

Uszczelnianie przewodów kanalizacyjnych metodą wewnętrznych iniekcji zalewowych

Dr inż. Andrzej Raganowicz

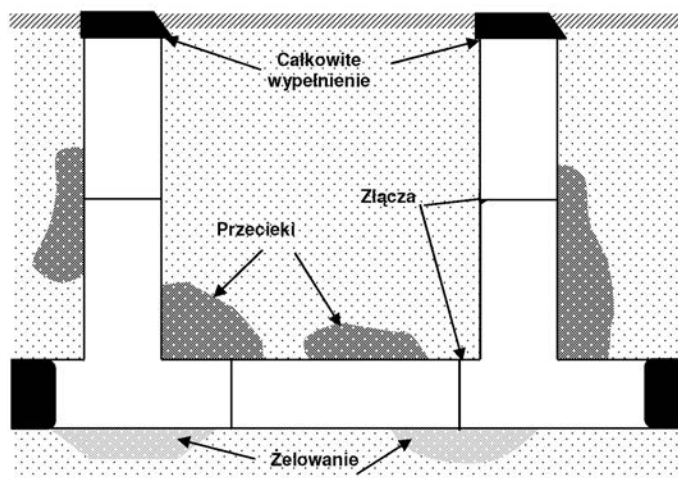
Zweckverband zur Abwasserbeseitigung im Hachinger Tal, Taufkirchen

W okresie ostatniego dziesięciolecia metoda wewnętrznych iniekcji zalewowych stała się bardzo popularną procedurą uszczelniania kanałów. W wielu przypadkach, gdy zawodzą standardowe metody renowacyjne, a wymiana kanału w systemie wykopowym z wielu powodów nie jest rozwiązaniem korzystnym, inwestorzy stosują ten system konserwacji przewodów kanalizacyjnych. Do najczęściej spotykanych wersji metody należy Tubogel i Sanipor. *Nota bene* polska nazwa tej metody nie jest odpowiednia, ponieważ te dwa pojęcia: iniekcja i zalewanie dotyczą zupełnie odrębnych procesów technicznych. W niemieckich opisach często używa się pojęcia iniekcja, co jest w sensie technicznym absolutnie niepoprawne i świadczy o niekompetencji ich autorów. Popularność tej metody wynika przede wszystkim stąd, że może być ona zastosowana w przypadku każdego przewodu, który nie jest zagrożony konstrukcyjnie, a jego średnica wewnętrzna nie przekracza 250 mm. Konsekwencją jest powstanie pewnego mitu, że omawiana metoda jest panaceum rozwiązującym wszystkie problemy odnowy sieci kanalizacyjnych. Skuteczność wewnętrznych iniekcji zalewowych jest ze względu na uwarunkowania proceduralne bardzo problematyczna, co potwierdza codzienna praktyka renowacyjna.

W latach osiemdziesiątych ubiegłego stulecia metoda Joostena oparta na iniekcji szkła wodnego do gruntu w celu jego wzmocnienia była zaadoptowana na potrzeby uszczelniania przewodów kanalizacyjnych. Podstawą obydwu systemów jest penetracja sodowego szkła wodnego o gęstości $1,40 \text{ g/cm}^3$ w gruncie. W przypadku zastosowań geotechnicznych medium bazowe jest iniektowane do ośrodka gruntowego za pomocą perforowanych rurek, tak zwanych iniektorów. Natomiast w przypadku renowacji sieci kanalizacyjnych medium bazowe eksfiltruje pod ciśnieniem hydrostatycznym do podłoża otaczającego bezpośrednio przewód poprzez nieszczelne mufy albo rysy. Zasięg penetracji szkła wodnego w gruncie jest zależny od jego porowatości i częściowo od ciśnienia iniekcji lub zalewania.

Proces żelacji sodowego szkła wodnego według receptury Joostena następuje w wyniku jego reakcji z utwardzaczem – roztworem chlorku wapniowego CaCl_2 . Zasięg penetracji chlorku w porach gruntowych wypełnionych szkłem wodnym limituje zasięg wzmocnienia podłoża lub uszczelnienia przewodu kanalizacyjnego. Podłoże gruntowe wzmocnione żelą silikatowym może osiągnąć dobre parametry wytrzymałościowe odpowiadające chudemu betonowi, ale jego wodoprzepuszczalność będzie tylko częściowo zredukowana.

System stabilizacji podłoża gruntowego według Joostena odgrywa we współczesnej geotechnice coraz mniejszą rolę. Penetracja szkła wodnego w porach szkieletu gruntowego jest procesem, który nie może być dokładnie zaplanowany i jest związany zawsze z dużym ryzykiem. W celu eliminacji wszystkich problemów związanych ze stosowaniem metody Joostena opracowano w latach 1979-1980 uniwersalną metodę wzmocniania podłoża gruntowego o nazwie *Jet Grouting*, która polegała na



Rys. 1. Schemat uszczelnienia odcinka przewodu kanalizacyjnego metodą wewnętrznych iniekcji zalewowych

iniekcji mieszanki mineralnej zarówno do gruntu spoistego, jak i do niespoistego za pomocą specjalnie skonstruowanych dysz o średnicy 2 mm pod ciśnieniem osiągającym nawet 80 MPa.

Metoda uszczelniania kanałów przez wewnętrzne iniekcje zalewowe polega na dwukrotnym wypełnieniu zamkniętego korkami pneumatycznymi odcinka kanału komponentami, z których jeden jest roztworem sodowego szkła wodnego, a drugi koagulantem powodującym wytrącenie się żelu silikatowego [1]. W pierwszej fazie następuje wypełnienie kanału od najniższej położonego przekroju komponentem A (sodowe szkło wodne, rys. 1). Wlewanie komponentu odbywa się poprzez niżej położoną studzienkę rewizyjną aż do poziomu terenu. Komponent ten pod wpływem ciśnienia hydrostatycznego eksfiltruje przez nieszczelne przekroje do podłoża gruntowego bezpośrednio otaczającego kanał. W miarę obniżania się poziomu komponentu A w studzience w sposób ciągły są uzupełniane jego ubytki. Po upływie 30 minut komponent A zostaje wypompowany, a kanał jest płukany i wprowadza się do niego komponent B, który eksfiltruje aż do momentu, gdy jego poziom w studzience ustabilizuje się. Z reguły nie trwa to dłużej niż 45 minut. Po upływie tego czasu komponent B zostaje odpompowany, a kanał przepłukuje się w celu przeprowadzenia kontroli szczelności i oddania go do eksploatacji.

WZMOCNIENIE PODŁOŻA GRUNTOWEGO METODĄ JOOSTENA

Początki stabilizacji podłoża gruntowego sięgają 1887 roku, kiedy to Jeziorski opatentował metodę opartą na sodowym szkłem wodnym. Według jego pomysłu należało wykonać dwa otwory w gruncie i do jednego wprowadzić sodowe szkło wodne, a do drugiego jego odpowiedni koagulant [4]. Dopiero w 1925 roku

Joosten nadał temu pomysłowi konkretne ramy techniczne, co umożliwiło stosowanie tej metody na skalę przemysłową. Historia metody Joostena ma także wątek polski.

Profesor Cebertowicz pracując jeszcze w czasie trwania II Wojny Światowej na Politechnice w Zurychu, poznał metodę stabilizacji podłoża gruntowego według Joostena, a po powrocie do kraju w twórczy sposób zaadaptował ją do warunków polskich. Na bazie licznych badań laboratoryjnych i terenowych opracowano dokładne receptury iniekcji dwurozтворowych i mało znanych do tej pory iniekcji jednorozтворowych. Pewnym *novum* było wspomaganie procesów iniekcyjnych stałym prądem elektrycznym o niskim napięciu.

Dzięki zastosowaniu metody opracowanej przez profesora Cebertowicza udało się w okresie odbudowy kraju ze zniszczeń wojennych uratować wiele bezcennych zabytków kultury polskiej. Jednym z najbardziej spektakularnych osiągnięć Profesora było zabezpieczenie zabytkowego kościoła św. Anny w Warszawie. W latach pięćdziesiątych ubiegłego stulecia ważnym zadaniem urbanistyczno-komunikacyjnym dla stolicy była budowa Trasy W-Z, która zagrażała kościołowi św. Anny. W celu ratowania tego cennego obiektu postanowiono wzmocnić jego konstrukcję nadziemną oraz poprawić warunki jego posadowienia. To drugie zadanie powierzono profesorowi Cebertowiczowi, który skutecznie przeprowadził stabilizację gruntu spoistego występującego w strefie wpływu posadowienia kościoła, stosując tak zwaną metodę wymiany jonowej.

Chemiczną bazę procesu żelacji stabilizującego grunty niespoiste stanowi sodowe szkło wodne, które jest wodnym roztworem silikatów alkalicznych. Sodowe szkło wodne stosowane w metodzie Joostena jest koloidalnym roztworem polimerów kwasu krzemowego i ich soli sodowych. Jego produkcja polega na rozpuszczeniu piasku kwarcowego, na przykład z sodą, a następnie w przegrzanej wodzie [2]:

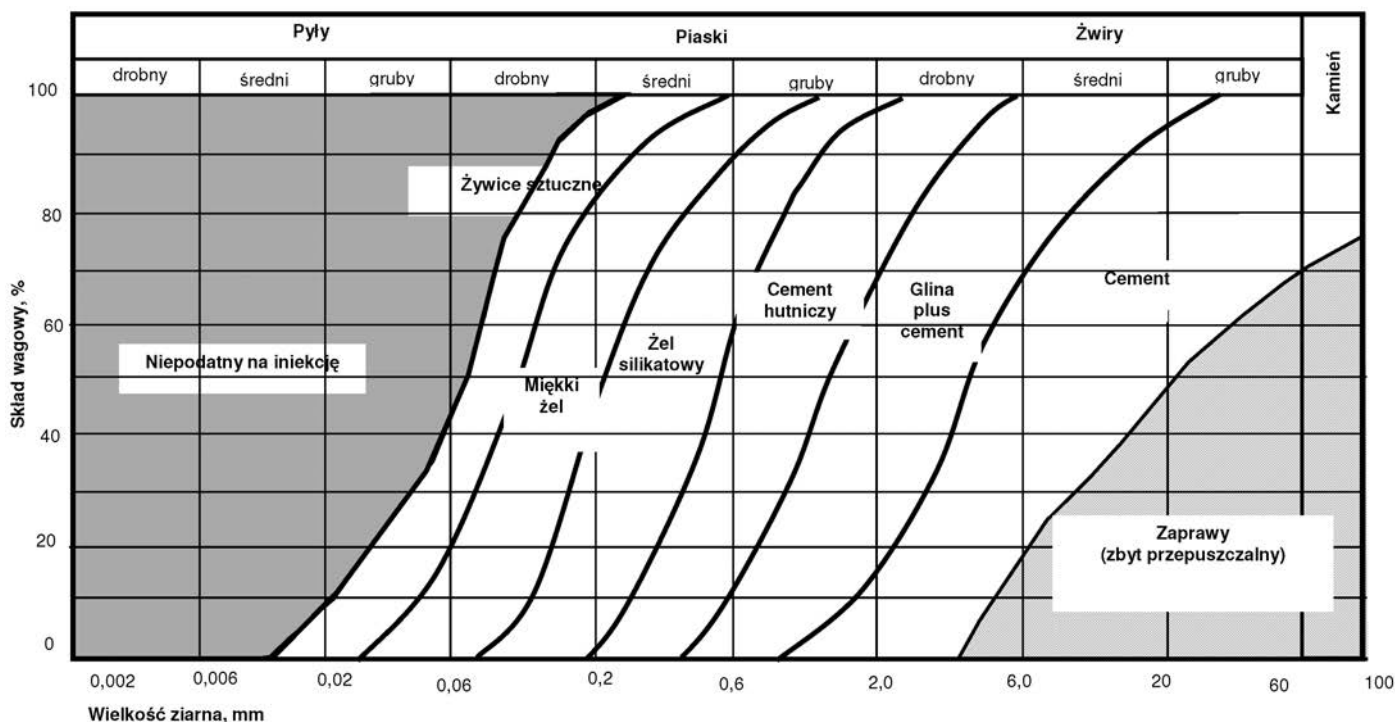


Roztwór ten jest bardzo alkaliczny, ponieważ $\text{pH} = 11 \div 13$. Charakterystyczną cechą sodowego szkła wodnego jest stosunek molowy:

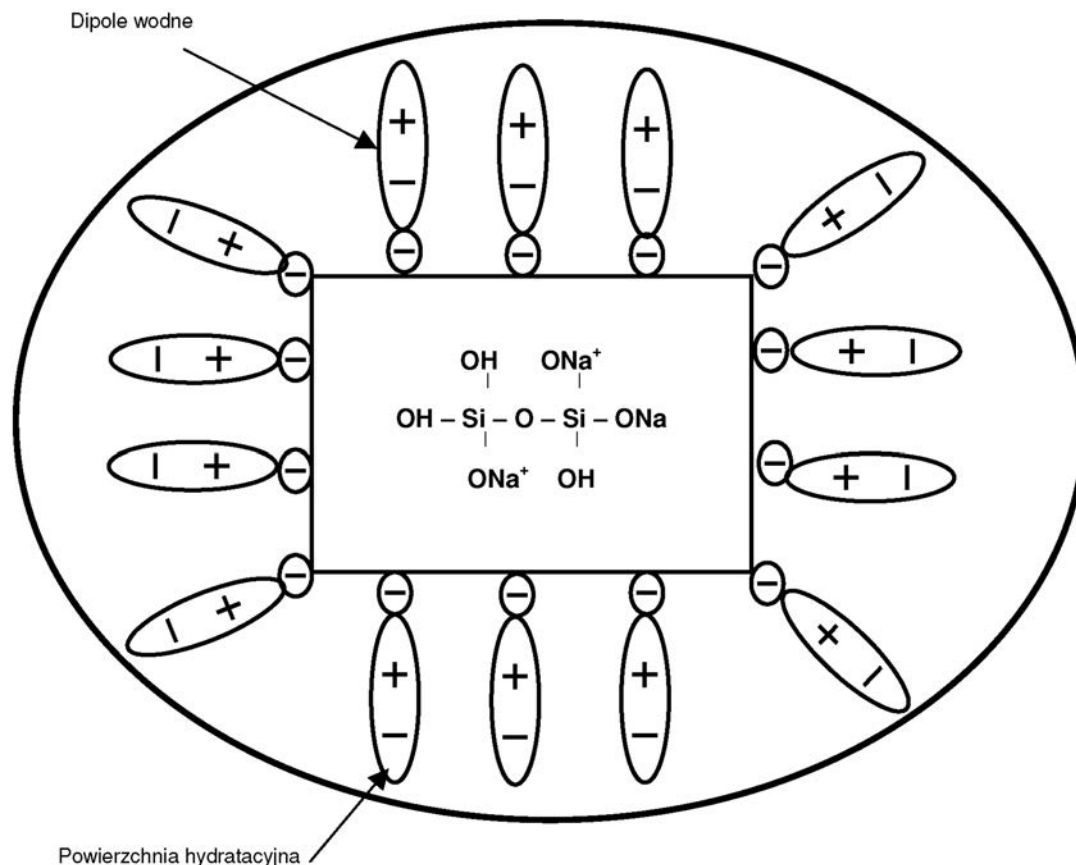
$$\text{Na}_2\text{O} / \text{SiO}_2 \quad (3)$$

W powszechnie stosowanym szkłe wodnym stosunek molowy waha się od 1:3,4 do 1:3,5. Bardzo ważnym parametrem fizycznym szkła wodnego jest lepkość, która zależy od temperatury i gęstości. Lepkość szkła wodnego o gęstości $1,34 \div 1,41 \text{ g/cm}^3$ wynosi w zależności od temperatury od 70 do 500 cP (Ns/m²). Parametr ten ma zasadnicze znaczenie przy zasięgu penetracji szkła wodnego w podłożu gruntowym. Warunkiem koniecznym do zastosowania metody Joostena jest niespoisty ośrodek gruntowy o odpowiedniej porowatości. Zgodnie z nomogramem na rys. 2 [4] warunek ten spełniają piaski o uziarnieniu $0,06 \div 2,00 \text{ mm}$. Wzmocnienie piasku o mniejszym uziarnieniu wymaga pewnej modyfikacji metody [2], tzn. zastosowania jej wersji jednorozтворowej oraz wymiany jonowej. W wyniku hydrolizy kwasu ortokrzemowego powierzchnie jego cząsteczek koloidalnych mają ładunek ujemny. W rzeczywistości istnieje podwójna powłoka elektryczna, która uniemożliwia zbliżanie się do siebie pojedynczych cząsteczek koloidalnych. Jest ona zbudowana z zewnętrznej powłoki koloidalnej o ładunku ujemnym oraz z drugiej strony z dodatniej powłoki hydratacyjnej, która uniemożliwia łączenie się cząsteczek koloidalnych w większe cząstki (rys. 3) [4].

W wyniku dodania jakiegoś elektrolitu (np. CaCl_2 albo innej soli ziemi alkalicznej) ma miejsce destabilizacja całego układu poprzez zneutralizowanie ujemnie naładowanej powłoki zewnętrznej. Proces ten nie ma nic wspólnego z neutralizacją chemiczną. Może ona prowadzić do zbliżenia się cząsteczek ko-

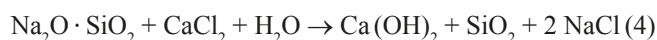


Rys. 2. Granice zastosowania metod iniekcyjnych jako funkcja uziarnienia podłoża gruntowego według Jessbergera



Rys. 3. Częsteczki koloidalne z powłokami hydratacyjnymi

loidalnych i ich łączenia w formie konstrukcji mostowej (Si^{4+} i O^{2-} , rys. 4). Jeżeli liczba kationów (np. Ca^{2+}) jest wystarczająca w celu osiągnięcia neutralnego środowiska elektrycznego, to następuje natychmiastowe wytrącenie się żelu. W przeciwnym przypadku powstawanie żelu ma charakter bardzo powolny. Żel silikatowy powstaje w wyniku reakcji dwu- lub trójwartościowych kationów wspomagających polikondensację, która prowadzi do tworzenia się sieci/struktury trójwymiarowej. W przypadku metody Joostena do neutralizacji ujemnej powłoki elektrycznej jest stosowany chlorek wapniowy (CaCl_2 , rys. 4) [2]. Proces żelacji można formalnie zapisać w następujący sposób:



TRÓJFAZOWY MODEL GRUNTOWY

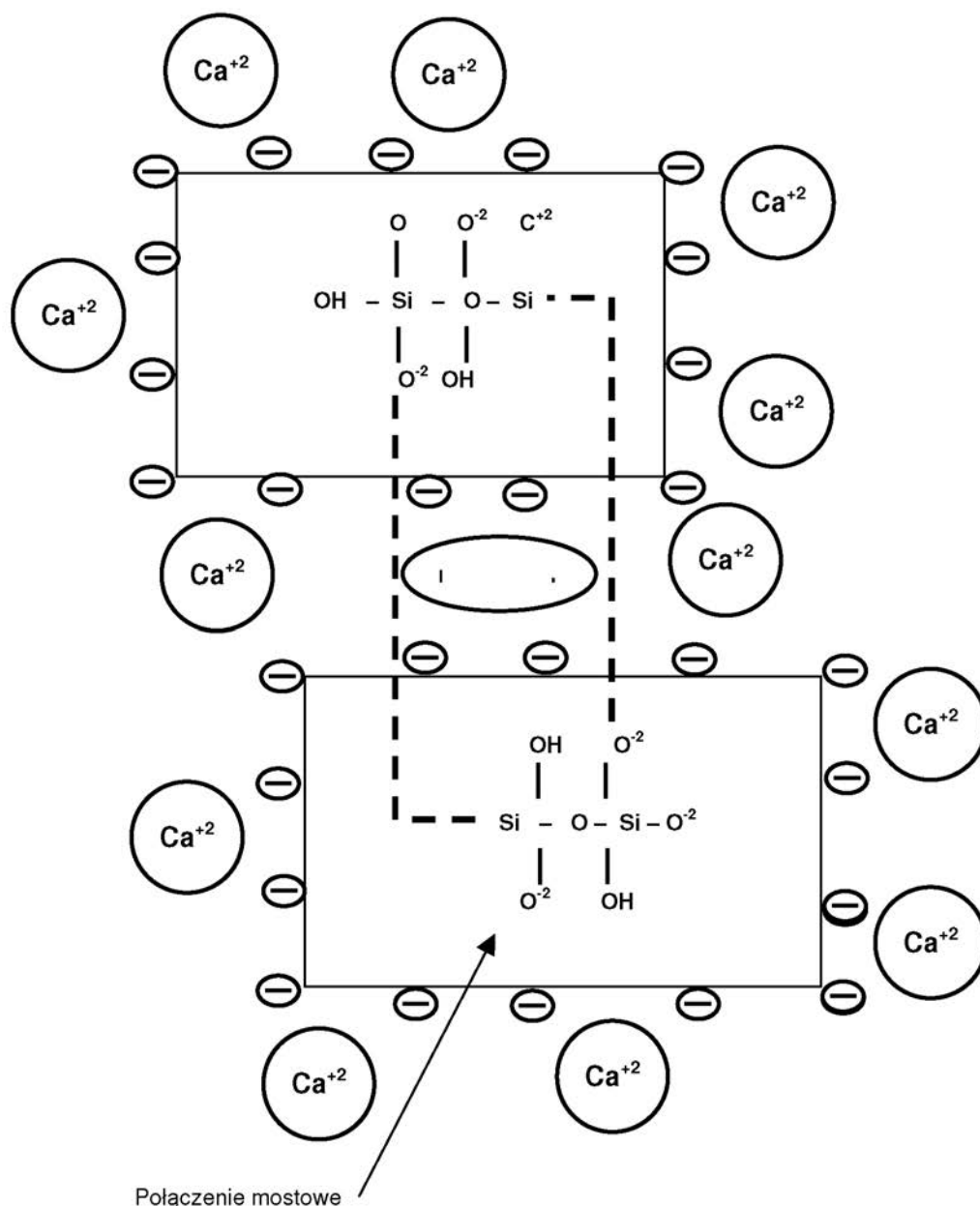
W obrębie nienasyconego gruntu można wyróżnić trzy fazy:

- mobilną wodę,
- mobilny gaz (powietrze),
- szkielet gruntowy (mineralne cząsteczki gruntu).

Woda jest tą fazą w szkielecie gruntowym, która lepiej niż powietrze „pokrywa” powierzchnię ziaren. Dzięki fenomenowi polegającemu na tym, że specyficzna energia powierzchniowa na granicy faz szkielet gruntowy – woda jest mniejszy niż na granicy szkielet gruntowy – powietrze, następuje wypieranie powietrza z systemu porów przez wodę. W gruncie nienasyconym

nie istnieje w zasadzie powierzchnia odgraniczająca powietrze od szkieletu. Dlatego też faza ta przyjmuje formę odrębnych wysepek zlokalizowanych tylko w dużych porach gruntowych. Natomiast woda jako faza, która dobrze pokrywa powierzchnię ziaren zajmuje nawet małe przestrzenie w strefie ich kontaktu.

Przy stabilizacji podłoża gruntowego metodą Joostena dochodzi w pierwszym etapie do iniekcji szkła wodnego, co powoduje powstanie czterofazowego systemu. Specyficzna energia powierzchniowa (napięcie powierzchniowe) na granicy faz szkło wodne – powietrze jest większa niż na granicy szkło – woda i w związku z tym kontakt szkła wodnego ze szkieletem gruntowym jest lepszy niż w przypadku powietrza, a nawet wody. W tym układzie szkło wypiera z porów gruntowych mobilną wodę i zajmuje jej miejsce. W drugim etapie realizacji następuje iniekcja chlorku wapniowego (CaCl_2). Roztwór tego związku charakteryzuje się małą energią powierzchniową oraz lepkością, w efekcie czego nie może dojść do całkowitego wyparcia szkła wodnego z porów gruntowych. W czasie iniekcji chlorku do gruntu nasączonego szkłem wodnym nie dochodzi do utworzenia się wyraźnej granicy między tymi dwoma komponentami, ponieważ mało lepki utwardzacz penetruje w bardzo lepkiem szkłem w formie tunelu (rys. 5c) [2]. W momencie kontaktu obu komponentów ma miejsce natychmiastowy proces żelacji, który rozwija się w kierunku zewnętrznych powierzchni cząstek gruntu (rys. 5d) [4]. W kanale utwardzacza nie dochodzi do żelacji, a po jej zakończeniu i wypłukaniu jego nadmiaru przestrzeń ta pozostaje wolna i może być wypełniona mobilną wodą gruntową (rys. 5e) [4], co tłumaczy małą efektywność metody Joostena w aspekcie uszczelniania podłoża gruntowego.



Rys. 4. Powstanie konstrukcji „mostowych” w wyniku neutralizacyjnego działania kationów

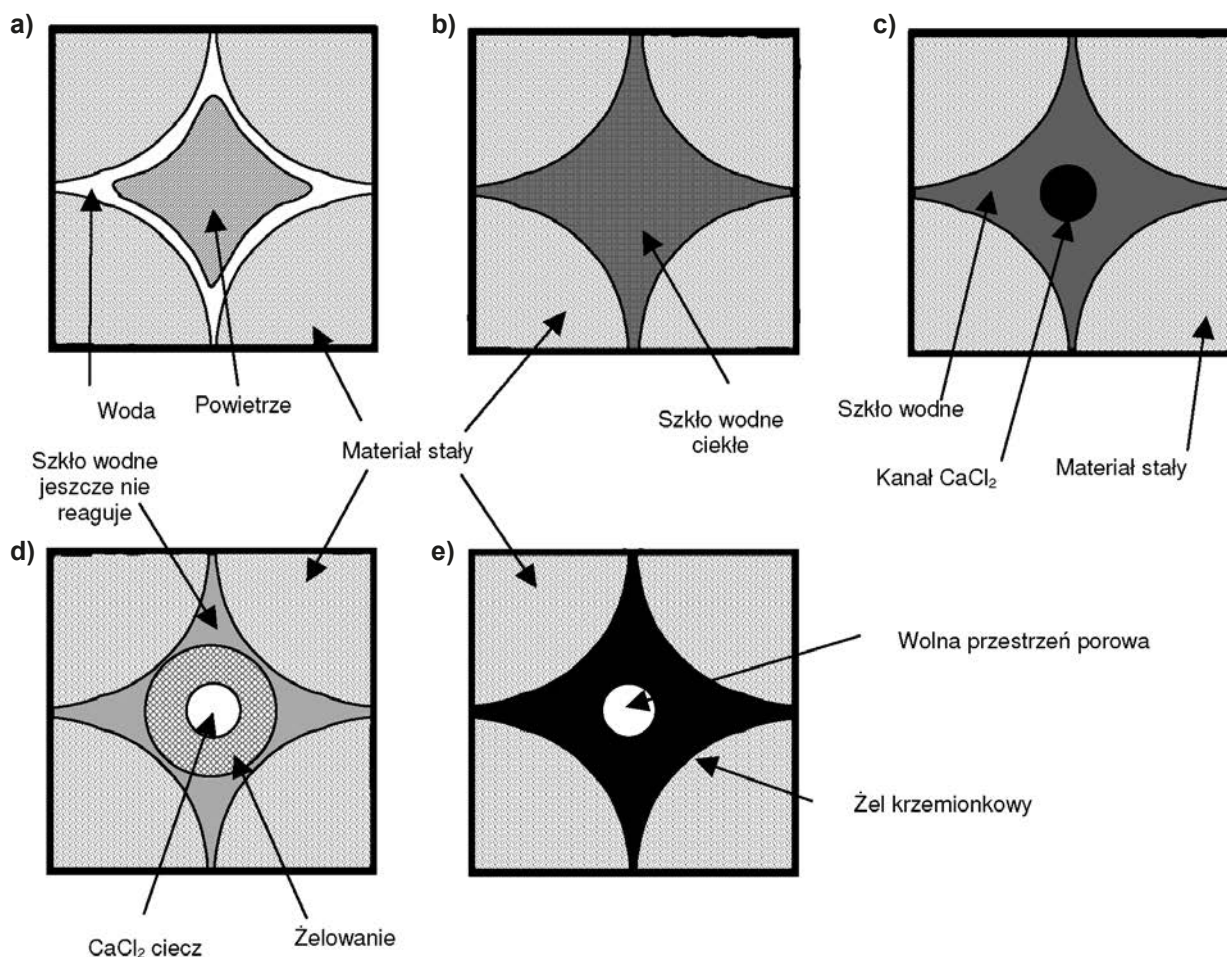
PODSUMOWANIE

Dokładniejsza analiza procesów fizyko-chemicznych zachodzących w trakcie silikatyizacji podłoża gruntowego oraz analogicznie funkcjonującego uszczelnienia kanałów pozwala stwierdzić, że metody te mogą być tylko wtedy skutecznie zastosowane, gdy spełnione są bardzo surowe wymagania technologiczno-wykonawcze. Przeprowadzenie uszczelnienia kanału metodą wewnętrzną iniekcji zalewowej wymaga przede wszystkim przeprowadzenia badań podsypanki oraz otaczającego ją ośrodka gruntowego. W praktyce bardzo często jest spotykany przypadek, że nie wykonano podsypanki, a przewód funkcjonuje w podłożu spoistym. Planowanie uszczelnienia w takich warunkach gruntowych nie może dać oczekiwanych efektów. Penetracja sodowego szkła wodnego w gruncie o uziarnieniu $d < 0,006$ mm jest, ze względu na jego dużą lepkość, praktycznie niemożliwa. Natomiast przy uziarnieniu $d > 2$ mm ma ona niekontrolowany

przebieg, co może uniemożliwić zainicjowanie procesu żelacji. Dlatego też podstawowym warunkiem zastosowania obydwu metod jest przede wszystkim istnienie szkieletu gruntowego i jego odpowiednia porowatość (uziarnienie).

Renowacja kanału metodą wewnętrzną iniekcji zalewowej nie zapewnia nawet średnioterminowego efektu uszczelnienia, w jej wyniku następuje niejednorodne wzmocnienie podsypanki oraz gruntu bezpośrednio otaczającego kanał. Ze względu na to, że uszkodzenia najczęściej są zlokalizowane w obrębie złączy, dochodzi do ich nadmiernego przeszytywnienia i utraty funkcjonalności. Złącze jest jedynym miejscem w schemacie statycznym kanału, gdzie mogą być zniwelowane wszystkie naprężenia eksploatacyjne. Konsekwencją braku przegubów jest powstanie wtórnych nieszczelności.

Szczególnie problematyczne jest zastosowanie metody, gdy w najbliższym otoczeniu kanału występują puste przestrzenie (kawerny), w których brakuje szkieletu gruntowego. Aby można



Rys. 5. Metoda Joostena: a) nienasycony ośrodek gruntowy – stan wyjściowy, b) penetracja szkła wodnego w porach gruntowych, c) penetracja chlorku wapnia w porach gruntowych, d) początek procesu żelowania, e) stan po zakończeniu żelowania

było stwierdzić istnienie kawern, jest konieczne przeprowadzenie takich badań jak sondowania lub badania za pomocą georadaru. Kawerny znajdujące się w bezpośrednim otoczeniu kanału muszą być wypełnione odpowiednią mieszanką mineralną pod ciśnieniem jeszcze przed rozpoczęciem prac renowacyjnych, w przeciwnym razie nie można uzyskać efektu wzmocnienia lub częściowego uszczelnienia gruntu bezpośrednio otaczającego kanał.

Jeżeli z jakiegoś ważnego powodu musi dojść do zastosowania uszczelnienia kanału metodą wewnętrznej iniekcji zalewowej, to należy zwrócić szczególną uwagę na następujące aspekty:

- uszczelniany odcinek kanału nie może być zagrożony konstrukcyjnie i nie może mieć płaszcza betonowego,
- wynik tak zwanego testu wodnego (badanie ubytku wody w trakcie zalewania) nie może być miarą zużycia komponentu A i B, ponieważ lepkość wody w temperaturze 20°C jest 100-krotnie mniejsza niż szkła wodnego, co decyduje o zakresie jej penetracji w gruncie,
- podstawowym wymogiem zastosowania metody jest przeprowadzenie badań w zakresie uziarnienia i stopnia zagęszczenia podsypki oraz podłoża gruntowego bezpośrednio otaczającego kanał,

- metoda powyższa jest zaklasyfikowana do grupy zabiegów o charakterze konserwacyjnym wyróżniająca się żywotnością techniczną od pięciu do dziesięciu lat.

Podsumowując, można wnioskować, że uszczelnianie kanałów metodą wewnętrznej iniekcji zalewowej nie jest szczególnie efektywną procedurą konserwacyjną. W wyniku jej zastosowania dochodzi do przesztywnienia złączy, co ma negatywny wpływ na nośność i funkcjonowanie przewodu kanalizacyjnego, a osiągnięcie odpowiedniego uszczelnienia niespoistego ośrodka gruntowego jest niemożliwe ze względu na tworzenie się kanału utwardzacza.

LITERATURA

1. Bundesministerium für Bildung und Forschung; „Forschungsprogramm zur Erhaltung von Baudenkmälern“.
2. Cambefort H.; „Bodeninjektionstechnik, Einpressungen in Untergrund und Bauwerke“; Wiesbaden, Berlin: Bauverlag 1969.
3. GEOCHEMIE Sanierungssysteme GmbH, München, 2007.
4. TU München, Lehrstuhl für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik; „Spezialverfahren“, Seite R1-R30.