

Analiza wpływu zmiany parametrów deformacji górniczej na linię kolejową

Aneta Korytkowska, Joanna Bzówka

W artykule przeanalizowano wpływ zmiany górotworu i ukształtowania powierzchni terenu, będące skutkiem podziemnej eksploatacji górniczej na linię kolejową. Pokazano sposób obliczania wskaźników deformacji niecki według teorii Budryka – Knothe oraz zaproponowano schemat postępowania w przypadku wystąpienia uszkodzeń.

Artykuł recenzowany zgodnie z wytycznymi MNiSW

data zgłoszenia do redakcji: 10.01.2014

data akceptacji do druku: 01.04.2014



mgr inż.
Aneta Korytkowska,
Absolwent Politechniki
Śląskiej
e-mail: holly01@tlen.pl



Dr hab. inż.
prof. Pol. Śl.
Joanna Bzówka
Politechnika Śląska
Wydział Budownictwa
Katedra Geotechniki
i Dróg
e-mail: Joanna.Bzowka@polsl.pl

Wprowadzenie

Podziemna eksploatacja górnicza, która ma na celu wydobywanie złóż surowców mineralnych, może powodować przemieszczenia elementów górotworu, powstawanie zjawisk sejsmicznych w postaci wstrząsów górotworu oraz prowadzić do zmiany stosunków wodnych w górotworze i na powierzchni [2].

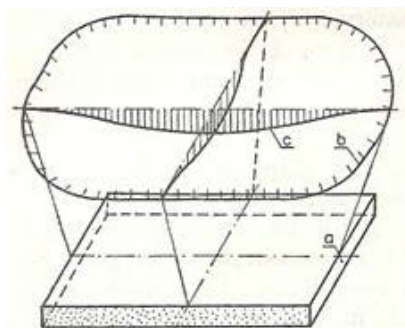
Rodzaje wpływów eksploatacji górniczej można podzielić na [3]:

- **deformacje powierzchni** – ciągłe (w postaci niecek obniżeniowych, por. Rys. 1), nieciągłe (deformacje powierzchniowe – lokalne obniżenia powierzchni, zapadliska, leje stożkowe itp.; deformacje liniowe – pęknięcia, szczeliny, progi terenne, rowy, osuwiska),
- **zmiany stosunków wodnych w górotworze i na powierzchni terenu** – zalewiska powierzchniowe, względne podniesienie poziomu wody gruntowej w stosunku do obniżonego poziomu terenu, obniżenia powierzchni terenu spowodowane odwodnieniem górotworu w obszarze tzw. leja depresyjnego, obniżenia powierzchni spowodowane zmianą poziomu wód gruntowych

w górotworze, wskutek czego następuje uaktywnienie procesów geologiczno-inżynierskich, powodujących w efekcie lokalne obniżenia powierzchni,

- **wstrząsy górnicze**, które mogą być pochodzenia tektonicznego lub eksploatacyjnego.

Zasadniczymi czynnikami decydującymi o wielkości i charakterze deformacji górotworu, a tym samym o deformacji powierzchni terenu, są [5]: głębokość eksploatacji (H), grubość eksploatowanego złoża (g) i sposób wypełnienia pustki poeksploatacyjnej (a), kształt i wielkość wybranego pola eksploatacji, litografia i stratygrafia nadległego górotworu, tektonika nadległego górotworu, nachylenie pokładu oraz szybkość frontu eksploatacji.



1. Niecka regularna wywołana wyrobiskiem poziomym pokładu [3]: a) wyrobisko, b) niecka obniżeniowa, c) linia obniżenia terenu

Prognozowanie deformacji powierzchni terenu i górotworu – założenia teorii wpływów eksploatacji Budryka– Knothe

Teorie oparte na modelu ośrodka stochastycznego opisują proces przemieszczania się gruzowiska skalnego w kierunku wybranej przestrzeni w sposób losowy. Stosowana obecnie teoria wpływów to teoria Knothe, zwana początkowo teorią Budryka–Knothe [5].

Założenia do teorii Knothe poprzedziły liczne analizy obserwowanych niecek obniżeniowych nad dużym polem eksploatacji, z których wynikało, że [5]:

- zasięg wpływów od eksploatacji złoża jest duży, ale istotne wpływy sięgają tylko do pewnej odległości od krawędzi pola,
- nad eksploatacją w odległości r od krawędzi pola niecka jest już płaska i osiąga w_{max} ,
- punkt przegięcia niecki występuje pod krawędzią pola lub wewnątrz pola,
- nad krawędzią pola występuje obniżenie równe $0,5w_{max}$,
- niecka jest symetryczna w stosunku do punktu przegięcia z pewnym przybliżeniem.

Pochodną profilu niecki można opisać odpowiednio sparametryzowaną funkcją rozkładu normalnego Gaussa:

$$\varphi(x) = \frac{h}{\sqrt{\pi}} e^{-h^2 x^2} \quad (1)$$

gdzie:

h – parametr rozkładu normalnego.

Na podstawie powyższych spostrzeżeń Knothe przyjął następujące założenia do swojej teorii [5]:

- pokład zalega poziomo lub prawie poziomo ($\alpha < 10^\circ$),
- górotwór, w którym przebiega proces deformacji jest jednorodny i nieściśliwy,
- opis dotyczy końcowego procesu przemieszczeń i deformacji,
- proporcjonalność przemieszczeń poziomych punktów do nachyleń profilu niecki $u(x) \approx T(x)$.

Knothe przyjął postać funkcji wpływów w postaci (por. Rys. 2) [5]:

$$f(x, s) = w_{max} \frac{h}{\sqrt{\pi}} e^{-h^2 (x-s)^2} \quad (2)$$

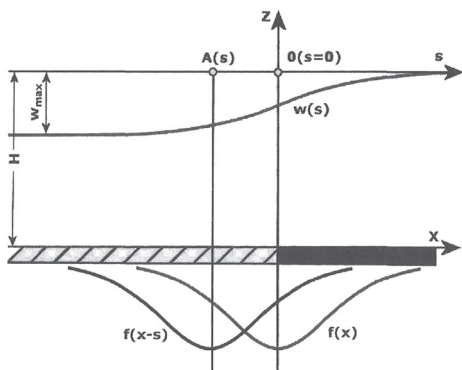
gdzie:

h – parametr rozkładu normalnego,

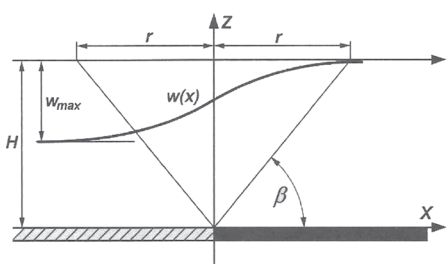
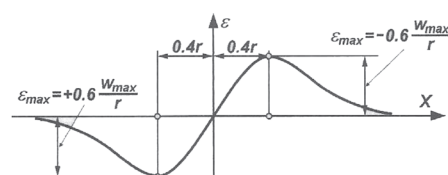
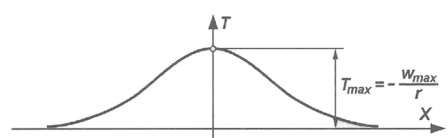
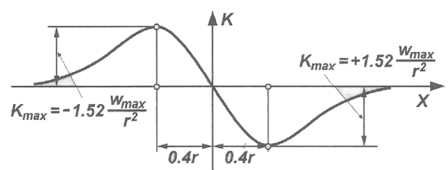
s – odległość punktu A od początku układu współrzędnych.

Jeżeli punkt A jest w początku układu, czyli s = 0, to równanie (2) ma postać:

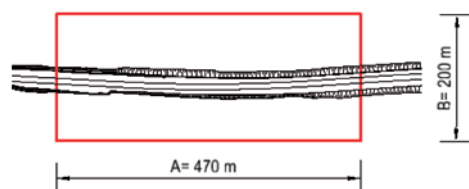
$$f(x) = w_{max} \frac{h}{\sqrt{\pi}} e^{-h^2 x^2} \quad (3)$$



2. Funkcja wpływów $f(x)$ i $f(x-s)$ Knothego i sposób uzyskiwania profilu niecki [5]



3. Przebieg wskaźników deformacji i usytuowanie wartości maksymalnych w rejonie dużego pola eksploatacji według teorii Knothego [5]:
Objaśnienie symboli: $K(x)$ – krzywizna profilu niecki; $u(x)$ – przemieszczenie poziome; $T(x)$ – nachylenie profilu niecki; $\varepsilon(x)$ – odkształcenie poziome; $w(x)$ – obniżenie; H – głębokość eksploatacji; β – kąt zasięgu wpływów głównych; r – promień zasięgu wpływów głównych



4. Pole eksploatacji nr 1 [4]

Tabela 1. Zestawienie parametrów eksploatacyjnych dla pola nr 1 [4]

Głębokość eksploatowanego pokładu	H [m]	450
Współczynnik eksploatacyjny zależny od systemu prowadzonej eksploatacji (z zawałem lub z podsadzką)	a	0.6
Kąt zasięgu wpływów głównych (β)	$\tan \beta$	2.3
Grubość eksploatowanego pokładu	g [m]	2.3
Długość pokładu	A [m]	470
Szerokość pokładu	B [m]	200

Tabela 2. Wartości pomocnicze do obliczeń deformacji [6]

Lp.	x/r	$\frac{1}{r} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{r^2 x^2}{r^2}} dx$	$e^{-\frac{r^2 x^2}{r^2}}$	$\frac{x}{r} \cdot e^{-\frac{r^2 x^2}{r^2}}$
1	2	3	4	5
1	-1.0	0.9939	0.0432	-0.0432
2	-0.9	0.9880	0.0785	-0.0707
3	-0.8	0.9775	0.1339	-0.1071
4	-0.7	0.9603	0.2145	-0.1502
5	-0.6	0.9336	0.3227	-0.1936
6	-0.5	0.8949	0.4559	-0.2280
7	-0.4	0.8420	0.6049	-0.2420
8	-0.3	0.7739	0.7537	-0.2261
9	-0.2	0.6920	0.8819	-0.1764
10	-0.1	0.5990	0.9691	-0.0969
11	0.0	0.5000	1.0000	0.0000
12	0.1	0.4010	0.9691	0.0969
13	0.2	0.3080	0.8819	0.1764
14	0.3	0.2261	0.7537	0.2261
15	0.4	0.1580	0.6049	0.2420
16	0.5	0.1051	0.4559	0.2280
17	0.6	0.0664	0.3227	0.1936
18	0.7	0.0397	0.2145	0.1502
19	0.8	0.0225	0.1339	0.1071
20	0.9	0.0120	0.0785	0.0707
21	1.0	0.0061	0.0432	0.0432

W przypadku prowadzenia eksploatacji pod obiektami o wielkości uszkodzeń decydują przede wszystkim maksymalne wartości deformacji, na które obiekty są narażone. Rysunek 3 przedstawia przebieg wskaźników deformacji i usytuowanie wartości maksymalnych w rejonie dużego pola eksploatacji według teorii Knothego [5].

Analiza wpływów eksploatacji górniczej na linię kolejową

W celu określenia wpływów eksploatacji górniczej wg teorii Budryka – Knothego dla wybranego pola eksploatacji nr 1, przyjęto parametry eksploatacyjne, które przedstawiono w tab. 1 (por. Rys. 4).

Do przeprowadzenia analizy dokonano pewnych założeń dotyczących parametrów techniczno–eksploatacyjnych linii kolejowej [4]:

- linia magistralna jest dwutorowa, zelektryfikowana,
- prędkość maksymalna pociągów pasażerskich z taborem klasycznym: $V_{\max} = 160$ km/h,
- prędkość maksymalna pociągów towarowych: $V_t = 120$ km/h,
- prędkość minimalna pociągów towarowych: $V_t = 80$ km/h,
- dopuszczalny nacisk na oś: 221 kN.

Korzystając ze wzorów teorii Budryka–Knothego oraz założonych parametrów eksploatacyjnych obliczono podstawowe parametry deformacji:

Maksymalne obniżenie powierzchni:

$$w_{\max} = a \cdot g = 0,6 \cdot 2,3 [m]$$

$$w_{\max} = 1,38 m$$

Promień zasięgu wpływów:

$$r = \frac{H}{\tan \beta} = \frac{450}{2,3} \left[\frac{m}{1} \right]$$

$$r = 196 \text{ m}$$

Nachylenie profilu niecki:

$$T_{\max} = -\frac{w_{\max}}{r} = \frac{1380}{196} \left[\frac{mm}{m} \right]$$

$$T_{\max} = 7.05 \text{ mm/m}$$

Odkształcenie poziome:

$$\varepsilon_{\max} = \pm 0,6 \frac{w_{\max}}{r} = 0,6 \cdot \frac{1380}{196} \left[\frac{mm}{m} \right]$$

$$\varepsilon_{\max} = 4,23 \text{ mm/m}$$

Przesunięcie poziome

$$u_{\max} = 0,4 w_{\max} = 0,4 \cdot 138 [cm]$$

$$u_{\max} = 55,05 \text{ cm}$$

Do obliczeń deformacji w danym punkcie x skorzystano z obliczeń parametrów

$$\frac{1}{r} \cdot \int_x^{\infty} e^{-\frac{\pi x^2}{r^2}} dx, \quad e^{-\frac{\pi x^2}{r^2}}, \quad \frac{x}{r} \cdot e^{-\frac{\pi x^2}{r^2}}$$

w zależności od stosunku x/r , które ułatwiają obliczenie osiadań, nachyleń, przesunięć, krzywizn, promieni ugięcia oraz odkształceń poziomych [6] (Tab. 2).

Przykład obliczenia dla: $x/r = -1$ dla $r = 196 \text{ m} \rightarrow x = -196 \text{ m}$

Obniżenie w punkcie x :

$$w(-196) = w_{\max} \cdot \frac{1}{r} \cdot \int_x^{\infty} e^{-\frac{\pi x^2}{r^2}} dx =$$

$$= 138 \cdot 0,9939 = 137 [cm]$$

Nachylenie profilu niecki w punkcie x :

$$T(-196) = \frac{w_{\max}}{r} \cdot e^{-\frac{\pi x^2}{r^2}} =$$

$$= \frac{1380}{196} \cdot (-0,0432) = 0,30 \left[\frac{mm}{m} \right]$$

Krzywizna profilu niecki x :

$$K(-196) = \frac{w_{\max}}{r^2} \cdot \frac{2\pi}{r} \cdot \frac{x}{r} \cdot e^{-\frac{\pi x^2}{r^2}} =$$

$$= \frac{1,38 \cdot 2\pi}{(196)^2 \cdot 0,001} \cdot (-0,0432) =$$

$$= -0,0098 \left[\frac{1}{km} \right]$$

Przesunięcia poziome w punkcie x :

$$u(-196) = \frac{w_{\max}}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{\pi x^2}{r^2}} =$$

$$= \frac{138}{\sqrt{2\pi}} \cdot 0,0432 = 2,0 [cm]$$

Tabela 3. Obliczenie wskaźników deformacji w poszczególnych punktach pola eksploatacji nr 1 [4]

Lp.	x	x/r	w(x) [cm]	T(x) [mm/m]	K(x) [1/km]	u(x) [cm]	ε(x) [mm/m]
1	2	3	4	5	6	7	8
1	-196.00	-1.0	137	0.30	-0.0098	2	-0.76
2	-176.40	-0.9	136	0.55	-0.0159	4	-1.25
3	-156.80	-0.8	135	0.94	-0.0242	7	-1.89
4	-137.20	-0.7	133	1.51	-0.0339	12	-2.65
5	-117.60	-0.6	129	2.27	-0.0437	18	-3.42
6	-98.00	-0.5	123	3.21	-0.0515	25	-4.02
7	-78.40	-0.4	116	4.26	-0.0546	33	-4.27
8	-58.80	-0.3	107	5.31	-0.0510	41	-3.99
9	-39.20	-0.2	95	6.21	-0.0398	49	-3.11
10	-19.60	-0.1	83	6.82	-0.0219	53	-1.71
11	0.00	0.0	69	7.04	0.0000	55	0.00
12	19.60	0.1	55	6.82	0.0219	53	1.71
13	39.20	0.2	43	6.21	0.0398	49	3.11
14	58.80	0.3	31	5.31	0.0510	41	3.99
15	78.40	0.4	22	4.26	0.0546	33	4.27
16	98.00	0.5	15	3.21	0.0515	25	4.02
17	117.60	0.6	9	2.27	0.0437	18	3.42
18	137.20	0.7	5	1.51	0.0339	12	2.65
19	156.80	0.8	3	0.94	0.0242	7	1.89
20	176.40	0.9	2	0.55	0.0159	4	1.25
21	196.00	1.0	1	0.30	0.0098	2	0.76

Odkształcenie poziome w punkcie x :

$$\varepsilon(-196) = \frac{w_{\max}}{r} \cdot \frac{\sqrt{2\pi}}{r} \cdot \frac{x}{r} \cdot e^{-\frac{\pi x^2}{r^2}} =$$

$$= \frac{138 \cdot \sqrt{2\pi}}{196} \cdot (-0,0432) =$$

$$= -0,76 \left[\frac{mm}{m} \right]$$

Obliczenia dla pozostałych punktów od 2÷21 przeprowadzono zgodnie z obliczeniami przedstawionymi powyżej. Wyniki obliczeń zestawiono w tab. 3.

Obliczone wskaźniki deformacji przedstawiono na rysunkach 5÷9.

W celu dalszej analizy wpływu eksploatacji górniczej na linię kolejową należy przenieść wielkości obliczonych obniżień profilu niecki $w(x)$ na profil podłużny danej linii kolejowej. Kolejnym etapem będzie przeanalizowanie jak zmienia się profil danej linii kolejowej w rejonie eksploatowanego pola.

Określenie pochylenia podłużnego niwelety po obniżeniu i porównanie z największym dopuszczalnym miarodajnym pochyleniem dla danej linii kolejowej powinno być zgodne z [1]. W przypadku, gdy niweleta analizowanej linii nie będzie zgodna z obowiązującymi przepisami należy doprowadzić niweletę do parametrów wymaganych dla danej trasy.

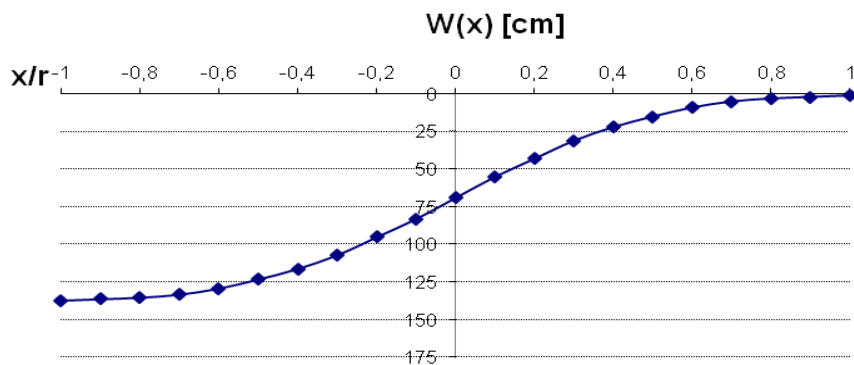
Na terenach górniczych problemem jest spełnienie warunku dotyczącego zachowania wymaganego układu wysokościowego torów i urządzeń z nimi związanych. Założenie ewentualnego podnoszenia obniżonych torów do ich pierwotnej niwelety można stosować, jednakże jest to związane z dużymi zakresami robót oraz dużymi kosztami. W większości przypadków podnoszenie niwelety do stanu pierwotnego nie jest konieczne, a roboty ograniczają się do doprowadzenia niwelety do stanu wymaganego dla danej trasy [6].

Ważnym czynnikiem, koniecznym do przeanalizowania, są warunki geologiczne – inżynierskie, bowiem decydują one o kształcie budowanego podtorza i rodzaju materiałów użytych do jego budowy.

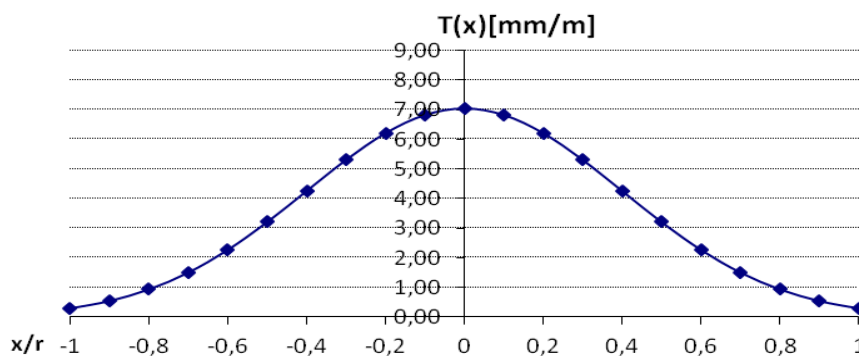
Dla podtorza szczególnie groźne są nagle pojawiające się odkształcenia nieciągłe, takie jak zapadliska, osuwiska, pęknięcia, szczeliny, progi i garby. Prawdopodobieństwo wystąpienia odkształceń nieciągłych zależy głównie od grubości nadkładu skalnego [7].

Podsumowanie

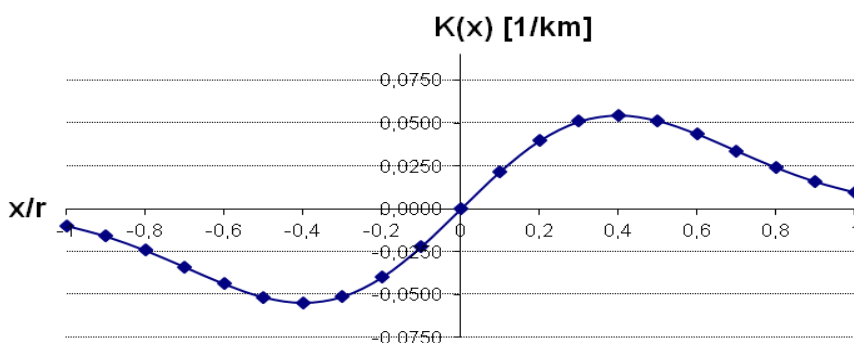
Projektowanie linii kolejowej na terenach górniczych już w początkowej fazie powinno uwzględniać opracowanie wstępnego projektu eksploatacji górniczej. Niweleta nowoprojektowanej linii kolejowej powinna być tak zaprojektowana, aby prognozowane obniżenia nie spowodowały przekroczenia ustalonych dla danej trasy parametrów



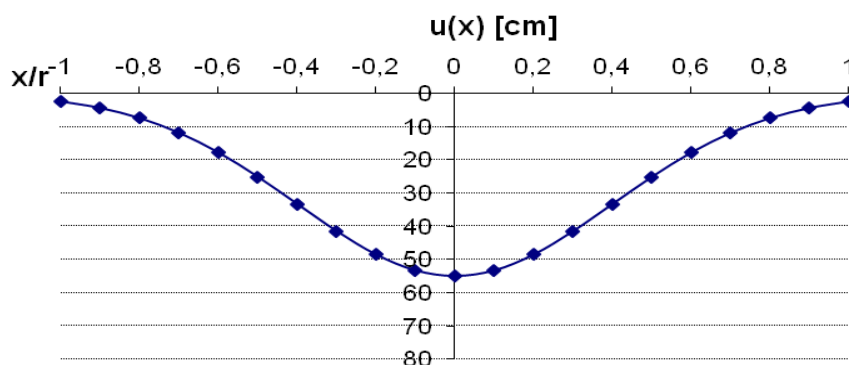
5. Obniżenie terenu $w(x)$ [cm] – pole eksploatacji nr 1[4]



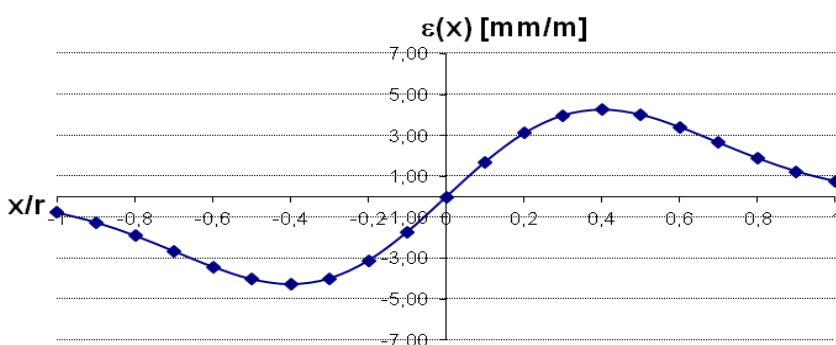
6. Nachylenie terenu $T(x)$ [mm/m] – pole eksploatacji nr 1[4]



7. Krzywizna terenu $K(x)$ [1/km] – pole eksploatacji nr 1[4]



8. Przeszczenia poziome $u(x)$ [cm] – pole eksploatacji nr 1[4]



9. Odształcenia poziome $\varepsilon(x)$ [mm/m] – pole eksploatacji nr 1[4]

eksploatacyjnych. Konieczna również jest obserwacja ruchów powierzchni torów oraz ewentualne usuwanie skutków powstałych szkód. Zastosowanie profilaktyki w początkowej fazie projektowania trasy kolejowej znacznie ograniczy koszty związane z poprawą funkcjonowania danej linii w przyszłości.

Podnoszenie niwelety do stanu pierwotnego wiąże się z dużym zakresem robót, jak również dużymi kosztami. Dlatego w miarę możliwości należy stosować niweletę obniżoną, dostosowaną do odpowiednich warunków dla danej linii.

Dostosowanie niwelety do warunków dla danej linii w większości przypadków powoduje zmianę pochyłości niwelety, co prowadzi do podniesienia niwelety i poszerzenia nasypu. Poszerzenie nasypu należy wykonywać w sposób gwarantujący właściwe połączenie części dobudowywanych z częściami istniejącymi nasypu. Konsekwencją podnoszenia niwelety są również roboty związane z przebudową ciągów odwodnieniowych, wydłużaniem przepustów, przestawianiem słupów sieci trakcyjnej, przebudową istniejących dróg w obrębie danej trasy.

W miejscach szczególnie narażonych na zjawiska osuwiskowe o złych warunkach gruntowo-wodnych, nasyp należy dodatkowo zabezpieczyć. Podłoże gruntowe można wzmocnić, np. kolumnami żwirowymi lub żwirowo-betonowymi. Zastosowanie takiego rozwiązania pozwala na wykonanie prac w stosunkowo krótkim czasie, przy zachowaniu ciągłości ruchu [4].

Materiały źródłowe

- [1] Dziennik Ustaw nr 151 poz. 987 (1998): „Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Morskiej w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać budowle kolejowe i ich usytuowanie”
- [2] Instrukcje, wytyczne, poradniki nr 364 (2007): „Wymagania techniczne dla obiektów budowlanych wznoszonych na terenach górniczych”, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa
- [3] Ledwoń J. (1983): „Budownictwo na terenach górniczych” Arkady, Warszawa
- [4] Nowakowska A. (2012): „Analiza wpływów eksploatacji górniczej na linię kolejową”, Praca magisterska, Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa, Gliwice
- [5] Popiołek E. (2009): „Ochrona terenów górniczych”, Wydawnictwo AGH, Kraków
- [6] Rosikoń A. (1979): „Budownictwo komunikacyjne na terenach objętych szkodami górniczymi”, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa
- [7] Skrzyński E. (2012): „Podtorze kolejowe”, PKP Polskie Linie Kolejowe, Warszawa