

# Rudolf Molisz

---

## Elektrokinetyczne metody konserwacji zabytków

---

Ochrona Zabytków 9/3 (34), 133-150

---

1956

Artykuł został zdigitalizowany i opracowany do udostępnienia w internecie przez Muzeum Historii Polski w ramach prac podejmowanych na rzecz zapewnienia otwartego, powszechnego i trwałego dostępu do polskiego dorobku naukowego i kulturalnego. Artykuł jest umieszczony w kolekcji cyfrowej [bazhum.muzhp.pl](http://bazhum.muzhp.pl), gromadzącej zawartość polskich czasopism humanistycznych i społecznych.

Tekst jest udostępniony do wykorzystania w ramach dozwolonego użytku.

# OCHRONA ZABYTKÓW

ROK IX

NR 3 (34)

## ELEKTROKINETYCZNE METODY KONSERWACJI ZABYTKÓW

RUDOLF MOLISZ

Blisko 150 lat temu fizyk rosyjski F. F. Reuss, Profesor Uniwersytetu Moskiewskiego, dokonał ciekawego odkrycia. W jednym ze swych doświadczeń zauważył, że stały prąd elektryczny przepuszczany przez nasycony wodą pył kwarcowy wywołuje w nim ruch wody w kierunku elektrody ujemnej. Aparatura doświadczalna, którą posługiwał się Reuss, była bardzo prosta. Jej główną częścią składową była rurka szklanna, wygięta w kształt litery „U”, w którą wtopione były platynowe elektrody. Pomiedzy elektrodami rurka wypełniona była pyłem kwarcowym. Po nalaniu do rurki wody i włączeniu elektrod w obwód stałego prądu elektrycznego, Reuss zauważył w ramieniu rurki z elektrodą ujemną podnoszenie się poziomu wody (ryc. 143). Zjawisko to otrzymało nazwę elektro-endo-osmozy, lub krótko elektroosmozy. Dalsze badania wykazały, że elektroosmoza może zachodzić tylko wtedy, gdy kanaliki porowatej masy, utworzonej np. z użytego przez Reuss'a pyłu kwarcowego, posiadają bardzo małe przekroje i tworzą zespół połączonych wzajemnie włoskowatych rurek, zwanych kapilarami. Pory piasku nawet drobnoziarnistego są już zbyt dużych wymiarów na to, by mógł w nich powstać elektroosmotyczny ruch wody. Dobre warunki dla elektroosmozy będą w gruntach o bardzo drobnych ziarnach, jak np. w gruntach pylistych, w glinach i iłach. Dobrym środowiskiem jest także każde nasycone wodą porowate ciało stałe, takie jak drewno, beton, cegła, niektóre porowate skały osadowe (piaskowiec, wapień), bibuła, tektura, papier itp. Chociaż doświadczenia Reuss'a z powodzeniem wykorzystano w przemyśle ceramicznym, zaś wielu późniejszych uczonych, a między innymi Smoluchowski, profesor Uniwersytetu Lwowskiego, kontynuowało takie badania, to jednak odkrycie to przez długie lata nie znalazło żadnego innego praktycznego zastosowania.

Zagadnieniem przyczynowości elektroosmotycznego przepływu cieczy w środowisku porowatym zajmowali się: Dorn, Nernst i Helmholtz. Według nich siłą poruszającą ciecz w polu elektrycznym są zjawiska elektryczne, występujące na granicy powierzchni fazy stałej i ciekłej. Pierwszą grupę stanowią zjawiska elektrokapilarne, takie jak napięcie powierzchniowe, napięcie międzyfazowe, adsorpcja itd. Mogą one występować na granicy faz ciała stałego i cieczy, ciała stałego i gazu, cieczy i gazu oraz dwóch cieczy. Ponieważ na granicy faz istnieje różnica potencjałów, to po przyłożeniu zewnętrznej siły elektromotorycznej będzie następowało wzajemne przesuwanie faz. Natomiast podczas ruchu jednej fazy względem drugiej powstanie siła elektromotoryczna. Te dwa zjawiska należą już do grupy zjawisk elektrokinetycznych. Tak więc pod działaniem zewnętrznej siły elektromotorycznej może nastąpić ruch cieczy względem powierzchni ciała stałego i wtedy ma się do

czynienia z elektroosmozą. W przypadku nadmiaru cieczy, gdy cząstki ciała stałego mają w niej swobodę ruchów, wówczas wystąpi zjawisko elektroforezy, lub elektrokataforezy, polegające na wędrówce cząstek naładowanych dodatnio do katody, ujemnie do anody.

Znane jest jeszcze trzecie zjawisko, którego nie można pominąć, gdy mówi się o praktycznym wykorzystaniu przepływu stałego prądu elektrycznego przez grunt. Nosi ono nazwę elektrokinetycznej wymiany jonów. Aby zrozumieć, na czym to zjawisko polega, należy zapoznać się z pojęciem gruntu. Wiemy, że grunt jest ciałem niejednorodnym, w którego skład wchodzi cząstki mineralne, woda z rozpuszczonymi w niej substancjami chemicznymi oraz powietrze i gazy. Własności gruntu zależą od wzajemnego stosunku ilościowego i jakościowego wymienionych składników. Nas interesować będzie przede wszystkim skład mineralny gruntu, stanowiący jego główne tworzywo. Zdołano stwierdzić, że im drobniejsze są części gruntu tym większy mają one wpływ na jego własności, szczególnie dotyczy to najdrobniejszych cząstek (koloidalnych) zwanych ilastymi, o wymiarach mniejszych od 0,001 mm.

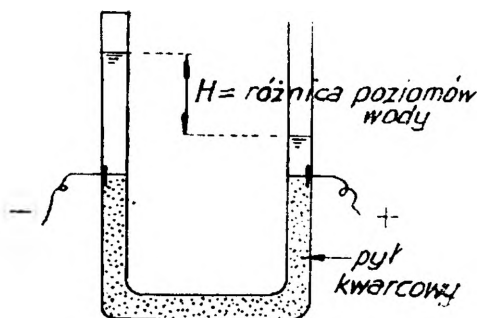
Cząstka koloidalna, znajdując się w wodzie lub roztworze wodnym, otoczona jest warstwą jonów. W środowisku wodnym jony znajdujące się w wodzie mogą przechodzić na powierzchnię cząstek ilastych, wypierając inne zgrupowane tam jony. Zjawisko to nazywamy wymianą jonową. Większą zdolność wymiany posiadają jony o większej wartościowości. W normalnych warunkach gruntowych w ilach zachodzi najczęściej wymiana kationów. Kationy trójwartościowe żelaza lub glinu mają większą zdolność wymiany od kationów dwu lub jednowartościowych, takich jak np. wapń, magnez, potas lub sól. Stały prąd elektryczny przepuszczany przez grunt ułatwia i przyspiesza wymianę jonową. Zauważono, że kationy glinu wprowadzone do gruntu wpływają korzystnie na pewne jego własności. Niektórzy uczeni, jak Casagrande w Niemczech, a prof. Cebertowicz w Polsce wykorzystali to zjawisko dla praktycznych celów budowlanych. Obaj posłużyli się elektrodami aluminiowymi wbitymi do gruntu. Pierwszy z nich w r. 1935 badał sposoby zwiększenia nośności pali fundamentowych. Stosował on elektrody aluminiowe w formie osłony nałożonej na pali, stwierdzając, że nadają się one najzupełniej do elektrokinetycznego wzmacniania gruntów w drodze opisanej poprzednio wymiany jonowej, tj. przez wprowadzenie do gruntu kationów glinu. Drugi wykorzystał tę metodę w czasie odbudowy kościoła św. Anny w Warszawie, używając jako elektrod prętów aluminiowych  $\varnothing$  10 mm, wbijanych w grunt. Ważniejsze szczegóły tej pracy podane będą w dalszej części niniejszego artykułu.

Wszystkie dotychczasowe prace, dotyczące praktycznego wykorzystania zjawisk elektrokinetycznych w zakresie budownictwa lądowego i wodnego szły w trzech zasadniczych kierunkach:

1. Elektroosmotycznego osuszania silnie nawodnionych gruntów spoistych.
2. Elektrochemicznej konsolidacji gruntów z zastosowaniem elektrod, biorących w tym procesie aktywny udział, jak np. aluminium (wymiana jonowa).
3. Elektrokinetycznej stabilizacji gruntów przez wprowadzenie do nich roztworów chemicznych drogą elektroosmozy (cebertyzacja).

Skuteczność zjawiska elektroosmozy wypróbowana była po raz pierwszy w r. 1940. Przy budowie wykopu na trasie linii kolejowej z Salzgitter (Niemcy) natrafiono na grunt tak plastyczny, iż nie można było uformować skarp nawet przy bardzo łagodnym pochyleniu 1:3. Po zastosowaniu elektroosmozy dalsze wykonywanie tego 7,5 m głębokości wykopu było możliwe nawet

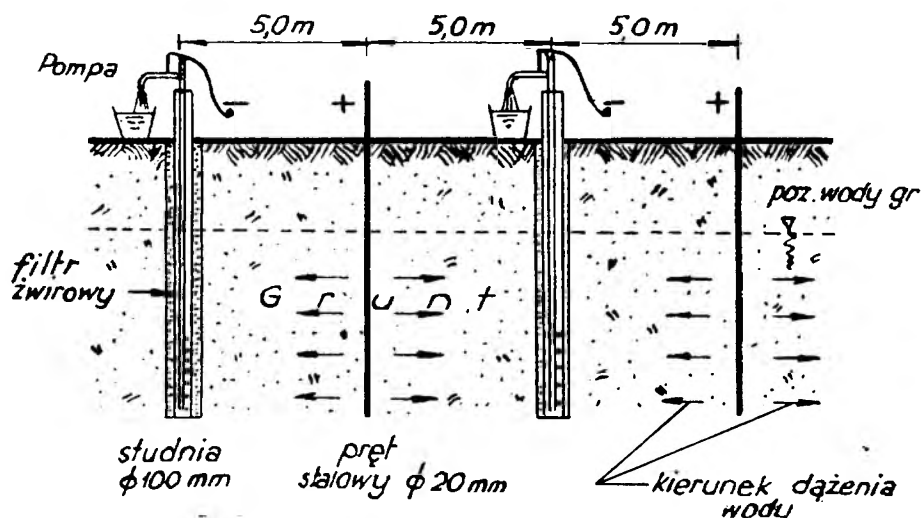
pod kątem nachylenia skarp równym  $70^{\circ}$ . Prace trwały 8 tygodni. Elektrodamy dodatnimi (katodami) były pręty żelazne ( $\varnothing 20$  mm) wbijane na głębokość 7,5 m w odstępach co 10 m. W połowie odległości między katodami zakładane były studnie z rur stalowych  $\varnothing 10$  cm, perforowanych i owiniętych filtrem z miedzianej siatki. Rury obłożone były wokół żwirem, mającym ułatwić dopływ wody gruntowej do studni. Studnie podłączone do bieguna ujemnego, były anodami. Katody (pręty) i anody (studnie) tworzyły szeregi elektrod o rozstawie 5 m. (ryc. 144). Mechaniczny przebieg procesu elektroosmotycznego odwodnienia, zwanego elektrodrenażem, lub elektro-odwodnieniem polegał na wędrówce wody gruntowej do studzien włączonych w obwód elektrycznym do bieguna ujemnego. Wodę gromadzącą się w studni usuwano pompą ręczną.



Ryc. 143. Schemat przyrządu, na którym Reuss badał zjawisko elektroosmozy. Rys. J. Nowiński

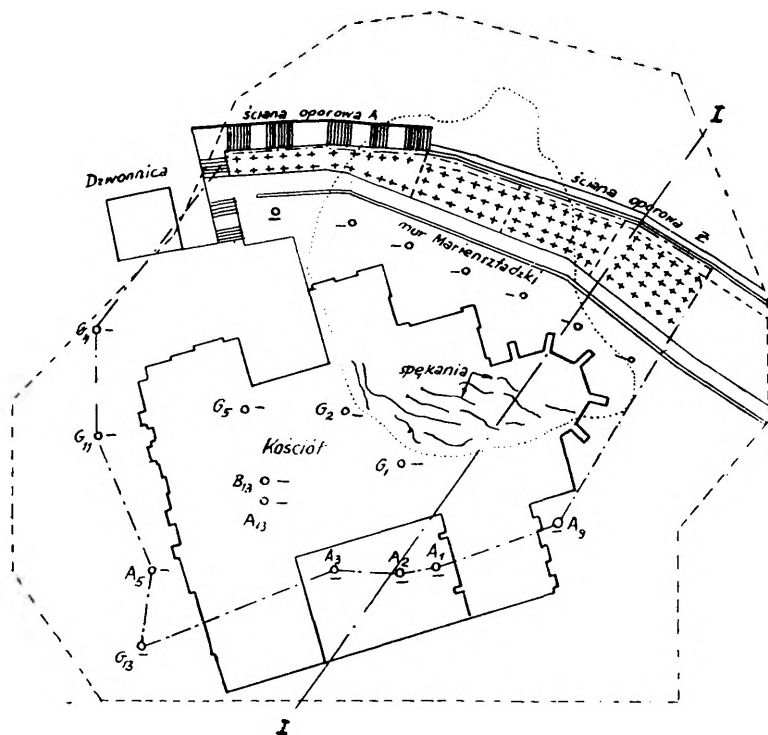
Ogólne napięcie prądu elektrycznego wyniosło 90—180 V, spadek potencjału między elektrodami 0,18—0,36 V/cm przy przeciętnym natężeniu prądu 20 A na jedną studnię. Na osuszenie  $1 \text{ m}^3$  gruntu zużyto około 27 kWh.

Pomyślny wynik prac osiągnięty w Salzgitter zachęcił do stosowania elektrodrenażu i w innych przypadkach. W r. 1944 w Lerkandel budowano tunel, którego wylot miał znajdować się w otwartym wykopie głębokości około 15 m. W czasie robót natrafiono na tzw. kurzawkę (grunt płynny) i tylko elektrodrenaż, wykonany w sposób podobny do opisanego poprzednio, umożliwił pomyślne głębień wykopu. Przy rozstawie elektrod równym 4,5 m, napięcie prądu elektrycznego wynosiło tylko 30 V, spadek potencjału około 0,066 V/cm, zaś średnia natężenia prądu 15 A na 1 studnię.

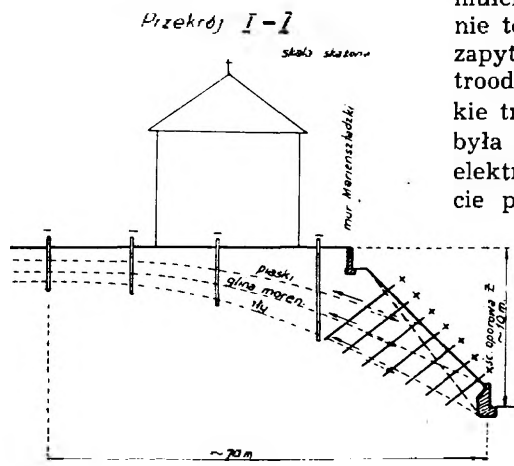


Ryc. 144. Schemat instalacji elektrodrenażu. Rys. J. Nowiński.





- Oznaczenia
- granica pola elektr.
  - ..... obszar największego różnicy ruchów ziemnych
  - ..... obszar bezpośrednio objęty osłoniętymi ruchami
  - + + + elektrody aluminiowe
  - elektrody użyczne (studnie z rur)



W tym samym roku w porcie Trontheim budowano fundamenty pod schron dla łodzi podwodnych. Była to potężna budowla o wymiarach  $230 \times 100$  m, położona tuż nad brzegiem morza na głębokości 14 m. I tutaj natrafiono na mułek i płynne piaski, które wykonanie tej budowli postawiły pod znakiem zapytania. Dzięki zastosowaniu elektrodwodnienia zdołano pokonać wszelkie trudności. Metodyka pracy podobna była do poprzednio opisanych. Rozstaw elektrod wynosił 4,5 m, ogólne napięcie prądu elektrycznego 40V, spadek potencjału 0,09 V/cm, a zużycie prądu na 1 m<sup>3</sup> osuszonego gruntu wynosiło tylko 0,4 KWh.

Ryc. 145 i 146. Kościół św. Anny w Warszawie w czasie prac zabezpieczających — plan sytuacyjny i przekrój. Rys. J. Nowiński.

W kilka lat później w r. 1949 prof. Cebertowicz, obecny dyrektor Instytutu Budownictwa Wodnego P.A.N. i profesor Politechniki Gdańskiej po raz pierwszy w Polsce zastosował zjawiska elektrokinetyczne dla ratowania kościoła św. Anny w Warszawie. W czasie budowy trasy W—Z zauważono, że wzniesienie terenu, na którym znajdował się kościół, zaczęło ulegać zsuwowi, zagrażając katastrofą pięknemu zabytkowi architektury polskiej. Zauważony w maju 1949 r. zsuw wzgórze naruszył równowagę świątyni. Liczne rysy i pęknięcia ścian z zatrważającą szybkością powiększały się z dnia na dzień. Sytuacja tym bardziej była przykra, że w dniu 22 lipca tegoż roku miało nastąpić uroczyste otwarcie trasy W—Z. Na zarządzenie Władz Ludowych powołana została komisja rzeczoznawców, w skład której wchodził również prof. Cebertowicz.

Szczegółowe badania wykazały, że przyczyną zsuwu była woda gruntowa nasycająca warstwy gruntu, dość silnie nachylone w kierunku trasy W—Z. (ryc. 145 i 146). Poślizgowi uległy warstwy piasku, spelzające po rozmokłej warstwie gliny. W tych warunkach zatrzymanie zsuwu było bardzo trudnym zadaniem. Wyliczono, że niezabezpieczenie zsuwu w przeciągu 10—14 dni, spowoduje nieuchronną katastrofę. W takich okolicznościach prof. Cebertowicz uznał za najbardziej wskazane zastosowanie elektroosmozy i boksytyzacji (wymiany jonowej). Pierwsza miała na celu zahamowanie wód gruntowych napływających w kierunku zsuwu, druga wzmocnienie gruntu przez wymianę jonową, tj. zastąpienie w koloidalnych cząstkach gruntu jonów o niskiej wartościowości jonami glinu (trójwartościowymi).

Już po kilku dniach dostrzeżono zahamowanie zsuwu, a ruchy murów znacznie zmalały. Po niespełna 2-ch miesiącach prace zabezpieczające, przedsięwzięte dla ochrony kościoła św. Anny zostały zakończone.

Metodyka prac związanych z elektrodrenażem polegała na wywołaniu elektroosmotycznego ruchu wody w gruncie w kierunku wierconych studni (z rur stalowych), włączonych w obwód prądu stałego do bieguna ujemnego. Elektrodami dodatnimi były pręty aluminiowe wbite w skarpe zsuwu (ryc. 145 i 146). Dzięki temu wymiana jonowa zachodziła równocześnie z elektrodrenażem. Ogólne napięcie prądu elektrycznego wynosiło 50—80 V, zaś spadek potencjału 0,02 do 1,0 V/cm. Rozstaw elektrod aluminiowych (dodatnich) zawierał się w granicach 1—4 m, zaś odległość katod od studni anodowych dochodziła do 25 m. Zużyto 3000 KWh na 34.000 m<sup>3</sup> zabezpieczonego gruntu.

Oprócz opisanych przeze mnie prac elektrokinetycznych, którymi uratowano cenny zabytek warszawski, komisja rzeczoznawców zaleciła jeszcze inne, dodatkowe zabezpieczenia, których szczegóły znajdzie Czytelnik w publikacji prof. W. Żenczykowskiego<sup>1</sup> i prof. P. Biegańskiego<sup>2</sup>.

Grunt nie jest jedynym środowiskiem odpowiednim do wykorzystania zjawiska elektroosmozy. Z równym powodzeniem można je stosować do suszenia zawilgoconych murów z kamienia, cegły lub betonu. W Polsce nie było dotąd okazji do zrobienia takich prób. W niektórych państwach zachodnich, jak np. w Szwajcarii istnieją specjalne przedsiębiorstwa, wykonujące tego rodzaju prace. Ogólna zasada elektroosmotycznego suszenia murów jest taka sama jak w gruntach, opracowanie zaś odpowiedniej metodyki prac na skalę

<sup>1</sup> W. Żenczykowski, Walka z żywiołem zsuwu na wzgórzu kościoła św. Anny w Warszawie, „Przegląd Budowlany”, 1949, nr 7—8.

<sup>2</sup> P. Biegański, Zabezpieczenia w kościele św. Anny (oo. Bernardynów) w Warszawie, „Ochr. Zab.”, 1950, nr 1, str. 60.

przemysłową nie nastęrczałoby u nas w kraju większych trudności. Jest rzeczą oczywistą, że w wypadku, gdy mur jest stale od zewnątrz zawilgacany, jednorazowy zabieg osuszania nie ochroni go od ponownego zawilgocenia. Nieodzowna jest impregnacja uszczelniająca lub wprost odcięcie muru od źródła wilgoci. Tak więc elektroosmoza można osiągnąć tylko efekty przejściowe.

Również nie są trwałe zmiany własności fizycznych i mechanicznych gruntu elektroosmotycznie osuszonego. To też zakres stosowania wyłącznie samej tylko elektroosmozy jest ograniczony.

Prof. Cebertowicz, który zagadnieniem tym zajmował się w latach 1940—1945 w czasie swego pobytu w Szwajcarii, rozpoczął badania, w których zjawisko elektroosmozy wykorzystał jako czynnik pomocniczy w metodzie znanej dziś pod nazwą „cebertyzacji“. Na czym metoda ta polega? Głównym jej założeniem jest wprowadzanie do gruntu takich roztworów chemicznych, które posiadałyby zdolność wytrącania się w postaci żelu, uszczelniającego grunt i sklejającego poszczególne jego ziarna w spoiwą bryłę. Ponieważ zasadniczym tworzywem gruntów są związki krzemowe, za podstawowy składnik wytwarzający lepiszcze przyjął prof. Cebertowicz szkło wodne, które jako koloidalny roztwór krzemianu sodowego uznał za najodpowiedniejszy. Dobór drugiego składnika poprzedziły liczne doświadczenia. Względy ekonomiczne i łatwość otrzymywania substancji w handlu skłoniły do stosowania przede wszystkim chlorku wapnia. Pierwsze doświadczenia laboratoryjne b. Instytutu Wodnego P.G. w Gdańsku już w 1946 r. doprowadziły do opracowania tzw. dwuroztworowej metodyki prac terenowych, polegającej na kolejnym wprowadzaniu do gruntu roztworów sodowego szkła wodnego i chlorku wapnia. Równocześnie z nasycaniem roztworami chemicznymi przepuszcza się przez grunt stały prąd elektryczny. Jego zadaniem jest wywołanie zjawisk elektrokinetycznych, a głównie elektroosmozy. Po nasyceniu gruntu roztworem szkła wodnego, dalsze kolejne wprowadzanie roztworu chlorku wapnia wywołuje niezwłocznie koagulację żelu i szybkie uszczelnianie się gruntu w najbliższym sąsiedztwie rury nasycającej. W związku z tym grawitacyjne przenikanie roztworów do gruntu jest wtedy utrudnione i ograniczone.

Prąd elektryczny staje się czynnikiem pomagającym infiltracji płynów w początkowym okresie nasycania. Dalsze stosowanie prądu elektrycznego odnosi się do okresu późniejszego (po zakończeniu nasycania) kiedy pory gruntowe już są wypełnione żelem. Świeżo wytworzony żel jest silnie uwodniony. Nadmiar wody nadaje mu konsystencję galaretowatą o niewielkich własnościach wytrzymałościowych i lepiących. To też elektroosmotyczne odwodnienie ząęszcza go i powiększa stopień zeskalania gruntu.

W dążeniu do udoskonalenia sposobów zeskalania gruntów metodami elektrokinetycznymi Instytut Budownictwa Wodnego PAN w Gdańsku podjął w r. 1953 badania mające na celu opracowanie metodyki jednoroztworowego zeskalania. Chodziło głównie o to, by zamiast dwóch roztworów wprowadzać do gruntu tylko jeden i to taki, w którym koagulacja żelu następowałaby dopiero po zakończeniu czynności nasycenia. Dzięki temu możliwe byłoby uzyskanie znacznego skrócenia czasu trwania robót zeskalających. Liczne próby laboratoryjne doprowadziły do opracowania mieszanin, w których jako podstawowy składnik występuje zawsze szkło wodne. Drugim reagentem może być chlorek wapnia, mleczko wapienne, ałun potasowy, kwas fosforowy itd. Dobór odpowiednich stężeń wymienionych składników i wzajemnych proporcji dozowania pozwala dowolnie regulować czas zachowania

płynności mieszaniny żelotwórczej w granicach od kilku minut do kilkunastu dób.

A teraz niektóre ważniejsze szczegóły, dotyczące metodyki prac w terenie.

Roztwory wprowadza się do gruntu za pomocą stalowych rur o średnicy 1,5 do 2 cali. Dolna część rury, sklepana w formie grotu lub wiertła, perforowana jest na długości 1,0—1,5 m otworami  $\text{Ø}$  5—8 mm. Odległość między rurami nie przekracza 1,5 m. Roztwory doprowadza się do rur węzami gumowymi ze zbiorników ustawionych w pobliżu miejsca robót. Prąd elektryczny stosuje się o takim ogólnym napięciu, które wynika z założonego spadku potencjału. Zazwyczaj spadek potencjału przyjmuje się w granicach

0,25—0,50 V/cm, wyjątkowo 1,0 V/cm. Jeśli więc rozstaw elektrod wynosi 150 cm, a spadek potencjału przyjmujemy 0,5 V/cm to ogólne napięcie prądu elektrycznego obliczymy z iloczynu  $150 \text{ cm} \times 0,5 \text{ V/cm} = 75 \text{ Volt}$ . Elektrodami mogą być te same rury (ryc. 147), przez które wprowadzamy do gruntu roztwory. Często są nimi pręty stalowe  $\text{Ø}$  16—20 mm. Do bieguny ujemnego zawsze podłączamy rury, do których wlewane są roztwory chemiczne.

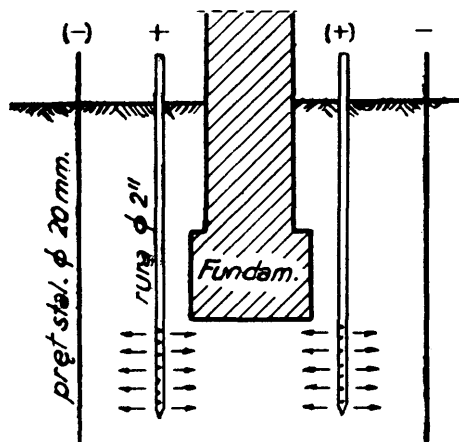
Ilość płynów potrzebnych do nasycenia pewnej bryły gruntu wyliczamy z jego porowatości, zakładając, że w gruntach piaszczystych objętość wprowadzanych płynów nie powinna wynosić więcej niż 50—70% objętości porów.

Stężenia roztworów należy dobierać do rodzaju gruntu przeznaczonego do zeskalania. W dwuroztorowej metodzie zeskalania stężenie roztworu szkła wodnego zawiera się w granicach 20—40° Bé, chlorku wapnia 6—15° Bé. Najczęściej używany stosunek objętościowy roztworu szkła wodnego do chlorku wapnia 1:1 daje najlepsze wyniki.

Sprzęt używany do robót zeskaleniowych jest prosty i niedrogi. Głównymi jego pozycjami są zbiorniki metalowe na roztwory chemiczne, rury, węże gumowe, przyrządy do wbijania, lub wkręcania rur oraz agregat elektryczny z przewodami elektrycznymi i przyrządami pomiarowymi (amperomierze, woltomierze).

Przebieg prac jest także prosty. W ustalonej kolejności następuje wbicie żelaznych elektrod i połączenie rur ze zbiornikami roztworów za pomocą węzów gumowych. Rury łączy się ze źródłem prądu elektrycznego i rozpoczyna nasycanie roztworami w sposób grawitacyjny. Zeskalanie warstwy gruntu o pewnej miąższości wykonuje się etapami przez stopniowe podciąganie rur do góry. Po zakończeniu nasycania następuje elektroosmotyczne osuszanie gruntu, trwające 6—8 dni.

W latach 1948—1956 opisaną metodę zeskalania zastosowano skutecznie w kilkudziesięciu przypadkach. W jednych wzmocniono grunt pod fundamentami nowych budowli, w innych zwiększano nośność gruntu pod budyn-



Ryc. 147. Sposób umieszczenia elektrod rurowych dla zeskalenia gruntu pod fundamentami budynku.

Rys. J. Nowiński.

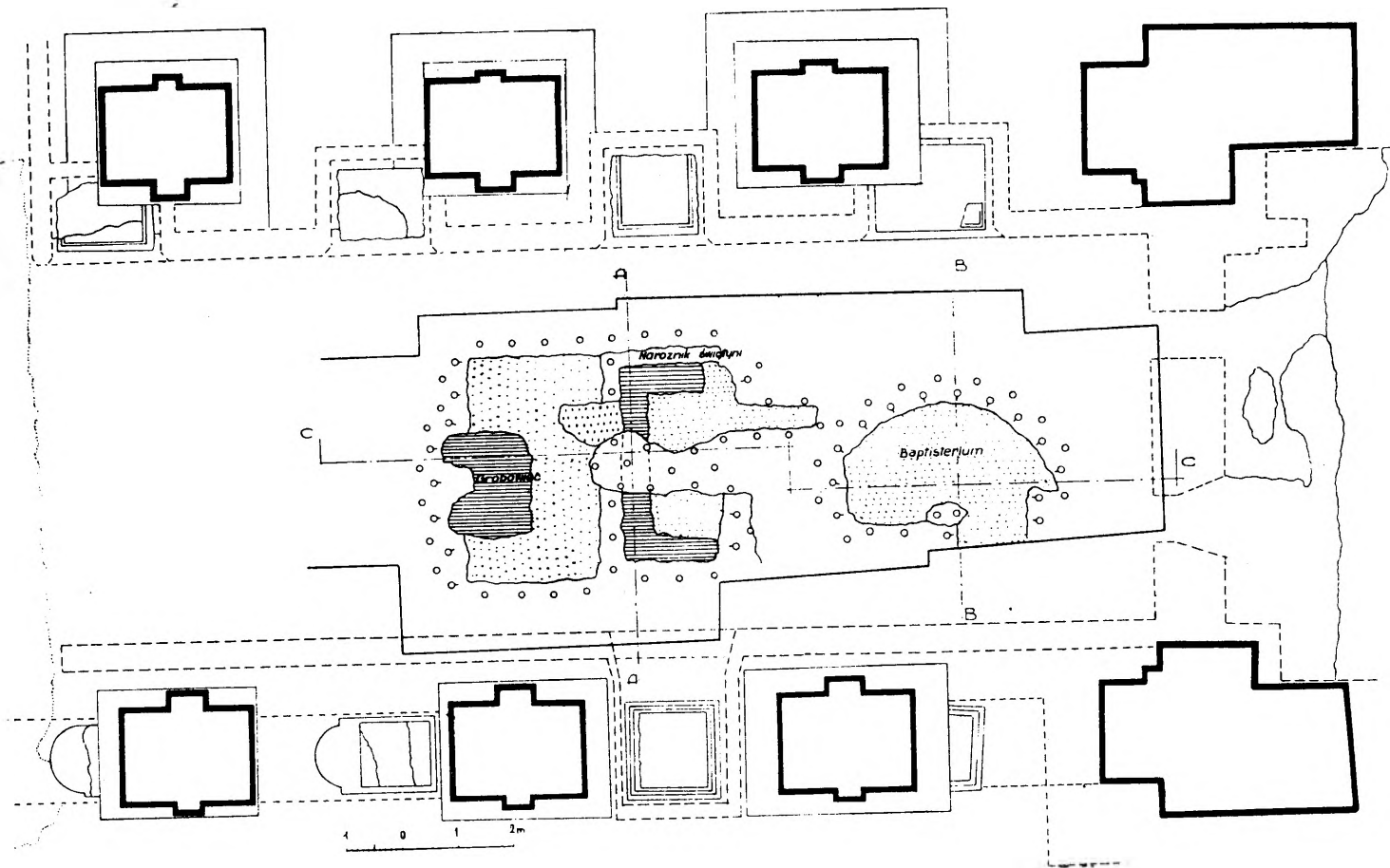
kami już istniejącymi. Korzystano z tej metody przy uszczelnianiu gruntu nabrzeży morskich, obwałowań rzecznych, śluz wodnych, piwnic i wykopów pod fundamenty obiektów przemysłowych. Wykonano także kilka prac związanych z ochroną zabytków i tym poświęcimy dalszą część artykułu.

Oprócz opisanego już zabezpieczenia kościoła św. Anny w Warszawie należy tu wymienić konserwację relikwii katedry poznańskiej, wzmocnienie gruntu pod fundamentami zamku kórnickiego i zabytkowego kościółka w Gieczu oraz próby mumifikacji drewna z wykopalisk z Gdańska i Biskupina.

Prace wykopaliskowe, prowadzone od roku 1946 w katedrze na Ostrowiu Tumskim w Poznaniu, doprowadziły do odkrycia murów fundamentowych katedry romańskiej z XI wieku oraz pozostałości jeszcze starszej świątyni z okresu pierwszych Piastów. Rozpoznano wśród nich szczątki narożnika muru, płytę baptisterium o średnicy około 4 m i grobowiec kamienny (ryc. 148). Odsłonięte relikty, będące bezcennym dokumentem wczesno-średniowiecznej architektury polskiej, należało niezwłocznie zabezpieczyć przed niszczącymi wpływami atmosferycznymi. Ponieważ zamierzeniem było udostępnienie wykopalisk dla szerokich rzesz zwiedzających, należało wybrać sposób, który pozwoliłby na trwałe zachowanie relikwii w stanie odsłoniętym i widocznym. Powołana przez Prezydium Rady Ministrów w roku 1952 Komisja Zabezpieczeń Katedry Poznańskiej przyjęła projekt członka tejże Komisji prof. R. Cebertowicza, którego koncepcją było zeskalenie wykopalisk własną metodą. Na życzenie Komisji i Wydziału Kultury przy Prezydium Woj. Rady Narodowej w Poznaniu projekt został opracowany przez Instytut Budownictwa Wodnego PAN w Gdańsku.

Analiza warunków gruntowych terenu katedry poznańskiej wykazała, że do głębokości 2,5 m znajduje się grunt nasypowy, będący mieszaniną gruzu, piasku, zaprawy wapiennej i humusu. Poniżej do 6,0 m zalega bardzo niejednorodna warstwa mułków piaszczystych z domieszkami drewna, próchnicy i skorup glinianych. Głębiej położone są warstwy piasków o różnym uziarnieniu a na głębokości około 6,5 m poniżej terenu znajduje się woda gruntowa, której zmienny poziom zależy od stanu wody rzeki Warty. Stwierdzono również, że przy wysokim stanie wód gruntowych relikty mogą być częściowo zatopiane.

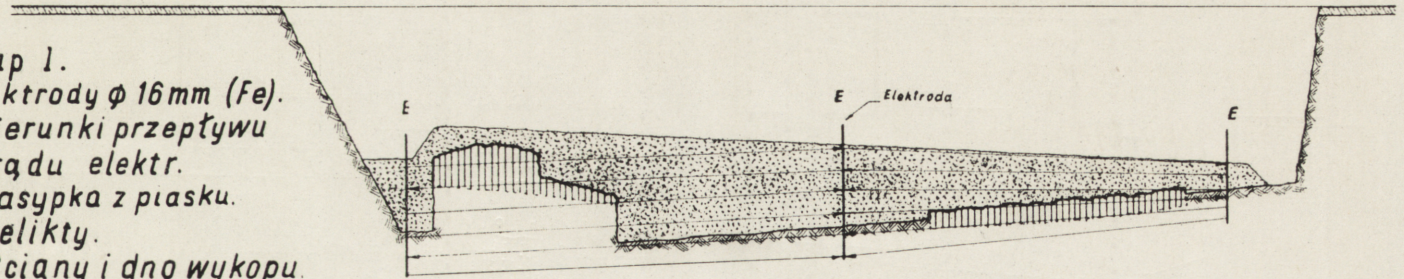
Zasadnicze obiekty zeskalania (relikty), budowane były z polnego kamienia, układanego na zaprawie wapiennej, wykazującej obecnie silny stopień zwietrzenia. Laboratoryjne próby zeskalania odłamków murów pobranych z Katedry Poznańskiej pozwoliły ustalić metodykę postępowania, według której prace zabezpieczające podzielono na dwa etapy. W pierwszym etapie chodziło o zatrzymanie procesów rozkładowych o charakterze biologicznym i chemicznym, drugi miał na celu powierzchniową i wglębną konserwację zabytków z równoczesnym wzmocnieniem i uszczelnieniem podłoża. Jako środek konserwujący w pierwszym etapie robót przyjęto jednoprocentowy roztwór alunu. Odsłonięte i oczyszczone z ziemi relikty pokryto warstwą czystego piasku. Po zwilżeniu go alunem wbito w piasek 3 rzędy elektrod z stali zbrojeniowej  $\phi$  16 mm i długości około 2 m (ryc. 149). Elektrody włączono w obwód stałego prądu elektrycznego o napięciu 40—50 Volt. W czasie przepływu prądu, którego kierunek zmieniano na przeciwny co 2—3 dni, piasek pokrywający relikty zwilżano systematycznie roztworem alunu. Po upływie miesiąca pracę 1-szego etapu zakończono. Usunięto elektrody, pozostawiając osłonę piaskową w stanie nienaruszonym. Drugi etap robót (ryc. 150)



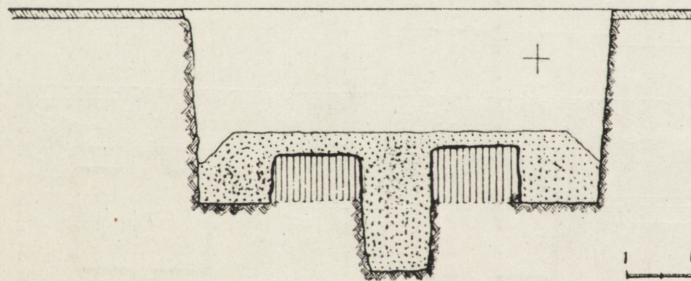
Ryc. 148. Plan sytuacyjny rozmieszczenia reliktów katedry poznańskiej. Rys. J. Nowiński.

# PRZEKRÓJ C-C

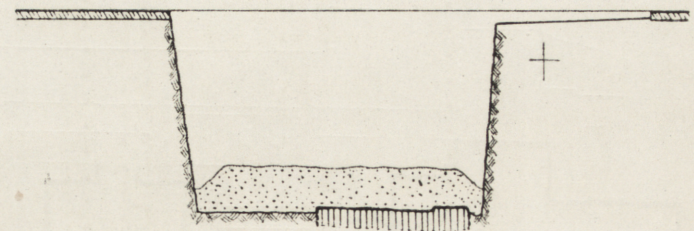
- Etap 1.  
| Elektrody  $\phi$  16mm (Fe).  
→ Kierunki przepływu prądu elektr.  
Zasyпка z piasku.  
Relikty.  
Ściany i dno wykopu.



# PRZEKRÓJ A-A



# PRZEKRÓJ B-B



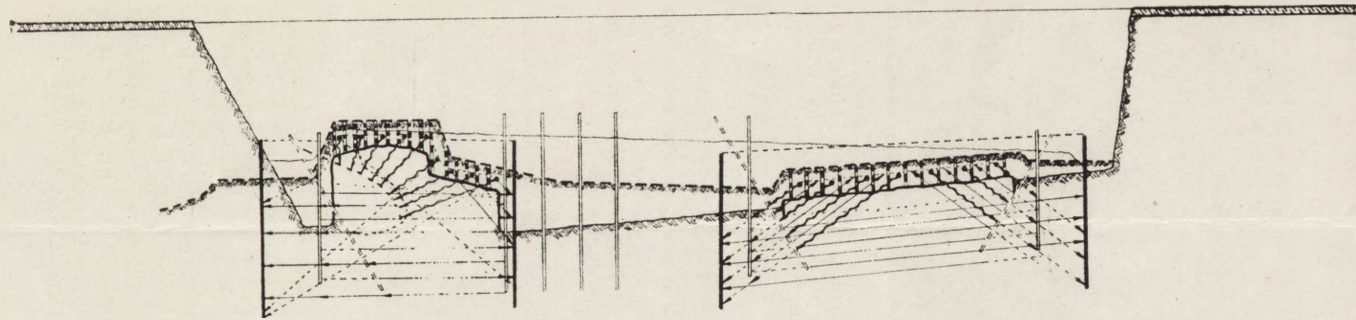
1 0 1 2 3m

Ryc. 149. Pierwszy etap zeskalania reliktyw katedry poznańskiej.

Rys. J. Nowiński.

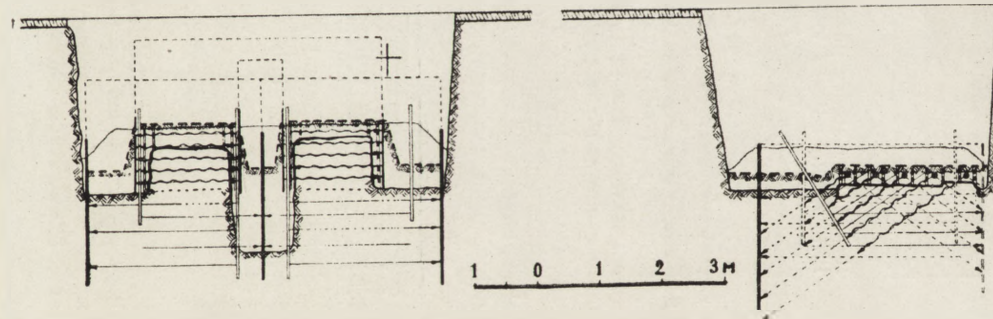


PRZEKRÓJ C-C



PRZEKRÓJ A-A

PRZEKRÓJ B-B



*Etap II.*  
 Rury wkręcane w grunt.  
 Rury formowane w piasku.  
 Pręty elektrodowe  $\phi 16^{mm}$   
 — " — " —  $\phi 26^{mm}$   
 Krata elektrod.  $\phi 16^{mm}$   
 — " — " —  $\phi 26^{mm}$   
 Kier. prądu przy powierzchni.  
 — " — " — w głębi.  
 Zasyпка z piasku.

Ryc. 150. Drugi etap zeskalania reliktyw katedry poznańskiej. Rys. J. Nowiński.





Ryc. 151. Katedra poznańska — obsypka piaskowa jednego z reliktyw. Na zdjęciu widoczne są w piasku otwory do wlewania roztworów chemicznych.

objął zeskalenie wszystkich zabytków jako całości. Pracę podzielono znów na dwie części. Część pierwsza dotyczyła fragmentów powierzchniowych i druga podziemnych. Tok postępowania prac powierzchniowych podobny był do robót etapu pierwszego z tą tylko różnicą, że każdy z obiektów zabezpieczenia zeskalano osobno. Po przykryciu reliktyw warstwą piasku grubości około 40 cm, potworzono przyzmy w kształcie mogił, które zlewano szkłem wodnym 25<sup>0</sup>Bé i chlorkiem wapnia 10<sup>0</sup>Bé. Każdą z przyzm okolono na górnej powierzchni rzędem elektrod (prętów) krótkich, zaś u stopy skarp długich (do głęb. 3,5 m) w odstępach co 0,4—1,2 m. Roztwory szkła wodnego i chlorku wapnia wlewano kolejno, porcjami, w pewnych odstępach czasu do wgłębień  $\phi$  5 cm nakłutych ostro zakończonymi rurami (ryc. 151). Stosunek objętościowy porcji szkła wodnego do chlorku wapnia przyjęto jak 1 : 1

Dolny rząd prętów wbitych wokół przyzmy i górne pręty w koronie przyzmy były elektrodami ujemnymi, a stalowe kraty włożone poziomo w piasek na wysokości 10—15 ponad reliktywami, elektrodami dodatnimi.

Wlewy roztworów odbywały się przy równoczesnym przepływie prądu elektrycznego. Nasycanie trwało tak długo, dopóki obserwowano wsiąkanie płynów.

W części drugiej drugiego etapu robót miały miejsce prace wgłębne (głęb. 3 m), polegające na łącznym zeskalaniu gruntu i podziemnych części reliktyw. Musiano tu zastosować rury perforowane wbite pionowo, lub skośnie, w odstępach co 0,7 do 1,0 m na głębokość 3,0 m. Rury połączone były gumowymi wężami ze zbiornikami, w których znajdowały się roztwory. Nasycanie odbywało się w kierunku od dołu do góry przez stopniowe pod-



Ryc. 152. Zamek w Kórniku — rozmieszczenie rur żelaznych do nasycania gruntu roztworami chemicznymi.

ciąganie rur (co 1 m). Wlewy roztworów o stężeniach takich jak w 1-szej części robót następowały kolejno porcjami po 50 litrów, aż do całkowitego nasycenia gruntu i reliktyw. Rury wlewowe dołączono do bieguna dodatniego, pręty i kraty do ujemnego. Prąd elektryczny przepuszczono w czasie nasycania i po zakończeniu wlewów, w okresie tzw. suszenia (około tygodnia).

Prace trwały od 13 sierpnia do 21 grudnia 1953 r. z przerwą od 12 września do 15 października.

Zeskalanie reliktyw wykonywał zespół pracowników Instytutu Budownictwa Wodnego PAN w Gdańsku.

Drugim zabytkowym obiektem, który zabezpieczono metodą zeskalania był zamek w Kórniku, zbudowany w XV wieku. Tu zagadnienie różniło się od poprzedniego. Zamek, posadowiony na drewnianym ruszcie palowym, przetrwałszy kilka wieków, zaczął w latach ostatnich ulegać intensywnemu osiadaniu, które doprowadziło do groźnego spękania ścian i sklepień tej pięknej i cennej budowli (ryc. 153 i 154). Największe zarysowania pokazały się w części północno-wschodniej. Szczegółowe badania doprowadziły do wniosku, że przyczyną tego stanu rzeczy było obniżenie się poziomu wody gruntowej, co z kolei pociągnęło za sobą wynurzenie się z wody górnej części rusztu fundamentowego, jego gnicie, a następnie osiadanie budowli. Nierównomiernego osiadania należało doszukiwać się w niekorzystnym układzie geologicznym i niejednorodnej miąższości warstw gruntowych. Fundamenty zamku posadowione były w gruncie nasypowym, pod którym na głębokości 3 m znajdowała się klinowa warstwa piaszczysto-żwirowa.

Po nieudanych próbach zabezpieczenia budowli palami Wolfsholz'a (1948 r.) przyjęta została metoda prof. Cebertowicza (1952), której prostym założeniem było zeskalenie gruntów łącznie z rusztem fundamentowym. Według przewi-

dywań nasycenie roztworami chemicznymi powinno było zwiększyć nośność gruntów i przerwać procesy biochemiczne, niszczące drewno rusztu.

Przebieg prac zabezpieczających był następujący: do nasycania użyto roztworów szkła wodnego o stężeniu 25—30<sup>o</sup>Bé i chlorku wapnia 10<sup>o</sup>Bé. Do metra sześciennego gruntu piaszczystego wprowadzono po 160 litrów każdego z roztworów. W przewarstwieniach żwirowych porcje wynosiły po 180 litrów, w warstwach gliniastych i mułkach tylko po 140 litrów. Ponieważ musiano pracować w piwnicach, rury (Ø 2 cale) były składane z krótkich odcinków 0,8—1,5 m. Głębokość wbicia rur wynosiła około 3,0—3,5 m poniżej stopy fundamentów, rozstaw 0,7—0,8 m. Rury rozmieszczano rzędami, opasującymi obustronnie fundament każdej ściany (ryc. 152), starając się aby ich odległość od krawędzi fundamentów była jak najmniejsza (około 40 cm). Obok co drugiej rury wbijano elektrody prętowe Ø 22 mm i długości 5,6 m. Po wprowadzeniu w grunt przez każdą rurę 70—90 litrów szkła wodnego i takiejże ilości roztworu chlorku wapnia rury dobrze przeczyszczano, i obruszano po czym wlewano dalsze porcje. Po całkowitym nasyceniu danej warstwy gruntu, podciągano rury o 1 metr w górę. Anodami w czasie trwania wlewów były rury nasycające, katodami — stalowe pręty. Ogólne napięcie prądu elektrycznego (stałego) wynosiło około 90—100 V. Suszenie trwało od 6—10 dób. W tym czasie bieguny prądu zmieniano co 6 godzin.



Ryc. 153. Zamek w Kórniku— pęknięcia i rysy na zewnętrznych murach zamku.

Szkló wodne (sodowe) dostarczono na miejsce robót ciężarowymi samochodami w cysternach o pojemności 3000 litrów. Stamtąd przepompowywano je do podobnych zbiorników, ustawionych na placu budowy. Chlorek wapnia sprowadzono w postaci krystalicznej (płatki) w blaszanych beczkach wagi 130 kg. Rozcieńczenie obu składników odbywało się w sześciu zbiornikach (poj. 1000 litrów każdy) ustawionych na drewnianym rusztowaniu o wysokości 3 m. Wodę dostarczano prowizorycznym rurociągiem. Rozcieńczone roztwory doprowadzano węzami gumowymi Ø 2,5—4 cali do 4 baterii rozdzielczych, z których każda posiadała po 10 wylotów zamykanych własnymi zaworami.

Od każdego wylotu wiódł krótki, 10-metrowy wąż gumowy, połączony z rurą nasycającą.

Najpierw wzmocniono zewnętrzne ściany południową i wschodnią wraz z wieżą, potem główny mur środkowy od strony wschodniej, mur wewnętrzny od strony zachodniej oraz ścianę ze-





Ryc. 154. Ogólny widok zamku kórnickiego.

wnętrzną zachodnią. Pozostałe mury wewnętrzne (poprzeczne) wzmocniano kolejno, posuwając się od strony wschodniej ku zachodowi. Ogółem wbito 2367 mb. rur i 1016 mb. prętów stalowych. Objętość zeskalonego gruntu wynosiła 2800 m<sup>3</sup>. Zużyto 190 ton szkła wodnego i 40 ton chlorku wapnia.

Po wykonaniu wzmocnienia podłoża nie stwierdzono żadnych dalszych osiadań fundamentów.

Z końcem r. 1954 na terenie powiatu Środa Wielkopolska podjęto prace podobne do wykonanych w zamku Kórnickim. W miejscowości Giecz zachował się mały kościół romański, pochodzący z XII wieku (ryc. 155). Odbudowano go w latach 1952—53, wykonując szereg prac wzmocniających mury (zastrzyki cementowe), pozakładano usztywniające żelbetowe elementy konstrukcyjne (słupy, wieńce) podniesiono ściany o wysokość 1,60 m. itd. Prace te nie uchroniły kościółka od zupełnie nieprzewidzianych, nierównomiernych osiadań, które, jak to zwykle bywa, pociągają za sobą pochylanie się i pękanie ścian i innych części konstrukcyjnych budynku. Początkowo nieznaczne pęknięcia i rysy murów absydy zaczęły się coraz bardziej powiększać, zmuszając do stosowania doraźnych zabezpieczeń (przypory). Dokładne oględziny zagrożonego budynku i badania gruntu doprowadziły do wniosku, że nadmierne osiadanie absydy ma przyczynę w złych warunkach odwodnienia powierzchniowego obszaru, otaczającego kościół. Opady atmosferyczne, spływające z dachu i okalającego terenu, gromadziły się w niewielkim wklęsnięciu terenowym właśnie tuż koło muru absydy, mając doskonałą okazję do nawadniania drobno i średnioziarnistych piasków, stanowiących podłoże płytkich i słabych fundamentów tej części kościoła.

Z przekroju geologicznego wynikało, że do głębokości 4,0 m od powierzchni terenu zalegają grunty piaszczyste, spoczywające na stropie glin piaszczystych. Poziom wody gruntowej notowano na głębokości 3,5 m. W takich warunkach gruntowych dla zwiększenia nośności gruntu wydało

się najbardziej celowe zastosowanie metody zeskalania. Z inicjatywy Urzędu Konserwatorskiego w Poznaniu Instytut Budownictwa Wodnego w Gdańsku przystąpił do prac w drugim półroczu 1954.

Zgodnie z projektem, dla nasycenia gruntu roztworami, po obu stronach fundamentów absydy wbite 2 rzędy rur do głębokości około 3,5 m (ryc. 156). Rozstaw rur wynosił 1,0 m. Elektrodamy były pręty stalowe średnicy 20 mm, wbite o 0,5 m głębiej od rur. W czasie nasycania rury podłączano do bieguna dodatniego, pręty do ujemnego i nadawano taki kierunek przepływu prądu elektrycznego, który pomagałby w przenikaniu roztworów pod fundamenty ścian absydy. Ogólne napięcie stałego prądu elektrycznego, dostarczanego przez prądnicę nie przekraczało 60 Volt. Stężenie roztworów chemicznych wynosiło dla szkła wodnego 25<sup>0</sup>Bé, dla chlorku wapnia 10<sup>0</sup>Bé. Dla uzyskania pełnego nasycenia 1 m<sup>3</sup> gruntu zużyto po 160 litrów każdego roztworu. Nasycanie rozpoczynano od warstw gruntowych najniższej położonych, postępując stopniowo ku górze. Tak jak to zawsze bywa w procesie zeskalania po zakończeniu nasycenia gruntu nastąpił 7 dniowy okres suszenia, w którym korzystano z elektrod prętowych, zmieniając co 6 godzin kierunek przepływu prądu elektrycznego.

Na zakończenie należy wspomnieć o wykonywanych w I.B.W. w Gdańsku próbach petryfikacji odłamków drewna, pochodzących z wykopalisk. Miały one charakter wyłącznie laboratoryjny. Mimo to na podstawie uzyskanych wyników można wyrazić pogląd, że konserwacja przedmiotów drewnianych o wymiarze długości sięgającym nawet rzędu kilku metrów może być z powodzeniem dokonywana w warunkach laboratoryjnych.

Próbki drewna z wykopalisk zeskalane (mumifikowane) w Instytucie Budownictwa Wodnego w Gdańsku były niewielkich rozmiarów, ich długość nie przekraczała 20 cm. Zasadniczym celem doświadczeń Instytutu



Ryc. 155. Kościół romański z XII w. w Gieczu.



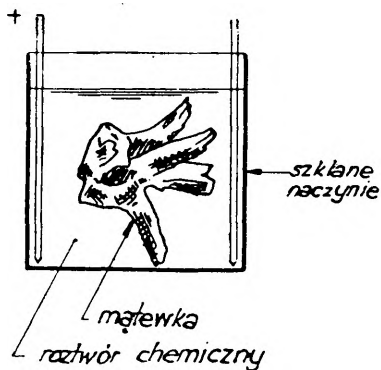
Ryc. 156. Kościół w Gieczu — elektrody rurowe wbite w grunt wokół spękanych ścian absydy.

było znalezienie odpowiedzi na pytania, czy drewno jako materiał pochodzenia organicznego może być zeskalane metodą prof. Cebertowicza, a jeśli tak, to w jakim stopniu polepszą się własności drewna i czy ich zmiany są trwałe.

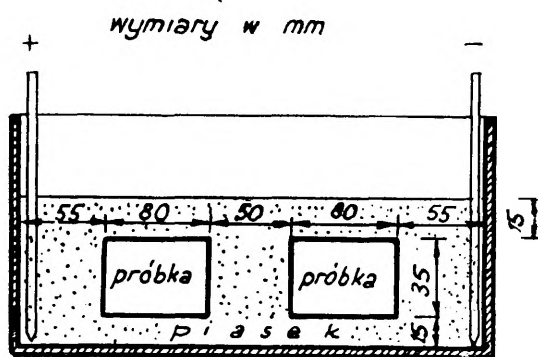
Do badań użyto suchego drewna sosnowego pochodzącego z wykopalisk z Biskupina i Gdańska oraz mątewki z Biskupina. Roztworami nasycającymi były szkło wodne i chlorek wapnia o różnych stężeniach. Niektóre próbki nasycano przez zanurzenie ich w roztworach (ryc. 157), inne obsypywano uprzednio piaskiem (ryc. 158), na podobieństwo reliktyw Katedry Poznańskiej.

Metodą zanurzenia z mumifikowano mątewkę z Biskupina. Umieszczono ją w niewielkim naczyniu (o wymiarach  $10 \times 9 \times 15$  cm) z roztworem szkła wodnego o stężeniu  $30^{\circ}\text{Bé}$ , w którym zanurzone były 2 elektrody żelazne. Napięcie włączonego prądu elektrycznego wynosiło 6 Volt. Po 2 godzinach szkło wodne w naczyniu zastąpiono chlorkiem wapnia ( $10^{\circ}\text{Bé}$ ) i przez dalsze 2 godziny przepuszczano prąd o napięciu 2—4 Volt. Cały opisany zabieg powtórzono jeszcze raz, lecz w czasie nieco dłuższym ( $2 \times 3,5$  godzin), następnie mątewkę wyjęto i po opłukaniu pozostawiono ją przez dobę na wolnym powietrzu dla przeschnięcia. Później w ciągu 7 godzin jeszcze suszono ją elektrycznie (elektroosmoza) na płycie aluminiowej, która była elektrodą ujemną. Górne końce mątewki owinięto drutem miedzianym, łącząc go do bieguna dodatniego (napięcie prądu 30 Volt). Na tym mumifikację mątewki zakończono. Po tygodniu mątewka stała się tak twarda, że nacisk paznokcia nie pozostawiał na niej żadnego śladu. Mątewka znajduje się w chwili obecnej w zbiorach Instytutu Budownictwa Wodnego PAN w Gdańsku. Po upływie 5 lat nie wykazuje żadnych zmian, poza uzyskaniem jeszcze większej twardości. Zresztą ostateczna ocena jakości mumifikacji w tym przypadku musi należeć do archeologów, dla których mątewka jest w każdej chwili dostępna.





Ryc. 157. Laboratoryjne zeskalanie drewnianej mątewki z Biskupina. Rys. J. Nowiński.



Ryc. 158. Laboratoryjne zeskalanie kawałków zabytkowego drewna z wykopalisk gdańskich. Rys. J. Nowiński.

Metoda zeskalania w piasku jest również bardzo prosta. Aby ją wypróbować wykonano doświadczenie z dwoma próbkami drewna z Biskupina o wymiarach około  $8 \times 8 \times 3,5$  cm. Drewnienka umieszczono w szklanej wannie o długości 32 cm na lekko ubitej warstwie piasku grubości 1,5 cm (ryc. 158). Elektrody mosiężne ustawione na krańcach dłuższego wymiaru wanny znajdowały się w jednej linii z próbkami drewna. Po zasypaniu próbek piaskiem tak, aby przykrycie wynosiło 1,5 cm, wlewo najpierw  $400 \text{ cm}^3$  roztworu szkła wodnego  $20^\circ \text{Bé}$ , a następnie tyleż  $\text{cm}^3$  roztworu chlorku wapnia o gęstości  $6^\circ \text{Bé}$ , włączając równocześnie prąd elektryczny o napięciu 3–5 Volt. Wlewy roztworów trwały 5 godzin (porcjami po  $30 \text{ cm}^3$ ), elektryczne suszenie 4 doby.

Próbki wyjęte z piasku przesuszono ostatecznie na wolnym powietrzu. Stwierdzono znaczne stwardnienie drewna. Dziś można wyrazić pogląd, że wzmocnienie drewna jest trwałe. W ciągu 5 lat nie dostrzeżono bowiem żadnych deformacji próbek, ani objawów pnięcia się.

Trudno jest na podstawie samych tylko badań laboratoryjnych wypowiedzieć się zdecydowanie, czy w odniesieniu do drewna metoda zeskalania znajdzie praktyczne zastosowanie na dużych obiektach wykopaliskowych w terenie. Potrzebne są tu dalsze doświadczenia w skali terenowej, które pozwoliłyby opracować i wypróbować właściwą metodykę zeskalania. To samo dotyczy odwilgocenia murów. Teoretycznie zagadnienia te są najzupełniej możliwe do rozwiązania, tak jak rozwiązano je w odniesieniu do gruntów<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> Artykuł opracowany został na podstawie materiałów Zakładu Zjawisk Elektrokinetycznych w Gruncie — Instytutu Budownictwa Wodnego PAN w Gdańsku.