologne, one of the most prominent monuments in Germany, is located in the extensively urbanized and industrialized Lower Rhine valley.

At the Cologne Cathedral with its great variety of natural stones (sandstone, limestone, trachyte, basalt, etc.) different phenomena of weathering can be observed. Besides natural weathering the destruction of material caused by air borne pollutants is of interest. As the main cause for this damage  $\text{SO}_2$  was determined. Long term IRMA-measurements, immission measurements and analyses of the weathering products confirmed the correlation between the rate of immission and stone destruction. Additional destruction to the predamaged stone is caused by biological corrosion.

Protective agents to secure the natural stone from penetration into its structure by pollutants have been chosen by laboratory investigations (crystallisation tests). The results of water absorption measurements (by Karsten Test Tube Method) proved the stability of conservative treatments applied to the building twelve years ago.