ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2003
Seria: BUDOWNICTWO z. 97 Nr kol. 1573

Mirosław BUKOWSKI, Bogdan RYMSZA
Politechnika Warszawska

# OBLICZANIE TECHNOLOGICZNYCH OSIADAŃ ISTNIEJĄCYCH FUNDAMENTÓW PRZY WZMACNIANIU PODŁOŻA INIEKCJĄ STRUMIENIOWĄ

**Streszczenie.** W referacie omawia się zagadnienie wyznaczania osiadań fundamentu, jakie wystąpią przy wzmacnianiu podłoża metodą iniekcji strumieniowej. Analizując różne schematy obliczeniowe, zwraca się uwagę na pewne metodyczne błędy przy ich stosowaniu. Modyfikując schemat fundamentu zastępczego, przedstawia się algorytm obliczeniowy, w którym przewidywane osiadania są determinowane przyrostem naprężeń w gruncie poniżej podstawy kolumn iniekcyjnych.

# COMPUTATION OF THE TECHNOLOGICAL FOUNDATION SETTLEMENT DUE TO SUBSOIL REINFORCEMENT BY JET GROUTING METHOD

**Summary.** Determination of the foundation settlement caused by Jet Grouting process of subsoil reinforcing is discussed in the paper. Various computation models are analyzed and some methodical errors in the application are pointed out. The computation algorithm is presented with a modification of a substitute foundation scheme, where anticipated settlements should be treated as a result of stress increase under the base of injected columns.

## 1. Wstęp

W warunkach miejskich nowe budynki są często lokalizowane w rejonie istniejącej zabudowy, przy „ostrych" granicach działki w terenie. Ponieważ z reguły są one głęboko posadawiane, m.in. w celu wygospodarowania podziemnych garaży, przy ich projektowaniu należy zwracać szczególną uwagę na bezpieczeństwo robót, w tym zachowanie właściwego stanu sąsiadujących i na ogół płycej posadowionych budowli. Zazwyczaj implikuje to konieczność odpowiedniego wzmocnienia podłoża pod ścianami zewnętrznymi przyległych budynków, jak również wymaga oszacowania ich przewidywanych osiadań.

Wzmacnianie podłoża pod fundamentami istniejących budynków coraz częściej wykonuje się metodą wysokociśnieniowej iniekcji strumieniowej (Jet Grouting – ang., dalej JG) [1, 2]. Zależnie od warunków i strefy zeskalania, iniekcję przeprowadza się w systemie:

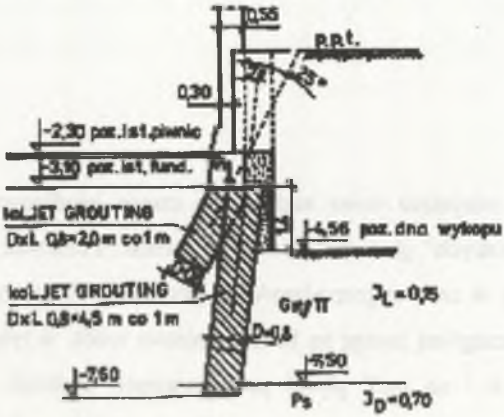
- pojedynczym (jednomediowym) – w którym odspajanie i cementację gruntu uzyskuje się za pomocą wysokoenergetycznego strumienia zaczynu cementowego;
- podwójnym (dwumediowym) – stosując dodatkowo sprężone powietrze lub strumień wody,
- potrójnym (trójmediowym) – stosując przy odspajaniu gruntu strumień ciśnieniowy wody wspomagany sprężonym powietrzem, a dla zeskalenia strumień zaczynu.

Przewidywane osiadania zabezpieczanych fundamentów wyznacza się różnymi metodami [3, 5]. Schematy obliczeniowe nie uwzględniają jednak uwarunkowań technologicznych metody JG, a mają one istotny wpływ na wartość i rozkład odkształceń podłoża [1]. Zagadnienie prognozowania osiadań fundamentów, jakie występują na skutek wzmacniania podłoża metodą iniekcji strumieniowej, jest przedmiotem niniejszego referatu.

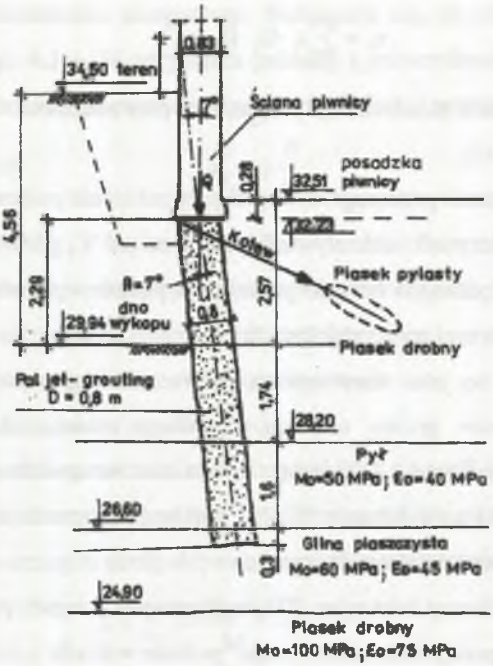
## 2. Stosowane schematy obliczeniowe

### 2.1. Przykłady wzmacniania podłoża i metody prognozowania osiadań

Przy wzmacnianiu podłoża metodą JG, pod ławami fundamentowymi ścian narażonych na spękania najczęściej wykonuje się kolumny iniekcyjne lub ciągłą palisadę. Ze względu na




Rys. 1. Przykład wzmocnienia podłoża metodą JG z zastosowaniem ukośnych kolumn palowych
Fig. 1. Example of ground reinforcement by the battered JG – columns




Rys. 2. Palisada iniekcyjna wzmocniona systemem kotwi gruntowych
Fig. 2. Injected JG – wall reinforced by soil anchor system

konieczność ukosowania kolumn lub ścian iniekcyjnych (uwarunkowanie technologiczne) oraz mając na uwadze niezrównoważony stan parcia gruntu w późniejszej fazie wykonywania wykopu (zwiększony napór gruntu na palisadę od strony istniejącego budynku), w praktyce wykonuje się dodatkowe pale ukośne (rys. 1) lub kotwie gruntowe (rys. 2).

Przy prognozowaniu osiadań fundamentu, jakie nastąpią w fazie wzmacniania podłoża na skutek zmiany warunków posadowienia, stosuje się różne schematy obliczeniowe, gdzie trzy przykładowe przedstawiono na rys. 3.

a) Osiadanie grupy pali (rys. 3a)

Kolumny iniekcyjne traktuje się jako pale przejmujące obciążenia

$$Q_i = Q\ r \tag{1}$$

gdzie: Q - obciążenie przekazywane przez ławę [kN/m],

r - osiowy rozstaw pali [m].

Osiadanie dowolnego pala ($s_i$) przy uwzględnieniu współpracy grupy pali ($j = 1 \div k$, $j \neq i$) wyznacza się według normy PN [4] (tamże, p. 4.5a – wzór 21), które przy założeniu Q = const, r = const i niezmienności warunków gruntowych wzdłuż ławy otrzymuje postać

$$s_i = \sum_{j=1}^{k} s_1 \cdot Q_i \cdot \left(1 + \alpha_{ij}^{*}\right) \tag{2}$$

gdzie: $s_1$ - osiadanie pojedynczego pala $s_{1i} = s_{1j}$ przy obciążeniu $Q_1 = 1$ (PN [4], tamże wzór 16),

$Q_i$ - obciążenie poszczególnych pali przy założeniu podatności ławy,

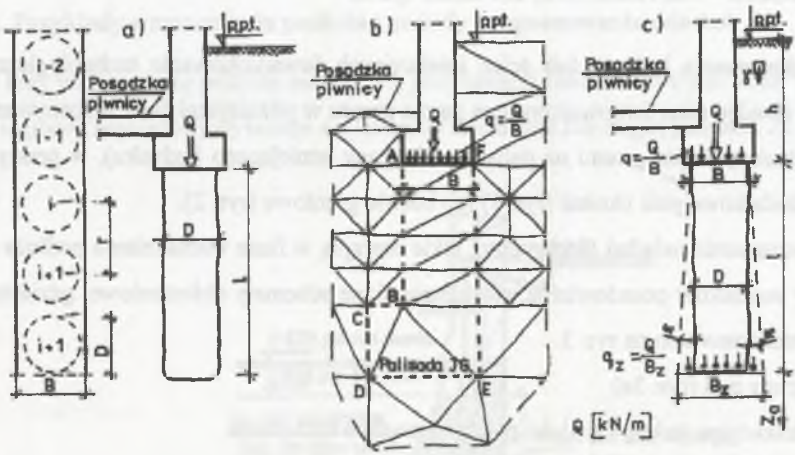
$\alpha_{ij}^{*}$ - współczynnik oddziaływania pala 'j' na pal 'i', gdzie szczegółowe wskazania uwzględniające warunki gruntowe są podane w normie PN [4][1].

b) Osiadanie półprzestrzeni sprężystej (rys. 3b)

Podłoże traktuje się jako warstwowaną półprzestrzeń sprężystą, różnicując parametry poszczególnych warstw gruntu oraz iniektowanego rdzenia ABCDEF o zmienionej charakterystyce materiałowej. Zakładając w analizie komputerowej niezmienność stanu obciążenia ławy przed i po wykonaniu iniekcji, osiadania wyznacza się metodą MES.

c) Osiadania fundamentu zastępczego (rys. 3c)

Przyjmując, że kolumny iniekcyjne JG – wykonywane z reguły przy rozstawie D<r<2,5D lub r ≈ D (palisada) – praktycznie „usztywniają" podłoże w strefie l, osiadanie ławy wyznacza




Rys. 3. Schematy obliczeniowe przy prognozowaniu osiadań fundamentu wywołanych wykonaniem kolumn iniekcyjnych: a – grupa pali, b – warstwowane podłoże sprężyste w ujęciu MES, c – fundament zastępczy

Fig. 3. Computation schemes used in determination of the anticipated foundation settlement caused by the JG – columns: a – pile group, b – elastic layer subsoil according to MES, c – substitute foundation

1) W cytowanej normie współczynnik ten niezbyt szczęśliwie oznaczono $\alpha_{ij}^{0}$, co może mylnie sugerować wykładnik n = 0, a zatem $\alpha_{ij}^{0} = 1$.

się według schematu fundamentu zastępczego. Nadmienia się, że schemat ten dopuszcza norma PN [4] (tamże, p. 4.5c). W przypadku palisady i jednorodności gruntu w strefie l, naprężenia zastępcze w umownym poziomie posadowienia (h + l) przyjmuje się równe:

- obliczając osiadanie ławy $$q_z = q\frac{B}{B_z} \tag{3a}$$

- analizując stan naprężenia $$\sigma_z = q_z + \gamma \cdot l \tag{3b}$$

gdzie: q = Q : B - naprężenia przekazywane przez ławę przed iniekcją,

$B_z = D+2ltg\alpha$ - szerokość fundamentu zastępczego,

$\gamma$ - ciężar objętościowy gruntu/gruntobetonu ($\gamma_g \approx \gamma_{gb}$);

pozostałe oznaczenia, jak na rys. 3c.

Osiadania podłoża pod fundamentem zastępczym oblicza się według klasycznych wzorów podawanych w literaturze i w normie, m.in. [3, 5]. Przy metodzie naprężeniowej, określając ściśliwość warstw „i" tworzących strefę aktywną $z_a$, osiadania przyjmuje się

$$s = \sum_{(z_a)} \frac{\sigma_{vi}(q_z, \eta_i) \cdot h_i}{M_{oi}} \tag{4}$$

gdzie: $\sigma_{vi}$ - wartość średnich naprężeń w warstwie „i", wywołanych naciskiem pasmowym $q_z$,

$h_i$ - miąższość warstwy,

$M_{oi}$ - edometryczny moduł ściśliwości pierwotnej,

$z_a$ - strefa aktywna przy posadowieniu głębokim [5].

Przy metodzie odkształceniowej, przyjmując sprężysty model gruntu, osiadania określa wzór

$$s = \frac{\omega \cdot q_z \cdot B_z \cdot (1 - \nu^2)}{E_0} \tag{5}$$

gdzie: $\omega$ - współczynnik wpływu przy fundamencie pasmowym,

$\nu$ - współczynnik Poissona,

$E_0$ - moduł odkształcenia pierwotnego,

$q_z$, $B_z$ - wielkości objaśnione przy wzorze (3).

Naświetlone tu schematy obliczeniowe były stosowane przy prognozowaniu osiadań palisady (rys. 2), której wykonanie było przedmiotem przetargu. W ofertach przetargowych, rozpatrując odkształcenia wzmacnianej ławy w fazie wykopu (rys. 2 – rzędna „29,94"), oszacowano je następująco (pomija się powołania źródłowe identyfikujące oferentów):

$s_a$ = 8,2 mm – schemat palowy (rys. 3a),

$s_b$ = 7,7÷8,7 mm – symulacja komputerowa MES (rys. 3b – osiadania krawędziowe),

$s_c$ = 6,2; 7,8 mm – fundament zastępczy (rys. 3c), gdzie osiadania obliczono odpowiednio: metodą naprężeniową $s_{c1}$ (4) i metodą odkształceniową $s_{c2}$ (5).

Zwraca się uwagę, że rozpatrywany tu przypadek (rys. 2) dotyczy palisady „JG", wykonywanej przy mocnych gruntach w podłożu i stosunkowo małych obciążeniach ławy.

## 2.2. Analiza schematów obliczeniowych

Zestawienie wartości $s_a$, $s_b$, $s_c$ (p. 2.1) mogłoby sugerować dużą precyzję szacowania przewidywanych osiadań. Zwraca się jednak uwagę, że oceniając dokładność metod obliczeniowych, jako kryterium porównawcze należy przyjmować bazę ustaleń empirycznych – w tym przypadku pomiary rzeczywistych osiadań. Te zaś przeciętnie są o 30÷50% mniejsze od wartości obliczeniowych, gdzie dla analizowanego tu przypadku (rys. 2) pomierzone później wartości osiadań ławy wynosiły 4÷5 mm. Wynika stąd wniosek, że schematy obliczeniowe „a, b, c" zawierają pewien metodyczny błąd założeń.

W schematach obliczeniowych (p. 2.1a,b,c – rys. 3), przy wyznaczaniu osiadań, jakie nastąpią na skutek wykonania kolumn iniekcyjnych lub palisady „JG", przyjmowano istniejące obciążenia całkowite ławy (Q). Tym samym nie uwzględniano konsolidacji podłoża przy dotychczasowym nacisku q = Q:B, działającym przez wiele lat. Przy przyjęciu tych obciążeń pomija się więc uwarunkowania technologiczne, zakładając niejako, że budowa (istniejącego) obiektu następuje po wykonaniu iniekcji „JG". Wyznaczane w ten sposób osiadania należy traktować jako oszacowanie górne ($s_{max}$). Drugi skrajny przypadek, to bezinwazyjne wzmocnienie podłoża pod wykonaną budowlą, „zamrażające" istniejący stan odkształcenia (chemizacja, pale wciskane itp.). Przy tej technologii i Q = const nie byłoby osiadań w fazie wzmacniania podłoża ($s_{min}$ = 0); osiadania wzmocnionego podłoża następowałyby w wyniku zmiany stanu obciążenia, na przykład nadbudowy lub wykonania w bezpośrednim sąsiedztwie nowych budowli.

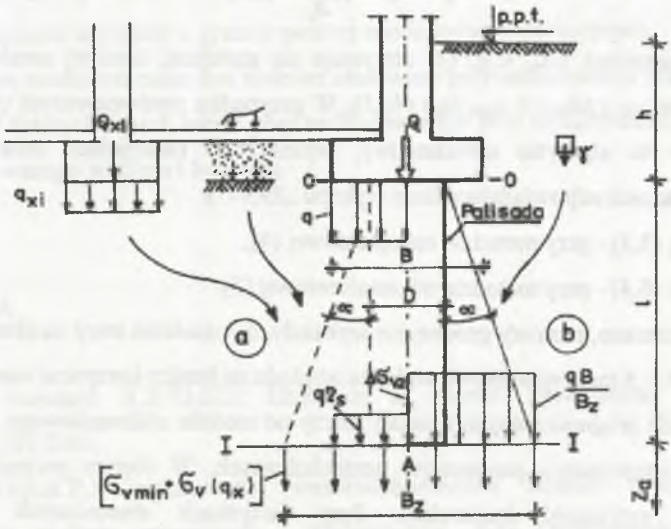
Przy wzmacnianiu podłoża metodą JG występuje przypadek pośredni, gdzie warunki technologiczne determinują osiadania $0 < s_{JG} < s_{max}(Q)$. Zwraca się bowiem uwagę, że jakkolwiek kolumny iniekcyjne czy palisada są wykonywane „inwazyjnie", to prace są prowadzone odcinkami. Przekazanie działających obciążeń na nowy ustrój fundamentowy następuje tu stopniowo, gdzie każdy segment iniekcji można traktować jako miejscową

wymianę gruntu na praktycznie sztywne kolumny bądź ścianę palową. Kolumny te są włączane do pracy po związaniu iniektu, gdy przystępuje się do „podbudowy" kolejnego odcinka ławy.

## 3. Proponowany algorytm obliczeniowy

Uwzględniając uwagi podane w p. 2.2, przy prognozowaniu osiadań technologicznych ($s_{JG}$) proponuje się przyjmować model obliczeniowy podany na rys. 4, który jest inżynierską modyfikacją schematu fundamentu zastępczego (rys. 3c). Istotą zróżnicowania jest założenie, że osiadania ławy $s_{JG}$, jakie wystąpią przy wykonywaniu kolumn iniekcyjnych lub palisady „JG" (zmieniających warunki posadowienia), są wynikiem ściśliwości / odkształceń podłoża w strefie $z_a$ pod wpływem następującego tam przyrostu naprężeń.

Przed przystąpieniem do iniekcji – zakładając, że proces konsolidacji podłoża jest zakończony – pionowe naprężenia całkowite na głębokości (h + l) wyznaczającej poziom I-I wynoszą (rys. 4a – umowny punkt odniesienia „A")




Rys. 4. Model obliczeniowy przy wyznaczaniu osiadań technologicznych $s_{JG}$: a – stan naprężenia przed wzmocnieniem podłoża, b – transformacja naprężeń po wykonaniu palisady

Fig. 4. Computation model for determination of the technological settlement $s_{JG}$: a – stress state prior to subsoil stabilization, b – stress transformation after construction the JG – wall

$$\sigma_{vt} = \sigma_{v\,min} + \sigma_v(q_x) + q\eta_s \tag{6}$$

gdzie: $\sigma_{vmin} = \gamma(h+l) - \gamma h\eta_{mA}$ – naprężenia minimalne w fazie dawnego wykopu dla budynku istniejącego przy wynikowym współczynniku odciążenia $\eta_{mA}$,

$\eta_s$ - współczynnik przekazywania naprężeń (q) w odniesieniu do sztywnej ławy,

$\sigma_v(q_x) = \sum q_{xi}\eta_{iA}$ - naprężenia w p.A wywołane przez sąsiednie fundamenty,

$\gamma$,h,l,q - wielkości objaśnione na rys. 4.

Zakłada się, że po wykonaniu iniekcji obciążenia ławy qB = Q są przekazywane na kolumny bądź palisadę, co zmienia model transmisji nacisku w głąb podłoża (rys. 4b). Pomijając zróżnicowania ciężaru objętościowego gruntu/gruntobetonu ($\gamma$), naprężenia całkowite w poziomie fundamentu zastępczego I-I określa wyrażenie

$$\sigma_{vz} = \sigma_{v\,min} + \sigma_v(q_z) + \frac{qB}{B_z} \tag{7}$$

gdzie: $B_z = D + 2l\mathrm{tg}\alpha$ - szerokość fundamentu zastępczego (zapis dotyczący palisady), pozostałe oznaczenia, jak wyżej (6).

Przyrost naprężeń, powodujący dodatkową konsolidację podłoża ($z_a$) na skutek zmiany warunków posadowienia ławy - wynosi

$$\Delta\sigma_{vz} = \sigma_{vz} - \sigma_{vt} = q(\frac{B}{B_z} - \eta_s). \tag{8}$$

Przy relacji naprężeń $\Delta\sigma_{vz} < q_z$ (3) otrzymuje się mniejsze, bardziej urealnione osiadania technologiczne $s_{JG}$ ($\Delta\sigma_{vz}$) < $s_{max}$ ($q_z$) (4; 5). W przypadku porównawczym (rys. 2), stosując proponowany tu algorytm obliczeniowy, wyznaczono następujące osiadania ławy (w nawiasach wartości odpowiadające fazie wykopu „29,94"):

$s_{JG}$ = 3,5 mm; (5,3) - przy metodzie naprężeniowej (4),

$s_{JG}$ = 4,6 mm; (6,4) - przy metodzie odkształceniowej (5).

Jak wspomniano, pomiary geodezyjne wykazały, że osiadania ławy na skutek iniekcji były w granicach 4 ÷ 5 mm; stosunkowo małe, ze względu na bardzo korzystne warunki gruntowe.

Dokładność prognozowanych osiadań zależy od modelu obliczeniowego, jak również od dokładności rozpoznania parametrów geotechnicznych. W danym przypadku należy też uwzględniać sztywność konstrukcji. Przy budynkach murowanych bez wieńców przystropowych można zakładać wiotkość konstrukcji. W przypadku zaś usztywnionych (np. z wieńcami żelbetowymi), ze względu na przestrzenną współpracę konstrukcji, prognozowane osiadania $s_{JG}$ należy zmniejszyć o ok. 25% w stosunku do wartości obliczeniowych.

## 4. Wnioski

Z przedstawionych rozważań wynikają następujące wnioski:

- Przy wzmacnianiu fundamentów metodą iniekcji strumieniowej należy mieć na uwadze osiadania, jakie wystąpią w fazie formowania kolumn i dalszej konsolidacji podłoża wynikającej ze zmiany posadowienia. Znajomość tych osiadań, zwłaszcza przy słabym podłożu, jest niezbędna dla przeprowadzenia analizy stanu użytkowania budowli i ewentualnego zabezpieczenia konstrukcji nadziemnej.
- Przy prognozowaniu osiadań roboczych należy uwzględniać konsolidację podłoża przy dotychczasowych naciskach oraz uwarunkowania technologiczne i statyczne: odcinkowe wykonywanie iniekcji, sztywność własną fundamentu i współpracę przestrzenną konstrukcji. Wyznaczanie tych osiadań jako pierwotnych skutków działania istniejących obciążeń na nowy ustrój fundamentowy niezależnie od schematu obliczeniowego jest niewłaściwe.
- Zaproponowany w referacie algorytm obliczeniowy pozwala urealnić wartości prognozowanych osiadań fundamentu, gdyż w założeniach:
  - uwzględnia lokalną redystrybucję naprężeń, jaka występuje w podłożu przy zmianie warunków posadowienia,
  - zachowuje „bazę" konsolidacji, traktując osiadania technologiczne $s_{JG}(\Delta\sigma_V)$ jako skutek przyrostu naprężeń w gruncie poniżej spodu kolumn iniekcyjnych.

Tym samym model ten może być również stosowany przy analizowaniu przyrostu osiadań fundamentu w dalszych fazach robót: przy nadbudowie lub przy wykonywaniu w sąsiedztwie nowo projektowanego wykopu i budynku.

## LITERATURA

1. European Standard ICS 93.020: Execution of special geotechnical works - Jet Grouting, CEN 2001.
2. Noga L., Kościk P.: Zastosowanie wysokociśnieniowej iniekcji strumieniowej do wzmacniania podłoża gruntowego i fundamentów, XVI Ogólnopolska Konferencja „Warsztaty pracy projektanta konstrukcji", Ustroń 2001, s.213-228.
3. PN-81/B-03020: Grunty budowlane – Posadowienie bezpośrednie budowli; PKNMiJ – Warszawa 1981.

4. PN-83/B-02482: Nośność pali i fundamentów palowych, W.Alfa, Warszawa 1984.
5. Rymsza B.: Obliczanie osiadań przy głębokim posadowieniu budowli, X Krajowa Konf. MGiF, Warszawa 1993, t.1, s.165-170.

Recenzent: Prof. zw. dr hab. inż. Zbigniew MŁYNAREK

**Abstract**

In the case of a new building founded deeply in urban areas, careful consideration should be given to adjacent structures on shallow spread footings. Because of deep excavations proper ground reinforcement under external foundations of the existing buildings is usually needed. Buttered injected columns (Fig. 1) or a injected pile–wall (Fig. 2) being constructed by Jet Grouting method (JG) are applied more and more often.

In the estimation of anticipated settlements caused by JG – process, and stress redistribution due to a new foundation system, many various computation schemes may be used (Fig. 3a,b,c). However, some methodical errors can occur in the application: the existing loading Q is usually taken into account, and soil consolidation state being induced by the previous pressure q = Q:B is neglected. In accordance with these assumptions the calculated settlement should be considered as being in the upper range ($s_{max} = s[q_z]$). Another extreme case is a non-invasive subsoil stabilization, which keeps "in-hold" the existing soil deformation state ($s_{min}=0$).

In the case of JG – columns or walls there is an intermediate state, where the technological settlement is $0 < s_{JG} < s_{max}$ (Q). For anticipation of the $s_{JG}$ value the modified computation model is proposed (Fig. 4). In this algorithm the stress increase $\Delta\sigma_{VI}$ (8) at the substitute column base I-I – treated as a result of differentiation of founding conditions – has to be determined. According to the relation $\Delta\sigma_V < q_z$ (3) the smaller settlement $s_{JG}$ ($\Delta\sigma_V$) (4; 5) is calculated, being closer to field measurement values.