



Dr inż. Stanisław Karczmarczyk

Zakład Techniki Budowlanych

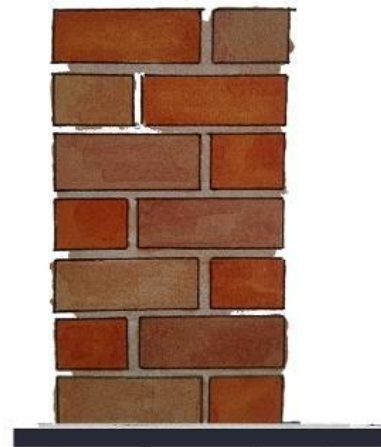
Wydział Architektury Politechniki Krakowskiej

Wzmacnianie i naprawy fundamentów murowych i kamiennych

1. Wprowadzenie

Sformułowany przez organizatorów konferencji wniosek na opracowanie referatu obejmującego zagadnienia wzmacniania i naprawy fundamentów z ograniczeniem ich rozwiązań materiałowych do murowanych z cegły ceramicznej pełnej i z kamienia jest równoznaczny z nakierowaniem treści referatu na fundamenty budowli i budynków historycznych wznoszonych do końca XIX stulecia i na początku XX stulecia.

Systematyka murów fundamentowych w obiektach historycznych.



mur z cegły ceramicznej



mur z ciosów kamiennych



mur z ciosów z warstwami wyrównawczymi



mur z kamienia łamanego z głazami polodowcowymi



mur "opus emplectum"

Rys.1. Systematyka wątków murowych stosowanych przy wznoszeniu fundamentów.

Przy umownym ograniczeniu rozwiązań do końca XIX wieku można stwierdzić, że w tym okresie nie stosowano powszechnie fundamentów jako wyraźnie wyodrębnionej podstawy budowli bądź budynku określanej w przyjętej systematyce. jako fundament bezpośredni [6]. Przy znacznej grubości ścian stosowanych w tym okresie wynoszących w granicach 1,0 metra, a nawet powyżej tej wartości fundament definiuje się jako poszerzoną z odsadzkami bądź liniowo ukośnie uformowaną część przekroju ściany piwnic. Z punktu widzenia pracy układu nośnego budynku istotną cechą takich fundamentów jest relatywnie niska sztywność giętą tak uformowanej podstawy ściany budynku a to sprzyja zarysowaniom ścian, sklepień i stropów w przypadku wystąpienia różnic odkształceń spowodowanych podatnością podłoża bądź następstwami prowadzonych wykopów w bezpośrednim styku z istniejącym fundamentem poniżej jego posadowienia

Tytuł referatu sformułowany przez organizatorów konferencji może sugerować, że zagadnienia wzmocnienia i naprawy winny się ograniczyć tylko do fundamentów bezpośrednich. Podobnie jak w rozwiązaniach współczesnych fundamentów można wyróżnić posadowienia pośrednie realizowane w formie pali drewnianych, na których murowano najczęściej fundamenty w formie murów cyklopowych z kamienia łamanego i fundamenty bezpośrednie, które charakteryzowały się posadowieniem ścian fundamentowych bezpośrednio na nośnym podłożu gruntowym. W referacie przygotowanym na XXIV Konferencję w 2009 roku [2] omówiono zasady oceny podłoża gruntowego i zasady stosowane przy realizacji fundamentów od czasów rzymskich ujętych w trakcie Witruwiusza [4] oraz przez kolejne historyczne opracowania aż do XIX stulecia. Znajomość zasad konstruowania fundamentów opisanych w kolejnych traktatach o budowaniu ułatwia ocenę historycznych posadowień i ułatwia dobór racjonalnych metod wzmocnienia posadowień i naprawy fundamentów.

Pomimo funkcjonujących ówczesnie zasad formowania fundamentów opisanych w kolejno wydawanych traktatach historycznych, w praktycznej działalności inżynierskiej obejmującej procesy badań geotechnicznych i rozpoznania istniejących fundamentów spotyka się wiele rozwiązań odbiegających od zalecanych w przeszłości zasad posadowienia budowli i budynków. Stąd też autor uważa, że jednym z pożytecznych elementów tego referatu będzie przedstawienie i usystematyzowanie rozwiązań rozpoznanych w ramach własnej praktyki inżynierskiej [3], [6], [14].

2. Opis najważniejszych zaleceń ujętych w traktatach historycznych na temat posadowienia budynków.

Przegląd historycznych zasad i zaleceń dotyczących oceny podłoża gruntowego oraz budowy i kształtowania fundamentu ujęto w pracy [2] prezentowanej na XXIV WPPK w Wiśle. Do najważniejszych zaleceń ujętych kolejno w traktatach Witruwiusza, Andrea Palladio, Battista Alberti i Vincenzo Scamozzi, który wymieniony jako ostatni z historycznych autorów wydał swoje dzieło w Wenecji w 1615 roku. W wymienionych traktatach należy wyróżnić powtarzające się zalecenia dotyczące jakości podłoża gruntowego, które w różny sposób definiowano w kolejnych traktatach historycznych

Spośród wymienionych autorów warto zacytować niektóre ujęte w dziełach historycznych zasady i metody budowy fundamentów. W traktacie Witruwiusza można znaleźć poradę „jeśli można, należy kopać aż do stałego gruntu a nawet głębiej, o ile to wydaje się wskazane ze względu na wielkość budowli”. Jest, tam również ujęte zalecenie, aby szerokość wykopu pod fundament była większa od planowanej grubości nadziemnej części ściany. Wynikała stąd zasada formowania odsadzek na styku umownie wyodrębnionego fundamentu ze ścianą.

Z kolei w dziele Andrea Palladio można znaleźć zalecenie, aby fundament był dwa razy grubszy od muru, który ma być na nim zabudowany. Jest również zawarta uwaga, aby „mieć na względzie rodzaj gruntu i rozmiary budowli i zakładać jeszcze szersze fundamenty na gruntach pulchnych i niestałych oraz wówczas, gdy mają otrzymać znaczne obciążenie”.

W traktacie Battista Alberti podana została definicja fundamentu jako wyodrębnionej części budowli stanowiącej podstawę, na której „ma się ułożyć i wznosić ową budowlę”. Jako rozwiązanie właściwe zaleca posadowienie budynków na podłożu skalnym. W traktacie wyróżniono i podkreślono starożytną maksymę o następującej treści: „kop szczęśliwie fundamenty, aż dopóki nie dotrzesz do trwałego gruntu, bo ziemia składa się wewnątrz z licznych i różnorodnych warstw”.

Spośród dzieł wydanych w Polsce należy wymienić traktat budowlany wydany przez Piotra Crescentyna w 1549 roku a w XVIII wieku L. Opaliński opracował dzieło pod tytułem „Krótka Nauka Budownicza Dworów Pałaców, zamków podług Nieba y zwyczaju Polskiego”.

Kolejne dzieło ujmujące zalecenia dotyczące zasad budowy fundamentów autorstwa jezuita W. Bystrzanowskiego zostało wydane w 1743 roku. W tym samym okresie powstało dzieło księdza S. Sierakowskiego ujmujące zagadnienia wykonywania posadowień. Dzieło to wydane w 1754 roku było zapewne inspirowane praktycznymi doświadczeniami autora, który zapewne przeżywał zawalenie się sklepień katedry w Przemyślu, a później podjął inicjatywę ich odbudowy. Stąd też w wydanym przez S. Sierakowskiego traktacie można znaleźć przestrogi wyrażone słowami „błędy w fundamentach są najszkodliwsze w strukturze trudne do naprawy, ale choćby i naprawione były zawsze struktura taka ma wadę, która ją prędzej, czy później do ruiny doprowadzi”. Skalę doświadczeń autora tego dzieła podkreśla również ostrzeżenie zawarte w słowach: „nie można tedy mieć dosyć ostrożności w zakładaniu gruntownie tej zasady, od której całość budowy zawisła”.

Konfrontacja historycznych porad i zapisów z praktycznymi doświadczeniami wskazuje, że zalecenia autorów traktatów najczęściej nie były respektowane przez budowniczych. Dotyczy to szczególnie takich cech fundamentów murowanych jak sposób przewiązania muru w kierunku poprzecznym oraz sposób uformowania przekroju poprzecznego fundamentu.

3. Systematyka rozwiązań fundamentów murowych

Na podstawie praktycznych doświadczeń można podzielić fundamenty murowe pod kątem zastosowanych materiałów do ich budowy, pod kątem uformowania przekroju poprzecznego ławy fundamentowej oraz pod kątem sposobu spływu obciążeń z fundamentu murowego na nośne warstwy podłoża gruntowego.

3.1. Podział fundamentów murowych ze względu na rodzaj materiału.

Przyjmując jako kryterium systematyki materiały stosowane do wznoszenia ław i ścian fundamentowych można wyróżnić następujące rozwiązania:

a/ Fundamenty z obrobionych ciosów kamiennych

b/ Fundamenty z kamienia łamanego

c/ Mieszane wązki murowane oparte na zastosowaniu kamienia łamanego lub obrobionych ciosów z domieszkami cegły palonej pełnej.

d/ Ławy fundamentowe z cegły palonej pełnej stosowane najczęściej w drugiej połowie XIX stulecia i na początku XX stulecia.

e/ Fundamenty uformowane w postaci murów kamiennych cyklopowych w których struktura muru wykonana była z głazów układanych bez spajającej je zaprawy w celu ochrony wyższych partii murów przed napływem wilgoci w mechanizmie podciągania kapilarnego.

f/ Fundamenty i ściany fundamentowe wznoszone z kamienia łamanego z uzupełnieniami cegłą ceramiczną paloną i z elementami wypełniającymi w postaci głazów narzutowych o wyoblonych kształtach pozyskiwanych w tym celu jako gładzy narzutowe z okresu zlodowacenia. Stąd też tego typu gładzy spotyka się w historycznych fundamentach na terenie Mazowsza, Warmii i Mazur (rys.2, rys. 3, rys.4).



Rys. 2. Przykład rozpadu muru fundamentowego zamku krzyżackiego w Jegławkach.



Wprowadzane do struktury fundamentów wyoblone gązdy narzutowe redukują znacząco spójność murów szczególnie w kierunku poprzecznym. Powoduje to bardzo często zagrożenie takich murów samorzutnym rozpadem po usunięciu obsypki fundamentu spowodowanej przykładowo pogłębieniem piwnic lub odstąpieniem zewnętrznej powierzchni ścian fundamentowych w celu wykonania izolacji pionowej.

Rys. 3 Mur fundamentowy „opus eueplectum” pałacu koło Szamotuł.



Rys. 4 Wyoblone gazy wbudowane w przekrój fundamentu w Archikatedrze
Wojska Polskiego.

3.2. Systematyka fundamentów murowych pod kątem geometrycznego uformowania ich przekroju poprzecznego.

W większości historycznych budynków brak jest wyraźnego, budowlanego wyodrębnienia ławy fundamentowej w stosunku do wyższych partii ścian murowanych. W niektórych przypadkach – szczególnie w budynkach bez podpiwniczenia – fundamentem nazywano dolną część przekroju ścian fundamentowych od poziomu terenu do poziomu posadowienia. W innych przypadkach jest to najniższa część przekroju ściany charakteryzująca się innym dobozem materiału, innym kształtem przekroju i innym uformowaniem zewnętrznego lica muru. Pomimo podanych wcześniej zaleceń dotyczących szerokości fundamentów w stosunku do opartych na nich ścian w większości historycznych budynków nie różnicowano grubości ścian fundamentowych w poziomie ich podstawy. Wynika to między innymi z zasad, jakimi kierowano się przy ustalaniu grubości ścian stanowiących konstrukcję wsporczą dla sklepień przekrywających najczęściej pomieszczenia dolnych kondygnacji.

Na podstawie praktycznych doświadczeń zebranych przy rozpoznaniu fundamentów budynków historycznych można wyróżnić następujące sposoby ich formowania.

a/Fundamenty o przekroju prostokątnym stanowiące umownie wydzielone dolne pasmo ściany fundamentowej.

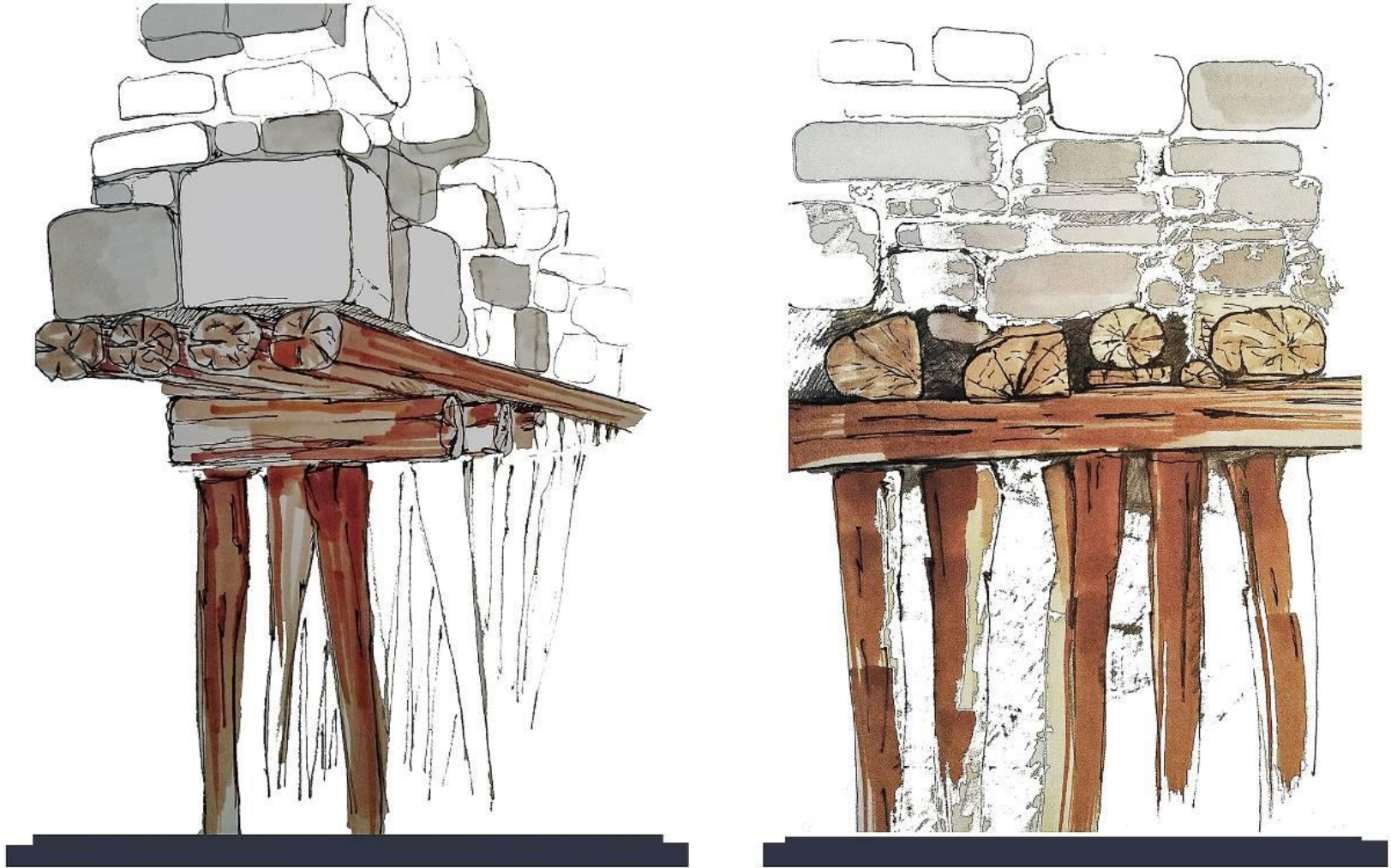
b/Fundamenty o przekroju trapezowym z poszerzeniem przekroju w kierunku podstawy zgodnie z zaleceniami ujętymi w traktacie L. Opalińskiego zalecającego formowanie przekroju „a scarpa”.

c/ Przekroje fundamentów z uskokowo wykonanymi odsadzkami spotykane z zasady w fundamentach wykonywanych w XIX stuleciu i w pierwszej połowie XX wieku z cegły ceramicznej palonej oraz z obrobionych ciosów kamiennych . W przypadku fundamentów kamiennych odsadzki nie są tak wyraźnie uformowane z uwagi na kształt i wymiary elementów murowych.

3.3. Rozwiązania fundamentów budowli wznoszonych w bezpośrednim sąsiedztwie rzek i w warunkach wysokiego poziomu wód gruntowych.

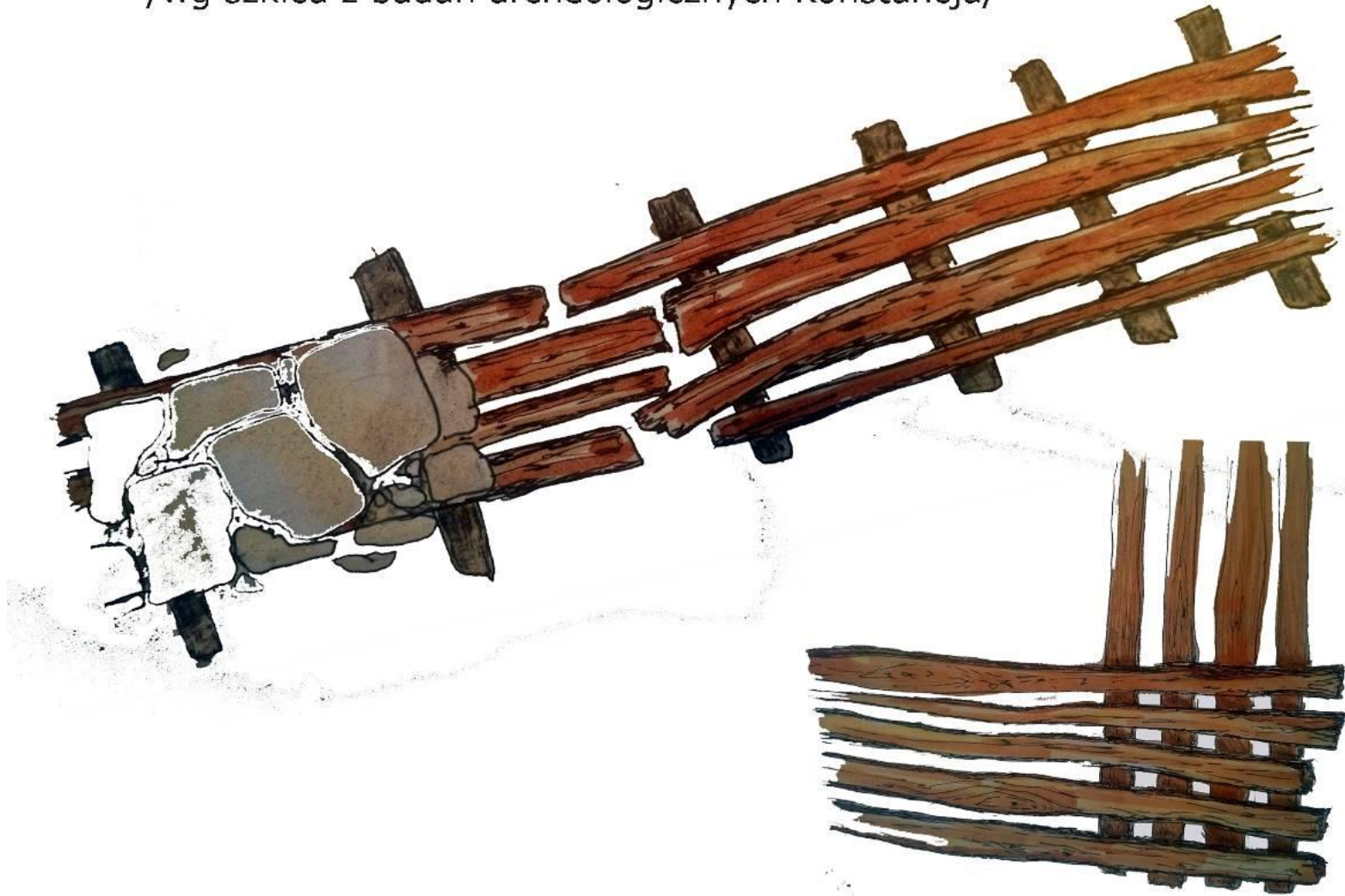
W literaturze przedmiotu można znaleźć informacje na temat miejsc, w których konieczne było stosowanie posadowień pośrednich na palach drewnianych. Podręcznikowym przykładem takich rozwiązań jest zabudowa Konstancji nad jeziorem Bodeńskim a w Polsce Pałac na Wyspie w zespole Łazienek Królewskich w Warszawie i ściana zachodnia zamku w Malborku. Na palach drewnianych posadowiono również takie budowle jak zamek w Baranowie Sandomierskim, zamek w Rzemieniu i sadzawka św. Stanisława w zespole klasztornym O.O Paulinów na Skałce w Krakowie. W przypadku przytoczonych przykładów spotyka się dwa rodzaje rozwiązań podbudowy z pali drewnianych zagłębionych poniżej poziomu zwierciadła wody gruntowej:

Schemat układu muru fundamentowego w obiekcie historycznym.
/wg szkicu z badań archeologicznych Konstancja/



Rys.5 Fundament na palach drewnianych z rusztem drewnianym w Konstancji.

Schemat układu muru fundamentowego w obiekcie historycznym.
/wg szkicu z badań archeologicznych Konstancja/



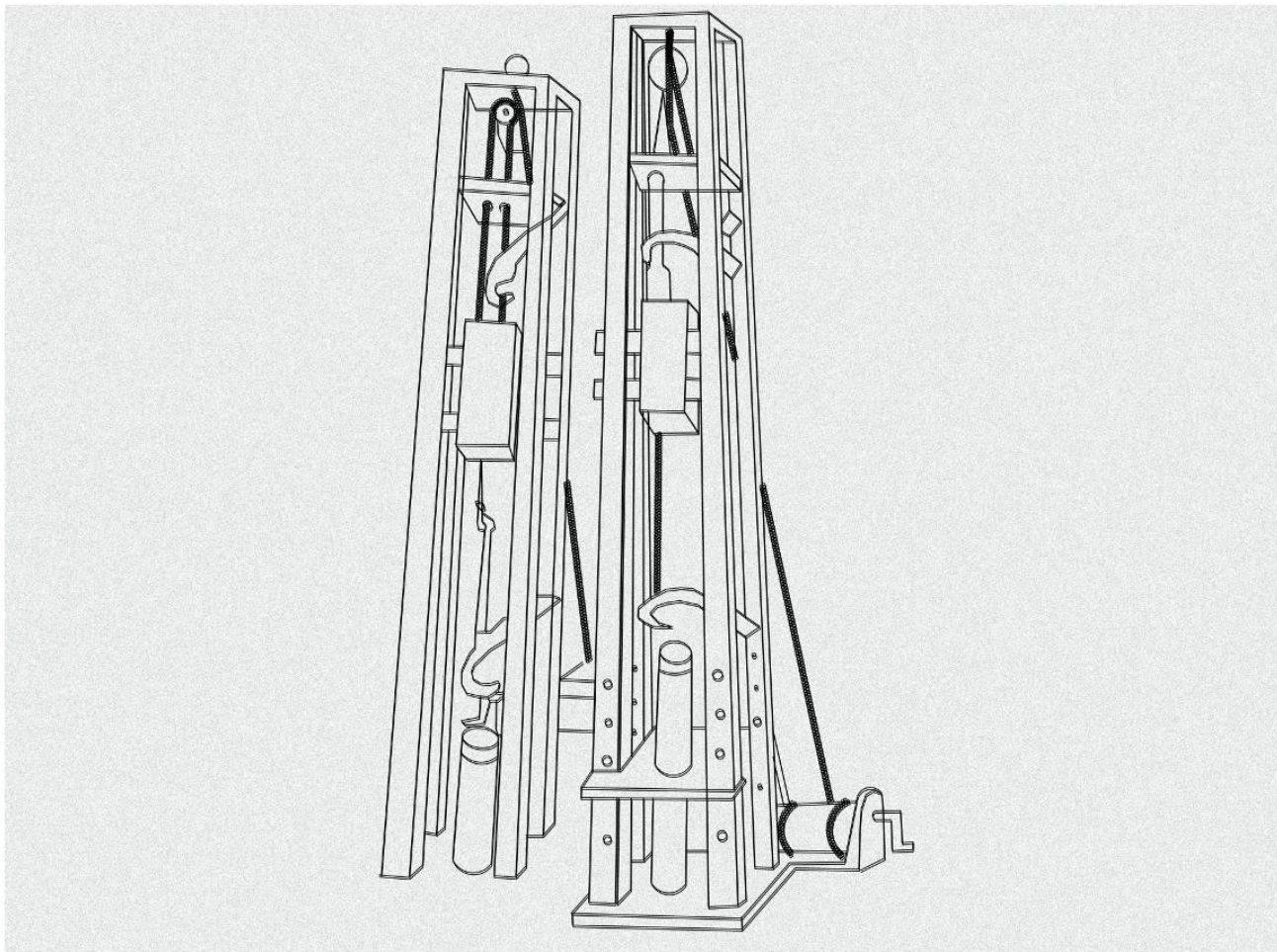
Rys. 6 Rozwiązanie drewnianego rusztu pod mur kamienny w Konstancji.

a/ Mur kamienny układany jest bezpośrednio na głowicach pali drewnianych. Rozwiązania takie zastosowano w Pałacu na Wyspie w zespole Muzeum Łazienek Królewskich w Warszawie, w sadzawce św. Stanisława w Baranowie Sandomierskim i w Rzemieniu. Opisany sposób uformowania spływu obciążeń na nośną warstwę, gruntu należy ocenić jako relatywnie korzystną – z punktu widzenia trwałości i niezawodności posadowienia. Ryzyko utraty nośności tak uformowanego fundamentu związane jest z następstwem trwałego bądź okresowego obniżenia poziomu wody gruntowej, co powoduje proces szybkiego butwienia drewna i postępujące nierównomierne osiadanie fundamentów. Taki mechanizm uszkodzeń posadowienia stwierdzono w przypadku zamku w Baranowie Sandomierskim, w Rzemieniu i w przypadku pali drewnianych podpierających taras otaczający pałac na Wyspie w zespole Muzeum Łazienek Królewskich. Należy przy tym podkreślić, że w przypadku pali podpierających taras Pałacu na Wyspie korozyjne uszkodzenie pali drewnianych było spowodowane tylko okresowymi, nieprzekraczającymi kilku miesięcy odsłonięciami końcówek pali z wody w następstwie wypompowania bądź wygradzenia wody w okalającym pałac stawie.

b/ Alternatywne rozwiązanie posadowienia pośredniego na palach drewnianych zawierało co najmniej dwuwarstwowy ruszt z bali drewnianych ułożonych bezpośrednio na głowicach drewnianych pali wbijanych. Rozwiązanie z poziomo ułożonymi rusztami występuje jako rozwiązanie standardowe w posadowieniu budynków i kamiennych murów obronnych w Konstancji nad jeziorem Bodeńskim. Wyniki badań archeologicznych określających układ rusztów ilustrują załączone rysunki i fotografie (rys.5, rys.6, rys.7).

W Polsce podobny sposób posadowienia obejmujący drewniane pale wbijane i ułożony na ich głowicach ruszt z bali drewnianych zastosowano przy budowie zachodniego muru obronnego zamku w Malborku. Z uwagi na brak podobnych rozwiązań w innych historycznych budowlach na terenie Polski należy sądzić, że w Malborku wzorowano się na rozwiązaniach stosowanych w porównywalnie niekorzystnych warunkach podłoża gruntowego w Konstancji [11], [12]. W przypadku Konstancji występuje nawodnione podłoże z miękkoplastycznych glin pylastych. Podobne warunki występują w bezpośrednim sąsiedztwie Nogatu przepływającego obok murów obronnych w Malborku.

Ręczny wbijak do pali zaprojektowany przez Francesco di Giorgio około 1450 roku.



Rys. 7 Szkic urządzenia do wbijania pali drewnianych

4. Przegląd metod wzmocnienia i zabezpieczania fundamentów murowych kamiennych i z cegły ceramicznej.

4.1. Przyczyny powodujące konieczność wzmocnienia fundamentów.

Konieczność wzmocnienia fundamentów murowych występuje w następujących przypadkach:

a/ Przy zmianie parametrów podłoża gruntowego powodującej obniżenie jego jednostkowego oporu co ma najczęściej miejsce w następstwie nawodnienia tego podłoża lub w wyniku rozluźnienia gruntu spowodowanego prowadzonymi wykopami w bezpośrednim sąsiedztwie fundamentu.

b/Wzrost obciążeń spowodowany przebudową bądź zmianą sposobu użytkowania budynku.

c/Zmiany w zakresie miarodajnej wielkości zagłębienia fundamentu spowodowane często pogłębieniem piwnic ze względów użytkowych bądź też formowaniem obwodowych fos osuszających ściany fundamentowe.

d/ Wpływ drgań parasejsmicznych powodujących zmianę parametrów podłoża przy gruntach tiksotropowych bądź też efektywny wzrost obciążeń na fundamenty spowodowany drganiami budowli [8].

e/ Wyniki okresowej kontroli bezpieczeństwa budynku w wyniku której zostaje ujawniona ukryta wada polegająca na znaczącym obliczeniowym niedoborze nośności fundamentów w stosunku do wymagań określonych w obowiązujących przepisach [14].

Jeżeli pierwsze z podanych przyczyn są oczywiste, to należy zwrócić uwagę na fakt, że teoretyczne podstawy mechaniki gruntów rozpoznawano i rozwijano od początku 18 stulecia. Zawdzięczamy to w pierwszym okresie pracom wybitnych inżynierów i matematyków, natomiast podstawy naukowe nowoczesnej mechaniki gruntów zaczęto tworzyć po 1910 roku. Interesujących informacji na ten temat można znaleźć w pracach publikowanych przez A.W Skemptoną [13].

Przypadki ujawniania niewystarczającej nośności fundamentów historycznych budynków dotyczą w pierwszym rzędzie sytuacji, kiedy fundamenty tych budowli posadowiono na uplastycznionym podłożu gliniastym lub na gruntach zawierających części organiczne. W publikacjach znanego specjalisty K. Piepera można znaleźć twierdzenie, że przyczyną 80% uszkodzeń ujawniających się obecnie w historycznych budynkach są fundamenty niezapewniające wymaganego poziomu nośności [11]. W świetle praktycznych doświadczeń tego autora wiele historycznych budynków wykazuje niedobory nośności sięgające wskaźnika nawet ponad pięć razy w stosunku do wymaganej obliczeniowo nośności, a mimo tego nie dochodzi do katastrof i awarii takich budynków. O braku zapasu bezpieczeństwa fundamentów – zdaniem K. Piepera – świadczy fakt, że proces narastania w nich uszkodzeń spowodowanych nierównomiernym osiadaniem można powstrzymać stosując tylko redukcję obciążeń wpływających na fundamenty.

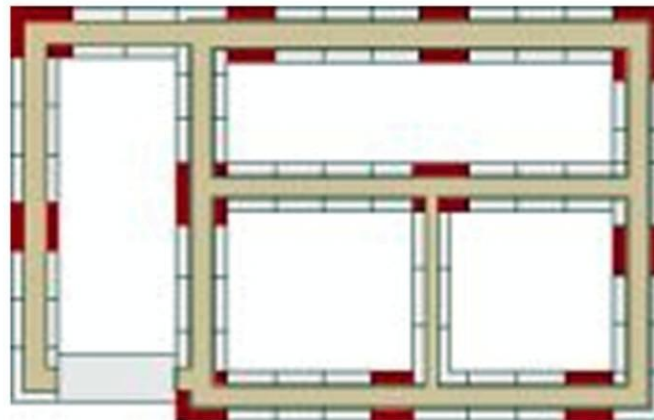
Z praktyki autora referatu można przytoczyć przykład co najmniej trzykrotnego przekroczenia obliczeniowej nośności ław fundamentowych podpierających ściany sznurowni w budynku teatru im. J. Słowackiego w Krakowie. Fakt tego przekroczenia ujawnił się na etapie modernizacji teatru. Ściany tej części budynku nie wykazywały uszkodzeń adekwatnych do stopnia wyczerpania ław fundamentowych.

4.2. Opis i analiza metod wzmocnienia fundamentów murowych.

a/ Podbijanie fundamentów.

Zasady podbijania.

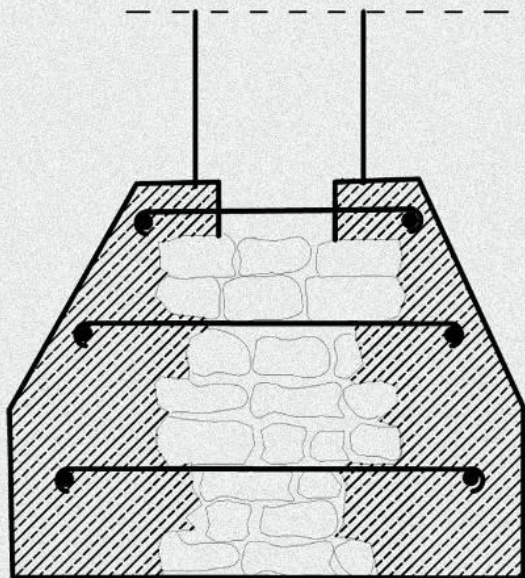
- Podbijanie fundamentów podzielić na odcinki 1m.
- Jednocześnie można podkopać co czwarty odcinek.
- Odległość między odcinkami nie powinna być mniejsza niż 1,5- krotna wysokość ściany piwnic. Jeśli ściana piwnic ma wysokość 220cm to pomiędzy podbijanymi odcinkami powinna zostać odległość 3,5-4m.
- Fundamenty należy podbijać bloczkami betonowymi na zaprawie cementowej lub cegłą pełną o wyczymałości elementu murowego min. 10 MPa.
- Odstłonięty szyb podbicia należy chronić przed zalaniem.



Rys.8. Schemat rozmieszczenia odcinków podbijania.

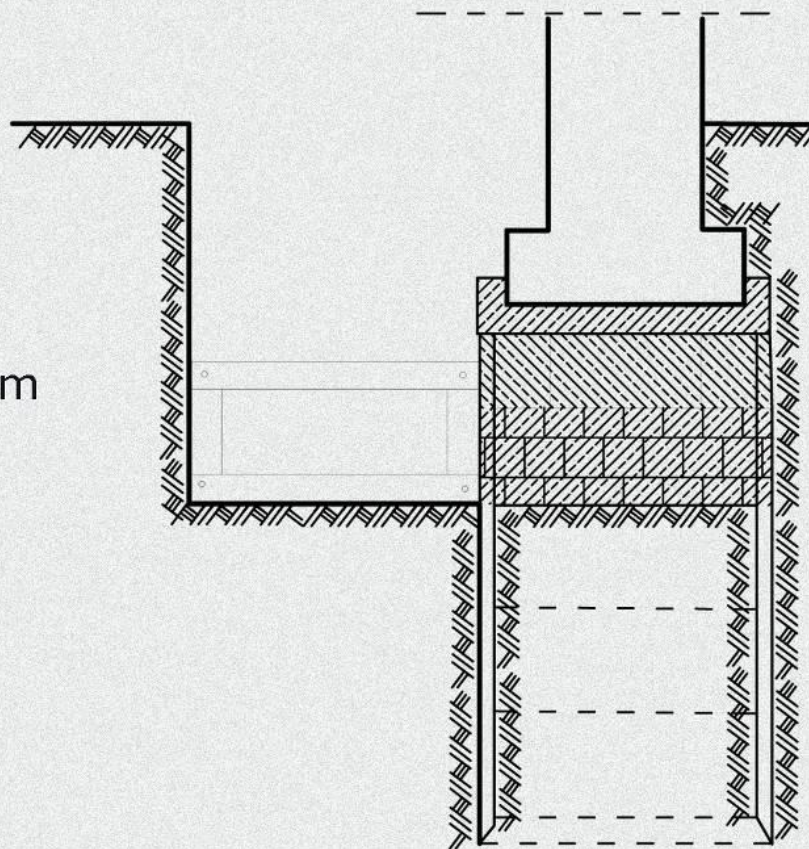
Podbijanie fundamentów można ogólnie zdefiniować jako formę uzupełniania ich przekroju przez zwiększenie wysokości przekroju fundamentu i głębokości posadowienia i w zależności od wymagań w zakresie nośności można również zwiększać szerokość podstawy fundamentu. Wzrost nośności podbijanego fundamentu może być więc wynikiem łącznego przyrostu nośności uzyskanego jako wynik zmiany następujących czynników:

- wartości zagłębienia podstawy fundamentu „D” w stosunku do poziomu posadzki piwnicy lub powierzchni terenu,
- szerokości podstawy fundamentu bądź jego powierzchni,
- korzystniejszych parametrów podłoża gruntowego na pogłębionym poziomie posadowienia.



Podbicie betonem monolitycznym przez poszerzenie.

Podbicie przez pogłębienie i ewentualne poszerzenie.



Rys.9. Warianty podbicia przez pogłębienie lub poszerzenie fundamentu

Podbijanie fundamentów winno być zaprojektowane i realizowane według ściśle określonej kolejności odcinków podbijania i według ściśle określonych wymiarów odcinków podbijania. Sposób realizacji podbicia winien być określony w projekcie (przykład projektu kolejności i sposobu podbicia ilustruje rys. 8, rys. 9).

W przypadku realizacji podbicia fundamentów murowych należy się liczyć z następującymi trudnościami i zagrożeniami realizacyjnymi:

- niska spójność muru a szczególnie muru kamiennego może stwarzać zjawisko samorzutnego odpadania spodniej warstwy elementów murowych do drażonego szybu na odcinku podbicia,

- szyb podbicia wymaga starannego rozparcia, aby ograniczyć skalę rozluźnienia podłoża w strefach przyległych do szybu podbicia,

- czas realizacji szybu podbicia i formowanie filara podbicia należy maksymalnie skrócić, aby ograniczyć skalę nieodwracalnych odkształceń podłoża gruntowego w sąsiedztwie podbijanego filara,

- w procesie podbijania należy się liczyć z nieuniknionymi odkształceniami ścian opartych na podbijanych fundamentach przyjmuje się, że nawet przy starannej realizacji takich prac mogą wystąpić osiadania sięgające wartości około 20mm [3] i towarzyszące im zarysowania ścian,

- w szczególnych przypadkach podbicie może polegać tylko na poszerzeniu podstawy fundamentu w formie przykładek żelbetowych zespolonych z murowaną ławą fundamentową jest to jednak wzmocnienie, które zaczyna funkcjonować po dociążeniu fundamentów.



Rys. 10. Przykład realizacyjnego zabezpieczenia podstawy podbijanego fundamentu kaplicy Trójcy Świętej

b/ Wzmacnianie przy pomocy mikropali.

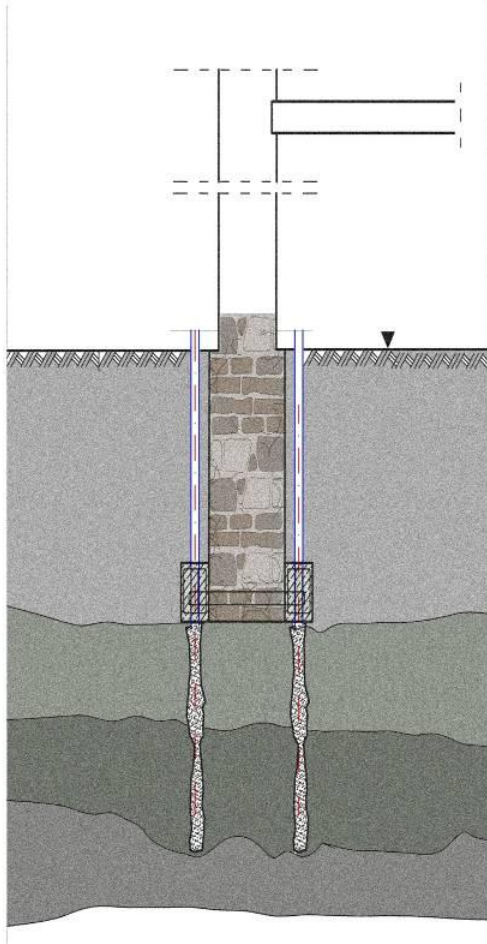
Technika wzmacniania fundamentów murowych przy pomocy mikropali jest stosowana w Polsce od lat 90-tych XX stulecia pomimo, że w zaawansowanych technologicznie krajach stosowano w praktyce mikropale już w latach 60-tych XX stulecia.

Podstawową cechą użytkową mikropali stosowanych najczęściej o średnicy w granicach od 120 do 200 mm jest możliwość ich realizacji wewnątrz budynków, ponieważ urządzenia do wiercenia i do iniekcji mają gabaryty wymagające pomieszczeń o wysokości netto 2,0 m a ponadto ich ciężar umożliwia transport ręczny.

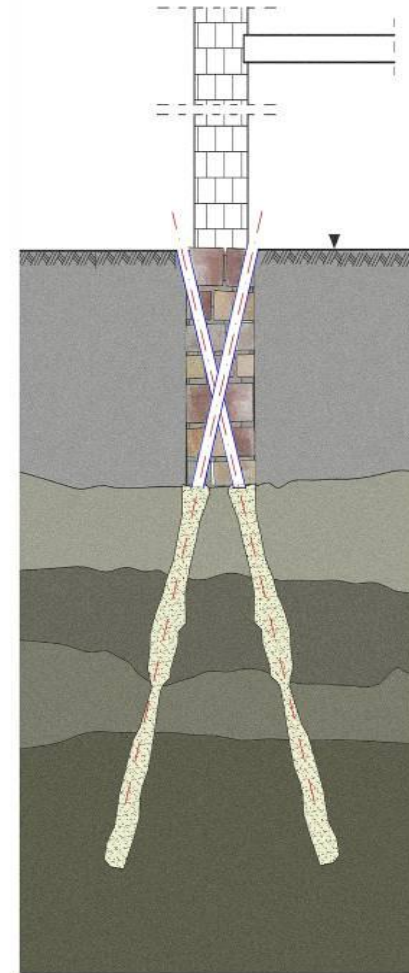
Ze względu na sposób spływu obciążeń z fundamentu na podłoże gruntowe za pomocą mikropali wyróżnia się dwa podstawowe rozwiązania

- bezpośrednio zespolenie mikropala z fundamentem na odcinku jego przenikania z ławą fundamentową lub ze ścianą fundamentową (rys.11).
- połączenie mikropali formowanych przy licu wzmacnianych fundamentów za pośrednictwem oczepów żelbetowych połączonych poprzecznie z ławą fundamentową (rys. 11).

Spływ obciążeń na mikropale za pośrednictwem oczepów.



Kozłowy układ mikropali zespolonych z przekrojem fundamentów.



Rys.11. Schematy spływu obciążeń przy wzmacnianiu fundamentów murowych mikropalami.

Przy omawianiu zastosowań mikropali należy również wyróżnić sposób formowania konstrukcji nośnej mikropali. W tym zakresie można wyróżnić następujące warianty formowania przekroju poprzecznego mikropala:

- pale, w których zastosowano rury stalowe jako ustrój nośny, przy czym najczęściej stosuje się rury o średnicy 76,1/6,3 mm lub rury o średnicy 101,6/6,3 mm,

- pale, w których elementem nośnym przekroju jest pręt gwintowany o średnicy 40mm stosowany jako standardowe rozwiązanie firmy „Bauer”,

- pale o przekroju poprzecznym uformowanym z wiązki prętów zbrojeniowych, którą najczęściej stanowią 4 pręty $\varnothing 16$ lub 4 pręty $\varnothing 20$ mm.

Porównując użytkowe cechy mikropali o podobnych sposobach formowania przekroju poprzecznego należy stwierdzić, że najwłaściwsze jest formowanie mikropali z rur perforowanych. Wadą tego rozwiązania jest relatywnie wysoki koszt jednostkowy rury stalowej.

Drugim, bardzo popularnym sposobem formowania przekroju nośnego mikropali jest stosowanie prętów pełnych o średnicy $d = 40$ mm lub większej. Jest to sposób formowania praktykowany między innymi przez firmę "Bauer". W oparciu o cechy użytkowe pręta nośnego z nagwintowaną powierzchnią zewnętrzną opracowano nawet rozwiązania umożliwiające podnoszenie wzmocnianego fundamentu do góry. Metodę sprawdzono przy operacji podnoszenia fundamentu nawet o wartości 165 mm odkształconego w wyniku nierównomiernego osiadania. Warunkiem zastosowania metody chronionej patentem jest duża sztywność własna fundamentu. Obecnie oferowane są również inne rozwiązania bazujące na sztywnych prętach o pełnym lub rurowym o przekroju.

Trzeci, kolejny wariant formowania przekroju mikropali polega na wprowadzeniu wiązki prętów zbrojeniowych spiętych ze sobą z przekładkami dystansowymi. Jest to sposób, który generuje najniższy cenowo udział przekroju stali w konstrukcji mikropala. Jest to rozwiązanie, które generuje jednak wysokie ryzyko popełnienia błędu w trakcie iniekcyjnego formowania pala.

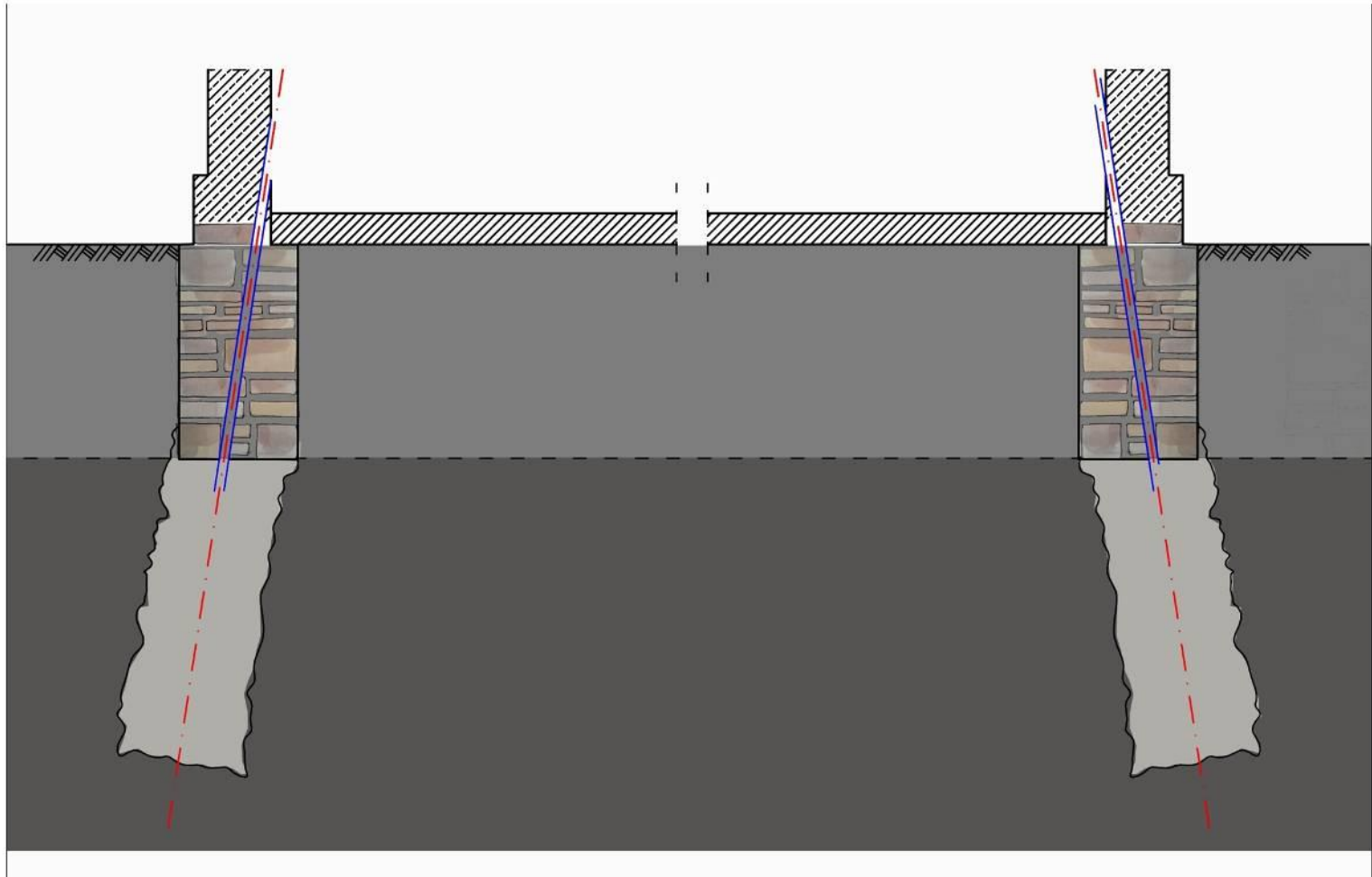
c/ Wzmacnianie posadowienia przez formowanie kolumn gruntobetonowych metodą iniekcji strumieniowej.

Technologia iniekcji strumieniowej została wprowadzona do praktyki inżynierskiej w latach 90-tych XX stulecia.

Jedną z pierwszych realizacji zabezpieczenia fundamentów przez formowanie podbicia kolumnami gruntobetonowymi było zabezpieczenie klasztoru S.S Boromeuszek w Trzebnicy woj. dolnośląskie. Do podstawowych zalet tej metody należy zaliczyć możliwość skutecznej stabilizacji posadowienia w przypadku fundamentów murowych wykazujących niską spójność i niską wytrzymałość zaprawy lub jej brak w przypadku murów cyklopowych. Przy tego typu wadach realizacja podbicia stwarza zagrożenie dla pracujących w szybie samorzutnie odpadającymi kamieniami lub fragmentami muru. Przykładem takiego zagrożenia stanowi ilustracja fotograficzna spodniej warstwy muru fundamentowego kaplicy św. Trójcy na zamku w Lublinie. Grupa pracowników doświadczonych przy robotach górniczych z kopalni Bogdanka asekurowała podstawę fundamentu prętami zbrojeniowymi zabezpieczającymi przestrzeń szybu przed niesygnalizowanym upadkiem elementów kamiennych (rys. 10).

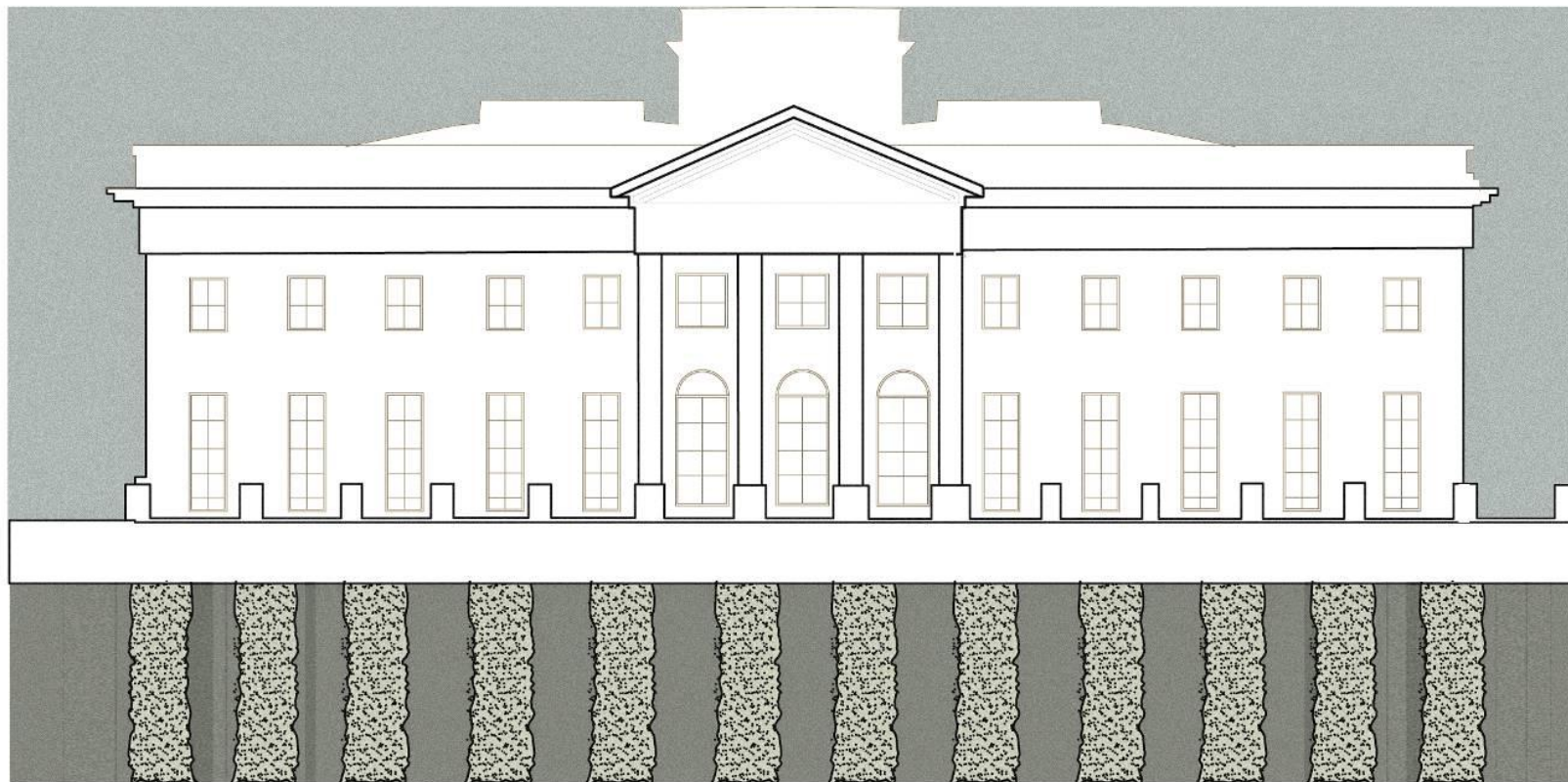
Realizacja podbicia metoda iniekcji strumieniowej stwarza ponadto możliwość częściowego zespolenia murów cyklopowych oraz murów charakteryzujących się obecnością kawern i rozluźniona strukturą.

Przykład formowania kolumn gruntobetonowych.



Rys. 12. Schemat formowania kolumn gruntobetonowych pod istniejącymi fundamentami jako forma ich podbicia

Wzmacnianie podłoża i fundamentów budowli zabytkowych metodą iniekcji strumieniowej.



Rys.13. Ilustracje możliwości podbicia historycznego budynku iniekcją strumieniową

d/ Realizacja wzmocnień obejmujących wykonanie płyty odciążającej z ograniczonym podbiciem.

Tego typu zabezpieczenie stanowi racjonalny sposób wzmocnienia posadowienia w następujących przypadkach:

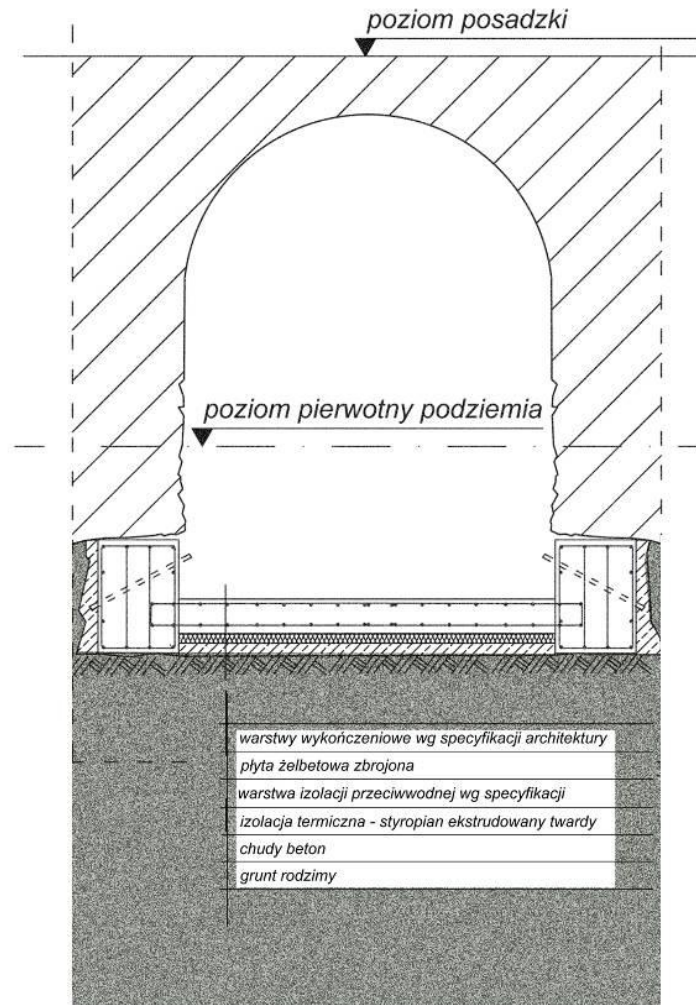
- przy powiększeniu wysokości użytkowej piwnic,
- na przypadkach, kiedy w istniejących budynkach stwierdza się niewystarczającą wartość zagłębienia fundamentu w następstwie okresowej oceny budynku,
- w przypadku wzrostu obciążeń wywołanych nadbudową lub zmianą sposobu użytkowania.
- w przypadku uciążliwości wywołanych wpływem drgań parasejsmicznych.

Na podstawie praktycznych doświadczeń można stwierdzić, że wprowadzenie płyt odciążających stanowi sposób zabezpieczenia konkurencyjny finansowo w stosunku do innych metod. Żelbetową płytę odciążającą należy kotwić w obwodowych ścianach w odpowiednio uformowanych gniazdach tak, aby wykluczyć możliwość wykuwania ciągłych bruzd na oparcie płyty. W praktyce długość oparcia w gniazdach w stosunku do wymiarów odcinków styčných przy wzmacnianej ścianie wynika z cech wytrzymałościowych muru i z warunku ścinania sięgaczy płyty opartych w gniazdach. Na ogół względna proporcja długości gniazd do odcinków styčných zawierają się w granicach od 0,6/0,4 do 0,5/0,5.

W przypadku, kiedy płyta odciążająca jest usytuowana na poziomie dolnej krawędzi istniejącego fundamentu lub poniżej tej krawędzi wówczas jej realizacja może się odbywać tylko pasmami na zasadach identycznych jak klasyczne podbijanie fundamentu. W takim przypadku mogą być oczywiście stosowane tylko płyty jednokierunkowo zbrojone.

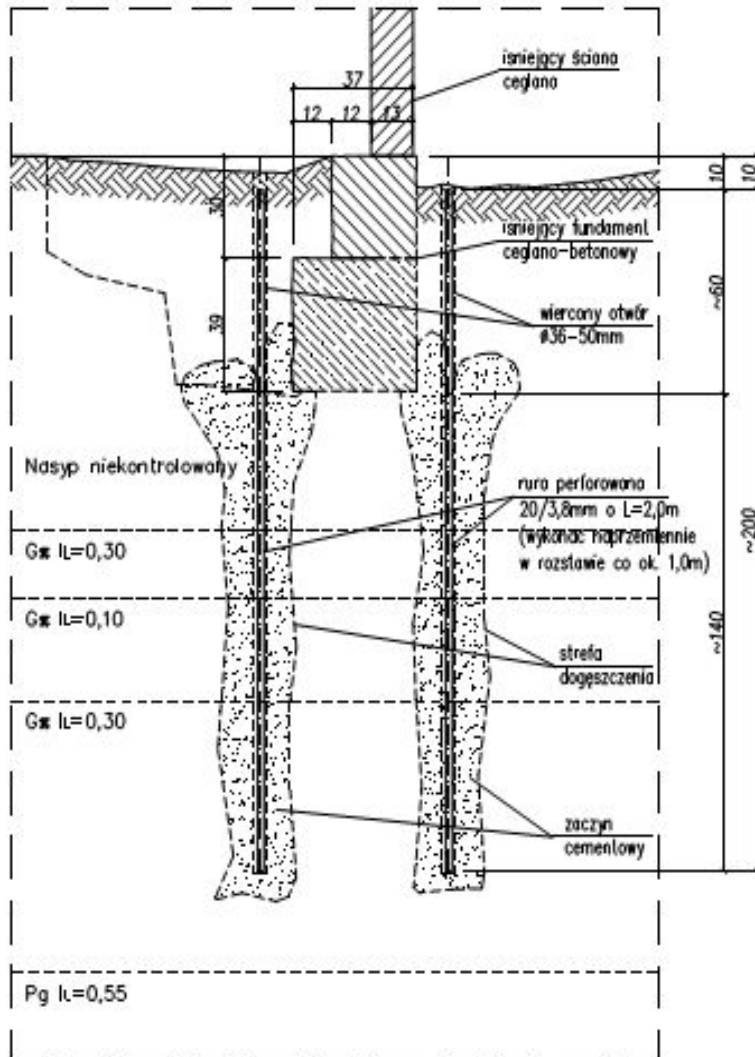
Ważnym zabiegiem towarzyszącym takiej formie wzmocnienia posadowienia jest zapewnienie aktywnego docisku płyty do podłoża gruntowego i docisku w miejscach połączenia ze ścianą fundamentową. Efekt takiego aktywnego docisku można uzyskać przy zastosowaniu iniekcji mineralnej do przestrzeni styku płyty z podłożem gruntowym. Dla zapewnienia kontrolowanego rozptyłu zaczynu iniekcyjnego, traktowanego w tym przypadku jako płyn mechanicznie hydraulicznego można zastosować połówki rurek PCV układane przed zabetonowaniem właściwej płyty na warstwie podbetonki.

Przykładowy sposób rozwiązania płyty odciążającej.

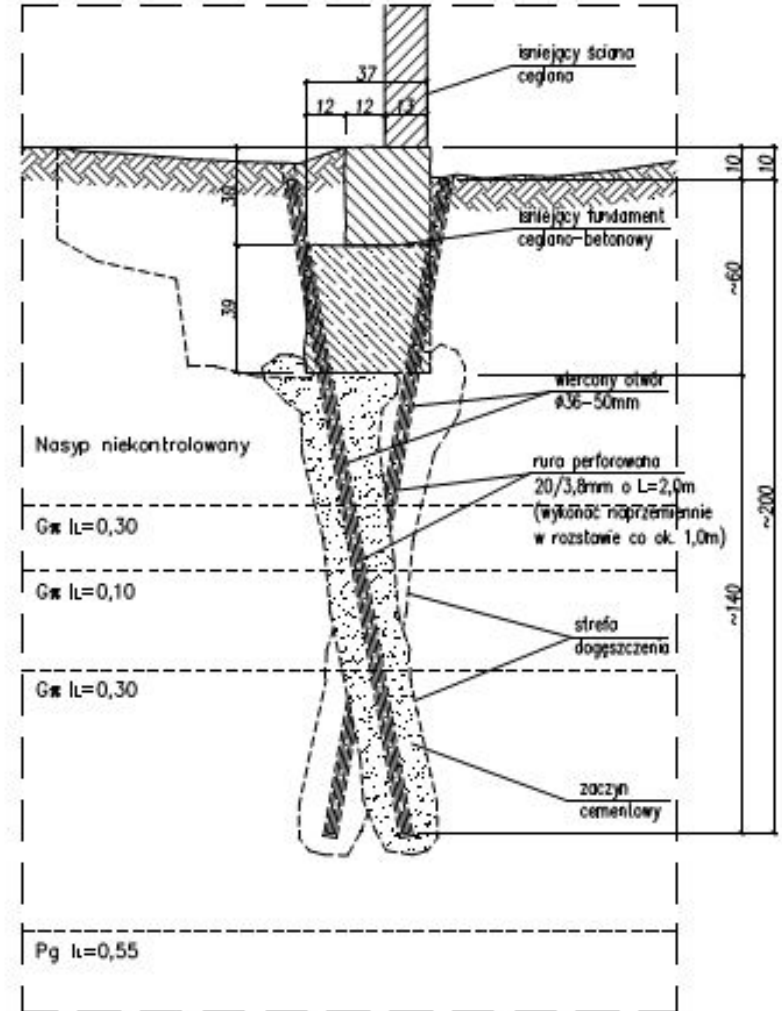


Rys.14. Przykład wzmocnienia płytą odciążającą.

Przykładowe rozwiązanie iniekcji zbrojonej dla B-79



Przykładowe rozwiązanie iniekcji zbrojonej dla B-79



Rys. 15. Schemat wzmocnienia podłoża metodą zbrojonej iniekcji dogęszczającej

e/ Wzmacnianie podłoża i posadowień metodą dogęszczającej iniekcji zbrojonej.

W literaturze przedmiotu metoda wzmacniania podłoża gruntowego metodą iniekcji dogęszczającej jest opisana jako metoda stosowana do poprawy parametrów podłoża gruntowego przez jego dogęszczenie. Efekt dogęszczenia uzyskuje się metodami iniekcyjnymi a zatem, dogęszczenie gruntu odbywa się przez oddziaływanie ciśnieniem hydraulicznym na grunt. Jest to metoda szczególnie przydatna w przypadkach, kiedy rozluźnienie struktury gruntu ma charakter lokalny spowodowany przyległymi wykopami lub w następstwie awarii sieci wodno-kanalizacyjnych.

Efekt zabiegu dogęszczenia można weryfikować przez sondowanie gruntu. W przypadku niewielkich obciążeń metoda iniekcji dogęszczającej może być wspomagana przez pozostawienie w podłożu rurek iniekcyjnych jako formy zminiaturyzowanych mikropali. Jest to zabieg, który w określonych przypadkach daje wyższy poziom pewności niż sama iniekcja dogęszczająca.

Przykładem zaczerpniętym z praktyki inżynierskiej autora może być zabieg zabezpieczania rozdzielni elektrycznej i transformatora w zespole zabudowy Teatru Starego w Krakowie oraz planowane zabiegi wzmocnienia posadowień fundamentów baraków na terenie obozu Auschwitz- Birkenau. W przypadku typowych baraków murowanych obozu Birkenau łączne obciążenie spływające na jeden metr bieżący lawy murowanej lub betonowej nie przekraczają wartości 16,0 kN/mb. Przy istniejącej konstrukcji ścian podłużnych i szczytowych nie jest możliwe zastosowanie podbicia, ponieważ nie pozwala na to zbyt niska sztywność ścian i niska sztywność przestrzenna budynku. Zastosowanie innych, opisanych powyżej metod byłoby w takim przypadku nieracjonalne a ponadto skutkowałoby uszkodzeniami związanymi z wierceniem otworów o relatywnie dużej średnicy i skalą ingerencji w oryginalne elementy budynku. W przypadku iniekcji zbrojonej wiercone otwory w przekroju fundamentu i w gruncie nie przekraczają z reguły średnicy o granicach 36÷50 mm.

5. Podsumowanie.

Problem oceny i wzmacniania posadowień budynków z fundamentami murowanymi stanowi jedno z często występujących zagadnień wynikających z prac adaptacyjnych w istniejących budynkach bądź też często jako skutek ujawnienia wad ukrytych w następstwie badań związanych z okresową oceną stanu technicznego budynku.

Do charakterystycznych cech tego typu fundamentów należy zaliczyć niską sztywność giętną ław fundamentowych oraz duży stopień zróżnicowania spójności struktury muru tworzącego przekrój umownie wyodrębnionego fundamentu.

Doświadczenia praktyczne związane z realizacją projektów obejmujących odnowę, konserwację i modernizację budynków istniejących wskazują na częste stosowanie tradycyjnych podbić jako metody, którą można realizować bez konieczności stosowania skomplikowanych urządzeń. Pomimo swojej prostoty jest to metoda zabezpieczenia posadowień związana z wysokim ryzykiem nieuniknionych uszkodzeń budynku [3].

Zastosowanie współczesnych technologii do stabilizacji posadowień otwiera nowe możliwości przy ich modernizacji zawierającej między innymi tworzenie nowych kubatur użytkowych zagłębionych pod fundamentami istniejącego budynku. W zależności od potrzeb użytkowych mogą być w tym celu wykorzystane technologie mikropali oraz technologie oparte na formowaniu kolumn gruntobetonowych metodą iniekcji strumieniowej. Znane są również przykłady realizacji pogłębień do głębokości nawet 12 m realizowanych metodą ręcznego podbijania.

Na podstawie przeprowadzonych analiz i systematyki rozwiązań wzmocnienia fundamentów murowych można stwierdzić, że w zakresie metod wzmocnienia można mówić o podobieństwie i analogii do metod stosowanych przy fundamentach współczesnych formowanych z betonu zbrojonego. Podstawowe różnice to na ogół duże zmiany parametrów podłoża gruntowego spowodowane działalnością człowieka i czynnika czasu oraz niska sztywność giętna i niska wytrzymałość dolnych pasm ścian spełniających rolę fundamentu.

Literatura

- [1]. Bereza W. Zastosowanie płyt dennych w obiektach istniejących. Nowoczesne technologie w budownictwie. Konferencja Instytutu Projektowania Budowlanego. Kraków 2007.
- [2]. Boryczko M, Karczmarczyk S. Ocena i zabezpieczanie posadowień budynków historycznych. XXIV Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji Wisła 2009 .
- [3]. Boryczko M, Karczmarczyk S. Podbijanie fundamentów budynków zabytkowych. Analiza nieuniknionych odkształceń. XXVIII Ogólnopolska Konferencja WPPK. Wisła 2013.
- [4]. Grubski L. Fundamentowanie budowli zabytkowych na przykładach krakowskich. Praca doktorska Kraków 1966- Biblioteka Główna Politechniki Krakowskiej.
- [5]. Herla Ivo, History of geotechnical engineering TU Dresden 2004
- [6]. Karczmarczyk S. Wzmacnianie fundamentów w budynkach zabytkowych. XX Ogólnopolska Konferencja Warsztat Pracy projektanta Konstrukcji Wisła – Ustroń 2005.

[7]. Karczmarczyk S. Bereza W. Sukiennice – Problemy ochrony badań i modernizacji. Kliczków 2007.

[8]. Kawecki J. Diagnostyka dynamiczna konstrukcji zagłębionych w gruncie. XX Konferencja WPPK, Wisła – Ustroń 2005.

[9]. Meyer Z. Obliczenia inżynierskie osiadania fundamentów . Szczecin 2012.

[10]. Monografia. XX Regionalne Problemy Inżynierii Środowiska. Szczecin 2012. Praca zbiorowa.

[11]. Praca zbiorowa. Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke. Universität Karlsruhe 1985,

[12]. Praca zbiorowa. Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke. Universität Karlsruhe 1986,

[13]. Skempton A.W. Landmarks in early soil mechanics. In: Proc .7 th Eur.Conf.SoilMech Brighton 1979, 5 Bd, s.1-26.

[14]. Żmudziński Z, Karczmarczyk S, Underpinning of the historic building of J. Slowacki theatre in Cracow. Konferencja Geotechnical Engineering for the Preservation of Monuments and Historic Sites. Napoli 1995.Wydawnictwo zbiorowe.