

**ZESZYTY  
NAUKOWE  
POLITECHNIKI  
ŚLĄSKIEJ**

**KAZIMIERZ KŁOSEK**

**WPŁYW ODKSZTAŁCENÍ PODŁOŻA GÓRNICZEGO  
NA WSPÓŁPRACĘ PODTORZA  
Z NAWIERZCHNIĄ DRÓG KOLEJOWYCH**

**BUDOWNICTWO**

**Z. 66  
GLIWICE  
1988**

# POLITECHNIKA ŚLĄSKA

## ZESZYTY NAUKOWE

Nr 929

KAZIMIERZ KŁOSEK



### WPLYW ODKSZTAŁCEŃ PODŁOŻA GÓRNICZEGO NA WSPÓŁPRACĘ PODTORZA Z NAWIERZCHNIĄ DRÓG KOLEJOWYCH

OPINIODAWCY

Prof. dr hab. inż. Jerzy Kwiatek

Prof. dr hab. inż. Jerzy Makowski

KOLEGIUM REDAKCYJNE

REDAKTOR NACZELNY — Prof. dr hab. inż. Wiesław Gabzdyl

REDAKTOR DZIAŁU — Dr inż. Zdzisław Trojan

SEKRETARZ REDAKCJI — Mgr Elżbieta Stinzing

CZŁONKOWIE KOLEGIUM — Prof. dr hab. inż. Adolf Maciejny

— Prof. dr inż. Stanisław Malzacher

— Prof. dr hab. inż. Bronisław Skinderowicz

OPRACOWANIE REDAKCYJNE

Mgr Aleksandra Kłobuszowska

Wydano za zgodą  
Rektora Politechniki Śląskiej

PL ISSN 0434-0779

Dział Wydawnictw Politechniki Śląskiej  
ul. Kujawska 3, 44-100 Gliwice

---

Nakł. 160+85    Ark. wyd. 14,4    Ark. druk. 12,75    Papier offset. kl. III 70x100, 70g  
Oddano do druku 23.03.88    Podpis. do druku 9.05.88    Druk ukończ. w czerwcu 1988  
Zam. 254/88 L-23    Cena zł 288,—

---

Skład, fotokopie, druk i oprawę  
wykonano w Zakładzie Graficznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach

## SPIS TREŚCI

	Str.
WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ .....	9
1. WPROWADZENIE .....	13
1.1. Uwagi wstępne .....	13
1.2. Droga kolejowa, jako specyficzny typ budowli liniowej, zlokalizowanej na terenach górniczych .....	13
1.3. Cel i zakres tematyczny pracy .....	15
2. WPLYW PODZIEMNEJ EKSPLOATACJI KOPALIN NA PODTORZE KOLEJOWE .....	21
2.1. Górnicze aspekty zagadnienia .....	21
2.2. Redystrybucja składowych stanu naprężenia i odkształcenia w podtorzu. Rozważania wstępne .....	27
2.3. Awaryjność elementów składowych drogi kolejowej w warunkach deformacji podłoża górniczego .....	34
2.4. Wstępne wnioski i konkluzje .....	35
3. WSPÓLDZIAŁANIE NAWIERZCHNI KOLEJOWEJ Z PODTORZEM NA TERENACH GÓRNICZYCH W ŚWIETLE OBSERWACJI TERENOWYCH ORAZ BADAŃ MODELOWYCH .....	38
3.1. Wybrane przykłady charakterystycznych uszkodzeń nawierzchni kolejowej oraz podtorza .....	38
3.2. Zmienność cech sprężystych podłoża rusztu torowego na terenach górniczych .....	45
3.3. Ocena utraty nośności przez podtorze .....	63
3.4. Wpływ przekonsolidowania górnych warstw podtorza na rozwój stref stanu granicznego w warunkach górniczych odkształceń rozluźniających oraz zagęszczających .....	80
3.5. Badania modelowe na ośrodku analogowym typu Taylora-Schneebe- li'ego .....	92
3.6. Uwagi i wnioski końcowe .....	97
4. ANALIZA STANU NAPRĘŻENIA W PODŁOŻU RUSZTU TOROWEGO NA TERENACH GÓRNICZYCH .....	100
4.1. Problemy odwzorowania współdziałania nawierzchni z podtorzem .....	100
4.2. Pobór modelu obliczeniowego podtorza .....	104
4.3. Jednorodne podłoża rusztu torowego .....	116
4.3.1. Składowe stanu naprężenia w aktywnej strefie podtorza .....	119
4.3.2. Analiza numeryczna uzyskanych rozwiązań .....	126
4.4. Wpływ niejednorodności warstwowej podtorza na jego współpra- cę z nawierzchnią .....	129



СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ПЕРЕЧЕНЬ ВАЖНЕЙШИХ ОБОЗНАЧЕНИЙ .....	9
1. ВВЕДЕНИЕ .....	13
1.1. Вводные замечания .....	13
1.2. Железная дорога, как специфический тип линейного сооружения, расположенного в горнопромышленной местности .....	13
1.3. Цель и объем разработки .....	15
2. ВЛИЯНИЕ ПОДЗЕМНОЙ ДОБЫЧИ ИСКОПАЕМЫХ НА ЗЕМЛЯНОЕ ПОЛОТНО .....	21
2.1. Горные аспекты проблемы .....	21
2.2. Перераспределение составляющих напряжения и деформации в полотне. Вводные рассуждения .....	27
2.3. Аварийность составляющих элементов железной дороги в условиях деформации горного основания .....	34
2.4. Предварительные выводы и заключения .....	35
3. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВЕРХНЕГО СТРОЕНИЯ ПУТИ И ПОЛОТНА В ГОРНОПРОМЫШЛЕННОЙ МЕСТНОСТИ В СВЕТЕ МЕСТНЫХ НАБЛЮЖДЕНИЙ И МОДЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ ...	38
3.1. Выбранные примеры характерных повреждений верхнего строения пути и полотна .....	38
3.2. Изменчивость упругости основания полотна в горнопромышленной местности .....	45
3.3. Оценка потери несущей способности полотна .....	63
3.4. Влияние переконсолидирования верхних слоев полотна на развитие зон предельного состояния в условиях горных разрыхляющих и уплотняющих деформаций .....	80
3.5. Модельные испытания на аналоговой среде типа Тейлора-Шнебеди ..	92
3.6. Замечания и заключительные выводы .....	97
4. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В ОСНОВАНИИ ПОЛОТНА В ГОРНОПРОМЫШЛЕННОЙ МЕСТНОСТИ .....	100
4.1. Проблема представления взаимодействия верхнего строения и полотна .....	100
4.2. Подбор расчетной модели полотна .....	104
4.3. Однородное основание полотна .....	116
4.3.1. Составляющие состояния напряжения в активной зоне полотна .....	119
4.3.2. Числовой анализ полученных решений .....	126
4.4. Влияние слойной неоднородности полотна на его взаимодействие с верхним строением .....	129



## CONTENTS

	Page
LIST OF MORE IMPORTANT SYMBOLS .....	9
1. INTRODUCTION .....	13
1.1. Preliminary notes .....	13
1.2. Railroad as a peculiar type of linear structure located on mining grounds .....	13
1.3. Object and scope of the study .....	15
2. THE EFFECT OF UNDERGROUND USEFUL MINERAL EXPLOITATION ON RAILWAY SUBGRADE .....	21
2.1. Mining aspects of the problem .....	21
2.2. Re-distribution of components of stress and strain state in a subgrade. Preliminary considerations .....	27
2.3. Failure frequency of rail-way components under the conditions of mining foundation deformation .....	34
2.4. Conclusions .....	35
3. CO-OPERATION OF TRACK STRUCTURE AND SUBGRADE ON MINING GROUNDS UNDER THE FIELD OBSERVATIONS AND MODEL TESTING .....	38
3.1. Selected examples of characteristic damages to the track structure and subgrade .....	38
3.2. Variability of elastic features of foundation of track layer framework on mining grounds .....	45
3.3. Evaluation of load capacity loss in subgrade .....	63
3.4. The effect of over-consolidation of upper subgrade layers on the limiting state zones under mining ravelling and compacting strains .....	80
3.5. Model testing in analog medium of Taylor-Schneebel type .....	92
3.6. Remarks and conclusions .....	97
4. THE ANALYSIS OF STATE OF STRESS IN THE FOUNDATION OF TRACK LAYER FRAMEWORK ON MINING GROUNDS .....	100
4.1. Problems of representation of co-operation between track structures and subgrade .....	100
4.2. A selection of calculation model for subgrade .....	104
4.3. Homogenous foundation of track layer framework .....	116
4.3.1. The components of stress state in active subgrade zone .....	119
4.3.2. Numerical analysis of solutions obtained .....	126
4.4. The effect of laminar heterogeneity of subgrade on its co-operation with track structure .....	129





WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

- a, b - współrzędne bezwymiarowe (opis geometrii rusztu torowego)
- $\lambda_0$  - parametr edometrycznej krzywej dociążenia
- B - połowa szerokości podkładu
- c - spójność
- $C_s$  - strukturalna część ogólnej spójności gruntu (tzw. spójność wzmocnienia)
- C - współczynnik podatności podłoża podkładów
- $C_\xi$  - współczynnik podatności sprężystej podłoża podkładów w warunkach poziomych deformacji terenu górniczego ( $\xi \neq 0$ )
- $C_0$  - wyjściowa wartość współczynnika podatności sprężystej podłoża ( $\xi = 0$ )
- d - długość podkładu
- $e_0$  - początkowa (wyjściowa) wartość wskaźnika porowatości
- E - moduł sprężystości
- $E_g$  - moduł sprężystości gruntu
- $E_0$  - wyjściowy moduł ściśliwości ( $\xi = 0$ )
- $E_\xi$  - moduł ściśliwości gruntu w warunkach poziomych odkształceń podtorza górniczego ( $\xi \neq 0$ )
- $E(e)s$  - moduł podatności gruntu
- f - ogólne oznaczenie funkcji
- $F_0$  - powierzchnia styku nawierzchni z podłożem
- G - moduł sprężystości poprzecznej
- h - głębokość (również współczynnik doświadczalny; rozdz. 3.4)
- H - miąższość warstwy, nadkład górotworu (również -  $h_g$ ; rozdz. 2 2)
- K - krzywizna terenu górniczego
- $K_0$  - współczynnik rozporu bocznego, wartość wyjściowa ( $\xi = 0$ )
- $K_\xi$  - współczynnik rozporu bocznego w warunkach poziomych odkształceń podłoża górniczego ( $\xi \neq 0$ )

- $K_o^{rb}$  - współczynnik rozporu bocznego przy odciażaniu
- $K_o^{nc}$  - współczynnik rozporu bocznego przy obciążaniu
- $K_{max}$   
 $min$  - graniczna wartość współczynnika rozporu bocznego (również  $K_{a,b}$  - w ujęciu metody ścieżek naprężeń)
- $l$  - rozstaw osiowy podkładów
- $L$  - tensor przemieszczeń (również zastępcza długość podkładu; rozdz. 3.2)
- $m$  - współczynnik odkształcenia poprzecznego, tzw. liczba Poissona (również miąższość pokładu kopaliny; rozdz. 1)
- $M$  - moment zginający
- $p$  - obciążenie rozłożone, ciśnienie (również naprężenie średnie w ujęciu tzw. metody ścieżek naprężeń; rozdz. 3)
- $P$  - siła skupiona
- $q$  - dewiator naprężenia
- $Q$  - obciążenie przekazywane z szyny na podkład
- $r$  - promień zasięgu wpływów głównych niecki obniżeniowej (również reakcja podtorza -  $r_j(t)$ ; rozdz. 4.1)
- $\bar{s}$  - średnie odchylenie kwadratowe
- $t$  - argument funkcji podcałkowej (rozdz. 4.3), współczynnik określający niezawodność pracy podtorza (rozdz. 4.3.1), czas
- $t_g$  - naprężenia normalne wywołane ciężarem własnym rusztu torowego
- $T$  - nachylenie terenu górniczego
- $u$  - przemieszczenie poziome terenu górniczego (również ciśnienie wody w porach gruntu; rozdz. 3.3)
- $U$  - współczynnik sprężystości podparcia szyny
- $w$  - obniżenie terenu górniczego (również wilgotność gruntu; rozdz. 3.3)
- $\Sigma w$  - spójność typu wodno-koloidalnego, tzw. spójność pierwotna
- $x_i$  - współrzędne ( $i = 1, 2, 3$ )
- $X, Y, Z(w)$  - wartości podstawień funkcyjnych
- $y$  - ugięcia nawierzchni
- $\alpha_x$  - współczynnik zmienności modułu ściśliwości rozluźnianego podłoża gruntowego (górniczego)
- $\alpha_z$  - współczynnik zmienności modułu ściśliwości zagęszczanego podłoża gruntowego

- $\alpha^*$  - współczynnik ugięcia podkładu
- $\beta$  - kąt zasięgu wpływów głównych niecki obniżeniowej (również kąt nachylenia tzw. ścieżki naprężeń w układzie "p - q")
- $\beta(t)$  - współczynnik intensywności procesu deformacji terenu górniczego
- $\gamma_{ik}$  - składowa tensora odkształcenia (kątego)
- $\gamma_0$  - ciężar objętościowy gruntu
- $\delta_{ik}$  - tensor kulisty
- $\Delta$  - przyrost przemieszczenia (naprężenia)
- $\varepsilon_{ik}$  - tensor odkształcenia
- $\varepsilon_{jj}$  - wartości główne tensora odkształcenia, dla  $j = 1, 2, 3$ ; (odkształcenia główne)
- $\varepsilon_r$  - poziome odkształcenia rozluźniające podłoża górniczego
- $\varepsilon_z$  - poziome odkształcenia zagęszczające podłoża górniczego
- $\varepsilon_{kr}(gr)$  - krytyczna (graniczna) wartość odkształceń poziomych
- $\eta_i$  - współrzędne bezwymiarowe ( $i = 1, 2, 3$ )
- $\lambda$  - współczynnik rozkładu naprężeń na podkłady
- $\nu$  - współczynnik Poissona
- $\xi$  - współrzędna bezwymiarowa
- $\rho$  - stosunek odkształceń poziomych na kierunkach głównych niecki obniżeniowej
- $\sigma_{ik}$  - składowe tensora naprężeń
- $\sigma_{ij}$  - wartości główne tensora naprężeń (naprężenia główne)
- $\sigma_{ik}^{r,z}$  - tensor naprężeń w warunkach odkształceń rozluźniających (zagęszczających)
- $\sigma_j^{gr}$  - graniczna wartość naprężeń
- $\sigma_{ik}^1$  - naprężenia całkowite (wyjściowe)
- $\sigma'_{ik}$  - naprężenia efektywne
- $\sigma_0(1)$  - parametr edometrycznej krzywej odciążenia (dociążenia)
- $\tau$  - naprężenia styczne (ogólnie)
- $\phi$  - kąt tarcia wewnętrznego (również współczynnik stanu podtorza; rozdz. 4)
- $\phi(i)$  - funkcja błędu [erf(x)]
- $\psi_1$  - kierunki działania naprężeń głównych

## 1. WPROWADZENIE

### 1.1. Uwagi wstępne

Podziemna eksploatacja kopalin użytecznych, ze względów gospodarczych w pełni uzasadniona, stanowi istotny czynnik zagrażający środowisku naturalnemu człowieka. Specyficzna sytuacja polskich zagłębi węglowych sprawia, że niekorzystne procesy i zjawiska towarzyszące tej działalności potęgują się z uwagi na fakt dużej koncentracji rejonów wydobywczych przy równoczesnym - wysokim stopniu zurbanizowania powierzchni nadległego terenu. Problem tzw. szkód górniczych jest więc zjawiskiem obiektywnie i nierozzerwalnie związanym z naszym narodowym przemysłem, a miejsce szczególne zajmuje tu górnictwo węgla kamiennego [121].

Wprawdzie tereny czynne górnictwa podziemnego zajmują obszar tylko około 1,5% powierzchni kraju to jednak realizuje się tam około 25% całego polskiego budownictwa, nie wliczając w to istniejącej już - gęstej sieci starej zabudowy i dużej koncentracji zakładów przemysłowych, wydobywczych itp. (głównie w GOP-ie) [95].

Nakładająca się na powyższą infrastrukturę gęsta sieć układów komunikacyjnych - w tym budowli oraz urządzeń kolejowych (publicznych i niepublicznych), doprowadza do znacznych utrudnień w prawidłowym funkcjonowaniu przedmiotowego układu zarówno w sensie ciągłości i bezpieczeństwa jego użytkowania, jak i określonych oczekiwań społecznych [9].

### 1.2. Droga kolejowa jako specyficzny typ budowli liniowej zlokalizowanej na terenach górniczych

Problematyka budownictwa komunikacyjnego na terenach podlegających wpływowi podziemnej eksploatacji górniczej stanowi z gospodarczego i społecznego punktu widzenia ważny element składowy globalnej działalności związanej z ochroną powierzchni przed szkodami górniczymi [85, 121, 124, 138]. Szczególnie istotnym zagadnieniem jest tu ochrona ciągłości użytkowania i bezpieczeństwo eksploatacji obiektów i urządzeń budownictwa kolejowego, głównie zaś nawierzchni oraz podtorza. To ostatnie, podlegając wpływowi intensywnych oddziaływań eksploatacyjnych przekazywanych poprzez tabor na nawierzchnię i współpracujące z nim podłoże gruntowe [70, 135, 160], jest poddawane w warunkach deformacji terenu górniczego dodatkowym odkształceniom charakterystycznym dla wpływów podziemnej eksploatacji kopalni.

Parametry geometryczne linii kolejowych w planie i podstawowe cechy konstrukcyjno-wytrzymałościowe nawierzchni sprawiają, iż z punktu widzenia klasyfikacji obiektów budowlanych na terenach górniczych są one zaliczane do grupy budowli liniowych, obok takich urządzeń i budowli jak np. rurociągi, gazociągi, kolektory, kanały, tunele, przepusty, wieloprzesłowe estakady, sieci napowietrzne itp. [12].

Wobec stosunkowo małej sztywności giętej EJ oraz pewnej - określonej sztywności wzdłużnej EA, problem ochrony tego rodzaju obiektów przed wpływami szkód górniczych jest w chwili obecnej sprowadzany z reguły do ich zabezpieczania na dodatkowe siły osiowe, powstające w strefie styku układu "konstrukcja - grunt", jako efekt tarcia deformującego się podłoża względem pasywnie współpracującej z nim budowli liniowej [161, 162, 163]. Dla obiektów liniowych zagłębionych w gruncie istotnym czynnikiem sprzyjającym mobilizacji dodatkowych naprężeń wewnętrznych jest ukształtowanie budowli w planie (załomy i odgałęzienia sieci) i jej usytuowanie wobec składowych deformacji podłoża gruntowego [112]. W przypadku ukośnego położenia osi obiektu liniowego względem prostoliniowego frontu eksploatacji uwzględnia się tu dodatkowo wpływ skręcania budowli (jako efekt tzw. torsji geodezyjnej powierzchni terenu), jej zginanie w płaszczyźnie poziomej (od składowej poprzecznej przemieszczeń poziomych [162]) oraz w płaszczyźnie pionowej, z tytułu działania krzywizny terenu górniczego [112].

Z teoretycznego punktu widzenia zagadnienie sprowadza się wówczas w swej istocie do rozwiązania równania różniczkowego dla odkształceń (podłużnych) powstających w strefie krawędziowej górniczej niecki obniżeniowej. Uwzględnienie odpowiednich warunków brzegowych oraz granicznych prowadzi do wyodrębnienia szeregu schematów statycznych zagadnienia, co znalazło, jak dotąd najpełniejszy wyraz w licznych pracach W. Szumierza [161, 162, 163].

W przedmiotowym ujęciu głównym czynnikiem determinującym charakter i intensywność oddziaływania terenu górniczego na budowle liniowe jest grupa podstawowych składowych deformacji powierzchni, wśród których kluczową rolę odgrywają przemieszczenia poziome u.

Jak dotąd, zagadnieniem znacznie słabiej rozeznany i w zasadzie wciąż otwartym - choć z praktycznego punktu widzenia niezwykle ważnym (mającym bez wątpienia decydujący wpływ na warunki pracy całej nawierzchni drogi kolejowej zlokalizowanej w rejonie oddziaływań podziemnej eksploatacji górniczej) - pozostaje ocena wpływu deformacji terenu górniczego na bezpośrednie podłoże rusztu torowego i całe podtorze gruntowe. Wyłania się tu wiele zagadnień badawczo-poznawczych [93] (związanych nie tylko z problemami terenów górniczych [42]), cechujących się zarazem pewną odrębnością w stosunku do "klasycznego" podłoża budowli, co w głównej mierze wynika z funkcjonalnych i użytkowych cech tego rodzaju budowli liniowej [49]. Analiza tych zagadnień stanowi treść przedmiotowej pracy.

### 1.3. Cel i zakres tematyczny pracy

Głównym celem pracy jest doświadczalne rozeznanie, fizykalna interpretacja oraz analityczny zapis istoty destrukcyjnych zjawisk towarzyszących współdziałaniu nawierzchni drogi kolejowej z podtorzem w warunkach oddziaływania wpływów podziemnej eksploatacji kopalni.

Tak sformułowany cel główny pracy został następnie rozdzielony na dwie zasadnicze grupy o charakterze celów cząstkowych. Pierwsza z nich obejmowała rejestrację terenową oraz weryfikację doświadczalną procesów implikujących w możną awaryjność elementów składowych drogi kolejowej zlokalizowanej na terenach górniczych.

W grupie tej można wyodrębnić następujące cele:

- Określenie głównych geomechanicznych czynników determinujących specyfikę współdziałania układu: nawierzchnia - podtorze, różniących zasadniczo wspomniany układ w stosunku do interpretacji oddziaływań uznawanych za typowe dla dróg kolejowych zlokalizowanych poza obszarami górniczymi.
- Analiza kinematyczna zjawisk towarzyszących współpracy nawierzchni z podłożem górniczym ze szczególnym wyodrębnieniem czynników decydujących o istocie destrukcyjnych procesów zachodzących w podtorzu, głównie zaś w jego przypowierzchniowej strefie oraz nawierzchni.
- Ocena fluktuacji charakterystyk wytrzymałościowych podłoża górniczego i ich związku z realną oceną nośności podtorza oraz tendencją do mobilizacji stanów granicznych w jego górnych - przekonsolidowanych warstwach, poszerzona o próbę weryfikacji rzeczywistej zmienności sprężystych cech podłoża rusztu torowego w zależności od charakteru deformacji terenu górniczego.

Grupa druga związana jest ze sferą dociekań o charakterze teoretycznym i dotyczy rozważań zmierzających do sformułowania analitycznego zapisu dla procesów redystrybucji składowych stanu naprężenia w nawierzchni i podtorzu w związku z ich lokalizacją na obszarach podlegających wpływom intensywnych - wieloparametrowych deformacji terenu górniczego.

Do zasadniczych celów cząstkowych tej grupy należy zaliczyć:

- Sprecyzowanie ogólnych warunków redystrybucji składowych stanu odkształcenia i naprężenia w podtorzu na terenach górniczych.
- Kreację modeli obliczeniowych nawierzchni oraz podłoża konwencjonalnego rusztu torowego uwzględniających dyskretny charakter współdziałania obu wymienionych uprzednio elementów składowych drogi kolejowej. Wśród problemów związanych z odwzorowaniem interakcji układu: nawierzchnia - podtorze za szczególnie istotny element uznano adekwatność zapisu analitycznego oraz możliwość jednoznacznej identyfikacji fizykalnych aspektów procesu deformacji terenu górniczego (przede wszystkim poziomych odkształceń podłoża  $\xi$ ) z mobilizacją dodatkowych oddziaływań kontaktowych oraz zmianami reakcji wewnętrznych w samej nawierzchni.

- Analizę numeryczną rekomendowanego - fenomenologicznego analogu podtorza w warunkach jego hipotetycznej jednorodności oraz dla przypadku fizykallyj (realnej) niejednorodności megaskopowej górnych stref podłoża rusztu torowego.

Przedmiotem rozważań w niniejszej pracy jest więc próba identyfikacji, kontroli i opisu zjawisk stanowiących o istocie wpływów deformacji podłoża górniczego na warunki pracy podtorza kolejowego ze szczególnym uwzględnieniem zmienności cech charakteryzujących w tych specyficznych warunkach proces współdziałania nawierzchni z podłożem. Uznając aktywność deformacji przypowierzchniowej strefy górotworu za główny czynnik sprawczy wielu niekorzystnych zjawisk rzutuujących w sposób zdecydowany na techniczną sprawność, ciągłość i bezpieczeństwo eksploatacji dróg kolejowych, podjęto w pracy próbę uchwycenia zasadniczych przejawów oraz form degradacji stanu technicznego podtorza (a w pewnej mierze i nawierzchni) celem stworzenia teoretyczno-eksperymentalnych podstaw efektywnego przeciwstawienia się wspomnianym uprzednio przeobrażeniom warunków współdziałania głównych elementów składowych drogi kolejowej.

W przedmiotowym ujęciu zakres tematyczny pracy obejmuje zarówno wybrane problemy geotechniczne terenów górniczych, jak i elementy związane z globalną ochroną zlokalizowanych tam budowli komunikacyjnych.

Zasadnicze rozważania teoretyczne zawarte we wstępnej części pracy są związane z próbą analitycznego zapisu podstawowego parametru identyfikacyjnego podłoża górniczego, którą to rolę przypisano współczynnikowi rozporu bocznego  $K_C$ . Zapis określający wartość tego współczynnika zezwala na oszacowanie charakteru jego zmian między innymi w funkcji podstawowych parametrów deformacji terenu górniczego, za jakie uznano tu poziome odkształcenia różniące  $\epsilon_x$  lub zagęszczające  $\epsilon_z$ .

Analiza dotychczasowych adaptacji, jak i ocena przydatności niektórych stosowanych dotąd fenomenologicznych (kontynualnych) modeli podtorza kolejowego skłoniła autora do podjęcia próby kreacji modelu podłoża rusztu torowego na bazie podejścia dyskretnego (strukturalnego). W ramach probabilistycznego nurtu tego ujęcia mieści się koncepcja Kandaurowa-Mullera, zgodnie z którą można formułować oraz rozwiązywać wiele zagadnień związanych z geomechaniką podtorza kolejowego, a więc i wbudowanych tam ośrodków ziarnistych o cechach rozporowych. Wprowadzenie do podstawowego układu równań różniczkowych tejszej teorii zapisanych dla składowych stanu naprężenia<sup>1</sup> zmiennej wartości identyfikatora geotechnicznych cech ośrodków ziarnistego  $K_C$ , jak i prognozowanych jego zmian, przede wszystkim w funkcji odkształceń górnich  $\epsilon$ , doprowadziło do osiągnięcia sformułowanego na wstępie celu.

<sup>1</sup>Wobec jednoznacznie określonych warunków początkowo-brzegowych oraz granicznych zagadnienia, jak i przyjętej hipotezy o charakterze oddziaływań kontaktowych w strefie styku elementów układu "nawierzchnia - podtorze"



Przedmiotową pracę tworzą cztery zasadnicze rozdziały. Po wstępie charakteryzującym całościowo problematyki ochrony powierzchni (w tym i budownictwa komunikacyjnego) w warunkach oddziaływania podziemnej eksploatacji górniczej, w rozdziale drugim rozpatrzono zagadnienia związane z wpływem tego czynnika na podtorze kolejowe. Omówiono podstawowe górniczo-budowlane aspekty zjawisk związanych z ogólnym przegrupowaniem składowych stanu odkształcenia oraz naprężenia w deformującym się podłożu. W związku, tensorowej formie analitycznego zapisu ujęto prognozowane przyrosty składowych stanu naprężenia, które wobec przyjętej hipotezy o granicznych stanach wyłączenia gruntu prowadzą do istotnego pogorszenia ogólnych warunków pracy całej nawierzchni drogi kolejowej, głównie w jej przypowierzchniowej strefie.

Przytoczono tu wiele związków danych statystycznych charakteryzujących wzrost awaryjności elementów składowych drogi kolejowej, kładąc przy tym szczególny nacisk na uwypuklenie odrębności zaistniałych uszkodzeń różniących tego rodzaju konstrukcje od innych obiektów i urządzeń zaliczanych również do klasy budowli liniowych. Potrzeba eksponowania problematyki budownictwa komunikacyjnego na terenach górniczych na tle pozostałych zlokalizowanych tam budowli i urządzeń o charakterze liniowym wynika, zdaniem autora, nie tylko z funkcjonalnej odrębności tego elementu infrastruktury technicznej, lecz w głównej mierze jest ona podyktowana wieloma specyficznymi przesłankami natury fizycznej, takimi jak:

- quasi-dynamiczny charakter ruchomego obciążenia zewnętrznego,
- zmienna w czasie i przestrzeni oraz wyraźnie zróżnicowana co do bezwzględnej wartości intensywność oddziaływań kontaktowych nawierzchni z podtorzem,
- charakterystyczna konfiguracja ustroju geometrycznego toru w planie i profilu,
- wysokie wymogi trwałości i niezawodności eksploatacyjnej kolei itp.

Treścią rozdziału trzeciego pracy jest analiza ogólnych warunków współdziałania nawierzchni z podtorzem na terenach górniczych. Bazuje ona na wynikach własnych badań laboratoryjnych i pomiarów poligonowych związanych w głównej mierze z charakterem zmienności cech sprężystych podtorza, jak i kryteriami oceny zjawisk prowadzących bezpośrednio lub też pośrednio do utraty jego nośności. Wskazano tu na znaczny wpływ czynnika prekonsolidacji górnych warstw podtorza i jego znaczenie w ocenie procesu rozwoju stref uplastycznienia gruntu, w warunkach poziomych odkształceń o charakterze rozluźniającym i zagęszczającym. Obszerne i w pełni oryginalne badania modelowe, w trakcie których wykorzystano ośrodek analogowy typu Taylor-Schneebeli'ego (T-S) zezwoliły w przekonaniu autora poczynić wiele interesujących spostrzeżeń praktycznych co do kinematycznych aspektów współpracy układu "nawierzchnia - podtorze", przy różnych wariantach realizowanych wymuszeń brzegowych. Wyprowadzone stąd wnioski i konkretne spostrzeżenia na użytek formalnej pozwoliły z kolei na dokonanie w rozdziale czwartym

określonych założeń związanych z doбором szczegółowego modelu matematycznego podtorza<sup>2</sup>. Opis struktury modelowego podtorza bazował zarówno na jego hipotetycznej - fizycznej jednorodności, jak i uwzględniał rzeczywistą - megaskopową niejednorodność budujących je w strefie przypowierzchniowej ośrodków ziarnistych, o ściśle kontrolowanych cechach geotechnicznych. Uzyskane rozwiązania w postaci zamkniętych układów równań pozwalają zatem, dla wszystkich składowych stanu naprężenia, symulować zjawiska związane z procesem wewnętrznego rozluźnienia (zagęszczenia) struktury podtorza wobec cechujących je realnie parametrów geometrycznych, warunków początkowo-brzegowych itp.

Wnioski wynikające z rozważań nad wynikami badań numerycznych oraz eksperymentów laboratoryjnych i prób poligonowych upoważniły do sprecyzowania konkluzji o charakterze konkretnych wniosków praktycznych. Są one w przekonaniu autora ściśle związane z pilną potrzebą podjęcia konkretnych działań zmierzających do uodpornienia elementów składowych drogi kolejowej na destruktcyjne oddziaływanie podłoża górniczego.

Prezentowane w pracy rezultaty interdyscyplinarnych dociekań i analiz stanowią efekt doświadczeń praktycznych oraz dorobku naukowego autora uzyskanego w trakcie realizacji licznych opracowań związanych bezpośrednio z własną działalnością badawczą prowadzoną na terenie Górnośląskiego Okręgu Przemysłowego. Aczkolwiek Śląski Okręg Kolejowy (w tym i zlokalizowane tam koleje użytku niepublicznego - głównie resortu górnictwa) stanowił tu woisty - naturalny poligon badawczy, to jednak uogólniony charakter modelowych odwzorowań oraz uniwersalność otrzymanych formuł analitycznych i wniosków pozwala transponować uzyskane rezultaty poznawcze oraz użytkowe również na inne obszary sieci kolejowej zagrożonej wpływami działalności przemysłu wydobywczego.

<sup>2</sup> Związane z tym problemy matematycznego modelowania podtorza omówiono między innymi w pracach [49, 69, 71]. Przytoczone tam rozważania dotyczące dyskretyzacji elementów składowych drogi kolejowej wykazały celowość dekompozycji układu na dwie substruktury. Część górną reprezentuje tu każdorazowo ruszt torowy, zaś część dolną tworzą zarówno warstwy kontrolowanych podsypiek, jak i samo podtorze gruntowe. Ośrodki składające się na materiał podsypek (warstw ochronnych, filtracyjnych itp.) oraz podtorza należą w sensie makroskopowym do rodziny środków rozdrobnionych, nieciągłych.

Analizując związki modeli obliczeniowych podtorza z zagadnieniami początkowo-brzegowymi teorii konsolidacji zestawiono komplety równań obejmujące: bilanse mechaniczne, równania kinematyczne, związki (prawa) konstytutywne, warunki brzegowe, warunki początkowe [49].

Poprzez określenie "model obliczeniowy podtorza" rozumiano ośrodek (rozdrobniony - ziarnisty, ewentualnie ciągły) o konkretnych cechach materiałowych, rozmiarach i ukształtowaniu, megastrukturze (uwarstwieniu) oraz rozkładzie programowych obciążeń zewnętrznych i podparć, symulujący określony maszyn podłoża obciążonego konstrukcją rusztu torowego wraz z taborem.

Wśród najistotniejszych i godnych zasygnalizowania wniosków pracy o charakterze poznawczym należałoby wymienić:

- stwierdzenie szczególnie wysokiej podatności podtorza na rozwój zjawisk związanych z chwilową oraz trwałą (długotrwałą) utratą jego nośności, do czego przyczynia się w głównej mierze prekonsolidujący charakter obciążeń eksploatacyjnych drogi kolejowej oraz przebieg procesów ciągłej deformacji terenu górniczego prowadzący w konsekwencji do realnej możliwości przejścia gruntów podłoża (przy porównywalnej wartości poziomych odkształceń  $\epsilon_{x,z}$ ) z geostaticznego stanu naprężeń do linii sprzężonych stanów granicznych,
- wykazanie ścisłej korelacji pomiędzy wzrostem poziomych odkształceń rozluźniających terenu górniczego a procesami prowadzącymi do wyraźnej, długotrwałej redukcji sprężystych charakterystyk podtorza, co w efekcie końcowym sprzyja zasadniczo niekorzystnym zmianom charakteru współdziałania nawierzchni z podtorzem,
- sformułowanie w kategoriach mechaniki ośrodków rozdrobnionych (o cechach rozporowych) matematycznego modelu podłoża rusztu torowego wraz z jego adekwatnym modelem fizycznym zezwalającym na trafne odwzorowanie istoty zjawisk zachodzących w strefie współdziałania podłoża górniczego z konstrukcją konwencjonalnej nawierzchni drogi kolejowej; za parametr wiodący przedmiotowej koncepcji uznano funkcję uzmiennionego współczynnika rozporu bocznego  $K_{\epsilon}$ , wyrażającego przede wszystkim zmienność poziomych naprężeń w podtorzu utożsamianych z jego górnicznymi deformacjami o charakterze zagęszczającym  $\epsilon_z$  lub rozluźniającym  $\epsilon_x$ .

Analityczno-eksperymentalna weryfikacja sprecyzowanych na wstępie pracy hipotez badawczych pozwoliła następnie sformułować autorowi, na bazie własnych doświadczeń praktycznych, podstawowe przesłanki bardziej skutecznej profilaktyki górniczobudowlanej w stosunku do komunikacyjnych budowli liniowych poddanych wpływom odkształceń terenu górniczego. Użytkowy charakter wysnutych stąd wniosków można tu sprowadzić do kilku zasadniczych - poniżej przedstawionych stwierdzeń:

- znaczący wzrost awaryjności elementów składowych konwencjonalnej nawierzchni kolejowej zlokalizowanej na terenach górnicznych wynika zarówno z przesłanek natury obiektywnej, jak i subiektywnej, jej źródłem są bowiem zarówno bezpośrednie oddziaływania związane z intensywnym ruchem kolejowym (np. w GOP), jak i faktyczny brak realizowanych w praktyce zabiegów o charakterze skutecznej profilaktyki konstrukcyjnej - uodparniającej przede wszystkim górne warstwy podtorza oraz samą nawierzchnię na oddziaływania pochodzenia górniczego,
- stwierdzono, że charakter działań zabezpieczających nie może ograniczać się wyłącznie do rektyfikacji niwelety "eks post" oraz prób pośredniej redukcji dodatkowych sił osłowych w nawierzchni (szynach), utrzymanie warunków tzw. niwelety trwale obniżonej pociąga z kolei za sobą wydatne obniże-

nie charakterystyk sprężystych podtorza mogące prowadzić do wydatnego wzrostu dodatkowych naprężeń zginających w szynach, z przekroczeniem naprężeń dopuszczalnych na zginanie włącznie,

- wykazano, iż zasadniczym czynnikiem sprawczym sprzyjającym narastaniu destrukcyjnych zjawisk w podtorzu oraz nawierzchni są poziome odkształcenia podłoża górniczego o charakterze rozluźniającym, stopień zaś bezpośredniej ingerencji tych odkształceń w mobilizację dodatkowych sił wewnętrznych jest dla konstrukcji nawierzchni oraz podtorza uwarunkowany charakterem interakcji wyżej wymienionych elementów,
- dotychczasowe badania własne autora o charakterze rozpoznawczym wykazały, że dalsze próby zmierzające do skutecznego uodpornienia podtorza powinny zmierzać w kierunku szerszego wykorzystania geotekstylii w charakterze elementów wzmacniających podłoża gruntowe na terenach górniczych (geosiatki, pojemniki podpokładowe itp.) oraz ekranów odcinających (kompensujących) w stosunku do poziomych deformacji o charakterze rozluźniającym.

## 2. WPŁYW PODZIEMNEJ EKSPLOATACJI KOPALIN NA PODTORZE KOLEJOWE

### 2.1. Górnictwe aspekty zagadnienia

Podziemna eksploatacja kopaliny zlokalizowanych w obrębie filarów ochronnych, w tym również obiektów i urządzeń budownictwa kolejowego [70, 85, 121, 146, 162], wpływa w sposób istotny na współdziałanie nawierzchni drogi kolejowej z podłożem. Deformacje przypowierzchniowej warstwy górotworu, spełniającej w tym przypadku funkcję podtorza, oddziałują bezpośrednio na aktywną strefę podłoża rusztu torowego, zaznaczając swój wpływ również w obrębie elementów składowych samej nawierzchni. Bliższa analiza tego zagadnienia wymaga zatem rozpatrzenia górnictwych oraz budowlanych aspektów procesu deformacji podłoża gruntowego.

Schemat w pełni ukształtowanej górnictwej niecki obniżeniowej przedstawiono w sposób poglądowy na rys. 1a. Analiza uogólnionych składowych deformacji przypowierzchniowej strefy górotworu (o cechach ośrodka ciągłego) pozwala, dla małych przemieszczeń punktów tejże warstwy, zapisać tensor przemieszczeń jednostkowych w postaci [69, 96]:

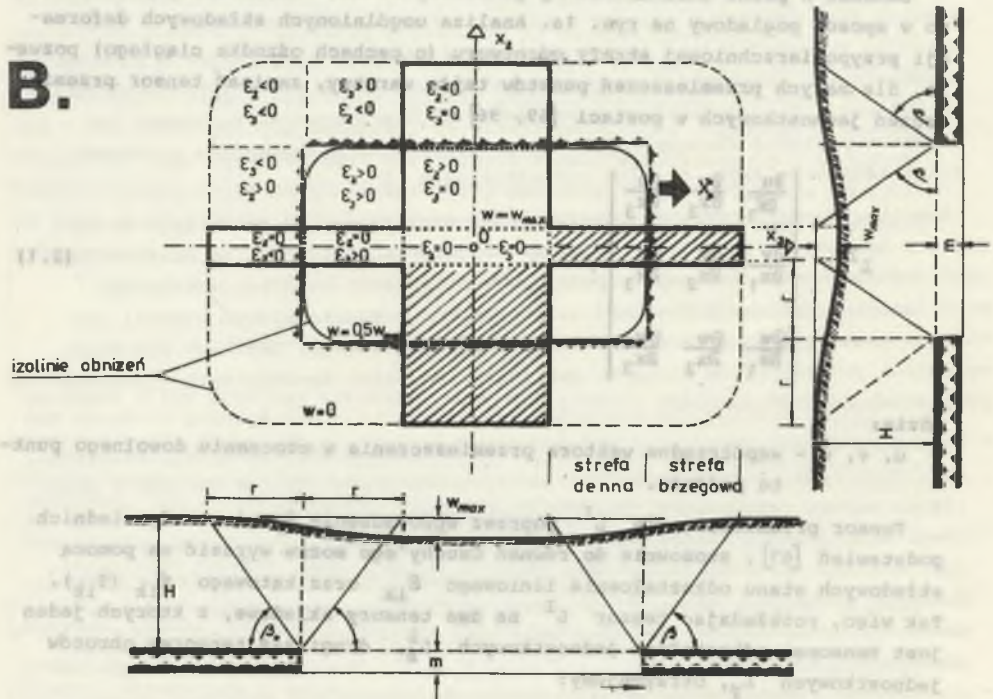
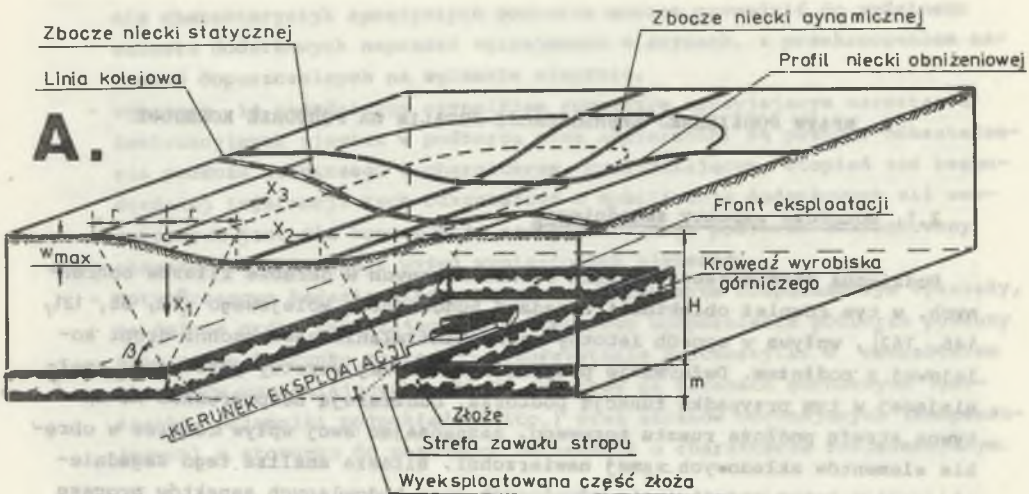
$$L^I = \begin{vmatrix} \frac{\partial u}{\partial x_1} & \frac{\partial u}{\partial x_2} & \frac{\partial u}{\partial x_3} \\ \frac{\partial v}{\partial x_1} & \frac{\partial v}{\partial x_2} & \frac{\partial v}{\partial x_3} \\ \frac{\partial w}{\partial x_1} & \frac{\partial w}{\partial x_2} & \frac{\partial w}{\partial x_3} \end{vmatrix}, \quad (2.1)$$

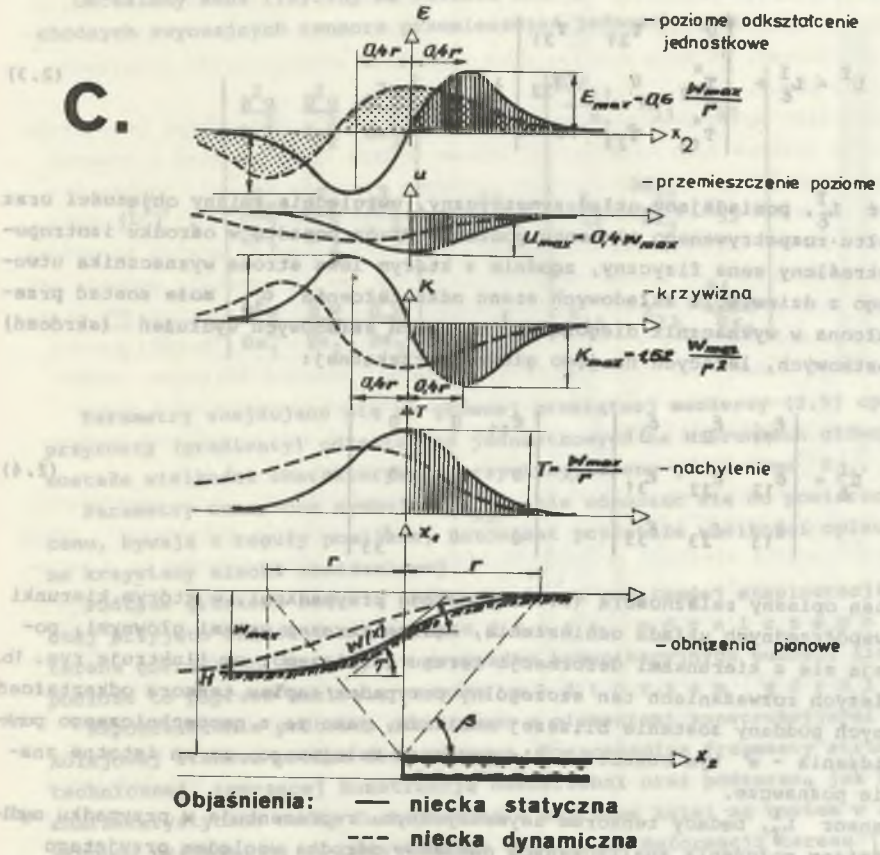
gdzie:

$\bar{u}$ ,  $\bar{v}$ ,  $\bar{w}$  - współrzędne wektora przemieszczenia w otoczeniu dowolnego punktu podłoża.

Tensor przemieszczenia  $L^I$  poprzez wprowadzenie do niego odpowiednich podstawień [61], stosownie do równań Cauchy'ego można wyrazić za pomocą składowych stanu odkształcenia liniowego  $\varepsilon_{ik}$  oraz kąтового  $\tau_{ik}$  ( $T_{ik}$ ). Tak więc, rozkładając tensor  $L^I$  na dwa tensory składowe, z których jeden jest tensorem odkształceń jednostkowych  $L^I_{\varepsilon}$ , drugi zaś tensorem obrotów jednostkowych  $L^I_{\tau}$ , otrzymujemy:

$$L^I = L^I_{\varepsilon} + L^I_{\tau} = \begin{vmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{21} & \varepsilon_{31} \\ \varepsilon_{12} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{32} \\ \varepsilon_{13} & \varepsilon_{23} & \varepsilon_{33} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 & \tau_{21} & \tau_{31} \\ \tau_{12} & 0 & \tau_{32} \\ \tau_{13} & \tau_{23} & 0 \end{vmatrix}, \quad (2.2)$$





Rys. 1. Podstawowe charakterystyki górniczej niecki obniżeniowej

a) ogólny widok górniczej niecki obniżeniowej, b) plan sytuacyjny wyrobiska górniczego wraz z głównymi profilami niecek obniżeniowych, c) funkcje wskaźników deformacji powierzchni w brzojnej części niecki przy przyjęciu gaussowskiego rozkładu wpływów

Fig. 1. Basic characteristics of mining subsiding trough

a) a general view of mining subsiding trough, b) a site plan of mining excavation, together with the main subsiding trough profiles, c) functions of surface deformation indices in the peripheral portion of trough on assuming the Gaussian effect distribution

Dokonując odpowiednich podstawień tensor  $L^I$  można również zapisać w postaci:

$$L^I = L_{\epsilon}^I + \begin{vmatrix} 0 & T_{21} & T_{31} \\ T_{12}^* & 0 & T_{32}^* \\ T_{13}^* & T_{23}^* & 0 \end{vmatrix} ; \quad (2.3)$$

Tensor  $L_{\epsilon}^I$ , posiadający układ symetryczny, uwzględnia zmiany objętości oraz kształtu rozpatrywanego elementu podłoża. Ma on ponadto w ośrodku izotropowym określony sens fizyczny, zgodnie z którym lewa strona wyznacznika utworzonego z dziewięciu składowych stanu odkształcenia  $\epsilon_{ij}$  może zostać przekształcona w wyznacznik diagonalny<sup>3</sup> o trzech składowych wydłużeń (skróceń) jednostkowych, leżących na jego głównej przekątnej:

$$L_{\epsilon}^I = \begin{vmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{21} & \epsilon_{31} \\ \epsilon_{12} & \epsilon_{22} & \epsilon_{31} \\ \epsilon_{13} & \epsilon_{23} & \epsilon_{33} \end{vmatrix} \Rightarrow \begin{vmatrix} \epsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33} \end{vmatrix} ; \quad (2.4)$$

Stan opisany zależnością (2.4) odpowiada przypadkowi, w którym kierunki osi współrzędnych układu odniesienia, będące zarazem osiami głównymi, pokrywają się z kierunkami deformacji terenu górniczego, co ilustruje rys. 1b. W dalszych rozważaniach ten szczególny przypadek zapłwu tensora odkształceń głównych poddany zostanie bliższej analizie, jako że z geotechnicznego punktu widzenia - w tym również i dla podtorza kolejowego, ma on istotne znaczenie poznawcze.

Tensor  $L_{\gamma}^I$ , będący tensorem asymetrycznym, reprezentuje w przypadku ogólnym zmiany położenia analizowanych obszarów ośrodka względem przyjętego układu współrzędnych. Kąty odkształcenia postaciowego  $\gamma_{ik}^*$  w płaszczyźnie poziomej  $(0, x_2, x_3)$  i nachylenia  $T_{ik}^*$ , charakteryzujące odkształcenia kątowe wewnątrz półprzestrzeni ośrodka, nie zawierają tu - z punktu widzenia ochrony powierzchni - informacji o istotnym znaczeniu. Ważne są tu natomiast parametry odkształcenia  $T_{ik}$ , charakteryzujące nachylenia terenu zgodne z kierunkiem największego spadku terenu  $T_{31}$  i na kierunku równoleżnikowym  $T_{21}$ . Opis zmienności tych parametrów, będących pierwszymi pochodnymi funkcji obniżenia terenu górniczego  $w(x_2, x_3)$ , nie przedstawia większego problemu [20, 12]. Tak więc znajomość składowych opisujących pierwsze pochodne uogólnionego wektora przemieszczeń, przy znanej składowej

<sup>3</sup> Dla orientacji osi zgodnej z położeniem kierunków głównych, gdzie wszystkie składowe  $\epsilon_{ij}$  (przy  $i \neq j$ ) odpowiadające czystemu ścinaniu, zerują się.



przemieszczenia  $u$  i obniżenia pionowego  $w$  pozwala obliczyć dwa dalsze główne wskaźniki deformacji terenu oznaczane symbolicznie przez  $\epsilon$  oraz  $T$ .

Określony sens fizyczny ma również tensor  $L^{II}$  utworzony z drugich pochodnych zwyczajnych tensora przemieszczeń jednostkowych:

$$(L^I)' = \begin{vmatrix} \frac{\partial^2 u}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 u}{\partial x_2^2} & \frac{\partial^2 u}{\partial x_3^2} \\ \frac{\partial^2 v}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 v}{\partial x_2^2} & \frac{\partial^2 v}{\partial x_3^2} \\ \frac{\partial^2 w}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 w}{\partial x_2^2} & \frac{\partial^2 w}{\partial x_3^2} \end{vmatrix} = L^{II} = \begin{vmatrix} \frac{\partial \epsilon_{11}}{\partial x_1} & K_{21} & K_{31} \\ K_{12} & \frac{\partial \epsilon_{22}}{\partial x_2} & K_{32} \\ K_{13} & K_{23} & \frac{\partial \epsilon_{33}}{\partial x_3} \end{vmatrix} \quad (2.5)$$

Parametry znajdujące się na głównej przekątnej macierzy (2.5) opisują przyrosty (gradienty) odkształceń jednostkowych na kierunkach głównych, pozostałe wielkości charakteryzują krzywizny terenu górniczego  $K_{ij}$ .

Parametry oznaczone symbolem  $K_{ij}^*$ , nie odnosząc się do powierzchni terenu, bywają z reguły pomijane, natomiast pozostałe wielkości opisują główne krzywizny niecki obniżeniowej.

Podłoże gruntowe budowli poddane wpływom podziemnej eksploatacji górniczej przyjęto określać mianem *podłoża górniczego* lub też terenu górniczego [91, 92]. W przypadku komunikacyjnych budowli liniowych podłoże to poprzez analogię nazwano *podtorzem górniczym*.

Współdziałanie podtorza górniczego z elementami konstrukcyjnymi drogi kolejowej stanowi proces dość złożony. Poszczególne fragmenty struktury technicznej, tworzącej konstrukcję nawierzchni oraz podtorze, jak również charakterystyczne cechy funkcjonalne i użytkowe kolei są bowiem w różnym stopniu uzależnione od podstawowych wskaźników deformacji terenu [77, 138, 161]. Ponadto, w zależności od usytuowania osi trasy kolejowej w stosunku do krawędzi wyrobiska górniczego, krotności prowadzonej eksploatacji [90, 91], prędkości postępu frontu [146] i wielu czynników górniczo-geologicznych, hydrogeologicznych [159] itp. - stopień zagrożenia poszczególnych elementów tego rodzaju budowli liniowych bywa zróżnicowany.

Z geotechnicznego punktu widzenia pewien (aczkolwiek niewielki) wpływ na zmianę stanu naprężenia w elementach drogi kolejowej mają w przypadku regularnych deformacji ciągłych przemieszczenia  $w$  i  $u$  oraz obroty  $T_{ik}$  i krzywizny  $K_{ik}$ . Zasadniczą przyczyną kłopotów eksploatacyjnych, związanych z tą grupą podstawowych wskaźników deformacji terenu, są zmiany cech użytkowych dróg kolejowych. Wynikają one głównie z konkretnych uwarunkowań profilowych tras kolejowych, częstej utraty drożności przez układy odwadniające szlaków oraz stacji, zmian układów geometrycznych nawierzchni w planie, niezbędnej rektyfikacji obiektów inżynierskich, niesprawności urządzeń trakcyjnych, ruchowych, zabezpieczających itp.

W odróżnieniu od wymienionych uprzednio czynników parametr poziomego odkształcenia, mogącego przybrać formę rozluźnienia  $\epsilon_r$  lub zagęszczenia  $\epsilon_z$  ośrodka gruntowego podtorza, implikuje bezpośrednio (albo pośrednio) wiele negatywnych zjawisk związanych z procesem współdziałania nawierzchni i podtorza górniczego. Bliższa analiza tych zagadnień stanowi treść kolejnych rozdziałów pracy.

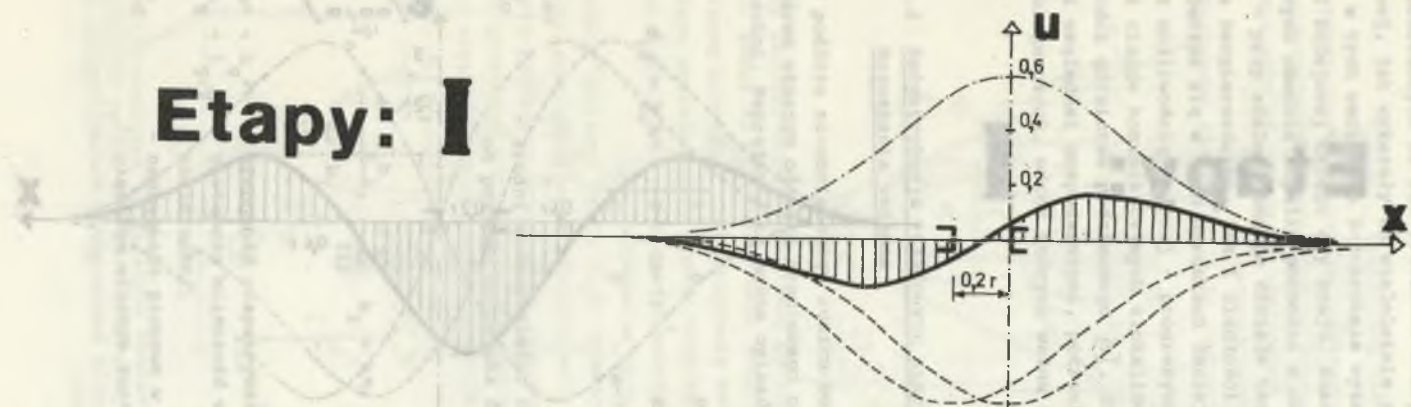
Rozpatrując wpływ poszczególnych parametrów deformacji terenu górniczego na obiekty liniowe tras kolejowych, celowe wydaje się wspomnieć o pewnych efektach szczególnych, związanych ze wstępnym procesem rozwoju tychże deformacji na etapie kształtowania się pełnej niecki obniżeniowej. Z punktu widzenia potrzeb budownictwa najczęściej rozpatruje się tu bowiem przypadek niecki (statycznej lub dynamicznej) w pełni już ukształtowanej, podczas gdy pierwszy etap jej powstawania bywa z reguły (niesłusznie) pomijany. W wielu przypadkach może ponadto w ogóle nie dochodzić do powstania pełnej niecki obniżeniowej z uwagi na rozmiary eksploatowanych obecnie pokładów, głębokość ich zalegania itp. W tych warunkach za szczególnie znamienne można uznać progresję zmian przemieszczeń poziomych  $u$  i ich pierwszych pochodnych  $\epsilon = \frac{du}{dx}$ , co zilustrowano w sposób poglądowy na rys. 2 i 3.

Odkształcenia poziome o charakterze zagęszczającym  $\epsilon_z$  przy rozpiętości wyrobiska rzędu  $0,8 r$  (gdzie:  $r$  - promień zasięgu wpływów górniczych), przyjmują teoretycznie wielkość dwukrotnie większą aniżeli wynikałoby to z parametrów niecki w pełni już ukształtowanej. Przypadek taki zaistniał między innymi w obrębie poligonu torowego, o czym wspomniano w punkcie 3.1. Superpozycja wpływów dwóch przeciwległych krawędzi pokładu sprawia, że teoretyczny przebieg funkcji przemieszczeń poziomych  $u$  doprowadza do powstania maksymalnej wielkości tego parametru dopiero przy znacznej rozpiętości wyrobiska (równiej lub też większej od  $2 r$ ). Wobec czynnego (dynamicznego) oddziaływania eksploatowanej nawierzchni na podtorze (rys. 25) uwzględnienie rejestrowanych wówczas efektów sprawia, że rola parametru  $u$  w ocenie stanu wyężenia głównych elementów konstrukcyjnych drogi kolejowej (przede wszystkim zaś szyn) ulega pewnemu przewartościowaniu<sup>4</sup>.

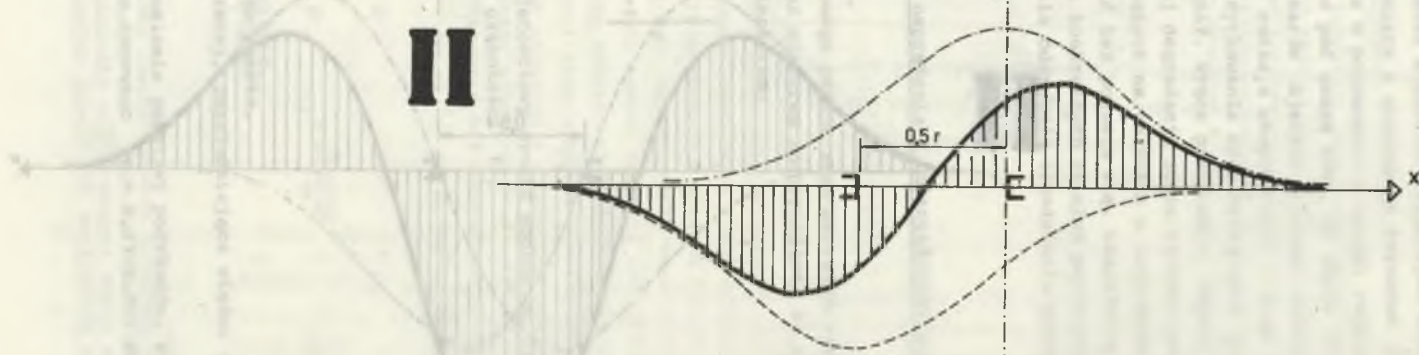
Znaczna część wydobywania kopalin, głównie zaś węgla kamiennego w GOP, pochodzi z filarów ochronnych ustanowionych dla torów szlakowych, stacji, bocznic oraz innych obiektów i urządzeń budownictwa kolejowego. W chwili obecnej około 30% linii Okręgu Śląskiego leży na obszarach górniczych [9, 135]. Oceniając zasięg spowodowanych tym szkód z punktu widzenia kosztów ponoszonych na ich usuwanie stwierdzono [50, 85], że największa szkodliwość podziemnej eksploatacji górniczej uzewnętrznia się w obrębie torów kolejowych.

<sup>4</sup> Jest to związane przede wszystkim z brakiem pełnego zespolenia konstrukcji rusztu torowego z jego bezpośrednim podłożem, co z kolei uniemożliwia spełnienie początkowo-brzegowego postulatu ciągłości kontaktu podkładów z podsypką. Jest to szczególnie istotne z uwagi na mechanizm przekazywania dodatkowych naprężeń stycznych, od deformującego się podłoża górniczego w stronę stykających się z nim (trwale) konstrukcji.

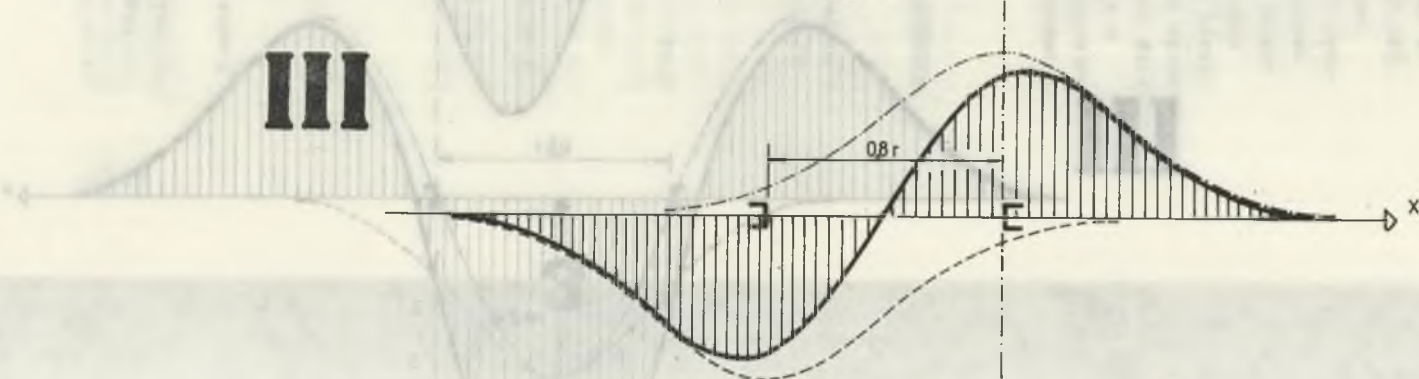
**Etapy: I**



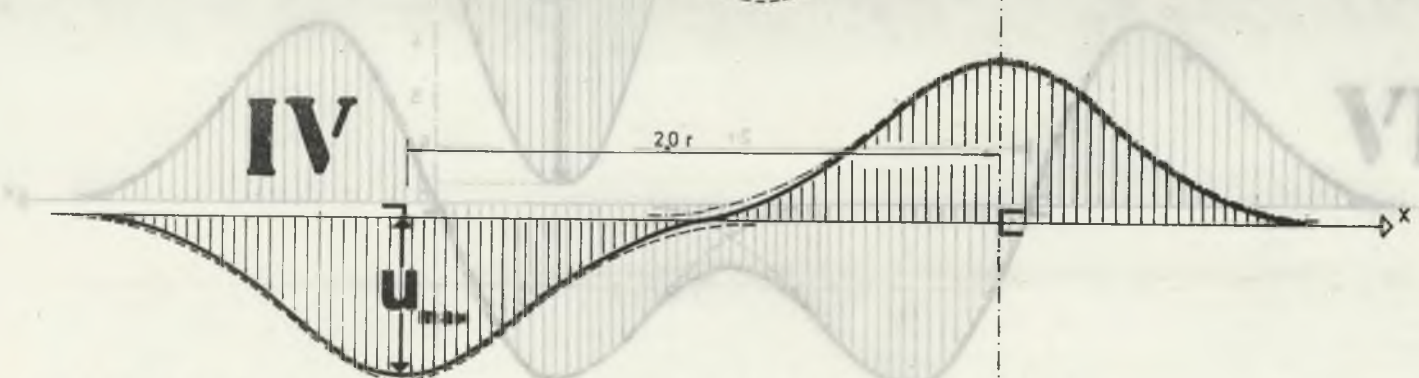
**II**



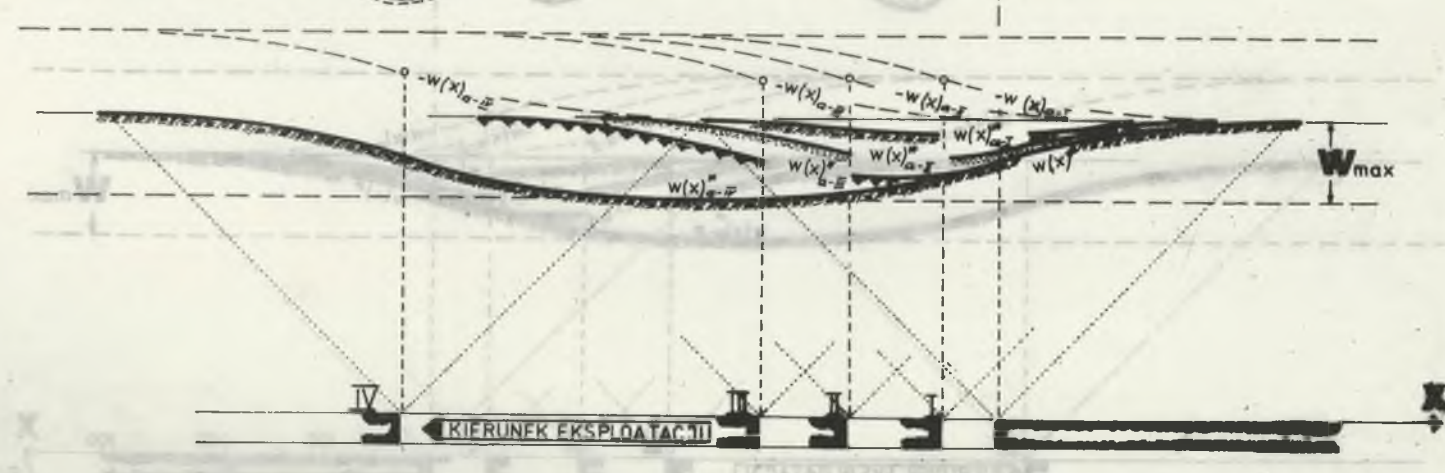
**III**



**IV**



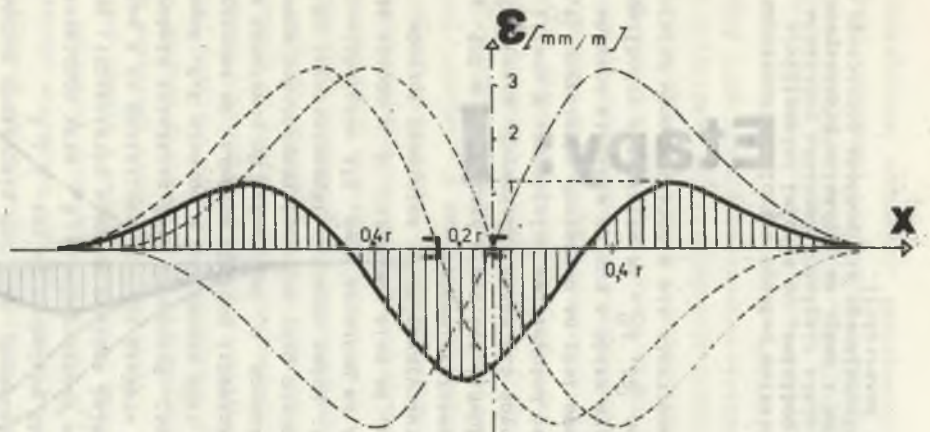
**VI**



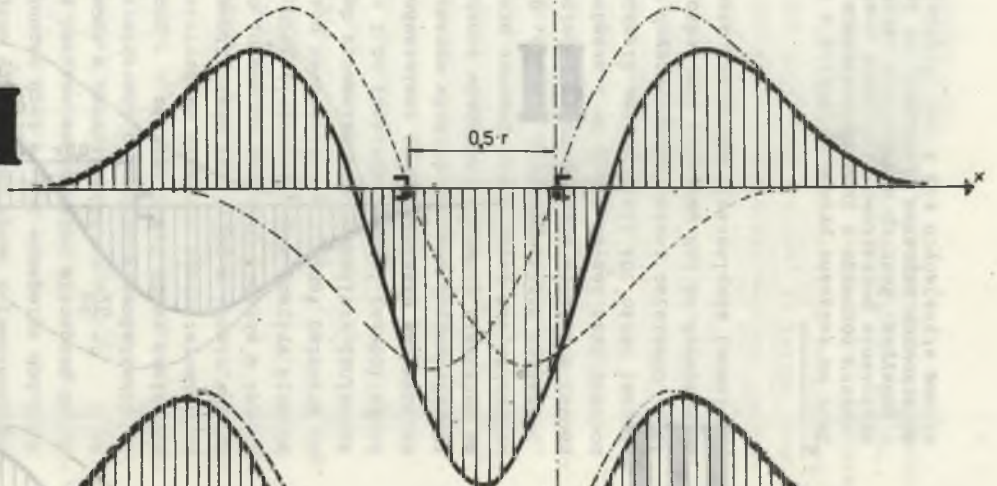
Rys. 2. Wpływ rozpiętości pola eksploatacyjnego na rozkład przemieszczeń poziomych „u”

Fig. 2. The effect of exploitation field span on horizontal displacement distribution „u”

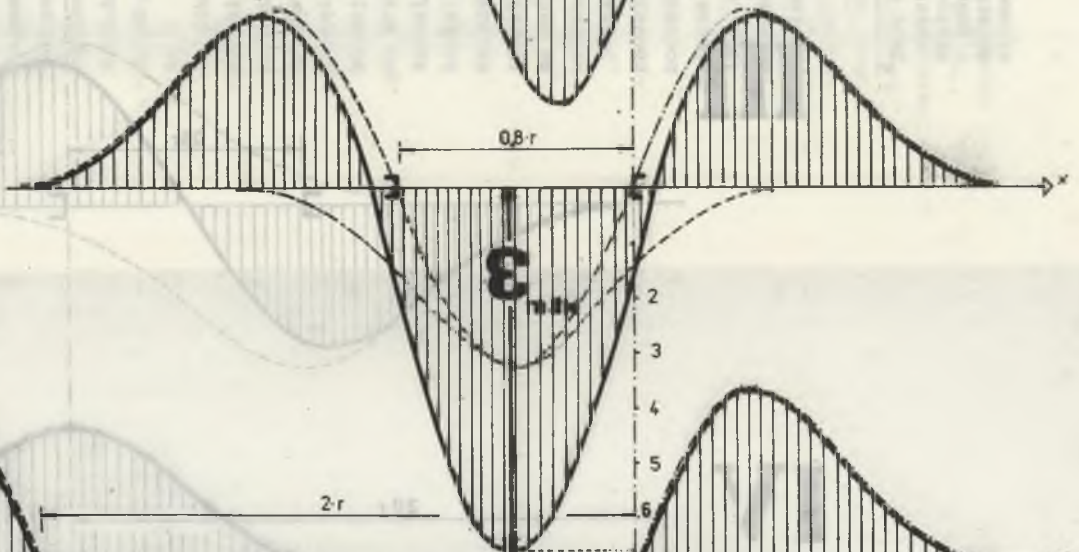
# Etapy: I



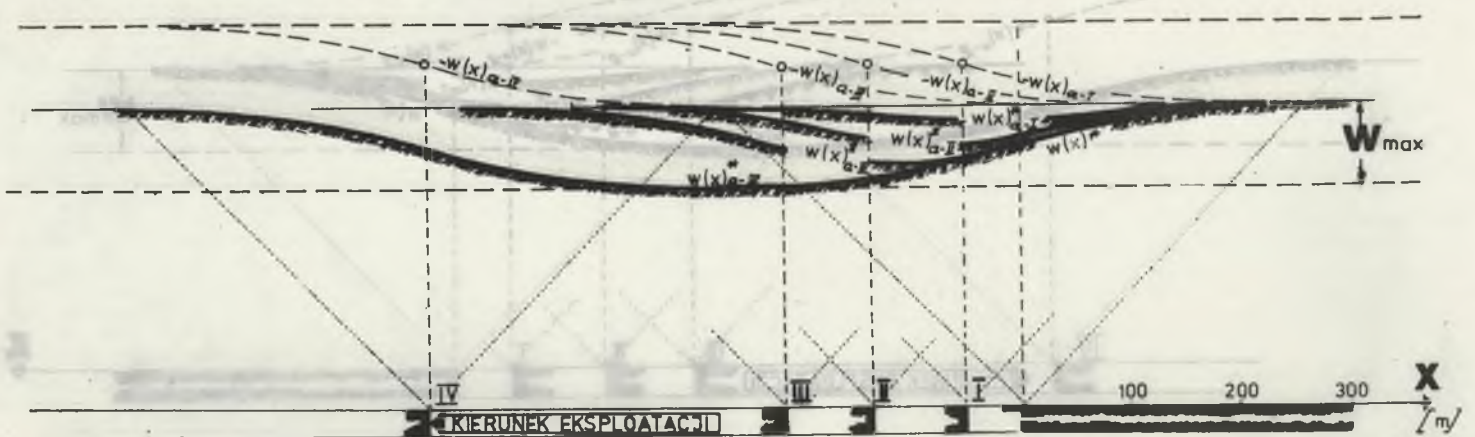
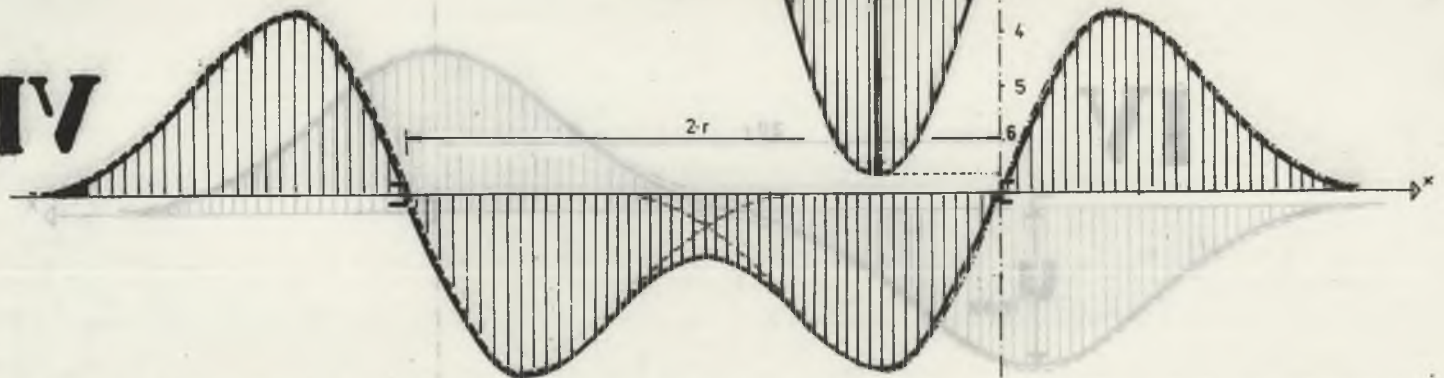
# II



# III



# IV



Rys. 3. Wpływ rozpiętości pola eksploatacyjnego na rozkład odkształceń poziomych „ε”

Fig. 3. The effect of exploitation field span on horizontal strain distribution „ε”

wych wszystkich bez wyjątku kategorii linii i wynosi około 70% ogółu nakładów ponoszonych na ich usuwanie. Awaryjność elementów składowych drogi kolejowej, jak wykazały to wieloletnie pomiary i obserwacje terenowe [9, 163], jest w tych warunkach 3-4-krotnie wyższa w porównaniu z innymi rejonami sieci kolejowej Okręgu czy kraju. Biorąc pod uwagę fakt, że około 40% wydobywanych obecnie kopalin pochodzi z obszarów objętych filarami ochronnymi [91] - przy stale rosnącym udziale tego rodzaju eksploatacji - stan zagrożenia bezpieczeństwa, jak i ciągłości użytkowania dróg kolejowych Okręgu nie będzie się w tych warunkach zmniejszał. Wręcz przeciwnie, należy liczyć się z możliwością dalszej - progresywnej degradacji stanu technicznej sprawności ciągów komunikacyjnych zlokalizowanych na terenach o intensywnej działalności górnictwa podziemnego [9]. Stąd też pojawia się, uzasadniona w pełni względami gospodarczymi, potrzeba konkretnych działań profilaktyczno-zapobiegawczych, wśród których ważną rolę odgrywają zagadnienia geotechniczne.

2.2. Redystrybucja składowych stanu naprężenia i odkształcenia w podtorzu.  
Rozważania wstępne

W podłożu nieobciążonego rusztu torowego panuje stan naprężeń wywołanych ciężarem własnym ośrodka gruntowego oraz ciężarem spoczywającej na nim nawierzchni. Naprężenia te można opisać tensorem:

$$\sigma_{ik} = \bar{\tau}_0 h^* \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & (m-1) & 0 \\ 0 & 0 & (m-1)^{-1} \end{vmatrix}; \quad (2.6)$$

gdzie:

$\bar{\tau}_0$  - średni ważony ciężar objętościowy gruntu podtorza, li zony od poziomu torowiska do głębokości  $h^*$ ,

$$\bar{\tau}_0 = \frac{\sum_{(i)} \tau_i h_i}{\sum_{(i)} h_i}; \quad \sum_{(i)} h_i = h^*;$$

$h^* = h_g + h$  - głębokość rozpatrywanego punktu,

$h_g = t_g / \gamma$  - zastępcza miąższość warstwy, uwzględniająca ciężar własny nawierzchni,

$t_g$  - naprężenia pionowe w poziomie podstawy podkładów, wywołane ciężarem własnym rusztu torowego ( $p = 0,01-0,015$  MPa).

- $m = 1/2$  - współczynnik odkształcenia poprzecznego gruntu (liczba Poissona),  
 $\nu$  - współczynnik Poissona dla podtorza.

Spowodowane przez siły ciężkości naprężenia pierwotne tworzą zawsze tensor niekulisty. Tego rodzaju stan naprężeń porównywalny z edometrycznymi warunkami pierwotnej, sedymentacyjnej konsolidacji rzutuje na późniejsze zachowanie się gruntów podtorza obciążonego taborem.

W analizowanym punkcie podtorza tensorowi (2.6) odpowiada tensor odkształcenia<sup>5</sup>:

$$\epsilon_{ik} = \epsilon_0 \delta_{ik} + v_{ik} = \epsilon_0 \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \epsilon_{11} - \epsilon_0 & 0 & 0 \\ 0 & -\epsilon_0 & 0 \\ 0 & 0 & -\epsilon_0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \epsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}; \quad (2.7)$$

gdzie:

$\epsilon_0 = \frac{1}{3} \epsilon_{11}$  - odkształcenie średnie, izotropowe,

$\delta_{ik}$  - tensor kulisty,

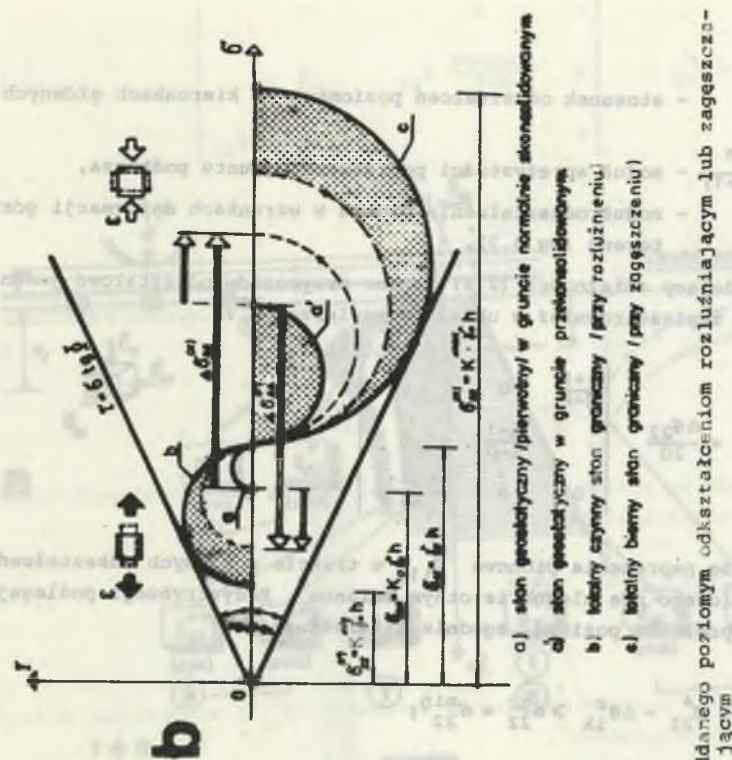
$v_{ik}$  - dewiator tensora odkształceń.

Założmy na wstępie, że materiał tworzący podtorze (a więc ośrodek gruntowy) jest fizycznie jednorodny, izotropowy oraz że posiada on cechy ciała quasi-sprężystego z określonym warunkiem plastyczności. Przyjęcie powyższych założeń pozwala w konsekwencji operować pewnym podobieństwem pomiędzy tensorami stanów odkształcenia oraz naprężenia, skutkiem czego w dowolnym punkcie ośrodka kierunki główne obu stanów są współosiowe.

Poziomemu rozluźnieniu ośrodka gruntowego  $\epsilon_r$ , które uznajemy praktycznie za odkształcenia bardzo małe (infinitesimalne), towarzyszą określone zmiany stanu naprężenia w podtorzu górniczym, co w sposób poglądowy przedstawiono na rys. 4. W przypadku odkształceń rozluźniających przyrosty składowych stanu naprężenia dla kierunków głównych można zapisać w formie tensora [66, 69, 71]:

$$\Delta \sigma_{ik}^r = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2G(m+p)}{m-1} \epsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2G(1+m\mu)}{m-1} \epsilon_{22} \end{vmatrix}; \quad (2.8)$$

<sup>5</sup> Składowa pierwsza stanowi tensor odkształceń normalnych, reprezentujący czystą dylatację ośrodka, tzn. zmianę jego objętości bez zmiany kształtu. Składowa druga reprezentując odkształcenie dewiatorowe charakteryzuje deformacje postaciowe bez zmiany objętości.



- a) stan graniczny pierwioty/ w gruncie normalnie skonsolidowanym
- d) stan graniczny w gruncie przekonsolidowanym
- b) dolny czynny stan graniczny / przy rozluźnieniu
- e) dolny bierny stan graniczny / przy zgęszczeniu

Rys. 4. Schemat stanu naprężeń w warstwie gruntu poddanego poziomemu odkształceniu rozluźniającym lub zgęszczającemu

a) składowe stanu naprężenia w podłożu górniczym, b) graniczne koła naprężeń dla podtorza

Fig. 4. A diagram of stresses in soil layer subjected to horizontal, ravelling or compacting strains

a) components of stress in mining foundation, b) limit circles of stresses for subgrade

gdzie:

$$\rho = \frac{\epsilon_{33}}{\epsilon_{22}} \quad - \text{stosunek odkształceń poziomych na kierunkach głównych}$$

$$G = \frac{E \epsilon_m}{2(m+1)} \quad - \text{moduł sprężystości poprzecznej gruntu podtorza,}$$

$$E \epsilon \quad - \text{moduł odkształcenia gruntu w warunkach deformacji górniczej terenu (wg 3.3).}$$

Odpowiadający zależności (2.8) tensor przyrostów odkształceń jednostkowych można zapisać również w układzie macierzowym<sup>6</sup>:

$$\Delta \epsilon_{ik}^r = \frac{\Delta \sigma_{22}}{2G} \begin{vmatrix} \frac{1+\rho}{m+\rho} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{m-1}{m+\rho} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\rho(m-1)}{m+\rho} \end{vmatrix} \quad (2.9)$$

Przyjęto, że naprężenia pionowe  $\sigma_{11}$  w trakcie poziomych odkształceń podtorza górniczego nie ulegną istotnym zmianom<sup>7</sup>. Redystrybucji podlegają głównie naprężenia poziome, zgodnie z zależnością:

$$\sigma_{ik}^r = \sigma_{22}^* - \Delta \sigma_{ik}^r > \sigma_{22}^{gr} = \sigma_{22}^{\min}, \quad (2.10)$$

gdzie:

$\sigma_{22}^*$  - naprężenie całkowite, uwzględniające obciążenie nawierzchnią i taborem,

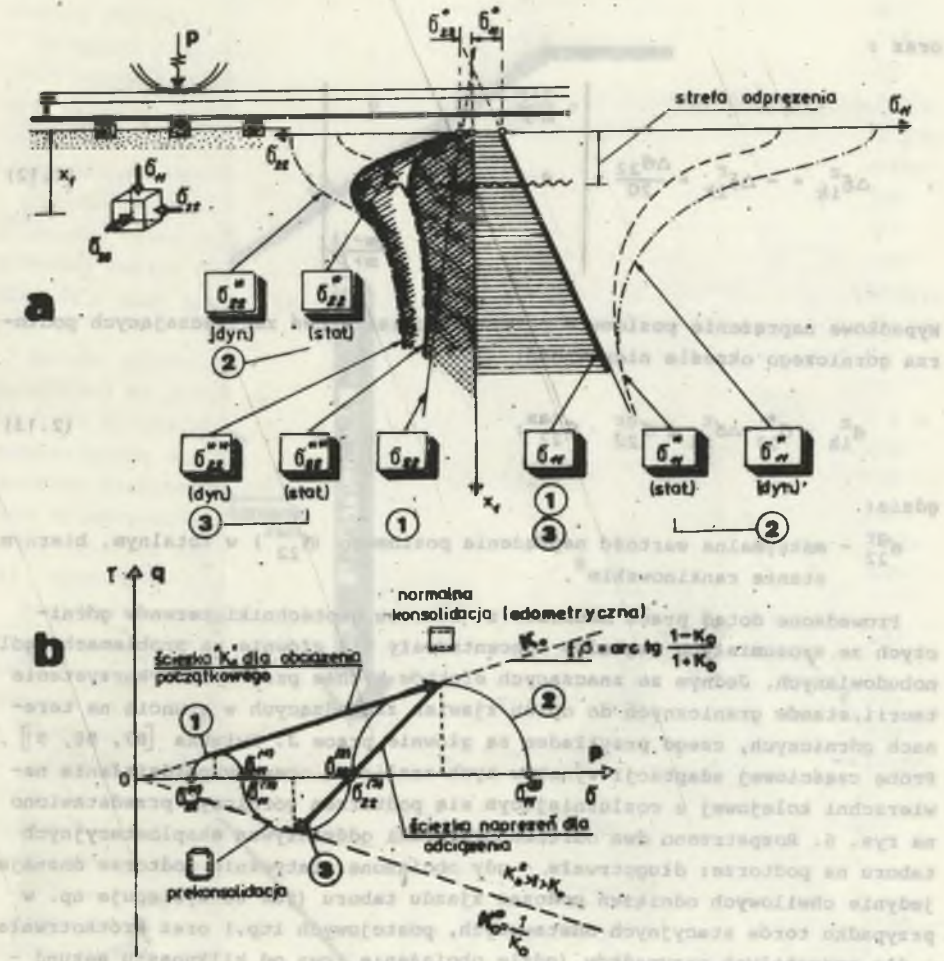
$\sigma_{22}^{gr}$  - minimalna wartość naprężenia poziomego ( $\sigma_{22}^{\min}$ ) w totalnym, czynnym stanie rankinowskim<sup>7</sup>.

Graficzną ilustrację uogólnionych warunków pracy podtorza przedstawiono na rys. 5. Obrazuje on w sposób jakościowy wpływ efektów przekonsolidowania gruntów podtorza na proces dochodzenia przez podłoże górnicze do stanów równowagi granicznej w przypadku poziomych odkształceń rozluźniających  $\epsilon_r$ , jak i zagęszczających  $\epsilon_z$ . Te ostatnie poprzez analogię do zależności (2.8) i (2.9) można opisać tensorami:

<sup>6</sup> W przytoczonych wyrażeniach odkształceniom jednostkowym o charakterze rozluźniającym (tzw. "rozpełzania") przypisano znak "-", zaś odkształceniom o charakterze zagęszczającym (tzw. "spełzanie") znak "+", co jest zgodne z przyjętą w geotechnice umową [61, 175].

<sup>7</sup> Założenie takie można uznać za dopuszczalne z uwagi na nieznaczne (praktycznie pomijalnie małe) zmiany ciężaru objętościowego gruntów na terenach górniczych [77, 82, 91].





Rys. 5. Prekonsolidacja podłoża rusztu torowego

a) wpływ historii obciążenia podtorza na wzrost naprężeń poziomych w podłożu, b) uproszczony schemat efektu prekonsolidacji w układzie  $p - q$

Fig. 5. Pre-consolidation of foundation of track layer framework

a) the effect of subgrade load history on the increase in horizontal stresses in foundation, b) a simplified diagram showing the pre-consolidation effect in the  $p - q$  system

$$\Delta\sigma_{ik}^z = -\Delta\sigma_{ik}^r = - \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2G(m+p)}{m-1} \epsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2G(1+m\rho)}{m-1} \epsilon_{22} \end{vmatrix} \quad (2.11)$$

oraz :

$$\Delta\epsilon_{ik}^z = -\Delta\epsilon_{ik}^r = \frac{\Delta\sigma_{22}}{2G} \begin{vmatrix} -\frac{1+\rho}{m+\rho} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{m-1}{m+\rho} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\rho(m-1)}{m+\rho} \end{vmatrix} \quad (2.12)$$

Wypadkowe naprężenie poziome w przypadku odkształceń zagęszczających podtorza górniczego określa nierówność:

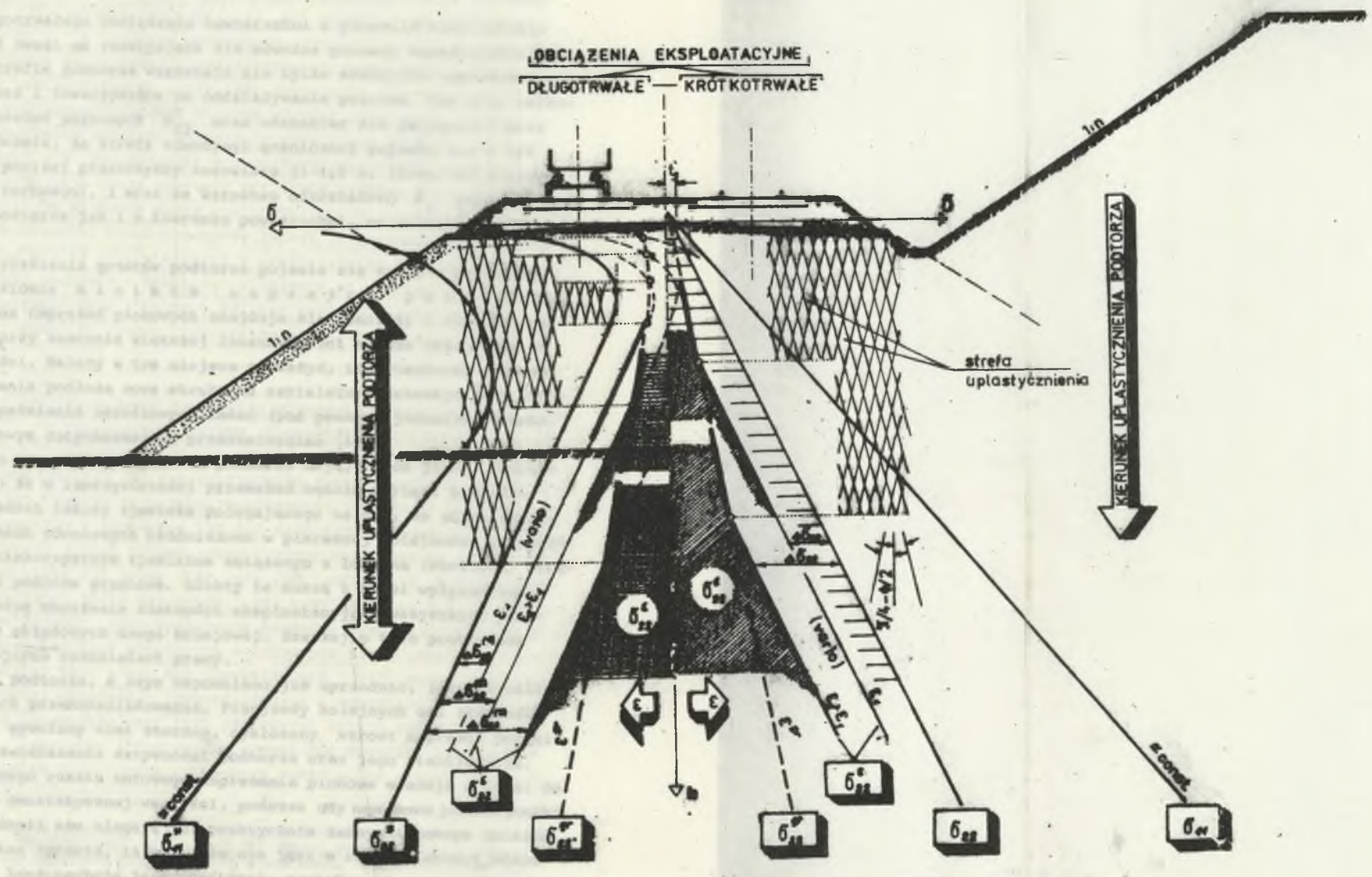
$$\sigma_{ik}^z = \sigma_{22}^* + \Delta\sigma_{ik}^z < \sigma_{22}^{gr} = \sigma_{22}^{max} \quad (2.13)$$

gdzie:

$\sigma_{22}^{gr}$  - maksymalna wartość naprężenia poziomego ( $\sigma_{22}^{max}$ ) w totalnym, biernym stanie rankinowskim<sup>8</sup>.

Prowadzone dotąd prace badawcze z zakresu geotechniki terenów górniczych ze zrozumiiałych względów koncentrowały się głównie na problemach ogólnobudowlanych. Jednym ze znaczących efektów tychże prac było wykorzystanie teorii stanów granicznych do opisu zjawisk zachodzących w gruncie na terenach górniczych, czego przykładem są głównie prace J. Kwiatka [87, 88, 91]. Próbe częściowej adaptacji wyników tych analiz do oceny współdziałania nawierzchni kolejowej z rozluźniającym się podtorzem górniczym przedstawiono na rys. 6. Rozpatrzono dwa odrębne przypadki oddziaływań eksploatacyjnych taboru na podtorze: długotrwałe - gdy obciążone statycznie podtorze doznaje jedynie chwilowych odciążań podczas zjazdu taboru (jak to występuje np. w przypadku torów stacyjnych odstawczych, postojowych itp.) oraz krótkotrwałe - dla pozostałych przypadków (gdzie obciążenie trwa od kilkunastu sekund - przejazd pojedynczego składu, do kilkunastu minut - krótkotrwały postój). Mówiąc o obciążeniu krótkotrwałym mamy zatem na myśli przedział czasu nieporównanie krótszy aniżeli okres uzewnętrznienia się na powierzchni deformacji terenu górniczego [90, 91, 121].

<sup>8</sup> Określenie powyższe przyjęto tu za Z. Wiłunem [175, s. 247].



Rys. 6. Rozwój stref uplastycznienia w podtorzu na terenach górniczych w zależności od charakteru obciążeń eksploatacyjnych torowiska  
 Fig. 6. Development of plasticization zones in subgrade on mining grounds depending on the nature of operating loads of railway subgrade

Wyodrębnione przypadki możliwych (skrajnych) sposobów obciążenia podtorza wpływają na zgoła odmienny charakter jego współpracy z nawierzchnią. Krótkotrwałe (sporadyczne) obciążenie taborem sprawia, że strefa równowagi granicznej pojawia się w pierwszej kolejności bezpośrednio w obrębie torowiska, a wraz ze wzrostem poziomego rozluźnienia obejmuje coraz głębsze warstwy podtorza.

Przewaga długotrwałego obciążenia nawierzchni w procesie eksploatacji linii sprawia (z uwagi na rozwijające się wówczas procesy konsolidacji [49]), że w aktywnej strefie podtorza wznoszą się nie tylko efektywne naprężenia pionowe, lecz również i towarzyszące im oddziaływania poziome. Tak więc całkowita wartość naprężeń poziomych  $\sigma_{22}^*$  oraz charakter ich zmienności wraz z głębokością sprawia, że strefa równowagi granicznej pojawia się w tym przypadku nieco poniżej płaszczyzny torowiska (1-1,5 m, licząc od poziomu podstawy rusztu torowego), i wraz ze wzrostem odkształceń  $\epsilon$  rozprzestrzenia się w głąb podtorza jak i w kierunku powierzchni, co zilustrowano na rys. 6.

Strefa uplastycznienia gruntów podtorza pojawia się zatem w pierwszej kolejności na poziomie  $\text{m i n i m u m n a p r ę ż e ń p o z i o m y c h}$  (wartość minimalna naprężeń pionowych znajduje się poniżej) i rozwija się dwukierunkowo - przy znacznie większej intensywności tychże zmian wraz ze wzrostem głębokości. Należy w tym miejscu zauważyć, iż wytworzona w obszarach uplastycznienia podłoża nowa struktura szkieletu gruntowego jest zdolna do dalszego spełniania określonych zadań (pod pewnymi jednakże warunkami), zgodnie ze swym dotychczasowym przeznaczeniem [62].

Analizowane tu przypadki obciążenia podtorza mają, rzecz jasna, charakter skrajny, jako że w rzeczywistości przeważać będzie wariant pośredni. Nie zmienia to jednak istoty zjawiska polegającego na tym, że górne strefy podtorza na terenach górniczych każdorazowo w pierwszej kolejności podlegają zdecydowanie niekorzystnym zjawiskom związanym z lokalną (chwilową) utratą nośności przez podłoże gruntowe. Efekty te muszą z kolei wpływać nieuchronnie na wyraźne obniżenie zdolności eksploatacyjnej wszystkich pozostałych elementów składowych drogi kolejowej. Szerzej o tych problemach wspomniano w kolejnych rozdziałach pracy.

Aktywna strefa podtorza, o czym wspomniano już uprzednio, jest ośrodkiem o wyraźnych cechach przekonsolidowania. Przejazdy kolejnych osi zestawów kołowych taboru i wywołany nimi znaczny, cykliczny, wzrost naprężeń normalnych wpływają na zwiększenie sztywności podtorza oraz jego stabilizację. W podłożu odciążonego rusztu torowego naprężenia pionowe wracają z kolei do swej pierwotnej - geostatycznej wartości, podczas gdy naprężenia poziome poniżej tzw. strefy odprężenia nie ulegają już praktycznie żadnym istotnym zmianom (rys. 5a). Efekt ten sprawia, iż podtorze nie jest w rzeczywistości ośrodkiem jednorodnym, lecz cechuje je specyficzna, megaskopowa - warstwowa niejednorodność [81, 104, 119, 150].

Jak wykazała to przytoczona uprzednio wstępna analiza, poziome deformacje terenu górniczego w pierwszej kolejności naruszają stabilność tej właśnie strefy. Dotyczy to głównie odkształceń o charakterze rozluźniającym  $\epsilon_1$ . Wstępne badania autora wydają się ponadto wskazywać, że również i deformacje o charakterze zagęszczającym  $\epsilon_2$  mogą stanowić istotny czynnik destabilizacji przypowierzchniowej strefy podtorza. W świetle dotychczasowych badań stwierdzano bowiem [78, 91, 138], że odkształcenia krytyczne przy poziomym zagęszczeniu ośrodka gruntowego wynoszą  $\epsilon_{kr} = 30-50$  mm/m, przekraczając tym samym znacznie odkształcenia uznawane za dopuszczalne dla zurbanizowanych terenów górniczych [95, 121]. Zauważyć należy jednakże, iż warunkowania te dotyczą jedynie gruntów poddanych normalnej konsolidacji, typowej dla podłoża gruntowego większości obiektów budowlanych wznoszonych na terenach górniczych. Praktycznie rzecz biorąc, nie można założyć wówczas występowania w podłożu górniczym biernego stanu granicznego. W powyższym kontekście warunki charakteryzujące pracę podtorza górniczego wymagają oddzielnego rozpatrzenia. Wyniki wstępnych badań laboratoryjnych dotyczące tego zagadnienia przedstawiono w rozdziale 3.4. Na ich podstawie można tu jedynie stwierdzić, że powstanie totalnego - biernego stanu granicznego w gruntach niespoistych jest możliwe również i przy odkształceniach poziomych  $\epsilon_2$  o znacznie mniejszej intensywności, rzędu 4-7 mm/m.

### 2.3. Awaryjność elementów składowych drogi kolejowej w warunkach deformacji podłoża górniczego

Droga kolejowa wraz z całą przypisaną jej infrastrukturą techniczno-ruchową stanowi element szczególnie podatny na różnego rodzaju uszkodzenia i awarie związane bezpośrednio lub też pośrednio z wpływami podziemnej eksploatacji górniczej na powierzchnię. Według danych przytoczonych na ten temat przez H. Kratzscha, [85, str. 441] około 20% ogółu nakładów finansowych związanych z profilaktyką, jak i usuwaniem szkód górniczych w RFN (1981 r.) dotyczyło obiektów i urządzeń komunikacyjnych. Podobna sytuacja panuje również w Polsce, gdzie szczególnie zagrożonym górniczo rejonem jest Śląski Okręg Kolejowy [135]. Zlokalizowana tam gęsta sieć układów kolejowych (przeznaczenia publicznego i niepublicznego) o znacznym stopniu obciążenia ruchowego w dużej części (około 30% [9]) jest usytuowana na terenach realnie zagrożonych wpływami podziemnej eksploatacji górniczej<sup>9</sup>. Za symptomatyczną dla tego rejonu można uznać szczególną szkodliwość składowych deformacji

<sup>9</sup>Ogółem według danych pracy [9] około 10% linii Okręgu znajduje się w strefie bezpośredniego zagrożenia (do 1990 r.) szkodami górniczymi, a dalszych 30% linii kolejowych jest usytuowanych na istniejących lub projektowanych obszarach górniczych. Około 20% linii przebiega przez tereny niecki węglovej, na których nie utworzono jeszcze obszarów górniczych.

terenu górniczego w obrębie obiektów i urządzeń kolejowych. Według J. Halligowskiego [50], uwidacznia się ona głównie w obrębie podtorza i nawierzchni kolejowej (ok. 70% nakładów). Interesująca jest w tym względzie również próba statystycznej oceny awaryjności toru kolejowego przedstawiona w pracach W. Szumierza, M. Bienka i in. [9, 16], obejmująca z górą 20-letni okres rejestracji awarii zaobserwowanych w liniach Okręgu Śląskiego, zlokalizowanych na obszarach górniczych i poza nimi. Stwierdzili oni, że ponad połowa awarii zaistniałych w obrębie elementów składowych drogi kolejowej zdarzyła się w torach zlokalizowanych na terenach górniczych, mimo iż łączna ich długość nie przekraczała ogółem 25% długości linii Okręgu. Struktura wspomnianej awaryjności, np. w odniesieniu do pęknięć szyn, wyrażała się ponad 3,5-krotnym wzrostem tego rodzaju uszkodzeń, zaś w przypadku rozjazdów współczynnik ten wynosił 2,7. Aczkolwiek statystyka ta nie stanowi (z różnych względów) wiernej i kompletnej rejestracji wszystkich awarii zaistniałych z tytułu szkód górniczych, a pewna ich część zaistniała bez wątpienia jedynie na skutek pośredniej roli czynnika górniczego (o charakterze intensyfikującym, mobilizującym [74, 98, 138]), niezaprzeczalnym faktem jest, iż podstawowe trudności eksploatacyjne kolei na terenach górniczo aktywnych wynikają bezpośrednio z całkowicie odmiennych - znacznie bardziej niekorzystnych warunków pracy statycznie-wytrzymałościowej nawierzchni i samego podtorza. Rejestrowane w tych warunkach liczne awarie i uszkodzenia nawierzchni drogi kolejowej stanowią jedynie zewnętrzny efekt znacznie bardziej złożonych procesów i zjawisk zachodzących w głównej mierze w obrębie ośrodka gruntowego (podtorza). Dotychczasowe badania wskazują, iż posiadają one swe źródło we wspomnianych uprzednio wieloparametrowych odkształceniach podłoża górniczego, które wywierają zasadniczy wpływ na zmianę właściwości ośrodka gruntowego, prowadząc zarazem do znaczącej redystrybucji składowych stanu naprężenia i odkształcenia w podtorzu.

Konieczność prowadzenia skutecznej działalności profilaktycznej związana jest z dużym zapotrzebowaniem kolei na opracowanie konkretnych, praktycznych sposobów opanowania zagadnienia [135]. To zaś wymaga dogłębnego rozeznania mechaniki współdziałania nawierzchni z deformowanym podtorzem celem określenia głównych czynników destabilizacji układu "nawierzchnia - podtorze". Eksperymentalne próby rozeznania tego zagadnienia stanowią treść rozdz. 3, zaś teoretyczne uzasadnienie oraz rozwiązanie powyższego problemu przedstawione zostało w rozdz. 4 pracy.

#### 2.4. Wstępne wnioski i konkluzje

Analiza górniczo-budowlanych aspektów oddziaływania podziemnej eksploatacji górniczej na podtorze kolejowe skłania do następujących wniosków natury ogólnej:

1. Tensorowy zapis uogólnionych składowych przemieszczeń jednostkowych przypowierzchniowej strefy górotworu w swej pierwszej i drugiej pochodnej wyraża określony sens fizyczny, wiążąc w ogólnej postaci wszystkie podstawowe parametry deformacji terenu górniczego. Z geotechnicznego punktu widzenia szczególne znaczenie ma tu znajomość składowych opisujących pierwsze pochodne uogólnionego wektora przemieszczeń (przy znanej składowej obniżenia pionowego  $w$ ). Po rozłożeniu na dwa tensory składowe pozwala to wyodrębnić grupę podstawowych wielkości opisujących stan odkształcenia jednostkowego  $\epsilon_{ij}$  podłoża górniczego.

2. Analizując wpływ poszczególnych parametrów deformacji terenu górniczego na obiekty liniowe zlokalizowane na powierzchni zwrócono uwagę na pewne charakterystyczne efekty związane z procesem rozwoju tychże odkształceń (głównie poziomego przemieszczenia  $u$  oraz odkształcenia  $\epsilon$ ) na etapie kształtowania się pełnej niecki obniżeniowej. Za szczególnie istotny uznano fakt superpozycji wpływów od dwóch przeciwległych krawędzi niepełnej niecki prowadzący do okresowej redukcji wartości parametru  $u$  (dla szerokości wyrobiska  $<2r$ ), podczas gdy w dennej strefie tejże niecki poziome odkształcenia zagęszczające mogą przyjąć w tym samym okresie wartość dwukrotnie wyższą (przy rozpiętości wyrobiska ok.  $0,8r$ ) aniżeli wynikałoby to z parametrów niecki pełnej. Uwzględnienie tego efektu sprawia, że znaczenie parametru przesunięć  $u$  z punktu widzenia jego roli i znaczenia w ocenie stanu wyężenia konstrukcji drogi kolejowej ulega pewnemu przewartościowaniu, podczas gdy zjawiska związane z progresją wzrostu odkształceń poziomych  $\epsilon_{ij}$  (w tym i zagęszczających) nabierają pierwszoplanowego znaczenia.

3. Wyodrębnione drogą analizy składowych stanu odkształcenia - przyrosty tensorów naprężeń poziomych, wobec przyjętych kryteriów stanu granicznego pozwalają na dokonanie wstępnej analizy procesu redystrybucji naprężeń w podłożu rusztu torowego, przede wszystkim w zależności od charakteru jego obciążenia przez tabor (krótkotrwałe - długotrwałe). Wykazano, że strefa uplastycznienia gruntów podtorza pojawia się w pierwszym rzędzie na poziomie minimum naprężeń poziomych (tzn. w strefie torowiska lub nieco poniżej) i rozwija się dwukierunkowo, ze znacznie większą jednak intensywnością tychże zmian wraz ze wzrostem głębokości.

Strefą nośną podłoża rusztu torowego staje się w tych warunkach jego - stosunkowo cienka - przypowierzchniowa warstwa, cechująca się jednakże względnie dużą sztywnością z uwagi na prekonsolidujący charakter oddziaływań eksploatacyjnych taboru. Analiza składowych stanu naprężenia w tej strefie wymaga jednakże oddzielnego (szczegółowego) rozpatrzenia, z uwzględnieniem realnych warunków obciążeń początkowo-brzegowych, konstrukcyjnej jak i strukturalnej niejednorodności warstwowej podtorza itp.

4. Liczne badania terenowe oraz analizy podjęte celem ustalenia rzeczywistych przyczyn intensyfikacji awarii i wzrostu podatności poszczególnych elementów składowych drogi kolejowej na uszkodzenia wykazały w tym wzglę-



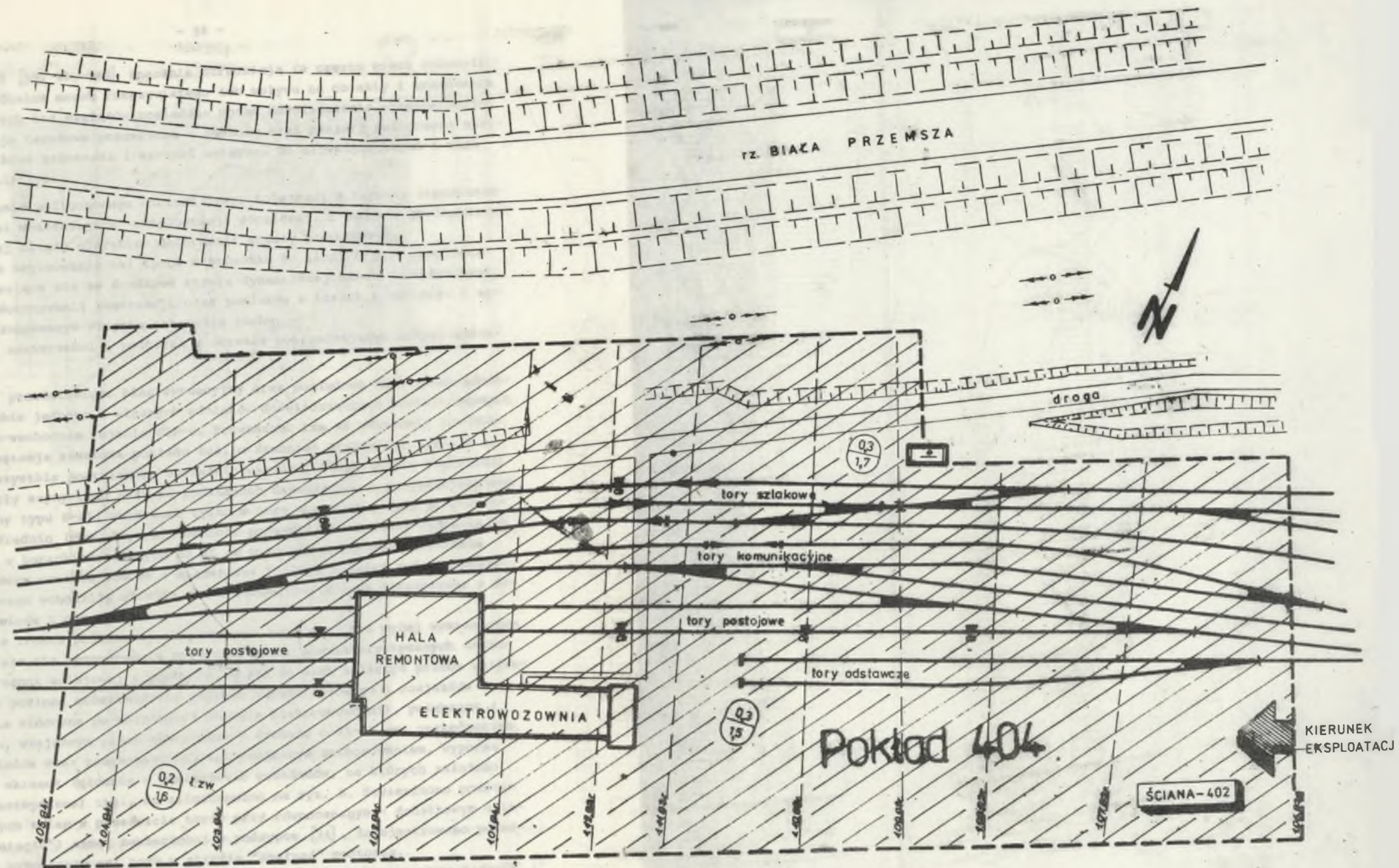


### 3. WSPÓŁDZIAŁANIE NAWIERZCHNI KOLEJOWEJ Z PODTORZEM NA TERENACH GÓRNICZYCH W ŚWIETLE OBSERWACJI TERENOWYCH ORAZ BADAŃ MODELOWYCH

#### 3.1. Wybrane przykłady charakterystycznych uszkodzeń nawierzchni kolejowej oraz podtorza

Jednym z podstawowych zagadnień badawczych dotyczących oceny wpływów deformacji terenu górniczego na zlokalizowane tam budowle jest określenie charakteru oddziaływań kontaktowych w strefie styku budowli z podłożem. W przypadku analizy ograniczonej do oceny wpływów poziomych odkształceń rozluźniających podłoża gruntowego na budowle zwarte lub liniowe, efekt tego rodzaju wymuszeń kinematycznych może być z reguły utożsamiany z wystąpieniem dodatkowych oddziaływań stycznych w płaszczyźnie kontaktowej obu struktur (podłoża i konstrukcji). Bezpośredni, trwałe kontakty ogółu konstrukcji z deformującym się podłożem górniczym prowadzi zatem do określonej redystrybucji oddziaływań wewnętrznych zarówno w samym obiekcie, jak i ośrodka gruntowym. Wzrost poziomych deformacji podłoża, rejestrowany jako proces pokonywania sił przyczepności (tarcia), prowadzi z reguły do powstania granicznego stadium współdziałania budowli z podłożem. Dzieje się tak niezależnie od tego, czy przekroczenie wytrzymałości nastąpiło bezpośrednio w miejscu styku współpracujących elementów (struktur), czy też w obrębie któregoś z nich (najczęściej gruntu). Zagadnieniom tym poświęcono dotąd wiele prac o charakterze eksperymentalnym i teoretycznym [82, 85, 86, 91, 126, 138, 162] i in. Bezpośrednie wykorzystanie tych wyników dla celów budownictwa liniowego, głównie zaś kolejowego, nie wydaje się jednakże właściwe i w pełni uzasadnione. Tezę taką potwierdzają przytoczone poniżej wyniki badań terenowych i ich interpretacja, odbiegająca nieco od wcześniejszych poglądów na ten temat.

Przypisując wpływom podziemnej eksploatacji górniczej powstanie określonych szkód w nawierzchni oraz podtorzu musimy każdorazowo mieć dostateczną pewność co do bezpośredniego związku przyczynowo-skutkowego łączącego oba te zjawiska. Istnieją tu bowiem przypadki, w których zły stan nawierzchni czy podtorza już sam w sobie stanowi niejednokrotnie poważne źródło zagrożenia dla pracy linii kolejowej. Wpływ deformacji podłoża górniczego staje się w tych warunkach już tylko dodatkowym czynnikiem aktywizującym (potęgującym) niekorzystne tendencje, mogąc stać się zarazem impulsem do powstania awarii, a nawet i katastrof [138]. Wiele odcinków linii i stacji kolejowych znajduje się w warunkach GOP-u pod wpływem wielokrotnej podziemnej eksploatacji kopalni, w wyniku czego skutki następujących po sobie i nakładających



OZNACZENIA:

- ▼ - pomiar osi odkształconej szyny
- - pomiar modułu odkształcenia podtorza (VSS)

Rys. 7. Plan sytuacyjny odcinka doświadczalnego w strefie oddziaływań podziemnej eksploatacji górniczej  
 Fig. 7. Site plan of track proof ground in the zone of interaction of underground mining

się deformacji [50, 90, 163] znacznie utrudniają (a często wręcz uniemożliwiają) indywidualną ocenę rzeczywistego ich wpływu na obiekty i urządzenia kolejowe. Z tych też względów posiadane dotąd doświadczenia eksploatacyjne oraz obserwacje terenowe poszerzono o badania oraz pomiary poligonowe spełniające dodatkowe założenia i warunki wstępne. Do najważniejszych z nich można było zaliczyć:

- zlokalizowanie poligonowego odcinka drogi kolejowej w terenie nienaruszonym wpływami wcześniejszej eksploatacji górniczej, o budowie geologicznej warunkującej ciągły charakter deformacji strefy podtorzowej,
- prostopadłe usytuowanie osi torów w stosunku do linii frontu eksploatacji, pokrywające się ze środkową strefą dynamicznej niecki obniżeniowej,
- możliwość dokonywania obserwacji oraz pomiarów w torach i podtorzu o wyraźnie zróżnicowanym stopniu natężenia ruchu,
- dobry stan nawierzchni i podtorza w okresie poprzedzającym wpływy górnicze.

Na rys. 7 przedstawiono plan sytuacyjny oraz poglądową mapę robót górniczych w obrębie jednego z własnych odcinków doświadczalnych zlokalizowanych w południowo-wschodnim rejonie GOP-u. Prowadzom tam na przełomie lat 1983-1984 eksploatacja zawałowa pokładu 404, o średniej miąższości 1,8-2,0 m, spełniała wszystkie postulowane uprzednio warunki. Nawierzchnie większości torów tworzyły szyny typu S-49 na podkładach drewnianych z przytwierdzeniem typu K. Szyny typu S-42, wbudowane tylko w tory postojowe, były przytwierdzone bezpośrednio (rys. 8b,c,d). Grubość podsypki tłuczniowej wynosiła od około 20 cm w torach odstawczych do 40 cm w torach szlakowych. Podtorze tworzyły utwory czwartorzędowe o miąższości 25-30 m i dużej jednorodności, w skład którego wchodziły głównie słabo zawodnione grunty piaszczyste z domieszkami żwirów i otoczków.

Przejęcie frontu podziemnej eksploatacji górniczej pod wyżej wymienionym obszarem stało się bezpośrednią przyczyną wielu charakterystycznych uszkodzeń nawierzchni kolejowej i podtorza. Można do nich zaliczyć przede wszystkim znaczne poziome odkształcenia podłoża rusztu torowego i rozjazdów (szczególnie widoczne po wschodniej stronie elektrowozowni), połączone z ich trwałym, wzajemnym przemieszczeniem - średnio o 25-35 cm, uszkodzeniem wielu podkładów oraz podrozjezdnic, ich wzajemnym zeskosowaniem, wyporem podsypki z okienek (głównie w sąsiedztwie podkładów, na których założono opórki przeciwpełzne) itp., co zilustrowano na rys. 8. Stwierdzono powstanie znacznych zmian w prześwicie torów przy równoczesnym - dodatkowym osiadaniu ("tonięciu") samej nawierzchni w podsypce [74]. Zarejestrowano ponadto wstępne wyboczenie osi toru w strefie "spełzań" podtorza.

Zjawiska te, co wymaga szczególnego podkreślenia, zaobserwowano jedynie w rejonie sporadycznie wykorzystywanych torów postojowych, odstawczych i komunikacyjnych (rys. 8). Nie zarejestrowano ich natomiast niemalże zupełnie w obrębie bezpośrednio przyległych torów szlakowych, po których odbywał



Rys. 8. Charakterystyczne uszkodzenia nawierzchni w rejonie odcinka doświadczalnego

a) widok ogólny uszkodzeń, b) poziome przemieszczenie podkładu w strefie opórek przeciwpężnych

Fig. 8. Characteristic defects of track structure within track proof ground

a) a general view of defects, b) horizontal displacement of sleeper in the zone of anti-creep stock rails,



c) rozszczepienie i zeskosowanie podkładów, d) przesunięcia wzdłużne w strefie rozjazdu  
 c) splitting and chamfering of sleepers, d) - longitudinal displacement in the turnout zone

się w tym czasie intensywny całodobowy ruch ciężkich składów wahadłowych kolei górniczej.

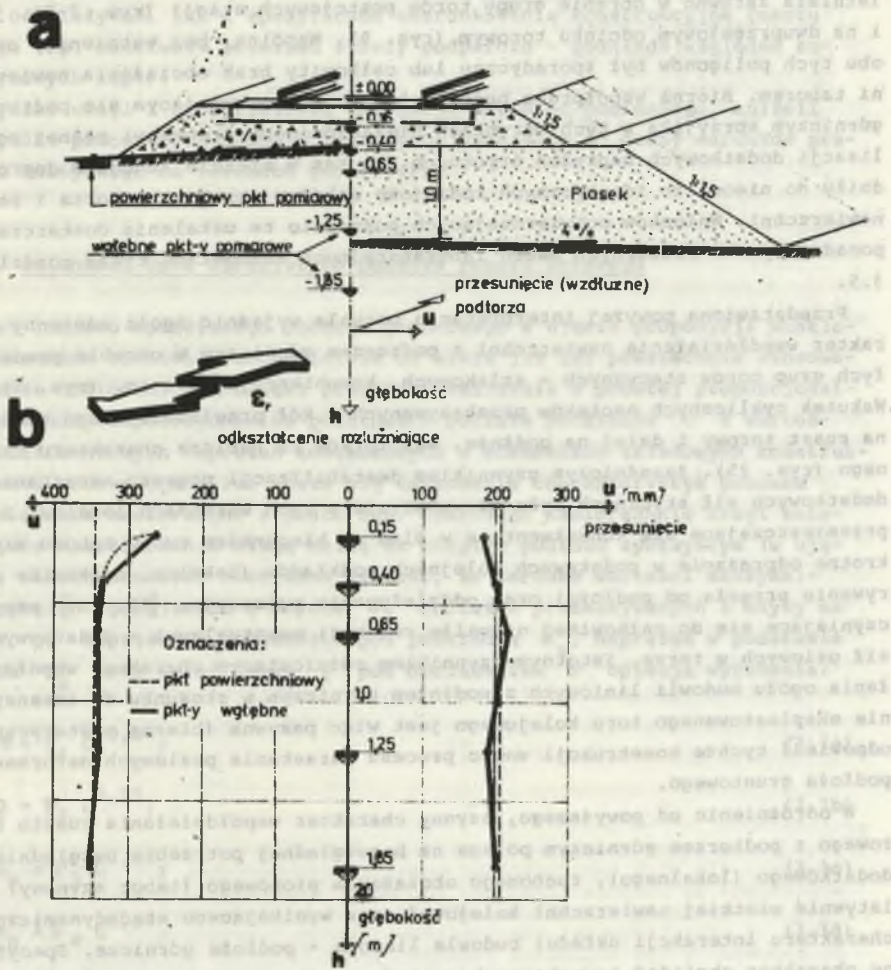
Obserwacje i pomiary stanu torów oraz stopnia deformacji terenu górniczego uzupełniono ciągłą rejestracją zmian pionowych składowych podatności sprężystej podłoża rusztu torowego i podłoża gruntowego w strefie międzytorzy [3, 60, 73, 83]. Reprezentatywne wyniki tychże pomiarów dla kolejnych faz przemieszczania się frontu eksploatacji przedstawiono w pkt. 3.2.

Wydaje się, iż dobrym uzupełnieniem prezentowanych tu obserwacji są wyniki pewnych wcześniejszych, obszernych badań poligonowych, prowadzone w zbliżonych warunkach górniczo-geologicznych na obszarze górniczym jednej z kopalń ROW-u. Poligon torowy, który tworzyły dwa wyodrębnione 40-metrowe odcinki toru (prostoliniowe - równoległe) posiadał bogate oprzyrządowanie pomiarowe umożliwiające pełną rejestrację całego procesu współdziałania rusztu torowego (wiotkiej taśmy wg [137]) z jego bezpośrednim podłożem oraz podtorzem gruntowym, co ilustruje schematycznie rys. 9. Jeden z torów posadowiono wyłącznie na warstwie podsypki tłuczniowej, podczas gdy w podłożu drugiego podsypka spoczywała na dodatkowej, metrowej warstwie gruboziarnistego piasku. Znamienny był tu ponadto fakt, iż tory przedmiotowego poligonu nie podlegały obciążeniom eksploatacyjnym taboru, stanowiąc całkowicie wyizolowany fragment nawierzchni.

Na rys. 9b przedstawiono charakterystyczne wyniki pomiarów dotyczące poziomych (wzdłużnych) przemieszczeń górniczych wybranych punktów podtorza względem konstrukcji rusztu torowego. Wynika z nich w sposób jednoznaczny, że w przypadku braku podsypki piaskowej, "kotwiący" wpływ rusztu torowego ogranicza swobodę przemieszczeń podłoża jedynie w cieniwej warstwie, której miąższość praktycznie rzecz biorąc równa jest grubości warstwy tłuczniowej. Wynika to ze stosunkowo niewielkiego ciężaru własnego samej nawierzchni kolejowej (nieobciążonej taborem), o czym wspomniano już uprzednio. Punkty pomiarowe usytuowane poniżej doznają przemieszczeń nieomalże zgodnych z poziomymi przesunięciami powierzchni terenu. Fakt ten wskazuje na brak bezpośredniego oddziaływania tej strefy na nawierzchnię (przede wszystkim szyny), głównie zaś na mobilizację procesu powstawania w niej dodatkowych sił osiowych.

W przypadku toru ułożonego na warstwie dodatkowej podsypki piaskowej można z kolei zauważyć znacznie mniejsze zróżnicowanie przemieszczeń powierzchni terenu w stosunku do podłoża rusztu torowego, co wskazuje na nieco mniejszą w tych warunkach intensywność wzrostu sił osiowych w torze. Obserwacje te znalazły zresztą potwierdzenie w bezpośrednich pomiarach siły rozrywającej przesła torowe w strefie złączonej.

Interpretacja przytoczonych tu wyników nie może abstrahować od różnic, jakie mimo pozornej (konstrukcyjnej) adekwatności, dzielą wspomniane odcinki poligonowy toru od linii eksploatowanej w warunkach rzeczywistych. W obu analizowanych przypadkach odkształcenia rozluźniające podtorze, poprzez tarcie podsypki w podstawach, na czołowych krawędziach podkładów jak



Rys. 9. Wyniki badań poligonowych podtorza na terenach górniczych

a) przekrój poprzeczny nawierzchni dla dwóch typów podłoża rusztu torowego (podsypka jedno- i dwuwarstwowa) wraz z rozmieszczeniem punktów pomiarowych, b) poziome przemieszczenia rejestrowane w podtorzu

Fig. 9. The results of proof ground investigations on mining ground subgrade according to [137]

a) a cross-section of track structure for two types of foundation of track framework (one-, and two-layer ballast), together with measuring point arrangement, b) horizontal displacements recorded in subgrade

i wskutek jej naporu na boczne powierzchnie podkładów, przyczyniły się do powstania dodatkowych sił osiowych w tokach szynowych<sup>10</sup>. Sytuacja taka istniała zarówno w obrębie grupy torów postojowych stacji (rys. 7-8), jak i na dwuprzęsłowym odcinku torowym (rys. 9). Wspólna, bez wątpienia, cechą obu tych poligonów był sporadyczny lub całkowity brak obciążenia nawierzchni taborem. Bierna współpraca budowli liniowej z deformującym się podtorzem górniczym sprzyjała w tych warunkach niezakończonemu procesowi pełnej mobilizacji dodatkowych naprężeń stycznych, te zaś w efekcie końcowym doprowadziły do nieomalże identycznych rodzajowo szkód w obrębie podtorza i samej nawierzchni. Wniosków potwierdzających pośrednio te ustalenia dostarczają ponadto wyniki obszernych badań laboratoryjnych stanowiące treść rozdziału 3.5.

Przedstawiona powyżej interpretacja pozwala wyjaśnić zgoła odmienny charakter współdziałania nawierzchni z podtorzem górniczym w obrębie pozostałych grup torów stacyjnych - szlakowych, komunikacyjnych i in. (rys. 7). Wskutek cyklicznych nacisków przekazywanych z kół przejeżdżającego taboru na ruszt torowy i dalej na podłoże, współpraca ta nabiera charakteru czynnego (rys. 25). Zasadniczym czynnikiem destabilizacji procesu narastania dodatkowych sił stycznych było niewątpliwie w tych warunkach lokalne, i przemieszczające się konsekwentnie w ślad za kierunkiem ruchu taboru wielokrotne odprężanie w podstawach kolejnych podkładów (lokalne, całkowite odrywanie przęsła od podłoża) oraz oddziaływanie pulsacyjne [70, 103] przyczyniające się do całkowitej niemalże redukcji ewentualnych - dodatkowych sił osiowych w torze. Istotnym czynnikiem różnicującym charakter współdziałania ogółu budowli liniowych z podłożem górniczym w stosunku do intensywnie eksploatowanego toru kolejowego jest więc pasywna (bierna - statyczna) odpowiedź tychże konstrukcji wobec procesu narastania poziomych deformacji podłoża gruntowego.

W odróżnieniu od powyższego, czynny charakter współdziałania rusztu torowego z podtorzem górniczym polega na bezwzględnej potrzebie uwzględnienia dodatkowego (lokalnego), ruchomego obciążenia pionowego (tabor szynowy) relatywnie wiotkiej nawierzchni kolejowej oraz wynikającego stąd dynamicznego charakteru interakcji układu: budowla liniowa - podłoże górnicze. Specyficzny charakter obciążeń zewnętrznych sprzyja z kolei, jak wykazano to już uprzednio, zasadniczej redukcji dodatkowych naprężeń stycznych w strefie kontaktowej obu współdziałających aktywnie elementów układu. O istocie wspomnianej redukcji decydują zarówno lokalne odrywanie nawierzchni od po-

<sup>10</sup> Źródłem dodatkowych (znaczących) sił osiowych w torze można się tu dopatrywać zatem w jego biernej współpracy z podsypką i całym podtorzem. Należy zauważyć, że sytuację tę można uznać za typową jedynie w odniesieniu do pozostałych rodzajów budowli i urządzeń typu liniowego, których cechy funkcjonalne oraz użytkowe zapewniają warunek pełnej (nieprzerwanej) ciągłości kontaktu z podłożem na dostatecznie długim odcinku.



ziomo deformującego się podłoża gruntowego, pulsacyjny charakter przekazywanych oddziaływań, jak i specyficzne uwarunkowania konstrukcyjne rusztu torowego (np. możliwość przesuwu strefy podparcia - podkładu względem torów szynowych itp.).

Powyższe uwagi i spostrzeżenia skłaniają zatem do odmiennego, aniżeli w przypadku pozostałych budowli liniowych, podejścia do oceny warunków pracy toru kolejowego na terenach górniczych.

### 3.2. Zmienność cech sprężystych podłoża rusztu torowego

Model liniowo sprężystego podłoża gruntowego w ujęciu propozycji Winklera-Zimmermanna stanowi w kolejnictwie od wielu już lat powszechnie stosowany schemat obliczeniowy. Dzięki przyjęciu założenia o prostej proporcjonalności pomiędzy współczynnikiem podatności podłoża podkładów  $C$  a wartościami obliczeniowych naprężeń kontaktowych w elementach składowych konstrukcji rusztu torowego, możliwe stało się testowanie charakterystyk procesu współdziałania nawierzchni z podtorzem. Traktując nawierzchnię drogi kolejowej jako nieskończenie długą belkę na ciągłym podłożu sprężystym (w ujęciu np. Saller-Hankera) nietrudno wykazać, że zarówno wartości maksymalnych naprężeń zginających w szynie  $\sigma$ , obciążeń przekazywanych z szyny na podkład  $Q$ , naprężeń w podkładzie pod podkładką  $\sigma_w$ , naprężeń w podstawie podkładu  $\sigma_p$  oraz ugięć szyny  $y$  pod obciążeniem  $P$  opisują wyrażenia:

$$\sigma = \varphi_1 C^{-0,25}; \quad (3.1a)$$

$$Q = \varphi_2 C^{0,25}; \quad (3.1b)$$

$$\sigma_w = \varphi_3 C^{0,25}; \quad (3.1c)$$

$$\sigma_p = \varphi_4 C^{0,25}; \quad (3.1d)$$

$$y = \varphi_5 C^{0,75}; \quad (3.1e)$$

$$\varphi_1 = \frac{P}{4W} \left(\frac{4EJ}{b}\right)^{0,25}; \quad \varphi_2 = 0,5P \cdot 1 \left(\frac{4EJ}{b}\right)^{-0,25};$$

$$\varphi_3 = \varphi_2 w^{-1}; \quad \varphi_4 = 2\varphi_2 (db_1\alpha^*)^{-1}; \quad \varphi_5 = \varphi_2 (b1)^{-1}; \quad (3.1f)$$

gdzie:

$EJ$  - sztywność szyn na zginanie,

$W$  - wskaźnik wytrzymałości szyny na zginanie,

$b$  - szerokość belki - podkładu podłużnego (zastępczego),

- $b_1$  - szerokość podkładu poprzecznego,
- $l$  - rozstaw podkładów,
- $d$  - długość podkładu,
- $w$  - powierzchnia styku podkładki z podkładem,
- $\alpha^*$  - współczynnik ugięcia podkładu.

Wiarygodność tego rodzaju obliczeń, uwarunkowana ponadto aproksymacją układów rzeczywistych przez odpowiednie modele mechaniczne (tzw. analogi globalne)<sup>11</sup> rusztu torowego, w głównej mierze uzależniona jest jednakże od właściwego oszacowania wartości współczynnika  $C$ , co w sposób bezpośredni wynika z zależności (3.1a-f). Trudno tu bowiem mówić o ściśłym obliczaniu wartości parametru  $C$ , jako że jest on złożoną funkcją wielu czynników, wśród których główną rolę odgrywają stan i rodzaj gruntów podtorza, parametry geometryczne rusztu torowego oraz kształt i sztywność powierzchni obciążającej, wielkość i charakter oddziaływań przekazywanych z podkładów na podsypkę itp. Nietrudno zatem stwierdzić, że współczynnik ten nie może być uważany za stałą cechę gruntową podtorza [3, 16, 60, 70, 76, 83, 143, 154, 175]. Ingerencja deformacji charakterystycznych dla podłoża górniczego, głównie zaś poziomych odkształceń  $\delta$ , wywołuje dalsze - istotne zmiany cech sprężystych podłoża gruntowego. Pojawiać się tu może ponadto jednoznaczne ograniczenie stosowalności tego rodzaju modelu obliczeniowego podłoża, jako że przy określonej intensywności deformacji terenu górniczego w przypowierzchniowej warstwie ośrodka gruntowego pojawiają się strefy odkształceń plastycznych. Wraz ze wzrostem poziomych deformacji rozluźniających zasięg tych stref powiększa się, ograniczając tym samym zakres obszarów stosowalności przyjętego modelu podtorza<sup>12</sup>.

<sup>11</sup> Analiza związków modeli obliczeniowych podtorza oraz nawierzchni z formułowanymi dla nich zagadnieniami początkowo-brzegowymi [49] sprowadza się w praktyce do rozpowszechnionej tendencji czynienia określonych uproszczeń polegających na nakładaniu "a priori" pewnych więzów na stan naprężenia (i odkształcenia) rzeczywistego układu "nawierzchnia - podtorze". Do typowych w tym względzie zabiegów można zaliczyć sprowadzanie zagadnień przestrzennych do problemów płaskich czy też kreację zastępczych modeli mechanicznych w odniesieniu do realnych (rzeczywistych) układów konstrukcyjnych.

<sup>12</sup> Stosowane powszechnie w chwili obecnej metody analizy pracy podtorza bazują niemalże wyłącznie na założeniu małych (infinitezimalnych) odkształceń. Nie zawsze odpowiada to rzeczywistości, gdzie znaczne niejednokrotnie deformacje słabego podłoża rusztu torowego (jak to chociażby występuje w przypadku analizowanego tu podtorza górniczego) wymagałyby uznania odkształceń (obrotów) jako wartości skończonych [49]. Pojawia się wówczas potrzeba wyboru współrzędnych opisujących ruch elementów układu. Ponadto wymagają zdefiniowania wielkości reprezentujące stany naprężenia i odkształcenia. Rozważania te wykraczają jednakże poza zakres przedmiotowej pracy. Należy zauważyć jedynie, że w teorii odkształceń skończonych traci ważność zasada ich superpozycji. Sprawia to, iż błędne stają się wszystkie koncepcje modeli złożonych bazujące na możliwości rozkładu deformacji na sprężyste, plastyczne lub lepkoplastyczne. W efekcie finalnym nie mogą one być składane w modele zbiorcze, co znacznie komplikuje przedmiotowe zagadnienie.

Problemem zmienności cech sprężystych podłoża górniczego jako jeden z pierwszych zajął się F. Wasilkowski. Dostrzegając zasadniczą różnicę w ocenie sprężystości podłoża rusztu torowego oraz podłoża dużych fundamentów budowli [170 cz. I], w drugim z analizowanych przypadków zalecał przyjmowanie niższych wartości współczynnika  $C$  aniżeli dla podtorza. W swych kolejnych pracach, podczas analizowania współpracy żebrowej stopy lub łąwy fundamentowej z podłożem, w konkluzji doszedł on jednak do wniosku, że współczynnik  $C$  z uwagi na geometryczne cechy rusztu (łąwy) będzie zawsze znacznie mniejszy aniżeli w przypadku zwartego kształtu gładkiej stopy. Fakt ten F. Wasilkowski tłumaczył znacznie większą podatnością kraty na wcinanie się jej wąskich żeber w deformowane podłożo górnicze, poprzez "pokonywanie jego wytrzymałości" (nośności). Z uwagi na pewne podobieństwo geometryczne rusztu torowego do analizowanych uprzednio konstrukcji oraz quasi-statyczny charakter obciążenia nawierzchni drogi kolejowej (ze względu na stałe ograniczenia prędkości) można założyć jakościową zgodność charakteru zmian cech sprężystych podłoża gruntowego konstrukcji i podtorza, polegającą na wyraźnym obniżaniu się wartości parametru  $C$  na terenach górniczych.

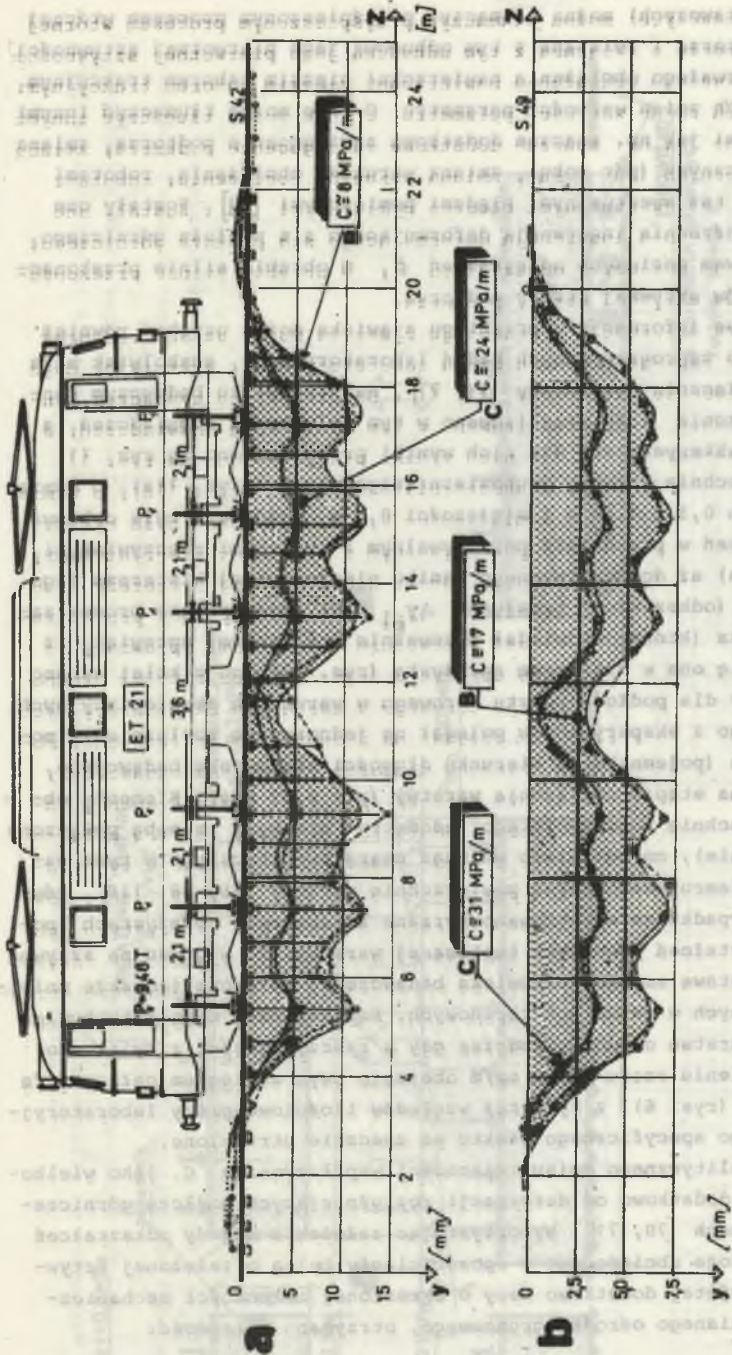
W uzyskiwanych przez F. Wasilkowskiego zależnościach analitycznych współczynnik podłoża był zawsze wielkością proporcjonalną do modułu sprężystości gruntu  $E_g$  [172]. Z kolei moduł ten w okresie pojawienia się poziomych odkształceń rozluźniających "zaczyna silnie maleć" [171], co znalazło swoje odzwierciedlenie w obliczeniowej propozycji zredukowanego modułu sprężystości podłoża gruntowego:  $E_1 = \eta E_g$ . Na podstawie badań laboratoryjnych A. Rosikonina ustalono wówczas  $\eta = 0,2$  dla rozluźnianych gruntów sypkich oraz  $\eta = 0,5$  dla gruntów spoiстых. Pośrednio oznaczało to zatem kilkukrotny spadek wartości cech sprężystych rozluźnianego podłoża, bardziej intensywny w przypadku gruntów sypkich aniżeli spoiстых. Kontynuację i rozwinięcie badań z tego zakresu (dla odmiennych jednakże celów, związanych głównie z budownictwem ogólnym) można znaleźć również w pracach T. Kantarka [56], S. Barycza [4], H. Glinki [37], M. Beli [6], M. Kawuloka [58] i in. [126]. Zmienność współczynnika  $C$  na terenach górniczych uznano ponadto jako zależną od fazy deformacji terenu i miejsca pomiaru. W trakcie analizy zmienności pionowego oddziaływania pomiędzy budowlą a podłożem narażonym na występowanie różnoimiennych krzywizn zrodziła się sugestia określenia współczynnika  $C$  na bazie podwójnej wartości edometrycznego modułu ściśliwości gruntu [172]. Została ona następnie rozwinięta i uogólniona w koncepcji niesprężystego winklerowskiego podłoża górniczego, wprowadzonej przez J. Kwiatka [89].

Wydaje się, że określenie charakteru zmian tego współczynnika wyłącznie na bazie analogii typu edometrycznego - jako najbardziej zbliżonej do procesu kształtowania się krzywizn pod obiektem, nie powinno abstrahować od równoczesnych poziomych deformacji podłoża górniczego (krzywizna wypukła - rozluźnienie, krzywizna wklęsła - zagęszczenie).

W świetle przytoczonych tu analiz związanych z oceną wartości współczynnika podatności podłoża na terenach górniczych, ewentualne bezpośrednie wykorzystanie którejkolwiek z nich dla celów budownictwa kolejowego nie wydaje się rokować zadowalających wyników. Istnieją wprawdzie próby analitycznego opisu zmienności tego parametru dla celów kolejowych, zawarte w pracy W. Szumierza [163] oraz publikacjach autora [70, 71, 77] jednakże dopiero bezpośrednie pomiary "in situ" mogą dostarczyć w pełni przekonujących i wiarygodnych przesłanek co do rzeczywistego charakteru oraz skali tego zjawiska.

W chwili obecnej znane są jedynie wyniki badań rozpoznawczych wykonywanych przez A. Kawczyńskiego [57] i własne, wstępne pomiary autora [73, 77]. We wnioskach pierwszej z prac stwierdzono, że wielkości współczynników podłoża różnią się w zależności od tego, czy analizowany odcinek toru był usytuowany w strefie poziomego zagęszczenia lub rozluźnienia podłoża górniczego. W obrębie deformacji danego typu wartości współczynnika  $C$  wykazywały stosunkowo dużą zgodność, a w przypadku odkształceń rozluźniających osiągały bardzo niskie wartości rzędu 1,1-6,1 MPa/m w rejonie stacji (PKP Katowice-Muchowiec) oraz 1,8-15,7 MPa/m na odcinku przyległego szlaku. Wartości te utrzymywały się w trakcie całego, 4-miesięcznego cyklu pomiarowego, mimo ciągłej i intensywnej eksploatacji badanej linii. Brak pomiarów wyjściowych (porównawczych) z okresu poprzedzającego wystąpienie deformacji w podtorzu, jak i liczne - wcześniejsze eksploatacje górnicze prowadzone w tym rejonie, niewątpliwie utrudniły głębszą i zobiektywizowaną interpretację tychże wyników. Pozostaje jednak faktem stwierdzenie autora, iż niezależnie od tego, która z wcześniejszych eksploatacji wpłynęła na wytworzenie się tak niskiej (i długotrwałej) wartości współczynnika  $C_0$  w obrębie podtorza, jest to zjawisko implikowane bezpośrednio przez oddziaływania typu górniczego.

Wolnymi od przytoczonych tu ewentualnych wątpliwości są wyniki badań zawarte w pracach autora [73, 77], gdzie poligon doświadczalny zlokalizowano w obrębie obszaru górniczego nie będącego pod wpływem wcześniejszej względnie sąsiedniej eksploatacji podziemnej (rys. 7). Pomiaru współczynnika podatności podłoża podkładów dokonano drogą bezpośrednich - precyzyjnych rejestracji osiadań rusztu torowego obciążonego quasi-statycznie pojazdem trakcyjnym, co zilustrowano w charakterze przykładu na rys. 10. Przedstawiono na nim wykresy pionowych odkształceń sprężystych nawierzchni w trakcie ich uzewnętrzniania się na powierzchni (B), jak i zaniku (C) po około 5-miesięcznym okresie. Analiza wyników tychże pomiarów wskazuje na znaczne obniżenie się wartości wyjściowego współczynnika  $C_0$  do około 8 MPa/m w torach postojowych (sześciokrotne) i około 17 MPa/m w torach szlakowych (trzykrotne), przy pierwotnej podatności sprężystej podtorza rzędu  $C_0 \approx 50$  MPa/m. Charakterystyczne, że w trakcie półrocznych obserwacji i pomiarów zaznaczył się z kolei wyraźny - bo trzykrotny wzrost wartości tego współczynnika w rejonie grupy torów postojowych i około dwukrotny w rejonie torów szlakowych. Wartości te były jednakże wciąż znacznie niższe od wyjściowej podatności  $C_0$ . Szybszy wzrost wartości tego współczynnika w torach



Rys. 10. Wpływ poziomych odkształceń podłoża górniczego na zmienność cech sprężystych podtorza  
 a) quasi-sprężyste odkształcenie nawierzchni w rejonie torów odsławczych i komunikacyjnych, b) odkształcenia  
 pionowe nawierzchni w obrębie torów szlakowych

Fig. 10. The effect of horizontal strains of mining foundation on the variation of subgrade elastic features  
 a) quasi-elastic strain of track structure in the region of traffic and haulage tracks, b) vertical strains  
 of track structure within route tracks

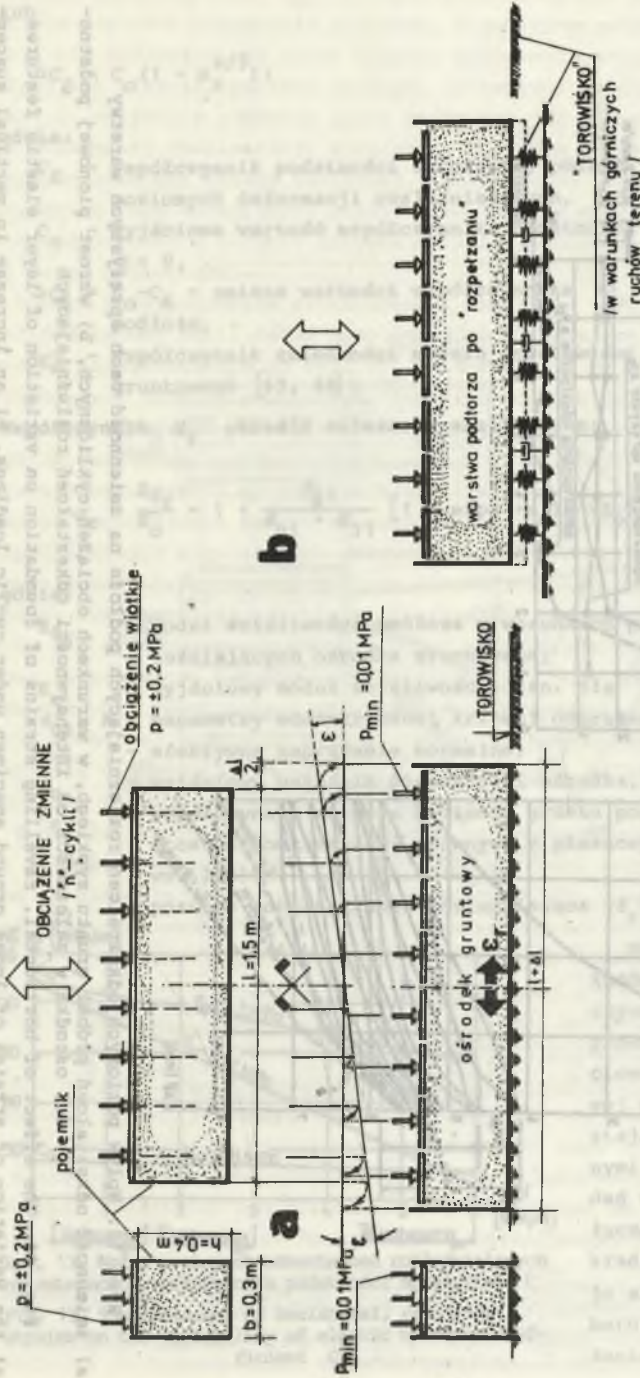
postojowych (odstawczych) można tłumaczyć przyspieszonym procesem wtórnej konsolidacji podtorza i związana z tym odbudową jego pierwotnej sztywności. na skutek długotrwałego obciążenia nawierzchni ciężkim taborem trakcyjnym.

Zaobserwowanych zmian wartości parametru  $C$  nie można tłumaczyć innymi czynnikami, takimi jak np. znaczne dodatkowe zawilgocenie podtorza, zmiana warunków klimatycznych (pór roku), zmianą warunków obciążenia, robotami podtorzowymi czy też ewentualnymi błędami pomiarowymi [73]. Zostały one spowodowane bezpośrednią ingerencją deformującego się podłoża górniczego, głównie zaś wpływem poziomych odkształceń  $\epsilon$ , w obrębie silnie przekonsolidowanych gruntów aktywnej strefy podtorza.

Pewne dodatkowe informacje o przebiegu zjawiska można uzyskać również drogą odpowiednio zaprogramowanych badań laboratoryjnych, aczkolwiek mają one charakter wyłącznie jakościowy [71, 77]. Na stanowisku badawczym konstrukcji A. Rosikonii [138] zrealizowano w tym celu serię doświadczeń, a najbardziej charakterystyczne dla nich wyniki przedstawiono na rys. 11. Obciążona powierzchnia warstwy gruboziarnistego piasku (rys. 11a), o wymiarach początkowych  $0,3 \times 1,50$  m i miąższości  $0,4$  m, poddawana była cyklowi obciążeń i odciążeń w przedziale porównywalnym z warunkami rzeczywistymi, ( $p = 0,01-0,2$  MPa) aż do praktycznego zaniku niesprężystej histerezy jego odkształcalności (odkształceń trwałych;  $\Delta y_{p1} \approx 0$ ). Postępujący proces zagęszczania ośrodka (który odpowiadał przeważnie 6-8 cyklom) sprawiał, iż przekształcała się ona w histerezę sprężystą (rys. 12), co z kolei uznano za stan optymalny dla podłoża rusztu torowego w warunkach eksploatacyjnych. Drugi etap każdego z eksperymentów polegał na jednorodnym rozluźnieniu modelowego podtorza (pojemnika) w kierunku długości stanowiska badawczego, co odbywało się na etapie odciążenia warstwy ( $p = 0,01$  MPa). Elementy obciążające powierzchnię tego swoistego "edometru" nie były ze sobą połączone (obciążenie wlotkie), co pozwalało uniknąć charakterystycznego w tych warunkach efektu klamrującego górną powierzchnię warstwy [65, 88, 138]. Również i w tym przypadku zarejestrowano wyraźne zwiększenie sprężystych (początkowych) odkształceń pionowych testowanej warstwy. Ze względu na sztywną (niepodatną) podstawę samego stanowiska badawczego, były one jednakże mniejsze od obserwowanych w warunkach terenowych. Rozluźnienie objęło tu bowiem jedynie cienką warstwę ośrodka, podczas gdy w rzeczywistości zjawisko to już przy rozluźnieniu rzędu kilku mm/m obejmuje swym zasięgiem całą strefę aktywną podtorza (rys. 6). Z tych też względów ilościowe próby laboratoryjnej symulacji tego specyficznego efektu są znacznie utrudnione.

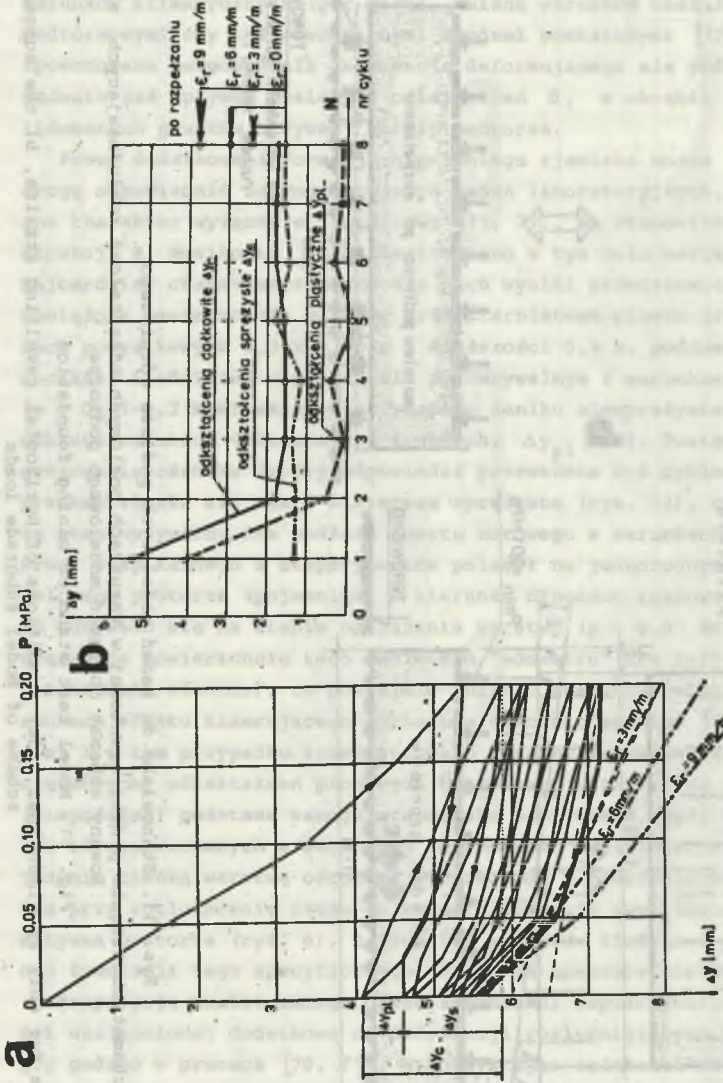
Propozycję analitycznego opisu zmienności współczynnika  $C$ , jako wielkości uzależnionej dodatkowo od deformacji rozluźniających podłoża górniczego, podano w pracach [70, 71]. Wykorzystując założenia metody odkształceń trójosiowych podłoża obciążonego w sposób ciągły belką o założonej sztywności, wobec przyjętej dodatkowo tezy o określonej zmienności mechanicznych cech rozluźnianego ośrodka gruntowego, otrzymano zależność:

$$C_{\epsilon} = \alpha_r^{4/3} C_0; \quad (3.2a)$$



Rys. 11. Stanowisko do badań modelowych podłoża górniczego  
 a) rzeczywisty schemat obciążenia próbki gruntowej w warunkach poziomych odkształcających, b) postu-  
 lowany schemat obciążeń modelowego podłoża

Fig. 11. Model test-stand of mining foundation  
 a) a true diagram for soil specimen load under conditions of horizontal ravelling strains, b) the suggested  
 scheme of model subgrade loads



Rys. 12. Wpływ poziomych odkształceń rozluźniającego podłoża na zmienność cech sprężystych warstwy  
 a) zmienność odkształceń próbki gruntu sytykiego, w warunkach obciążeń cyklicznych, b) wzrost pionowej podatno-  
 ści ośrodka w zależności od intensywności odkształceń rozluźniających

Fig. 12. The effect of horizontal, ravelling strains of foundation on variation of layer elastic features  
 a) the variation of strains of loose ground specimen under cyclic loadings, b) an increase in vertical suscep-  
 tibility of medium depending on ravelling strain intensity



lub

$$\Delta C_{\varepsilon} = C_0 (1 - \alpha_r^{4/3}); \quad (3.2b)$$

gdzie:

$C_{\varepsilon}$  - współczynnik podatności sprężystej podłoża podkładów w warunkach poziomych deformacji rozluźniających,

$C_0$  - wyjściowa wartość współczynnika podatności sprężystej, tzn. dla  $\varepsilon = 0$ ,

$\Delta C_{\varepsilon} = C_0 - C_{\varepsilon}$  - zmiana wartości współczynnika  $C_0$  jako efekt rozluźnienia podłoża,

$\alpha_r$  - współczynnik zmienności modułu ściśliwości rozluźnianego podłoża gruntowego [63, 66].

Współczynnik  $\alpha_r$  określa zależność analityczna:

$$\alpha_r = \frac{E_{\varepsilon_r}}{E_0} = 1 + \frac{\sigma_{01}}{\sigma_{01} + \sigma_{11}} [1 - \exp(1+e_0)(1-K_0)(1+\rho)A^{-1}\varepsilon_{22}]; \quad (3.3)$$

gdzie:

$E_{\varepsilon_r}$  - moduł ściśliwości podłoża w warunkach poziomych odkształceń rozluźniających ośrodka gruntowego,

$E_0$  - wyjściowy moduł ściśliwości, tzn. dla  $\varepsilon_{22} = 0$ ,

$\sigma_{01}, A$  - parametry edometrycznej krzywej odprężenia [35, 63],

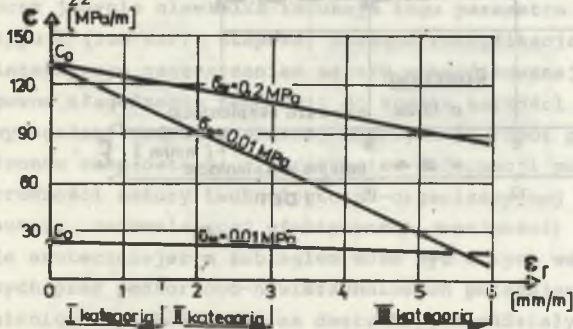
$\sigma_{11}$  - efektywne naprężenie normalne,

$e_0$  - wyjściowy wskaźnik porowatości ośrodka,

$K_0$  - współczynnik rozporu bocznego gruntu podtorza (dla  $\varepsilon_{22} = 0$ ),

$\rho$  - stosunek odkształceń głównych w płaszczyźnie poziomej (patrz wz. 2.8),

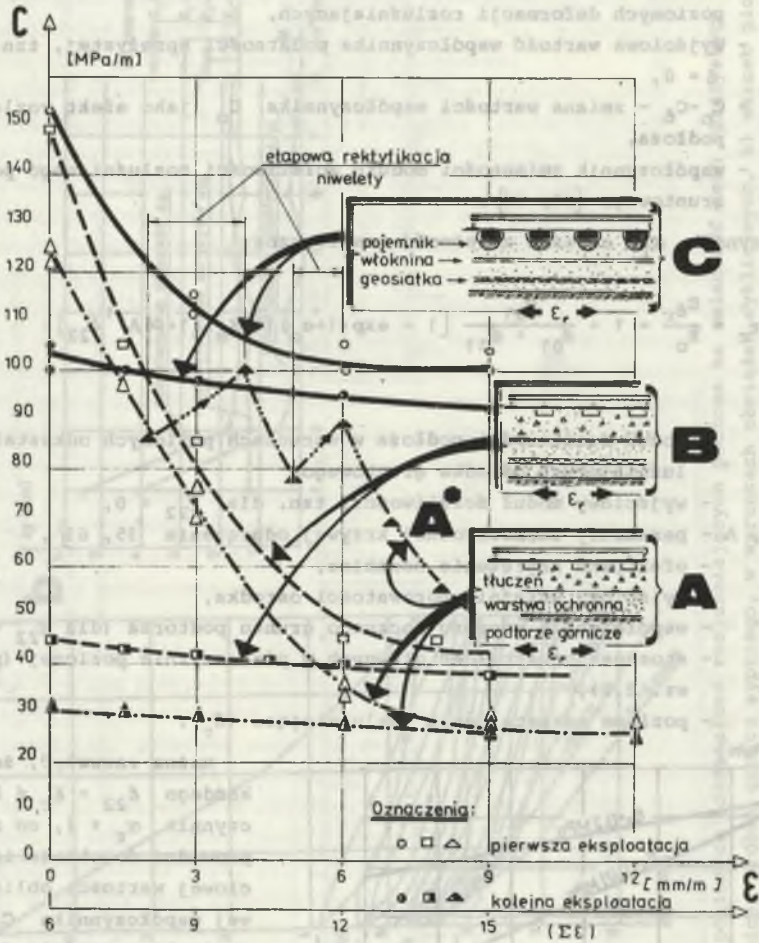
$\varepsilon_{22}$  - poziome odkształcenie rozluźniające ( $\varepsilon_r$ ).



Rys. 13. Wpływ poziomych odkształceń rozluźniających na zmienność współczynnika podatności sprężystej  $C_{\varepsilon}$ .

Fig. 13. The influence of horizontal, ravelling strains on the variability of elastic reaction coefficient  $C$ .

Można zauważyć, że dla każdego  $\varepsilon_{22} = \varepsilon_r \neq 0$  współczynnik  $\alpha_r < 1$ , co z kolei prowadzi do obniżenia wyjściowej wartości obliczeniowej współczynnika  $C_0$ . Pozostaje to w zgodzie z opisanymi uprzednio wynikami badań terenowych. Analiza załączonego na rys. 13 przykłądu obliczeniowego wskazuje na tendencję do znacznie bardziej intensywnego obniżania się pierwotnie wysokiej



Rys. 14. Wpływ rodzaju konstrukcji nawierzchni na zmienność współczynnika C w warunkach odształceń rozluźniających

Fig. 14. The influence of track structure construction on the variability of coefficient C in loosen strain conditions

wartości współczynnika  $C_0$ , i odpowiednio znacznie łagodniejszy jej spadek dla wartości pierwotnie niższych. W praktyce oznacza to, iż w podtorzu linii nie podlegających dotąd wpływowi deformacji górniczych wystąpią z reguły w ich efekcie znacznie bardziej intensywne zmiany wartości współczynnika  $C$ , aniżeli w podtorzu linii poddanych już uprzednio kilkukrotnym wpływom podziemnej eksploatacji górniczej. W drugim z przypadków typowym dla warunków niwelety trwale obniżonej, należy zatem liczyć się z długotrwałym obniżeniem cech sprężystych podłoża, co z kolei musi wywołać określone reperkusje zarówno w obrębie aktywnej strefy podtorza, jak i w pracy statycznej samej nawierzchni.

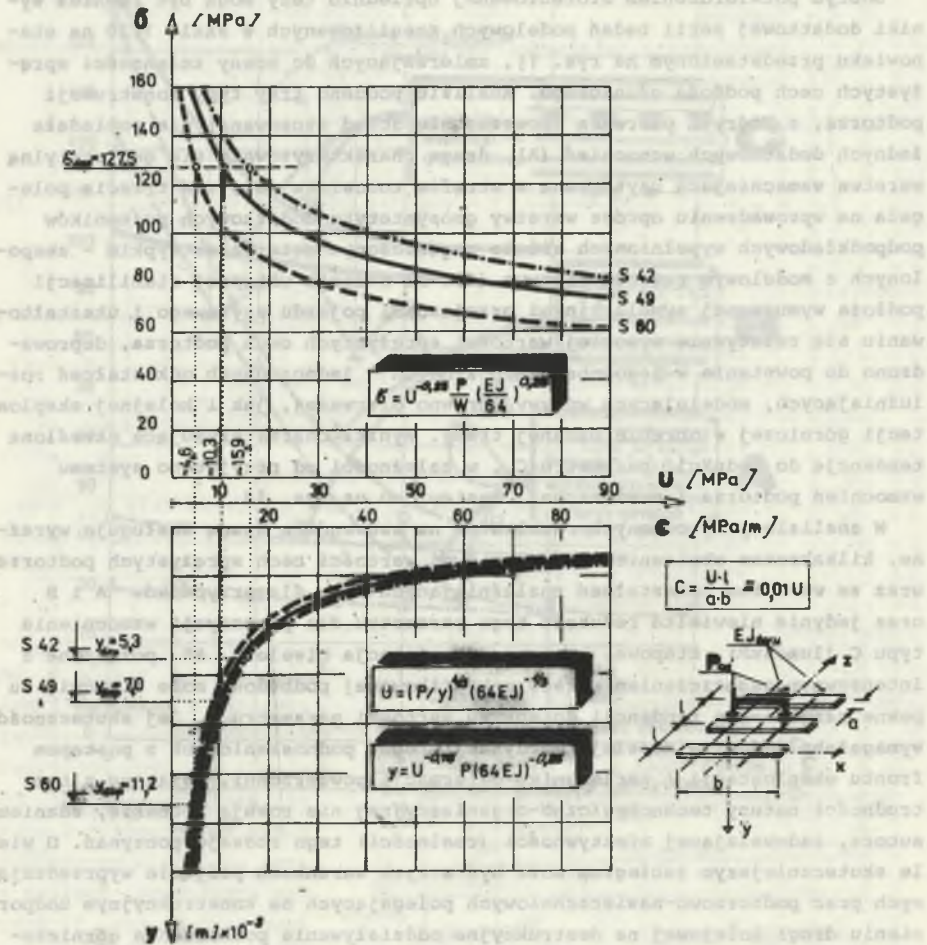
Dobrym potwierdzeniem sformułowanej uprzednio tezy mogą być również wyniki dodatkowej serii badań modelowych zrealizowanych w skali 1:20 na stanowisku przedstawionym na rys. 11, zmierzających do oceny zmienności sprężystych cech podłoża górniczego. Analizie poddano trzy typy konstrukcji podtorza, z których pierwsza (powszechnie dotąd stosowana) nie posiadała żadnych dodatkowych wzmocnień (A), druga charakteryzowała się geotekstylną warstwą wzmacniającą usytuowaną w strefie torowiska (B), zaś trzecia polegała na wprowadzeniu oprócz warstwy geosyntetyku dodatkowych pojemników podpodkładowych wypełnionych silnie zagęszczonym materiałem sypkim - zespolonych z modelowym rusztem torowym (C). Po okresie wstępnej stabilizacji podłoża wymuszonej symulacyjnymi przejazdami pojazdu szynowego, i ukształtowaniu się relatywnie wysokiej wartości sprężystych cech podtorza, doprowadzono do powstania w jego obrębie poziomych - jednorodnych odkształceń rozluźniających, modelujących wpływy zarówno pierwszej, jak i kolejnej eksploatacji górniczej w obrębie badanej trasy. Wyniki charakteryzujące określoną tendencję do redukcji parametru  $C_0$ , w zależności od przyjętego systemu wzmocnień podtorza i nawierzchni, zestawiono na rys. 14.

W analizie przytoczonych rezultatów na szczególną uwagę zasługuje wyraźne, kilkakrotne obniżenie się wyjściowej wartości cech sprężystych podtorza wraz ze wzrostem odkształceń rozluźniających  $\epsilon_r$  dla przypadków A i B oraz jedynie niewielka redukcja tego parametru dla propozycji wzmocnienia typu C (lub 4xP). Etapowa, bieżąca rektyfikacja niwelety A\* połączona z intensywnym zagęszczaniem warstw rektyfikowanej podbudowy może stanowić tu pewne złagodzenie tendencji do spadku wartości parametru  $C$ . Jej skuteczność wymagałaby jednakże ścisłej koordynacji robót podnoszeniowych z postępem frontu eksploatacji i narastaniem deformacji powierzchni. Związane z tym trudności natury technologiczno-organizacyjnej nie rokują jednakże, zdaniem autora, zadowalającej efektywności (realności) tego rodzaju poczynić. O wiele skuteczniejszym zabiegiem może być w tych warunkach podjęcie wyprzedzających prac podtorzowo-nawierzchniowych polegających na konstrukcyjnym uodpornieniu drogi kolejowej na destrukcyjne oddziaływania pochodzenia górniczego, np. według koncepcji oznaczonej tu schematem C. System ten, zapewniając wzrost nośności podłoża rusztu torowego (geotekstylny pojemnik), wpływa równocześnie na kompensację odkształceń rozluźniających (geosiatka) nie dopuszczając do ich rozwoju w obrębie przypowierzchniowych stref podtorza.

Prace nad tym rozwiązaniem są obecnie kontynuowane pod kierunkiem autora i znajdują się w fazie prób na odcinkach doświadczalnych.

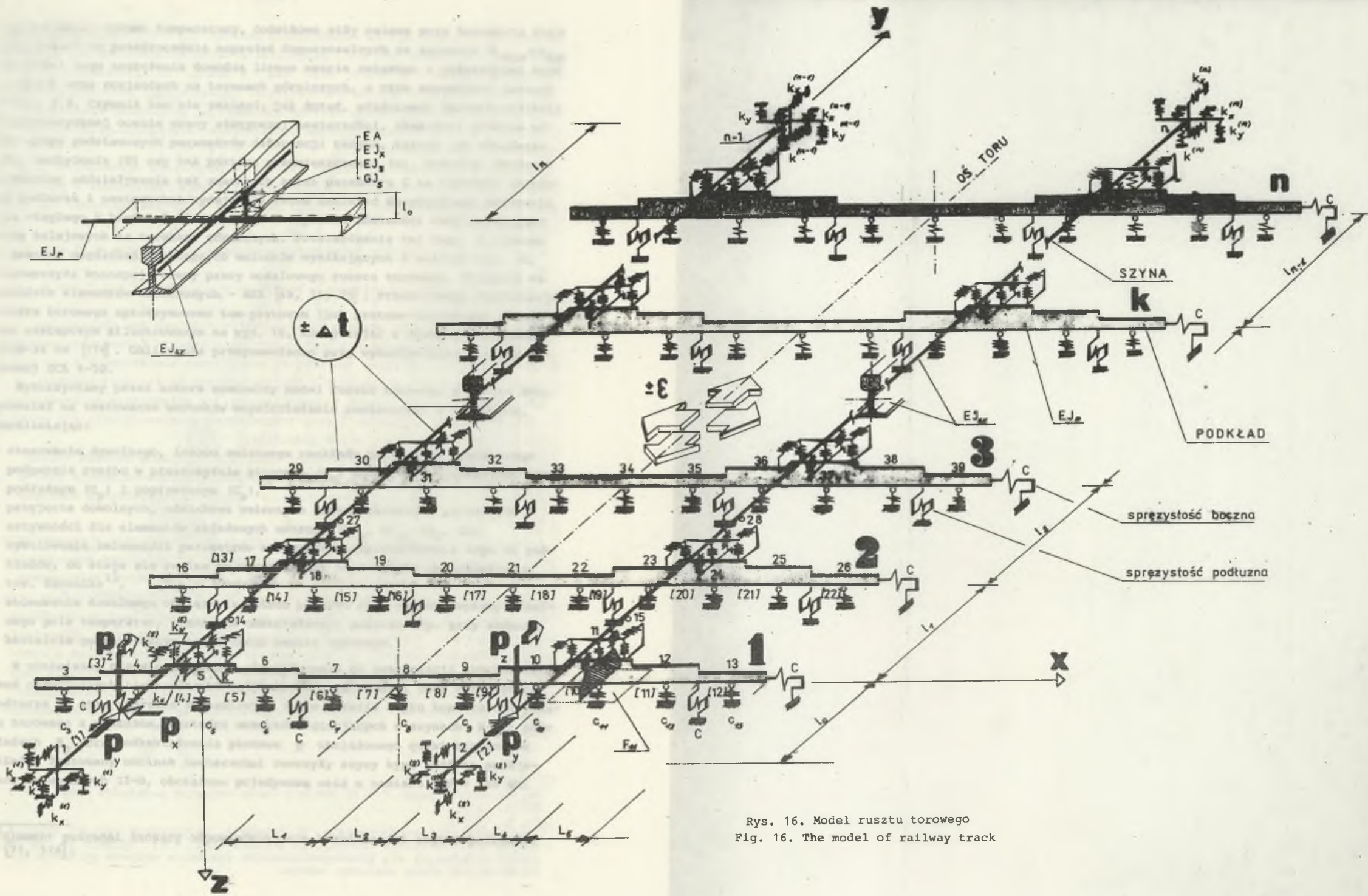
Graficzną ilustracją tezy, wiążącej poprzez funkcję ugięcia  $y$  (3.1e) zmienność współczynnika  $C$  (lub  $U$  - współczynnika sprężystości podparcia szyny), ze zmianami naprężeń zginających w tokach szynowych (3.1a) trzech podstawowych typów przedstawiono na rys. 15.

Rejestrowany w warunkach terenowych rząd wielkości współczynnika  $C$  może w skrajnych warunkach pracy nawierzchni (przy superpozycji innych czynników, takich jak np.: zmęczenie materiału, znaczne niejednorodne rozluźnienie)



Rys. 15. Wpływ zmienności cech sprężystych podtorza na ugięcia nawierzchni  $y$  oraz naprężenia zginające w szynach  $\sigma$

Fig. 15. The effect of variability of subgrade elastic features on track structure deflections  $y$  and bending stresses in rails  $\sigma$



Rys. 16. Model rusztu torowego  
 Fig. 16. The model of railway track

nie podtorza, wzrost temperatury, dodatkowe siły osiowe przy hamowaniu itp.) doprowadzić do przekroczenia naprężeń dopuszczalnych na zginanie  $\sigma_{rzecz} > \sigma_{dop}$ . Realności tego zagrożenia dowodzą liczne awarie związane z pęknięciami szyn w torach oraz rozjazdach na terenach górniczych, o czym wspomniano szerzej w pkt. 2.3. Czynnikiem ten nie znalazł, jak dotąd, właściwego odzwierciedlenia w merytorycznej ocenie pracy statycznej nawierzchni, skupionej głównie wokół grupy podstawowych parametrów deformacji terenu, takich jak obniżenie ( $w$ ), nachylenie ( $T$ ) czy też poziome przemieszczenie ( $u$ ). Pośredni (wtórny) charakter oddziaływania tak znacznych zmian parametru  $C$  na elementy składowe podtorza i nawierzchni wydaje się zatem nabierać decydującego znaczenia dla ciągłego i bardziej niezawodnego utrzymania zdatności eksploatacyjnej dróg kolejowych na terenach górniczych. Potwierdzenia tej tezy, a zarazem i pewnego uogólnienia wstępnych wniosków wynikających z analizy rys. 15, dostarczyła koncepcja oceny pracy modelowego rusztu torowego, bazująca na metodzie elementów skończonych - MES [69, 71, 75]. Przestrzenną konstrukcję rusztu torowego aproksymowano tam prętowym (lub prętowo-tarczowym) schematem zastępczym zilustrowanym na rys. 16, korzystając z systemu programów IDIM-34 JW [174]. Obliczenia przeprowadzono przy wykorzystaniu maszyny cyfrowej ICL 4-50.

Wykorzystany przez autora nominalny model rusztu torowego w ujęciu MES, pozwalał na testowanie warunków współdziałania nawierzchni z podtorzem, umożliwiając:

- stosowanie dowolnego, losowo zmiennego rozkładu parametrów sprężystego podparcia rusztu w płaszczyźnie pionowej ( $C_z$ ) oraz poziomej: na kierunku podłużnym ( $C_y$ ) i poprzecznym ( $C_x$ ),
- przyjęcie dowolnych, odcinkowo zmiennych giętno-skrętnych parametrów sztywności dla elementów składowych ustroju ( $EJ_x$ ,  $EJ_y$ ,  $GJ_s$ ,  $EA$ ),
- symulowanie zmienności parametrów sztywności przytwierdzenia szyn do podkładów, co staje się realne po wprowadzeniu do schematu obliczeniowego tzw. łącznika<sup>13</sup>,
- stosowanie dowolnego obciążenia układu poprzez siły masowe, wpływy lokalnego pola temperatur, wymuszone odkształcenia podłoża itp. przy zadanym kształcie geometrycznym konstrukcji rusztu torowego.

W niniejszej pracy ograniczono się wyłącznie do prezentacji wyników obliczeń numerycznych ilustrujących wpływ realnej zmienności cech sprężystych podtorza na stan naprężeń kontaktowych ( $p$ ) w strefie styku konstrukcji rusztu torowego z podłożem, wartości momentów zginających w szynach  $M_{sz}$  i podkładach  $M_p$  oraz odkształcenia pionowe  $y$  obciążonego quasi-statycznie układu. Testowany odcinek nawierzchni tworzyły szyny typu S-49 na podkładach drewnianych II-B, obciążone pojedynczą osią o nacisku  $2P = 196$  kN.

<sup>13</sup>Element pośredni łączący odpowiednio osie bezwładności szyn i podkładów [71, 174].

Parametrem zmiennym był tu współczynnik podłoża  $C_0 = C_z$ , który według kryteriów J. Eisenmanna [28, 29], przybierał kolejno wartości: bardzo dobrą - 130 MPa/m, dobrą - 40 MPa/m oraz złą - 3 MPa/m, co zilustrowano na rys. 17a-c. Przyjęto, że wartość ostatnia, zaobserwowana doświadczalnie w przypadku podtorza poddanego wpływom wielokrotnej podziemnej eksploatacji górniczej, stanowi skrajne - dolne ograniczenie testowanego przedziału zmienności współczynnika C.

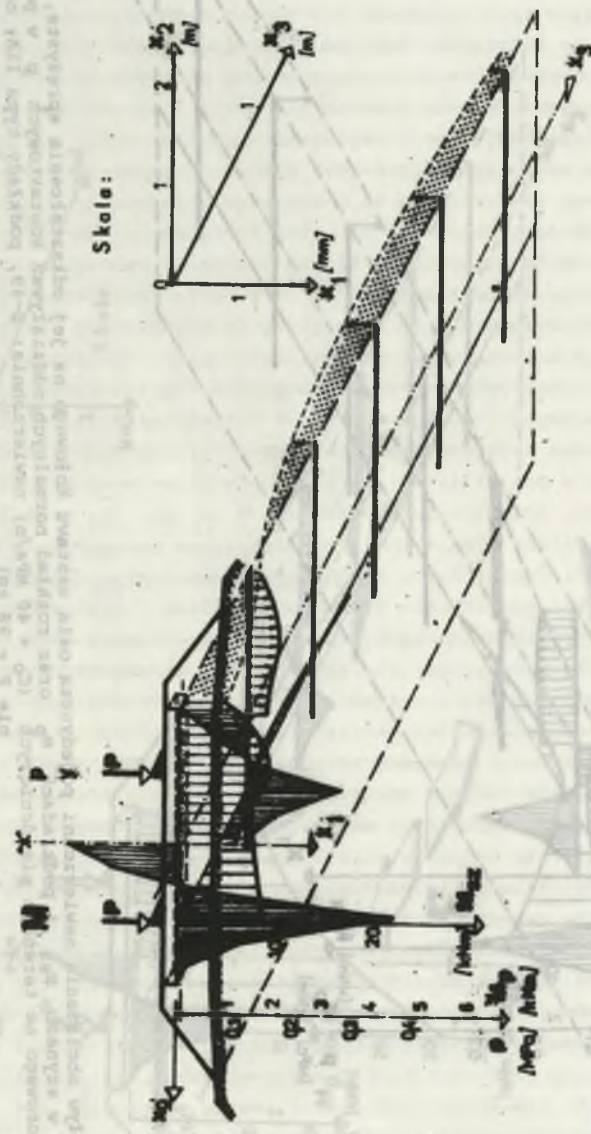
Analiza porównawcza uzyskanych rezultatów potwierdza wcześniejszą tezę o zasadniczym zróżnicowaniu warunków współdziałania nawierzchni z podtorzem wraz z określoną fluktuacją wartości parametru C, w szczególności zaś uwagę zwraca:

- istotny wzrost momentów zginających w szynach  $M_{sz}$  z około 8-15 kNm do 32 kNm
- redukcja momentów zginających w pokładach  $M_p$ ; z około 4,4-3,7 kNm do 2,0 kNm
- zwiększenie strzałki ugięcia nawierzchni ( $y > 10$  mm) pod obciążeniem oraz znaczne wydłużenie się strefy odrywania przęsła torowego od podłoża,
- redystrybucja normalnych (pionowych) oddziaływań kontaktowych p (z poziomu 0,3-0,35 MPa do około 0,2 MPa) polegająca na znacznej redukcji ciśnień w podstawie rusztu torowego z uwagi na wciągnięcie do współpracy większej liczby podkładów<sup>14</sup> przy równoczesnym ujednorodnieniu się wartości naprężeń normalnych w ich podstawie;
- w przypadku obciążenia nawierzchni taboroem. o rozstawie osiowym wózków mniejszym od  $0,75 \pi L$  [70] naprężenie w podsypce oraz osiadania rusztu torowego w dalszym ciągu wzrastają z uwagi na superpozycję oddziaływań<sup>15</sup>.

Odształcenia rozluźniające podłoża górniczego, ingerując w proces zmian jego sztywności, przyczyniają się zatem okresowo do wyraźnego pogorszenia warunków współpracy podtorza z nawierzchnią dróg kolejowych. Podejmowane działania profilaktyczne powinny więc uwzględniać zabiegi zmierzające przede wszystkim do konstrukcyjnego uodpornienia drogi kolejowej na działanie szkód górniczych, głównie zaś do możliwie szybkiego i trwałego odtworzenia cech sprężystych podtorza na ustalonym uprzednio poziomie. Jednym z właściwych i najprostszych środków technicznych sprzyjających samoistnie temu procesowi jest systematyczne (etapowe) podnoszenie niwelety obniżeniowej toru, z równoczesnym - intensywnym zagęszczeniem kolejnych warstw podbudowy.

<sup>14</sup> Trzy podkłady przy  $C = 40$  MPa/m i około dziewięć podkładów przy  $C = 3$  MPa/m.

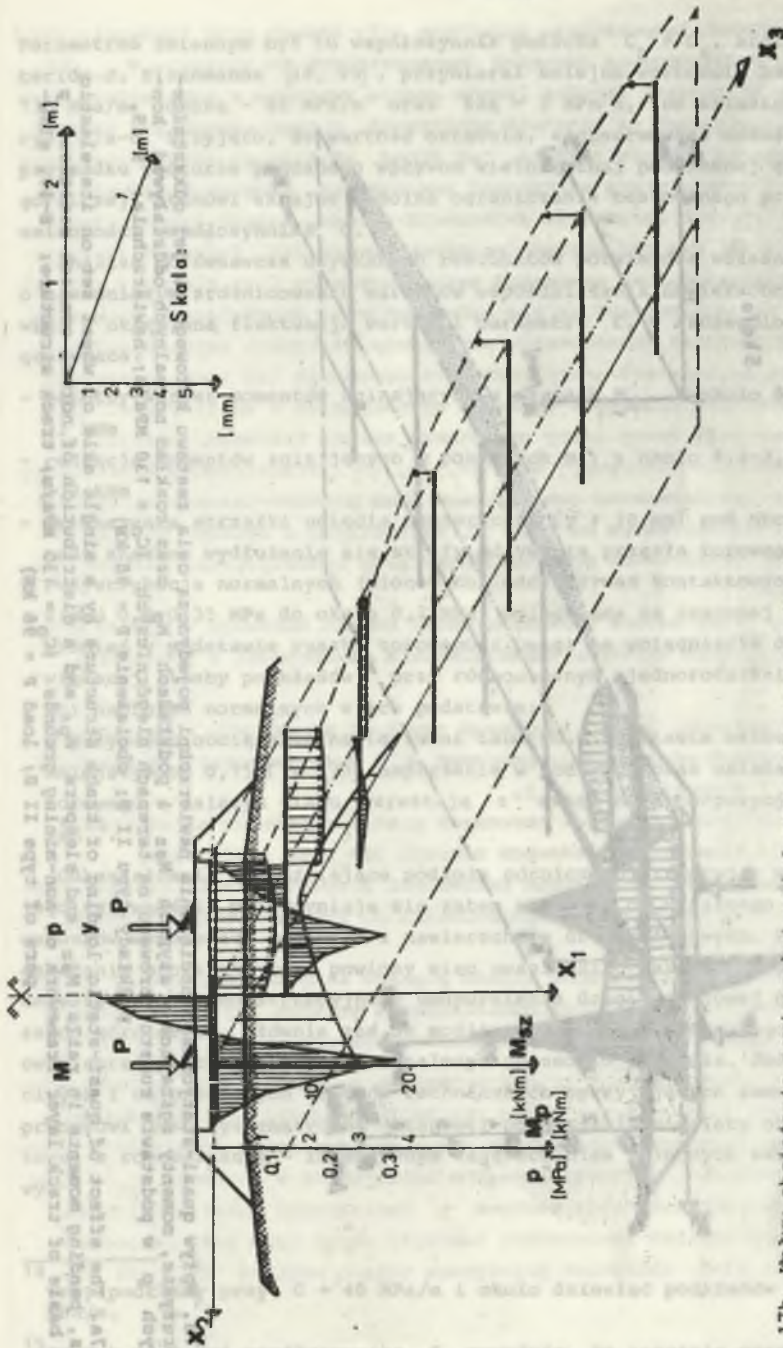
<sup>15</sup> Spadek wartości współczynnika C powoduje, że znacznie wzrasta długość strefy docisku rusztu torowego do podłoża (rys. 17c). Sprawia to, że znacznie zwiększa się prawdopodobieństwo sumowania wpływów od dwóch sąsiednich osi wózka jezdnego taboru.



Rys. 17a. Wpływ quasi-statycznego obciążenia nawierzchni powierzchniowej osia zestawu kołowego na jej odkształcenia sprężyste, momenty zginające w szynach  $M_z$  i podkładkach  $M_p$  oraz rozkład normalnych oddziaływań kontaktowych  $p$  w podstawie rusztu torowego na terenach niegórnictwowych ( $C_0 = 130 \text{ MPa/m}$ ; nawierzchnia: S-49, podkłady typu II B; obciążenie  $P = 98 \text{ kN}$ ).

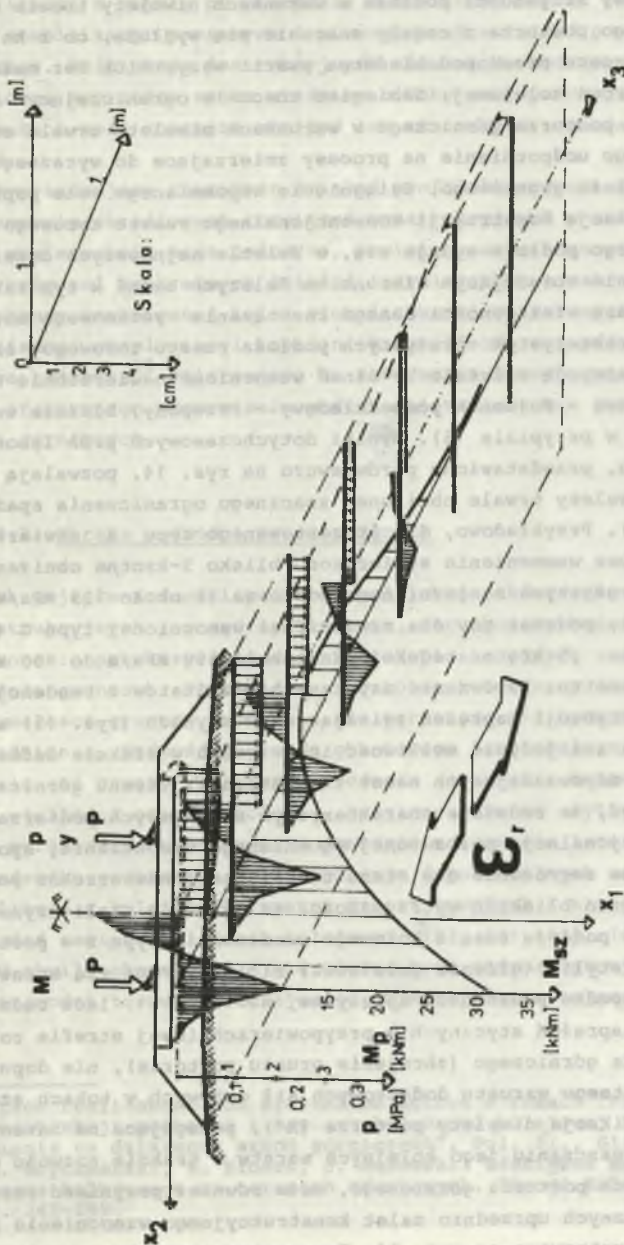
Fig. 17a. The effect of quasi-static loading of track structure by a single axle of wheel set on its elastic strains, bending moments in rails  $M_z$  and sleepers  $M_p$ , and a distribution of normal contact reactions  $p$  in the basis of track layer framework on non-mining grounds ( $C_0 = 130 \text{ MPa/m}$ ; track structure: S-49, sleepers of type II B; load  $P = 98 \text{ kN}$ ).





Rys. 17b. Wpływ obciążenia nawierzchni pojedynczą osią zestawu kołowego na jej odkształcenia sprężyste, momenty zginające w szynach  $M_{sz}$  i podkładach  $M_p$  oraz rozkład normalnych oddziaływań kontaktowych  $P$  w podstawie rusztu torowego na terenach niegórnictw (Co = 40 MPa/m; nawierzchnia: S-49, podkłady typu IIB; obciążenie  $P = 98$  kN)

Fig. 17b. The effect of loading the track structure by a single wheel set axle on its elastic strains, bending moments in rails  $M_{sz}$  and sleepers  $M_p$ , and a distribution of normal contact interactions  $P$  in the basis of track, layer framework on non-mining grounds (Co = 40 MPa/m; track structure: S-49, sleepers of type II B; load  $P = 98$  kN)



Rys. 17c. Wpływ quasi-statycznego obciążenia nawierzchni pojedynczą osią zestawu kołowego na jej odkształcenia sprężyste, momenty zginające w szynach  $M_{sz}$  i podkładach  $M_p$  oraz rozkład normalnych oddziaływań kontaktowych  $p$  w podstawie rusztu torowego na terenach górniczych ( $C_s \approx 3$  MPa/m; nawierzchnia: S-49, podkłady typu II B; obciążenie  $P = 98$  kN)

Fig. 17c. The effect of quasi-static loading of track structure by a single axle set on its elastic strains, bending moments in rails  $M_{sz}$  and sleepers  $M_p$  and a distribution of normal contact interactions  $p$  in the basis of track layer framework on mining grounds ( $C_s \approx 3$  MPa/m; track structure: S-49, sleepers of type II B; loading  $P = 98$  kN)

Podjęwane obecnie w praktyce coraz to powszechniejsze zalecenia o celowości stosowania tzw. niwelety trwale obniżonej [138, 161], uzasadniane ponadto względem natury ekonomicznej (jak i brakami natury materiałowej oraz sprzętowej), mogą w tych warunkach nie zapewnić pożądaných rezultatów.

Proces odbudowy sztywności podłoża w warunkach niwelety trwale obniżonej i nie wzmocnionego podtorza z reguły znacznie się wydłuża, co z kolei przyczynia się do wzrostu prawdopodobieństwa awarii wszystkich bez mała elementów składowych drogi kolejowej. Zabiegiem znacznie ograniczającym redukcję cech sprężystych podtorza górniczego w warunkach niwelety trwale obniżonej może stać się jego uodpornienie na procesy zmierzające do wyraźnego obniżenia nośności podłoża gruntowego. Osiągnięcie wspomnianego celu poprzez odpowiednią modyfikację konstrukcji konwencjonalnego rusztu torowego oraz jego bezpośredniego podłoża wydaje się, w świetle najnowszych doświadczeń autora, szczególnie obiecującym kierunkiem dalszych badań w tym zakresie.

Uznając za miarę efektywności danego rozwiązania systemowego możliwie niski spadek charakterystyk sprężystych podłoża rusztu torowego, za szczególnie trafną koncepcję należało by uznać wzmocnioną nawierzchnię typu 4xP (Podkład - Podszwa - Pojemnik podpodkładowy - Przepony; bliższe uwagi na ten temat podano w pr. ypisie 16). Wyniki dotychczasowych prób laboratoryjnych tego systemu, przedstawione porównawczo na rys. 14, pozwalają bowiem oczekiwać dla niwelety trwale obniżonej znacznego ograniczenia spadku parametru  $C = f(\delta)$ . Przykładowo, dla prezentowanego typu A nawierzchni konwencjonalnej bez wzmocnienia stwierdzono blisko 5-krotne obniżenie się wartości cech sprężystych rozluźnianego podtorza (z około 125 MPa/m do 25 MPa/m mniej), podczas gdy dla nawierzchni wzmocnionej typu C (4xP) rejestrowano jedynie 1,5-krotną redukcję (z około 150 MPa/m do 100 MPa/m) wspomnianego parametru. Porównanie uzyskanych rezultatów z tendencją do określonej dystrybucji naprężeń zginających w szynach (rys. 15) wskazuje z kolei na nieznaną jedynie możliwość ich wzrostu w efekcie deformacji rozluźniających, odpowiadających nawet III kategorii terenu górniczego. Nietrudno zauważyć, że redukcja charakterystyk sprężystych podtorza nawierzchni konwencjonalnej, pozbawionej wspomnianego wzmocnienia, spowoduje relatywnie większe zagrożenie dla stanu technicznego nawierzchni poprzez osiągnięcie naprężeń bliskich wytrzymałości na zginanie stali szynowej.

Zastosowanie w podłożu rusztu torowego wzmocnienia typu B w postaci samych tylko geotekstylii (głównie geosiatek) nie przyczyni się wprawdzie do ograniczenia spadku podatności sprężyste nawierzchni, lecz będzie sprzyjać kompensacji naprężeń stycznych w przypowierzchniowej strefie rozluźniającego się podłoża górniczego (zbrojenie gruntu podtorza), nie dopuszczając tym samym do istotnego wzrostu dodatkowych sił osiowych w tokach szynowych.

Etapowa rektyfikacja niwelety podtorza (A\*), polegająca na intensywnym - sukcesywnym zagęszczaniu jego kolejnych warstw w trakcie rozwoju odkształceń rozluźniających podtorza górniczego, może również przynieść rezultaty zbliżone do omówionych uprzednio zalet konstrukcyjnego wzmocnienia podtorza (np. 4xP), co zilustrowano na rys. 14. Ten system utrzymania nawierzchni

oraz podtorza na terenach górniczych, z uwagi na szereg rygorystycznych wymogów natury technologiczno-organizacyjnej oraz diagnostycznej, nie znalazł jednakże, jak dotąd, szerszego zastosowania. Powszechnie stosowana technika robót podnoszeniowych polega bowiem w swej istocie na przystąpieniu do ich realizacji z reguły po przejściu dynamicznej niecki obniżeniowej i praktycznej stabilizacji poziomych i pionowych odkształceń powierzchni terenu górniczego. Kulminacja destrukcyjnych zjawisk zachodzących w nawierzchni i podtorzu wyprzedza zatem właściwe roboty zabezpieczające, co w określonych warunkach może znacznie obniżyć ich skuteczność, a niejednokrotnie i celowość.

Wyprzedzający charakter działań profilaktycznych, głównie zaś szersze stosowanie określonych rozwiązań konstrukcyjnych o charakterze uodparniającym nawierzchnię oraz podtorze, powinien zatem stanowić, zdaniem autora, przyszły cel konkretnych działań inżynierskich w zakresie ochrony infrastruktury technicznej kolei zlokalizowanej na terenach zagrożonych wpływami podziemnej eksploatacji kopalni. W chwili obecnej podejmowane są intensywne prace badawcze<sup>16</sup> zmierzające do stworzenia nowych, niekonwencjonalnych metod efektywnego wzmocnienia podtorza i nawierzchni drogi kolejowej na terenach górniczych.

### 3.3. Utrata nośności przez podtorze

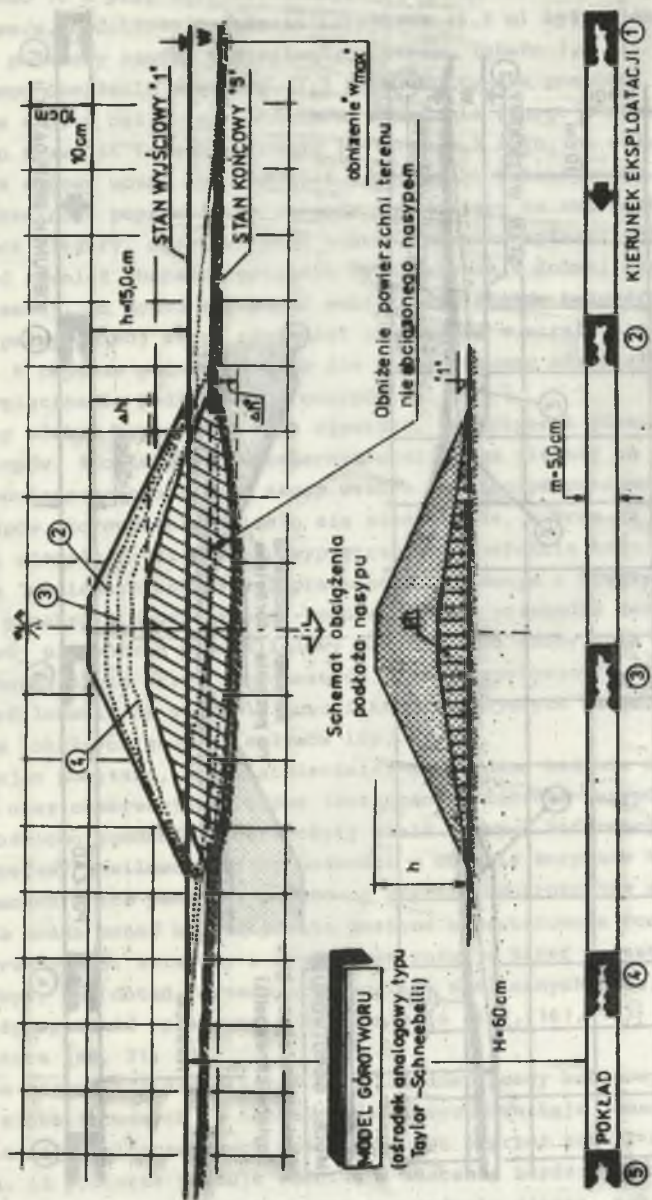
Na pojęcie nośności podtorza kolejowego składa się określony zespół cech konstrukcyjnych jego górnych warstw, warunkujących dostateczną wytrzymałość w procesie przekazywania obciążeń eksploatacyjnych z rusztu torowego na podłoże gruntowe. Problem ten, aczkolwiek związany ściśle z pojęciem wytrzymałości gruntów podtorza, nie ogranicza się bynajmniej do tego tylko zagadnienia. Nośność podtorza gruntowego jest uzależniona od wytrzymałości granicznej gruntu (granicznej nośności gruntu) i bezpośrednio związanej z nią wielkości osiadań podłoża. Przekroczenie tej wytrzymałości np. pod wpływem wzrastającego obciążenia powoduje naruszenie istniejącej dotąd równowagi ośrodka gruntowego. Przekroczenie dopuszczalnych odkształceń podtorza implikuje z kolei niekorzystny wzrost trwałych i z reguły niejednorodnych osiadań nawierzchni drogi kolejowej [127, 131, 133, 143, 155 i in.] .

W chwili obecnej daje się odczuć brak jednoznacznej, trafnej metody oceny nośności torowiska kolejowego. Wykorzystanie zalecanej normatywnie kon-

<sup>16</sup>Prace realizowane pod kierunkiem autora w ramach CPBR-9.3.66 pt.: "Wybór konstrukcji podtorza i nawierzchni drogi kolejowej KRR w aspekcie uodpornienia na działanie szkód górniczych", Pol. Sl., Gliwice 1986-1990; patrz M. Gryczmański, K. Kłosek, J. Sękowski: Efektywne metody wzmocnienia podtorza kolejowego na terenach górniczych. "Drogi Kolejowe", 1987, nr 12, s. 262-268.

cepcji, bazującej na warunku nieprzekroczenia naprężeń krytycznych w płaszczynie torowiska, w porównaniu z propozycjami wywodzącymi się z rozwiązań teorii stanów granicznych, nasuwa bowiem wiele uwag i wątpliwości co do merytorycznej poprawności ujęcia tego zagadnienia, o czym świadczą m.in. wnioski z prac Ł. Siewczyńskiego [143, 144, 145], jak i autora [76, 77]. Wobec niezadowalającego stanu technicznego podtorza wielu linii [100] oraz znacznej rozbieżności wyników uzyskiwanych przy wykorzystaniu powyższych propozycji obliczeniowych, potrzeba dalszych - intensywnych prac w tym zakresie wydaje się oczywistą. W warunkach deformacji terenu górniczego zagadnienie oceny nośności podtorza gruntowego nabiera zgoła odmiennego charakteru. Z uwagi na specyficzny przebieg zjawisk mechanicznych zachodzących wówczas w ośrodku gruntowym, wywołanych przede wszystkim jego poziomym rozluźnieniem w brzegowej strefie niecki obniżeniowej, do przekroczenia granicznej nośności gruntu dochodzi nie wskutek wzrostu nacisków jednostkowych na podłoże, lecz w efekcie redystrybucji poziomych składowych stanu naprężenia zgodnie z zależnościami (2.8) i (2.10). Interpretacja tego procesu sprawdzana np. przez J. Kwiatka [88] do różnicy w wielkościach parcia czynnego i biernego gruntu na wyodrębnionej w podłożu pionowej płaszczynie<sup>17</sup>, w swej istocie polega na takim zmniejszeniu się poziomych naprężeń w rozluźnionym podłożu, że uniemożliwia ono mobilizację pełnej wartości parcia biernego. Spowodowana tym zjawiskiem utrata pierwotnej nośności gruntu może zostać przywrócona jedynie poprzez wtórną komprymację podłoża - ta zaś staje się bezpośrednią przyczyną dodatkowych osiadań podtorza wraz z nawierzchnią połączonych z wytworzeniem się w ośrodku gruntowym nowego stanu równowagi. W podłożu górniczym obciążonym budowlą zjawisko to określa się mianem *chwilowej* utraty nośności. Jest ono powszechnie obserwowane na terenach górniczych i polega na dodatkowym zagębianiu się budowli w podłożu, ponad wartość obniżenia przyległego terenu. Na specyfikę tego zjawiska w odniesieniu do aktywnej strefy podtorza i kolejowych budowli ziemnych zwrócono uwagę w pracach [71, 74]. Bazując na wynikach własnych eksperymentów modelowych i rozpoznawczych badań poligonowych, dostrzeżono wyraźne zróżnicowanie charakteru deformacji korpusu nasypów oraz przekopów kolejowych na terenach górniczych. Na rys. 18 i 19 przedstawiono ilustrację graficzną najbardziej charakterystycznych wyników badań modelowych z tego zakresu, w trakcie których wykorzystano ośrodek analogowy typu T-S. Analizowane zagadnienia dotyczyły najniekorzystniejszego wariantu sytuacyjnego, tzn. prostopadłego usytuowania frontu eksploatacji górniczej w stosunku do podłużnej osi trasy. Za szczególnie interesujący w tych badaniach można było uznać efekt zwiększonego osiadania korpusu budowli nasypowych, zbliżony do "pozornego tonięcia" całych obiektów - głównie w brzegowej strefie niecki

<sup>17</sup> Rozwiązanie to dla podłoża niegórniczego zaproponował S.J. Bełżecki [35]; patrz też [94], gdzie określono je na podstawie równowagi klinów odłamu Rankina.



Rys. 18. Modelowe odwzorowanie wpływu dynamicznej niecki obniżeniowej na komunikacyjne budowle nasypowe przy wykorzystaniu analogu gruntowego typu T-S'  
 Fig. 18. A model representation of the effect of dynamic subsiding trough on communication earthen structures making use of ground analog of type T-S'

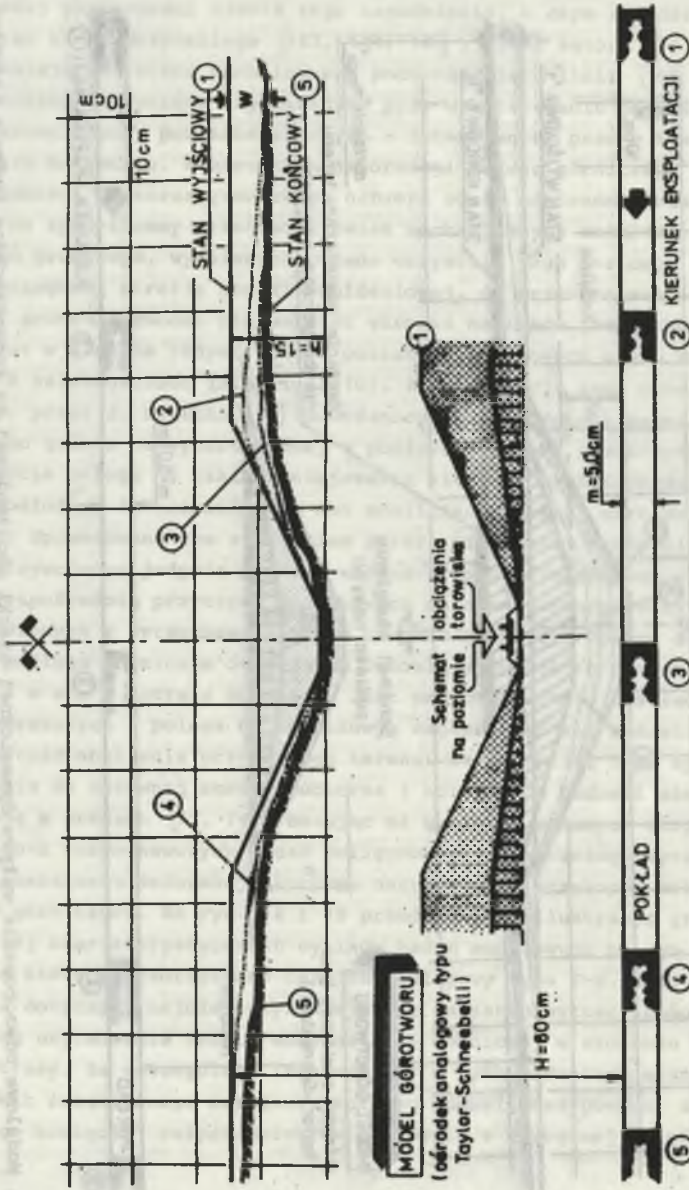


Fig. 19. Modelowe odwzorowanie wpływu dynamicznej niecki obniżeniowej na przekopy przy wykorzystaniu analogu gruntowego typu T-S  
ground analog of type T-S

obniżeniowej. Największe dodatkowe osiadania rejestrowano w środkowej strefie podłoża nasypów. Podobnie rzecz miała się w odniesieniu do obiektów terenowych. Przykładowo, dla jednego z obserwowanych nasypów kolejowych o wysokości około 10 m przy zarejestrowanych odkształceniach rozluźniających rzędu 3-4 mm/m, dodatkowe osiadania torowiska (0,9 m) były niemalże równe obniżeniu podstawy nasypu i przyległego terenu (około 1,0 m). W wartości bezwzględnego obniżenia niwelety (1,9 m) mieściły się ponadto, stosunkowo równomierne wzdłuż osi trasy, dodatkowe osiadania samego rusztu torowego w stosunku do krawędzi torowiska rzędu 10-15 cm/0,5 roku, co zilustrowano na rys. 20. Za typowy można było również uznać efekt intensywnego wzrostu deformacji przekroju poprzecznego nasypów, polegający na zmianach nachylenia skałp, które ulegały, ogólnie rzecz biorąc, pewnemu spłaszczeniu. Można było zauważyć również charakterystyczne wybrzuszenia w dolnej części korpusu budowli ziemnej, co mogło sugerować mobilizację stanów bezpośrednio poprzedzających pełny rozwój stref równowagi granicznej w strefach przyskarpowych [74]. W rejonie podstawy skarp nie zaobserwowano odkształceń wskazujących na wypiętrzenie podłoża spod nasypów.

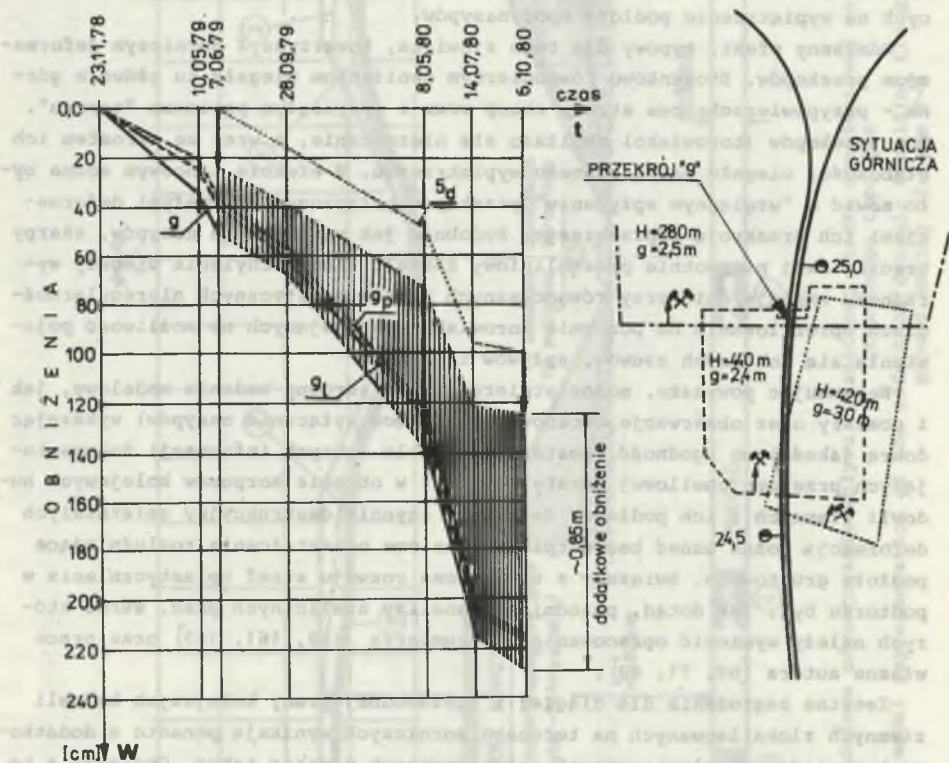
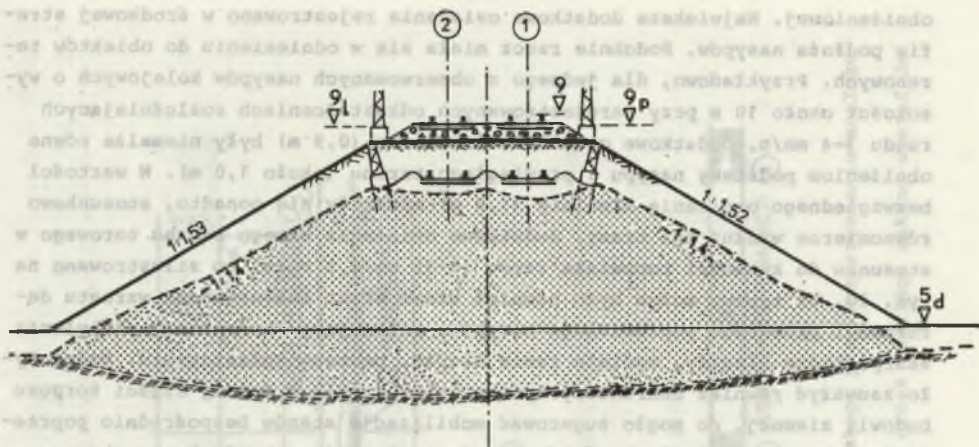
Odmienny efekt, typowy dla tego zjawiska, towarzyszył górnicyzmu deformacjom przekopów. Stosunkowo równomiernym obniżeniom ulegały tu głównie górne - przypowierzchniowe strefy skarp wraz z przyległym poziomem "terenu". Dno przekopów (torowisko) obniżało się nieznacznie, a wraz ze wzrostem ich głębokości ulegało nawet pewnemu wypiętrzeniu. W efekcie końcowym można było mówić o "względnym spłycceniu" przekopów połączonym z trwałymi deformacjami ich przekroju poprzecznego. Podobnie jak w przypadku nasypów, skarpy traciły swój pierwotnie prostoliniowy kształt, ich nachylenia ulegały wyraźnemu zmniejszeniu przy równoczesnych charakterystycznych nieregularnościach oprofilowania na poziomie torowiska, wskazujących na możliwość pojawienia się lokalnych zsuwów, spływów itp.

Reasumując powyższe, można stwierdzić, że zarówno badania modelowe, jak i pomiary oraz obserwacje terenowe (dotyczące wyłącznie nasypów) wykazują dobrą jakościowo zgodność, dostarczyły wielu cennych informacji dokumentujących przejawy chwilowej utraty nośności w obrębie korpusów kolejowych budowli ziemnych i ich podłoża. Za główny czynnik destrukcyjny zaistniałych deformacji można uznać bez wątpienia poziome odkształcenia rozluźniające podłoża gruntowego. Związany z tym proces rozwoju stref uplastycznienia w podtorzu był, jak dotąd, przedmiotem analizy nielicznych prac, wśród których należy wymienić opracowania W. Szumierza [160, 161, 163] oraz prace własne autora [69, 71, 80].

Istotne zagrożenia dla ciągłej i niezawodnej pracy kolejowych budowli ziemnych zlokalizowanych na terenach górniczych wynikają ponadto z dodatkowych obciążeń eksploatacyjnych przekazywanych poprzez tabor. Obciążenia te sprawiają, iż podtorze pracuje wówczas w znacznie bardziej złożonym stanie naprężenia aniżeli inne zlokalizowane tam budowle ziemne, takie jak np. obwałowania zbiorników nadpoziomowych, groble osadników przemysłowych, kana



- 68 -  
 PRZEKRÓJ Nr 9  
 km 24,9+287



Rys. 20. Wyniki badań poligonowych nasypu kolejowego (H = 10 m) zlokalizowanego w zasięgu oddziaływań podziemnej eksploatacji górniczej

Fig. 20. The results of proof ground investigations of railway embankment (H = 10 m) located within a range of influences of underground mining

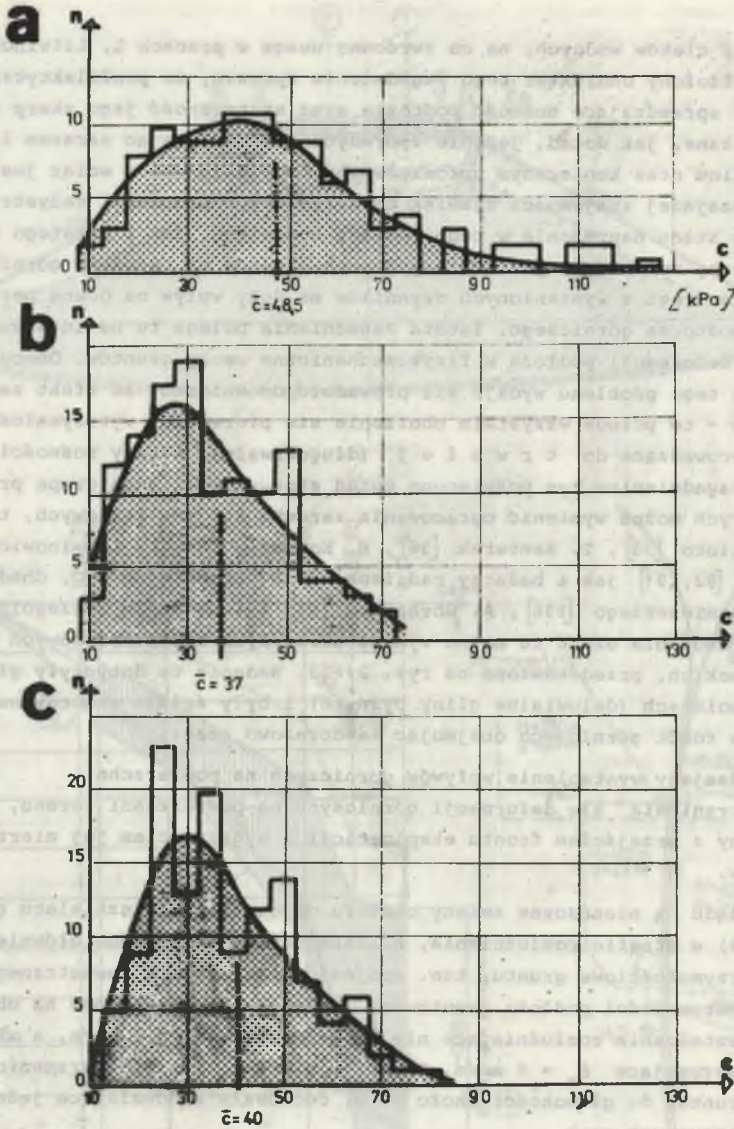
łów czy też cieków wodnych, na co zwrócono uwagę w pracach L. Litwinowicza [97, 98]. Złożony charakter tego zagadnienia sprawia, że profilaktyczne obliczenia sprawdzające nośność podtorza oraz stateczność jego skarp są przeprowadzane, jak dotąd, jedynie sporadycznie, podlegając zarazem licznym ograniczeniom oraz koniecznym uproszczeniom. Wynikają one z wciąż jeszcze niewystarczającej znajomości zjawisk towarzyszących procesowi redystrybucji składowych stanu naprężenia w tego rodzaju budowlach, jak i częstego braku realnej oceny zmian wytrzymałościowych cech gruntów na terenach górniczych. Szczególnie drugi z wymienionych czynników ma duży wpływ na ocenę poziomu nośności podtorza górniczego. Istota zagadnienia polega tu na ingerencji poziomych deformacji podłoża w fizykomechaniczne cechy gruntów. Obecny stan rozeznania tego problemu wydaje się prowadzić do wniosku, że efekt zaistniałych zmian - to przede wszystkim obniżenie się pierwotnej wytrzymałości gruntów, prowadzące do trwałej (długotrwałej) utraty nośności przez podłoże. Zagadnieniom tym poświęcono dotąd stosunkowo liczną grupę prac, wśród których można wymienić opracowania zarówno autorów krajowych, takich jak: H. Glinko [38], T. Kantarek [56], H. Konderla [84], L. Litwinowicz [97, 98] i in. [82, 91] jak i badaczy radzieckich: B. Bronstejna i C. Chadźinova [12], O. Romińskiego [136], A. Gorbanova [40] i innych. Za szczególnie godne zainteresowania uznać tu można wyniki obszernych badań terenowych badaczy radzieckich, przedstawione na rys. 21-23. Badania te dotyczyły głównie gruntów spoiстых (deluwialne gliny, pylaste) i były ściśle skoordynowane z postępem robót górniczych obejmując każdorazowo czas:

- a) poprzedzający wystąpienie wpływów górniczych na powierzchni,
- b) uzewnętrzniania się deformacji górniczych na powierzchni terenu,
- c) związany z przejściem frontu eksploatacji i wygaśnięciem jej mierzalnych wpływów.

Ze względu na nieznaczne zmiany ciężaru objętościowego szkieletu gruntowego ( $\leq 3\%$ ) w strefie rozluźnienia, bliższej analizie poddano głównie parametry wytrzymałościowe gruntu, tzn. spójność i kąt tarcia wewnętrznego oraz wskaźnik porowatości podłoża gruntowego. Badania przeprowadzono na obszarze gdzie odkształcenia rozluźniające nie przekroczyły  $\epsilon_r = 3$  mm/m, a odkształcenia zagęszczające  $\epsilon_z = 9$  mm/m. Próbkę pobierane z przypowierzchniowej warstwy gruntu, do głębokości około 10 m, cechowała zadowalająca jednorodność analizowanych cech.

Do najbardziej istotnych zmian, jakie można było zauważyć w obrębie tego poligonu, należy zaliczyć bez wątpienia znaczny spadek spójności gruntu 20-45% (maksymalnie do około 65%), przy równoczesnym nieznacznym wzroście wartości kąta tarcia wewnętrznego o 7-10%. W strefie brzegowej niecki obniżeniowej wskaźnik porowatości gruntu zwiększył się o około 10%.

Na uwagę zasługuje nie w pełni odwracalny charakter wyżej wymienionych zmian, co w głównej mierze odnosi się do spójności gruntu. Badania O. Romińskiego [136] wskazują przykładowo, że odbudowa 50% spójności następuje po upływie nie mniej niż 5-6 lat, pełna natomiast odbudowa wartości tego

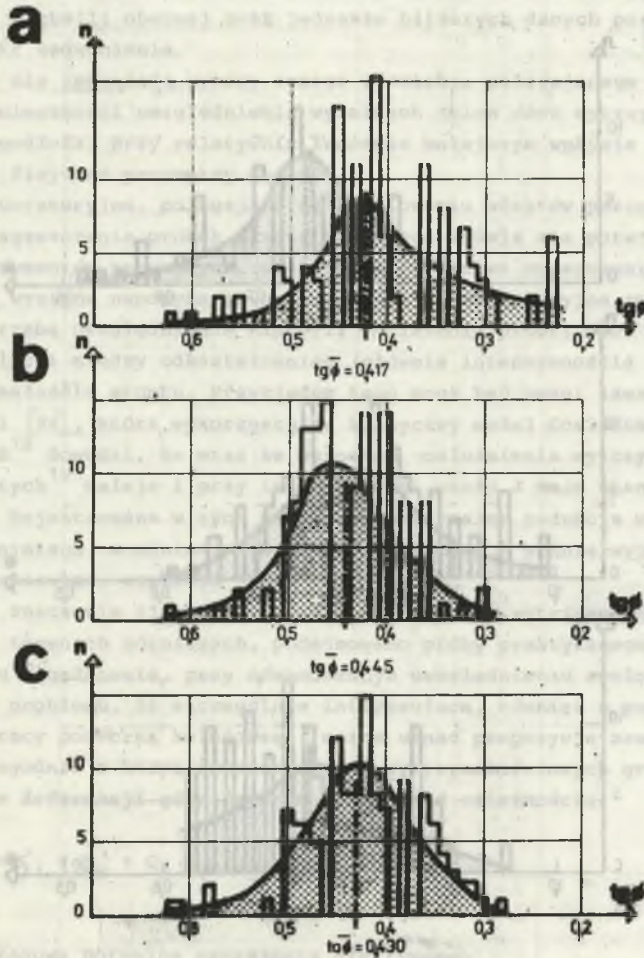


Rys. 21. Wpływ odkształceń terenu na zmienność spójności gruntów podłoża wg [12]

a) przed wystąpieniem wpływów górniczych, b) w trakcie oddziaływania eksploatacji górniczej na powierzchnię, c) po zaprzestaniu podziemnej eksploatacji kopalni

Fig. 21. The effect of mining ground strains on the variability of foundation ground cohesion according to [12]

a) before occurrence of mining effects, b) during interaction of mining with surface, c) after discontinuation of useful mineral exploitation

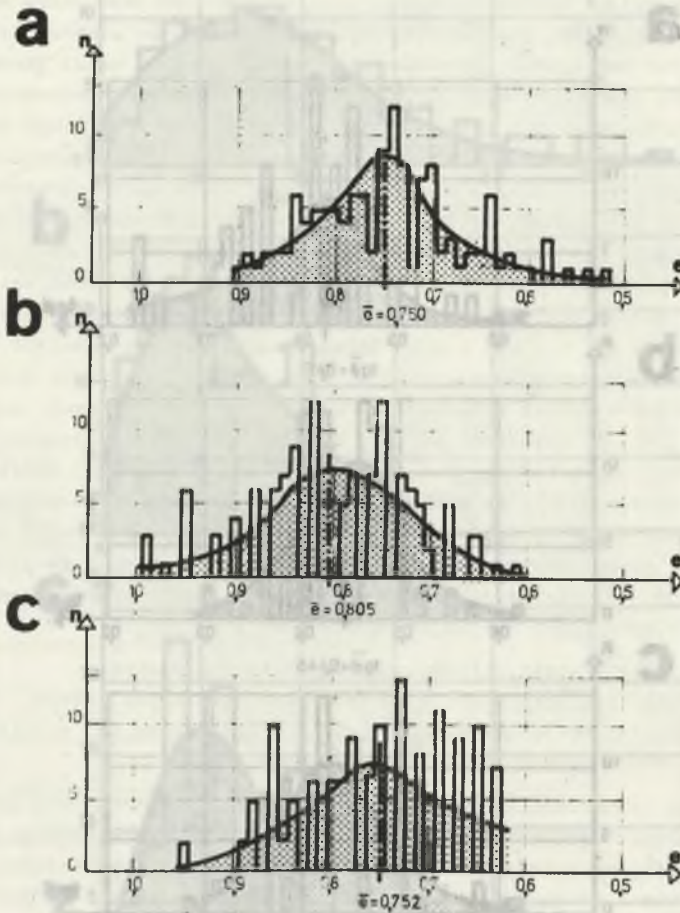


Rys. 22. Wpływ odkształceń terenu górniczego na zmienność kąta tarcia wewnętrznych gruntów podłoża

a) przed wystąpieniem wpływów górniczych, b) w trakcie oddziaływania eksploatacji górniczej na powierzchnię, c) po zaprzestaniu podziemnej eksploatacji kopalni

Fig. 22. The effect of mining ground strains on the variability of internal friction angle of foundation grounds

a) before occurrence of mining effects, b) during interaction of mining with surface, c) after discontinuation of useful mineral exploitation



Rys. 23. Wpływ odkształceń terenu górniczego na zmienność wskaźnika porowatości gruntów podłoża wg [12]

a) przed wystąpieniem wpływów górniczych, b) w trakcie oddziaływania eksploatacji górniczej na powierzchnię, c) po zaprzestaniu podziemnej eksploatacji

Fig. 23. The effect of mining ground strains on the variability of void ratio of foundation grounds acc. to [12]

a) before mining effects, b) during interaction of mining with surface, c) on stopping underground mining

parametru następuje dopiero po około 20 latach. Należy tu jednakże zwrócić uwagę na fakt, iż badania te były prowadzone w podłożu nie obciążonym dodatkowo (budowlą). W przypadku gruntów podtorza kolejowego, obciążenia eksploatacyjne taboru będą spełniały niewątpliwie rolę czynnika intensyfikującego tenże proces. W chwili obecnej brak jednakże bliższych danych pozwalających ująć ten aspekt zagadnienia.

Wnioski te nie zmieniają wymowy samego zjawiska, polegającego w swej istocie na konieczności uwzględnienia wyraźnych zmian cech wytrzymałościowych gruntów podłoża, przy relatywnie znacznie mniejszym wpływie deformacji górniczych na fizyczne parametry gruntów.

Badania laboratoryjne, polegające na symulowaniu efektów poziomego rozluźnienia i zagęszczenia próbek gruntu spoistego wydają się potwierdzać rezultaty eksperymentów terenowych, aczkolwiek ilościowe opracowanie uzyskanych tą drogą wyników napotyka pewne trudności interpretacyjne związane głównie z potrzebą uwzględnienia historii obciążenia próbki oraz ustaleniem wzajemnych relacji między odkształceniem (głównie intensywnością rozluźnienia) a wytrzymałością gruntu. Przykładem tego mogą być uwagi zawarte w pracy H. Konderli [84], która wykorzystując klasyczny model Coulomba-Mohra oraz model DLS<sup>18</sup> dowodzi, że wraz ze wzrostem ozluznienia wytrzymałość gruntów spoistych<sup>19</sup> maleje i przy intensywności około 3 mm/m stan ten stabilizuje się. Rejestrowana w tych warunkach maksymalna redukcja wytrzymałości gruntu spoistego, w odniesieniu do wytrzymałości w stanie wyjściowym (bezodkształceniowym), wynosiła około 60% [91].

Doceniając znaczenie zjawisk związanych z redukcją wytrzymałości podłoża gruntowego na terenach górniczych, podejmowano próby praktycznego (normatywnego) opisu zagadnienia, przy równoczesnym uwzględnieniu reologicznych aspektów tego problemu. Za szczególnie interesującą, również z punktu widzenia analizy pracy podtorza kolejowego, można uznać propozycję zawartą w pracy [134], zgodnie z którą zmienność cech wytrzymałościowych gruntów podanych wpływom deformacji górniczych można opisać zależnością:

$$\tau_{\max} = \sigma'_{11} \operatorname{tg} \phi'_w + C_s + \beta(t) \sum W; \quad (3.4)$$

gdzie:

- $\sigma'_{11}$  - składowa normalna naprężenia efektywnego,
- $\phi'_w$  - kąt tarcia wewnętrznego gruntu o średniej wilgotności  $w_c$  w czasie ścinania,
- $C_s$  - strukturalna część ogólnej spójności gruntu, tzw. spójność wzmocnienia,
- $\sum W$  - spójność gruntu wywołana więziami typu wodno-koloidalnego przy wilgotności  $w_c$ , tzw. spójność pierwotna,
- $\beta(t)$  - współczynnik uwzględniający intensywność procesu deformacji terenu górniczego.

<sup>18</sup>DLS - model zaproponowany przez Dmítruka-Lysika-Suchnicką [153].

<sup>19</sup>Ił Jąroszowski o nienaruszonej strukturze.

Tablica 1

Wartości współczynnika  $\beta(t)$   
wg [34]

Kategoria	Klasyfikacja terenu górniczego ze względu na intensywność deformacji powierzchni		Wartości współczynnika $\beta(t)$ zależnie od konsystencji gruntu			
	Intensywność deformacji powierzchni		miękkoplastyczna	plastyczna	twardoplastyczna	zwarta
	odkształcenie $\epsilon$ [mm m <sup>-1</sup> /mies.]	krzywizna $K$ [m <sup>-1</sup> /mies.]				
1	$0,3 \leq \epsilon < 1,0$	$10 \leq K < 30$	$0,5 \leq T < 1,5$	1,0	1,0	1,0
2	$0,1 \leq \epsilon < 0,3$	$3 \leq K < 10$	$0,1 \leq T < 0,5$	0,1	0,8	1,0
3	$0,01 \leq \epsilon < 0,1$	$1 \leq K < 3$	$0,01 \leq T < 0,1$	0	0,3	1,0
4	$0,001 \leq \epsilon < 0,01$	$0,1 \leq K < 1$	$0,001 \leq T < 0,01$	0	0	1,0
5	$\epsilon < 0,001$	$K < 0,1$	$T < 0,001$	0	0	0,3

Wartości współczynnika  $\beta(t)$ , zależne od konsystencji gruntu (gliny, gliny piaszczyste) oraz kategorii terenu górniczego<sup>20</sup>, zestawiono w tabl. 1.

Propozycja ta bazuje na znanej skądinąd koncepcji N. Masłowa [41], dotyczącej oceny wytrzymałości na ścinanie gruntów spoiстых. Uwzględniając różne czynniki warunkujące zmienność cech strukturalnych gruntów, w odniesieniu do parametru spójności wydzielił on jego dwie główne składowe: strukturalną i wodno-koloidalną. Pierwsza z nich, określaną również mianem spójności wzmocnienia [41], niezależna od zwięzłości i wilgotności gruntu, jest uwarunkowana nieodwracalnym charakterem więzi krystalicznych między cząstkami szkieletu gruntowego. Poziome odkształcenia rozluźniające terenu górniczego ingerując w tę właśnie składową część spójności, poprzez niszczenie kruchych więzi strukturalnych typu  $C_s$  (przy  $\epsilon_r \geq 6-9$  mm/m) przyczyniają się w głównej mierze do zmniejszenia ogólnej wytrzymałości gruntów spoiстых, na co w swych pracach zwracali również uwagę H. Glinko i L. Litwinowicz [38, 98]. Zdaniem tych autorów, przeobrażenia struktury rozluźnianych gruntów spoiстых przyczyniają się zarazem do stosunkowo niewielkich i praktycznie pomijalnych zmian składowej wodno-koloidalnej spójności oraz kąta tarcia wewnętrznego. Wnioski te, dotyczące w szczególności zmian spójności pierwotnej  $\Sigma W$ , różnią się nieco w stosunku do wcześniejszych zaleceń przedstawionych w pracy [134], skąd wynika, że w przypadku gruntów o konsystencji miękkoplastycznej lub plastycznej - w zależności od intensywności deformacji podłoża górniczego, redukcja ta może być również bardzo znaczna, jako że  $0 < \beta(t) < 1$ . Wynika stąd, że po przekroczeniu krytycznej wielkości rozluźnienia o wytrzymałości rodzimych gruntów spoiстых podtorza decydować może wyłącznie zredukowana składowa spójności pierwotnej  $\Sigma W$  oraz kąt tarcia wewnętrznego  $\phi$ , co zgodnie z hipotezą Coulomba-Mohra, określa zależność:

$$|\tau|_{\min} = \sigma'_{11} \operatorname{tg}\phi_w + \beta(t) \Sigma W. \quad (3.4a)$$

W skrajnie niekorzystnych warunkach [ $\beta(t) \cong 0$ ] może zaistnieć również sytuacja, w której wytrzymałość więzi ośrodka zostanie sprowadzona do wielkości minimalnej - identyfikowanej wyłącznie z oporem jego tarcia:

$$|\tau|'_{\min} = \sigma'_{11} \operatorname{tg}\phi. \quad (3.4b)$$

Pod pojęciem krytycznej wielkości rozluźnienia rozumie się tu taką wielkość odkształcenia podłoża, która wywołuje stabilizację naprężeń poziomych w ośrodku gruntowym.

W kontekście powyższych zaleceń na uwagę zasługują wyniki porównawczych, badań gruntów spoiстых poddanych rozluźnieniu i peźnaniu [38]. Wynika z nich, iż niezależnie od zróżnicowania warunków przebiegu obu procesów, ist-

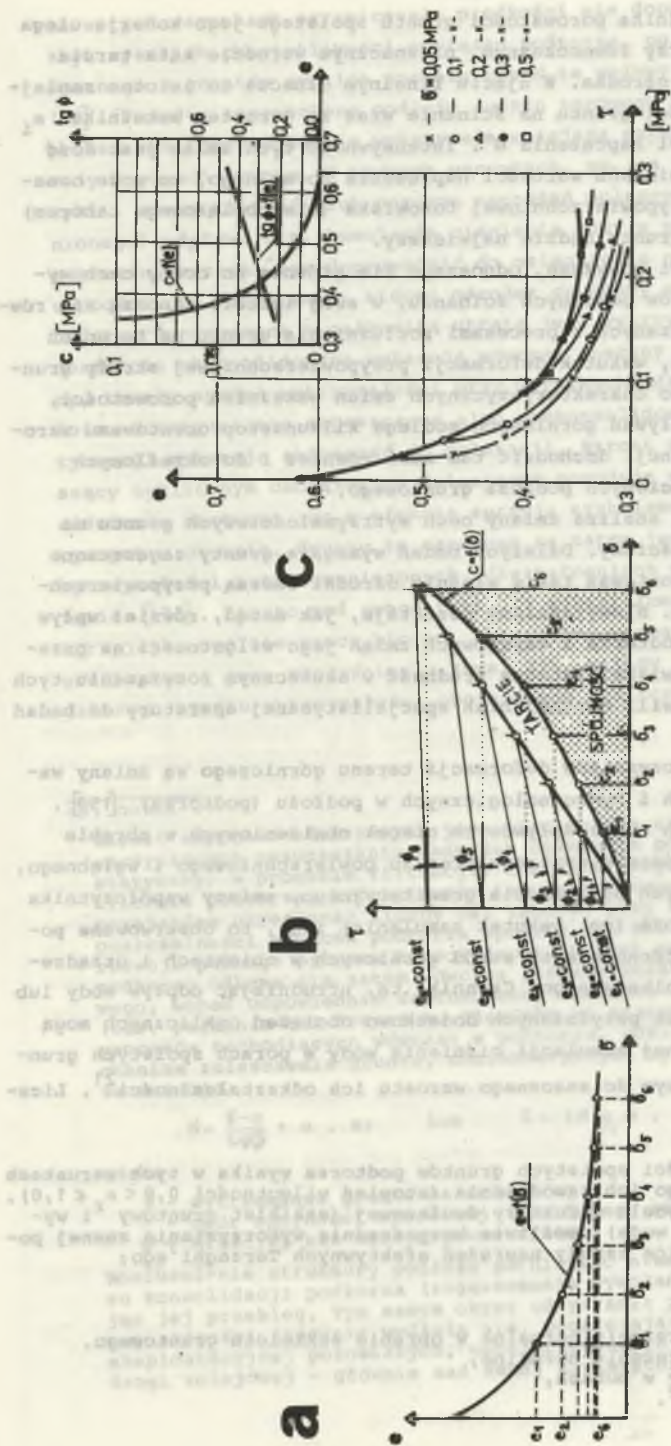
<sup>20</sup> Wg norm radzieckich [134], którym odpowiadają odmienne kategorie terenu górniczego oraz inne granice konsystencji gruntu.



nieje pewne podobieństwo charakteru zniszczeń strukturalnych materiału, polegające na każdorazowym doprowadzeniu gruntu do wytrzymałości odpowiadającej trwałemu oporowi ścinania (tzw. wytrzymałość rezydualna). Na zagadnienie to zwrócono również uwagę w pracach autora [71, 77, 82]. Utrata wytrzymałości gruntu w procesie peźzania następuje jednakże przy dwukrotnie większej wielkości krytycznej gęstości defektów strukturalnych aniżeli w procesie rozluźnienia. Odmienność reakcji wewnętrznej gruntu w procesie peźzania polega również na efektach wzmocnienia ośrodka i preorientacji cząstek szkieletu gruntowego, czego nie stwierdzono w procesie jego jednorodnego rozluźnienia [38, 98]. Jak stwierdza w swej pracy H. Suchnicka [155], wszelkie próby ilościowej oceny reakcji wewnętrznych ośrodka gruntowego powinny bazować na przyjętych do jego opisu modelach fizycznych. Modele te, będąc uproszczoną interpretacją rzeczywistości, pozwalają z kolei czynić poszukiwania adekwatnych modeli matematycznych, opisujących przede wszystkim znaczenie struktury gruntu w ocenie jego właściwości. Główną rolę w ocenie i opisie struktury materiału odgrywają, według H. Suchnickiej, więzi łączące poszczególne elementy strukturalne (tzn. ziarna, cząstki, wodę itp.). Analiza wytrzymałości poszczególnych więzi w przypadku ośrodków rozdrobionych, a więc i gruntów, jest w chwili obecnej, praktycznie rzecz biorąc, nierealna. Próba opisu tych zjawisk w stanach przedgranicznych i granicznym, na poziomie oddziaływań mikrostrukturalnych musi zatem - abstrahując od analizy odosobnionych reakcji pojedynczych więzi - zmierzać do statystycznego opisu reakcji wewnętrznych materiału.

Dotychczasowe badania wskazują więc, że po osiągnięciu określonej wytrzymałości zdolność do przenoszenia obciążeń przez więzi krystaliczne gwałtownie spada, podczas gdy wytrzymałość więzi wodno-koloidalnych, łącznie z oporami tarcia, decyduje o ostatecznej wytrzymałości ośrodka [41].

Na szczególną uwagę zasługuje tu ponadto fakt, iż opór przypisywany spójności jest znacznie większy aniżeli opór tarcia. Zagadnieniem tym z punktu widzenia oceny wpływu zagęszczenia gruntów spoistych na ich wytrzymałość w procesie ścinania zajmował się między innymi A.A. Ničiporowič [118]. Stosując oryginalną (na ówczesne czasy) interpretację wyników z prób bezpośredniego ścinania próbek poddanych uprzednio cyklicznym oddziaływaniom typu edometrycznego, otrzymał on szereg wartości parametrów wytrzymałościowych  $\phi_1$  oraz  $c_1$  dla różnych poziomów stabilizacji wskaźnika porowatości gruntu  $e_1 \cong \text{const.}$ , co przedstawiono na rys. 24. Wynika z niego, że udział składowych oporów tarcia w ogólnej wytrzymałości gruntu jest zmienny i zależy od wielkości naprężenia efektywnego  $\sigma'$ . Wraz ze wzrostem tego naprężenia rośnie rola kohezji, która może stać się czynnikiem decydującym w ocenie globalnej wytrzymałości gruntu. Zmianie wskaźnika porowatości gruntu (niezależnie od mechaniki zjawisk wywołujących ten efekt) towarzyszy zatem charakterystyczne przegrupowanie składowych elementów wytrzymałości na ścinanie. Ilościowe wyniki badań tego efektu uzyskane przez A. Ničiporowiča przykładowo dla gliny piaszczystej, przedstawiono na rys. 24c. Wynika z nich, iż



Ry. 24. Wpływ wskaźnika porowatości gruntu spoiстого ( $G_c$ ) na zmienność jego parametrów wytrzymałościowych (w interpretacji Nićiporoviča [118])  
 a) wstępne obciążenie próbek typu edometrycznego:  $e = f(\delta)$ , b) interpretacja prób bezpośredniego ścinania próbek:  $c = f(\delta)$ , c) zmienność cech wytrzymałościowych gruntu w zależności od poziomu stabilizacji wskaźnika porowatości  $e$   
 Fig. 24. The influence of void ratio of cohesive soil ( $G_p$ ) on the variation of its strength parameters (as interpreted by Nićiporovič [118])  
 a) a preload load of consolidometric-type specimen:  $e = f(\delta)$ , b) interpretation of tests of specimen direct shearing:  $c = f(\delta)$ , c) variability of strength features of soil depending on stabilization degree of the void ratio  $e$

wraz ze wzrostem wskaźnika porowatości gruntu spoiściego jego kohezja ulega znacznemu obniżeniu przy równoczesnym, nieznacznym wzroście kąta tarcia wewnętrzznego badanego ośrodka. W ujęciu finalnym oznacza to istotne zmniejszenie się wytrzymałości gruntu na ścinanie wraz ze wzrostem wskaźnika  $e_i$  niezależnie od wartości naprężenia  $\sigma'$ . Intensywność tych zmian jest dość znaczna, głównie dla niskich wartości naprężenia normalnego, co może oznaczać, że w strefie przypowierzchniowej torowiska (nie obciążonego taborem) spadek wytrzymałości gruntu będzie największy.

Wydaje się, iż uwagi powyższe, odnoszące się głównie do oceny cech wytrzymałościowych gruntów poddanych ścinaniu, w swej istocie odnoszą się również i do zjawisk związanych z procesami rozluźnienia gruntu na terenach górniczych. Tam bowiem, wskutek deformacji przypowierzchniowej strefy gruntu, dochodzi również do charakterystycznych zmian wskaźnika porowatości, który w trakcie oddziaływań górniczych podlega kilkunastoprocentowemu wzrostowi [12]. W konsekwencji dochodzić tam musi również i do określonych zmian cech wytrzymałościowych podłoża gruntowego.

Przytoczona powyżej analiza zmiany cech wytrzymałościowych gruntu ma głównie charakter jakościowy. Dalszych badań wymagają grunty zagęszczone i przekonsolidowane, ponieważ takie właśnie ośrodki tworzą przypowierzchniową strefę torowiska. Niewyjaśniony pozostaje, jak dotąd, również wpływ cyklicznych obciążeń podtorza i okresowych zmian jego wilgotności na przebieg analizowanego zjawiska. Istotną trudność w skutecznym rozwiązaniu tych zagadnień stanowi w chwili obecnej brak specjalistycznej aparatury do badań laboratoryjnych.

Jednym z ubocznych czynników deformacji terenu górniczego są zmiany warunków hydrograficznych i hydrogeologicznych w podłożu (podtorzu) [159]. Tworzenie się lokalnych - bezodpływowych niecek obniżeniowych w obrębie podtorza, częste uszkodzenia systemów drenażu powierzchniowego i wglębnego, utrata spadków podłużnych odwodnienia grawitacyjnego, zmiany współczynnika przepuszczalności podłoża (np. wskutek zamulania) itp., to obserwowane powszechnie w praktyce wtórne efekty szkód górniczych w obiektach i urządzeniach budownictwa komunikacyjnego. Czynniki te, utrudniając odpływ wody lub go ograniczając, wskutek przyłożonych dodatkowo obciążeń cyklicznych mogą doprowadzić do nadmiernej kumulacji ciśnienia wody w porach spoiстых gruntów podtorza, a tym samym do znacznego wzrostu ich odkształcalności<sup>21</sup>, Licz-

<sup>21</sup> Wzrost odkształcalności spoiстых gruntów podtorza wynika w tych warunkach z niemalże całkowitego ich zawodnienia (stopień wilgotności  $0,9 < s < 1,0$ ). Przyjęcie dla nich modelu struktury dwufazowej (szkielet gruntowy i wypełniająca jego pory woda) umożliwia bezpośrednie wykorzystanie znanej powszechnie w geotechnice zasady naprężeń efektywnych Terzaghi'ego:

$$\sigma = \sigma' - m \cdot u$$

gdzie:

- $\sigma'$  - efektywne naprężenie normalne w obrębie szkieletu gruntowego,
- $\sigma$  - całkowite naprężenie normalne,
- $u$  - ciśnienie wody w porach,
- $m$  -  $\{1, 1, 1, 0, 0, 0\}$  \*.

ne w tych warunkach ograniczenia prędkości nie dopuszczają do propagacji zbyt wysokich częstotliwości obciążeń podtorza, co w przypadku podłoża zbudowanego z gruntów sypkich pozwala uznać te wpływy za pomijalnie małe [70, 162]. Ponadto zagęszczone podłoże rusztu torowego przy danym poziomie naprężeń cyklicznych będzie wykazywało mniejszą szybkość akumulacji ciśnienia wody w porach gruntu. W pewnych warunkach, np. na skutek wzrostu liczby cykli, częstotliwości lub poziomu naprężeń pulsacyjnych, zahamowanego (utrudnionego) odpływu itp. kumulacja ciśnienia wody w porach może jednakże w zrozumieniu Terzaghi'ego doprowadzić do osiągnięcia przez naprężenia efektywne wartości, po ustaleniu której ośrodek gruntowy ulegnie upłynnieniu, co będzie równoznaczne z całkowitą utratą jego wytrzymałości. Grunty luźne lub normalnie skonsolidowane wykazują wówczas znaczny i praktycznie nieodwracalny, trwały spadek wytrzymałości przy wyraźnych odkształceniach całego podłoża. Grunty silnie zagęszczone albo prekonsolidowane (w strefie linii krytycznej) wykazują skłonność do dylatacji. Wzrost objętości ośrodka towarzyszący cyklicznym obciążeniom ścinającym powoduje w tych warunkach spadek ciśnienia porowego, co w efekcie sprzyja szybkiemu wzrostowi naprężeń efektywnych w gruncie. Grunty te narażone są zatem jedynie na chwilową utratę wytrzymałości przy ograniczonych odkształceniach w kolejnych cyklach obciążenia [173]. Biorąc pod uwagę fakt, iż odkształcenia podłoża górniczego sprzyjają, ogólnie rzecz biorąc, okresowemu wzrostowi porowatości ośrodka gruntowego i jego rozluźnieniu (rys. 23), należy liczyć się z możliwością dalszego spadku wytrzymałości obciążonego cyklicznie podtorza.

cd. notki 21

Wzrost naprężeń efektywnych jest więc ściśle uzależniony od warunków towarzyszących rozpraszaniu nadwyżek ciśnienia porowego (ponad stan hydrostatyczny) w procesie filtracji. Charakterystyczny dla obciążonego cyklicznie podtorza, krótkotrwały impuls zmiennych naprężeń związany z przejazdem określonej liczby osi taboru, przy równoczesnej słabej przepuszczalności gruntów podtorza sprawia, że nie dochodzi tu częstokroć do rozwoju pełnego procesu konsolidacji. Wzrost naprężeń całkowitych  $\sigma$  w podtorzu odbywa się zatem wówczas głównie kosztem wzrostu ciśnienia porowego, wobec odpowiednio zredukowanej wartości naprężeń efektywnych  $\sigma'$  (tzw. pełzania bez drenażu). Zjawisko to stanowi o istocie destrukcyjnych procesów zachodzących wówczas w podtorzu, gdzie z uwagi na tarciowy mechanizm zniszczenia gruntu, charakterystyki wytrzymałościowe podłoża wiążą ze relacją:

$$\sigma = \frac{\sigma - c}{\tan \phi} + u \cdot m; \quad \text{lub} \quad \sigma = (\sigma' - m \cdot u) \tan \phi + c;$$

gdzie:

- $\sigma$  - wytrzymałość gruntu na ścinanie,
- $c$  - opór spójności właściwej (dla danego stopnia wilgotności gruntu),
- $\phi$  - właściwy kąt tarcia wewnętrznego.

Rozluźnienie struktury podłoża górniczego niweczy dodatkowo efekty procesu konsolidacji podtorza (zagęszczenia wywołanego ruchem taboru), opóźniając jej przebieg. Tym samym okres odzyskania przez podtorze jego pierwotnej nośności znacznie wydłuża się, pogarszając tym samym stan zdolności eksploatacyjnej pozostałych, współpracujących z nim elementów składowych drogi kolejowej - głównie zaś samej nawierzchni.

Aczkolwiek wpływ niskich częstotliwości obciążenia cyklicznego na charakterystyki wytrzymałościowe gruntów nie jest jeszcze w chwili obecnej dostatecznie rozpoznany, wielu autorów, jak np. Peacock i Seed [125] czy Wong i Chan [176], wydaje się zgodnie stwierdzać, że w przypadku przebadanego zakresu częstotliwości 0,2-4 Hz, mechaniczne własności gruntów sypkich praktycznie nie zależą od częstotliwości obciążenia. Reakcja gruntów spoiстых na niskie częstotliwości obciążenia rzędu 0,01-0,5 Hz jest zdaniem innych badaczy, zgoła odmienna. Jak wykazali bowiem Matsui i Ohara [106] czy Talahashi i Hight [164], mniejsza częstotliwość obciążeń powodowała szybszą reakcję gruntu, wyrażającą się poprzez bardziej intensywny wzrost odkształceń plastycznych i wyższe ciśnienie wody w porach, co tłumaczono wpływem specyficznych właściwości reologicznych badanych gruntów spoiстых. Wyższe częstotliwości obciążenia powodują zatem (w przyjętym zakresie częstotliwości) mniejszy spadek naprężeń efektywnych, a więc i relatywnie mniejszy spadek wytrzymałości gruntów spoiстых. Ponieważ rektyfikacja niwelety torów na terenach górniczych jest z reguły realizowana poprzez warstwowe podnoszenie rusztu torowego na piasku, żużlach, skale płonnej i innych materiałach sypkich (antropogennych), sprzyja to szybszej odbudowie nośności przez podtorze i w pewnym sensie skuteczniej zabezpiecza je przed negatywnymi wpływami obciążeń dynamicznych. Dopuszczanie (a nawet i zalecanie) do eksploatacji nawierzchni charakteryzującej się tzw. niweletą trwale (okresowo) obniżoną, w przypadku podtorza utworzonego z gruntów spoiowych przy małej częstotliwości, a zarazem dużej liczbie cykli obciążenia, wydaje się być dodatkowym czynnikiem sprzyjającym rozwojowi destrukcyjnych procesów w podtorzu. W świetle przytoczonych tu rozważań należy zatem uznać ten typ rozwiązań technologiczno-ruchowych za wybitnie niekorzystny dla procesu współdziałania nawierzchni z podtorzem na terenach górniczych.

W specyficznych warunkach deformacji podłoża górniczego poddanego dodatkowo zewnętrznym oddziaływaniom obciążeń cyklicznych, proces utraty wytrzymałości gruntu oraz zmian nośności podłoża przebiega niewątpliwie w sposób odmienny aniżeli podczas tzw. klasycznego ścinania [61, 175]. Pojawia się tu konieczność sprecyzowania adekwatnych kryteriów zniszczenia, zgodnych z charakterem i przebiegiem badanego zjawiska (procesu), co w chwili obecnej jest zagadnieniem dość złożonym. Sformułowane dla obciążeń cyklicznych kryteria zniszczenia<sup>22</sup> trudno jednoznacznie powiązać z czynnikami determinującymi nośność podłoża na terenach górniczych, o czym wspomniano już uprzednio<sup>23</sup>. Złożony charakter tego problemu wymaga podjęcia odpowiednich

<sup>22</sup> Podwójna amplituda odkształcenia pionowego i wskaźnik ciśnienia wody porowej w zależności od granicznej liczby cykli wg [173].

<sup>23</sup> Intensywność deformacji górniczych, graniczne (poziome) odkształcenia podłoża, gęstość defektów strukturalnych ośrodka, stopień prekonsolidacji itp.

prac, głównie o znaczeniu eksperymentalnym. Pomyślnie jego rozwiązanie wymagać będzie jednakże nowej, specjalistycznej aparatury, pozwalającej na odwzorowanie odpowiedniej liczby czynników ingerujących w przebieg badanego procesu. Sformułowanie na bazie któregoś ze znanych modeli klasycznej mechaniki gruntów jednolitej teorii zezwalającej na opis tak różnorodnych czynników, również jest sprawą bardzo złożoną. Z tego też względu, do czasu sformułowania w kategoriach mechaniki odpowiednich modeli matematycznych dla opisu teorii współdziałania nawierzchni z podtorzem górniczym, można skorzystać np. z propozycji St. Dmitruka [26]. Proponowana przez niego i rozwijana obecnie metoda formułowania modeli matematycznych w teorii szkód górniczych, przy zastosowaniu analogów procesów o obiektach (tzw. modeli globalnych), wydaje się stanowić właściwy kierunek ewentualnych dalszych badań i analiz w tym zakresie.

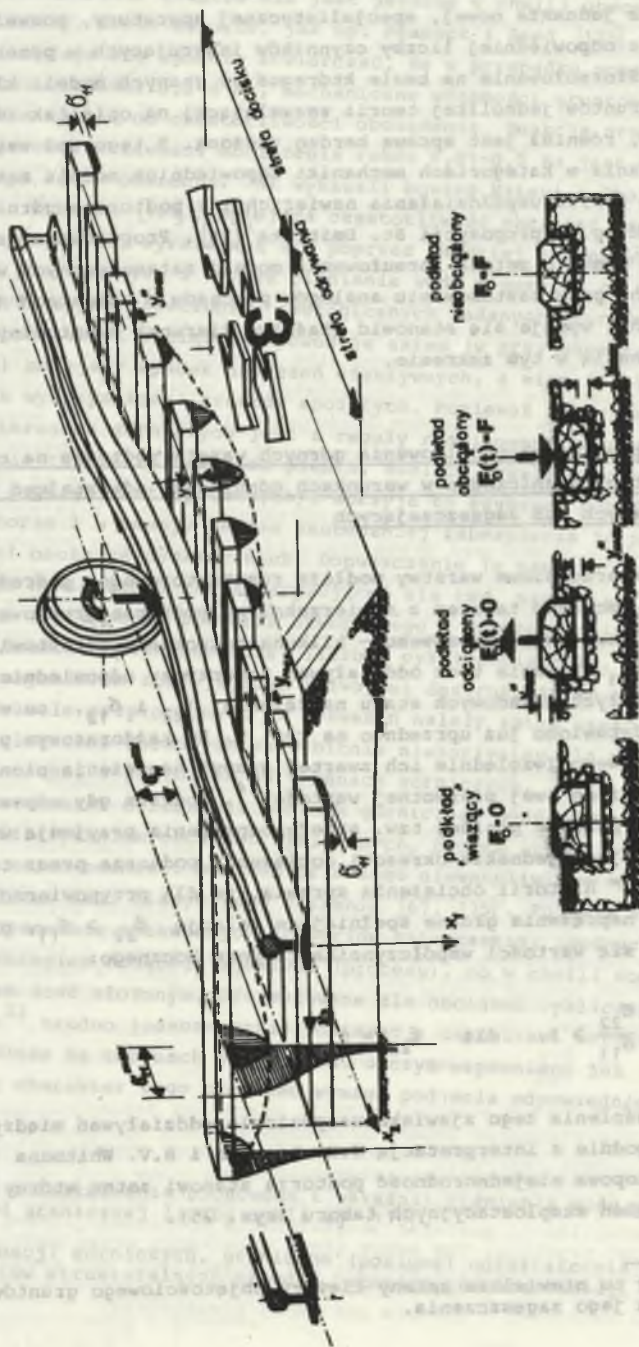
#### 3.4. Wpływ przekonsolidowania górnych warstw podtorza na rozwój strefy stanu granicznego w warunkach górniczych odkształceń rozluźniających lub zagęszczających

Przypowierzchniowe warstwy podłoża rusztu torowego, pośrednicząc w przekazywaniu obciążeń taborom z nawierzchni na podtorze gruntowe, podlegają w strefie torowiska okresowemu - kilkunastokrotnemu wzrostowi naprężeń normalnych  $\sigma_{11}$ . Zmianie tych oddziaływań towarzyszy odpowiednie przegrupowanie pozostałych składowych stanu naprężenia  $\epsilon_{22}$  i  $\sigma_{12}$ , co w sposób pogłębiony przedstawiono już uprzednio na rys. 5. Po każdorazowym przejeździe pociągu szynowego (względnie ich zwartej grupy) naprężenia pionowe  $\sigma_{11}$  wracają w pełni do swej pierwotnej wartości<sup>24</sup>, podczas gdy odpowiadające im naprężenia poziome poniżej tzw. strefy odprężenia przyjmują wartości stałe - odpowiadające jednakże okresowi dociążenia podtorza przez tabor. Ta swoista "pamięć" historii obciążenia sprawia, że dla przypowierzchniowej strefy torowiska naprężenia główne spełniające relacje  $\sigma_{22} > \sigma_{11}$ , prowadzą do wytworzenia się wartości współczynnika rozporu bocznego:

$$K = \frac{\sigma_{22}}{\sigma_{11}} \geq 1; \quad \text{dla} \quad \epsilon_{22} = 0; \quad (3.5)$$

Próbie wyjaśnienia tego zjawiska na poziomie oddziaływań międzyziarnowych podano, zgodnie z interpretacją T.W. Lambego i R.V. Whitmana [94], na rys. 26. Megaskopowa niejednorodność podtorza stanowi zatem wtórny efekt cyklicznych obciążeń eksploatacyjnych taboru (rys. 25).

<sup>24</sup> Pomijamy tu niewielkie zmiany ciężaru objętościowego gruntów podtorza z tytułu jego zagęszczenia.



Rys. 25. Fazy współdziałania koła pojazdu szynowego z rusztem torowym i podtorzem w warunkach deformacji terenu górniczego

Fig. 25. The phases of co-operation between railway wheel with track layer framework and subgrade under conditions of mining ground deformation

Współczynnik rozporu bocznego  $K_o$ , przyjmowany w warunkach obciążeń geostatycznych jako wartość stała dla danego rodzaju gruntu [175] jest w rzeczywistości złożoną funkcją wielu czynników, takich jak: stan i rodzaj gruntu (rodzime - zasypowe<sup>25</sup>) decydują o nim parametry fizykomechaniczne oraz cechy reologiczne ośrodka, czynniki technologiczne (układanie - zagęszczanie), krotność i intensywność obciążenia itp. [81]. Brak jednoznacznej - normatywnej metody oceny tego współczynnika utrudnia ponadto weryfikacje wielu funkcjonujących obecnie sposobów jego analitycznego opisu.

Z punktu widzenia potrzeb kolejnictwa istotnym czynnikiem decydującym o realności ocen tego parametru będzie potrzeba uwzględnienia powtarzalności obciążeń dla różnych poziomów prekonsolidacji ośrodka. Warunki te w znacznej mierze zostały uwzględnione w badaniach B. Schmidta [141], R. Bellotiego i in. [7], I. Alpána [1] oraz E. Flavigny'ego [32].

Wyniki badań E. Flavigny'ego dotyczące gruntów spoistych wskazują przykładowo, iż na pierwszym etapie (cyklu) obciążenia próbki (przy  $\epsilon_{22} = 0$ ) dochodzi do niemalże liniowego wzrostu funkcji  $\epsilon_{22} = f(\sigma'_{11})$ . Odpowiada to stałej wartości parametru  $K_o$  wraz ze wzrostem pierwotnych naprężeń normalnych  $\sigma'_{11}$ . Odciążenie próbki charakteryzuje każdorazowo zależność nieliniowa, wpływająca na zróżnicowanie wartości współczynników rozporu bocznego przy obciążeniu oraz odprężeniu, co ujmuje się w formie zależności:

$$K_o^{rb} = K_o^{nc} (OCR)^h; \quad (3.6)$$

gdzie:

- $K_o^{rb}$  - współczynnik rozporu bocznego przy odciążeniu,
- $K_o^{nc}$  - współczynnik rozporu bocznego przy obciążeniu,
- $h$  - współczynnik ustalony doświadczalnie,
- OCR - wskaźnik prekonsolidacji (overconsolidation ratio),

$$OCR = \frac{\sigma'_{11}{}^{max}}{\sigma'_{11}}; \quad (3.6a)$$

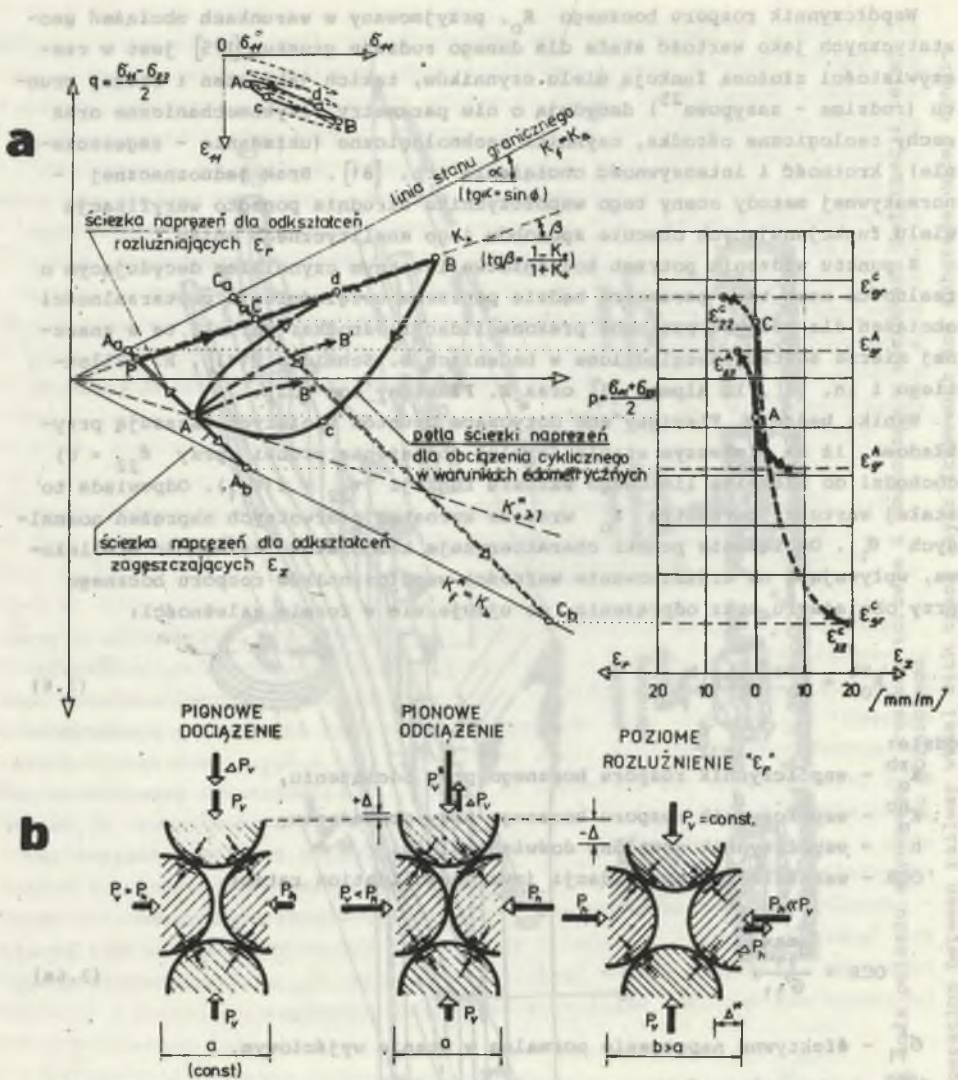
$\sigma'_{11}$  - efektywne naprężenie normalne w stanie wyjściowym,

$\sigma'_{11}{}^{max}$  - maksymalne efektywne naprężenie normalne, tzw. ciśnienie prekonsolidujące.

Już w pierwszym cyklu histerezy obciążeń naprężenia poziome mogą zatem podczas odciążenia przekroczyć wartość naprężeń pionowych  $\sigma'_{11}$ . Wraz ze wzrostem liczby tychże cykli współczynnik rozporu bocznego  $K_o$  przy obciążeniu ulega trwałemu wzrostowi osiągając wartości od 1 do 3 [13, 117, 119, 120, 129, 151]. Są to zarazem wartości znacznie przekraczające wielkość współczynnika  $K_o$  ocenianego jak dla gruntów luźnych lub skonsolidowanych.

<sup>25</sup> Wg klasyfikacji podanej w PN-83/B-03010: Ściany oporowe. 1983.





Rys. 26. Analiza pracy podtorza na terenach górniczych w ujęciu metody ścieżek naprężeń

a) pętle ścieżek naprężeń w podtorzu obciążonym cyklicznie, b) wpływ normalnych obciążeń cyklicznych oraz poziomych odkształceń rozluźniających na charakter dyskretnych oddziaływań międzyziarnowych w strefie aktywnej podłoża rusztu torowego

Fig. 26. The analysis of subgrade operation on mining grounds in the terms of stress path method

a) loops of stress paths in subgrade loaded in cycles, b) the effect of normal cyclic loads and horizontal, ravelling strains on the nature of discrete intergranular interactions in the active zone of track layer framework foundation

Próba oceny wpływu tego czynnika na rozprzestrzenianie się składowych stanów naprężenia w podłożu rusztu torowego stanowi treść rozdziału 4.3.

Wytworzony w obrębie przypowierzchniowej strefy podtorza stan naprężeń na skutek oddziaływań aktywnego górniczo podłoża ulega charakterystycznym zmianom. Poszukując wyjaśnienia tego zjawiska na poziomie oddziaływań międzyziarnowych (rys. 26) można zauważyć, że przy stałej wartości siły pionowej  $P_v \approx \text{const}$ , poziome odkształcenie rozluźniające  $\epsilon_x$  jednostkowej objętości o wartość  $\Delta^*$  wywołuje w stykach ziarn dodatkowe oddziaływania o zwrotach przeciwnych do elementarnych sił  $P_h$  powodując tym samym obniżenie wartości reakcji poziomych ( $P_h < P_v$ ). Mogący na tym etapie wystąpić wzrost obciążeń pionowych (jako skutek obciążenia przejeżdżającym taborem) przyczynia się do wyraźnej destabilizacji struktury układu ziarn, jako że  $P_h \ll P_v^{\text{max}}$ , co z kolei poprzez rozprzestrzenianie się stref poślizgu ziarn doprowadzi do wytworzenia się w podtorzu płaszczyzn o przekroczonych wartościach wytrzymałości na ścinanie równoznaczne z miejscowym uplastycznieniem ośrodka<sup>26</sup>. Jak wskazują na to przeprowadzone dotąd w Głównym Instytucie Górnictwa badania laboratoryjne [91], poziome odkształcenia rozluźniające rzędu 2-3 mm/m (dla gruntów sypkich) i 4-6 mm/m (dla gruntów spoistych)

<sup>26</sup> Krzywe ścinania wskazują na zasadniczą różnicę zachowania się próbek bez uprzedniej konsolidacji, jak i poddanych w teście trójosiowym konsolidacji anizotropowej typu  $K_0$ :

$$\sigma_1 / \sigma_m = 3(1 - K_0)(1 + 2K_0) \quad \text{przy} \quad \epsilon_{22} = \epsilon_{33} = 0 \quad \text{i} \quad \epsilon_{11} \neq 0$$

gdzie:

$\sigma_1$  - intensywność naprężenia

$$\sigma_1 = \left[ \frac{1}{2} (3J_2 - J_1^2) \right]^{1/2};$$

$\sigma_m$  - średnie naprężenie główne

$$\sigma_m = \frac{1}{3} J_1;$$

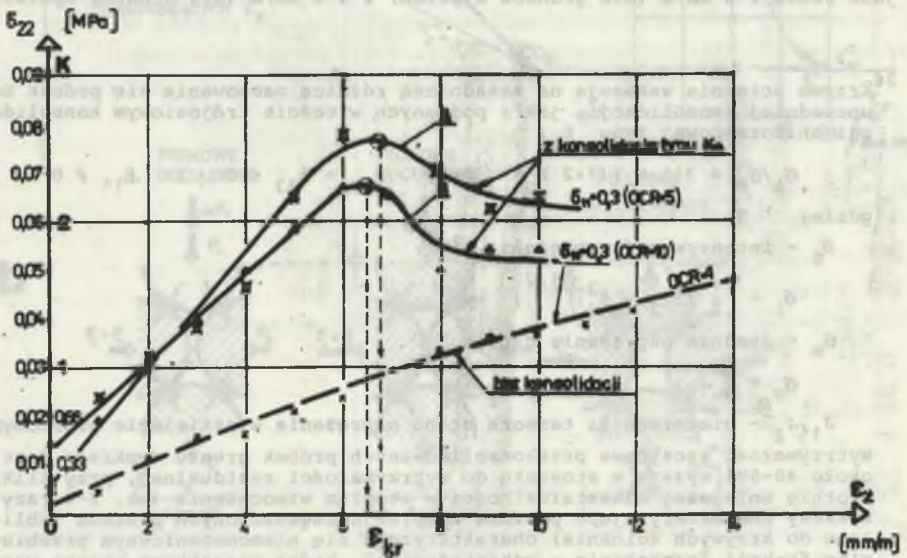
$J_1, J_2$  - niezmienniki tensora stanu naprężenia w szkielecie gruntowym.

Wytrzymałość szczytowa przekonsolidowanych próbek gruntu sypkiego jest około 40-50% wyższa w stosunku do wytrzymałości residualnej, przy kilkukrotnie mniejszej odkształcalności w stadium wzmocnienia (ok. 2-4 razy). Wykresy charakteryzujące poziomą kompresję zagęszczonych piasków (zbliżone do krzywych ścinania) charakteryzują się niemonotonicznym przebiegiem funkcji "naprężenie - odkształcenie", która początkowo stromo wznosi się do punktu wytrzymałości szczytowej (etap wzmocnienia struktury). Przy dalszym wzroście odkształcenia przebieg wykresu wykazuje pewien spadek wartości (etap osłabienia) i stabilizację poziomu naprężenia przy dalszym wzroście deformacji  $\epsilon_z$  (faza idealnego płynięcia). Piaski luźne oraz średnio zagęszczone charakteryzuje monotoniczny przebieg krzywej poziomej zagęszczalności (ustawiczne wzmocnienie) aż do poziomu wytrzymałości granicznej (idealne płynięcie materiału). Analiza wyników badań wskazuje ponadto na zależność oporu ośrodka, przy poziomym jego zagęszczeniu, od zmian naprężenia izotropowego  $\sigma_m$ . Podatność ta wzrasta wraz ze zmniejszaniem się poziomu naprężeń izotropowych w szkielecie.

doprowadzają z reguły do stabilizacji naprężeń poziomych w podłożu, a strefa stanu granicznego sięga wówczas głębokości około 6 m. Jest to obszar znajdujący się w totalnym - czynnym stanie rankinowskim (rys. 6).

Badania związane z oceną stanu naprężenia w gruntach sypkich poddanych działaniu poziomych odkształceń zagęszczających wykazały z kolei, że krytyczne odkształcenia podłoża nie przekraczają w tych warunkach 30-50 mm/m [91, 138]. W konkluzji stwierdzono więc, że praktycznie rzecz biorąc, na terenach górniczych wystąpienie biernego stanu granicznego jest nierealne. Uwagi powyższe zachowują pełną aktualność w adekwatnych warunkach terenowych, tj. dla gruntów luźnych lub normalnie skonsolidowanych, a więc takich, jakie z reguły stanowią podłoże budowlane.

Przeprowadzone przez autora w Głównym Instytucie Górnictwa - Katowice badania<sup>27</sup> uzupełniające na gruntach sypkich nie konsolidowanych, jak i wstępnie przekonsolidowanych do poziomu OCR = 5-10 przy naprężeniach wyjściowych  $\sigma_{11} = 0,03-0,1$  MPa<sup>28</sup> wykazały, że krytyczne odkształcenia przy poziomym zagęszczeniu ośrodka mogą wyraźnie się zmniejszyć, do wielkości rzędu 5-7 mm/m, co zilustrowano na rys. 27. Wyższe wartości naprężeń nor-



Rys. 27. Wpływ efektu prekonsolidacji gruntu sypkiego ( $OCR > 1$ ) na zmienność jego krytycznych, jednorodnych odkształceń zagęszczających

Fig. 27. The influence of loose ground pre-consolidation effect ( $OCR > 1$ ) on the variability of its critical, homogeneous compacting strains

<sup>27</sup> Na odpowiednio zmodyfikowanym apracie trójosiowego ściskania konstrukcji M. Błaszczak [91].

<sup>28</sup> Odpowiadających naprężeniom od ciężaru własnego nawierzchni i warstw podsypek sprowadzonych do poziomu torowiska.

malnych powodują wzrost odkształceń krytycznych do 10-15 mm/m przy  $\sigma_{11} = 0,2$  MPa. Wytrzymałość residualna ośrodka poddanego zagęszczeniu  $\epsilon_z$  nie jest zależna od drogi, jaką w przestrzeni naprężeń przebyło obciążenie charakteryzujące ten stan [153]. Aczkolwiek badania te mają charakter wstępny - rozpoznawczy, to wydają się one wskazywać na realność wystąpienia w przekonsolidowanych gruntach sypkich podtorza, totalnego - biernego stanu granicznego. Próbę teoretycznego uzasadnienia tego zjawiska przedstawił autor we wcześniejszych pracach [63, 79]. Wyprowadzone tam zależności bazują na prawie sprężystej zmiany objętości, zgodnie z którym niezmiennik stanu naprężenia w danym punkcie podłoża  $d\Theta$  jest proporcjonalny do odkształcenia objętościowego  $d\epsilon^v$  w okolicy tegoż punktu. Odkształcenie to i związane z nim zmiany porowatości gruntu zależą tylko od wielkości sumy naprężeń głównych działających na szkielet gruntowy, nie są natomiast uzależnione od ich wzajemnego stosunku. Prawo to jest słuszne również przy wysokich wartościach naprężeń średnich, przekraczających granicę plastyczności ośrodka [35].

Analiza poziomych odkształceń półprzestrzeni gruntowej doprowadziła zatem do uzyskania zależności opisującej zmienność funkcji współczynnika rozporu bocznego:

- dla odkształceń zagęszczających

$$K_{\epsilon_z} = \frac{\sigma_{22}^2}{\sigma_{11}} = K_0 + E(e)s(1+\rho\varphi)\alpha_z\sigma_{11}^{-1}\epsilon_{22} < K_{\max}; \quad (3.7)$$

- dla odkształceń rozluźniających

$$K_{\epsilon_x} = \frac{\sigma_{22}^2}{\sigma_{11}} = K_0 - E(e)s(1+\rho\varphi)\alpha_x\sigma_{11}^{-1}\epsilon_{22} > K_{\min}; \quad (3.8)$$

Ograniczenia wynikające z warunku plastyczności podłoża przyjmują dla gruntów sypkich postać:

$$K_{\max} = \text{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right); \quad (3.9)$$

Dla gruntów spoistych można posłużyć się przybliżoną zależnością:

$$K_{\max} = \text{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi^x}{2}\right); \quad (3.10)$$

gdzie:

$$\varphi^x = \text{arc}(\text{tg}\varphi + \frac{c}{\sigma_{11}}); \quad (3.11)$$

- $\sigma_{11}$  - naprężenia normalne,
- $\sigma_{22}^z$  - naprężenie poziome w warunkach górniczych odkształceń zagęszczających  $\epsilon_z$  wg (2.13),
- $\sigma_{22}^r$  - naprężenie poziome w warunkach odkształceń rozluźniających  $\epsilon_x$  wg (2.8),
- $K_O$  - współczynnik rozporu bocznego<sup>29</sup> (dla  $\epsilon_{22} = 0$ ),
- $E_{(e)s}$  - moduł podatności gruntu,
- $\rho$  - stosunek odkształceń poziomych na kierunkach głównych (2.8),
- $\alpha_z$  - współczynnik zmienności modułu ścisłości zagęszczonego podłoża gruntowego,
- $\alpha_x$  - współczynnik zmienności modułu ścisłości podłoża rozluźnianego (3.3).

Współczynnik  $\alpha_z$  określa zależność [63, 66]:

$$\alpha_z = \frac{E \epsilon_z}{E_O} = \frac{\sigma_O}{\sigma_O + \sigma_{11}} \exp[\sin\phi(1+e_o)(1+\rho)A_O^{-1}\epsilon_{22}] + \frac{\sigma_{11}}{\sigma_O + \sigma_{11}}; \quad (3.12)$$

gdzie:

- $E_{\epsilon_z}$  - moduł ścisłości gruntu w warunkach poziomych odkształceń zagęszczających  $\epsilon_z$ ,
- $E_O$  - wyjściowy moduł ścisłości (tzn. dla  $\epsilon_{22} = 0$ ),
- $\sigma_O, A_O$  - parametry edometrycznej krzywej dociążenia [35, 63],
- $e_o$  - wyjściowy wskaźnik porowatości ośrodka.

Pozostałe oznaczenia przyjęto jak we wzorze (3.3).

W analizowanym zagadnieniu potraktowano wartości  $\nu, \phi$  oraz  $c$  jako testowe wskaźniki identyfikacyjne materiału, natomiast  $E_{(e)}$  i  $K_E$  jako nośniki informacji o procesach zachodzących wewnątrz obszaru elementarnego [25].

Można wykazać, że dla każdego  $\epsilon_{22} = \epsilon_z \neq 0$  współczynnik  $\alpha_z > 1$ , co wskazuje na tendencję wzrostu wartości modułu poziomej ścisłości gruntu o wielkość:

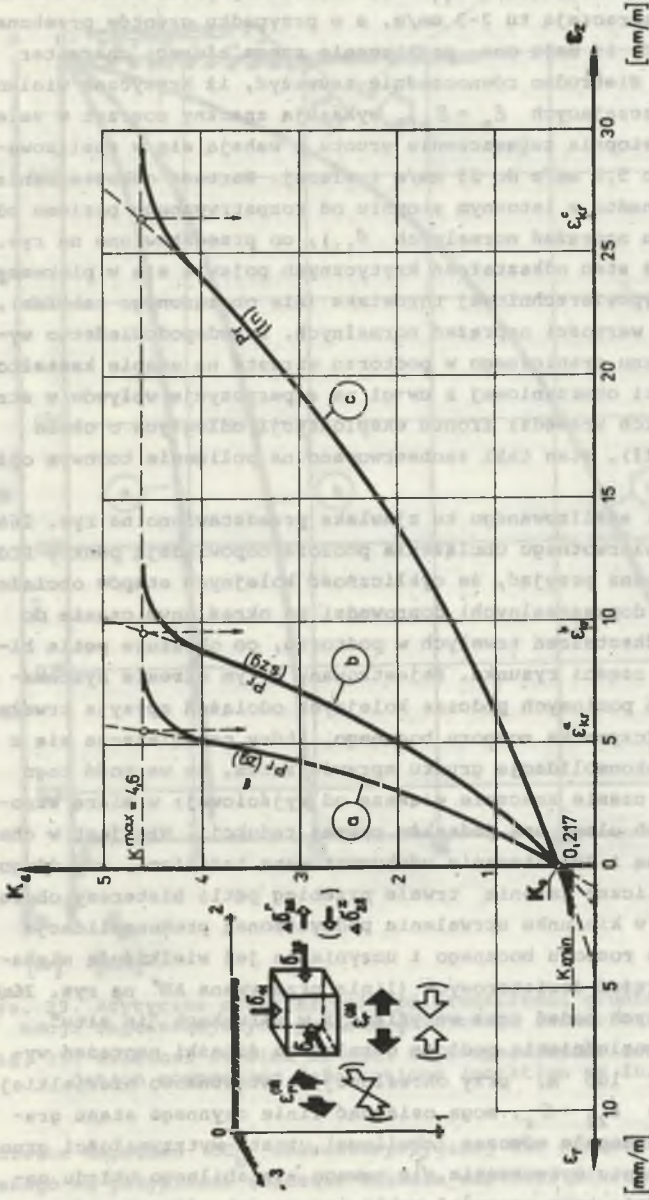
$$\Delta E_O = E_O(\alpha_z - 1). \quad (3.13)$$

W charakterze przykładu ilustrującego monotoniczność funkcji (3.7 i 3.8) w zależności od wyjściowego stopnia zagęszczenia gruntu sypkiego<sup>30</sup>, na rys. 28

<sup>29</sup>Z oceną wartości (spoczynkowego) współczynnika rozporu bocznego  $K_O$  w zależności od stopnia prekonsolidacji podłoża wiąże się mobilizację określonej wielkości kąta tarcia wewnętrznego ośrodka ziarnistego  $\phi_O$ , którą, korzystając np. z propozycji Jaky'ego w ujęciu A. Myslivca [17], można wyznaczyć z zależności:

$$\sin\phi_O = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} = \frac{\sigma_1 - \sigma_1(1 - \sin\phi)}{\sigma_1 + \sigma_1(1 - \sin\phi)} = \frac{\sin\phi}{2 - \sin\phi};$$

<sup>30</sup>Piasek gruby w stanie zagęszczonym "a", średnio zagęszczonym "b" i luźnym "c";  $\phi \cong 40^\circ$ ,  $\sigma_{11} = 0,3$  MPa.



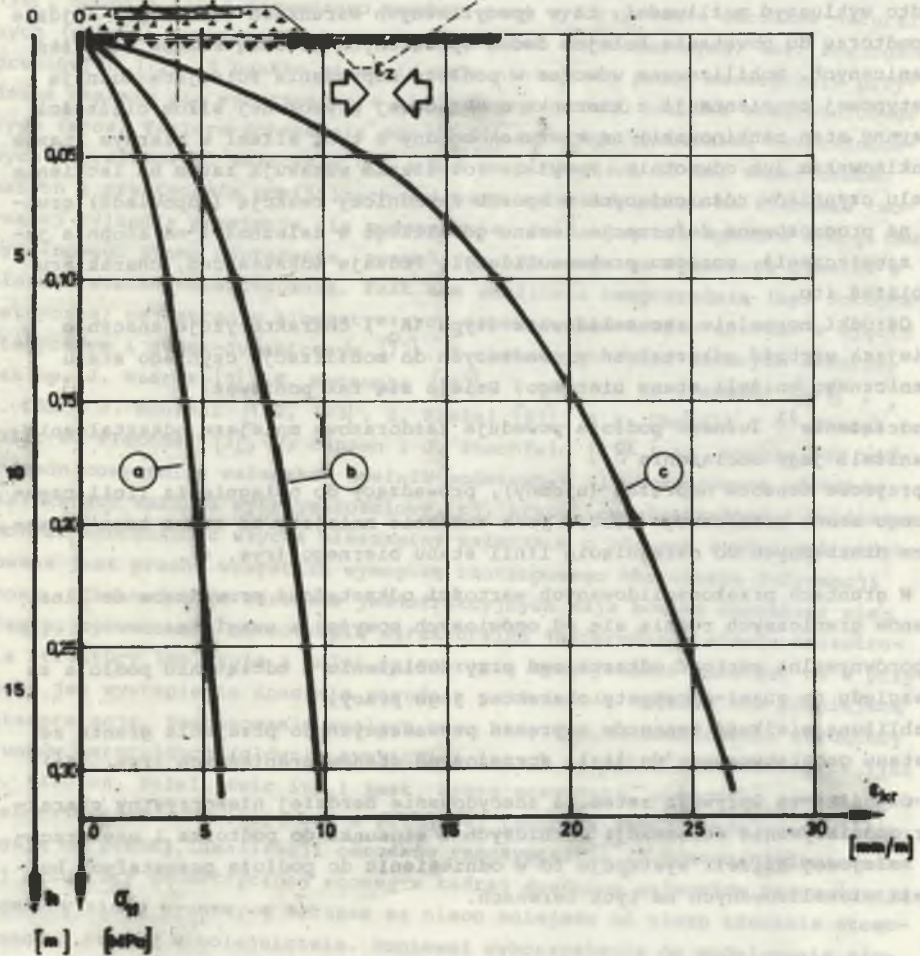
Rys. 28. Zmienność współczynnika rozporu bocznego gruntu sypkiego  $K_\epsilon$  w warunkach poziomych odkształceń terenu górniczego  
 (a - piasek gruby, zagęszczony; b - piasek gruby, średniozagęszczony; c - piasek gruby, luźny;  $\beta = 17-18,4 \text{ kN/m}^3$ ,  $\phi = 40^\circ$ ,  $\sigma_{11} = 3,0 \text{ kN/dm}^2$ )  
 Fig. 28. Variability of lateral strut coefficient for loose ground  $K_\epsilon$  under conditions of horizontal strains of mining grounds  
 (a - coarse sand, compacted; b - coarse sand, mean-compacted; c - coarse sand, loose;  $\beta = 17-18,4 \text{ kN/m}^3$ ,  $\phi = 40^\circ$ ,  $\sigma_{11} = 3,0 \text{ kN/dm}^2$ )

przedstawiono teoretyczną zmienność współczynnika  $K_{\epsilon}$  w warunkach poziomych odkształceń terenu górniczego (dla  $\sigma_{11} = 0,3$  MPa). Krytyczne odkształcenia rozluźniające nie przekraczają tu 2-3 mm/m, a w przypadku gruntów przekonsolidowanych można uznać, iż mają one, praktycznie rzecz biorąc, charakter zniszczenia krucho. Nietrudno równocześnie zauważyć, iż krytyczne wielkości odkształceń zagęszczających  $\epsilon_z = \epsilon_{kr}$  wykazują znaczny rozrzut w zależności od pierwotnego stopnia zagęszczenia gruntu i wahają się w analizowanym przypadku od około 5,6 mm/m do 25 mm/m i więcej. Wartość odkształcenia krytycznego zależy ponadto w istotnym stopniu od rozpatrywanego poziomu odniesienia "h" (poziomu naprężeń normalnych  $\sigma_{11}$ ), co przedstawiono na rys. 29. Wynika z niego, iż stan odkształceń krytycznych pojawia się w pierwszym rzędzie w strefie przypowierzchniowej torowiska (nie obciążonego taborem), a więc dla mniejszych wartości naprężeń normalnych. Prawdopodobieństwo wystąpienia biernego stanu granicznego w podtorzu wzrasta na etapie kształtowania się pełnej niecki obniżeniowej z uwagi na superpozycję wpływów w strefie dennej od sąsiednich krawędzi frontu eksploatacji odległych o około  $0,8 r$  (rys. 3, etap III). Stan taki zaobserwowano na poligonie torowym opisanym w rozdziale 3.1.

Próbie interpretacji analizowanego tu zjawiska przedstawiono na rys. 26a. Ścieżce naprężeń dla pierwotnego obciążenia podłoża odpowiadają punkty PCdB leżące na linii  $K_0$ . Można przyjąć, że cykliczność kolejnych etapów obciążeń (w granicach naprężeń dopuszczalnych) doprowadzi po określonym czasie do całkowitej redukcji odkształceń trwałych w podtorzu, co obrazuje pętla histerezy AdBc w górnej części rysunku. Rejestrowany w tym okresie systematyczny wzrost naprężeń poziomych podczas kolejnych odciażeń sprzyja trwałej zmianie wartości współczynnika rozporu bocznego, który przemieszcza się z linii  $K_0$  na  $K_0^*$ . Prekonsolidacja gruntu sprawia zatem, że wartość tego współczynnika jest po czasie znacznie większa od wyjściowej; w miarę wzrostu naprężeń normalnych ulega ona jednakże pewnej redukcji. Nie jest w chwili obecnej sprawą jasną i dostatecznie udokumentowaną badaniami, czy długo-trwałe obciążenia cykliczne zmieniają trwale przebieg petli histerezy obciążeń w układzie "p-q", w kierunku utrwalenia podwyższonej prekonsolidacją wartości współczynnika rozporu bocznego i uczynienia jej wielkością niezależną od wartości naprężeń dewiatorowych (linia przerywana AB" na rys. 26a). Sprawa ta wymaga dalszych badań oraz weryfikacji w warunkach "in situ".

Podczas poziomego rozluźnienia podłoża górniczego ścieżki naprężeń wprowadzone z punktu C lub A, przy określonej, a stosunkowo niewielkiej wartości odkształcenia  $\epsilon_{z2} = \epsilon_x$ , mogą osiągnąć linię czynnego stanu granicznego  $K_f = K_a$ . Następuje wówczas (chwilowa) utrata wytrzymałości gruntu na ścinanie, do momentu wytworzenia się nowego - stabilnego układu naprężeń w podtorzu. Będzie temu sprzyjał cykliczny wzrost oddziaływań normalnych w podtorzu.

Deformacje zagęszczające  $\epsilon_z$  wykazują znaczne zróżnicowanie wartości odkształceń końcowych do osiągnięcia linii biernego stanu granicznego  $K_b$ .



Rys. 29. Krytyczne odkształcenia półprzestrzeni gruntowej w warunkach deformacji zagęszczających podłoża górniczego (oznaczenia jak na rys. 28)

Fig. 29. Critical strains of soil half-space under conditions of mining foundation compacting deformations (notation as in Fig. 28)

Ścieżce naprężeń  $CC_b$  charakterystycznej dla ośrodka normalnie skonsolidowanego są przypisane znacznie większe wartości odkształceń granicznych aniżeli ścieżce  $AA_b$ , co znalazło pełne potwierdzenie w przytoczonych uprzednio wynikach badań laboratoryjnych (rys. 27).

Przeprowadzona analiza potwierdziła zatem wyraźne zróżnicowanie w rozwoju stref stanu granicznego podłoża w zależności od stanu budujących je gruntów i charakteru prognozowanych obciążeń. Dotyczy to przede wszystkim wpły-



wu poziomych odkształceń zagęszczających na przekonsolidowane grunty podtorza, w których może dochodzić do powstania totalnego - biernego stanu rankinowskiego już przy odkształceniach rzędu 5-8 mm/m. Nie można tu ponadto wykluczyć możliwości, iż w specyficznych warunkach górniczych dojdzie w podtorzu do powstania kolejno dwóch sprzężonych ze sobą stanów naprężeń granicznych. Mobilizowane wówczas w podłożu naprężenia ścinające doznają nietypowej reorientacji z kierunku o składowej przeciwnej siłom ciężkości (czynny stan rankinowski) na kierunek zgodny z tymi siłami w biernym stanie rankinowskim lub odwrotnie. Powyższe rozważania wskazują zatem na istnienie wielu czynników różnicujących w sposób zasadniczy reakcję (odpowieź) gruntu na prognozowane deformacje terenu górniczego w zależności od stopnia jego zagęszczenia, poziomu przekonsolidacji, rodzaju odkształceń, charakteru obciążeń itp.

Ośrodki normalnie skonsolidowane (typu "K<sub>0</sub>") charakteryzuje znacznie mniejsza wartość odkształceń prowadzących do mobilizacji czynnego stanu granicznego aniżeli stanu biernego. Dzieje się tak ponieważ:

- odciążenie<sup>31</sup> luźnego podłoża powoduje każdorazowo mniejsze odkształcenia aniżeli jego obciążenie<sup>32</sup>,
- przyrost tensora naprężeń (ujemny), prowadzący do osiągnięcia linii czynnego stanu granicznego (2.8), jest znacznie mniejszy od zmian tego tensora niezbędnych do osiągnięcia linii stanu biernego (rys. 4).

W gruntach przekonsolidowanych wartości odkształceń prowadzące do linii stanów granicznych różnią się od omówionych powyżej z uwagi na:

- porównywalną wartość odkształceń przy dociążeniu i odciążeniu podłoża ze względu na quasi-sprężysty charakter jego pracy,
- zbliżoną wielkość tensorów naprężeń prowadzących do przejścia gruntu ze stanu geostatycznego do linii sprzężonych stanów granicznych (rys. 26a).

Czynniki te wpływają zatem na zdecydowanie bardziej niekorzystny charakter oddziaływania deformacji górniczych w stosunku do podtorza i nawierzchni kolejowej aniżeli występuje to w odniesieniu do podłoża pozostałych budowli zlokalizowanych na tych terenach.

### 3.5. Badania modelowe na ośrodku analogowym typu Taylora-Schneebeli'ego

Złożony charakter deformacji powierzchni terenu górniczego, jak i zmieniające się w ślad za tym warunki współdziałania nawierzchni z podtorzem sprawiają, iż szczególnego znaczenia w rozeznaniu istoty zachodzących wów-

<sup>31</sup> Względnie rozluźnienie  $\epsilon_r$  prowadzące do czynnego stanu rankinowskiego.

<sup>32</sup> Względnie poziome zagęszczenie  $\epsilon_x$ , do biernego stanu rankinowskiego włącznie.

czas zjawisk nabierają badania eksperymentalne - głównie modelowe [74, 77, 126]. Badania takie prowadzono zarówno przy wykorzystaniu ośrodków naturalnych (głównie sypkich), jak i na materiałach ekwiwalentnych, tzw. analogach gruntowych [72]. Z punktu widzenia celu niniejszej pracy szczególnie przydatne okazało się wykorzystanie klasycznego modelu ośrodka rozdrobnionego typu (stos) Taylora-Schneebeli'ego (T-S), będącego mieszaniną dwusrednicowych - grafitowych wałeczków  $\Phi 4$  i  $\Phi 6$  mm o długości 45 mm. Wobec bardzo małych i praktycznie pomijalnych wydłużeń wałeczków stosu na kierunku tworzącej cylindra przyjmuje się powszechnie, że analog ten spełnia wymogi dwuwymiarowego stanu naprężenia, pozwalając tym samym na symulację zjawisk w płaskim stanie odkształcenia. Fakt ten umożliwia bezpośrednią (np. fotografometryczną) rejestrację kinematycznych aspektów modelowych zjawisk w ujęciu statycznym i quasi-dynamicznym [77]. Z obszernych badań licznych autorów, jak np. J. Biarez [8], H. Matsuoka [107], Z. Mróz i A. Drescher [113], M. Oda i J. Konishi [122, 123], I. Kisiel [61], P.A. Cundall i O. Strack [22], E. Fletcher [3], H. Hansen i J. Stechfeld [51] i in. wynika, że różnośrednicowy zbiór wałeczków spełnia podstawowy dla rozporowych ośrodków ziarnistych warunek wytrzymałościowy, tj. kryterium plastyczności Coulomba-Mohra. Konieczność użycia mieszaniny wałeczków o różnych średnicach podyktowana jest przede wszystkim wymogiem izotropowego charakteru deformacji stosu. Odkształcenia ośrodków jednofrakcyjnych mają bowiem charakter nieciągły, spowodowany anizotropią strukturalną jednorodnego stosu. Anizotropia struktury implikuje z kolei anizotropię sprężystości analogu, co w przypadku jej wystąpienia znacznie utrudnia prowadzenie badań i ich późniejszą interpretację. Zastosowanie analogu typu stos T-S do modelowania struktury gruntów naturalnych (głównie sypkich) i innych ośrodków rozdrobnionych (jak np. tłuczeń, żużel, żwir itp.) jest, rzecz oczywista, obciążone pewnymi niedoskonałościami. Wynikają one z przyjętej techniki samego modelowania i polegają na pewnej idealizacji ośrodków rzeczywistych za pomocą ujednorodnionej struktury geometrycznej stosu, w której średnice wałeczków przewyższają rozmiary ziarn gruntu, a zarazem są nieco mniejsze od ziarn tłucznia stosowanego z reguły w kolejnictwie. Ponieważ wykorzystanie do modelowania złożonych kinematycznie zjawisk rzeczywistych ośrodków rozdrobnionych również nie jest pozbawione istotnych uciążliwości, wad i niedogodności, zarysowuje się tu celowość podejścia kompromisowego. Polega ono na wzajemnie weryfikującym się i uzupełniającym wykorzystaniu zalet i eliminacji wad obu głównych nurtów badań modelowych, będących zarazem jedynie próbą kreacji analogów dla procesów rzeczywistych zachodzących w podtorzu "in situ". Można w tym miejscu jedynie dodać, iż dotychczasowe próby autora, polegające na wykorzystaniu stosu typu T-S na potrzeby rozwiązywania niektórych geotechnicznych problemów budownictwa na terenach górniczych związane np. z modelowaniem podłoża konstrukcji fundamentowych [65], ścian oporowych i tuneli [66, 67, 78], budowli ziemnych [74, 77], górotworu [72] itp., wykazały pełną przydatność analogu, a ich rezultaty nie budziły większych zastrzeżeń. Celowość stosowa-

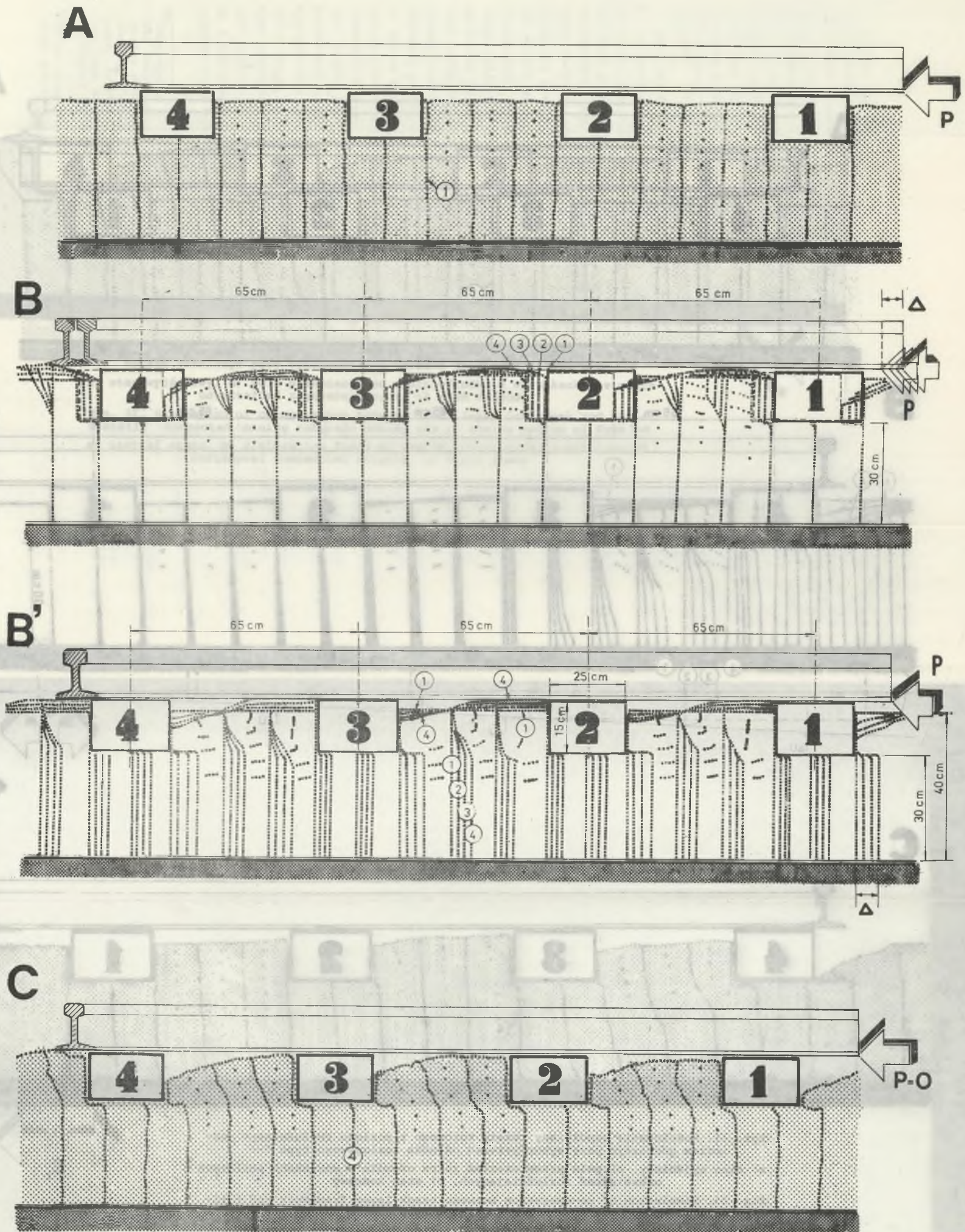
nia tej techniki modelowania jest szczególnie istotna i cenna na etapie wstępnego - rozpoznawczego podejścia do określonego problemu, co w odniesieniu do wielu zagadnień geotechnicznych terenów niegórnicznych zostało już uprzednio wielokrotnie stwierdzone.

Na przedstawionych w rozdziale 3.3 rys. 18 i 19 zilustrowano możliwość wykorzystania analogu T-S do modelowania deformacji całego górotworu wraz ze zlokalizowanymi na jego powierzchni kolejowymi budowlami ziemnymi. Szczególne zagrożenie dla nośności i stateczności tego typu obiektów stanowią, jak wiadomo, odkształcenia podłoża ukierunkowane prostopadłe do ich podłużnej osi. Analiza współdziałania nawierzchni kolejowej z podtorzem górniczym, z uwagi na liniowy charakter konstrukcji rusztu torowego, wymagała z kolei realizacji testów symulujących propagację poziomych odkształceń podłoża głównie na kierunku równoległym do osi toru [77, 79, 80]. Rozpatrzono w tym celu trzy zasadnicze przypadki możliwych praktycznie wymuszeń kinematycznych układu "nawierzchnia - podtorze":

- 1a) prostoliniowy odcinek rusztu torowego przesuwają się poziomo względem podłoża niegórnicznego; za punkt odniesienia rejestracji fotogrametrycznej przyjęto pasywne podłożo (rys. 30B),
- 1b) wymuszenie kinematyczne analogiczne jak w przypadku poprzednim; za punkt odniesienia przyjęto jednakże model rusztu torowego (rys. 30B'),
- 2) odcinek nawierzchni spoczywa na podłożu doznającym poziomych odkształceń rozluźniających  $\epsilon_r$  (rys. 31),
- 3) podłożo rusztu torowego doznaje poziomych odkształceń zagęszczających  $\epsilon_z$  (rys. 32).

Wszystkie badania (w skali 1:1) realizowano z wykorzystaniem prototypowego stanowiska badawczego własnej konstrukcji. Stanowisko to, o wymiarach powierzchni roboczej<sup>33</sup> 3,0 x 1,5 m, dzięki linowo odkształcalnej podstawie (listwa gumowa) umożliwiało realizację jednorodnych - poziomych deformacji podłoża  $\epsilon_{r,z}$ , krzywizny dowolnego znaku oraz nachylenia. Szczegółową dokumentację oraz opis działania aparatu przedstawiono we wcześniejszych pracach, np. [65]. W ośrodku wyodrębniono kontrastowe znaczniki ułatwiające bezpośrednią, fotogrametryczną rejestrację pola przemieszczeń wybranych ziarn stosu względem pozostałych elementów tworzących tu rodzaj tła. Na odrębnej kliszy każdorazowo rejestrowano stan wyjściowy "A", etap quasi-dynamicznych przemieszczeń względnych nawierzchni i podtorza "B" oraz stan końcowy "C". W badaniach ograniczono się do 4-podkładowego, ważkiego (obciążenie wyłączanie ciężarem własnym nawierzchni) odcinka rusztu torowego spoczywającego na 30 cm warstwie stosu.

<sup>33</sup> Przy całkowitym braku tarcia ośrodka o czołowe powierzchnie stanowiska badawczego tzw. efektywna strefa modelowania nie wykazywała żadnych zaburzeń, poza niewielkimi (praktycznie pomijalnymi) wpływami ścian bocznych aparatu.

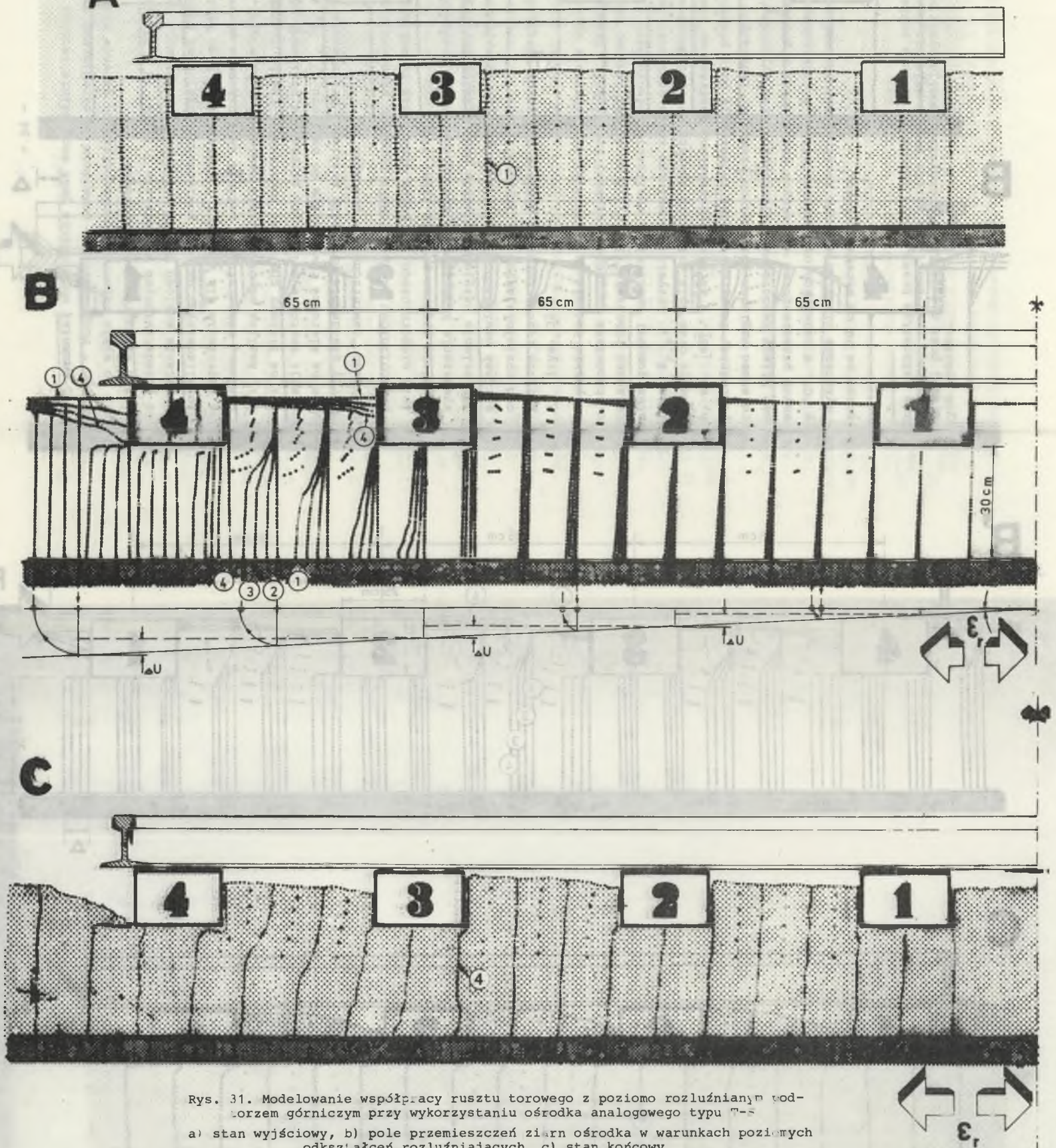


Rys. 30. Modelowanie współpracy rusztu torowego z podtorzem przy wykorzystaniu ośrodka analogowego typu T-S

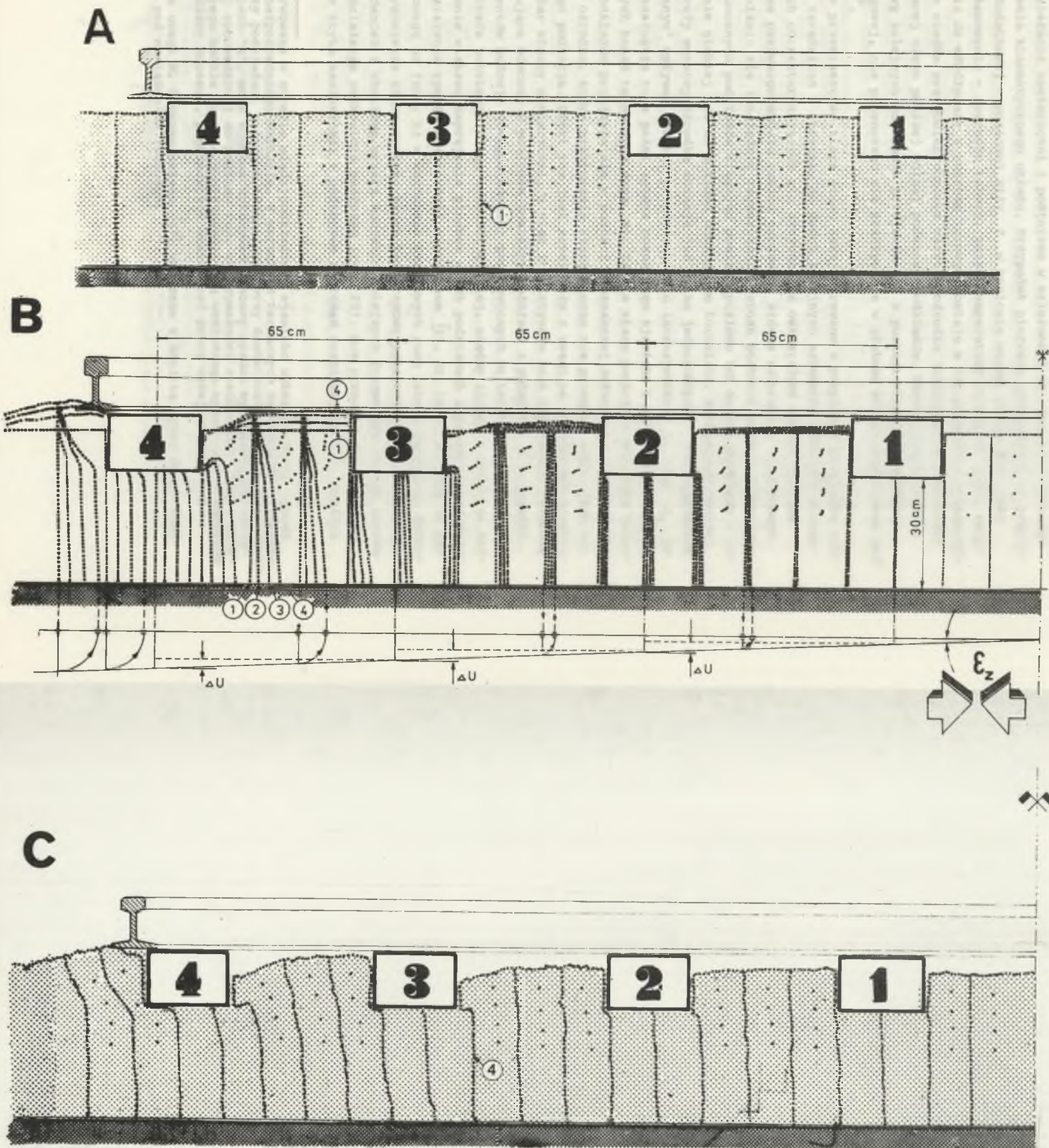
a) stan wyjściowy, b) - b') przesuw rusztu względem pasywnego podłoża (niegórniczego), c) stan końcowy

Fig. 30. Simulation of co-operation between track layer framework and subgrade making use of analog medium of Type T-S

a) initial state, b) - b') displacement of track layer framework in relation to passive foundation (non-mining), c) final state



Rys. 31. Modelowanie współpracy rusztu torowego z poziomo rozluźnianym podłożem górniczym przy wykorzystaniu ośrodka analogowego typu T-S  
 a) stan wyjściowy, b) pole przemieszczeń ziarn ośrodka w warunkach poziomych odkształceń rozluźniających, c) stan końcowy  
 Fig. 31. Simulation of co-operation between track layer framework and horizontally ravelled mining subgrade making use of analog medium, type T-S  
 a) initial state, b) dislocation field of medium grains under horizontal, raveling strains, c) final state



Rys. 32. Modelowanie współpracy rusztu torowego z poziomo zagęszczonym podtorzem górniczym przy wykorzystaniu ośrodka analogowego typu T-S  
 a) stan wyjściowy, b) pole przemieszczeń ziarn ośrodka w warunkach poziomych odkształceń zagęszczających, c) stan końcowy

Fig. 32. Simulation of co-operation between track layer framework and horizontally compacted mining subgrade making use of analog medium of Type T-S  
 a) initial state, b) dislocation field of medium grains under conditions of horizontal compacting strains, c) final state

Analiza otrzymanych wyników wskazuje na zasadniczą odrębność charakteru współdziałania nawierzchni z podtorzem w zależności od typu realizowanego wymuszenia kinematycznego układu. Przypadek pierwszy, polegający na przyłożeniu dodatkowej - poziomej siły  $P$  w poziomie stopki szyny (np. jako efekt hamowania - rozruchu taboru, zmian temperatury otoczenia itp.) wskazuje, iż do współpracy z rusztem torowym zostaje w tym przypadku wciągnięta jedynie cienka przypowierzchniowa warstwa ośrodka (tłuczniwa) o miąższości sięgającej nieco poniżej dolnej podstawy podkładów. Tarcie ziarn stosu o podstawy kolejnych podkładów przejawia się w postaci cienkiej warstewki poślizgowej, nie przenosząc się praktycznie w głębsze strefy modelowego podtorza<sup>34</sup>.

Pole przemieszczeń ziarn stosu zarejestrowane w powyższym przypadku różni się zasadniczo w stosunku do dwóch kolejnych schematów wymuszeń kinematycznych charakteryzujących się aktywnością okształceń samego podłoża względem pasywnego modelu rusztu torowego. Główne zaburzenie w swobodnym rozluźnianiu się (względnie zagęszczaniu) stosu pochodzi od pionowych krawędzi bocznych podkładów sięgając poniżej poziomu ich dolnej podstawy i zarazem nie głębiej niż do poziomu modelowego torowiska. Zalegające poniżej tej strefy warstwy ośrodka doznają już tylko jednorodnych - niezaburzonych "kotwiącym" wpływem rusztu, przemieszczeń o intensywności  $\varepsilon_x$  lub  $\varepsilon_z$ . Na uwagę zasługuje tu w pełni zgodna ocena tego zjawiska z rezultatami wcześniejszych badań terenowych (rys. 9). Tarcie ziarn podłoża o podstawę kolejnych podkładów przejawia się w postaci nieznacznej deformacji cienkiej warstewki ośrodka, która praktycznie rzecz biorąc nie przenosi się w głąb modelowego podtorza. Efekt ten jest zrozumiały z uwagi na stosunkowo niewielki ciężar własny nawierzchni, a więc i relatywnie małe naprężenia normalne występujące wówczas w poziomie kontaktu podkładu z podsypką. W przypadku fundamentów budowli (bezpośrednich) posadowionych na terenach górniczych, tzw. strefa kotwienia sięga znacznie głębiej, między innymi z uwagi na nieporównanie większe naprężenia pionowe w ich podstawach i pasywny charakter współdziałania tychże konstrukcji z podłożem [91, 92, 162]. Zwróćmy tu ponadto uwagę na fakt, iż w warunkach terenowych ruch taboru wprowadza dodatkowe wymuszenia kinematyczne, które każdorazowo przejawiają się między innymi również i chwilową utratą kontaktu kolejnych fragmentów rusztu torowego z odciażanym całkowicie podłożem (rys. 25). Nie przenosi ono bowiem w strefie styku nawierzchni z podtorzem naprężeń rozciągających<sup>35</sup>. Analiza

<sup>34</sup> Obserwowane w strefie międzypodkładowej zjawisko wykazuje cechy typowe dla bezpośredniego ścinania. W warunkach terenowych zagęszczona w strefie między podkładami podsypka tłuczniowa, przy dostatecznie dużych przemieszczeniach "A", może wówczas wykazywać znaczny spadek wytrzymałości szczytowej sprowadzonej do poziomu tzw. wytrzymałości residualnej [153]. Efektem tego będzie wyraźne zmniejszenie się wzdłużnego oporu rusztu torowego na dalszy przesuw, pogarszające stabilność pracy całej nawierzchni.

<sup>35</sup> Patrz uwagi M. Gryczmańskiego [47] związane z analizą pracy belek ciągłych pod obciążeniem ruchomym.

tego aspektu współdziałania elementów składowych drogi kolejowej stanowi istotny fragment całego, rozważanego w pracy problemu.

Interesujące w tym względzie wydają się ogólne rozważania natury teoretycznej S. Dmitruka [26], który stwierdza, że "możliwości konstrukcyjne wykształcenia połączenia pomiędzy nawierzchnią a podtorzem są bardzo ograniczone, a rolę łącznika odgrywa styk tych obiektów w postaci sprzężenia ciśnieniowo-ciernego". Określenie funkcji sprzężenia tego rodzaju łącznika jest szczególnie trudne. W przypadku wystąpienia w eksploatowanym podtorzu poziomych odkształceń  $\epsilon_r$  lub  $\xi_r$ , łączniki te zapewniają ponadto swobodę przemieszczeń poszczególnych części układu, nie dopuszczając do mobilizacji dodatkowych naprężeń stycznych w podstawach kolejnych podkładów. Nie przyczyniają się one tym samym do powstania z tego tytułu w torze dodatkowych sił osiowych (rozciągających lub ściskających). Siły takie mogłyby powstać jedynie jako efekt naporu (rozporu) podsypki usytuowanej w okienkach oraz jej tarcia o czołowe powierzchnie podkładów. Wskutek oddziaływania dynamicznego taboru ulegają one jednak szybkiej redukcji<sup>36</sup> [103].

Ograniczenie analizowanej tu swobody przemieszczeń połączone z podjęciem aktywnej roli przekaźników sygnałów (dodatkowych naprężeń) pochodzących od wymuszeń typu górniczego jest możliwe jedynie w torach nieobciążonych lub użytkowanych zgoła sporadycznie. Tylko takie warunki sprzyjają bowiem mobilizacji w poszczególnych elementach układu dodatkowych reakcji wewnętrznych. Przekazywane wówczas przez łączniki sygnały zwrotne uzewnętrzniają się w postaci szkód, zilustrowanych na rys. 8. Jednoznacznym potwierdzeniem słuszności tej tezy jest obserwowane w praktyce wyraźne zróżnicowanie zakresu uszkodzeń w torach intensywnie eksploatowanych w porównaniu z torami wyłączonymi z ruchu w trakcie prowadzenia podziemnej eksploatacji górniczej.

Pasywny charakter współdziałania konstrukcji z podłożem górniczym wykazują również pozostałe budowle liniowe, takie jak: elementy infrastruktury uzbrojenia terenu (rurociągi, gazociągi, kolektory, linie kablowe itp.), tunele, przepusty, niezdylatowane długie ławy i ruszty fundamentowe itp. Utożsamianie warunków statycznej pracy tych budowli z intensywnie eksploatowaną nawierzchnią dróg kolejowych na terenach górniczych należy, w świetle przytoczonych tu wyników badań modelowych oraz terenowych, uznać za nieadekwatną. Linie kolejowe, jako specyficzny typ budowli liniowej, wymagają zatem na terenach górniczych stosowania odrębnych warunków profilaktyki konstrukcyjno-wytrzymałościowej i użytkowej [70, 135, 163].

<sup>36</sup> Warunki w jakich prowadzono te badania, zakładały możliwość jednorazowej, pełnej mobilizacji sił naporu (w praktyce wymuszanej mechanicznie pomiędzy dwoma kolejnymi przejazdami składów) podsypki na podkłady, a następnie rejestrowaniu spadku wartości tych sił w trakcie przejazdu kolejnych osi taboru. W warunkach eksploatacyjnych pracy toru na terenach górniczych można to uznać za przypadek zgoła sporadyczny. Ciągłe przejazdy składów nie dopuszczają bowiem w rzeczywistości do tak interpretowanej tendencji wzrostu poziomych odkształceń podtorza (patrz tabl. 1).



### 3.6. Wnioski końcowe

Przedstawione w powyższym rozdziale wyniki własnych badań terenowych oraz eksperymentów w skali modelowej i półtechnicznej upoważniają do sprecyzowania następujących wniosków natury ogólnej i szczegółowej:

1. W świetle przeprowadzonych badań i analiz stwierdzono, że wpływ podziemnej eksploatacji górniczej na komunikacyjne budowle liniowe wykazuje specyficzne cechy różniące zasadniczo współdziałanie tych obiektów z podłożem w odróżnieniu od innych budowli tego typu zlokalizowanych również na terenach górniczych (takich jak np.: rurociągi, linie kablowe, gazociągi itp.). Z uwagi na funkcjonalną odrębność tego elementu infrastruktury technicznej powierzchni za najistotniejsze znamiona wspomnianej odrębności należy bez wątpienia uznać efekty pochodne quasi-dynamicznego, ruchomego obciążenia eksploatacyjnego nawierzchni (lokalne odrywanie konstrukcji rusztu torowego od podłoża w trakcie przejazdów kolejnych osi taboru, kompensujący wpływ oddziaływań dynamicznych w stosunku do mobilizowanego naporu podsypki na podkłady itp.), techniczno-ruchowe zróżnicowanie warunków współdziałania nawierzchni z podtorzem, jego charakterystyczne uwarunkowania geometryczne oraz wysokie wymagania co do trwałości i niezawodności użytkowej.
2. Rozluźniające odkształcenia terenu górniczego i związane z tym procesy (np. zmienność fizykomechanicznych cech gruntów) zachodzące w podłożu gruntowym stają się przyczyną znacznego, długotrwałego obniżenia cech sprężystych podtorza (3-6 razy w stosunku do wartości wyjściowej; dla  $\epsilon_r = 0$ ). Te z kolei przyczyniają się do istotnej redystrybucji naprężeń zarówno w strefie oddziaływań kontaktowych nawierzchni z podtorzem, jak i w odniesieniu do poziomu wyteżenia samej konstrukcji rusztu torowego. Normalne naprężenia kontaktowe w strefie styku rusztu z podłożem ulegają pewnej redukcji (o około 40-60%) z uwagi na wciągnięcie do współpracy większej liczby sąsiednich podkładów. Towarzyszy temu jednakże istotny (2-3 krotny) wzrost momentów zginających w szynach, co jest połączone z wyraźną zmianą pionowej podatności podłoża gruntowego. Stanowi to między innymi wiarygodne wytłumaczenie występowania większej liczby pęknięć szyn i rozjazdów na terenach górniczych (ok. 3,5-krotny wzrost w warunkach śląskiej DOKP) potwierdzając zarazem tezę, iż konsekwencje tego stanu rzeczy nie mogą w pełni obciążać wyłącznie odpowiednich służb kolei.
3. Podtorze zlokalizowane na terenach górniczych jest bezpośrednio zagrożone zarówno chwilową jak i trwałą (długotrwałą) utratą nośności.
  - 3.1. Pierwszy z wymienionych czynników destabilizacji, implikowany w głównej mierze poziomymi odkształceniami rozluźniającymi  $\epsilon_r$  nie zaś wzrostem nacisków jednostkowych na podtorze  $p$ , stanowi efekt redystrybucji poziomych składowych stanu naprężenia w podłożu. Po-

chodną tego zjawiska jest stwierdzony przez autora wzrost dodatkowych osiadań zarówno samego rusztu torowego względem torowiska, jak i całego korpusu budowli ziemnych (nasypów) względem rodzimego podłoża gruntowego. W przypadku przekopów należy liczyć się z praktycznie niespotykanym w innych warunkach efektem ich względnego spłyceńia z uwagi na znacznie bardziej intensywny wzrost obniżen górniczych terenu w strefach przyskarpowych, aniżeli samego torowiska. Zwrócenie uwagi na szereg aspektów związanych z występowaniem nietypowych deformacji korpusów kolejowych budowli ziemnych na terenach górniczych oraz przeprowadzenie rozpoznawczych badań eksperymentalnych nad mechanizmami prowadzącymi do aktywizacji analizowanych zjawisk, stanowi w pełni oryginalny wynik poznawczy niniejszej pracy, o istotnych cechach praktycznej przydatności. Ilościowe określenie tych zmian może wymagać jednak jeszcze dalszych badań, głównie zaś większej liczby pomiarów i obserwacji terenowych.

3.2. Trwała (długotrwała) utrata nośności przez podtorze jest związana z ingerencją poziomych deformacji podłoża górniczego w fizykomechaniczne cechy gruntów, co jest związane przede wszystkim ze spadkiem ich wytrzymałości na ścinanie. W specyficznych warunkach podtorza kolejowego, z uwagi na cykliczny charakter obciążeń zewnętrznych, możliwość znacznych (okresowych) zmian wilgotności gruntu oraz wyrażną prekonsolidację jego strefy przypowierzchniowej itp., przebieg tego procesu staje się znacznie bardziej złożony i mniej czytelny aniżeli zachodzi to w stosunku do podłoża innych typów budowli. Sposób obciążeń podłoża gruntowego spełniać tu będzie jednakże zdaniem autora rolę czynnika aktywizującego procesy związane z odbudową mechanicznych cech gruntów podtorza.

3.3. Prekonsolidacja przypowierzchniowej strefy podtorza sprawia, że niezależnie od opisanych uprzednio zagrożeń ze strony odkształceń rozluźniających za realne w świetle przeprowadzonych badań należy uznać pojawienie się w górnych warstwach podtorza lokalnych stref granicznego stanu biernego (sprężonego). Prawdopodobieństwo zaistnienia takiej sytuacji jest możliwe szczególnie w trakcie kształtowania się pełnej niecki obniżeniowej, w środkowym obszarze jej strefy dennej.

4. Badania eksperymentalne zjawisk charakteryzujących proces współdziałania rusztu torowego z podtorzem, w których wykorzystano między innymi ośrodek analogowy typu Taylora-Schneebeli'ego, potwierdziły w pełni praktyczną przydatność i trafność przyjętej techniki modelowania. Możliwość pełnej (nieprzerwanej) quasi-dynamicznej rejestracji pola przemieszczeń dowolnych ziarn podtorza dla różnych schematów kinematycznych wymuszeń w obrębie układu "ruszt - podłoże" (przesuw względny rusztu w stosunku do pasywnego podtorza - poziome rozluźnienie lub zageszczenie jednorodne

podłoża) stanowi bez wątpienia cenną i w pełni wiarygodną weryfikację, uzupełniającą wyniki wcześniejszych badań i obserwacji terenowych.

- 4.1. Badania te ujawniły niezaprzeczalny fakt istotnego zróżnicowania mechaniki współdziałania rusztu torowego z podłożem górniczym w odniesieniu do zjawisk rejestrowanych dla podtorza pasywnego (nie-górniczego).
- 4.2. W pierwszym przypadku kinematyczny obraz pola przemieszczeń ziarn wykazuje jednoznacznie, że do współpracy z rusztem torowym jest wciągana jedynie bardzo wąska strefa podłoża podkładów wraz z materiałem wypełniającym przestrzeń tzw. okienek, co sprowadza się do wniosku o celowości wyodrębnienia podstawowych, ciśnieniowo-cier-nych więzów przedmiotowego układu.
- 4.3. Stwierdzono, że w przypadku symulacji odkształceń charakterystycznych dla podłoża górniczego pole przemieszczeń ogarnia całą strefę modelowego podtorza. W przypowierzchniowej warstwie ośrodka obserwowany jest wyraźny efekt "klamrujący" konstrukcji rusztu torowego (w przypadku trwałego kontaktu nawierzchni z podłożem), który podlega całkowitej niemal że redukcji w przypadku pewnej (choćby niewielkiej i krótkookresowej) swobody pionowych przemieszczeń konstrukcji względem podłoża. Wytworzeniu takich warunków sprzyja w rzeczywistości ruch taboru, powodując odrywanie fragmentów rusztu torowego od podłoża. Należy zauważyć, iż wcześniejsze badania terenowe tego zagadnienia dostarczyły rezultatów w pełni zgodnych z powyższymi spostrzeżeniami i uwagami, nie zezwalając jednakże na zebranie tak obszernego materiału faktograficznego w odniesieniu do kinematycznych aspektów tego złożonego zjawiska.

W przeświadczeniu autora badania przedstawione w niniejszej części pracy dostarczyły przekonujących dowodów na to, iż próby rozwiązania złożonych zagadnień z zakresu współdziałania różnego rodzaju konstrukcji z podłożem górniczym nie mogą być ograniczane wyłącznie do spekulatywnych analiz teoretycznych względnie rozważań natury czysto apriorycznej. Wymagała każdorazowo względami natury praktycznej dogłębna analiza fizykalna zagadnienia powinna przy tym polegać na możliwie wszechstronnej penetracji doświadczalnej badanego problemu posługując się przy tym różnorodnymi technikami badawczymi, od eksperymentów w skali laboratoryjnej poczynając (w przedmiotowej pracy były to między innymi: specjalistyczne badania trójosiowe, modele ziarnistych ośrodków analogowych, próby wykorzystujące prototypowe stanowiska badawcze w skali półtechnicznej itp.) a na badaniach i obserwacjach terenowych kończąc. Wzajemnie weryfikujący się i uzupełniający charakter wyników tychże badań może stanowić dopiero w przedmiotowej klasie problemów badawczych wiarygodną przesłankę do kreacji adekwatnych modeli fenomenologicznych danego zagadnienia.

#### 4. ANALIZA STANU NAPRĘŻENIA W PODŁOŻU RUSZTU TOROWEGO NA TERENACH GÓRNICZYCH

##### 4.1. Problemy odwzorowania współdziałania nawierzchni z podtorzem

Mimo wieloletnich prób czynionych w tym zakresie, modelowe odwzorowanie stosunkowo prostego (mogło by się wydawać) układu mechanicznego "ruszt torowy - podtorze", stanowi wciąż aktualny i niezmiennie ważny dla kolejnictwa problem. Fakt ten nie wynika bynajmniej z obecnego poziomu wiedzy reprezentowanej przez dyscyplinę naukową określaną mianem "drogi kolejowe". Zagadnienie to nie doczekało się bowiem, jak do chwili obecnej, pełnej i jednoznacznej oceny również i w odniesieniu do pozostałych działów geomechaniki ogólnobudowlanej zajmującej się szeroko rozumianą współpracą konstrukcji budowlanych z podłożem<sup>37</sup>. S. Dmitruk i B. Lysik stwierdzają wręcz, że "... pełne rozwiązanie zadań współdziałania będzie możliwe dopiero wówczas, gdy w wyniku wszechstronnych badań uda się ustalić modele współdziałania w postaci teorii pozwalających określać stan naprężenia i odkształcenia w każdym obszarze elementarnym obiektów tworzących układ, jak to ma miejsce w teoriach mechaniki".

Jedną z istotnych trudności stojących na tej drodze jest w chwili obecnej brak bliższego określenia uogólnionych wyrażeń określanych mianem równań stanu dla gruntów. Metodyka rozwiązywania wielu zadań technicznych pociąga za sobą częstokroć konieczność operowania kategoriami abstrakcji, urzeczywistnianych następnie w postaci modeli (np. mechanicznych, matematycznych, fizycznych itp.). W problematyce budownictwa na terenach górniczych - w tym i budownictwa komunikacyjnego, z uwagi na specyficzny charakter współdziałania obiektów z podłożem dominuje pogląd, iż sam górotwór można aproksymować modelami ośrodków sztywnych. Spoczywające na nim warstwy przypowierzchniowe, określane mianem strefy aktywnej, to ośrodki o określonych cechach odkształcalności. Przyjmuje się tu, iż wektor przemieszczenia powierzchni w strefie kontaktu konstrukcji z podłożem jest zawsze współosiowy z wektorem siły wzajemnego oddziaływania obu elementów układu. Do opisu strefy aktywnej są wykorzystywane i odpowiednio adaptowane - znane modele ciał sprężystych oraz niesprężystych (częściowo sprężystych), pojedyncze sprężyny, ośrodki kontynualne (fenomenologiczne) o cechach sprężysto-plastycznych i lepkosprężystych, ośrodki rozdrobnione i modele stochastyczne (strukturalne). Zdaniem W. Króla [86], spośród wielu możliwych do przyję-

<sup>37</sup> Patrz: Praca zbiorowa [25].

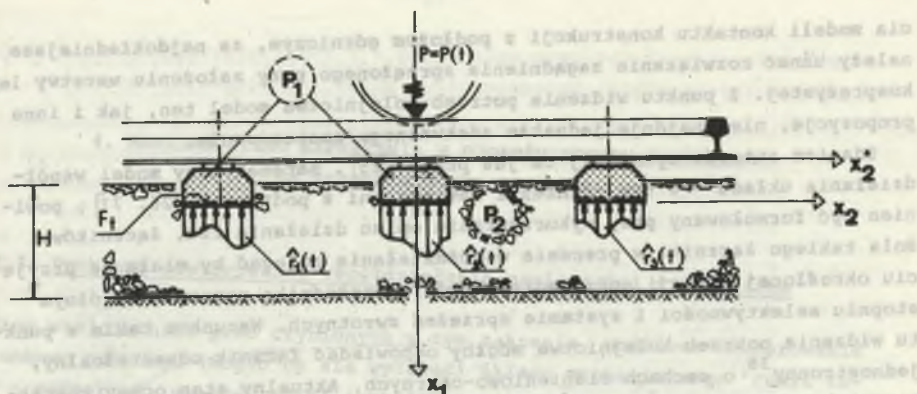
cia modeli kontaktu konstrukcji z podłożem górniczym, za najdokładniejsze należy uznać rozwiązanie zagadnienia sprzężonego przy założeniu warstwy lepko-sprężystej. Z punktu widzenia potrzeb kolejnictwa model ten, jak i inne propozycje, nie znajduje jednakże adekwatnego zastosowania.

Zdaniem autorów cytowanej tu już pracy [25], matematyczny model współdziałania układu - w tym również i nawierzchni z podtorzem [26, 71], powinien być formułowany przy wykorzystaniu opisu działania tzw. łączników. Rola takiego łącznika w procesie współdziałania polegać by miała na przyjęciu określonej funkcji sprzężenia układu, przekaznika sygnałów o różnym stopniu selektywności i systemie sprzężeń zwrotnych. Warunkom takim z punktu widzenia potrzeb kolejnictwa mógłby odpowiadać łącznik odkształcalny, jednostronny<sup>38</sup> o cechach ciśnieniowo-ciernych. Aktualny stan oceny charakterystyk geometrycznych i materiałowych takiego łącznika jest stosunkowo ograniczony, o czym wspomniano już uprzednio, i jako taki powinien stanowić przedmiot ewentualnych dalszych badań i poszukiwań. Z punktu widzenia potrzeb niniejszej pracy wiele cech tego podejścia ma jednakże atrybuty praktycznej przydatności, głównie z uwagi na możliwość bliższego wyjaśnienia niektórych aspektów współdziałania nawierzchni z podtorzem górniczym i ustalenia źródeł dodatkowych wymuszeń w tymże układzie. Z punktu widzenia mechaniki próba opisu współpracy rusztu torowego z podłożem polega na poszukiwaniu rozwiązania dyskretnego dla zagadnienia kontaktowego dwóch odkształcalnych ciał. Współdziałające obiekty, oznaczone tu przez  $p_1$  (podkłady) i  $p_2$  (podłoże rusztu) w sensie mechanicznym różnią się rodzajem materiału, z którego zostały ukształtowane, a to z kolei sprawia, że powstające w nich reakcje są odmienne, co w sposób poglądowy przedstawiono na rys. 33. Dla stanów przedgranicznych w obrębie powierzchni styku musi być spełniony ogólny warunek równowagi oddziaływań podkładów  $p_j(t)$  i reakcji podtorza  $r_j(t)$ :

$$\int_{F(t)} p_j(t) dF + \int_{F(t)} r_j(t) dF = 0 \quad (4.1)$$

Z uwagi na brak możliwości bliższego określenia równania konstytutywnego dla ośrodków tworzących podtorze oraz przyjmowanie powszechnie do opisu jego stanu funkcji z niejawnym argumentem czasu  $t$ , zależność (4.1) nosi cechy modelowego odwzorowania zdarzenia, nie zaś procesu. Należy tu ponadto zauważyć, że funkcje  $p_j(t)$  oraz  $r_j(t)$ , uwzględniające warunki początkowo-

<sup>38</sup> Z mechanicznego punktu widzenia założenie więzi sprężystej na styku konstrukcji z podłożem działa dwukierunkowo. W zależności od kierunku wymuszonego odkształcenia elementu nawierzchni powstaje zatem w łączniku siła dodatnia (ściśkanie - przy dociążeniu) lub ujemna (rozciąganie - przy odciążeniu). Zachodzi tu potrzeba samoczynnego wyłączenia więzi w przypadku pojawienia się w niej reakcji ujemnej z uwagi na pełną swobodę odrywania nawierzchni od podłoża.



Rys. 33. Uogólniony model współdziałania nawierzchni z podtorzem  
 Fig. 33. A generalized model of co-operation between track structure and subgrade

-brzegowe zadania, nie mają w powyższym ujęciu żadnych formalnych ograniczeń i jako takie mogą przyjmować dowolną praktycznie formę zapisu. Poprawność rozwiązania zadania jest uzależniona od określenia aktualnej w chwili "t" powierzchni styku elementów układu  $F(t)$ . W analizowanej tu sytuacji podtorza górniczego i charakteryzujących je stałych ograniczeniach prędkości ruchu, szybkość przemieszczania się cząstek obciążonego podłoża  $p_2(t)$  nie będzie przekraczała prędkości przemieszczeń układu wymuszającego  $p_1(t)$ , zn. podkładów. W chwili obciążenia taborem do współpracy będzie zatem wciągana cała powierzchnia łącznika  $F_0$ , zaś w przypadku odciążenia będzie ulegać ona redukcji do wartości  $F_0 \approx 0$  (odrywanie podkładu od podłoża), by powrócić do wartości pierwotnej  $F_0$  z chwilą obciążenia podłoża samym już tylko ciężarem własnym nawierzchni (rys. 5 i 25). W pewnych ograniczonych (lokalnych) strefach podłoża może wystąpić trwała redukcja tej powierzchni (np. podkłady podparte częściowo, wiszące itp.), na co zwrócono już uwagę we wcześniejszych pracach autora [0, 7]. Obiektywna trudność związana z brakiem jednoznacznie określonego zapisu warunków brzegowych dla rozpatrywanego układu sprawia, że nieuchronnie staje się podjęcie decyzji o wyborze charakteru rozkładu oddziaływań kontaktowych. Przyjęta hipoteza powinna cechować jej techniczna dopuszczalność, potwierdzona możliwie licznymi badaniami oraz testami w warunkach eksploatacyjnych. Aktualnie znane są liczne prace z tego zakresu związane zarówno z oceną rozkładu naprężeń w płaszczyźnie kontaktu stempla z podłożem (obciążenie półprzestrzeni), jak i rozkładem naprężeń w samym ośrodku rozdrobionym [10]. Jako jedni z pierwszych eksperymenty takie prowadzili już w latach dwudziestych A.T. Goldbeck, A. Scheidig i F. Kögler [147], uzyskując w rezultacie postać rozkładów parabolicznych, zbliżonych do równomiernych, jak i siodłowate rozkłady nacisków w podstawie elementów obciążających. Różnejsze badania wykazały, że rozkład naprężeń pionowych w płaszczyźnie kontaktu zależy od wielu czyn-

ników, takich jak wielkość i charakter obciążenia podłoża, poziom zagłębienia elementu, stopień zagęszczenia ośrodka gruntowego oraz jego wilgotność, sztywność, szorstkość oraz kształt powierzchni obciążającej i in. [10, 62, 175]. Obecnie wiadomo, że małym obciążeniom odpowiada z reguły rozkład kontaktowych naprężeń normalnych w kształcie siódła, który wraz ze wzrostem obciążenia przekształca się w rozkład typu parabolicznego<sup>39</sup>. Zachodząca w trakcie wzrostu obciążeń koncentracja naprężeń pod środkiem dociążanego - sztywnego<sup>40</sup> elementu różni się zatem znacznie od rozkładu równomiernego, przyjmowanego z reguły dla podłoża podkładów przez wielu badaczy, np. J. Spanga [150], J. Eisenmanna [28] i innych [17, 18, 31, 39, 59]. Przy występujących wówczas stosunkowo niewielkich zmianach w rozkładzie naprężeń  $\sigma_{11}$  w obrębie podłoża, istotne dla globalnej oceny pracy podtorza różnice w zależności od przyjętej hipotezy o reakcji podłoża można zaobserwować w przypadku naprężeń poziomych  $\sigma_{22}$  oraz stycznych  $\sigma_{12}$ , co dla kilku przykładów obliczeń numerycznych zilustrowano na rys. 37-39.

Schematy obliczeniowe wykorzystujące paraboliczny rozkład naprężeń kontaktowych w podstawach podkładów przedstawił, jako jeden z pierwszych, G.M. Szachunjan [157], odwołując się przy tym do wyników swych wcześniejszych badań laboratoryjnych, z których wynikało, że naprężenia w osi (poprzecznej) obciążonego podkładu przewyższają o około 60% wartość ekwiwalentnych naprężeń sprowadzonych do rozkładu odśrodkowo równomiernego. Podobne wyniki obszernych analiz porównawczych, odnoszących się do podtorza i pojedynczych stempli, przedstawił I.I. Kandaurov [55]. Również R. Szajer [158] oraz J. Sysak [155] bazując na wynikach wcześniejszych badań Brueninga i Schuberta wskazują na celowość przyjęcia podobnego opisu rozkładu ciśnień na podsypkę, sugerując zarazem wykorzystanie w teoretycznym opisie pracy warstw podsypki modeli ośrodków rozdrobionych w postaci zbioru jednośrednicowych, kulistych krazków (rys. 34-8). Niektórzy autorzy, jak np. H. Borowicka [11] dla znacznych obciążeń sypkiego podłoża sugerują przyjmowanie charakteru oddziaływań kontaktowych w postaci rozkładu normalnego. Rozkłady tego typu uzyskuje się każdorazowo w bezpośrednim podłożu podkładów, czego potwierdzeniem mogą być między innymi wyniki obszernych badań laboratoryjnych przeprowadzonych pod kierunkiem S. Mazura [108].

Badania te, jak i wyniki własnych rozważań, dały podstawę dla wprowadzenia nowych propozycji teoretycznego opisu oddziaływań kontaktowych dla ośrodków rozdrobionych podtorza, gdzie materiał sypki o cechach rozporowych traktuje się jako ośrodek stochastyczny [68]. Za istotną przyczynę dodatkowej koncentracji kontaktowych naprężeń normalnych w strefie środkowej

<sup>39</sup> Dzieje się tak niezależnie od rodzaju gruntu.

<sup>40</sup> O nośności podłoża podkładów decyduje każdorazowo wymiar krótszej krawędzi podstawy (szerokość); na kierunku tym podkład ma znacznie większą sztywność aniżeli na kierunku długości.

wej każdego z elementów obciążających (podkładów) przy równoczesnym odprężeniu podłoża w strefach przykrawędziowych (bez jakiegokolwiek wzrostu dodatkowych obciążeń zewnętrznych) należy uznać ponadto poziome odkształcenia rozluźniające podłoża górniczego [65]. Obszerne, własne badania doświadczalne tego zagadnienia utwierdziły zatem autora w przekonaniu o słuszności przyjętego odwzorowania co do charakteru oddziaływań kontaktowych nawierzchni z podtorzem na terenach górniczych. Dla przyjętych hipotez o rozkładzie naprężeń kontaktowych oraz założonej anizotropii (megaskopowej) układu warstw podłoża istnieje wówczas możliwość trafniejszego odwzorowania charakteru współdziałania nawierzchni z podtorzem.

Wynikające stąd wnioski natury poznawczej i praktycznej spełniają zatem postulat adekwatności przyjętych wyjściowo odwzorowań dla modeli analitycznych podtorza z fizycznym obrazem zagadnienia. Zauważmy, że uwarunkowań tych nie dostrzegała w zasadzie większość stosowanych dotąd propozycji i metod obliczeniowych zmierzających do odwzorowania rzeczywistych warunków współdziałania nawierzchni z podtorzem.

Za główne atrybuty przyjętych tu założeń uznano więc:

- nieliniowy charakter oddziaływań kontaktowych podkładów z podłożem (typu parabolicznego),
- rozdrobnioną strukturę podłoża rusztu torowego charakteryzującą się uziemienną wartością współczynnika rozporu bocznego, uznanego za wiodący parametr geotechniczny podtorza górniczego,
- założenie o konstrukcyjnej niejednorodności górnych warstw podtorza (anizotropia warstwowa) oraz prekonsolidacji jego przypowierzchniowej strefy.

#### 4.2. Dobór modelu obliczeniowego podtorza

Modele mechaniczne stosowane do opisu zachowania się podłoża (w tym i rusztu torowego) można najogólniej rzecz biorąc, podzielić na ciągłe i dyskretne [23, 25, 46]. Modele zaliczane do grupy pierwszej są powszechnie stosowane w mechanice gruntów i skał, uznając je w sensie makroskopowym za ośrodki ciągłe. Założenie takie odpowiada większości spotykanych w geomechanice problemów inżynierskich, jako że wymiary elementów struktury podłoża są z reguły dostatecznie (a praktycznie pomijalnie) małe w stosunku do wymiarów badanego obiektu. Modele zaliczane do grupy drugiej uwzględniają fakt rozdrobnienia (nieciągłości) struktury materiałów, traktując je jako ośrodki dyskretne [149]. Istnieją tu również możliwości podejścia pośredniego, które z jednej strony biorą pod uwagę atrybuty rozdrobnionej struktury ośrodków poprzez uwzględnienie wewnętrznego tarcia oraz spójności materiału, z drugiej jednakże strony równania stanu traktują badany ośrodek jako materiał ciągły. Przykładem takiego podejścia są rozwiązania bazujące na teorii stanów granicznych [104]. Należy zauważyć, iż każdy z wymienionych tu sposobów ujęcia zagadnienia znalazł zastosowanie w próbach modelowo-



wego odwzorowania pracy podtorza kolejowego, w tym i podtorza na terenach górniczych.

Głównym zastrzeżeniem czynionym w stosunku do podejścia kontynuualnego jest przyjmowane "a priori" założenie o fizycznej ciągłości materiału w każdym infinitezymalnym jego obszarze. Ponadto zastąpienie w obrębie danego podobszaru (warstwy) wielu istotnych fizykomechanicznych cech rzeczywistych ośrodków rozdrobionych (gruntów) za pomocą jedynie dwóch stałych parametrów materiałowych, takich jak  $E_1$  oraz  $\nu_1$ , nie odzwierciedla specyfiki rozdrobionej struktury ośrodka poddanego obciążeniom zewnętrznym. Rozchodzenie się naprężeń w ośrodku gruntowym, który mógłby w tych warunkach być zastąpiony dowolnym innym materiałem o identycznych cechach mechanicznych ( $E_1, \nu_1$ ), podlega wszak określonym - specyficznym uwarunkowaniom o charakterze dyskretnym, niejawnym. O ile proporcje wymiarowe elementu obciążającego podłoże w stosunku do wymiarów ziarn gruntu są z reguły bardzo małe ( $10^{-3}-10^8$ ), zezwalając na tego rodzaju postępowanie, to w przypadku podłoża rusztu torowego - głównie zaś jego przypowierzchniowych warstw, zarysowuje się celowość zgoła odmiennego podejścia.

Gruboklastyczne ośrodki tworzące bezpośrednie podłoże podkładów (tłucznie, żwiry, gruboziarniste piaski, odpady przemysłowe - głównie kopalniane itp.) nie spełniają z całą pewnością wymogów ciągłości i jednorodności materiału z uwagi na ich typowo rozdrobnioną strukturę. Tworzy ją porowaty szkielec złożony z bryłowatych okruchów mineralnych (pochodzenia czwartorzędowego lub antropogenicznego), o porach częściowo wypełnionych wodą i gazem. Wzajemne oddziaływania kontaktowe między ziarnami mają charakter czysto tarciový typu "minerał - minerał", przy dowolnej konfiguracji płaszczyn kontaktu, nieregularnym kształcie oraz losowo zmiennym układzie ziarn.

Sformułowanie w kategoriach mechaniki matematycznego modelu podtorza oraz związanego z nim modelu fizycznego, wiernie odwzorowującego zjawiska i procesy zachodzące w podłożu, jest więc (jak dotąd) zadaniem niezmiernie złożonym i trudnym w praktycznej realizacji. Przydatność konkretnego modelu obliczeniowego stosowanego dla opisu analizowanego tu problemu brzegowego może zostać oceniona drogą analizy wyników wcześniejszych testów identyfikacyjnych, jak i rozważań teoretycznych związanych bezpośrednio (lub też pośrednio) z rozpatrywanym problemem. Kryteria wartościujące stopień przydatności danej koncepcji powinny wyrażać się poprzez łatwość praktycznej oceny zmiennych - wiodących parametrów modelu oraz podatność na prowadzenie optymalizujących testów numerycznych w określonym przedziale ważności modelu. Rzeczne określenie parametrów identyfikujących cechy podłoża rusztu torowego - to podstawowy cel kreacji fizycznego modelu zagadnienia. Niezbędne jest w tym celu prowadzenie ściśle określonych testów pomiarowych, które w układzie "naprężenie - odkształcenie" pozwoliłyby na możliwie wierne odwzorowanie rzeczywistych warunków pracy podtorza. To z kolei wymaga stosowania wysoce specjalistycznej aparatury i prototypowych stanowisk badawczych, głównie z uwagi na potrzebę realizacji specyficznych wymuszeń kinematycznych podłoża, charakterystycznych dla terenów górniczych.

Na obecnym etapie rozwoju geotechniki terenów górniczych spełnienie wszystkich tych wymogów nie zawsze jest jeszcze w pełni możliwe, aczkolwiek wiele prac z tego zakresu pozwala już na zadowalającą identyfikację zjawisk różnicujących charakter współdziałania obiektów inżynierskich z podłożem górniczym i podłożem wolnym od tego rodzaju wymuszeń.

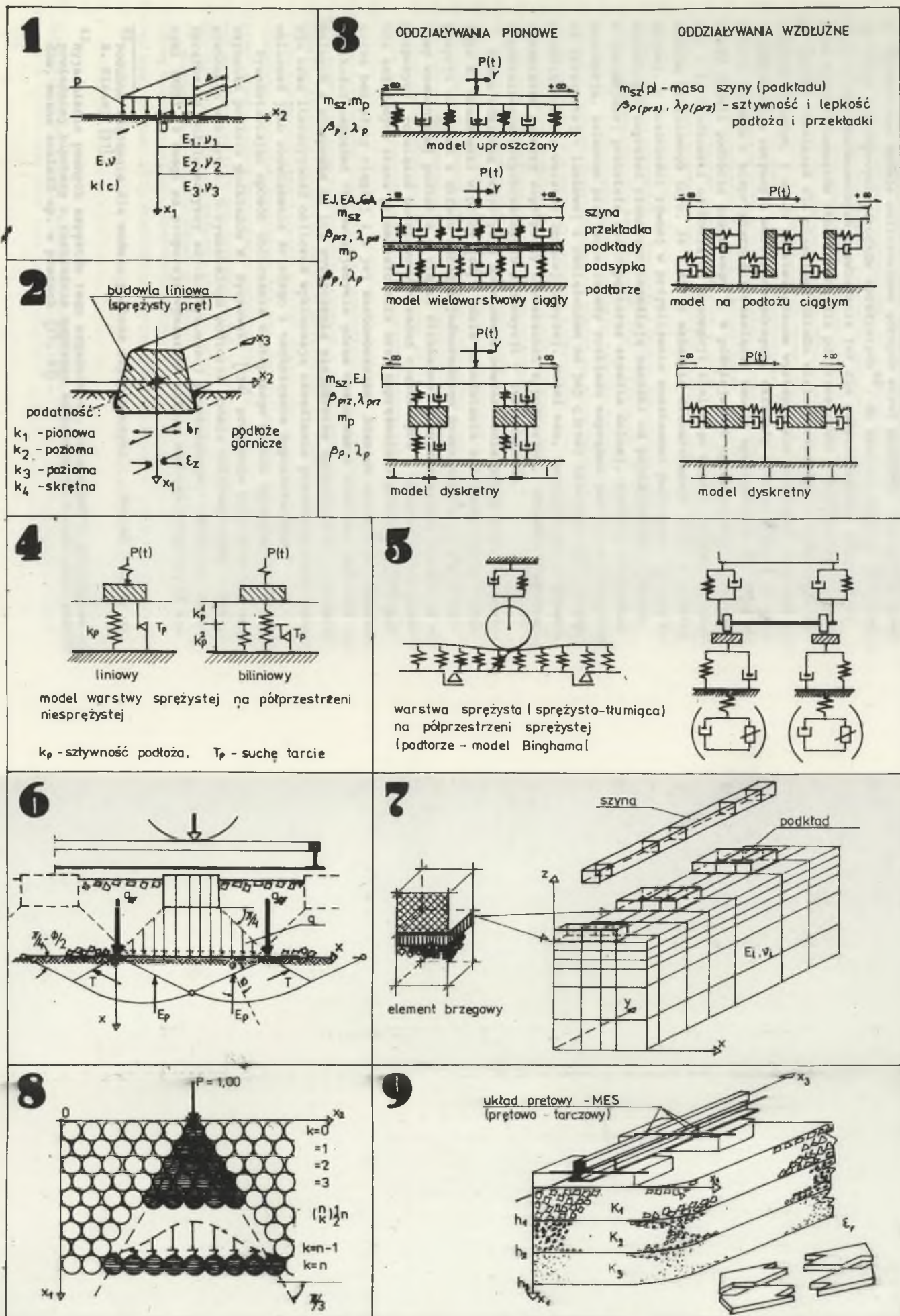
Z uwagi na prezentowany aktualnie, zaawansowany poziom wiedzy o mechanice ośrodków ciągłych wraz z jej precyzyjnym i uporządkowanym aparatem matematycznym oraz bogatą bazą eksperymentalną, podejście kontynuualne do zagadnień geotechnicznych podtorza wydaje się zdecydowanie dominować w stosunku do ujęcia dyskretnego. Dowodem tego są w chwili obecnej liczne już kreacje zaawansowanych modeli obliczeniowych podtorza i całej współpracującej z nim nawierzchni.

Z prezentowanych ostatnio w tym zakresie publikacji autorów krajowych na niewątpliwą uwagę zasługują prace J. Makowskiego [100, 102]. Dokonując wnikliwej analizy porównawczej modeli obliczeniowych podtorza oraz systemów jego wzmocnienia, od podłoża winklerowskiego i jednorodnej półprzestrzeni sprężystej poczynając, poprzez rozwiązania wykorzystujące metodę naprężeń krytycznych, teorię stanów granicznych i modele reologiczne, a na prezentacji obszernych danych eksperymentalnych kończąc, wskazuje on na możliwość szerszego ich wykorzystania w projektowaniu podłoża rusztu torowego. Uwagi te w szczególności odnoszą się do metod oceny nośności granicznej podtorza, dla opisu którego J. Makowski proponuje reologiczny model Bingham'a (rys. 34-5).

Na pewne istotne ograniczenia w doborze modeli obliczeniowych podtorza wskazuje z kolei Ł. Siewczyński [143, 144, 145], zwracając między innymi uwagę na częste fakty bezkrytycznego stosowania wybranych modeli geotechnicznych dla celów analizy pracy podtorza. Odnosi się to głównie do tzw. metody węgierskiej, bazującej na empiryczno-analitycznym modelu półprzestrzeni sprężystej, gdzie dopuszczalne obciążenia podłoża podkładów traktowane są jako obciążenia krytyczne<sup>41</sup> dopuszczające wytworzenie się w podtorzu sprężystego stanu krytycznego. Zbudowane na bazie tego modelu nomogramy typu  $\sigma_{kr} = f(\phi, c)$  budzą wątpliwości co do poprawności opisu reakcji podtorza na obciążenia eksploatacyjne, o czym wspomniano również w pracach M. Bukowskiego [16] oraz autora [76]. Ł. Siewczyński preferuje w związku z powyższym wykorzystanie modeli bazujących na teorii stanów granicznych w ujęciu Prandtla-Caquo, zwracając zarazem główną uwagę na zmienność obciążenia granicznego w zależności od wilgotności gruntów podtorza oraz fluktuacji wartości współczynników pewności w trakcie całego okresu użytkowania linii. W pracach M. Bukowskiego [17] uwagę zwracają próby opisu modelowej pracy rusztu torowego - traktowanego jako ciągła belka Gorbunowa-Posadowa, spoczywająca na jednorodnej półprzestrzeni sprężystej. Do ustalenia parametrów

41

Największe możliwe obciążenie nie powodujące uplastycznienia materiału w żadnym punkcie podłoża.



Rys. 34. Wybrane modele obliczeniowe podłoża

1 - jednorodna (uwarstwiona) półprzestrzeń sprężysta, 2 - sprężysto-plastyczne podłoża górnicze typu winklowskiego, 3 - warstwa lepko-sprężysta na półprzestrzeni sprężystej (modele warstwowe ciągłe i dyskretnie), 4 - liniowy (biliniowy) model warstwy sprężystej na półprzestrzeni sprężystej, 5 - warstwa sprężysta (lepko-sprężysta) na półprzestrzeni sprężystej, 6 - model podłoża w ujęciu stanu granicznego nośności, 7 - przestrzenny model podłoża w ujęciu MES (MEB), 8 - dyskretny model podłoża w ujęciu deterministycznym, 9 - dyskretny model podłoża warstwowego w ujęciu probabilistycznym

Fig. 34. Selected calculation models of subgrade

1 - homogeneous (stratified) elastic half-space, 2 - elastic-plastic mining subgrade of Winkler type, 3 - viscous-elastic layer on elastic half-space (continuous and discrete laminar models), 4 - linear (bilinear) model of elastic layer on elastic half-space, 5 - elastic layer (viscous-elastic) on elastic half-space, 6 - a subgrade model in terms of load capacity limit state, 7 - spatial subgrade model expressed by FEM (BEM), 8 - discrete subgrade model in terms of deterministic expression, 9 - discrete model of laminar subgrade in terms of probabilistic expression

sztynności układu, jak i sprężystości samego podłoża zaleca on wykorzystać metodę Timoszenki, uznając ją za bardziej uniwersalną w porównaniu do powszechnie stosowanego obecnie podejścia Sallera-Hankera. Testowane przez M. Bukowskiego modele obliczeniowe górnych stref podtorza - to trójwarstwowy układ izotropowych ośrodków sprężystych<sup>42</sup>, do analizy którego wykorzystano w celach porównawczych rozwiązania jak dla półprzestrzeni jednorodnej oraz metodę elementów skończonych dla półprzestrzeni niejednorodnej. Uzyskane wyniki rozwiązań dla płaskiego układu wielowarstwowego o obciążeniu odcinkowo ciągłym, z uwagi na stwierdzone występowanie poziomych naprężeń rozciągających w sztywnych warstwach górnych, skłoniły z kolei autora do wysunięcia wniosku o nieprzydatności rozwiązań teorii sprężystości dla tego rodzaju modeli podtorza gruntowego<sup>43</sup>. W późniejszych opracowaniach M. Bukowski i K. Gradkowski odchodzą od koncepcji liniowego modelu podłoża na rzecz modelu biliniowego (rys. 34 - 4), o układzie dwuwarstwowym [16]. W strefie górnej, o miąższości równej w przybliżeniu rozstawowi podkładów, poziom maksymalnych naprężeń pionowych określają naciski od pojedynczego podkładu. W obejmującej pozostałą część podtorza strefie dolnej, zgodnie z powyższą koncepcją, zalecono przyjęcie zasady rozkładu naprężeń jak dla półprzestrzeni sprężystej - liniowej z obciążeniem na jej górnej krawędzi, wynikającym z oddziaływania warstwy leżącej powyżej. Model ten, uwzględniający ponadto dynamiczne aspekty współpracy nawierzchni z podtorzem, stanowi rozwinięcie i poszerzenie dotychczasowych propozycji w tym zakresie.

Nieco odmienną propozycję modelowego odwzorowania pracy podtorza analizuje K. Gradkowski w pracy [43], gdzie przedstawia założenia zasady transpozycji obciążeń z układu ośrodka jednorodnego Boussinesq'a na płytę warstwy wzmocnionej podtorza w ujęciu Girkmanna. Przyjęta metoda polega na superpozycji rozwiązań podstawowych zadań cząstkowych i zmierza do wyznaczenia składowych stanu przemieszczenia oraz naprężenia w płaskim modelu podtorza bez płyty ciągłej i z jej zastosowaniem. Zdaniem autora, obliczeniowe wielkości naprężeń stanowią jedynie górne oszacowanie rozkładu naprężeń normalnych a stosowane do ich wyznaczenia wielokrotne uproszczenia, transpozycje oraz iteracyjność obliczeń wykluczają określenie przedstawionego sposobu obliczeń jako rozwiązania ścisłego i technicznie dopuszczalnego.

Przedstawiając sposób obliczania zastępczego modułu sprężystości i współczynnika podłoża podkładów M. Syczewski [154] proponuje przyjęcie dla uwarstwionego w kierunku horyzontalnym podtorza modelu obliczeniowego w postaci sprężystej półpłaszczyzny zdyktyzowanej prostokątnymi elementami skończonymi (MES). Z uwagi na proporcje wymiarowe układu obciążającego górną kra-

<sup>42</sup> Podobne założenia dla modelu podłoża szyny poczynili również i inni, np. S. Firlej [31].

<sup>43</sup> Wyjaśnienie pewnych aspektów tego zagadnienia, związanych z przyjęciem odpowiedniej hipotezy o rozkładzie naprężeń kontaktowych w podstawie podkładów, można znaleźć np. w pracach [71, 81].

wędź elementów proponuje przyjęcie modelu tarczy o odcinkowo zmiennej grubości, co zdaniem autora, stanowi lepsze przybliżenie przestrzennego charakteru pracy konwencjonalnego podłoża rusztu torowego<sup>44</sup>. Należy w tym miejscu zauważyć, że koncepcję taką (płaska tarcza) przedstawił już uprzednio T. Basiewicz [5], co w odniesieniu do realizacyjnego elementu konstrukcji w postaci monolitycznej nawierzchni kolejowej<sup>45</sup> zapewnia znacznie bardziej adekwatne powiązanie modelu obliczeniowego i fizycznego tego konkretnego problemu brzegowego. U podłoża takiego wyboru znalazły się dociekania autora związane z problemem kontrolowanego doboru geometrii (miąższości i głębokości ułożenia warstwy) oraz własności materiału użytego do formowania podłoża szynowego, zapewniającego w pełni sprężystą jego pracę pod obciążeniem użytkowym. Analityczna weryfikacja modelu obliczeniowego przyczyniła się tu do oceny miąższości podłoża, z którego powinny zostać wyeliminowane ośrodki rozdrobnione jako materiał niezdolny do przenoszenia naprężeń rozciągających.

Złożony charakter współpracy budowli liniowej z deformującym się górnico podłożem skłonił W. Szumierza [162] do aproksymacji rzeczywistego podłoża rusztu torowego modelem ośrodka ciąglego o cechach sprężystych typu winklerowskiego. Charakteryzują go cztery niezależne współczynniki sztywności podłoża związane z jego podatnością poziomą, pionową oraz skrętną (rys. 34 - 2). Na tej bazie analizowany jest w układzie statycznym brzegowy problem współdziałania modelu sprężystego pręta z przemieszczającym się poziomo gruntem, ze szczególnym uwzględnieniem rozkładu oddziaływań stycznych na krawędzi jego kontaktu z podłożem. Poprzez uwzględnienie cech wzdłużnej podatności budowli i poziomej podatności samego podłoża gruntowego, wskazuje ona na możliwość 30-50% redukcji obliczeniowych sił osiowych w budowlach liniowych wywołanych peźaniem podłoża górniczego. Podobny model nawierzchni, aczkolwiek w znacznie uproszczonej wersji ( $EA = \infty$ ), proponuje w swej pracy H. Kratzsch [85].

Autorzy pracy zbiorowej [21], traktującej o problemach modelowania oraz dynamiki układu mechanicznego tor - pojazd, wykorzystują nominalny model toru w postaci belki ciąglej na sprężystym podłożu Winklera. Łączniki układu o cechach sprężysto-tłumiących (ciało Kelvina-Voigta) mogą przyjmować charakterystyki liniowe lub nieliniowe, sam zaś model toru może być przyjmowany w postaci układu ciąglego lub dyskretnego o jednym stopniu swobody, składającego się z zastępczej masy toru oraz liniowych lub nieliniowych charakterystyk sztywności i tłumienia (rys. 34 - 5). Należy zwrócić uwagę, iż stosowane w modelu równoległe łączenie elementów reologicznych typu Kelvina, a więc modeli już zawierających połączenia równoległe, można zastąpić pojedynczym elementem o odpowiednio dobranych parametrach [23]. Modele tego ty-

<sup>44</sup>Patrz [71, 75].

<sup>45</sup>Czterowarstwowa płyta: beton zbrojony, beton niskiej marki, warstwy gruntu stabilizowanego.

pu nie dają więc żadnych nowych informacji o reakcji podłoża rusztu torowego.

Przytoczone powyżej - wybrane rezultaty poszukiwań w kierunku doboru optymalnego modelu obliczeniowego podtorza, zaczerpnięte z literatury krajowej poszerzono o zwięzłą prezentację najbardziej interesujących zdaniem autora, a zarazem i reprezentatywnych ujęć tego problemu w aktualnej literaturze zagranicznej. Na uwagę wydają się tu zasługiwać sprężysto-lepkie modele układów ciągłych - warstwowych jak i dyskretnych, zaproponowane przez S.L. Grassiego, R.W. Gregory'ego, D. Harrisona i K.L. Johnsona [44, 45], co zilustrowano na rys. 34 - 3. Analizując wpływ wysokich częstotliwości drgań układu (50- 1500 Hz) na pracę nawierzchni i podtorza, przeprowadzili oni analizę adekwatności tychże modeli obciążonych dynamicznie w płaszczyźnie pionowej, poziomej oraz wzdłuż osi podłużnej toru. Testowane modele w odróżnieniu od stosowanych dotąd w Wielkiej Brytanii schematów obliczeniowych nawierzchni w postaci belki Eulera spoczywającej na ciągłym - jednorodnym podłożu sprężystym, pozwalają symulować quasi-dyskretny charakter przekazywania oddziaływań na podtorze, ze szczególnym uwzględnieniem sprężystości przekładek oraz dodatkowych charakterystyk statecznościowo-wytrzymałościowych szyn<sup>46</sup>. Podwójna warstwa lepko-sprężysta pozwalała na znacznie lepsze odwzorowanie dynamiki współdziałania podkładów betonowych z podtorzem, podczas gdy w analizie pracy rusztu torowego na podkładach drewnianych, do częstotliwości około 700 Hz, w pełni wystarczającym okazał się model konwencjonalnej belki na jednorodnym podłożu sprężystym. Reakcje dyskretnego modelu nawierzchni w przedziale wysokich częstotliwości obciążeń normalnych (rzędu 600-1000 Hz) były silnie uzależnione od rezonansu podkładów i ich wpływu na podtorze.

Wpływ oddziaływań wzdłużnych o wysokiej częstotliwości miał w przypadku modelowego podtorza wyraźne znaczenie do poziomu około 200 Hz, powyżej którego szyna wykazywała skuteczne tłumienie. Modelowanie dyskretnego charakteru oddziaływań w strefie styku podkładów z podsypką nie ma w tym przypadku istotnego znaczenia, rzutującego na jakość uzyskiwanych wyników. Badania te, dostarczając wielu cennych informacji o dynamice współdziałania nawierzchni z podtorzem, na bazie przyjętych analogów mechanicznych podłoża nie zezwalają jednakże w sposób bezpośredni odwzorowywać istotnych tu - geotechnicznych aspektów pracy podtorza w trakcie obciążeń eksploatacyjnych, jak i składowych deformacji podłoża charakterystycznych dla terenów górniczych.

Najbardziej dynamicznie rozwijającym się obecnie nurtem geomechaniki w zakresie analizy pracy podtorza kolejowego jest bez wątpienia podejście adaptujące rozwiązania metody elementów skończonych (MES) i metody elementów brzegowych (MEB), dla układów płaskich i przestrzennych. Zakładając, że w ogólnym ujęciu mechaniki nawierzchnia drogi kolejowej stanowi trójwy-

<sup>46</sup>Odształcenia ścinające oraz bezwładność szyn w ruchu obrotowym [45], sama szyna traktowana jest jako belka ciągła w ujęciu Timoszenki.

miarowy element konstrukcyjny o nieliniowych cechach materiałowych, stworzono tu, jak dotąd, szereg systemów obliczeń numerycznych oraz powiązanych z nimi metod weryfikacji parametrów obliczeniowych dotyczących w głównej mierze podtorza. Zaproponowany przykładowo przez S.D. Tayabji'ego i M.R. Thompsona [165] model ILLITRACK - CRTSS<sup>47</sup> bazuje na dwuwymiarowym (półprzestrzennym) modelu tarczy o grubości liniowo zmiennej wraz z głębokością podłoża oraz liniowo (lub nieliniowo) zmiennych sprężystych cechach materiału. Model MULTA przedstawiony przez J.C. Kennedy'ego i R.T. Prausego [59] bazuje na rozwiązaniach układów trójwymiarowych - jednorodnych i warstwowych, o cechach liniowo-sprężystych. Na podobnych założeniach opiera się również model R. Sauvage i G. Larible [140] pod nazwą ROSALIE. Modyfikacją modelu MULTA jest system GEOTRACK stworzony przez C.S. Changa, C.W. Adegoke i E.T. Seliga [18]. Jest to trójwymiarowy model uwarstwionego podłoża sprężystego o zmiennych cechach materiałowych, zakładający dyskretyzację ciągłej belki podkładu na szereg elementarnych płyt kołowych obciążających równomiernie podtorze. Poprzez odpowiednie łączenie macierzy sztywności podtorza i rusztu torowego, uwzględniające równowagę całego układu i wzajemne warunki jego interakcji, uzyskano poszukiwane wielkości odkształceń i naprężeń kontaktowych, przy równoczesnej możliwości symulowania efektu odrywania rusztu (obciążonego) od podłoża. Model L.R. Herrmanna [52], o nazwie PSA, wykorzystuje do opisu podtorza elementy przyrządowe o długości nieograniczonej na kierunku równoległym do osi szyny, bazując przy tym na metodzie rozdzielania zmiennych w szeregach Fouriera dla obciążeń. Założono tu, że podtorze tworzy materiał o cechach liniowo sprężystych.

Najbardziej zaawansowany model mechaniczny drogi kolejowej w ujęciu MES przedstawili, jak dotąd, C.S. Desai i H.J. Siriwardane [24]. Do opisu trójwymiarowego układu konstrukcyjnego (rys. 34 - 7) o nieliniowych równaniach konstytutywnych ośrodka (podtorza) zastosowano cztery różne modele ciał sprężysto-lepkoplastycznych (w zadaniu jednowymiarowym: model Ramberga-Osgooda, dla układu płaskiego i przestrzennego: metoda zmiennego modułu, kryterium Druckera-Pragera, model stanu krytycznego oraz model nasadkowy; patrz [48]). Wykorzystanie metody elementów brzegowych polegało na symulacji efektów kontaktowych w strefie styku nawierzchni z podtorzem. Do istotnych zalet tego modelu zaliczyć należy, zdaniem autorów, dowolność w wyborze nieliniowo-sprężystych lub sprężysto-plastycznych modeli konstytutywnych gruntu, konsekwencję i pewność zastosowanych procedur numerycznych, założenie dowolnej siatki węzłów dyskretyzujących ośrodki oraz przyjęcie siatki elementów brzegowych umożliwiających symulację efektów kontaktowych.

Żaprezentowany powyżej przegląd stosowanych obecnie modeli obliczeniowych podłoża rusztu torowego potwierdza wyrażoną na wstępie opinię o dominującej roli kontynualnego (fenomenologicznego) podejścia w formułowaniu równań stanu dla podtorza. Mimo wyraźnego w tym zakresie postępu w dalszym cią-

<sup>47</sup>CRTSS (ang.) - Conventional Railway Track Support System.

gu brak jednakże koncepcji w pełni odpowiadającej zakresowi pojęcia "matematyczny model ośrodka", które zgodnie z formułowanymi tu wymogami<sup>48</sup> powinno obejmować: kinematykę, dynamikę oraz podstawowe równania stanu, tj. zamknięty układ równań opisujących reakcję ciała odkształcalnego na wymuszenia zewnętrzne wraz ze wszystkimi atrybutami niezbędnymi do sformułowania fizycznego modelu zagadnienia. Zakładając, iż stworzenie takiego modelu będzie jednakże możliwe, sprawą wciąż otwartą pozostanie kwestia adekwatnego opisu rzeczywistej - ziarnistej struktury materiału stosowanego w konstrukcji górnych stref konwencjonalnej nawierzchni, aktywnie współuczestniczącego w przejmowaniu obciążeń eksploatacyjnych, jak i spełniającego inne dodatkowe funkcje użytkowe [10]. Z tych też względów celowe wydaje się poszerzenie klasy powszechnie stosowanych dotąd modeli ośrodków rozdrobionych (gruntów) w stronę podejścia dyskretnego i wykorzystanie zarysowujących się w jego ramach nurtów deterministycznego lub probabilistycznego.

Podstawową cechą pierwszego z nich jest przyjęcie założenia o regularności kształtu pojedynczych ziarn ośrodka rozdrobionego i wzajemnie uporządkowanej ich strukturze (rys. 34 - 8). Na tej bazie formułowane są z kolei deterministyczne związki łączące zależności statyczne i kinematyczne obowiązujące w elementarnej jednostce objętości ośrodka. Zgodnie z takimi założeniami rozwijane były prace M.R. Horne'a [53], R.D. Mindlina i M. Deresiewiczza [11], P.W. Rowe'a [139], J. Fedy [30], P. Cundalla i O. Stracka [22] i wielu innych<sup>49</sup>. Za jedną z pierwszych prób adaptacji deterministycznych modeli ośrodków rozdrobionych na potrzeby kolejnictwa można uznać wstępne prace G.M. Szachunjanca [157, s. 244]<sup>50</sup>. Oryginalną próbę wykorzystania tego modelu do analizy deformacji przypowierzchniowej strefy podłoża w obrębie górniczej niecki obniżeniowej można znaleźć również w pracy H. Kratzscha [85]. Analizowany ośrodek, będący zbiorem pojedynczych sztywnych ziarn (jednorodnych krążków lub kół), cechuje się wyraźną anizotropią pierwotną i wzbudzoną (deformacyjną), o czym wspomina między innymi A. Florkiewicz [34], analizując koncepcje modelowania materiału idealnie plastycznego oraz izolowanej warstwy o wzmocnieniu (lub osłabieniu) konfiguracyjnym. W zakończeniu pracy konkluduje on, iż stwierdzona dla tego zbioru zależność statyki i kinematyki ziarn ma w ogólnym przypadku postać niestowarzyszonego i niewspółosiowego prawa płynięcia.

<sup>48</sup> Patrz uwagi zawarte w pracy M. Gryczmańskiego [48], wraz z odsyłaczem do wcześniejszych prac G. Szefera; również [49].

<sup>49</sup> Obszerny przegląd prac z tego zakresu zawiera rozdz. 9 pracy I. Kisiela i B. Lysika [61] oraz rozdz. 3 pracy K. Thiela [167].

<sup>50</sup> Patrz też [158, t. 2, s. 8] i [156 s. 98]; S.N. Popov [127] zaleca z kolei zróżnicowanie wielkości kąta rozprzestrzeniania się naprężeń w podtorzu w zależności frakcji zastosowanego tłucznia, i tak:

$\alpha = 30^\circ$  - dla ziarn kulistych,  
 $\alpha = 45^\circ$  - dla tłucznia frakcji 25-40 mm,  
 $\alpha = 52^\circ$  - dla tłucznia frakcji 25-70 mm,  
 $\alpha = 60^\circ$  - dla tłucznia frakcji 40-70 mm,

gdzie:  $\alpha$  - kąt między normalną do płaszczyzny powierzchni a linią ograniczającą rozprzestrzenianie się naprężeń pionowych w podłożu.



Analizie modelu zbudowanego z regularnych układów krążków poświęcili uwagę również R. Michałowski oraz Z. Mróz [110], podejmując próbę sformułowania postaci warunku plastyczności i związków konstytutywnych dla sztywno-plastycznego ciała sypkiego. Rozważając zagadnienie równowagi układu pojedynczych ziarn, problem opisu ich wzajemnego ruchu traktują przyrostowo. Warunki obciążenia zewnętrznego, prowadzące do wyznaczenia oddziaływań kontaktowych i przemieszczeń środków pojedynczych ziarn, wymagają jednakże założenia o jednorodności stanu naprężenia i odkształcenia brzegowego. Przyrosty oddziaływań międzyziarnowych są wówczas identyczne, co z kolei ułatwia sformułowanie relacji "naprężenie - odkształcenie" jak dla ośrodka ciągłego. Uzyskane zależności mogą być wykorzystane, zdaniem autorów, w obliczeniach nośności granicznej oraz w analizie przemieszczeń statycznie wyznaczalnych układów jak np. bloki skalne. We wnioskach stwierdzają oni, z czym trudno się nie zgodzić, że opis rzeczywistego ośrodka rozdrobionego będzie wymagał uwzględnienia faktycznej niejednorodności rozkładu oddziaływań międzyziarnowych.

Za szczególnie interesującą propozycję, znacznie poszerzającą zakres stosowalności modelowego podejścia dyskretnego o charakterze deterministycznym, należy uznać pracę D.H. Trollope'a i B.C. Burmana [169], w której przedstawili oni oryginalny - sztywnościowy model ośrodka dyskretnego o nazwie DSM<sup>51</sup>. Stanowi on rozwinięcie stosowanych dotąd metod modelowania elementów dyskretnych, będąc zarazem (zdaniem autorów) istotnym wkładem w poszerzenie zakresu stosowalności MES w jego klasycznej formie, poprzez wprowadzenie specyficznych elementów kontaktowych, charakteryzujących sztywność interakcji pomiędzy elementami sąsiednimi o zróżnicowanej odkształcalności. Kontakt sztywnych struktur (w układzie płaskim) zapewnia trzy stopnie swobody w odniesieniu do środków geometrycznych elementów podstawowych.

Za punkt wyjścia rozważań o modelach klastycznych przyjęli oni efekt przesklepiania się układu ziarnistego w każdym infinitezymalnym obszarze ośrodka, polegający w swej istocie na stwierdzonej niewspółosiowości składowych stanu naprężenia i odkształcenia. Widzą oni w tym główny element zróżnicowania założeń proponowanego ujęcia teoretycznego w stosunku do rozwiązań teorii izotropowych ośrodków ciągłych, gdzie kierunek naprężenia głównego jest zawsze sprzężony z kierunkiem mobilizacji największych odkształceń materiału. Uwzględnienie tego efektu ma duże znaczenie w ocenie zagadnień stateczności (np. skarp), które charakteryzuje złożony mechanizm niszczenia, polegający na znacznej redystrybucji oddziaływań wewnętrznych, mogących zaistnieć przy braku korespondujących z tym stanem zmian oddziaływań zewnętrznych. Przedstawione przez Trollope'a i Burmana w charakterze przykładu wyniki obliczeń numerycznych dla składowych stanu naprężenia w strefie przyskarpowej wskazują na dobrą zgodność założeń teoretycznych z wynikami eksperymentów, co potwierdzałoby trafność założeń rekomendowanego przez nich podejścia. Pewnym ograniczeniem w praktycznej stosowalności tego

<sup>51</sup> DSM (ang.) - the Discrete Stiffness Model.

podejścia jako całości jest typowa dla nurtu deterministycznego pełna regularność struktury ziarnistej ośrodka (adekwatna jedynie dla wyselekcjonowanych frakcji ośrodków rozdrobnionych) oraz trudność w uwzględnieniu na obecnym etapie bardziej złożonych schematów obciążeń brzegowych.

Wolny od większości tego rodzaju ograniczeń jest zdaniem autora drugi nurt poszukiwań, rozwinięty w ramach koncepcji ośrodków dyskretnych, a określany mianem podejścia probabilistycznego. Uwzględnia on w pełni losowy charakter rozkładu ziarn tworzących przestrzenną strukturę ziarnistą, dowolność ich kształtu i układu punktów kontaktowych, a co za tym idzie, również i stochastyczny charakter propagacji oddziaływań wewnątrz ośrodka. Za prekursora tego kierunku poszukiwań należy uznać J. Litwiniszyna [62, 121], którego idee traktowania ośrodka ziarnistego jako swobodnego rodzaju ośrodka sypkiego zostały z kolei wykorzystane i rozwinięte w pracach I.I. Kandaurova [54, 55] i R.A. Mullera [114, 115, 116].

Poza własnymi publikacjami autora [66, 68, 69, 71, 81, 82] jedną z nielicznych (i bodajże jedyną) pracą, w której wykorzystano pewne aspekty podejścia stochastycznego w modelowaniu struktur podłoża torowego, jest publikacja A.M. Gołowanczikova [39], gdzie podjął on w uproszczonej wersji problem analizy rozkładu pionowych oddziaływań w podsypce kolejowej. Wśród innych prac wykorzystujących ten nurt podejścia dyskretnego należy wymienić prace: L. Litwinowicza [97, 98] związane z analizą wpływu poziomych odkształceń rozluźniających podłoża górniczego na stateczność korpusów budowli ziemnych; St. Dymka [27] dotyczące rozkładu naprężeń w strefie wyrobiska górniczego; W. Brząkały [14, 15], B.I. Gargera [36] i autora [67, 78] z zakresu analizy parcia gruntu na zbocza podparte, konstrukcje płytkich tuneli oraz obudów szybowych; A.I. Tejtelbauma [166] oraz D. Athoanasiou-Grivasa i M.E. Harra [2] dotyczące stateczności skarp nasypów wykonanych z materiałów gruboziarnistych; B.S. Radowskiego [130] traktujące o składowych stanu naprężenia w wielowarstwowej, podatnej nawierzchni drogowej.

Do opisu procesu rozchodzenia się naprężeń i odkształceń ośrodka sypkiego (górotworu) w trakcie kształtowania się górniczej niecki obniżeniowej J. Litwiniszyn wykorzystał podstawowe równanie procesów stochastycznych Smoluchowskiego-Einsteina-Koźmogorowa. Koncepcja Kandaurova, obejmująca swym początkowym zakresem wyłącznie ośrodki bezrozporowe<sup>52</sup> [54], bazowała na zbliżonych założeniach, w ramach których podstawową rolę odgrywały: konstrukcja trójkąta Pascala dla naprężeń normalnych<sup>53</sup> i określone tym sposo-

<sup>52</sup> Brak odkształcalności elementów (ziarn-bloków) w kierunku poziomym.

<sup>53</sup> System rozprzestrzeniania się naprężeń w rozdrobnionym ośrodku bezrozporowym bazuje bowiem na założeniu o deterministycznym charakterze kinematyki ruchu ziarn w kierunku pionowym (zgodnie z siłami ciężkości) i stochastycznych fluktuacjach w kierunku poziomym (w lewo lub też w prawo), co jest zgodne z zasadami jednorodnego mechanizmu dyfuzyjnego [14].

bem współczynniki dwumianu kwadratowego<sup>54</sup>. Zakładając możliwość aproksymacji krzywej rozkładu dwumianowego przez funkcję gęstości prawdopodobieństwa rozkładu zmiennej losowej Gaussa-Laplace'a, otrzymał on wyrażenia opisujące rozkład oddziaływań w bezrozporowym ośrodku rozdrobnionym od pojedynczej siły skupionej zlokalizowanej na górnej krawędzi masywu<sup>55</sup>.

Przedstawione przez Kandaurova założenia teorii sypkiego ośrodka bezrozporowego zostały poszerzone przez R.A. Mullera [114] na klasę ośrodków rozdrobnionych o cechach rozporowych<sup>56</sup>. U podstaw tego rozumowania tkwi założenie o proporcjonalności sił tarcia (i spójności) w punkcie styczności dwóch sąsiednich ziarn ośrodka w stosunku do różnicy pionowych oddziaływań występujących w obrębie tychże ziarn. Przytoczona w pracy [115] analiza statycznego układu liniowo-odkształcalnych elementów o dowolnym kształcie wykazuje bowiem, że w układzie płaskim stateczność każdego z ziarn wymaga oparcia przeciętnie rzecz biorąc na dwóch ziarnach leżących poniżej (odpowiednio w układzie przestrzennym na czterech ziarnach). Wprowadzając uzyskane tą drogą zależności do ogólnie znanych różniczkowych równań równowagi ośrodka ciągłego (tzw. homogenizacja struktury), przy założonych warunkach brzegowych i granicznych, otrzymano podstawowy dla tej teorii układ równań różniczkowych typu parabolicznego (4.2a-c). Struktura tych równań wskazuje, że wszystkie składowe stanu naprężenia w rozporowym ośrodku sypkim są pochodnymi naprężeń normalnych  $\sigma_{11}$ , zaś podstawowym geotechnicznym parametrem identyfikacyjnym ośrodka rozdrobnionego jest współczynnik parcia (rozporu) boczno K. Analogiczny układ równań dla ośrodka sypkiego otrzymał również I.T. Sergeev [142], posługując się jednakże w tym celu założeniami bazującymi na teorii procesów Markowa<sup>57</sup>.

Reasumując powyższe rozważania i uwagi należy stwierdzić, że stosowane w chwili obecnej modele górnych stref podłoża rusztu torowego bazują głównie na odpowiednio adaptowanych rozwiązaniach mechaniki klasycznej. Najczęściej korzysta się tu praktycznie rzecz biorąc, z:

- rozważań teorii sprężystości (wliczając w to MES i MEB), zgodnie z którymi podporze aproksymuje się płaskimi lub przestrzennymi modelami ośrodków ciągłych o cechach liniowej czy nieliniowej odkształcalności; w celu ana-

<sup>54</sup> Kandaurov zauważa w tym miejscu za W.F. Babkowem (1938), iż jako pierwsi zależność tę otrzymali i próbowali praktycznie wykorzystać już w roku 1910 inżynierowie amerykańskich dróg żelaznych w raporcie dotyczącym analizy naprężeń w podporzu [55].

<sup>55</sup> Zbliżoną metodę oceny rozkładu naprężeń, uwzględniającą ponadto parametry wytrzymałościowe spekań podłoża, przedstawił H.A. Hayashi [167]; por. również prace W. Smolczyka [148] i R. Marsala [105].

<sup>56</sup> W rozporowych ośrodkach rozdrobnionych w pełni losowy charakter propagacji naprężeń sprawia, że przekazywanie oddziaływań pionowych z warstw wyższych na niższe odbywa się zgodnie z zasadami niejednorodnego mechanizmu dyfuzyjnego (fluktuacje stochastyczne zarówno w kierunku pionowym, jak i poziomym), na co zwracają uwagę S. Chikwandu i M. Alimba [19] oraz W. Brząkała [14].

<sup>57</sup> Patrz również uwagi W. Brząkały dotyczące modeli dyfuzyjnych [15].

lize wybranych zagadnień wprowadza się ograniczoną dyskretyzację oddziaływań w obrębie elementów składowych nawierzchni stosując schematy zastępcze, nie wychodzące jednakże (w odniesieniu do podtorza) poza modele o charakterze deterministycznym,

- rozwiązań teorii stanów granicznych dla ośrodków rozdrobnionych, przy założeniu odpowiednich współczynników bezpieczeństwa dla zadanych schematów obciążeń i przewidywanych warunków pracy podtorza.

W świetle doświadczeń eksploatacyjnych nietrudno zauważyć, że takie ujęcie zagadnienia jest dość odległe od rzeczywistych warunków pracy podtorza (w rozumieniu założeń początkowo-brzegowych dla danego modelu obliczeniowego) i jako takie przyczynia się do nadmiernego uproszczenia fizycznego obrazu zagadnienia.

Podtorze pracuje z reguły w warunkach wymuszeń pozasprężystych [102] a zarazem i w stanach przedgranicznych [143]. Z tego też względu w przekonaniu autora celowe wydaje się przyjęcie założenia kompromisowego, z fizycznego punktu widzenia znacznie bardziej przekonywującego. Cechy te bez wątpienia posiada proponowany w pracy model podtorza jako ośrodka rozdrobnionego o cechach rozporowych, wywodzący się z koncepcji Kandaurova-Mullera<sup>58</sup>. W opinii I. Kisiela i in. [62, s. 42-43] wypełnia on "...bowiem lukę, jaka istnieje dotąd pomiędzy << stanem sprężystym >> gruntu, traktowanego jako ciało stałe, a << stanem granicznym ośrodka sypkiego >>". Nietrudno wykazać zarazem (patrz rozdz. 4.3), że rozwiązania teorii ośrodków ziarnistych w ujęciu Kandaurova-Mullera stanowią uogólnienie pewnych spostrzeżeń czynionych na bazie teorii sprężystości, co w szczególności odnosi się do charakteru rozkładu naprężeń normalnych  $\sigma_{11}$  w podtorzu [68].

Zestawienie funkcjonujących obecnie - fenomenologicznych modeli podtorza mogłoby wskazywać na dominującą pozycję nurtu kontynualnego w teoretycznym podejściu do tego zagadnienia. Zważywszy jednakże na istotne ograniczenia, jakim podlegają wywodzące się stąd modele obliczeniowe podtorza, może okazać się, że już w niedalekiej przyszłości znacznie bardziej rozpowszechnionym kierunkiem dalszych poszukiwań (oraz metod weryfikacji modeli fizycznych) będzie podejście dyskretne, np. w ujęciu probabilistycznym. Nie przesądzając perspektyw rozwojowych któregoś z wyżej wymienionych podejść, w dalszym ciągu pracy główną uwagę poświęcono możliwości praktycznego wykorzystania tego właśnie ujęcia dyskretnego w analizie pracy podtorza rusztu torowego narażonego na dodatkowe oddziaływanie ze strony górniczo aktywnego podłoża gruntowego.

<sup>58</sup> Istnieje tu ponadto możliwość wykorzystania modeli ośrodków rozdrobnionych do opisu zjawisk w ośrodkach bardziej złożonych, takich jak grunty spoiste czy zawodnione, o czym wspomina W. Brzakała [14]. Próby stworzenia takiego opisu wymagają jednakże wyjścia poza ramy "bezpieściowych" procesów Markowa (jako takie nie są one przedmiotem analizy w niniejszej pracy).

W przekonaniu autora jest to w chwili obecnej jedyny, w pełni wiarygodny tok postępowania warunkujący osiągnięcie efektywnych rezultatów poznawczych. Umożliwia on bowiem, przy w pełni zadowalającej zgodności założeń natury fizycznej oraz analitycznej, odwzorowanie wszystkich bez mała czynników ingerujących w proces współdziałania nawierzchni z podtorzem górniczym. Czyni to z kolei uzyskane rezultaty w pełni użytecznym materiałem dalszych rozważań i analiz warunkujących podjęcie realistycznych zabiegów natury praktycznej.

### 4.3. Jednorodne podłoże rusztu torowego

Zapisane w ujęciu Kandaurova-Mullera różniczkowe równania równowagi ośrodka ziarnistego o cechach rozporowych, w warunkach obciążeń quasi-statycznych przyjmują dla zagadnienia płaskiego następującą postać:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \sigma_{11}}{\partial x_1} = K_{\epsilon} x_1 \frac{\partial^2 \sigma_{11}}{\partial x_2^2}; \end{array} \right. \quad (4.2a)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{12} = \sigma_{21} = -K_{\epsilon} x_1 \frac{\partial \sigma_{11}}{\partial x_2}; \end{array} \right. \quad (4.2b)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{22} = K_{\epsilon} (\sigma_{11} + K_{\epsilon} x_1^2 \frac{\partial^2 \sigma_{11}}{\partial x_2^2}); \end{array} \right. \quad (4.2c)$$

Założenia proponowanego tu podejścia analitycznego, bazującego na twierdzeniu o stochastycznym rozkładzie oddziaływań międzyziarnowych pozwalają, dla pojedynczej siły skupionej  $P$  obciążającej na kierunku normalnej krawędź półpłaszczyzny, określić stan naprężeń normalnych wewnątrz analizowanego ośrodka dyskretnego:

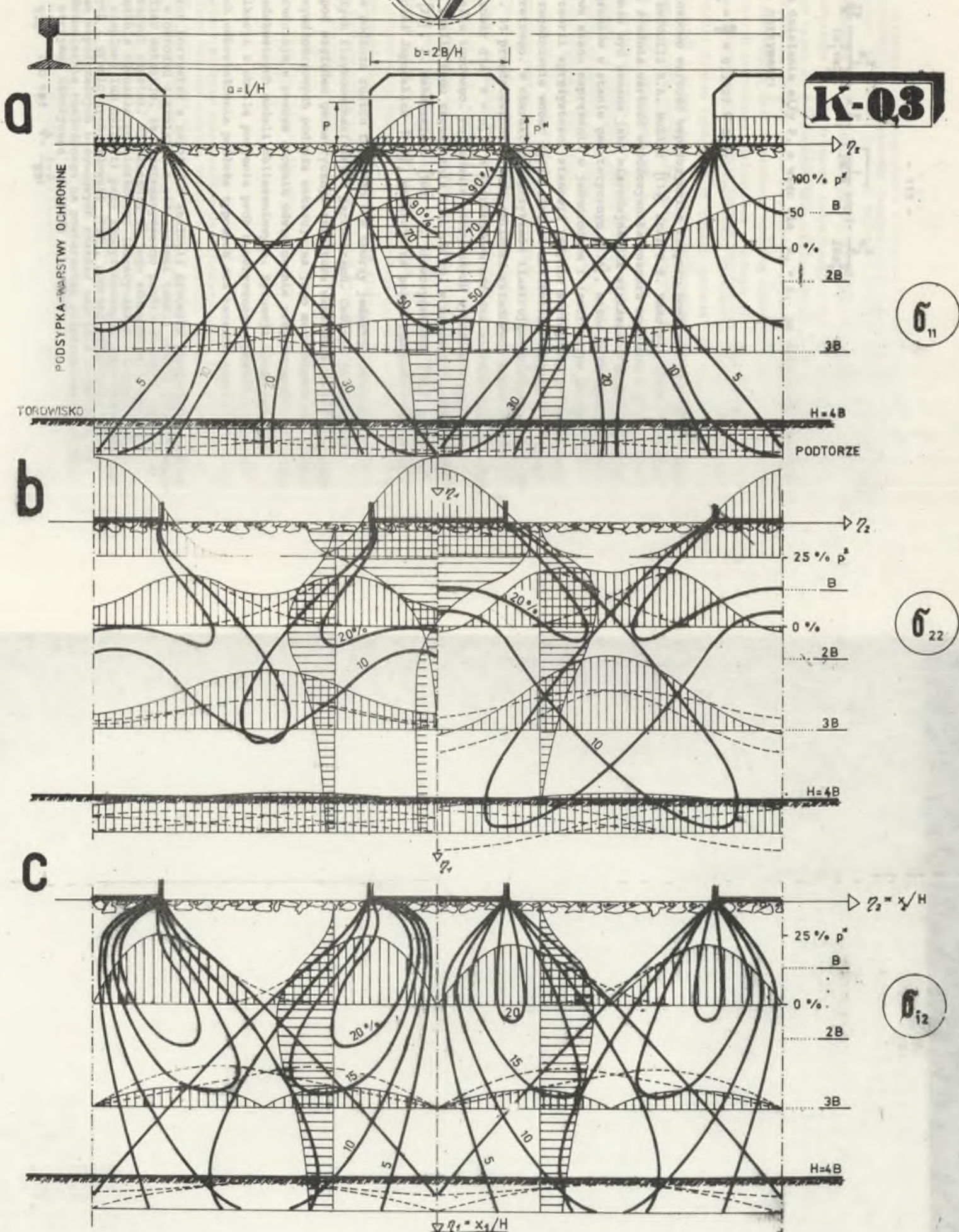
$$\sigma_{11} = \frac{P}{x_1 \sqrt{2K_{\epsilon}}} \exp\left(-\frac{x_2^2}{2K_{\epsilon} x_1^2}\right); \quad (4.3)$$

gdzie:

$x_1, x_2$  - współrzędne układu odniesienia (rys. 34 - 9),

$K_{\epsilon}$  - uziemniona wartość współczynnika rozporu bocznego ośrodka rozporowego, określona zgodnie z zależnościami (3.7) lub (3.8).

Porównując wpływ oddziaływania na podłoże pojedynczej siły skupionej  $P$  usytuowanej na krawędzi jednorodnej półprzestrzeni sprężystej (np. według Flamanta [61]) z oddziaływaniem tejże samej siły na krawędź rozporowego ośrodka ziarnistego typu Kandaurova-Mullera otrzymamy:



Rys. 35. Składowe stanu naprężenia w jednorodnym podtorzu dla  $K_0 = 0,3$   
 a) naprężenia pionowe oraz ich izobary, b) naprężenia poziome oraz ich izobary, c) naprężenia styczne oraz ich izobary  
 Fig. 35. Components of stress state in homogeneous subgrade for  $K_0 = 0,3$   
 a) vertical stresses and their isobars, b) horizontal stresses and their isobars, c) tangential stresses and their isobars

$$\sigma_{11} = \frac{2P}{\pi} \frac{x_1^3}{(x_1^2 + x_2^2)^2} = \frac{P}{x_1} \sqrt{\frac{1}{2\pi K}} \exp\left(-\frac{x_2^2}{2Kx_1^2}\right);$$

W płaszczyźnie działania siły  $P$ , a więc dla  $x_2 = 0$ , po dokonaniu prostych przekształceń, otrzymamy:

$$K = K_0 = \frac{3}{8} = 0,3927 \approx 0,4;$$

Na zbliżoną liczbowo wartość współczynnika rozporu bocznego ( $K = 0,34$ ) jako pierwsi uwagę zwrócili R.A. Muller [114] oraz B.S. Radovski [131]<sup>59</sup>. Z uwagi na fakt, iż średnia wartość współczynnika rozporu bocznego z przedziału  $K = 0,34-0,4$  może być uznana jako miarodajna dla większości normalnie skonsolidowanych gruntów w stanie geostatycznym [175], można pośrednio wnioskować, że składowe stanu naprężenia w jednorodnym i izotropowym podłożu opisane w ramach teorii sprężystości stanowią jedynie szczególny przypadek rozwiązania tego zagadnienia wobec ogólniejszych możliwości tkwiących w ramach podejścia dyskretnego. W charakterze przykładu ilustrującego powyższe stwierdzenie, na rys. 35 przedstawiono wyniki obliczeń składowych stanu naprężenia oraz ich izobar dla  $K = 0,3$  w jednorodnym ośrodku ziarnistym stanowiącym podłoże rusztu torowego. Porównanie otrzymanych wykresów z wynikami wcześniejszych analiz tego zagadnienia ujętych np. w pracach J. Spanga [150], J. Eisenmanna [28], J. Makowskiego [100]. Ł. Siewczyńskiego [143] lub wynikami zaleceń Kolei Japońskich [109], wskazuje na pełną zgodność otrzymanych rezultatów.

Bezpośrednie podłoże rusztu torowego nie tworzy jednakże ośrodka jednorodnego, o stałych fizykomechanicznych parametrach. Cechuje je wyraźnie ukształtowana pod względem geometrycznym struktura warstwowa, a niejednorodność cech wytrzymałościowych podłoża wskazuje na jego megaskopową strukturę. Czynniki te utrudniają w pewnym stopniu odwzorowanie przypisywanych im efektów w postaci adekwatnych modeli obliczeniowych. Sytuacja ulega jednakże znacznej komplikacji z chwilą podjęcia prób numerycznego symulowania zmienności składowych odkształcenia podłoża typowych dla terenów górniczych,

<sup>59</sup> Pierwszy z nich korzystał z założeń o analogii procesów rozprzestrzeniania się naprężeń w ośrodku ziarnistym z założeniami teorii ruchów cząstek braunowskich. Muller wskazuje, że z matematycznego punktu widzenia zadanie o ruchach błądzących cząstek, niezależnie od jego sformułowania sprowadza się do rozwiązania równania różniczkowego (identycznego z zagadnieniami przewodności cieplnej lub dyfuzji) przy zmodyfikowanych odpowiednio warunkach brzegowych i granicznych. Radovski [131], poprzez całkowanie wyrażeń opisujących we współrzędnych biegunowych rozkład naprężeń normalnych od obciążenia równomiernie rozłożonego na powierzchni półprzestrzeni ośrodka ziarnistego, otrzymał identyczną zależność w postaci:

$$K_0 = \frac{1}{8\psi} = \frac{1}{1-\psi}; \quad \text{lub też} \quad \psi = \frac{1-\psi}{8\psi};$$

głównie zaś jego poziomych jednorodnych odkształceń rozluźniających lub zagęszczających.

Przyjęte "a priori" założenie o ciągłości ośrodka w każdym jego infini-  
tezymalnym obszarze, a w szczególności formalna zasada zeszytnienia mate-  
riału, znacznie ograniczają przydatność stosowanych tu dotąd modeli obli-  
czeniowych podtorza. Wolnym, praktycznie rzecz biorąc, od powyższych uwarun-  
kowań modelem matematycznym podłoża gruntowego jest propozycja autora zil-  
strowana na rys. 34 - 9, zgodna z założeniami Kandaurova-Mullera. Występu-  
jący w podstawowych równaniach różniczkowych równowagi (4.2) współczynnik  
rozporu boczno  $K_c$  stanowi jedyny (wiarygodny) nośnik informacji o cha-  
kterze wymuszonych odkształceń podtorza oraz stanie i rodzaju materiału  
ziarnistego tworzącego aktywną strefę podtorza, co z kolei pozwala uznać  
go za p a r a m e t r w i o d a c y proponowanego w pracy sposobu obli-  
czeniowego. Przyjęcie takiego założenia wobec przytoczonych w rozdz. 3.4  
zależności analitycznych (3.7) i (3.8), określających w głównej mierze zmien-  
ność parametru  $K_c$  jako funkcji poziomych odkształceń podłoża górniczego  
 $\epsilon_{r,z}$ , znakomicie ułatwia odwzorowanie zjawisk związanych z redystrybucją  
składowych stanu naprężenia w podtorzu na terenach górniczych. Szczególnie  
istotnym elementem jest tu możliwość symulowania wpływu poziomych odkształ-  
ceń rozluźniających podtorza  $\epsilon_r$  poprzez przyjmowanie wartości parametru  
 $K_c$  z dolnego przedziału jego zmienności, odpowiadającego totalnemu - czyn-  
nemu stanowi rankinowskiemu podłoża (dla tłucznia  $K_c = 0,1$ ). Wpływ efektu  
zagęszczenia (konsolidacji) podtorza można z kolei przeanalizować dla war-  
tości tego współczynnika odpowiednio przewyższających jego wartość geosta-  
tyczną, tj. dla  $K_c > K_0$ . Wykorzystanie w analizie pracy podtorza - stocha-  
stycznego modelu ośrodka rozdrobionego o cechach rozporowych, gdzie współ-  
czynnik  $K_c$  stanowić będzie podstawowy parametr identyfikacyjny zagadnie-  
nia, pozwala zatem stworzyć dogodny model analityczny podłoża rusztu toro-  
wego, aktualny dla szerokiego przedziału zmienności warunków jego użytko-  
wania<sup>60</sup>.

<sup>60</sup> Niezależnie od wyżej wymienionych okoliczności wartość współczynnika  $K$   
dla podtorza będzie niewątpliwie ulegać zmianom wskutek rozkruszania i  
miażdżenia ziarn tłucznia w toku eksploatacji nawierzchni, zanieczyszcze-  
nia podsypki (np. w warunkach GOP-u miałem węglowym) nadmiernej zawilgo-  
cenia lub oblodzenia podłoża itp. Istnieje tu ponadto możliwość odwzoro-  
wania charakterystycznych etapów robót nawierzchniowych oraz podtorzowych  
związanych z procesami oczyszczania podsypki, jej ponownego zabudowania  
oraz zagęszczenia i stabilizacji mechanicznej. Określenie wiarygodnych  
przedziałów zmienności parametru  $K$  w trakcie tych procesów, jak i in-  
nych zjawisk (np. długotrwałych ruchów osuwiskowych podtorza) wymaga od-  
dzielnych badań laboratoryjnych. Próby realizacji takich badań dla celów  
budownictwa drogowego zawiera m.in. praca Stypułkowskiego [152, s. 27-32],  
zaś zagadnień kolejowych dotyczy praca M. Mackiewicz [99]; por. [64].



### 4.3.1. Składowe stanu naprężenia w aktywnej strefie podtorza

Przyjmując, że rozkład średnich naprężeń normalnych w podstawie pojedynczego podkładu no-i cechy rozkładu równomiernego przy warunkach brzegowych:

$$\sigma_{11}(x_{22}, 0) = \begin{cases} p^* = f(\xi) = \text{const} & \text{dla } x_{22} \in (-B, B); \\ 0 & \text{dla } x_{22} \notin (-B, B); \end{cases} \quad (4.4)$$

zgodnie z założeniami propozycji Kandaurova-Mullera otrzymamy:

$$\sigma_{11} = \int_{-B}^B f(\xi) \frac{1}{x_1 \sqrt{2\pi K_\xi}} \exp \left[ -\frac{(x_2 - \xi)^2}{2K_\xi x_1^2} \right] d\xi; \quad (4.5)$$

Korzystając z podstawowego układu równań (4.1a-c), po scałkowaniu i przekształceniach, otrzymamy zależności opisujące rozkład naprężeń średnich w podstawie pojedynczego podkładu:

$$\sigma_{11} = \frac{p^*}{\sqrt{2\pi}} \left[ \int_0^{\varphi_2 - 0,5b} \frac{\varphi_1 \sqrt{K_\xi}}{\varphi_1 \sqrt{K_\xi}} \exp(-0,5t^2) dt - \int_0^{\varphi_2 + 0,5b} \frac{\varphi_1 \sqrt{K_\xi}}{\varphi_1 \sqrt{K_\xi}} \exp(-0,5t^2) dt \right]; \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{22} = p^* & \left\langle \frac{K_\xi}{\sqrt{2\pi}} \left[ \int_0^{\varphi_2 - 0,5b} \frac{\varphi_1 \sqrt{K_\xi}}{\varphi_1 \sqrt{K_\xi}} \exp(-0,5t^2) dt - \int_0^{\varphi_2 + 0,5b} \frac{\varphi_1 \sqrt{K_\xi}}{\varphi_1 \sqrt{K_\xi}} \exp(-0,5t^2) dt \right] + \right. \\ \text{(o.r.)} & \left. \sqrt{\frac{K_\xi}{2\pi \varphi_1^2}} \left\{ (\varphi_2 + 0,5b) \exp \left[ -\frac{(\varphi_2 + 0,5b)^2}{2K_\xi \varphi_1^2} \right] - \right. \right. \\ & \left. \left. (\varphi_2 - 0,5b) \exp \left[ -\frac{(\varphi_2 - 0,5b)^2}{2K_\xi \varphi_1^2} \right] \right\} \right\rangle; \quad (4.7) \end{aligned}$$

$$\sigma_{12} = p^* \sqrt{\frac{K_\xi}{2\pi}} \left\langle \exp \left[ -\frac{(\varphi_2 + 0,5b)^2}{2K_\xi \varphi_1^2} \right] - \exp \left[ -\frac{(\varphi_2 - 0,5b)^2}{2K_\xi \varphi_1^2} \right] \right\rangle; \quad (4.8)$$

gdzie:

- $p^*$  - obciążenie odcinkowo równomiernie rozłożone; (o.r.),
- $\varphi_1, \varphi_2, b$  - współrzędne bezwymiarowe, ( $\varphi_1^H = x_1, \varphi_2^H = x_2, b^H = 2B$ )

- H - miąższość analizowanej warstwy podtorza (rys. 35),  
 2B - szerokość podstawy podkładu.

Wprowadzając oznaczenia<sup>61</sup> [27, 55]:

$$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x \exp(-0,5t^2) dt;$$

lub

$$\int_0^x \exp(-0,5t^2) dt = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \Phi(x); \quad (4.9)$$

$$x = \frac{\sigma_{22} + 0,5b}{\eta_1 \sqrt{K_E}}, \quad y = \frac{\sigma_{22} - 0,5b}{\eta_1 \sqrt{K_E}}; \quad (4.10)$$

wzory (4.6) - (4.8) można zapisać w nieco bardziej zwartej postaci:

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_{11} = 0,5p * [\Phi(Y) - \Phi(X)]; \\ \sigma_{22} = p * K_E \left\{ 0,5[\Phi(Y) - \Phi(X)] + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \right. \end{array} \right\} \quad (4.11)$$

$$\left. \begin{array}{l} (o.r.) \\ \left[ X \exp(-0,5X^2) - Y \exp(-0,5Y^2) \right] \end{array} \right\}; \quad (4.12)$$

$$\sigma_{12} = p * \sqrt{\frac{K_E}{2\pi}} [\exp(-0,5X^2) - \exp(-0,5Y^2)]; \quad (4.13)$$

Przyjmując z kolei zgodnie z uwagami zawartymi w pkt. 4.1, że rozkład średnich naprężeń normalnych w podstawie obciążonego podkładu (na kierunku

<sup>61</sup>W pracy [62, s. 51, wz. 2.46] przyjęto oznaczenie identyczne z zależnością (4.9) niniejszej pracy, podczas gdy zgodnie z [168, s. 581] jest:

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-t^2) dt;$$

gdzie: erf(x) - funkcja błędu (error function). Zachodzi tu więc relacja:

$$\text{erf}(x) = \Phi(x\sqrt{2}); \quad (4.9a)$$

Zależności (4.11) - (4.13) nie są więc identyczne z podanymi w pracy [62, s. 51, wz. (2.47)].

jego szerokości) jest typu parabolicznego<sup>62</sup>, co odpowiada warunkom brzegowym:

$$\sigma_{11}(x_{22}, 0) = \begin{cases} p' = f(\xi) = p \left[ 1 - \left( \frac{x_2}{B} \right)^2 \right] & \text{dla } x_{22} \in (-B, B) \\ 0 & \text{dla } x_{22} \notin (-B, B) \end{cases}$$

Wobec (4.5) oraz (4.2a-c) i (4.14) otrzymamy:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{11} &= \frac{p}{b^2 \sqrt{2\kappa}} \left\langle (b^2 - 4\eta_2^2 - 4\eta_1^2 \kappa_\xi) \left[ \int_0^{\frac{\eta_2 - 0,5b}{\eta_1 \sqrt{\kappa_\xi}}} \exp(-0,5t^2) dt - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \frac{\eta_2 + 0,5b}{\eta_1 \sqrt{\kappa_\xi}} \int_0^{\frac{\eta_2 + 0,5b}{\eta_1 \sqrt{\kappa_\xi}}} \exp(-0,5t^2) dt \right] - 2b\eta_1 \sqrt{\kappa_\xi} \left\{ \left( 1 + 2 \frac{\eta_2}{B} \right) \exp \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \left[ - \frac{(\eta_2 - 0,5b)^2}{2\kappa_\xi \eta_1^2} \right] - \left( 1 - 2 \frac{\eta_2}{B} \right) \exp \left[ - \frac{(\eta_2 + 0,5b)^2}{2\kappa_\xi \eta_1^2} \right] \right\} \right\rangle; \quad (4.15) \\ \text{(o.p.)} \left. \begin{aligned} \sigma_{22} &= \frac{p\kappa_\xi}{b^2 \sqrt{2\kappa}} \left\langle (b^2 - 4\eta_2^2 - 12\eta_1^2 \kappa_\xi) \left[ \int_0^{\frac{\eta_2 - 0,5b}{\eta_1 \sqrt{\kappa_\xi}}} \exp(-0,5t^2) dt - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \frac{\eta_2 + 0,5b}{\eta_1 \sqrt{\kappa_\xi}} \int_0^{\frac{\eta_2 + 0,5b}{\eta_1 \sqrt{\kappa_\xi}}} \exp(-0,5t^2) dt \right] - 2b\eta_1 \sqrt{\kappa_\xi} \left\{ \left( 3 + 2 \frac{\eta_2}{B} \right) \exp \right. \right. \end{aligned} \right. \end{aligned}$$

<sup>62</sup> Porównując wypadkowe oddziaływania kontaktowe dla obciążenia odcinkowo równomiernego i parabolicznego otrzymamy:

$$p^* 2B = \int_{-B}^B p \left[ 1 - \left( \frac{x_2}{B} \right)^2 \right] dx_2 = \frac{4}{3} pB; \quad \text{stad } p = \frac{3}{2} p^*; \quad (4.14a)$$

Przyjęcie parabolicznego rozkładu naprężeń brzegowych powoduje więc, że ekstremalna jego wartość "p" występująca w osi poprzecznej podkładu jest o 50% większa od naprężenia średniego p\*, co odpowiada sugestiom innych autorów przytoczonych w rozdz. 4.1.

$$\left. \begin{aligned}
 & \left[ - \frac{(\eta_2 - 0,5b)^2}{2K_\xi \eta_1^2} \right] + (3-2 \frac{\eta_2}{b}) \exp \left[ - \frac{(\eta_2 + 0,5b)^2}{2K_\xi \eta_1^2} \right] \Bigg\} >, \quad (4.16) \\
 \text{(o.p.)} \quad \sigma_{12} &= \frac{8pK_\xi \eta_1 \eta_2}{b^2 \sqrt{2\pi}} \left\langle \left[ \int_0^{\frac{\eta_2 - 0,5b}{\eta_1 \sqrt{K_\xi}}} \exp(-0,5t^2) dt - \int_0^{\frac{\eta_2 + 0,5b}{\eta_1 \sqrt{K_\xi}}} \exp(-0,5t^2) dt \right] \right. \\
 & \left. + \frac{\eta_1}{\eta_2} \sqrt{K_\xi} \left\{ \exp \left[ - \frac{(\eta_2 - 0,5b)^2}{2K_\xi \eta_1^2} \right] - \exp \left[ - \frac{(\eta_2 + 0,5b)^2}{2K_\xi \eta_1^2} \right] \right\} \right\rangle > \quad (4.17)
 \end{aligned}
 \right.$$

gdzie:

p - ekstremalna wartość obciążenia odcinkowego typu parabolicznego (o.p.).

Zależności (4.15) - (4.17) różnią się od wyników przedstawionych w pracy [55, s. 161-162, wz. (11.8) - (11.9)]<sup>63</sup>. Korzystając z oznaczeń (4.9) - (4.10) równania (4.15) - (4.17) przybierają nieco bardziej prostą formę zapisu:

$$\left. \begin{aligned}
 \sigma_{11} &= \frac{2p\eta_1^2 K_\xi}{b^2} \left\{ (XY+1) [\Phi(X) - \Phi(Y)] - \sqrt{\frac{2}{X}} \left[ X \exp(-0,5 Y^2) - Y \exp(-0,5 X^2) \right] \right\}; \quad (4.18)
 \end{aligned}
 \right.$$

$$\left. \begin{aligned}
 \sigma_{22} &= \frac{2p\eta_1^2 K_\xi}{b^2} \left\{ K_\xi (XY+3) [\Phi(X) - \Phi(Y)] - \frac{1}{\eta_1} \sqrt{\frac{2K_\xi}{X}} \right. \\
 & \left. \left[ (b+\eta_1 \sqrt{K_\xi} X) \exp(-0,5 Y^2) + (b-\eta_1 \sqrt{K_\xi} Y) \exp(-0,5 X^2) \right] \right\}; \quad (4.19)
 \end{aligned}
 \right.$$

$$\left. \begin{aligned}
 \sigma_{12} &= \frac{4p\eta_1 \eta_2 K_\xi}{b^2} \left\{ [\Phi(Y) - \Phi(X)] + \frac{\eta_1}{\eta_2} \sqrt{\frac{2K_\xi}{X}} \right. \\
 & \left. \left[ \exp(-0,5 Y^2) - \exp(-0,5 X^2) \right] \right\}; \quad (4.20)
 \end{aligned}
 \right.$$

<sup>63</sup> Zależności określające naprężenia  $\sigma_{12}$  oraz  $\sigma_{22}$  wyprowadzono w pracy [55] korzystając z błędnie przeprowadzonego całkowania, co usprawiedliwia ponowne ich przytoczenie w niniejszej pracy.

Uwzględniając poprzez superpozycję oddziaływań (na poziomie torowiska), wpływ podkładów sąsiednich wyrażony współczynnikiem  $\lambda$ , dla hipotezy o obciążeniu odcinkowo równomiernie rozłożonym otrzymamy<sup>64</sup>:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{11} &= 0,5p^* \left\{ [\phi(Y) - \phi(X)] + \lambda [\phi(Z-X) - \phi(Z-Y)] \right\}; & (4.21) \\ \sigma_{22} &= p^* K_{\xi} \left\langle 0,5 [\phi(Y) - \phi(X)] + \frac{1}{\sqrt{2X}} [X \exp(-0,5 X^2) - \right. \\ &\quad \left. - Y \exp(-0,5 Y^2)] + 0,5 \lambda [\phi(Z-X) - \phi(Z-Y)] + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\lambda}{\sqrt{2X}} \left\{ (Z-Y) \exp[-0,5 (Z-Y)^2] - (Z-X) \exp[-0,5 (Z-X)^2] \right\} \right\rangle; & (4.22) \\ \sigma_{12} &= p^* \sqrt{\frac{K_{\xi}}{2X}} \left\langle [\exp(-0,5 X^2) - \exp(-0,5 Y^2)] - \right. \\ &\quad \left. - \lambda \left\{ \exp[-0,5 (Z-Y)^2] - \exp[-0,5 (Z-X)^2] \right\} \right\rangle; & (4.23) \end{aligned} \right\} \text{(o.r.)}$$

gdzie:

$$z = \frac{a}{\sigma_1 \sqrt{K_{\xi}}} - \text{wartość podstawienia,}$$

$$a = \frac{l}{H} - \text{współrzędna bezwymiarowa,}$$

l - rozstaw osiowy podkładów,

$\lambda$  - współczynnik uwzględniający zmniejszone oddziaływanie podkładów sąsiednich w stosunku do podkładu centralnego (obciążonego bezpośrednio)<sup>65</sup>,

(o.r.) - zależności określające wypadkowe naprężenia w podtorzu dla warunków brzegowych, jak w przypadku (o.p.),

(o.p.) - j.w. lecz dla obciążenia odcinkowo parabolicznie rozłożonego (o.p.).

<sup>64</sup> Przyjęto, że naprężenia (strefa torowiska) w podłożu obciążonego osiowo podkładu mają wpływ na jedynie dwa bezpośrednio do niego przyległe podkłady sąsiednie. Należy jednakże zauważyć, że wraz ze wzrostem wartości współczynnika  $K_{\xi}$  podłoża rusztu torowego oraz jego miąższości, wzrasta wpływ oddziaływania podkładów sąsiednich (nie tylko bezpośrednio przyległych).

<sup>65</sup> Orientacyjną wartość współczynnika  $\lambda$  można określić z zależności (rys. 33):

$$\lambda = \frac{\hat{P}_1(z)(t)}{\hat{P}_2(t)}$$

gdzie:  $\hat{P}_1(z)(t)$  - reakcja normalna w podstawie podkładu sąsiedniego,

$\hat{P}_2(t)$  - reakcja normalna w podstawie podkładu centralnego.

Według [109, s. 88], dla typowych warunków geotechnicznych podłoża rusztu torowego można przyjąć  $\lambda \approx 0,5$ . W przypadku analizy pracy podtorza na terenach górniczych należy uwzględnić fakt, że wartości oddziaływań w strefie podkładu centralnego oraz podkładów sąsiednich są zbliżone, ponieważ w rozkładzie naprężeń normalnych uczestniczy większa ich liczba (rys. 17). Należy wówczas przyjąć  $0,5 < \lambda < 1,0$ ; ( $\lambda_{gr} = 0,7-0,9$ ).

Dla hipotezy o obciążeniu odcinkowo parabolicznym otrzymamy składowe naprężenia wypadkowych w podtorzu:

$$\sigma_{11} = \frac{2p\varphi_1^2 K_\varepsilon}{b^2} \left\langle (XY+1) [\phi(X) - \phi(Y)] - \sqrt{\frac{2}{\pi}} [X \exp(-0,5 Y^2) - Y \exp(-0,5 X^2)] + \lambda \left\{ [(X-Z)(Y-Z)+1] [\phi(Z-Y) - \phi(Z-X)] - \sqrt{\frac{2}{\pi}} [(Z-Y) \exp[-0,5(Z-X)^2] - (Z-X) \exp[-0,5(Z-Y)^2]] \right\} \right\rangle; \quad (4.24)$$

$$\sigma_{22} = \frac{2p\varphi_1^2 K_\varepsilon}{b^2} \left\langle K_\varepsilon \left\{ (XY+3) [\phi(X) - \phi(Y)] - \frac{1}{\varphi_1} \sqrt{\frac{2K_\varepsilon}{\pi}} [(b+\varphi_1 \sqrt{K_\varepsilon} X) \exp(-0,5 Y^2) + (b-\varphi_1 \sqrt{K_\varepsilon} Y) \exp(-0,5 X^2)] + \lambda \left\{ [(X-Z)(Y-Z) + 3] [\phi(Z-Y) - \phi(Z-X)] - \frac{1}{\varphi_1} \sqrt{\frac{2K_\varepsilon}{\pi}} [b + (Z-Y)\varphi_1 \sqrt{K_\varepsilon}] \exp[-0,5(Z-X)^2] + [b - (Z-X)\varphi_1 \sqrt{K_\varepsilon}] \exp[-0,5(Z-Y)^2] \right\} \right\} \right\rangle; \quad (4.25)$$

$$\sigma_{12} = \frac{4p\varphi_1\varphi_2 K_\varepsilon}{b^2} \left\langle [\phi(Y) - \phi(X)] + \frac{\varphi_1}{\varphi_2} \sqrt{\frac{2K_\varepsilon}{\pi}} [\exp(-0,5 Y^2) - \exp(-0,5 X^2)] - \left\{ [\phi(Z-X) - \phi(Z-Y)] + \frac{\varphi_1}{\varphi_2} \sqrt{\frac{2K_\varepsilon}{\pi}} [\exp[-0,5(Z-X)^2] - \exp[-0,5(Z-Y)^2]] \right\} \right\rangle; \quad (4.26)$$

Stosunkowo złożony zapis przedstawionych powyżej zależności wymagał oprogramowania uwzględniającego ponadto możliwość:

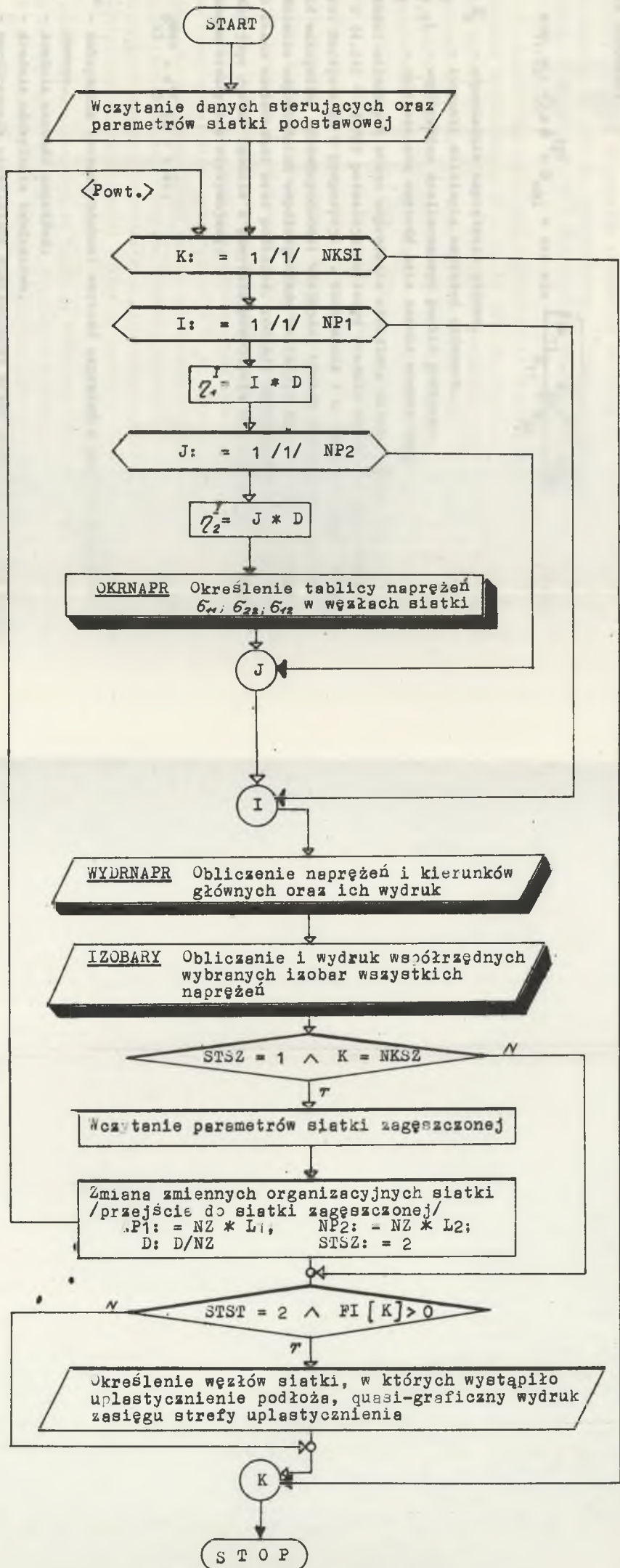
- określenia wielkości naprężeń głównych w dowolnym punkcie podtorza i kierunków ich działania:

$$\bar{\sigma}_1 = 0,5(\sigma_{11} + \sigma_{22}) + 0,5 \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 4\sigma_{12}^2}; \quad (4.27)$$

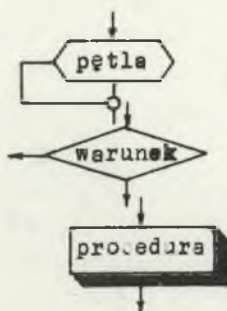
$$\bar{\sigma}_2 = 0,5(\sigma_{11} + \sigma_{22}) - 0,5 \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 4\sigma_{12}^2}; \quad (4.28)$$

$$\phi_1 = \arctg \frac{\bar{\sigma}_1 - \sigma_{11}}{\sigma_{12}}, \quad \phi_2 = \arctg \frac{\sigma_{22} - \bar{\sigma}_2}{\sigma_{12}}; \quad (4.29)$$

SCHEMAT BLOKOWY PROGRAMU KOL-1



Oznaczenia:



Rys. 36. Schemat blokowy programu KOL-1

Fig. 36. Block diagram of the KOL-1 programme

- sprawdzenia zasięgu stref uplastycznienia dla wybranych punktów podłoża rusztu torowego:

$$M(\varphi_1, \varphi_2) \rightarrow \phi^{(2)} > \phi_{obl} = \arcsin \frac{\sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 4\sigma_{12}^2}}{\sigma_{11} + \sigma_{22}}; \quad (4.30)$$

gdzie:

- $\bar{\sigma}_1, \bar{\sigma}_2$  - odpowiednie naprężenia główne,
- $\psi_{1,2}$  - kierunki działania naprężeń głównych,
- $M(\varphi_{1,2})$  - współrzędna analizowanego punktu podtorza,
- $\phi_{obl}$  - obliczeniowa wartość kąta tarcia wewnętrznego.

Wartości składowych stanu naprężenia określone zależnościami (4.21) - (4.23) i (4.24) - (4.26) pozwalają obliczyć średnie wielkości naprężeń w podtorzu. Korzystając z propozycji J. Eisenmanna i L. Mattnera [29], możemy określić maksymalne (prawdopodobne) wielkości tychże oddziaływań poprzez uwzględnienie odpowiednich współczynników wariancji (ok. 10-30%) uzależnionych od stanu nawierzchni oraz podtorza, rodzaju obciążającego pojazdu oraz szybkości jego ruchu. Zgodnie z powyższą propozycją dla podtorza obciążonego pojazdem trakcyjnym otrzymujemy:

$$\sigma_{ij}^{max} = \sigma_{ij}^{sr} (1 + t \bar{s}); \quad (4.31)$$

gdzie:

- $\sigma_{ij}^{max}$  - maksymalna (prawdopodobna) wartość naprężeń w podłożu rusztu torowego,
- $\sigma_{ij}^{sr}$  - średnia wartość naprężeń,
- $\bar{s}$  - średnie odchylenie kwadratowe,
- $t$  - współczynnik określający niezawodność pracy podtorza na bazie krzywej prawdopodobieństwa Gaussa, ( $t = 1$  dla  $p = 68,3\%$ ;  $t = 2$  dla  $p = 95,5\%$ ;  $t = 3$  dla  $p = 99,7\%$ ).

Wartości średniego odchylenia kwadratowego  $\bar{s}$ , uzależnione są od stanu podtorza oraz prędkości ruchu taboru<sup>66</sup>. W warunkach terenów górniczych, z uwagi na zły (z reguły) stan nawierzchni i podtorza należy przyjąć  $\bar{s} = 0,3$  (dla  $V < 60$  km/h).

<sup>66</sup> Ustalone doświadczalnie średnie odchylenie kwadratowe  $\bar{s}$  należy określać zgodnie z relacją [29]:

$\bar{s} = 0,1\varphi$ ; dla bardzo dobrego stanu drogi kolejowej,

$\bar{s} = 0,2\varphi$ ; dla stanu dobrego,

$\bar{s} = 0,3\varphi$ ; dla stanu złego,

gdzie:  $\varphi = 1$  przy  $V < 60$  km/h,

$\varphi = 1 + \frac{V-60}{140}$  przy  $60 < V < 200$  km/h.



#### 4.3.2. Analiza numeryczna uzyskanych rozwiązań

Schemat blokowy programu do obliczania składowych stanu naprężenia w podtorzu, o roboczej nazwie KOL-1<sup>67</sup>, przedstawiono na rys. 36. Program napisany został w języku ALGOL-60 na EMC typu ICL 4-50. Postać danych programu KOL-1 przedstawiono w pracy [71].

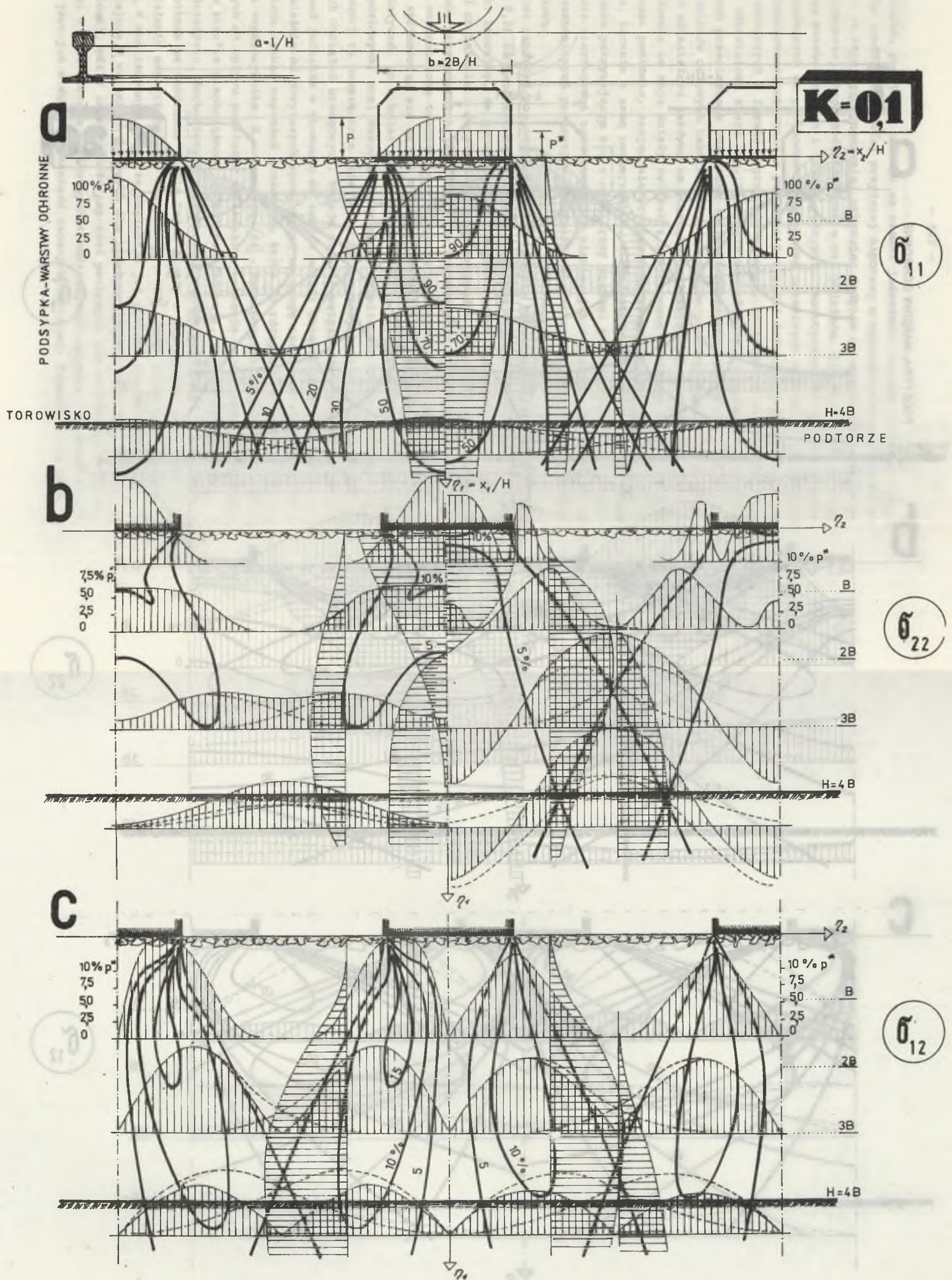
W charakterze przykładów ilustrujących monotoniczność funkcji (4.11) - (4.13) oraz (4.18) - (4.20) na rys. 35, 37 i 38 przedstawiono graficzny obraz składowych stanu naprężenia (oraz ich izobar) w jednorodnym podłożu rusztu torowego dla trzech charakterystycznych wartości współczynnika  $K_e$  (0,1; 0,3; 2,0) oraz dwóch podstawowych hipotez o rozkładzie naprężeń kontaktowych w podstawie podkładów (obciążenie równomierne - paraboliczne). Przyjęto, że łączna grubość warstw podłoża podkładów odpowiada podwójnej szerokości podstawy elementu obciążającego 2B (tj. około 50 cm), a obciążenie układu ma charakter quasi-statyczny i jest usytuowane w osi symetrii podkładu środkowego. Analiza otrzymanych wyników wskazuje ciekawe i zgodne z praktycznymi obserwacjami wnioski. Składowe stanu naprężenia wykazują istotne zróżnicowanie oddziaływań taboru na podtorze w zależności od charakteryzującego to podłoża współczynnika rozporu bocznego  $K_e$  tłumacząc zasadniczą odmienność warunków współdziałania nawierzchni z podtorzem. O ile w przypadku wartości  $K_o \approx 0,3$  otrzymane wyniki można uznać za identyczne z rozwiązaniami bazującymi na teorii sprężystości dla ośrodków izotropowych [81], to w przypadku ośrodków poddanych poziomemu rozluźnieniu ( $K_e \approx 0,1$ ) lub silnemu zagęszczeniu o charakterze prekonsolidującym ( $K_e \approx 2,0$ ) reakcja podłoża rusztu torowego na zadane (identyczne) obciążenia zewnętrzne jest zasadniczo odmienna.

Rozluźnienie podłoża podkładów sprawia, że przy założonej grubości warstw podsypki, około 60% naprężeń normalnych "p" zostaje przekazanych na podtorze, podczas gdy w przypadku podłoża normalnie skonsolidowanego ( $K_o \approx 0,3$ ) wartość ta nie przekracza 35%, zaś w przypadku jego znacznego zagęszczenia około 15%. W niekorzystnych warunkach<sup>68</sup> należy liczyć się zatem z możliwością blisko 4-krotnego wzrostu naprężeń normalnych  $\sigma_{11}$  w płaszczyźnie torowiska, co musi wywrzeć określony - jednoznacznie negatywny wpływ na nośność i stateczność całego podtorza<sup>69</sup>. Na uwagę zasługuje tu ponadto znaczna nierównomierność oddziaływań normalnych w przypowierzchniowej strefie rozluźnianego podtorza, która w pozostałych dwóch przypadkach była praktycznie

<sup>67</sup> Współautorami programu są: dr inż. J. Weseli oraz dr inż. A. Radziecki z Katedry Budowy Mostów Pol. Śląskiej.

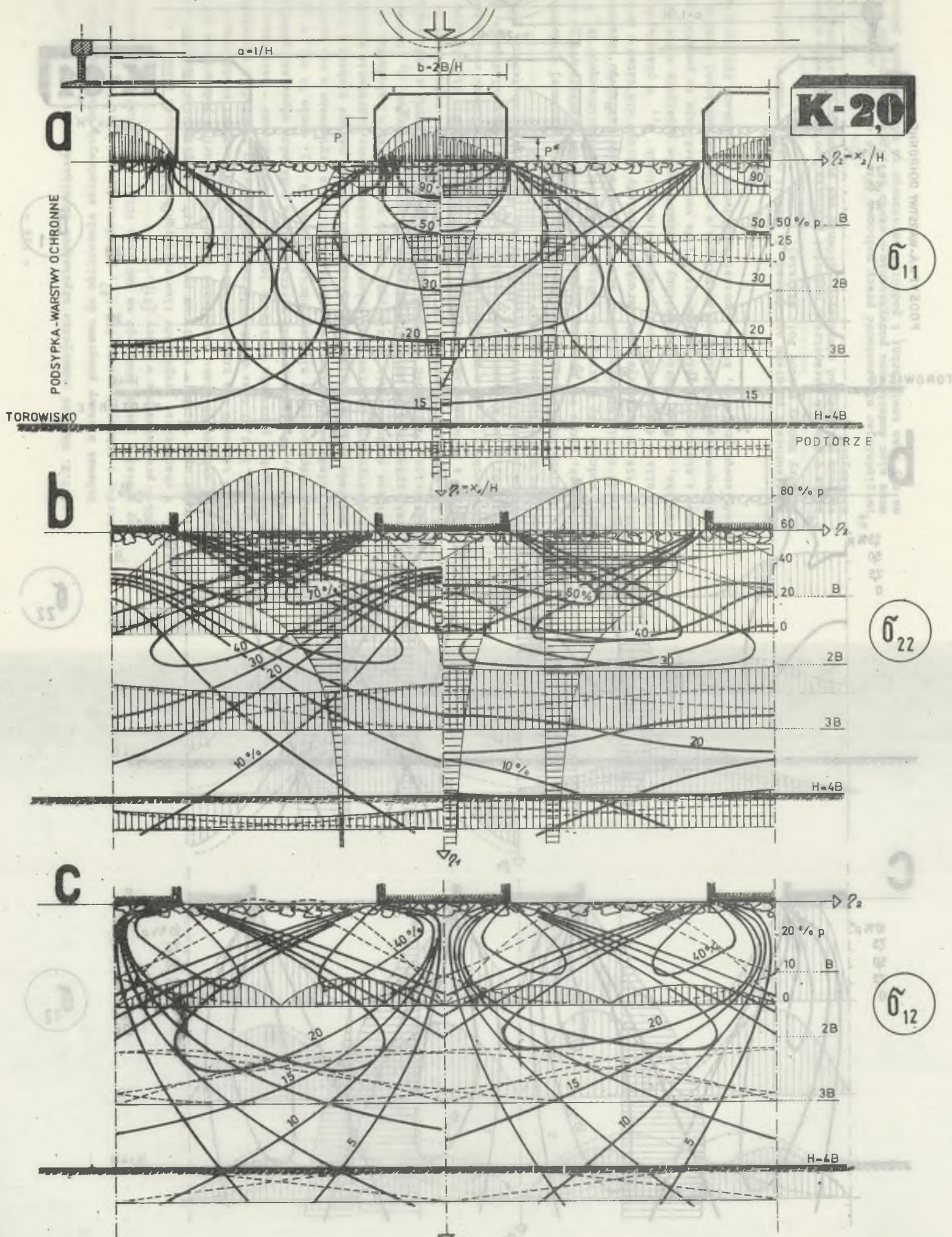
<sup>68</sup> Linia o dobrych parametrach nośności podtorza, po raz pierwszy poddana wpływom oddziaływań górniczych, głównie zaś poziomych odkształceń rozluźniających.

<sup>69</sup> Uwzględniając niezawodność pracy podtorza (dla  $p = 95,5\%$ ) wartości te mogą ulec dodatkowemu podwyższeniu o około 60%, przede wszystkim z uwagi na zły stan nawierzchni i podtorza narażonego na oddziaływania górnicze.



Rys. 37. Składowe stanu naprężenia w jednorodnym podtorzu poddanym poziome-  
mu rozluźnieniu dla  $K_e = 0,1$  (oznaczenia jak na rys. 35)

Fig. 37. Components of stress state in homogeneous subgrade subjected to hori-  
zontal raveling for  $K_e = 0,1$  (notation as in fig. 35)



Rys. 38. Składowe stanu naprężenia w jednorodnie skonsolidowanym podtorzu dla  $K_c = 2,0$  (oznaczenia jak na rys. 35)  
 Fig. 38. Components of stress state in homogeneously consolidated subgrade for  $K_c = 2,0$  (notation as in fig. 35)

rzecz biorąc, pomijalna z uwagi na niemal jednorodny rozkład naprężeń  $\sigma_{11}$  w strefie torowiska. Rodzaj przyjętej hipotezy o naprężeniach kontaktowych nie miał tu istotnego znaczenia, wskazując jedynie na możliwość nieco większej koncentracji naprężeń pionowych w osi podkładu, dla obciążenia brzegowego typu parabolicznego i luźnej podsypki. Teoretyczne uzasadnienie procesów prowadzących do prognozowania naprężeń normalnych w podtorzu dobrze tłumaczy obserwowane potocznie w praktyce przypadki deformacji podtorza na terenach górniczych w formie poprzecznych koryt, lokalnych - bezodpływowych niecek, odkształceń skarp itp. Wiąza się one głównie z efektem znacznego, okresowego przeciążenia torowiska (przy niezmiennych praktycznie wartościach nacisków osiowych taboru) prowadzącego do progresywnego wzrostu jego trwałych odkształceń zarówno na kierunku podłużnym, jak i poprzecznym. Odkształcenia te mają ścisły związek z analizowaną uprzednio chwilową utratą nośności podtorza, stając się źródłem dodatkowych osiadań górnych stref podtorza, łącznie z samą nawierzchnią. Niejednorodny przebieg tego zjawiska na kierunku pokrywającym się z osią trasy stanowi z kolei zasadniczy powód narastania nierówności toru zarówno w planie, jak i profilu, niezależnie od wpływu zasadniczych parametrów deformacji charakteryzujących ciągłą nieckę obniżeniową.

Analiza naprężeń poziomych w podłożu rusztu torowego wskazuje (dla  $K_E \approx 0,1$  i  $0,3$ ) na teoretyczną możliwość powstania w podtorzu naprężeń rozciągających. Zauważmy, że sytuacja taka zachodzi jedynie w płaszczyźnie osi symetrii obciążenia i dotyczy wyłącznie przypadku (hipotezy) naprężeń kontaktowych, przyjmowanych jako odcinkowo równomiernie rozłożone. Ponieważ ośrodki rozdrobione tworzące nawierzchnię (podsypki) charakteryzują się znikomą spójnością, nie są one w stanie, rzecz jasna, przenieść tego rodzaju oddziaływań, co z kolei w świetle obserwacji terenowych (jak i obszernych badań modelowych) musi nasuwać uzasadnione wątpliwości co do słuszności przyjmowanej tu powszechnie (nie tylko na potrzeby kolejnictwa) hipotezy o warunkach obciążeń brzegowych. Wydaje się, iż wątpliwości tych nie można formułować jednakże w stosunku do samych modeli obliczeniowych podtorza.

Niezależnie od powyższych spostrzeżeń na uwagę zasługuje zróżnicowanie w przebiegu izobar naprężeń poziomych, które to różnice wraz ze wzrostem wartości współczynnika  $K_E$  zanikają [64]. Superpozycja naprężeń  $\sigma_{22}$ , pochodzących od wpływu podkładów sąsiednich, wskazuje na ich znaczną koncentrację w strefie nieobciążonej (międzypodkładowej). Znaczną intensywność tych oddziaływań, dochodzących w prekonsolidowanym podłożu do 70% p, wskazuje dobitnie na znaczenie i rolę tejże strefy w zapewnieniu stabilnego współdziałania nawierzchni z podtorzem [99, 108]. Zbyt słabe zagęszczenie podsypki w analizowanym obszarze względnie jej poziome rozluźnienie (jak to ma miejsce w warunkach typowych dla brzegowej strefy górniczej niecki obniżeniowej, gdzie intensywność naprężeń poziomych nie przekracza 5-10% p, świadcząc o 7-14-krotnym spadku tychże oddziaływań), sprawia, że materiał ten nie jest już w stanie przenieść zadanych obciążeń. Przejawia się to w

postaci obserwowanych w praktyce nadmiernych osiadań nawierzchni wskutek rozwoju stref wyporu w podłożu podkładów, aż do osiągnięcia stanu lokalnego zniszczenia włącznie. Po dodatkowym zagłębieniu się podkładów, w ich podstawach wytwarza się nowy stan równowagi o relatywnie mniejszej wartości normalnych oddziaływań kontaktowych, a więc i zmniejszonej intensywności naprężeń  $\sigma_{22}$ . Ponieważ zjawisko to nie przebiega w sposób jednorodny na długości danego odcinka toru, dochodzi tam do powstania określonych nierówności w jego profilu podłużnym. Źródłem tych deformacji w przypadku terenów górniczych są zatem poziome odkształcenia rozluźniające  $\epsilon_r$ . W swej istocie destabilizacja nośności podtorza polega zatem w tych warunkach na redukcji wysokiej pierwotnie wartości współczynnika rozporu bocznego  $K_c$  i wzroście dodatkowych osiadań rusztu torowego ponad wartości głównych (zasadniczych) obniżen terenu górniczego (rys. 18 i 20). Fakt ten znacznie pogarsza stan techniczny całej nawierzchni zwiększając jej awaryjność, o czym wspomniano już uprzednio w rozdz. 2.3.

Stosunkowo najmniejsze różnice, w zależności od przyjętej hipotezy o rozkładzie naprężeń kontaktowych, można zaobserwować (przy  $K_c = \text{const}$ ) dla naprężeń stycznych  $\sigma_{12}$ . W dobrze utrzymanej - zagęszczonej podsypce składowe te koncentrują się głównie w przykrawędziowych strefach podkładów, a ich intensywność dochodzić może do około 40% p. Wskutek oddziaływania podkładów sąsiednich naprężenia  $\sigma_{12}$  wraz ze wzrostem głębokości ulegają jednakże znacznej redukcji, do całkowitego ich zaniku na poziomie torowiska włącznie. Zgoła odmienna sytuacja panuje w podtorzu poddanym rozluźnieniu, gdzie na poziomie torowiska około 7-10% naprężeń p przedostaje się w formie oddziaływań stycznych do podtorza. O ile w przypadku wartości współczynnika  $K_c \approx 0,3$  można było uznać, że grubość kontrolowanej warstwy podsypki jest wystarczającą do tego, by składowe obciążenia podtorza miały charakter wyłącznie naprężeń głównych ( $\sigma_{11} = \bar{\sigma}_1$  oraz  $\sigma_{22} = \bar{\sigma}_2$ ), to stan wyteżenia podtorza dla  $K_c \approx 0,1$  podlega istotnej redystrybucji, znacznie pogarszającej warunki pracy całego podłoża gruntowego.

W przypadku podjęcia decyzji o ciągłej eksploatacji danej linii w warunkach kształtowania się tzw. niwelety trwale obniżonej<sup>70</sup>, stan techniczny podtorza wskutek opisanych uprzednio procesów ulegać będzie dalszemu - trwałemu pogorszeniu. Wśród zabiegów profilaktycznych mogących w praktyce przyczynić się do poprawy tego stanu rzeczy należałoby zatem wymienić:

- bezwzględna potrzebę zwiększenia grubości warstw ochronnych podtorza, z odpowiednim wyprzedzeniem czasowym robót rektyfikacyjnych w stosunku do prognozowanych deformacji górniczych,
- zabezpieczenie strefy torowiska przed wpływami dodatkowych naprężeń, głównie zaś mobilizacji oddziaływań normalnych  $\sigma_{11}$  oraz stycznych  $\sigma_{12}$  (np. poprzez szersze wykorzystanie materiałów geotekstylnych, patrz rozdz. 3.2).

<sup>70</sup> Duże natężenie ruchu, brak obwodnic i in. utrudnienia nie pozwalają z reguły na wyłączenie danej linii z eksploatacji na czas trwania robót górniczych w obrębie filara ochronnego kolei.

Zwiększenie miąższości warstw ochronnych powinno przy tym nastąpić w trakcie odpowiednio zaprojektowanych (i zrealizowanych) prac wyprzedzających, nie zaś (jak to powszechnie występuje obecnie) w ramach działań technicznych usuwających skutki zaistniałych już szkód górniczych. Prace te, polegające bowiem w swej istocie na podnoszeniu "ex post" niwelety toru do określonego poziomu, następują zawsze z dużym opóźnieniem, co zdaniem autora nie jest w stanie zapewnić pożądanego efektu profilaktycznego w odniesieniu do podtorza.

Innym rozwiązaniem mogą tu być odpowiednie zabiegi konstrukcyjno-technologiczne, polegające na uodpornieniu nawierzchni i podtorza na prognozowane odkształcenia podłoża górniczego. Liniowy charakter konstrukcji nawierzchni drogi kolejowej, w głównej zaś mierze specyfika prognozowanych deformacji, wymagają dokonania racjonalnego wyboru określonego sposobu wzmocnienia aktywnej strefy podtorza, przede wszystkim z uwagi na wpływy poziomych odkształceń o charakterze rozluźniającym. Wykonane pod kierunkiem autora<sup>71</sup> rozpoznawcze badania modelowe wydają się wskazywać na celowość stabilizacji oraz wzmocnienia podtorza górniczego głównie poprzez szersze wykorzystanie geotekstyli i geosyntetyków lub też zbrojenie gruntu z wykorzystaniem geosiatek [128]. Bliższe sprecyzowanie konkretnych propozycji i rozwiązań o charakterze inżynierskim jest w chwili obecnej jeszcze niemożliwe i przedwczesne. Podjęte prace wydają się jednakże rokować nadzieję na uzyskanie pozytywnych rezultatów oraz na ich wdrożenie (w ramach linii KRR - Kolejowego Ruchu Regionalnego dla GOP-u).

#### 4.4. Wpływ niejednorodności warstwowej podtorza na jego współpracę z nawierzchnią

Niejednorodność górnych stref podtorza kolejowego może mieć charakter konstrukcyjny - wynikający z zastosowania wielowarstwowego układu materiałów spełniających ściśle określone funkcje użytkowe, lub strukturalny - posiadający swe źródło w anizotropii warstwowej cech ośrodków tworzących bezpośrednio podłożę rusztu torowego.

Niejednorodność konstrukcyjna nawierzchni jest podyktowana w głównej mierze względami natury statecznościowo-wytrzymałościowej, na które według J. Makowskiego [101], składają się wymogi:

- nośności i charakteru rozkładu obciążeń eksploatacyjnych,
- wibroodporności,

<sup>71</sup> Praca realizowana pod kierunkiem autora w ramach CPBR 9.3. - "Obsługa transportowa społeczeństwa i gospodarki" (problematyka Kolejowego Ruchu Regionalnego), zadanie nr 66.000 pt.: Wybór konstrukcji podtorza i nawierzchni drogi KRR w aspekcie uodpornienia na działanie szkód górniczych. IBP Pol. Śląskiej, 1986-1990.

- wodoprzepuszczalności,
- ograniczenia migracji cząstek ilastych (wg kryterium Terzaghi'ego),
- mrozoodporności (wg kryterium Casagrande'a).

Czynniki wpływające na utratę nośności przez podtorze terenów górniczych oraz wybrane zagadnienia związane z oceną jego wibroodporności zostały przedstawione w rozdz. 3.3 pracy, zaś problemy związane z oceną procesu rozpręszczenia się obciążeń w podtorzu i bezpośrednim podłożu rusztu torowego przedstawiono w rozdz. 4.3. Przyjęto ponadto, że ingerencja podłoża górniczego w zmienność pozostałych czynników determinujących niejednorodność konstrukcyjną podtorza ma charakter drugorzędny, nie wnosi istotnych zmian co do kryteriów ich oceny przyjmowanych powszechnie jak dla terenów niegórniczych. Zauważmy, iż podstawowym warunkiem trwałości i niezawodności pracy podtorza jest jednoczesne spełnienie wszystkich wyżej wymienionych kryteriów statecznościowo-wytrzymałościowych i funkcjonalnych.

Drugi z analizowanych rodzajów niejednorodności megaskopowej podtorza stanowi wtórny efekt jego długotrwałych, cyklicznych obciążeń eksploatacyjnych [81], o czym wspomniano już uprzednio w rozdz. 3.4. W przypadku tym trudno wprawdzie mówić o ścisłym rozgraniczeniu warstw podłoża z wyraźnie zróżnicowaną sztywnością (podatnością), toteż przyjęcie takiego założenia ma tu charakter czysto umowny, aczkolwiek istotny z formalnego punktu widzenia.

Reasumując powyższe uwagi, można stwierdzić, że bezpośrednie podłożo rusztu torowego nie stanowi w praktyce ośrodka jednorodnego. Cechuje je wyraźnie ukształtowana struktura warstwowa, wymagająca stworzenia dla niej adekwatnego schematu obliczeniowego w ramach przyjętej, dyskretnej koncepcji modelu podtorza jako ośrodka rozdrobionego o cechach rozporowych. Celem tej analizy jest przede wszystkim ocena czynnika niejednorodności megaskopowej podłoża z uwagi na zmienność warunków współdziałania nawierzchni z podtorzem (niegórniczym), jak i w symulowanych numerycznie warunkach typowych dla podtorza górniczego, ze szczególnym uwzględnieniem jego poziomych odkształceń rozluźniających  $\epsilon_x$ .

#### 4.4.1. Składowe stanu naprężenia w uwarstwionym podłożu rusztu torowego

Przyjmując założenie, że współczynnik rozporu boczno  $K_c$  stanowi podstawowy parametr identyfikacyjny ośrodka ziarnistego w obrębie danej warstwy, a jego zróżnicowanie na kierunku głębokości może być utożsamiane z dyskretyzacją podłoża na kolejne warstwy, w dalszych rozważaniach dla uproszczenia przyjęto model podtorza dwuwarstwowego. Założono, że górna warstwa o miąższości  $h_1$  charakteryzuje się wyraźniej zróżnicowaną wartością współczynnika  $K_1$ , aniżeli warstwa dolna  $K_2$ , o znacznej grubości  $h_2$ .

Decydujące o prawidłowości rozwiązania tego zadania jest założenie określające warunki przekazywania naprężeń na granicy obu warstw. Podobnie jak w innych rozwiązaniach tego problemu, można na etapie pierwszym założyć jednorodność całego podłoża pod warunkiem, że będzie ono zbudowane w całości

z materiału warstwy dolnej, lecz o takiej grubości, która sprawi, że na granicy warstw zostaną zachowane wartości pionowych naprężeń normalnych, jak w schemacie wyjściowym.

Wartość naprężeń  $\sigma_{11}^{(1)}$  wywołanych oddziaływaniem pojedynczej siły skupionej  $P$  usytuowanej na powierzchni rozporowego ośrodka ziarnistego ( $K_1$ ), na głębokości  $h_1$  będzie równa:

$$\sigma_{11, h_1}^{(1)} = \frac{P}{h_1} \sqrt{\frac{1}{2\pi K_1}} \exp\left(-\frac{x_2^2}{2K_1 h_1^2}\right); \quad (4.32)$$

Przyjmując założenie, że górną warstwę podłoża tworzy ośrodek o cechach rozporowych nie  $K_1$ , lecz  $K_2$ , ekwiwalentna miąższość tej warstwy  $h_1^*$  może być ujęta w formie zapisu naprężeń normalnych na tej samej głębokości  $h_1$ :

$$\sigma_{11, h_1}^{(2)} = \frac{P}{h_1^*} \sqrt{\frac{1}{2\pi K_2}} \exp\left(-\frac{x_2^2}{2K_2 (h_1^*)^2}\right); \quad (4.33)$$

Porównując stronami równania (4.32) oraz (4.33), po prostych przekształceniach otrzymamy:

$$h_1^* = h_1 \sqrt{\frac{K_1}{K_2}}; \quad (4.34)$$

Zatem dla:

$K_1 < K_2 \Rightarrow h_1^* < h_1$ ; (dolna warstwa bardziej sztywna),

$K_1 > K_2 \Rightarrow h_1^* > h_1$ ; (górną warstwę sztywniejszą).

Naprężenia normalne w warstwie dolnej, od pojedynczej siły skupionej  $P$ , można więc określić z zależności:

$$\sigma_{11} = \frac{P}{\left[ h_1 \left( \sqrt{\frac{K_1}{K_2}} - 1 \right) + h_2 \right] \sqrt{2\pi K_2}} \exp \left\{ - \frac{x_2^2}{2K_2 \left[ h_1 \left( \sqrt{\frac{K_1}{K_2}} - 1 \right) + h_2 \right]^2} \right\}; \quad (4.35)$$

gdzie:

$h_1$  - miąższość warstwy górnej ( $h_1 = \text{const}$ ),

$h_2$  = vario; głębokość w obrębie warstwy dolnej, liczona od stropu warstwy górnej ( $h_2 > h_1$ , patrz rys. 39).

Nietrudno wykazać, że dla  $h_2 < h_1$  zależność (4.35) przybiera postać (4.32), co odpowiada sytuacji, w której rozkład naprężeń  $\sigma_{11}$  jest zdeterminowany



wyłącznie parametrami warstwy górnej. W przypadku układu trójwarstwowego (ogólnie n-warstw) sytuacja powtarza się i polega każdorazowo na ustaleniu ekwiwalentnej grubości dwóch górnych warstw w stosunku do warstwy podścielającej, co z kolei sprowadza rozwiązanie zadania do analizowanego uprzednio układu dwuwarstwowego.

Zgodnie z przytoczonymi uprzednio zależnościami (4.1a-c), pozostałe składowe stanu naprężenia określają odpowiednie pochodne funkcji naprężeń normalnych, pionowych.

Bazując na pojęciu warstwy zastępczej, funkcja naprężeń stycznych w strefie styku obu warstw powinna spełniać zależność:

$$\sigma_{12, h_1^*}^{(2)} = -K_2 h_1^* \frac{\partial \sigma_{11}^{(2)}}{\partial x_2}; \quad (4.36)$$

gdzie:

- $\sigma_{12, h_1^*}^{(2)}$  - naprężenie styczne w spągu warstwy zastępczej (o współczynniku  $K_2$ ),
- $\sigma_{11}^{(2)}$  - naprężenie normalne w rozpatrywanym poziomie ośrodka ziarnistego (ujednorodnionego) o współczynniku rozporu bocznego  $K_2$ ,
- $h_1^*$  - grubość warstwy zastępczej wg (4.34).

Uwzględniając dla pojedynczej siły skupionej P zależności (4.32) i (4.34) w równaniu (4.36) otrzymamy:

$$\sigma_{12, h_1^*}^{(2)} = \sqrt{\frac{K_2}{K_1}} \sigma_{12, h_1}^{(1)}; \quad (4.37)$$

gdzie:

- $\sigma_{12, h_1^*}^{(2)}$  - naprężenie styczne w spągu warstwy zastępczej,
- $\sigma_{12, h_1}^{(1)}$  - naprężenie styczne na poziomie jw. (tzn.  $h_1$ ), lecz w ośrodku o współczynniku  $K_1$ ,

przy czym:

$$\sigma_{12, h_1}^{(1)} = -K_1 h_1 \frac{\partial \sigma_{11}^{(1)}}{\partial x_2};$$

Analogicznie do równania (4.35), naprężenia styczne w poziomie  $h_2$  ( $h_2 > h_1$ ) warstwy dolnej można zatem, wobec (4.34) i (4.37), zapisać w ogólnej postaci:

$$\sigma_{12, h_2}^{(2)} = \sigma_{12} = -\sqrt{K_1 K_2} \left[ h_1 \left( \sqrt{\frac{K_1}{K_2}} - 1 \right) + h_2 \right] \frac{\partial \sigma_{11, h_2}^{(2)}}{\partial x_2}; \quad (4.38)$$

Napężenie styczne w układzie dwuwarstwowym obciążonym na powierzchni pojedynczą siłą skupioną P, po uwzględnieniu w równaniu (4.38) zależności (4.35) oraz (4.34), można zapisać:

$$\sigma_{12} = P \frac{x_2}{K_2 \left[ h_1 \left( \sqrt{\frac{K_1}{K_2}} - 1 \right) + h_2 \right]^2 \sqrt{\frac{2K_1}{K_2}}} \exp - \left\{ \frac{x_2^2}{2K_2 \left[ h_1 \left( \sqrt{\frac{K_1}{K_2}} - 1 \right) + h_2 \right]^2} \right\}, \quad (4.39)$$

Podobnie jak w przypadku równania (4.35) można wykazać, że dla  $h_2 < h_1$  zależność powyższa charakteryzuje rozkład naprężeń  $\sigma_{12}$  już tylko w obrębie warstwy górnej o współczynniku rozporu bocznego  $K_1$ .

Postępując tak jak dla naprężeń  $\sigma_{12}$ , w przypadku oddziaływań poziomych  $\sigma_{22}$  dla układu dwuwarstwowego, otrzymamy:

$$\sigma_{22, h_2}^{(2)} = \sigma_{22} = K_1 \sigma_{11, h_2}^{(2)} + K_1 K_2 \left[ h_1 \left( \sqrt{\frac{K_1}{K_2}} - 1 \right) + h_2 \right]^2 \frac{\partial^2 \sigma_{11, h_2}}{\partial x_2^2}, \quad (4.40)$$

gdzie:

$\sigma_{22, h_2}^{(2)}$ ;  $\sigma_{11, h_2}^{(2)}$  - naprężenia ekwiwalentne (odpowiednio: poziome i pionowe) poniżej spągu warstwy górnej.

Dla pojedynczej siły skupionej P otrzymamy zatem:

$$\sigma_{22} = P \frac{K_1 x_2^2}{K_2 \left[ h_1 \left( \sqrt{\frac{K_1}{K_2}} - 1 \right) + h_2 \right]^3 \sqrt{2K_2}} \exp - \left\{ \frac{x_2^2}{2K_2 \left[ h_1 \left( \sqrt{\frac{K_1}{K_2}} - 1 \right) + h_2 \right]^2} \right\}; \quad (4.41)$$

Wprowadzając oznaczenia:

$$\varrho_2^H = x_2; \quad \varrho_3^H = h_1 \left( \sqrt{\frac{K_1}{K_2}} - 1 \right) + h_2; \quad bH = 2B; \quad (4.42)$$

$$x_w = \frac{\varrho_2 + 0,5b}{\varrho_3 \sqrt{K_2}}; \quad y_w = \frac{\varrho_2 - 0,5b}{\varrho_3 \sqrt{K_2}};$$

podobnie jak w rozdz. 4.3.1, po odpowiednich podstawieniach oraz przekształceniach otrzymamy składowe stanu naprężenia w podłożu pojedynczego podkładu o równomiernym rozkładzie oddziaływań w podstawie  $p^*$  (o.r. - w.), spoczywającego na dwuwarstwowym ośrodku rozdrobnionym:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{11} &= 0,5 p^* [\Phi(Y_w) - \Phi(X_w)]; & (4.43) \\ \sigma_{22} &= p^* K_1 \left\{ 0,5 [\Phi(Y_w) - \Phi(X_w)] + \sqrt{\frac{1}{2\pi}} \right. \\ &\quad \left. [X_w \exp(-0,5 X_w^2) - Y_w \exp(-0,5 Y_w^2)] \right\}; & (4.44) \\ \sigma_{12} &= p^* \sqrt{\frac{K_1}{2\pi}} [\exp(-0,5 X_w^2) - \exp(-0,5 Y_w^2)]; & (4.45) \end{aligned} \right\} \text{(o.r.-w.)}$$

Przyjmując z kolei hipotezę o parabolicznym rozkładzie oddziaływań kontaktowych (o.p.-w) w podstawie podkładu otrzymamy:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{11} &= \frac{2p\eta_3^2 K_2}{b^2} \left\{ (X_w Y_w + 1) [\Phi(X_w) - \Phi(Y_w)] - \sqrt{\frac{2}{\pi}} \right. \\ &\quad \left. [X_w \exp(-0,5 Y_w^2) - Y_w \exp(-0,5 X_w^2)] \right\}; & (4.46) \\ \sigma_{22} &= \frac{2p\eta_3^2 K_1}{b^2} \left\{ K_2 (X_w Y_w + 3) [\Phi(X_w) - \Phi(Y_w)] - \frac{1}{\eta_3} \sqrt{\frac{2K_2}{\pi}} \right. \\ &\quad \left. [b + \eta_3 \sqrt{K_2} X_w] \exp(-0,5 Y_w^2) + (b - \eta_3 \sqrt{K_2} Y_w) \right. \\ &\quad \left. \exp(-0,5 X_w^2) \right\}; & (4.47) \\ \sigma_{12} &= \frac{4p\eta_2 \eta_3 \sqrt{K_1 K_2}}{b^2} \left\{ [\Phi(Y_w) - \Phi(X_w)] + \frac{\eta_3}{\eta_2} \sqrt{\frac{2K_2}{\pi}} \right. \\ &\quad \left. [\exp(-0,5 Y_w^2) - \exp(-0,5 X_w^2)] \right\}; & (4.48) \end{aligned} \right\} \text{(o.p.-w.)}$$

Otrzymane równania opisują zatem w płaskim układzie odniesienia wszystkie składowe stanu naprężenia w dwuwarstwowym podłożu rusztu torowego, uzależniając ponadto charakter ich rozkładu od hipotezy o rozkładzie oddziaływań kontaktowych w strefie styku nawierzchni z podtorzem.

#### 4.4.2. Dane przyjęte do badań numerycznych wraz z analizą uzyskanych rezultatów

Korzystając z zależności opisanych równaniami (4.43) - (4.45) oraz (4.46) - (4.48) zrealizowano szereg testów numerycznych, przyjmując w nich jako

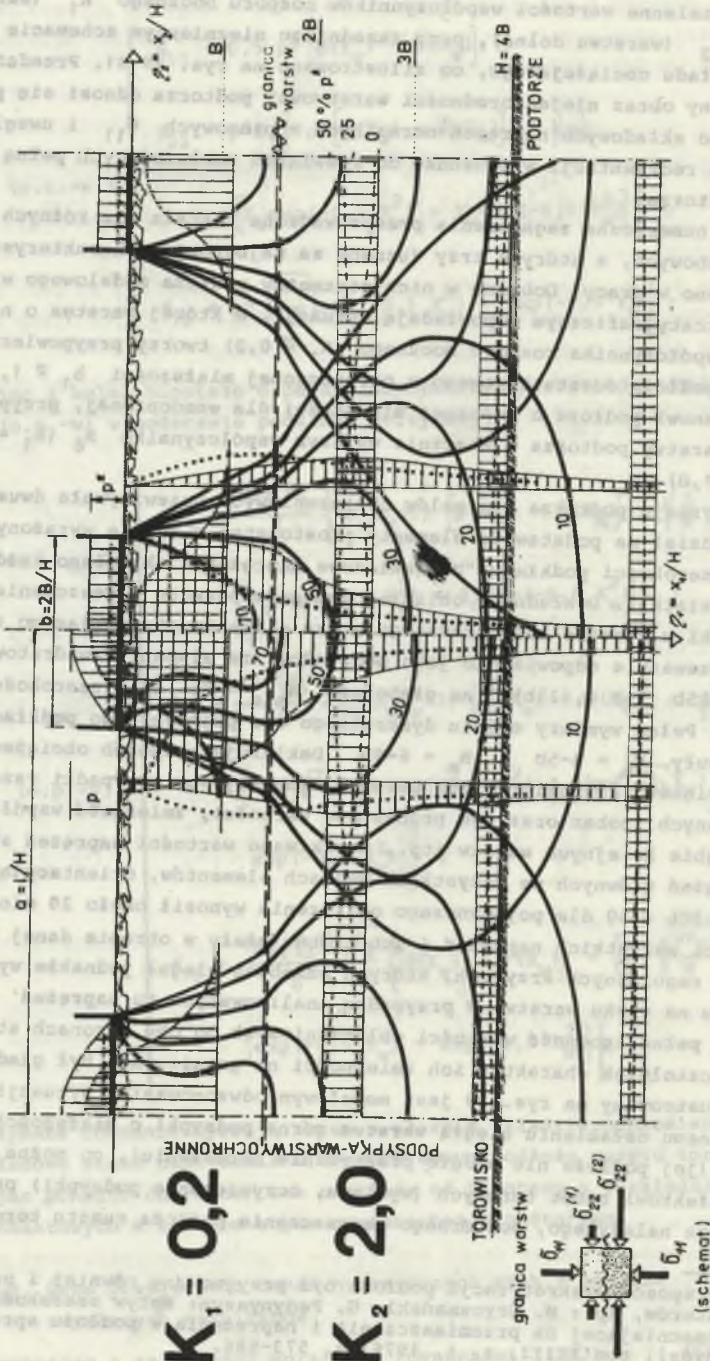
podstawowe zmienne wartości współczynników rozporu bocznego  $K_1$  (warstwa górna) i  $K_2$  (warstwa dolna), przy zasadniczo niezmiennym schemacie geometrycznym układu obciążającego, co zilustrowano na rys. 39-41. Przedstawiony tam graficzny obraz niejednorodności warstwowej podtorza odnosi się przede wszystkim do składowych naprężeń normalnych - pionowych  $\sigma_{11}$  i uwzględnia stopień ich reorientacji w stosunku do rozwiązań zakładających pełną jednorodność podtorza.

Analiza numeryczna zagadnienia przeprowadzona została dla różnych układów liczbowych, z których trzy (uznane za najbardziej charakterystyczne) przedstawiono w pracy. Dobrane w nich parametry podłoża modelowego w swym układzie stratygraficznym odpowiadają sytuacji, w której warstwa o niskiej wartości współczynnika rozporu bocznego ( $K_1 \approx 0,2$ ) tworzy przypowierzchniową strefę podłoża rusztu torowego o ograniczonej miąższości  $h_1 \approx 1,5B$  (rys. 39) lub stanowi podłoże o znacznej miąższości dla wzmocnionej, przypowierzchniowej warstwy podtorza o znacznie wyższym współczynniku  $K_2$  ( $K_1 = 2,0$  lub  $K_1 = 1,0$ ).

Dyskretyzacja podtorza dla celów obliczeniowych przewidywała dwustopniowy jego podział na podstawowe elementy prostokątne o module wyrażonym jako krotność szerokości podkładu "b" (składowe naprężenia określano każdorazowo w węzłach siatki). Dokładność obliczeń wymagała ponadto zagęszczenia modelowej siatki w strefie bezpośredniego styku elementu obciążającego z podłożem, co przeważnie odpowiadało jego podziałowi na elementy kwadratowe o szerokości  $0,25b$  (lub  $0,125b$ )<sup>72</sup> na głębokość  $H_{m,z} = 2b$  oraz szerokość  $B_{m,z} = 6b$  [71]. Pełne wymiary modelu dyskretnego dla pojedynczego podkładu wynosiły z reguły  $H_m = 4-5b$  i  $B_m = 6-8b$ . Deklarując: sposób obciążenia podtorza (odcinkowo równomierne lub paraboliczne czy oba przypadki razem), liczbę określanych izobar oraz ich procentowe wartości, zmienność współczynników  $K_1$  w obrębie kolejnych warstw itp., uzyskiwano wartości naprężeń składowych oraz naprężeń głównych we wszystkich węzłach elementów. Orientacyjny czas pracy EMC ICL 4-50 dla pojedynczego obliczenia wynosił około 20 minut.

Wartości wszystkich naprężeń i ich izobar miały w obrębie danej warstwy charakter regularnych krzywych, których przebieg ulegał jednakże wyraźnemu zaburzeniu na styku warstw. W przypadku analizowanych tu naprężeń  $\sigma_{11}$  występowała pełna zgodność wartości obliczeniowych po obu stronach styku warstw, aczkolwiek charakter ich zmienności na granicy nie był gładki. Przypadek zilustrowany na rys. 39 jest modelowym odwzorowaniem sytuacji, w której znacznemu osłabieniu uległa warstwa górna podsypki o miąższości około 25-30 cm (jej podłoże nie uległo praktycznie naruszeniu), co można przypisać np. efektowi robót torowych (wymiana, oczyszczanie podsypki) przeprowadzonych bez należytego, powtórnego zagęszczenia podłoża rusztu torowego.

<sup>72</sup>Podobny sposób dyskretyzacji podłoża był przyjmowany również i przez innych autorów, np.: M. Gryczmański, G. Fedynszyn: Wpływ szerokości warstwy wzmacniającej na przemieszczenia i naprężenia w podłożu sprężystym. Arch. Hydr., tom XXIII, z. 4, 1976, s. 573-586.

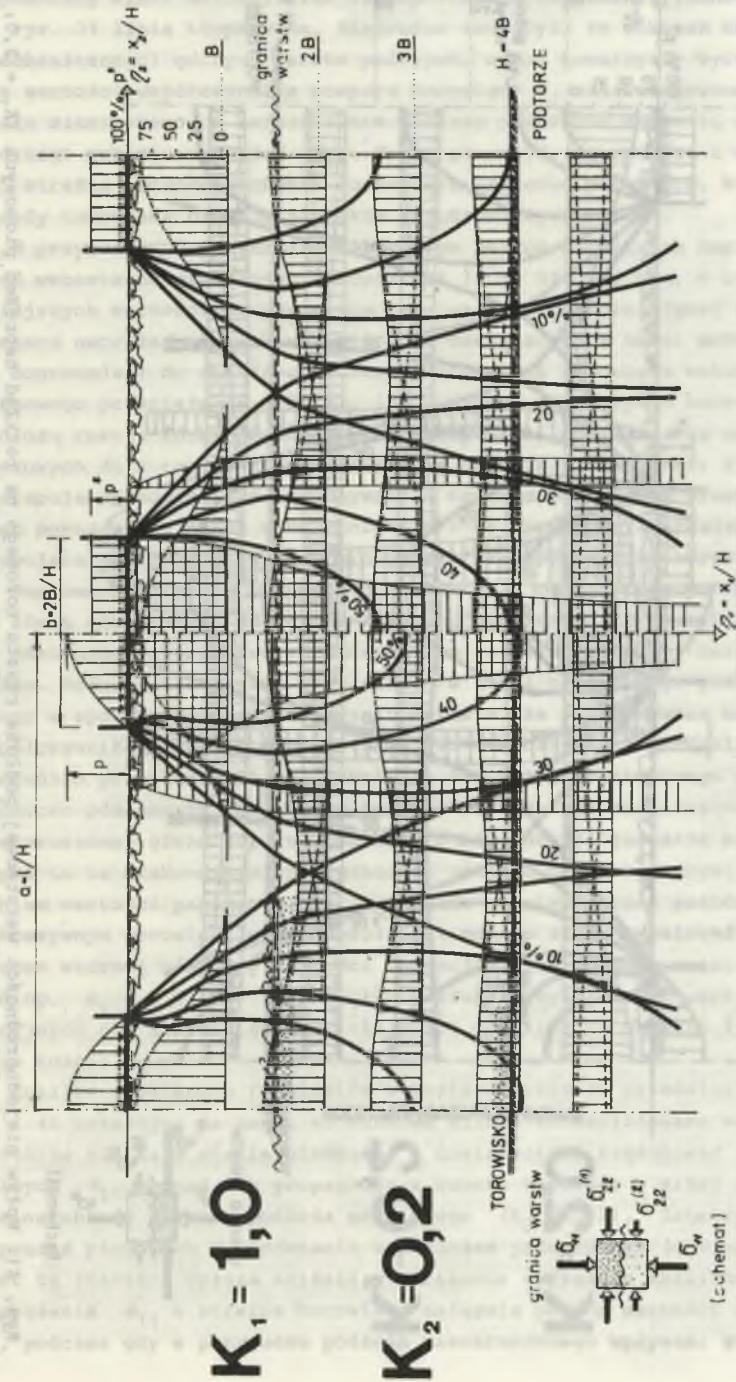


**$K_1 = 0,2$**

**$K_2 = 2,0$**

Rys. 39. Wpływ niejednorodności warstwowej podłoża rusztu torowego na rozkład naprężeń pionowych ( $K_1 = 0,2$ ;  $K_2 = 2,0$ ). Warstwa górna osłabiona

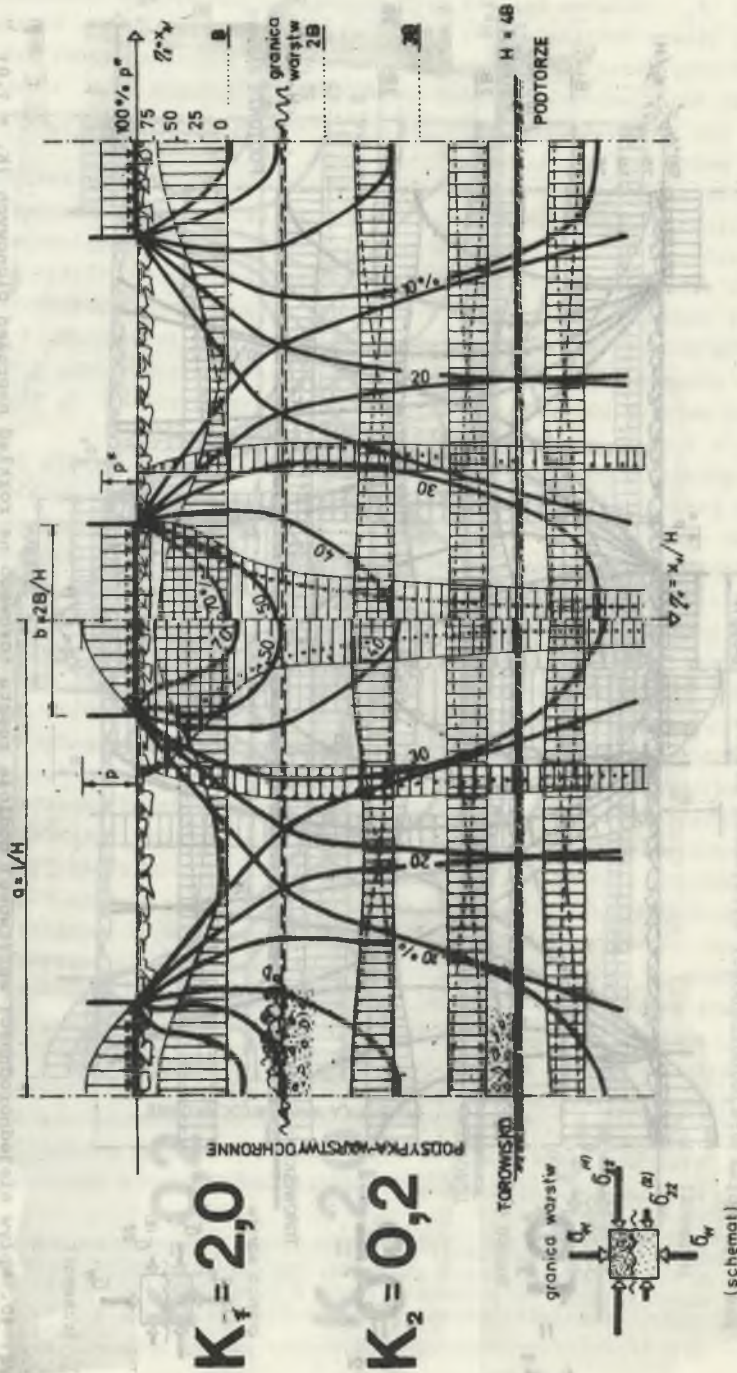
Fig. 39. The effect of laminar heterogeneity in the foundation of track layer framework on the vertical stress distribution ( $K_1 = 0,2$ ;  $K_2 = 2,0$ ). Upper layer - attenuated



$K_1 = 1,0$

$K_2 = 0,2$

Rys. 40. Wpływ niejednorodności warstwowej podłoża ruszta torowego na rozkład naprężeń pionowych ( $K_1 = 1,0$ ;  $K_2 = 0,2$ ). Warstwa dolna osłabiona wpływami górniczymi  
 Fig. 40. The effect of laminar heterogeneity in the foundation of track layer weakened by mining stress distribution ( $K_1 = 1$ ;  $K_2 = 0,2$ ). Lower layer weakened by mining effects



$K_1 = 2,0$

$K_2 = 0,2$

Rys. 41. Wpływ niejednorodności warstwowej podłoża torowego na rozkład naprężeń pionowych ( $K_1 = 2,0$ ;  $K_2 = 0,2$ ). Warstwa dolna osłabiona wpływami górnicyzmi, warstwa górna wzmocniona

Fig. 41. The effect of laminar heterogeneity in the foundation of track layer framework on the vertical stress distribution ( $K_1 = 2,0$ ;  $K_2 = 0,2$ ). The lower layer weakened by mining influences, whereas the upper one reinforced

Stanowi naprężeń normalnych  $\sigma_{11}$  w podtorzu, dla okresu poprzedzającego wspomniany efekt destabilizacji, odpowiadają naprężenia pionowe zaznaczone na rys. 39 linią kropkowaną. Nietrudno zauważyć, że wskutek rozluźnienia (mechanicznego) górnych warstw podsypek, czemu towarzyszy wyraźne obniżenie wartości współczynnika rozporu bocznego  $K_1$  dla wbudowanego tam materiału ziarnistego, w bezpośrednim podłożu podkładów dochodzi do blisko dwukrotnego wzrostu naprężeń  $\sigma_{11}$ . Warto zauważyć, że również i w nienaruszonej strefie podłoża dochodzi do wzrostu naprężeń pionowych, które poniżej strefy torowiska ulegają jednakże szybkiemu wytłumieniu.

W przytoczonym przykładzie liczbowym poziom normalnych naprężeń pionowych wzrasta na głębokości torowiska z 14 do 19%  $p^*$ , tzn. o około 35%. Przy mniejszych wartościach parametru  $K_2$  warstwa podścielającej intensywność wzrostu naprężeń  $\sigma_{11}$  staje się dużo większa, co z kolei może prowadzić (i doprowadza) do wyraźnego wzrostu deformacji torowiska wskutek jego dodatkowego przeciążenia [79, 81, 135]. Wzrost oddziaływań normalnych  $\sigma_{11}$  w podłożu rusztu torowego musi, rzecz oczywista, pociągnąć za sobą wzrost dodatkowych (i z reguły niejednorodnych) osiadań nawierzchni. Zjawisko to, występujące szczególnie intensywnie w trakcie pierwszych przejazdów taboru, jest powszechnie znane w kolejnictwie i ma charakter zanikający wraz z postępującą odbudową cech determinujących nośność podłoża torowego.

Poziome deformacje podtorza o charakterze rozluźniającym  $\epsilon_r$ , jako typowy efekt odkształceń powierzchni terenu górniczego, przyczyniają się do zgoła odmiennego charakteru współdziałania nawierzchni z jej bezpośrednim podłożem. Rozwój stref stanu granicznego w głębi obciążonego podtorza, uwidoczony w sposób poglądowy na rys. 6 sprawia, że przypisywana mu zmienność współczynnika rozporu bocznego prowadzi (w porównaniu do analizowanego uprzednio przypadku) do wyodrębnienia się układu warstwowego podtorza o zasadniczo odmiennych charakterystykach. Dość dobrze zagęszczona (i względnie nienaruszona) górna warstwa podtorza o nieznacznej jednakże miąższości spoczywa tu na słabonósnym, rozluźnionym podłożu gruntowym (rys. 6). Zróżnicowaniem wartości parametru  $K_1$  w obrębie warstwy górnej podtorza (jak i sukcesywnym wzrostem jej grubości  $h_1$ ) możemy zatem symulować postępujący proces wtórnej odbudowy nośności (konsolidacji) podłoża rusztu torowego (od np.  $K_1 = 1,0$  do  $K_2 = 2,0$ ), w trakcie cyklicznych obciążeń eksploatacyjnych po zaprzestaniu działalności górniczej w obrębie filara ochronnego kolei.

Analiza uzyskanych rezultatów w postaci wykresów przedstawionych na rys. 40 i 41 wskazuje, że nawet stosunkowo silnie skonsolidowane warstwy górne podtorza nie są w stanie przenieść i dostatecznie zredukować naprężeń normalnych  $\sigma_{11}$  przed ich propagacją z rusztu torowego w niżej leżące i znacznie osłabione warstwy podłoża gruntowego ( $K_2 \cong 0,2$ ). Intensywność wzrostu naprężeń pionowych w porównaniu z podłożem jednorodnym (o współczynniku  $K_1$ ) jest tu znacznie wyższa aniżeli w wariancie uprzednio analizowanym, jako że naprężenia  $\sigma_{11}$  w strefie torowiska osiągają poziom wartości około 35-40%  $p^*$ , podczas gdy w przypadku podłoża nienaruszonego wpływami górniczymi wy-



nosiły one jedynie około 14% p\*. Mamy tu zatem do czynienia z prawie 2,5-3-krotnym wzrostem naprężeń pionowych w obrębie torowiska przy praktycznie niezmiennym charakterze zewnętrznych obciążeń eksploatacyjnych, czego nieuniknionym efektem wtórnym są znaczne - trwałe deformacje i uszkodzenia całego podtorza. W skrajnie niekorzystnych warunkach górniczo-budowlanych, wpływach wielokrotnej eksploatacji kolejnych pokładów pod tą samą linią itp., intensywność uszkodzeń podtorza i nawierzchni będzie się nasilać jako efekt superpozycji różnorodnych czynników destrukcyjnych [9, 70, 90, 135], co z kolei może prowadzić do awarii (np. osuwisk [74], a nawet i katastrof [98, 138]). Należy w tym miejscu ponadto zauważyć, iż odbudowa nośności podtorza osłabionego wpływami górniczymi ma charakter procesu długotrwałego<sup>73</sup> i w pełni nieodwracalnego, między innymi z uwagi na charakter zmienności fizyko mechanicznych cech budujących je gruntów [38, 82, 98].

W tych warunkach szczególnego znaczenia nabiera właściwie pojęta działalność profilaktyczna, łagodząca skutki zaistniałych w podtorzu zjawisk. Przytoczone powyżej wnioski uzyskane drogą analizy teoretycznej zagadnienia zdają się potwierdzać celowość zalecanych działań praktycznych, związanych z odpowiednim (w sensie materiałowym) wykonaniem warstwowej nadbudowy górnych stref podtorza, połączonej z jego starannym zagęszczeniem (stabilizacją mechaniczną). Wzmocniona tym sposobem sztywność podtorza konwencjonalnego rusztu torowego zapobiegnie jego nadmiernym uszkodzeniom, przyczyniając się zarazem do rektyfikacji niwelety drogi kolejowej. Efektu tego nie można, rzecz jasna, oczekiwać w przypadku konsekwentnego stosowania tzw. niwelety trwale obniżonej lub gdy zalecana i sukcesywnie realizowana podbudowa warstwowa toru zostanie wykonana w sposób nieskoordynowany z prognozowanymi obniżeniami terenu górniczego. Działania te, mające w swym zamysle profilaktycznym charakter wyraźnie prewencyjny, można realizować, praktycznie rzecz biorąc, bez żadnych ograniczeń na całym obszarze górniczej niecki obniżeniowej. Z uwagi na zakres prognozowanych w budownictwie komunikacyjnym szkód [9], celowe wydaje się jednakże podjęcie dodatkowych przedsięwzięć zmierzających do bardziej skutecznego, a zarazem i mniej absorbującego (w trakcie eksploatacji), uodpornienia podtorza i nawierzchni na działanie odkształceń pochodzenia górniczego<sup>74</sup>.

<sup>73</sup> Sprawa ta wymaga dalszych badań i uściśleń. Wydaje się, iż jednym z głównych czynników słabej zagęszczalności (a więc i długotrwałej odbudowy nośności podtorza górniczego) jest trudność w wytworzeniu się tzw. zjawiska kowadzia (patrz rys. 11), o czym wspomniano pośrednio np. w pracy: Arquite G.: Zagęszczanie. Drogi i pasy startowe. WKiŁ, Warszawa 1980, s. 263-264; powołując się na terminologię oraz wcześniejsze badania Parameythiotiego. Zwraca się tam uwagę na istotny wpływ stanu podłoża (jako "podstawy") na zagęszczalność spoczywającej na nim warstwy. Luźny "podkład" wymagał zawsze znacznie dłuższego okresu zagęszczania, a otrzymane sztywności warstw różniły się w sposób wyraźny, tzn. były znacznie niższe przy podkładzie luźnym, silnie odkształcalnym i odwrrotnie.

<sup>74</sup> Dotychczasowe rezultaty wydają się wskazywać, iż cel ten zostanie w znacznej mierze osiągnięty po zakończeniu badań oraz wdrożeń realizowanych przez autora w ramach CPBR 9.3, o czym wspomniano w uwagach do rozdz. 4.3.2.

#### 4.5. Uwagi i wnioski końcowe

Rezultaty przytoczonych uprzednio rozważań związanych z problemami odwzorowania procesu współdziałania elementów składowych nawierzchni z podtorzem górniczym oraz doбором modelu obliczeniowego podłoża i wyniki przeprowadzonych badań numerycznych dają podstawę do następujących uwag i wniosków natury ogólnej:

1. Sformułowanie związku zagadnień początkowo-brzegowych z wymogami budowy matematycznego modelu współdziałania nawierzchni z podtorzem w warunkach deformacji terenu górniczego jest zadaniem niezwykle złożonym i w swej istocie polega na poszukiwaniu rozwiązania dla dyskretnego zagadnienia kontaktowego dwóch ciał odkształcalnych (ruszt torowy - podtorze). Z uwagi na brak możliwości (jak do chwili obecnej) bliższego określenia równań konstytutywnych dla ośrodków tworzących podtorze, istotnym krokiem staje się tu podjęcie decyzji o przyjęciu adekwatnego charakteru rozkładu oddziaływań kontaktowych.
2. Podjęta w kategoriach mechaniki próba kreacji matematycznego modelu górnych warstw podtorza oraz związanego z nim modelu fizycznego ośrodka, odwzorowującego ponadto w trafny sposób złożoną mechanikę zjawisk charakterystycznych dla terenów górniczych, doprowadziła autora do wniosku, iż najpełniej stawianym tu wymogom odpowiada podejście dyskretne (strukturalne) w jego nurcie probabilistycznym, bazujące na koncepcji Kandaurova-Mullera. Ujęcie to odnoszące się przede wszystkim do ośrodków rozporowych o wyraźnej strukturze ziarnistej, wywodzi się z założeń uwzględniających w pełni stochastyczny rozkład oddziaływań międzyziarnowych, przy dowolnym kształcie oraz losowym układzie punktów kontaktowych poszczególnych ziarn.
  - 2.1. Podejście to, obejmujące w pełni formułowanie i rozwiązywanie konkretnych zagadnień równowagi ośrodka rozdrobionego, może zostać adoptowane i wykorzystane dla celów analizy warunków pracy podtorza kolejowego, w tym również i na terenach podlegających wpływom podziemnej eksploatacji górniczej.
  - 2.2. Podstawowym geomechanicznym parametrem identyfikacyjnym modelowego ośrodka rozdrobionego jest współczynnik parcia (rozporu) boczno  $K$ . W rekomendowanym podejściu analitycznym stanowi on jedyny, wiarygodny nośnik informacji o charakterze i intensywności poziomych odkształceń podłoża górniczego, stanowiącego aktywną strefę podtorza kolejowego ( $K_g$ ). Jego funkcyjny - wieloparametrowy zapis, uzyskany drogą rozważań analitycznych, znajduje pełne uzasadnienie w przeprowadzonych uprzednio laboratoryjnych testach weryfikujących.
3. Analiza składowych stanu naprężenia w aktywnej strefie podtorza wskazuje jednoznacznie na istotne zróżnicowanie warunków jego pracy w zależności od:

- charakterystyk parametrów identyfikacyjnych ośrodków tworzących podłoże rusztu torowego, co w głównej mierze związane jest z realną oceną wartości współczynnika  $K_c$ ,
- wiarygodności przyjętej hipotezy o rozkładzie oddziaływań kontaktowych w strefie styku podkładów z podłożem,
- przyjętego modelu układu stratygraficznego podtorza (jednorodnie - warstwowe).

Najistotniejsze uwagi szczegółowe, związane z analizą stanu naprężenia w podłożu rusztu torowego na terenach górniczych, można ująć w postaci następujących stwierdzeń:

1. Uzyskane rozwiązania w postaci zamkniętego układu równań pozwalają na dokonanie analizy redystrybucji wszystkich składowych stanu naprężenia w podtorzu, zależnie od wyjściowego stanu podłoża i stopnia mobilizacji destrukcyjnych oddziaływań pochodzenia górniczego - w głównej mierze poziomych odkształceń rozluźniających  $\varepsilon_r$  o kierunku równoległym do podłużnej osi trasy.
2. Wykazano, że rozwiązanie adaptowane dotąd dla tego rodzaju zagadnień, a mieszczące się w ramach [klasycznej teorii sprężystości (traktującej podtorze jako ośrodek jednorodny, ciągły, izotropowy), stanowią jedynie przypadek szczególny, możliwy do uzyskania w ramach rekomendowanego tu, znacznie bardziej ogólnego a przy tym i adekwatnego fizykalnie podejścia dyskretnego. Zezwala ono na uwzględnienie zarówno rzeczywistej - megaskopowej anizotropii podłoża rusztu torowego, jak i umożliwia symulację efektów typowych dla prekonsolidacji lub też względnego rozluźnienia struktury podtorza gruntowego.
3. Wpływ odkształceń podłoża górniczego o charakterze rozluźniającym na podtorze przejawia się w głównej mierze wyraźnym wzrostem naprężeń normalnych  $\sigma_{11}$  w strefie torowiska, przy niezmiennej wielkości obciążeń eksploatacyjnych pochodzących od taboru. Naprężenia te w skrajnie niekorzystnych warunkach mogą kilkukrotnie przewyższyć (2-4 razy) odpowiednie reakcje z okresu poprzedzającego wspomniane deformacje. Przyjęcie którejś z hipotez o rozkładzie naprężeń kontaktowych w podstawie podkładu (odcinkowo równomierne - paraboliczne) nie implikuje tu wyraźnie zróżnicowanych i niejednoznacznych ocen. Uwzględnienie natomiast niejednorodności warstwowej górnych stref podtorza wskazuje na bardziej realistyczną ocenę zjawisk związanych z rozprzestrzenianiem się i redukcją tychże naprężeń w podłożu rusztu torowego.
4. Uwagę zwraca wyraźne zróżnicowanie w przebiegu izobar naprężeń  $\sigma_{22}$  oraz  $\sigma_{12}$  w zależności od przyjętego poziomu wartości współczynnika  $K$ , jak i założonej hipotezy o oddziaływań kontaktowych. Bez wątpienia za znacznie bardziej prawidłowe należy tu uznać przyjęcie założenia o parabolicznym rozkładzie naprężeń  $\sigma_{11}$  w podstawach obciążonych podkładów, jako że nie prowadzi to w efekcie do wytworzenia się w podłożu (fikcyjnych) naprężeń o charakterze rozciągającym.

5. Odształcenia rozluźniające podtorza  $\epsilon_r$  stają się bezpośrednią przyczyną propagacji dodatkowych naprężeń stycznych w głąb torowiska. Przy braku odształceń pochodzenia górniczego są one (dla przyjmowanych dotąd grubości podsyppek i warstw ochronnych) skutecznie zredukowane poprzez wpływ naprężeń  $\sigma_{12}$  pochodzących od podkładów sąsiednich. Redystrybucja naprężeń  $\sigma_{22}$  na poziomie torowiska polega w tych warunkach na ich wyraźnej koncentracji w strefach tzw. okienek, połączonej z równoczesnym zanikiem bezpośrednio pod podkładami. Przy równoczesnym, znaczącym wzroście naprężeń  $\sigma_{11}$  w osiowej strefie podkładów, zjawisko to musi prowadzić do wyraźnego wzrostu dodatkowych osiadań rusztu torowego podczas ruchu taboru, ponad wartość zasadniczych obniżek terenu górniczego.

6. Wśród wielu możliwych tu do zastosowania zabiegów profilaktycznych postuluje się rezygnację z koncepcji tzw. niwelety trwale obniżonej<sup>75</sup> na rzecz systematycznego (i zsynchronizowanego z postępem robót górniczych), wyprzedzającego podwyższania nośności przypowierzchniowych warstw podtorza, wzmocnienie konstrukcyjne podtorza itp.

Wyłania się tu pilna potrzeba opracowania alternatywnych, możliwie prostych technicznie (oraz technologicznie), lecz i skutecznych rozwiązań konstrukcyjnych dla samej nawierzchni, jak i podtorza, celem lepszego ich uodpornienia na działania deformacji terenu górniczego, głównie zaś poziomych odształceń rozluźniających  $\epsilon_r$ .

<sup>75</sup> Pojęcia "niwelety trwale obniżonej" nie utożsamia się tu bynajmniej z koncepcją przedstawioną w pracy ([138, s. 301], gdzie jest ona ściśle powiązana z planowaną eksploatacją górniczą i skoordynowana z robotami podnoszeniowymi. Chodzi tu więc o taki etap (wariant) kształtowania się niwelety, w którym nie podlega ona jakiegokolwiek uprzedniej adaptacji do zmiennych warunków profilowych terenu górniczego.

## 5. PODSUMOWANIE

Obserwowana w ostatnich latach znaczna intensyfikacja działalności górniczej w obrębie filarów ochronnych gęstej sieci infrastruktury komunikacyjnej GOP-u sprawiła, że znacznie wzrosło zagrożenie dla ciągłości i bezpieczeństwa prowadzenia ruchu w warunkach oddziaływania podziemnej eksploatacji kopalni, co w szczególności odnosi się do podtorza i nawierzchni dróg kolejowych.

Warunki pracy podłoża rusztu torowego, jak i sam proces współdziałania nawierzchni z podtorzem podlegają w tym przypadku zasadniczym i z reguły niekorzystnym zmianom. Świadczy o tym znaczny bo 3-4-krotny wzrost awaryjności wszystkich bez mała elementów składowych dróg kolejowych zlokalizowanych na terenach górniczych, niezależnie od destrukcyjnych zmian natury funkcjonalno-użytkowej w obrębie wspomnianych układów komunikacyjnych.

Przedstawiona w pracy analiza wpływu odkształceń podłoża górniczego na współpracę podtorza z nawierzchnią dróg kolejowych naświetliła w tych warunkach złożone problemy natury poznawczej, nie tracąc równocześnie z pola widzenia licznych aspektów natury praktycznej. Dotyczy to w szczególności ogólnych kryteriów realizacji działań profilaktycznych w strefie podtorza, synchronizacji wspomnianych zabiegów z prognozami górniczych deformacji powierzchni, postulowanych zabiegów uodparniających o zasadniczo podwyższonej efektywności itp., co w formie wniosków i licznych uwag szczegółowych ujęto wewnątrz pracy.

Tematykę badawczą mieszczącą się w szeroko pojętych ramach dyscypliny "drogi kolejowe" cechuje obserwowana w ostatnim okresie intensyfikacja poszukiwań w zakresie nowych, dokładniejszych, a zarazem bardziej adekwatnych możliwości opisu rzeczywitych zjawisk i procesów rejestrowanych w naturze. Odnosi się to również do podjętej w pracy problematyki podtorza oraz zachodzących w nim zjawisk, zwłaszcza zaś efektów związanych z bezpośrednim wpływem podziemnej eksploatacji górniczej. Działając w przekonaniu, iż ograniczenie się wyłącznie do prezentacji (sugestii) nowych modeli teoretycznych pracy podtorza w czysto zmatematyzowanym ujęciu nie jest w stanie spełnić istniejących tu oczekiwań natury praktycznej, obrano w realizacji wytyczonego na wstępie celu drogę paralelnej identyfikacji zagadnienia.

Realizowany w pracy cykl poznawczy polegał zatem z jednej strony na doskonaleniu (weryfikacji) istniejących tu - nielicznych modeli fizycznych z zakresu współdziałania nawierzchni i podtorza górniczego, z drugiej zaś strony przybrał formę budowy całkowicie nowego - fenomenologicznego modelu podłoża rusztu torowego (podtorza), spełniającego ponadto określone warunki zachowań uznanych za typowe dla terenów górniczych. Wprowadzenie do analizy

problemów pracy podtorza nowej klasy modeli typu stochastycznego (ziarnistego) doprowadziło do znacznie bardziej realistycznego postawienia zagadnienia (w sensie zgodności matematycznego oraz fizycznego modelu podłoża rusztu torowego), a tym samym przyczyniło się do wierniejszego opisu warunków jego rzeczywistej pracy w trakcie eksploatacji.

Przeprowadzone badania terenowe, specjalistyczne testy laboratoryjne i oryginalne eksperymenty na ośrodku analogowym typu Taylora-Schneebelego potwierdziły wysuwaną uprzednio tezę o zasadniczej odrębności mechaniki współdziałania nawierzchni z podłożem w specyficznych warunkach deformacji terenu górniczego, w odróżnieniu od symptomów tejże współpracy poza tymi obszarami.

Wykazano, że o istocie redystrybucji oddziaływań w strefie styku układu nawierzchnia - podtorze (górnice) decydują poziome odkształcenia podłoża o charakterze rozluźniającym lub zagęszczającym, a stopień bezpośredniej ingerencji tychże odkształceń w mobilizację dodatkowych sił wewnętrznych w obrębie konstrukcji rusztu torowego (przede wszystkim szyn) jest ściśle uzależniony od warunków interakcji układu.

Droga kolejowa, w odróżnieniu od innych budowli typu liniowego, wykazuje w trakcie jej eksploatacji określoną podatność na cykliczne - quasi-dynamiczne oddziaływania pionowe od osi przejeżdżającego taboru. Cechuje ją zatem swoista aktywność współdziałania z podłożem górniczym, co z kolei w znacznym stopniu sprzyja samoistnej redukcji dodatkowych sił osiowych w torze. Nie stanowią one zatem bynajmniej jedynego źródła dodatkowych oddziaływań wewnętrznych pochodzenia górniczego, a ich znaczenie dla oceny globalnych warunków współdziałania nawierzchni z podtorzem może, w przekonaniu autora, ulegać pewnemu przewartościowaniu wobec nie mniej istotnych czynników związanych z wielopostaciową utratą nośności przez podtorze górnicze, istotną zmiennością jego charakterystyk sztywnościowych, zasadniczym przegrupowaniem oddziaływań kontaktowych w układzie: nawierzchnia - podtorze itp. Rozluźnienie struktury gruntów podtorza, sprzyjające zmianom jego cech wytrzymałościowych - przede wszystkim redukcji wytrzymałości na ścinanie, implikuje wydatny spadek podatności, sprężystej podłoża rusztu torowego. W świetle doświadczeń autora należy liczyć się z realną możliwością 3-6-krotnej redukcji cech sprężystych podtorza poddanego po raz pierwszy wpływom ciągłych deformacji podłoża górniczego. Stabilizacja minimalnej wartości tego parametru odpowiada w praktyce odkształceniom charakterystycznym dla III-kategorii terenów górniczych i wykazuje tendencję do długotrwałej stagnacji na zbliżonym poziomie również dla ewentualnych dalszych oddziaływań pochodzenia górniczego związanych z eksploatacją kolejnych pokładów w filarze ochronnym kolei. W efekcie tego procesu dochodzi do zasadniczych zmian w ogólnych warunkach współdziałania nawierzchni z podtorzem. Polegają one głównie na wyraźnym wzroście momentów zginających w tokach szynowych (o 200-300%) przy równoczesnej redukcji momentów zginających w podkładach (około 45-55%) i rozłożeniu oddziaływań pionowych na znacznie większą ich

liczbę. Jak wynika z przeprowadzonych badań, proces ten, implikowany rozluźnieniem gruntu w brzegowej strefie niecki obniżeniowej, jest zjawiskiem stosunkowo długotrwałym - pozbawionym efektów skutecznego (natychmiastowego) wzmocnienia w trakcie obciążeń eksploatacyjnych przekazywanych przez tabor. W analizie współdziałania nawierzchni z podtorzem górniczym czynnik ten, jak dotąd, nie był, praktycznie rzecz biorąc, brany pod uwagę. Wzrastająca w tych warunkach awaryjność nawierzchni i podtorza nie może być zatem przypisywana wyłącznie kolei z tytułu złego utrzymania elementów drogi kolejowej, lecz jest ona bez wątpienia bezpośrednią pochodną działalności górniczej, i jako taka powinna podlegać odmiennej aniżeli dotąd interpretacji formalno-prawnej.

Próba wstępnej analizy sygnalizowanych tu zjawisk, bazująca na założeniach teorii stanów granicznych, pozwoliła sprecyzować jedynie ogólne warunki redystrybucji składowych stanu odkształcenia i naprężenia w podtorzu na terenach górniczych. Za główne czynniki współdecydujące o mobilizacji i intensywności rozwoju stref stanu granicznego w podłożu rusztu torowego uznano charakter jego obciążenia (chwilowe względnie długotrwałe), jak i procesy charakterystycznej dla tego rodzaju współpracy - prekonsolidacji przypowierzchniowej strefy gruntów podtorza. Ta ostatnia, jak wykazano, w szczególności niekorzystnych warunkach pracy drogi kolejowej może przyczynić się do rozwoju szczególnie niekorzystnych, sprężonych stref stanu granicznego w podtorzu. Krytycznym odkształceniom rozluźniającym sypanie warstwy gruntów wbudowanych w podtorze rzędu  $\epsilon_r^{kr} = 2-3$  mm/s (dla gruntów spoiстых  $\epsilon_r^{kr} = 4-6$  mm/m) odpowiadają bowiem odkształcenia zagęszczające nie przekraczające w zasadzie  $\epsilon_z^{kr} < 5-7$  mm/m. Stwierdzenie tego faktu stanowi istotny aspekt poznawczy pracy rzutuujący zarazem na ocenę jego praktycznych reperkusji w stosunku do oceny warunków pracy podtorza, gdzie z reguły dopuszcza się do powstania odkształceń odpowiadających II-III kategorii terenu górniczego.

Warunki pracy podłoża rusztu torowego na terenach górniczych są zatem szczególnie predestynowane do licznych w tym przypadku uszkodzeń oraz lokalnych awarii, co znacznie pogarsza stan jego zdolności eksploatacyjnej, ograniczając skuteczne wypełnianie roli swoistego fundamentu liniowego wobec nawierzchni i taboru.

Kreację modelu obliczeniowego podłoża rusztu torowego, będącą jednym z zasadniczych celów pracy, oparto na analizie stojących obecnie do dyspozycji geomechaniki modeli obliczeniowych gruntów. Dostarczyła ona, o czym wspomniano już uprzednio, licznych argumentów na rzecz rezygnacji z rozwiązań bazujących na kontynuacyjnych analogach typu deterministycznego (fenomenologicznego) na rzecz ujęcia dyskretnego (strukturalnego) w jego probabilistycznym nurcie.

Odnosząc się do ośrodków ziarnistych o cechach rozporowych koncepcja Kondaurova-Mullera obejmuje w pełni formułowanie oraz rozwiązywanie zagadnień równowagi ośrodka rozdrobionego, w tym również materiału poddanego symulowanym numerycznie, poziomym odkształceniom o charakterze zagęszczają-

cym  $\varepsilon_z$  lub rozluźniającym  $\varepsilon_r$ . Możliwość taka istnieje tu głównie dzięki uziemiłonej funkcji współczynnika rozporu bocznego  $K_G$ , będącego parametrem wiodącym przedmiotowej koncepcji analitycznej. W myśl rekomendowanego podejścia stanowi on bowiem w przekonaniu autora podstawowy, a zarazem i w pełni adekwatny nośnik cech przypisywanych podłożu górnictwu. Będąc w swym analitycznym ujęciu funkcją szeregu fizykomechanicznych cech podłoża gruntowego, parametr  $K_G$  - co jest tu najistotniejsze, wyraża zmienność poziomych naprężeń w podtorzu przypisywaną jego jednorodnym odkształceniom  $\varepsilon_{r,z}$ .

Adaptacja uziemiłonej wartości współczynnika rozporu bocznego w strukturalnym modelu podtorza, cechującego się ponadto megaskopową anizotropią (konstrukcyjną i strukturalną) oraz stochastyczną propagacją oddziaływań międzyziarnowych i w pełni losowym ich kształtem, sprzyja trafnemu odwzorowaniu istoty fizykalnych procesów przebudowy reakcji wewnętrznych w aktywnej strefie podłoża rusztu torowego, jak i w całym masywie gruntowym podtorza.

Wobec uporządkowanej w czasie, dyskretnej propagacji wielkości odkształceń podłoża górnictwa  $\varepsilon_r$  uzyskano tym sposobem stosunkowo nieskomplikowany model ciągu zdarzeń, będący swoistą analogią zjawisk rejestrowanych w rzeczywistych warunkach pracy drogi kolejowej na terenach górniczych. Pochodne tego procesu w postaci znacznej intensyfikacji oddziaływań normalnych w strefie torowiska (blisko 4-krotny wzrost naprężeń pionowych) w połączeniu ze spadkiem wartości naprężeń poziomych oraz ich dekoncentracją w strefach międzypodkładowych, jak i propagacja dodatkowych naprężeń stycznych w głąb torowiska sprawiają, że stan techniczny podtorza ulega gwałtownej degradacji. Konkluzje wypływające z testów numerycznych znajdują pełne potwierdzenie w wynikach badań poligonowych i w eksperymentach modelowych. Świadczy to o osiągnięciu stawianego we wstępie pracy celu badawczego, dowodząc zarazem słuszności przyjętych tez, co do charakteru oraz specyfiki współdziałania nawierzchni drogi kolejowej z podtorzem na terenach górniczych.

Bazując na proponowanym w pracy sposobie oceny składowych stanu naprężeń w podtorzu można z kolei podjąć próbę rozwijania, adekwatnych dla tych nietypowych warunków, metod diagnostycznych. Dotychczasowa działalność w tym zakresie miała charakter zgoła intuicyjny, co nie zawsze sprzyjało skuteczności postulowanych tu konkretnych rozwiązań inżynierskich. Prezentowane w pracy ujęcie zagadnienia wypełnia tym samym kolejną, istotną lukę w działalności związanej z profilaktyką budownictwa komunikacyjnego na terenach górniczych.

Traktując przedstawione tu rezultaty poznawcze jako punkt wyjścia do dalszych prac badawczych należałoby w tym miejscu zauważyć, iż powinny być one ukierunkowane na:

- poszerzenie bazy materiałów doświadczalnych z zakresu analizy zmienności cech wytrzymałościowych przekonsolidowanych gruntów podtorza górnictwa w warunkach dużych zmian wilgotnościowych, wpływów obciążeń cyklicznych



- na odbudowę nośności podtorza i wzrost jego sztywności w warunkach kilkukrotnego przejścia frontu robót górniczych pod analizowanym obiektem liniowym,
- oceny skuteczności wybranych systemów uodpornienia konstrukcyjnego nawierzchni i podtorza na wpływy intensywnej podziemnej eksploatacji górniczej, ze szczególnym uwzględnieniem strefy torowiska, korpusu komunikacyjnych budowli ziemnych oraz ich podłoża,
- poszerzenie i wzbogacenie klasy modeli matematycznych i fizycznych adaptowanych do opisu współdziałania nawierzchni z podtorzem przy dążeniu z jednej strony do uzyskiwania możliwie prostych (aczkolwiek przybliżonych), a zarazem i zadowalających rezultatów praktycznych, z drugiej zaś strony do poszukiwania i budowy wieloparametrowych modeli o stopniu złożoności warunkującym pełną adekwatność obu głównych nurtów cyklu poznawczego.

## LITERATURA

- [1] Alpan I.: The Empirical Evaluation of the Coefficient  $K_0$  at Rest. "Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division", 1967, vol. 7, nr 1, s. 31-39.
- [2] Athanasion-Grivas D., Harr M.E.: Stochastic Propagation of Rupture Surfaces within Slopes. Proc. 2 Int. Conf.: "Applications of Statistics and Probability in Soil and Structural Engineering". Aachen 1975, s. 34-35.
- [3] Bałuch H.: Sposoby wyznaczania charakterystyk podłoża kolejowego. "Problemy Kolejnictwa" 1967, z. 39, s. 119-136.
- [4] Barycz S.: Wyznaczanie modułu ściśliwości gruntu zmienionego wpływem podziemnej eksploatacji górniczej w postaci poziomych odkształceń właściwych "pełzania". Dysertacja doktorska, Kraków 1965.
- [5] Basiewicz T.: Nawierzchnia kolejowa na podłożu betonowym typu CBP-74. Konferencja Naukowa - "Konstrukcja i utrzymanie nawierzchni kolejowej", Inst. Bud. Łąd. Pol. Gdańskiej, Gdańsk 1975, s. 9-21.
- [6] Bela M.: Sztywne fundamenty kołowe na niejednorodnym podłożu gruntowym w terenie górniczym. "Inżynieria i Budownictwo" 1980, nr 6, s. 229-233.
- [7] Bellotti R., Formigoni G., Jamiolkowski M.: Remarks on the Effect of Overconsolidation on the Coefficient of Earth Pressure at Rest. Proc. of the First Baltic Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Vol. 2, Gdańsk 1975, s. 61-71.
- [8] Biarez J.: Mechanika gruntów. PAN, Ossolineum, Wrocław 1963.
- [9] Bieniek M., Szumierz W. i in.: Analiza aktualnego i perspektywicznego zagrożenia bezpieczeństwa i ciągłości ruchu kolejowego na liniach Okręgu Śląskiego w wyniku dotychczasowych i prognozowanych wpływów eksploatacji górniczej. Prace COBIRTK, Nr 3156/16, Katowice 1984.
- [10] Biernatowski K.: Stateczność sztywnych fundamentów na podłożu sypkim. Prace Nauk. Inst. Geot. Pol. Wrocł. nr 6, Monografie nr 1, Wrocław 1971.
- [11] Borowicka H.: Über ausmittig belastete, starre Platten auf elastisch - isotropen Untergrund. Ingenieur Archiv, XIV, Berlin 1943.
- [12] Bronstejn B., Chadzinow C.: K opriedieleniju izmienenij swojstw gruntow pri ich podrabotkie. Sb. Naucznych Trudow: Stroitelstwo sooruzenij nad gornymi wyrabotkami". Izd. Nedra. Moskva 1965, nr 6, s. 9-16.
- [13] Brooker E.W., Ireland H.O.: Earth Pressures at Rest Related to Stress History. "Canadian Geotechnical Journal" 1965, vol 2, nr 1, s. 1-15.
- [14] Brząkała W.: Dyfuzje stochastyczne w ośrodkach rozdrobnionych. Prace Nauk. Inst. Geot. Pol. Wrocł. nr 38, S.: Konferencje - nr 14 "Geotechnika Budowlana" - III Wiosenna Szkoła Geomechaniki" Wrocław 1982, s. 30-39.
- [15] Brząkała W.: Efekt przesłaniania w stochastycznym ośrodku rozdrobnionym. Prace Inst. Geot. Pol. Wrocł. nr 44, S.: Konferencje - nr 17, pt. "Metody statystyczne w Geotechnice", IV Wiosenna Szkoła Geomechaniki, Wrocław 1984, s. 13-21.
- [16] Bukowski M., Gradkowski K.: Analiza wybranych problemów współpracy nawierzchni i podtorza. Mat. III - Semin. Probl. Resort. MNSzWiT RI-18 pt. "Podstawy modelowe kształtowania i utrzymania dróg szynowych". IDiM Pol. Warsz., Warszawa 1985, s. 231-286.

- [17] Bukowski M. (red.): Analiza modelu podtorza kolejowego w reżimie obciążeń dynamicznych, różnych obciążeń i rodzaju gruntów w podtorzu. Problem resortowy MK-137. Podtemat 04-0.2, IDiM Pol. Warsz., Warszawa 1985 (maszynopis).
- [18] Chang C.S., Adegoko C.W., Selig E.T.: Geotrack Model for Railroad Track Performance. "Journal of the Geotechnical Engineering Division". Proc. of the ASCE, 1980, vol. 106, nr GT11, s. 1201-1218.
- [19] Chikwendu S.Ch., Alimba M.: Diffusion Analogy for some Stress Computations. "Journal of the Geotechnical Engineering Division", 1979, Proc. of the ASCE, vol. 105, nr GT11, s. 1337-1342.
- [20] Chudek M.: Mechanika górotworu. Pol. Śl., Gliwice 1981.
- [21] Chudzikiewicz A., Drożdźiel J., Kisilowski J., Żochowski A.: Modelowanie i analiza dynamiki układu mechanicznego tor - pojazd. PWN, Warszawa 1982.
- [22] Cundall P.A., Strack O.D.L.: A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies. "Geotechnique" 1979, vol. 29, nr 1, s. 47-65.
- [23] Derski W., Izbicki R., Kisiel I. (red.), Mróz Z.: Mechanika skał i gruntów. Mechanika techniczna. PWN, Warszawa 1982, t. 7.
- [24] Desai C.S., Siriwardane A.M.: Numerical Models for Track Support Structures. "Journal of the Geotechnical Engineering Division" 1982, Proc. of the ASCE, vol. 108, nr GT3, s. 461-480.
- [25] Dmitruk S., Lysik B.: Modele współdziałania konstrukcji z gruntem. [W:] Współpraca konstrukcji budowlanych z podłożem. PAN - Kiliw, Ossolineum 1978, s. 15-56.
- [26] Dmitruk S.: O problemach współdziałania nawierzchni z podtorzem. Prace Nauk. Inst. Inż. Łąd. Pol. Wrocł. nr 24, S.: Konferencje nr 7 - "Drogi szynowe - zagadnienia badawczo-konstrukcyjne i eksploatacyjne". Wrocław 1978, s. 3-14.
- [27] Dymek F.: Pewne rozwiązania dla ośrodka sypkiego (stochastycznego) rozporowego i bezrozporowego. Zeszyty Problemowe Górnictwa 1979, t. 17, z. 1, s. 41-80.
- [28] Eisenmann J.: Einfluss der Schwellengroße, Schwellenteilung und Schotterbettstärke auf die Untergrundbeanspruchung. ETR - Heft 8, 1970, s. 309-317.
- [29] Eisenmann J., Mattner L.: Auswirkung der Oberbaukonstruktion auf die Schotter- und Untergrund - beanspruchung. "Eisenbahningenieur" 1984, vol. 34, nr 3, s. 99-107.
- [30] Feda J.: Mechanics of Particulate Materials. The Principles. Academia - Prague 1982.
- [31] Firlej S.: Wpływ podtorza na szynę kolejową. "Drogi Kolejowe" 1986, nr 2, s. 47-50.
- [32] Flavigny E.: Coefficient  $K_0$  et consolidation de materiaux argileux. Proc. of the First Baltic Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Gdańsk 1975, vol. 2, s. 135-143.
- [33] Fletcher E.H.: Random Walk Model of Ideal Granular Mass. "Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division" 1971, "Proc. of the ASCE" vol. 97, nr SM10, s. 1379-1392.
- [34] Florzkievicz A.: O dwóch koncepcjach dyskretnego, sztywno-plastycznego modelu ośrodka ziarnistego. VII Krajowa Konf. Mech. Gr. i Fund., Poznań 1984, s. 209-215.
- [35] Fłorin W.A.: Osnovy miechaniki gruntow. Moskwa 1959, Leningrad 1961, t. 1 i 2.
- [36] Garger B.I.: O dawlenii na ográždejuszczie powierchnosti s ucetom ich podatlivosti i szerochowatosti s poziciji statističeskoj teorii. Sbornik Trudov LXIX, WNIMI - Leningrad 1968, s. 145-153.
- [37] Glinko H.: Rozpeżazanie gruntu w świetle jego reologicznych własności. Praca doktorska. GIG, Katowice 1973.

- [38] Glinko H.: Przebieg procesu rozluźnienia gruntów spoistych na terenach górniczych w świetle badań wytrzymałościowych i mikrostrukturalnych. Prace Inst. Inż. Budowl. i Sanit. Pol. Lubel., S.: A, nr 10, Lublin 1984.
- [39] Gołowanczikow A.M.: K rasczietu vertikalnych naprżeń w bałastnoj przimie. Vestnik WNIIST 1965, nr 3, s. 12-15.
- [40] Gorbanow A.: Normatiwnyje i rasczietnyje charakteristiki czietwerticznych gliniastych gruntow Donbassa. Sb. Naucz. Tr.: "Stroitelstwo sooruzenij nad gornymi vyrabotkami", Nedra, Moskwa 1965, nr 6, s. 5-8.
- [41] Grabowska-Olszewska B., Sergiejew J.M.: Gruntoznawstwo. Wyd. Geologiczne, Warszawa 1977.
- [42] Grabowski Z.: Rola geotechniki w diagnostyce podtorza kolejowego. "Drogi Kolejowe" 1985, Nr 12, s. 273-274.
- [43] Grytkowski K.: Podatność rozdrobnionego ośrodka podłoża podkładów z płytą ciągią. "Drogi Kolejowe" 1986, nr 2, s. 45-47.
- [44] Grassie S.L., Gregory R.W., Harrison D., Johnson K.L.: The Dynamic Response of Railway Track to High Frequency Vertical Excitation. "Journal Mechanical Engineering Science" 1982, vol. 24, nr 2, s. 77-90.
- [45] Grassie S.L., Gregory R.W., Johnson K.L.: The Dynamic Response of Railway Track to High Frequency Longitudinal Excitation. "Journal Mechanical Engineering Science" 1982, vol. 24, nr 2, s. 97-102.
- [46] Gryczmański M.: Ogólny model współdziałania konstrukcji z podłożem gruntowym. III Wiosenna Szkoła Geomechaniki, Karpacz 1981. Pr. Nauk. Inst. Geot. Pol. Wrocław, Wrocław 1982, z. 38, s. 40-50.
- [47] Gryczmański M.: Zagadnienia analizy statycznej podtorzy. II Krajowa Konferencja "Geotechnika w budownictwie komunikacyjnym", Poznań 1980, nr 12, s. 1-12.
- [48] Gryczmański M.: Sprężysto-lepkoplastyczne modele szkieletu gruntowego. WSI Opole, S.: Studia i Monografie, z. 2, Opole 1983.
- [49] Gryczmański M., Kłosek K.: Wybrane problemy matematycznego modelowania podtorza wobec współczesnych metod i modeli obliczeniowych geomechaniki. Mat. I Semin. CPBP-02.19 nt.: "Podstawy rozwoju systemów i środków transportowych". Pol. Warsz., Warszawa 1987, s. 113-128, t. I.
- [50] Haligowski J.: Ogólne zasady prowadzenia eksploatacji pod liniami kolejowymi. Mat. Konf. - "Wybrane problemy ochrony obiektów kolejowych na terenach górniczych", Katowice 1977, s. 15-33.
- [51] Hansen B., Steenfelt J.: J. Brinch Hansen's Earth Pressure Theory Tested by Experiments in a Pin Model. Proc. 5th Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Budapest 1976, s. 447-458.
- [52] Herrmann L.R.: Three - Dimensional Elasticity Analysis of Periodically Loaded Prismatic Solids. Report Univ. of California 1968.
- [53] Horne M.R.: The Behaviour of an Assembly of Rotund, Rigid, Cohesionless Particles. Proc. Roy. Soc., ser. A-286, London 1965, ser. A-310, 1969.
- [54] Kandaurov I.I.: K teorii raspriedielenij naprżeń w zernistom gruntowom osnowanii. "Osnowanija, Fundamenty i Mechanika Gruntow", 1960, nr 4, s. 6-9.
- [55] Kandaurov I.I.: Miechanika ziernistych sred i jeje primenenie w stroitelstwie. Leningrad - Moskwa 1966.
- [56] Kantarek T.: O oddziaływaniu stycznym podłoża górniczego w zagadnieniach budownictwa. Prace Kom. Nauk. Techn. - Górnictwo, z. 1, Katowice 1965, s. 247-251.
- [57] Kawczyński A.: Określenie zmian współczynnika podłoża w warunkach oddziaływań górniczych. Praca badawcza WSI Lublin - COBiRTK Katowice, nr 3037/16, Lublin 1975.
- [58] Kawulok M.: Doświadczalna analiza współczynnika podatności podłoża. I Nauk.-Techn. Konf. "Budownictwo na terenach górniczych", Katowice - Kamień k/Rybnika 1985, s. 65-80.

- [59] Kennedy J.C., Prause R.J.: Development of Multilayer Analysis Model for Tie Ballast Track Structures. Proc. of the 57-th Transportation Research Board Annual Meeting, New York 1978.
- [60] Kerr A.D.: On the Stress Analysis of Rails and Ties. American Railway Engineering Association - Bulletin 659, Washington 1976, vol. 78, s. 19-43.
- [61] Kisiel I., Lysik B.: Zarys reologii gruntów. Działanie obciążenia statycznego na grunt. Arkady, Warszawa 1966.
- [62] Kisiel I., Dmiłtruk S., Lysik B.: Zarys reologii gruntów. Nośność i stateczność. Arkady, Warszawa 1969.
- [63] Kłosek K.: Dodatkowe osiadczenie budowli i parcie gruntu w ośrodkach poziomo odkształcanych. "Ochrona Terenów Górniczych" 1979, nr 48, s.32-36.
- [64] Kłosek K.: Wpływ górniczych deformacji na rozkład naprężeń poziomych w podspycie kolejowej w ujęciu mechaniki ośrodków dyskretnych. Konf. Nauk. - "Drogi Kolejowe", Gdańsk 1981, s. 333-339.
- [65] Kłosek K., Rosikoń A.: Wpływ poziomych odkształceń rozluźniających podłoża na proces redystrybucji kontaktowych naprężeń nozmalnych w świetle badań eksperymentalnych. Konf. Nauk. Kom. Ochr. Ter. Górn., PAN Oddz. w Katowicach pt.: "Pionowe oddziaływania między budowlą i podłożem górniczym", Katowice 1981.
- [66] Kłosek K., Graftiaux M.F.: Quelques problemes concernant la construction d'ouvrages d'art en terrain d'exploitation miniere. "Industrie Minerale - Les Techniques", Aout - Septembre, France 1982, s. 349-359.
- [67] Kłosek K.: Interaction between Shallow Tunnel Structure and Mining Subsoil Handled by Means of the Discrete Media Mechanics. International Symposium AITES - ITA: "Underground Works - Man - Environment", Warszawa 1983, s. 437-449.
- [68] Kłosek K.: Podłożę rusztu torowego w ujęciu rozwiązań mechaniki ośrodków dyskretnych. Mat. II Krajowej Konf. Nauk. "Drogi Kolejowe", Poznań - Rydzyna 1983, s. 89-96.
- [69] Kłosek K.: Dyskretyzacja modelu współdziałania rusztu torowego z jego bezpośrednim podłożem oraz podtorzem gruntowym. Mat. I Seminarium Problemu Resortowego MNSzWiT RI-18 pt. "Podstawy modelowe kształtowania i utrzymania dróg szynowych", IDiM Pol. Warsz., Warszawa 1983, s. 121-147.
- [70] Kłosek K., Rosikoń A.: Analiza wpływu deformacji terenu górniczego na nawierzchnię kolejową w warunkach oddziaływań eksploatacyjnych taboru. "Ochrona Terenów Górniczych" 1983, nr 64, s. 19-25.
- [71] Kłosek K.: Model nawierzchni i podtorza drogi kolejowej z uwzględnieniem specyfiki terenów górniczych. Mat. II Seminarium Problemu Resortowego MNSzWiT, RI-18 pt. "Podstawy modelowe kształtowania i utrzymania dróg szynowych", IDiM Pol. Warsz., Warszawa 1984, s. 188-220.
- [72] Kłosek K.: Wykorzystanie analogu gruntowego typu Taylor-Schneebelei do modelowania wpływów eksploatacji górniczej na obiekty powierzchniowe budownictwa komunikacyjnego. Prace Komisji Naukowej, Oddz. PAN - Katowice 1984, z. 9, s. 230-234.
- [73] Kłosek K., Majde A.: Wpływ deformacji górniczej na współdziałanie nawierzchni kolejowej z podtorzem w świetle pewnych pomiarów i obserwacji terenowych. Zesz. Nauk. Pol. Śl., S.: Budownictwo, z. 61, Gliwice 1985, s. 47-54.
- [74] Kłosek K., Litwinowicz L., Zimnoch S.: Deformacje kolejowych budowli ziemnych na terenach górniczych w świetle eksperymentów modelowych oraz badań polygonowych. Zesz. Nauk. Pol. Śl., S.: Budownictwo, z. 61, Gliwice 1985, s. 37-46.
- [75] Kłosek K.: Nominalny model rusztu torowego w ujęciu MES. III Krajowa Konf. Naukowa - "Drogi Kolejowe", Kraków - Muszyna 1985, s. 167-174, t. 1.

- [76] Kłosek K.: W sprawie kryteriów oceny nośności podtorza kolejowego. III Krajowa Konf. Naukowa - "Drogi Kolejowe", Kraków - Muszyna 1985, s. 175-186, t. 1.
- [77] Kłosek K.: Modyfikacja warunków współpracy drogi kolejowej z podłożem górnictwem wobec wyników badań modelowych oraz pewnych pomiarów poligonowych. Mat. III Seminarium Problemu Resortowego MNSzWiT RI-18 pt. "Podstawy modelowe kształtowania i utrzymania dróg szynowych" IDiM Pol. Warsz., Warszawa 1985, s. 183-230.
- [78] Kłosek K.: Napór gruntu na konstrukcje w warunkach górniczych ruchów terenu. Mat. I Nauk.-Techn. Konf. KILiW PAN: "Budownictwo na terenach górniczych", Katowice - Kamień k/Rybnika 1985, s. 140-154.
- [79] Kłosek K.: Redystrybucja składowych stanu naprężenia i odkształcenia w podłożu rusztu torowego na terenach górniczych. Zesz. Nauk. Pol. Śl., S.: Budownictwo, Gliwice 1985, z. 63, s. 37-47.
- [80] Kłosek K.: Hodnoceni vlivu dužni činnosti na stabilitu železničného tělesa na základě výsledku modelového a vstupních teoretických uvah. Konf.: "Vplyvy banskej činnosti na železničné stavby". Žilina 1985, s. 150-160.
- [81] Kłosek K.: Wpływ niejednorodności warstwowej podtorza na jego współpracę z nawierzchnią. Mat. IV Seminarium Problemu Resortowego MNSzWiT RI-18 pt. "Podstawy modelowe kształtowania i utrzymania dróg szynowych", IDiM Pol. Warsz., Warszawa 1986, s. 265-292.
- [82] Kłosek K., Graftiaux M.F.: Interactions des fondations des ouvrages d'art et du sol d'assise en terrain d'exploitation minière. "Industrie Minerale - Mines et Carrieres - les Techniques", France - Juin 1986, s. 283-292.
- [83] Koc W., Radomski R.: Wyznaczanie współczynnika podłoża przez pomiar odkształceń szyn. "Przegląd Kolejowy Drogowy" 1970, nr 4, s. 25-29.
- [84] Konderla H.: Wpływ wstępnego odkształcenia rozciągającego na wytrzymałość gruntów spoiстых. Komunikat nr 293 Pol. Wrocław., Wrocław 1978.
- [85] Kratzsch H.: Mining Subsidence Engineering. Springer - Verlag, Berlin - Heidelberg - New York 1983.
- [86] Król W., Król A.: Wpływ deformacji terenu górnictwa na konstrukcję budowli. [W:] "Współpraca konstrukcji budowlanych z podłożem", Wyd. PAN KILiW, Ossolineum, 1978, s. 57-124.
- [87] Kwiatek J., Glinko H., Zawora J.: Stany graniczne na terenach objętych wpływami podziemnej eksploatacji górnictwa. Prace GIG, Komunikat nr 542, Katowice 1971, s. 3-8.
- [88] Kwiatek J.: Wpływ poziomego rozluźnienia podłoża na budowle. "Ochrona Terenów Górniczych" 1976, nr 35, s. 7-13.
- [89] Kwiatek J.: Niesprężyste winklerowskie podłoża górnictwa. "Ochrona Terenów Górniczych" 1979, nr 49, s. 9-12.
- [90] Kwiatek J.: Zachowanie się podłoża budowli przy wpływach wielokrotnych eksploatacji górnictwa. "Ochrona Terenów Górniczych" 1984, nr 70, s. 3-7.
- [91] Kwiatek J.: Wybrane problemy geotechniki terenów górnictwa. Prace Komisji Górnictwa PAN Oddz. w Katowicach, Ossolineum, Wrocław 1982.
- [92] Kwiatek J.: O działaniu budowli na podłoża górnictwa. Prace GIG, Seria dodatkowa, Katowice 1969.
- [93] Kwiatek J., Pytlarz T., Rosiak S.: Aktualne problemy badawcze w zakresie ochrony obiektów kolejowych na terenach górnictwa. Mat. Konf. - "Wybrane problemy ochrony obiektów kolejowych na terenach górnictwa", Katowice 1977, s. 128-135.
- [94] Lambe T.W., Whitman R.V.: Mechanika gruntów. Arkady. Warszawa 1977.
- [95] Ledwoń J.A.: Budownictwo na terenach górnictwa. Arkady, Warszawa 1983.

- [96] Lessaer S.: Ogólna charakterystyka górniczej deformacji terenu z punktu widzenia potrzeb budownictwa. Mat. II Seminarium Nauk. Oddz. PAN w Katowicach pt.: "Wybrane zagadnienia geotechniki terenów górniczych", Katowice - Lublin 1978, s. 22-26.
- [97] Litwinowicz L.: Oddziaływanie poziomych odkształceń górniczych terenu na budowle nasypowe w ujęciu mechaniki ośrodków dyskretnych. Mat. Konf. "Budowle ziemne na terenach górniczych". PAN - Oddz. w Kat., Katowice 1977, s. 87-96.
- [98] Litwinowicz L.: Wpływ rozluźnienia nasypów znajdujących się w zasięgu oddziaływania podziemnej eksploatacji górniczej na ich stateczność. Pr. Inst. Inż. Bud. i Sanit. Pol. Lub. S.: [A], nr 7, Lublin 1982.
- [99] Mackiewicz M.: Laboratoryjne badania ciśnień bocznych w podsypce kolejowej i ich związku z podatnością sprężystą podłoża - w warunkach obciążeń statycznych. Inst. Inż. Łąd. Pol. Wrocław., Komunikat nr 10/74, Wrocław 1974.
- [100] Makowski J.: Stateczność kolejowych budowli ziemnych w świetle rozważań teoretycznych oraz analizy charakterystycznych osuwisk na PKP. Pol. Warsz., Warszawa 1975.
- [101] Makowski J.: Materiały konstrukcyjne i technologie wykonawcze górnej warstwy podtorza kolejowego. Temat Resort: MK-137-04-03, (maszynopis) IDiM Pol. Warsz., Warszawa 1980.
- [102] Makowski J.: Analysis of the Mathematical Model of the Railway Track Formation. "Rail International", March - Bruxelles 1980, s. 152-185.
- [103] Malcharek K., Rosikoń A.: Wpływ dynamicznego oddziaływania taboru kolejowego na opory podłużne podsypki. "Ochrona Terenów Górniczych" 1975, nr 33, s. 43-46.
- [104] Margotiew A.N.: Ocenka proczności bałastnego słoja i ziemianego położona po predelnomu sostojaniju. Trudy CNIIMPSS, Wyp. 415, Izd. "Transport", Moskwa 1970, s. 1-152.
- [105] Marsal R.J.: Stochastic Processes in the Grain Skeleton of Soils. Proc. 6th Int. Conf. Soil Mech. Found. Engrg., Montreal 1965, vol. 2, s. 303-307.
- [106] Matsui T., Ohara H., Ito T.: Cyclic Stress Strain History and Shear Characteristics of Clay. "Journal of the Geotechnical Engineering Division" 1980, Proc. of the ASCE, vol. 106, nr GT10.
- [107] Matsuoka H.: A Microscopic Study on Shear Mechanism of Granular Materials. "Soil and Foundations" 1974, vol. 14, nr 1, s. 29-40.
- [108] Mazur S.: Wybrane zagadnienia nośności nawierzchni kolejowej. Prace Nauk. Inst. Inż. Łąd. Pol. Wrocław. nr 27, S.: Monografie nr 8, Wrocław 1983.
- [109] Measures for Stabilization of Railway Earth Structures. Japan Railway Technical Service, Tokio 1979.
- [110] Michałowski R., Mróz Z.: Metody teorii plastyczności w mechanicznie sztywno-plastycznych ciałach ziarnistych. Konf. Nauk. - "Geotechniczne Problemy Wielkopolski", Poznań 1978, s. 146-157.
- [111] Mindlin R.D., Deresiewicz H.: Elastic Spheres in Contact under Varying Oblique Forces. "Journal of Applied Mechanics" 1953, t. 20, s. 327-343.
- [112] Mokrosz R.: Wprowadzenie do mechaniki budowli liniowych zagłębionych w gruncie na terenach górniczych. Wyd. Kom. Ochr. Ter. Górn. PAN, Oddz. w Katowicach, Katowice 1985.
- [113] Mróz Z., Drescher A.: Podstawy teorii plastyczności ośrodków rozdzielonych. PAN, Ossolineum, Wrocław 1972.
- [114] Muller R.A.: K statisticzeskoj teorii raspriedielenija napriazhenij w zernistom gruntowom osnowanii. "Osnowanija, Fundamenty i Mechanika Gruntow" 1962, nr 4, s. 4-6.

- [115] Muller R.A.: O naprężenno sostojanii ziernistoj gruntowej sriedy. Sb. Statej: "Woprosy projektirovanija i zaszczyty zdanij i sooruzenij na osnovanijach, deformirujemych gornymi vyrabotkami", Moskwa 1962, s. 149-160.
- [116] Muller R.A.: O raspriedielenii naprjazhenij w ziernistom gruntowom osnowanii. Trudy VNIMI, Sb. XLVII, Leningrad 1962, s. 100-109.
- [117] Myšlivec A.: Die grenzwerte des erdruckedruckes. Proc. 5-th Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Budapest 1976, s. 509-511.
- [118] Ničiporowič A.: Soprotiwlenie swjaznych gruntow sdwigu pri rascziete gidrotiechničeskich sooruzenij na ustojcziwost. Strojizdat, Moskwa 1948.
- [119] Norman G.M., Selig E.T.: Ballast Performance Evaluation with Box Tests. "American Railway Engineering Association Bulletin" - 962, Washington 1983, vol. 84, s. 207-239.
- [120] Novais-Ferreira H.: The Earth Pressure in Compacted Soils. Proc. VIII ECSMFE, vol. 1, Helsinki 1983, s. 279-282.
- [121] Ochrona powierzchni przed szkodami górnictwymi. "Śląsk", Katowice 1980, cz. 1.
- [122] Oda M.: A Mechanical and Statistical Model of Granular Material. "Soil and Foundations" 1974, vol. 14, nr 1, s. 13-27.
- [123] Oda M., Konishi J.: Microscopic Deformation Mechanism of Granular Material in Simple Shear. "Soil and Foundations" 1974, vol. 14, nr 4, s. 25-38.
- [124] Payne P.G.: Selby Coalfield Diversion of East Coast Main Line. J. Rept. Proc. Perman. Way Inst., London 1982, vol. 100, nr 3, s. 197-211.
- [125] Peacock W.H., Seed H.B.: Sand Liquefaction under Cyclic Loading Simple Shear Conditions. "Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division" 1968, Proc. of the ASCE, vol. 94, nr SM3.
- [126] Podstawy teoretyczne i eksperymentalne budownictwa na terenach górniczych. Mat. Konf. Nauk. KILiW PAN, Oddz. Katowicka PAN, Katowice 1979.
- [127] Popow S.N.: Bałlastnyj słoj żeleznodorożnogo puti. Izd. "Transport", Moskwa 1965.
- [128] Proceedings III<sup>rd</sup> International Conference on Geotextiles. Vol. I - "Road and Railway Applications". Vienna - Austria 1986.
- [129] Pruška L.: Pressure at Rest of Cohesionless Materials in Laboratory Conditions. Proc. 5-th Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Budapest 1976, s. 127-142.
- [130] Radowski B.S.: Raspriedielenie naprjazhenij w modeli nieżestkoj doroznoj odieždy. Trudy Sojuz-Dor-NII, Wyp. 13, Moskwa 1966, s. 116-125.
- [131] Radowski B.S.: K sravnieniju statističeskoj tieorii raspriedielenija naprjazhenij s tieoriej uprugosti. Trudy Sojuz-Dor-NII, Wyp. 1, Moskwa 1964, s. 5-10.
- [132] Raymond G.P.: Design for Railroad Ballast and Subgrade Support. "Journal of the Geotechnical Engineering Division" 1978, Proc. of the ASCE, vol. 104, nr GT1, s. 45-60.
- [133] Raymond G.P.: Soil - Structural Interaction and Concrete tie Design. "Journal of the Geotechnical Engineering Division" 1978, Proc. of the ASCE vol. 104, nr GT2, February, s. 249-265.
- [134] Rekomendacji po rasczėtu zdanij i sooruzenij na gorizontálne wozdiejstwija podrabotok. Kijew 1973.
- [135] Rodak A.: Niektóre aspekty związane z eksploatacją nawierzchni kolejowej w specyficznych warunkach Okręgu Śląskiego. Zesz. Nauk. Pol. Sl. S.: Budownictwo, z. 63, Gliwice 1985, s. 31-35.
- [136] Romenski O.: Issledowanie wzaimodiejstwija grunta s powierzchnostju sooruzenij, podrabatywajemych połogopadajuszczimi ugołnymi piastami. Charkow 1970.



- [137] Rosikoń A., Malcharek K.: Wpływ eksploatacji górniczej na tor kolejowy w świetle prac badawczych na poligonach doświadczalnych. "Ochrona Terenów Górniczych" 1972, nr 20, s. 29-42.
- [138] Rosikoń A.: Budownictwo komunikacyjne na terenach objętych szkodami górniczymi. WKiŁ, Warszawa 1979.
- [139] Rowe P.W.: The Stress - Dilatancy Relation for Static Equilibrium of an Assembly of Particles in Contact. Proc. Roy. Soc. London A269, s. 500-527.
- [140] Sauvage R., Larible G.: La modélisation par "éléments finis" des couches d'assise de la voie ferrée. "Revue Générale des Chemins de Fer" 1982, nr 101, s. 475-484.
- [141] Schmidt B.: Lateral Stress in Uniaxial Strain. Bulletin, Danish Geot. Inst., 1967, nr 23.
- [142] Sergiejew I.T.: Primienienie urawnienia wierojanostnych processow k teorii raspriedielenia napriazhenij w sypuczich gruntowych osnovaniach. "Osnowanija, Fundamienty i Miechanika Gruntow" 1969, nr 2, s. 5-7.
- [143] Siewczyński Ł.: Zagadnienia współpracy nawierzchni kolejowej z podtorzem gruntowym. Pol. Pozn., Rozprawy nr 66, Poznań 1974.
- [144] Siewczyński Ł.: Geotechniczne problemy budowy i utrzymania nawierzchni kolejowej. II Krajowa Konferencja: "Geotechnika w budownictwie komunikacyjnym" Poznań 1980, nr 9, s. 3-46.
- [145] Siewczyński Ł.: Projektowanie wzmocnienia podtorza w strefie torowiska. Prace Nauk. Inst. Inż. Łąd. Pol. Wrocł. nr 24, S.: Konferencje nr 7 pt. "Drogi szynowe - zagadnienia badawczo-konstrukcyjne i eksploatacyjne". Wrocław 1978, s. 229-239.
- [146] Skinderowicz B.: Projektowanie eksploatacji pokładów węgla pod trasami kolejowymi. "Ochrona Terenów Górniczych" 1978, z. 45, s. 42-44.
- [147] Smolczyk U.: Bodenmechanik und Grundbau. Stuttgart 1983.
- [148] Smolczyk U.: Stress Computation in Soil Media. "Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division" 1967, Proc. of the ASCE, vol. 93, nr SM2, s. 101-124.
- [149] Sobczyk K.: O stochastycznych modelach ośrodków niejednorodnych. Prace Nauk. Inst. Geot. Pol. Wrocł. nr 24, S.: Konferencje nr 9, Wrocław 1977, s. 17-28.
- [150] Spang J.: Planumsschutzschichten unter Eisenbahngleisen. "Archiv Für Eisenbahntechnik", 1965, Folge 20, s. 81-111.
- [151] Stewart H.E., Selig E.T.: Predicted and Measured Resilient Response of Track. "Journal of the Geotechnical Engineering Division", Proc. of the ASCE 1982, vol. 108, nr GT11, s. 1423-1442.
- [152] Stypułkowski B.: Zagadnienia materiałowe w projektowaniu i wykonawstwie drogowym. WKiŁ, Warszawa 1981.
- [153] Suchnicka H.: Problemy określania wytrzymałości gruntów. Prace Nauk. Inst. Geot. Pol. Wrocł., nr 3, S.: Monografie nr 9, Wrocław 1979.
- [154] Syczewski M.: Obliczanie podkładów na sprężystym podłożu. Analiza badania ich rysoodporności. Zesz. Nauk. Pol. Białost., Nauki Techniczne nr 49, Budownictwo nr 4, Białyсток 1985.
- [155] Sysak J. (red.) i inni: Drogi kolejowe. PWN, Warszawa 1986.
- [156] Sysak J.: Podstawy dróg kolejowych, PWN, Warszawa 1982.
- [157] Szachunjan G.M.: Put' i putiewoje chozjajstwo. Moskwa 1949.
- [158] Szajer R.: Drogi żelazne. PWN, Warszawa 1969.
- [159] Sztelak J.: Szkody górnicze wynikające ze zmiany układu hydrograficznego i hydrogeologicznego. Mat. Konf. Nauk.-Techn. pt. "Górnicze prognozy deformacji powierzchni w świetle potrzeb budownictwa", Kom. Ochr. Ter. Górn. PAN Oddz. w Kat., Katowice 1986, s. 35-61.

- [160] Szumierz W.: Analiza wpływu górniczych rozpełzań terenu na stateczność skarp podtorza kolejowego. Konf. Nauk. pt.: "Budowle ziemne na terenach górniczych", Kom. Ochr. Gór. PAN, Oddz. w Katowicach, Katowice 1977, s. 97-105.
- [161] Szumierz W., Bieniek M., Jamrozik E., Matuszek J., Rosiak S., Rosikoń A., Seweryn B.: Określenie stopni odporności na oddziaływania górnicze elementów składowych drogi kolejowej (podtorza, obiektów mostowych, toru kolejowego, sieci trakcyjnej, urządzeń zabezpieczenia ruchu kolejowego, budynków nastawni, hamulców torowych). Prace COBiRTK, nr 3030/16, (cz. I), 1975, WKiŁ, Warszawa 1977, z. 64, (cz. II).
- [162] Szumierz W.: Statyka budowli liniowych poddanych działaniu sił poziomym od peźzania podłoża górniczego. Prace GIG, Seria dodatkowa, Katowice 1980.
- [163] Szumierz W.: Opracowanie metod prognozowania deformacji górniczych w obiektach kolejowych. Prace COBiRTK, Nr 3098/16 część B (analityczna), Katowice 1981.
- [164] Takahashi M., Hight D.W., Vaughan P.: Effective Stress Changes Observed during Undrained Cyclic Triaxial Tests on Clay. Proc. of the Symp. on "Soils under Cyclic and Transient Loading", vol. 1, Swansea, January 1980.
- [165] Tayabji S.D., Thompson M.R.: Consideration in the Analysis of Conventional Railway Track Support System. "Transportation Engineering Journal" Proc. of the ASCE 1977, vol. 103, nr TE2, s. 279-292.
- [166] Tejtelbaum A.I.: Naprężennoje sostojanie tieła plotin iz krupnoobłamocznego materiała. Trudy Inst. - VODGEO, Wyp. 19, Gidrotechnika, Moskwa 1968, s. 39-43.
- [167] Thiel K.: Mechanika skał w inżynierii wodnej. PWN, Warszawa 1980.
- [168] Trajdos T.: Matematyka dla inżynierów. Kurs wyższy. Wyd. Naukowo-Techniczne, Warszawa 1981.
- [169] Trollope D.H., Burman B.: Physical and Numerical Experiments with Granular Wedges. "Geotechnique" - 1980, vol. 30, nr 2, s. 137-157.
- [170] Wasilkowski F.: Pełne zabezpieczenie budowli przed szkodami górniczymi. "Inżynieria i Budownictwo" 1951, nr 78 - cz. 1 i 1953, nr 3 - cz. 2.
- [171] Wasilkowski F.: Wpływ rozpełzania podłoża na fundamenty budowli posadowionych na terenach górniczych. "Inżynieria i Budownictwo" 1966, nr 7.
- [172] Wasilkowski F.: Obliczanie budynków mieszkalnych posadowionych na terenach górniczych. "Inżynieria i Budownictwo" 1969, nr 1.
- [173] Werno M. (red.): Podłoże gruntowe obciążone cyklicznie. WKiŁ, Warszawa 1985.
- [174] Weseli J.: Metoda elementów skończonych. Programy do obliczania konstrukcji inżynierskich. Mat. XXIV Konf. Nauk. KILiW PAN, część II, Krynica 1978.
- [175] Wiłun Z.: Zarys geotechniki. WKiŁ, Warszawa 1982.
- [176] Wong R.T., Chan C.K., Seed H.B.: Cyclic Loading Liquefaction of Gravely Soils. "Journal of the Geotechnical Engineering Division", Proc. of the ASCE, 1975, vol. 101, nr GT6.

## WPLYW ODKSZTAŁCEŃ PODŁOŻA GÓRNICZEGO NA WSPÓŁPRACĘ PODTORZA Z NAWIERZCHNIĄ DRÓG KOLEJOWYCH

### Streszczenie

Praca zawiera analizę problemów współdziałania układu: nawierzchnia - podtorze w warunkach wymuszonych odkształceń podłoża górniczego. Celem sformułowania analitycznego zapisu procesu redystrybucji składowych stanu naprężenia w nawierzchni i podtorzu:

- sprecyzowano ogólne warunki przegrupowania składowych stanu naprężenia i odkształcenia w podtorzu zlokalizowanym w strefie czynnych oddziaływań podziemnej eksploatacji górnicznej,
- ustalono podstawowe warunki oraz kryteria oceny zmian nośności podtorza kolejowego,
- określono zasadnicze geomechaniczne parametry mające wpływ na intensywność mobilizacji stref stanu granicznego w podtorzu oraz na charakter ich propagacji w aktywnej strefie podłoża rusztu torowego,
- przeprowadzono serię eksperymentów poligonowych i badań modelowych z wykorzystaniem ośrodków analogowych typu stos Taylor-Schneebelli, celem rozeznania istoty destrukcyjnych zjawisk związanych z wpływem podłoża górniczego na elementy składowe drogi kolejowej.

Na bazie powyższych rezultatów badań modeli fizycznych, jak i analizy fenomenologicznych modeli interakcji układu, podjęto próbę kreacji modelu obliczeniowego aktywnej strefy podłoża rusztu torowego. Uznano, iż modelem spełniającym najpełniej złożone uwarunkowania tego zagadnienia jest rozbudowana propozycja Kandaurova-Mullera, będąca dyskretnym (strukturalnym) urzeczywistnieniem koncepcji zapisu dla równań konstytutywnych ośrodków rozdrobnionych o cechach rozporowych.

Wykazano, że w ramach tego podejścia, bazującego na probabilistycznej koncepcji rozkładu oddziaływań międzyziarnowych, istnieje pełna możliwość formułowania oraz rozwiązywania wielu złożonych zagadnień geomechaniki podtorza kolejowego, w tym i podtorza zlokalizowanego na terenach górniczych.

Uzyskane wyniki badań i analiz numerycznych pozwoliły na sprecyzowanie ogólnych i szczegółowych wniosków natury praktycznej, co wiąże się z podjęciem określonych zabiegów profilaktyczno-zapobiegawczych uodparniających nawierzchnię oraz podtorze drogi kolejowej na działanie destrukcyjnych czynników pochodzenia górniczego.

## ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ГОРНОГО ОСНОВАНИЯ НА ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА И ВЕРХНЕГО СТРОЕНИЯ ПУТЕЙ

### Р е з ю м е

В разработке дается анализ вопроса взаимодействия системы: верхнее строение — полотно, в условиях вынужденных деформаций горного основания. С целью получения аналитической записи процесса перераспределения составляющих состояния напряжения в верхнем строении и полотне:

- уточнено общие условия перегруппировки составляющих состояния напряжения и деформации в полотне, расположенном в зоне активного влияния подземной эксплуатации ископаемых,
- определено основные условия и критерия оценки изменений несущей способности земляного полотна,
- определено основные, геомеханические параметры влияющие на интенсивность мобилизации зон предельного состояния в полотне, а также на характер их распространения в активной зоне основания полотна,
- проведено ряд полигонных экспериментов и модельных испытаний при использовании аналоговых сред типа штабель Тейлора—Шнебели, с целью исследования сути деструктивных явлений, связанных с влиянием горного основания на составные элементы железнодорожного пути.

На основании вышеприведенных результатов исследований физических моделей, а также анализа феноменологических моделей интеракции системы предпринято попытку образования расчетной модели активной зоны основания полотна. Признано, что моделью наиболее удовлетворяющей ряду сложных обусловленностей этого вопроса является расширенное предложение Кандаурова—Мулера, как дискретное (структурное) осуществление концепции записи для основных уравнений дробленных сред с рапорными свойствами. Доказано, что в рамках такого подхода, базирующего на вероятностной концепции распределения междузерновых влияний, существует полная возможность формулирования и решения ряда сложных вопросов геомеханики земляного полотна, в том и полотна расположенного в горнопромышленных местностях. Полученные результаты испытаний и числовых анализов позволили вывести ряд общих и подробных практических выводов, что связано с предприятием определенных попыток профилактично-предупредительного характера, которые защищают верхнее строение и полотно железнодорожного пути от деструктивных факторов горного происхождения.

EFFECT OF MINING FOUNDATION STRAINS ON A CO-OPERATION  
OF SUBGRADE WITH A TRACK STRUCTURE

S u m m a r y

- Work contains the analysis of co-operation problems of the system: track structure - foundation, under conditions of mining subsoil's deformations. In order to express an analytic record of the stress components redistribution both in the track structure and in the subgrade:
- general conditions of a rearrangement of the stress and strain component in the subgrade, situated in a zone of active reactions of an underground mining were precised,
- basic conditions and criteria of the estimation of the load capacity changes were settled,
- principal geomechanical parameters, having an influence on intensity of the mobilization of limit state zones in the subgrade and on the nature of their propagation in an active foundation zone of a track layer framework were fixed,
- a series of both site experiments and model testing was carried out with a use of the analogue media of Taylor-Schnebelli's pite type, in order to recognize an essence of destructive phenomena relevant to the mining foundation's effect on components of the railway road,

On the basis of above results of physical model testing likewise phenomenological analysis of models of system interactions, an attempt of creation of the computational model of an active zone of the track layer framework's foundation was undertaken. It was acknowledged that the model fully complying with the series of complex conditions of this problem, is an extended Kandaurov-Muller's proposal, being a discrete (structural) realization of the conception of record for constitutive equations of disintegrated media of straining features. It has been proved, that within this approach, basing itself on a probabilistic conception of intergranular reactions disintegration, a whole possibility of expressing and solving a series of compound problems of the railway subgrade's geomechanics including the subgrade, situated on mining sites exists.

Findings of tests and numerical analyses allowed to precise a sequence of both general and detailed conclusions of a practical nature, which is related to an undertaking of specified prophylactic operations inuring the track structure and the subgrade of the railway road to an acting of destructive factors of mining origin.