

Osiadania podtorza gruntowego

Eugeniusz SKRZYŃSKI¹

Streszczenie

Klasyczne podtorze gruntowe w postaci nasypów i przekopów stanowi sprawdzone podparcie nawierzchni na kolejach konwencjonalnych zarówno eksploatowanych z mniejszymi prędkościami pociągów, jak i na liniach dużych prędkości. W artykule opisano przyczyny osiadań podtorza gruntowego, wpływ osiadań podtorza na odkształcenia nawierzchni kolejowej, skutki wciskania się podsypki w drobnoziarniste grunty podtorza oraz najczęściej stosowane metody zapobiegania osiadaniom podtorza gruntowego. Przedstawiono zalecenia budowniczych kolei, zarówno z dawnych lat, m.in. prof. A. Wasutyńskiego, jak i współczesnych.

Słowa kluczowe: infrastruktura kolejowa, podtorze gruntowe, osiadania

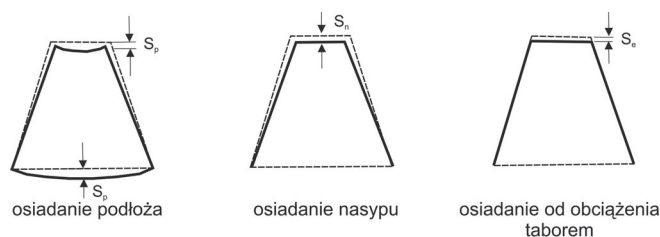
1. Wstęp

Podtorze gruntowe w postaci nasypów i przekopów jest stosowane na większości linii kolejowych na świecie. Takie podtorze, mimo że jest najtańsze, ma wiele wad, do których należy zaliczyć znaczne i nierównomierne osiadania wpływające na stan eksploatowanej nawierzchni kolejowej, którą z tego względu uznaje się za nawierzchnię podatną. Ta wada ma szczególnie duże znaczenie w początkowym okresie eksploatacji podtorza na liniach z nawierzchnią konwencjonalną oraz na liniach dużych prędkości, ponieważ podtorze gruntowe podlega pionowym odkształceniom (rys. 1), wynikającym między innymi z:

- odkształceń podłoża, w tym osiadań podłoża obciążonych nasypami, podnoszenia się podłoża w wyniku pęcznienia gruntów lub ich odciążenia w głębokich przekopach,
- osiadań nasypów z powodu niedostatecznego zagęszczenia gruntów,
- osiadań eksploatacyjnych i ugięć sprężystych powodowanych przez tabor.

Większość osiadań podtorza gruntowego ma charakter trwały. Sezonowo mogą występować zmiany położenia z powodu zmian poziomu wód gruntowych lub przemarzania gruntu, natomiast sprężyste ugięcia podtorza występują jedynie podczas obciążenia taborem. Największe osiadania podtorza gruntowego występują podczas budowy

i w początkowym okresie jego eksploatacji. Z tego względu na etapie projektowania i budowy podtorza, osiadania eksploatacyjne powodowane przez tabor kolejowy mogą być pominięte – nie dotyczy to osiadań eksploatacyjnych i ugięć sprężystych podtorza w rejonach obiektów inżynierskich na liniach dużych prędkości.



$$\text{Osiadanie łączne } S_l = S_p + S_n + S_t.$$

Rys. 1. Rodzaje osiadań [rys. autora]

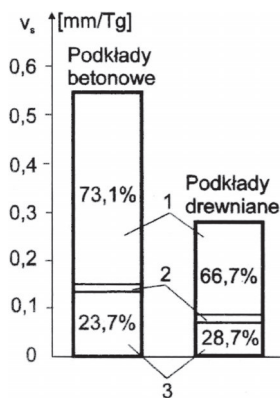
Wymagania dotyczące podtorza gruntowego zmieniały się z biegiem lat. Należy tu przypomnieć, że około 83% dróg kolejowych w Polsce wybudowano przed I wojną światową, a więc w okresie rozbiorów Polski. W poszczególnych zaborach obowiązywały różne przepisy, wszędzie jednakże zasadą było równoważenie robót ziemnych – podtorze było budowane z gruntów znajdujących się na miejscu lub w sąsiedztwie robót. Nasypy budowano z gruntów dowożonych z najbliższych przekopów wykonywanych na tej samej linii, przy użyciu wózków i pojazdów konnych i dogęszczane za

¹ Dr inż.; Instytut Kolejnictwa, Zakład Dróg Kolejowych i Przewozów; e-mail: eskrzynski@ikolej.pl.

pomocą ręcznych ubijaków, bez kontroli zagęszczenia. Najmniej korzystna sytuacja dotyczyła przekopów, gdzie w przeciwieństwie do nasypów, nie było możliwości wyboru gruntu do budowy. Nie sprzyjało to ograniczeniu osiadań budowli ziemnych. Problemy związane z odkształceniami nowo budowanego podtorza opisywał już prof. A. Wasiutyński [28].

Wymagania dotyczące stabilności położenia toru w eksploatacji na liniach z nawierzchnią konwencjonalną i niedużymi prędkościami pociągów są uzależnione od warunków eksploatacji, takich jak masy taboru, prędkości pociągów, dopuszczalne pochylenia toru i odkształcenia umożliwiające zabudowę toru bezстыkowego. Nadal jednak budowa i utrzymanie podtorza gruntowego na takich liniach jest trudne. Przykładem może być Linia Hutnicza Szerokotorowa (LHS) o długości około 395 km, przebiegająca przez tereny o niezwykle zróżnicowanych warunkach wodno-gruntowych.

Na terenach szkód górniczych, na których występują bardzo duże osiadania, wymagania dotyczące podtorza zależą również od metod utrzymania zapewniających bezpieczną eksploatację, takich jak częstość podnoszenia toru i regulacji jego położenia. Przykładowe udziały części składowych podłoża podkładów na narastanie trwałych osiadań toru na liniach kolejowych z typowym podtorzem gruntowym i konwencjonalną nawierzchnią podsypkową pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Przykładowe udziały elementów podłoża podkładów w trwałych osiadań toru oraz tempa narastania osiadań [23]: 1) podsypka, 2) ochronna warstwa filtracyjna, 3) grunty podtorza

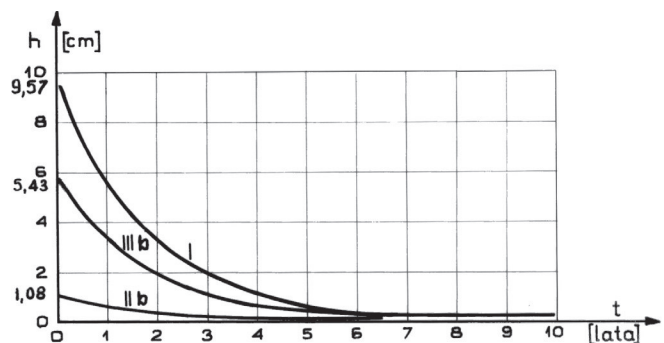
Na liniach dużych prędkości obowiązują większe niż na pozostałych liniach, wymagania dotyczące stabilności położenia toru w eksploatacji; dotyczy to zarówno osiadań, jak i ich nierównomierności, zwłaszcza w przypadku nawierzchni bezpodsypkowych, na których dopuszczalne osiadania zależą przede wszystkim od możliwości korygowania ich w późniejszej eksploatacji [23].

W artykule opisano przyczyny osiadań podtorza gruntowego, wpływ tych osiadań na odkształcenia nawierzchni kolejowej, skutki wciskania się podsypki w drobnoziarniste

grunty podtorza oraz najczęściej stosowane metody zapobiegania osiadań. Przedstawiono również zalecenia budowniczych kolei, zarówno z dawnych lat, m.in. prof. A. Wasiutyńskiego, jak i współczesnych.

2. Osiadania podłoża

Osiadania podłoża gruntowego stanowią duże wyzwanie zarówno dla projektantów, jak i pracowników zajmujących się późniejszym utrzymaniem drogi kolejowej, gdyż w praktyce ludzie mają niewielki wpływ na warunki wodno-gruntowe w danym rejonie. W przypadku dobrych oraz przeciętnych warunków wodno-gruntowych osiadania podłoża nie są zbyt duże i zanikają po kilku latach eksploatacji (rys. 3), jednakże zawsze zaleca się szczegółowe badania podłoża i w razie potrzeby dogęszczenie lub wymianę przypowierzchniowej warstwy gruntów.



Rys. 3. Prognozowane osiadania podłoża h pod nowo zbudowanymi nasypami w funkcji czasu t [20, 27]: I – nasyp nowo zbudowany o wysokości około 5,7 m z piasków i margli, na podłożu z piasków, pyłów i glin, IIb – nasyp dobudowany o wysokości około 5,5 m z żużla wielkopieczowego, na podłożu z pyłów i margli, IIIb – nasyp nowo zbudowany o wysokości około 5,9 m z piasków, na podłożu z piasków i pyłów

Budowa dróg kolejowych przez błota i torfy napotyka szczególne trudności i projekt budowy nasypu na takich podłożach zawsze musi być poprzedzony dostatecznie szczegółowym badaniem geologiczno-inżynierskim. Zasady budowy i metody obliczeń osiadań nasypów na bagnach są opisane w licznych publikacjach, m.in. w podręcznikach [28, 29]².

...Jeżeli nasyp buduje się na gruncie błotnistym, pokrytym twardą skorupką, to pod ciśnieniem nasypu może się ona rozrwać, powodując nagłe pogrążenie się nasypu na dno błota. Dla uniknięcia tego, po obydwóch stronach budującego się nasypu należy przekopać w odległości około 2 m od podstawy stoku rowy takiej głębokości, aby skorupa, przecięta na całą grubość, nie przeszkadzała swobodnemu osiadaniu nasypu. Grunty torfiaste mają tę własność, że pod ciśnieniem bardzo długo osiadają, nie ulegając się ostatecznie. Wobec tego na-

² Cytaty pisane kursywą przytoczono z zachowaniem oryginalnej pisowni.

leży wogóle unikać budowania nasypów na gruntach torfiastych, lub też całkowita warstwa torfu powinna być zdjęta na szerokość podstawy nasypu... [28].

...Badania terenów ze słabonośnymi osadami należy przeprowadzić bardzo starannie, stosując dostateczną liczbę wierceń nie tylko wzdłuż osi drogi, lecz i z obu stron, przy dolnych krawędziach podwodnej części nasypu. Zaleca się tak rozmieścić otwory wiertnicze, aby tworzyły prawidłową siatkę prostokątną dostatecznie gęstą dla ustalenia rzeźby dna bagna i dokładnej lokalizacji zalegania słabych gruntów w planie... [29].

Tereny bagniste zazwyczaj dzieli się na trzy typy [6]:

- I. Bagna, w których wycięte pionowe ściany zachowują swój kształt (zwłaszcza do głębokości 2 m). Cechą charakterystyczną jest mała ściśliwość torfów, których pod nasypami o wysokości do 3 m nie usuwa się.
- II. Bagna z gruntów miękkoplastycznych, zalegających na namulach – również mało nośnych i bardzo ściśliwych (odkształcenia plastyczne). Wycięte w nich pionowe ściany nie zachowują kształtu i wcinki zapełniają się bezpośrednio po wykonaniu. Występują trudności w usuwaniu torfu przed rozpoczęciem sypania nasypu oraz boczne wypieranie torfu spod nasypu.
- III. Bagna o gruntach organicznych, płynnych, przykrytych tylko roślinnym kożuchem (tzn. bagna pływające). Cechą charakterystyczną tego typu bagien jest duża wytrzymałość na rozerwanie pływającego kożerca.

Gdy miąższość bagna nie przekracza 4,0 m, zaleca się całkowite usunięcie bagna z podłoża nasypu. W przypadku głębszego zalegania bagna typu I lub III, stosuje się częściowe usunięcie bagna i budowę nasypu z gruntów mineralnych niespoistych (piaski, żwiry, pospółki). Wysokość H mineralnej części nasypu i grubość h pozostawionej warstwy bagna typu I lub II powinny odpowiadać wymiarom podanym w tablicy 1.

Tablica 1

Wysokość nasypów H i warstw gruntu bagiennego h [6]

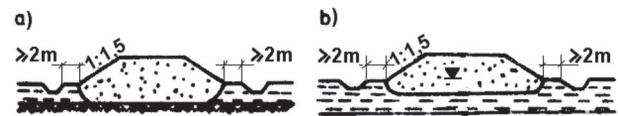
H [m]	h [m]	Uwagi
2	0,25–1,00	Mniejsze wartości h dla gruntów bagnistych o wilgotności 100%
3	1,00–2,00	
4	2,00–5,00	Większe wartości h dla gruntów bagnistych o wilgotności 100%
5	5,00–10,00	

Na bagnach typu I grunt organiczny usuwa się za pomocą koparek lub spycharek. Na bagnach typu II, wykonuje się bezpośrednio nasyp, który pod obciążeniem własnym pogrąża się w bagno. W pierwszym etapie prac wykonuje się możliwie wąski nasyp w środku projektowanej grobli i w miarę pogrążania się sypanego gruntu w bagno poszerza się go na boki. Często stosuje się przeciążenie podłoża przez nadsypanie gruntu ponad projektowaną wysokość, a po zakończeniu osiadań ścina się nasyp do profilu określonego projektem. Nadmiar gruntu zrzuca się na boczne ławy.

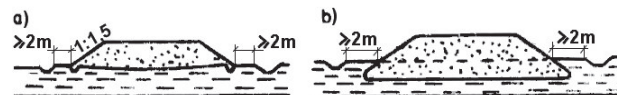
Na bagnach typu III, nasyp wykonuje się od czoła, z przeciwnym kożucha i stopniowym pogrążaniem nasypywanych gruntów, aż do oparcia się ich na mineralnym dnie.

Na bagnach typu I i II stosuje się również rozwiązania polegające na wykonywaniu podtorza z gruntów stabilizowanych w kilku jego poziomach. Istnieje możliwość uzyskania równomiernego rozkładu obciążeń na podłożu bagiennym oraz równomiernego osiadania nasypu. Możliwe jest również lepsze wykorzystanie podłoża bagnistego przez stosowanie ciągłego rusztu żelbetowego z belek prefabrykowanych (0,1 x 0,2 x 2,5 m) lub mat z tworzywa sztucznego, układanych przed rozpoczęciem sypania nasypu. Zadaniem takiego rusztu jest przejście sił rozporu i wyrównanie osiadań.

Nasypy na bagnach wykonuje się najczęściej metodą czołową, przy czym grunt układa się stopniami (warstwami poziomymi). Podwodne części nasypów wykonuje się z gruntów przepuszczalnych, zapewniających dobry przepływ wody. W każdym przypadku przy podstawie nasypu w odległości co najmniej 2 m wykonuje się rowy boczne, ułatwiające osuszanie podłoża i osiadanie nasypu (rys. 4 i 5).



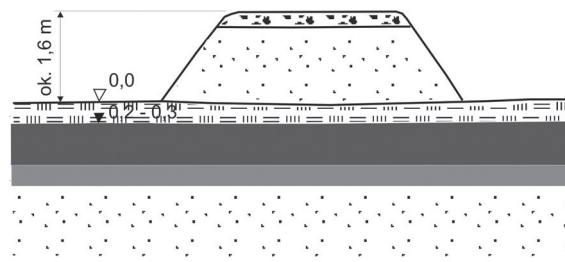
Rys. 4. Posadowienie nasypu na bagnach [13, 15]: a) na dnie mineralnym bagna, b) w bagnie, po częściowym wybraniu gruntu organicznego spod nasypu



Rys. 5. Posadowienie nasypu na torfach [13, 15]: a) bez usuwania gruntów bagiennych typu I i II, b) na podłożu bagiennym typu II, po częściowym wybraniu gruntu organicznego

Szczegółowe rozpoznanie podłoża jest konieczne, gdyż niekorzystne grunty bagiennie można napotkać w najmniej oczekiwanych miejscach, np. na wyniosłości terenu, płytko w podłożu lub bezpośrednio pod modernizowaną nawierzchnią. Potwierdza to wykolejenie w 1997 r. pociągu pospiesznego Barbakan (na stacji Reptowo), z powodu nagłej zmiany położenia zwrotnicy rozjazdu [8]. Stwierdzono wówczas, że jedną z przyczyn katastrofy mogła być lokalizacja stacji Reptowo na warstwie torfu i gytii (rys. 6). Ta lokalizacja spowodowała wzrost amplitud drgań podłoża wymuszanych przez pojazdy, zwłaszcza w zakresie niższych częstotliwości i sprzyjała propagacji drgań wzdłuż niskiego nasypu.

Jeśli przewidywane osiadania podłoża gruntowego lub koszty dostosowania podłoża do wymagań są zbyt duże, zaleca się obejścia rejonów niekorzystnych warunków wodno-gruntowych lub budowę obiektów inżynierskich, umożliwia-



Rys. 6. Przekrój poprzeczny podtorza przed stacją Reptowo [12]

0,4 m - humus, piasek, kamienie
1,2 m - piasek drobny luźny
0,3 m - humus
0,5 m - torf brunatny średnio-rozłożony
0,3 m - gytia (odmiana spropelu) popielata, miękkoplastyczna (maże się)
piasek drobny średnio zagęszczony i zagęszczony

jących przeniesienie obciążeń na znajdujące się niżej bardziej wytrzymałe warstwy gruntu podłoża. Dotyczy to zwłaszcza linii nowo budowanych oraz linii dużych prędkości.

3. Osiadania nasypów

3.1. Wpływ rodzaju gruntu i technologii robót na osiadania nasypów

W podręczniku prof. A. Wasiutyńskiego znajdują się następujące zalecenia: ...*Osiadanie nasypów kolejowych pod wpływem obciążenia trwa czasami lat kilka. W zwykłych przypadkach osiadanie nasypu nie daje się zauważyć już po 2 do 3 latach. Największemu osiadaniu podlegają nasypy gliniaste i ziemiste, najmniejszemu zaś kamieniste i piaszczyste. Wielkość osiadania w % od wysokości nasypów można przyjąć:*

- dla nasypów z kamienia 3%
- piasku 5
- czarnoziemiu 8
- gliny 9

Dla uniknięcia późniejszego dosypywania i podnoszenia toru na podsypce w celu zachowania projektowanego przekroju linii, niezbędne jest przy sypaniu nasypów dawać im nieco większą wysokość. Przy budowie dróg żelaznych zwiększa się zwykle projektowaną wysokość nasypu o 10%, co najmniej zaś o 5%, w zależności od rodzaju gruntu. Jednocześnie ze zwiększeniem wysokości nasypu należy powiększyć również (mniej więcej o 10%) szerokość nasypu w koronie, gdyż szerokość ta, jak wykazuje praktyka, zmniejsza się czasem

wskutek ulegania się gruntu w kierunku poprzecznym, jako też wskutek kruszenia się gruntu na powierzchni stoków...

W przypadku budowy nasypu bez sztucznego zagęszczania, należy się liczyć z jego znacznym osiadaniem. Proces ten przebiega wolno i po pewnym czasie, nieraz dopiero po kilku latach, następuje stabilizacja budowli, w wyniku której grunt traci spulchnienie chwilowe, wykazując jednak pewne zwiększenie swej objętości w stosunku do objętości, jaką zajmował przed wydobyciem z przekopu (spulchnienie trwałe). Spulchnienia chwilowe i trwałe gruntów miały i nadal mają duże znaczenie w technologii i organizacji wykonawstwa robót ziemnych. Nasypy należy zatem budować z odpowiednią nadwyżką wysokości i szerokości tak, aby po kompresji gruntu, zapewnić zgodność z projektowanymi przekrojami poprzecznymi. Wartości spulchnień czasowych i trwałych podano m.in. w pracach [6, 13] (tabl. 2).

W praktyce często trzeba przeliczać objętość gruntów w stanie rodzimym V_r na objętość w stanie spulchnionym V_s lub w stanie zagęszczonym V_u . W tym celu można zastosować następujące wzory [6]:

$$V_s = V_r \cdot f_s; \quad V_r = V_s \cdot f_r; \quad V_u = V_s \cdot f_z$$

ze współczynnikami według tablicy 3.

Osiadania nasypów w bardzo dużym stopniu zależą od zagęszczenia wbudowywanych gruntów, a więc między innymi od rodzaju środków transportowych stosowanych do budowy. W przypadku terenu poziomego, wartości osiadań nasypu ΔH i poszerzeń torowiska ΔK zależnie od rodzaju gruntu, wysokości nasypu i rodzaju środka transportowego, orientacyjnie przyjmuje się według rysunku 7 i tablicy 4.

Tablica 2

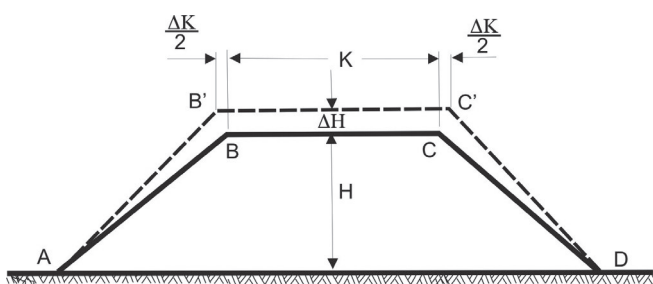
Orientacyjne wartości spulchnienia czasowego i trwałego gruntów [13]

Rodzaj gruntu	Spulchnienie [%]	
	czasowe	trwałe
Piasek suchy, ziemia uprawna	5–15	1–2
Piasek wilgotny, piasek gliniasty i pylasty, żwir niespoisty	15–25	2–3
Gлина piaszczysta, glina i ilt plastyczne, namuły rzeczne gliniaste	20–30	3–5
Gliny ciężkie i ility półtwarde, łożupki miękkie, glina zwałowa, otoczaki i rumowiska	25–35	5–7
Gruz budowlany, margle miękkie i opoka kredowa, łożupki twarde, zlepionce słabo scementowane	30–40	7–10
Łupek, opoka zwarta, wapienie miękkie, łożupki, margiel twarde, piaskowce słabe zwietrzałe	30–45	10–15
Średnie i twarde gatunki skał (wapienie i piaskowce), niezwiertzałe granity, gnejsy, bazalty itp.	45–50	15–20

Tablica 3

Średnie wartości współczynników spulchnienia i zagęszczenia gruntu [4]

Grunt		Wartości współczynników		
Rodzaj	Stan	Zagęszczenia dla stanu rodzimego f_r	Spulchnienia f_s	Zagęszczenia f_z
Piasek	Rodzimy	1,00	1,11	0,95
	Spulchniony	0,90	1,00	0,86
	Zagęszczony	1,05	1,17	1,00
Ziemia zwykła	Rodzimy	1,00	1,25	0,90
	Spulchniony	0,80	1,00	0,72
	Zagęszczony	1,11	1,39	1,00
Glina	Rodzimy	1,00	1,43	0,90
	Spulchniony	0,74	1,00	0,63
	Zagęszczony	1,11	1,59	1,00
Grunt kamienisty	Rodzimy	1,00	1,66	–
	Spulchniony	0,70	1,00	–

Rys. 7. Wartości osiadania nasypu ΔH i poszerzenia torowiska ΔK [6]

Obecnie, w celu skrócenia okresu osiadania budowli, zawsze stosuje się dodatkowe sztuczne zagęszczanie układanego gruntu. Dzięki temu uzyskuje się [11, 24]:

- zmniejszenie osiadań budowli,
- zwiększenie nośności budowli,

- zwiększenie stateczności skarp,
- zmniejszenie wodoprzepuszczalności gruntu.

Na proces zagęszczania duży wpływ mają rodzaj i wilgotność gruntu oraz metoda jego zagęszczania. Grubości układanych warstw gruntu oraz potrzebne liczby przejazdów maszyn do zagęszczania są określane w zależności od rodzaju maszyn, sposobu budowy nasypu oraz właściwości zagęszczanego gruntu. Podczas zagęszczania, każdy następny przejazd maszyny powinien przykrywać ślad poprzedniego przejazdu na szerokości 0,1–0,2 m, a prace zawsze powinny rozpoczynać się od krawędzi nasypu, co zapobiega rozsuwaniu się gruntu. Podczas tych prac szczególną uwagę należy zwrócić na stateczność i spójność konstrukcji nasypu w miejscach wjazdów i zjazdów maszyn w czasie budowy. Zależnie od wymaganego zagęszczenia,

Tablica 4

Wartości osiadań nasypów ΔH i poszerzeń torowisk ΔK [6, 12] (w procentach wysokości)

Rodzaj gruntu	Wysokość nasypu H [m]	Rodzaj środka transportowego					
		kolejka robocza		pojazdy mechaniczne		Zgarniarki	
		ΔH [%]	ΔK [%]	ΔH [%]	ΔK [%]	ΔH [%]	ΔK [%]
Piaski	do 4	4	12	3	9	1,5	4,5
	4–10	3	9	2	6	1	3
	ponad 10	2	6	1,5	4,5	0,6	1,8
Piaski gliniaste Gliny piaszczyste	do 4	10	22	8	16	2	6
	4–10	7	14	6	12	1,5	4,5
	ponad 10	4	8	4	6	1	3
Gliny i ily	do 4	14	25	12	20	3	9
	4–10	9	20	8	15	2	6
	ponad 10	7	14	5	10	1,5	4,5

przy braku szkodliwych wpływów, takich jak budowa nasypu w czasie deszczu lub ze zmarzniętych brył gruntu gliniastego, zapasy na osiadanie nasypów przyjmuje według tablicy 5.

Tablica 5

Zapas na osiadanie nasypów [6]

Charakterystyka gruntu (I_s – wskaźnik zagęszczenia gruntu)	Zapas na osiadanie (% projektowanej wysokości nasypu)
Grunty skalne i grubobryliste	3
Grunty gliniaste i piaszczyste	–
$I_s = 0,90$	1–2,5 ¹⁾
$I_s = 0,95$	0,5
Grunty gliniaste	2–3

¹⁾ Większa wartość odnosi się do krótkich terminów (do 6 miesięcy) budowy nasypu z gruntów o stopniu wilgotności zbliżonym do dopuszczalnej.

Szczególne wymagania dotyczące doboru gruntów i ich zagęszczenia oraz związanych z nimi osiadań stosuje się w przypadku podtorza na liniach dużych prędkości. Wymagania dla takiego podtorza podano między innymi w pracach [1, 15].

3.2. Osiadania nowo wybudowanych nasypów o wysokości 0,5–2,5 m

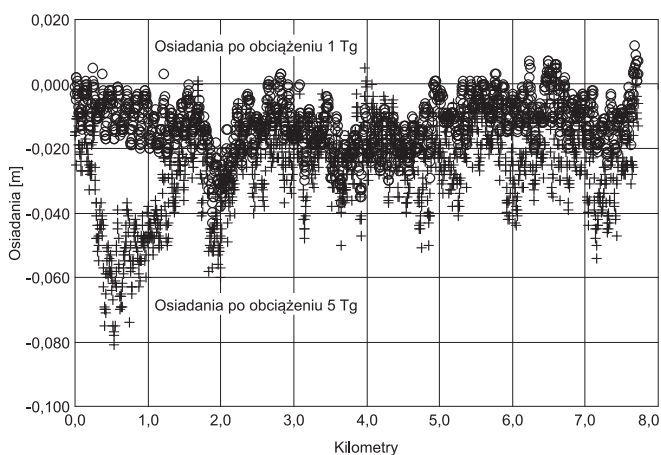
Oszacowanie wpływu parametrów podtorza na narastanie pionowych odkształceń toru w początkowym okresie jego eksploatacji umożliwiły pomiary przeprowadzone w latach 1998–1999 na torze doświadczalnym Instytutu Kolejnictwa w Żmigrodzie [9]. Podtorzem są nasypy o wysokości 0,5–2,5 m na niejednorodnym podłożu (piaski, gliny itp.). Warstwy ochronne torowiska były zbudowane z piasków oraz pospółek [18].

W analizach osiadań wykorzystano wyniki okresowych niwelacji powierzchni tocznej wewnętrznej szyny toru w punktach rozmieszczonych co 5 m po obciążeniu równym 0, 1 i 5 Tg oraz przed kolejnymi regulacjami położenia toru, wyniki pomiarów modułów odkształcenia podtorza na poziomie torowiska oraz wyniki badań właściwości gruntów podtorza [2].

Wyniki okresowych niwelacji umożliwiły obliczenie drugich różnic rzędnych toku szynowego Δh_2 w punktach rozmieszczonych w odstępach 5 m. Średnie drugie różnice³ charakteryzowały nierównomierne pionowe odkształcenia toru na poszczególnych sekcjach toru doświadczalnego o długości 300 m. Moduły odkształceń podtorza zmierzono płytą VSS o średnicy 30 cm w 68 miejscach pod podsypką pomiędzy podkładami, na głębokości od 26 do 50 cm od

spodu podkładów. Wartości modułów były obliczane według ówczesnie obowiązującej normy BN-64/8931-01 [3], tzn. bez współczynnika zmniejszającego 0,75, co powoduje ich zawyżenie o około 33% w stosunku do metody stosowanej obecnie.

Wyniki pomiarów wysokościowych toru pokazano na rysunku 8. Wynika z niego, że średnie osiadania toru na poszczególnych sekcjach toru po obciążeniu 1 Tg wyniosły 13 mm, a po obciążeniu 5 Tg wzrosły do 28 mm. Jedynie lokalnie w rejonie km 0,5 przekroczyły 80 mm. Prawdopodobną przyczyną zwiększonych odkształceń w tym kilometrze była konsolidacja plastycznych piasków gliniastych zalegających w podłożu.

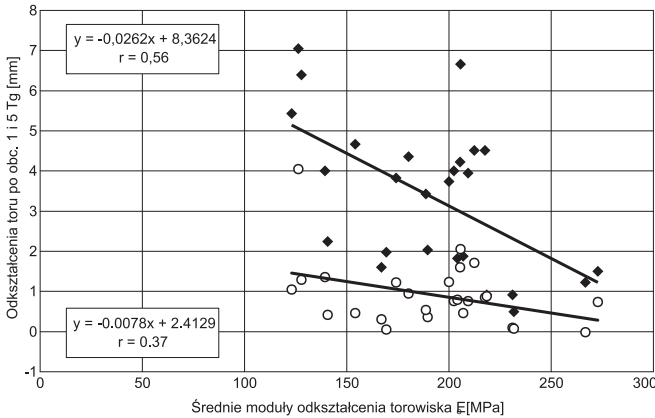


Rys. 8. Osiadania toku szynowego wewnątrz toru w punktach rozmieszczonych co 5 m po obciążeniu toru równym 1 i 5 Tg [22]

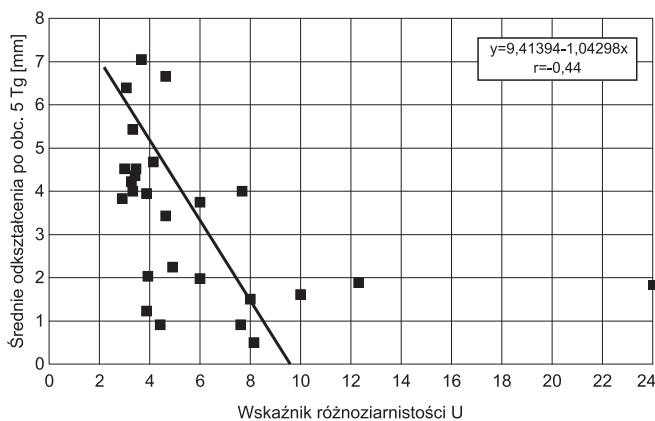
W czerwcu 1998 r., po obciążeniu toru równym 17 Tg i kolejnych regulacjach jego położenia stwierdzono, że największe osiadania wystąpiły na odcinku w km 1,0–2,6, w km 1,9–2,0 osiadania wyniosły 42 mm, natomiast w km 2,1 osiągnęły 58 mm (na tym odcinku podtorze budowano zimą). Osiadania na odcinku z warstwą ochronną torowiska z piasku nie były większe niż przeciętne i wynosiły 10–15 mm, lokalnie osiągały 25 mm, ale stan toru na tym odcinku był znacznie gorszy niż na odcinkach sąsiadujących. Wpływ sztywności torowiska na osiadania toru w poszczególnych przekrojach poprzecznych, odpowiadających miejscom pomiarów modułów odkształcenia, okazał się niewielki, gdyż współczynnik korelacji liniowej wyniósł zaledwie 0,18. Natomiast korzystny wpływ zwiększonej sztywności torowiska ujawnił się w nierównomiernych odkształceniach toru na poszczególnych sekcjach. Współczynnik korelacji liniowej r wyniósł 0,37 dla obciążenia 0–1 Tg oraz 0,56 dla obciążenia 0–5 Tg, co oznacza że około 30% nierównomiernych odkształceń toru może być wyjaśniona zmianami sztywności podtorza na długości toru (rys. 9). Stwierdzono również, że osiadania toru gwałtownie zwiększają się, gdy grunt warstwy ochronnej pod podsypką

³ Średnie drugie różnice rzędnych toku szynowego Δh_2 mogą być miarą średnich kątów załomów toku szynowego, tj. jego nierówności.

jest jednorodny, tzn. gdy wskaźnik jego różnoziarności⁴ U jest mniejszy od 5. Negatywny wpływ dużej jednorodności uziarnienia gruntu pod podsypką ujawnił się również w nierównościach toru (rys. 10).



Rys. 9. Wpływ średniej sztywności torowiska na średnie odkształcenia toru na sekcjach o długości 300 m po obciążeniu toru równym 1 i 5 Tg (moduły odkształcenia podtorza określane wg normy BN-64/8931-01) [22]



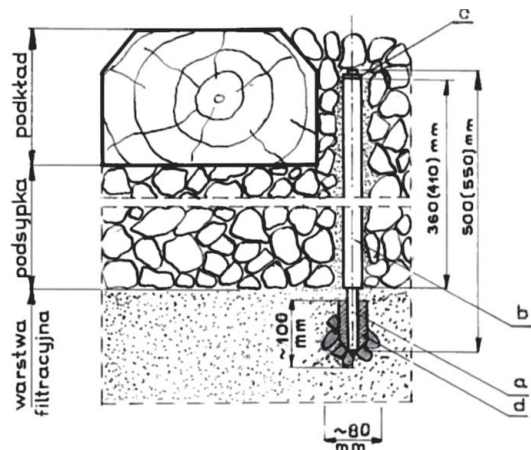
Rys. 10. Wpływ różnoziarności gruntu U na sekcjach o długości 300 m na średnie odkształcenia toru po obciążeniu toru równym 5 Tg [22]

W wyniku badań stwierdzono między innymi, że:

1. Moduły odkształcenia eksploatowanego podtorza gruntowego, nawet uznawanego za jednorodne, charakteryzują się dużą zmiennością, wynikającą zarówno z rzeczywistego zróżnicowania sztywności podtorza, jak i błędów pomiarowych.
2. Zwiększenie sztywności podtorza zmniejsza zarówno osiadania toru, jak i jego nierównomierne odkształcenia.
3. Przyczyną dużych odkształceń eksploatowanego toru może być niewłaściwe uziarnienie gruntu warstwy ochronnej torowiska – wskazuje to na celowość stosowania na warstwy ochronne gruntów niespoistych, charakteryzujących się dużą niejednorodnością uziarnienia, np. $U \geq 10$.

3.3. Osiedzenia nowo wybudowanych nasypów o wysokości 5–6 m

Badania osiadań nowo wybudowanych nasypów opisano między innymi w pracach [20, 27]. Dotyczyły one nasypów o wysokości 5–6 m zbudowanych z różnych gruntów, eksploatowanych przy prędkości pociągów 60–65 km, naciskach osi taboru 188–200 kN oraz obciążeniu toru 11,3–19,2 Tg/rok. Na odcinkach doświadczalnych była nawierzchnia konwencjonalna z podsypką tłuczniową oraz szynami typu S49 na podkładach drewnianych typu II/B. Ochronne warstwy filtracyjne torowisk były zbudowane z piasków średnich o stosunkowo małym wskaźniku różnoziarności uziarnienia U wynoszącym od 1,75 do 2,65. W analizach osiadań toru wykorzystano wyniki okresowych niwelacji powierzchni tocznych główek wewnętrznych szyn torów w punktach rozmieszczonych co 4 m. Rzędne torowisk określano przez pionowe domiary powierzchni tocznych główek szyn do reperów pokazanych na rysunku 11, zakładanych za pomocą wbijanej tzw. sondy łyżkowej.



Rys. 11. Reper do pomiarów przemieszczeń pionowych torowiska [20, 26]: a) pręt stalowy o średnicy 10 mm, b) rura osłaniająca pręt, c) pierścień gumowy osłaniający pręt od góry, d) bryła zaczynu cementowego z zatopionymi w niej drobnymi ziarnami tłuczniwa

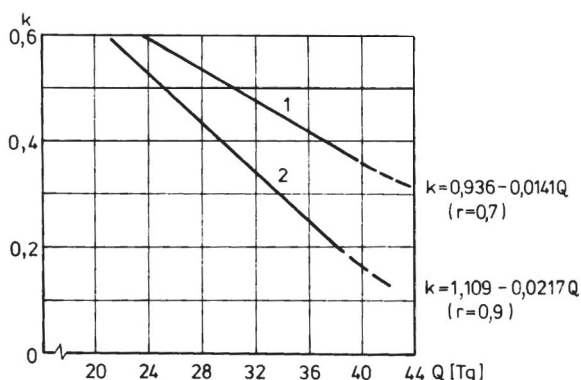
W wyniku tych badań stwierdzono, że udział osiadań podtorza w osiadaniach toru zmniejsza się stopniowo podczas eksploatacji. Po obciążeniu toru większym od około 21 Tg na tempo narastania osiadań toru, w większym stopniu niż osiadania podtorza, wpływało zmniejszanie się grubości warstwy podsypki oraz wciskanie się jej ziaren w grunt warstwy filtracyjnej. Po takich obciążeniach tempo narastania osiadań toru wynosiło średnio:

- 2,2 mm/Tg – w przypadku nasypów z ułożonych na przemian warstw margla i piasku,
- 2,0 mm/Tg – w przypadku nasypów z żużli wielkopieczowych,

⁴ Wskaźnik różnoziarności gruntu $U = d_{60} / d_{10}$ jest miarą podatności gruntu niespoistego na zagęszczanie i rozgęszczanie się pod wpływem drgań (d_x – oznacza średnicę ziaren lub cząstek gruntu, których wraz z mniejszymi jest x% masy gruntu).

- 1,6 mm/Tg – w przypadku nasypów zbudowanych z piasków,
- osiadania torowiska zaś wynosiły odpowiednio około 105, 75 i 50 mm.

Obciążenie toru równe około 21 Tg może więc stanowić jedno z kryteriów stabilizacji nasypów. Obciążeniu temu odpowiadały okresy eksploatacji równe 15–23 miesiące. Porównanie wpływu nowo zbudowanego i eksploatawanego podtorza gruntowego na osiadania toru ilustruje rysunek 12.



Rys. 12. Udział podtorza gruntowego w osiadeniach toru k w funkcji jego obciążenia Q [18, 20, 27]: 1) nasypy nowo wybudowane, 2) nasypy istniejące po dobudowie drugiego toru

Na podstawie opisanych badań sformułowano następujące wnioski:

1. Największe przyrosty nierównomiernych odkształceń nasypów o wysokości 5–6 m występują przy obciążeniu toru Q mniejszym niż:
 - 7 Tg, tj. w okresie 6 miesięcy, gdy są zbudowane z żużli wielkopieczowych,
 - 2 Tg, tj. w okresie 3 miesięcy, gdy są zbudowane z piasków.
 Po tych okresach przyrosty odkształceń torowisk maleją, statystycznie nie różnią się od przyrostów odkształceń torowisk nasypów ustabilizowanych i możliwe jest układanie torów bezстыkowych.
2. Okres „stabilizacji” nasypów zbudowanych z ułożonych na przemian warstw margla i piasku, jest dłuższy od 13–14 miesięcy (przez taki okres prowadzono badania), gdyż w nasypach tych pomimo niewielkich opadów atmosferycznych obserwowano zwiększone odkształcenia powodowane przez „lasowanie się” margla.
3. W celu uzyskania wymaganego w eksploatacji zagęszczenia warstw ochronnych torowisk, konieczne jest wykonywanie tych warstw z gruntów niespoistych o dużej niejednorodności uziarnienia.

Stwierdzono również, że:

- lokalizacja nierówności toków szynowych na długości torów w większości przypadków nie zmienia się w czasie – oznacza to, że narastanie lub zmniejszanie się nie-

równości toru odbywa się głównie z powodu zwiększania lub zmniejszania się załomów niwelety, bez zmiany jej ogólnego kształtu,

- wpływ nierównomiernych odkształceń torowiska na odkształcenia toru może być różny, zależny od wzajemnego układu odkształceń torowiska i toru, co oznacza, że przy narastaniu nierównomiernych odkształceń torowiska stan toru może się pogarszać albo polepszać.

4. Osiadania w rejonach obiektów inżynierskich

W podręczniku [6] znajdują się następujące zalecenia:

...Szczególnej uwagi wymaga budowa nasypów na podejściach do mostów. W tych miejscach często występują słabo zagęszczone, młode osady aluwialne, czasami ilaste lub torfiaste, które podlegają dużym osiadeniom. [...] Szczególną ostrożność należy zachować w przypadku gruntów torfiastych, podlegających wypieraniu spod nasypu, oraz lessowych, podlegających zapadom. Osiadanie to, zwłaszcza, gdy jest połączone z wypieraniem gruntów spod przyczółka, może wywołać jego przemieszczenie. Istnieją liczne przykłady wypierania gruntów pod przyczółkami i pod nasypami podejść mostowych łącznie z tworzeniem się osuwisk [...]. Nasypy na dojazdach do mostów, w granicach klina odłamu, należy wykonać z gruntów piaszczystych, żwiru lub pospółki. W razie braku gruntów przepuszczalnych należy stosować stabilizację gruntów, tj. zeskalanie ich za pomocą cementu lub innych dodatków. Nasypy nad przepustami należy wykonywać jednocześnie z obu stron, z jednakowych, dobrze zagęszczonych, poziomych warstw gruntu. Przed zasypaniem przepustu wykonanego w starym nasypie, z obu stron przepustu należy wyłożyć stopnie...

Problem zapewnienia jednorodności podparcia nawierzchni dla styku obiektu inżynierskiego i odkształcającej się budowli ziemnej dotyczy większości linii istniejących i modernizowanych, w mniejszym stopniu zaś linii nowo budowanych, na których zjawisku niejednorodności w dużym stopniu można zapobiec przez zastosowanie odpowiednich konstrukcji. Dotychczas nie ma wymagań dotyczących konstrukcji zapewniających płynną zmianę sztywności toru i zmniejszających skutki zwiększonych oddziaływań taboru w rejonach obiektów inżynierskich, takich jak mosty i przepusty. Pewne zalecenia dotyczące konstrukcji odcinków przejściowych podano w karcie UIC [8], przepisach [5, 17] oraz pracach [21, 24]. Według zasad podanych w warunkach technicznych [11]:

1. Odcinki przejściowe należy stosować w przypadku podtorza:
 - nowobudowanego dla prędkości większych od 120 km/h,
 - dostosowywanego (modernizowanego) do prędkości większych od 160 km/h,
 - eksploatawanego, w którym występują nadmierne efekty progowe.

2. Konstrukcje odcinków przejściowych powinny uwzględniać:
- rodzaj obiektu inżynierskiego (otwarty, zamknięty, wiszący, na palach itp.),
 - możliwości wykonawcze (m.in. możliwość wykonania robót na linii istniejącej, możliwość odpowiedniego zagęszczenia materiału przy obiekcie),
 - prędkość pociągów,
 - wysokość nasypu,
 - dopuszczalne w eksploatacji różnice osiadań obiektu i podtorza przy obiekcie,
 - odwodnienie przy obiekcie.

W pracy [21] stwierdzono, że efektów progowych przy obiekcie inżynierskim nie będzie, gdy w eksploatacji będą spełnione następujące warunki:

- 1) sprężystość toru na obiekcie będzie taka sama jak poza nim,
- 2) podtorze gruntowe przy obiekcie nie będzie ulegało trwałym odkształceniom,
- 3) obiekt podczas przejazdów pociągów nie będzie ulegał ugięciom i drganiom powodującym zwiększenie dynamicznych oddziaływań taboru na tor poza obiektem.

Pewien pogląd na możliwości spełnienia pierwszego warunku daje porównanie ugięć toru na różnych podłożach, bez uwzględniania ugięć samych obiektów. Wynika z niego, że:

- w przypadku podtorza gruntowego o przeciętnej jakości, ugięcia toru na podkładach betonowych są prawie takie same jak toru na obiekcie na mostownicach drewnianych,
- dla podtorza dobrego (zmodernizowanego) dużą zgodność ugięć można uzyskać w przypadku toru na podkładach betonowych i toru na obiekcie na podsypce (większą zgodność można uzyskać po ułożeniu pod podsypką na obiekcie odpowiedniej maty tłumiąco-amortyzującej).

Możliwości spełnienia drugiego i trzeciego warunku są ograniczone, gdyż podtorze gruntowe zawsze ulega pewnym odkształceniom podczas eksploatacji, a przęsła długich obiektów uginają się. Odkształcenia podtorza mogą również występować na skutek przemieszczeń i drgań podpór obiektów lub deformacji obiektów ramowych. W praktyce, na liniach eksploatowanych i modernizowanych do mniejszych

prędkości, ze względu na ograniczone możliwości zmiany konstrukcji podtorza, najczęściej stosuje się dodatkowo usztywnienia nawierzchni, wzmocnienia górnych części podtorza w postaci warstw gruntów stabilizowanych i płyt betonowych, rzadziej zaś całego podtorza [21]. Dodatkowe usztywnienia nawierzchni mogą polegać na:

- wydłużeniu odbojnic poza obiekt,
- ułożeniu dodatkowych szyn usztywniających przy obiekcie,
- zastosowaniu wydłużonych podkładów przy obiekcie.

Wzmocnienie górnych warstw podtorza może polegać na zabudowie:

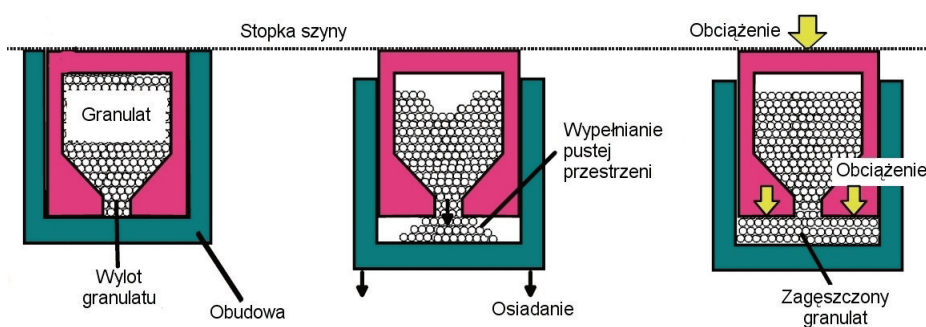
- jedno- lub wielowarstwowego pokrycia ochronnego torowiska,
- płyt przejściowych umożliwiających zmniejszenie nacisków na grunty podtorza,
- kolumn kamiennych (otwory o średnicy około 0,3 m i głębokości około 2,0 m, wypełnione dobrze zagęszczonym kruszywem, wzmacniają słabe grunty podtorza i polepszają jego odwodnienie).

W praktyce, do tej pory nie ma prostych i tanich konstrukcji zapobiegających występowaniu efektów progowych na liniach mniejszych prędkości. Interesującym, sprawdzanym obecnie, rozwiązaniem jest urządzenie kompensujące osiadania AICS-SS, którego schemat pokazano na rysunku 13. Wiele takich urządzeń mocuje się do szyn pomiędzy podkładami za pomocą silnych magnesów na odcinku podkładów „zawieszonych” przy obiekcie inżynierskim. Dotychczas w badaniach poligonowych stwierdzono, że takie urządzenia:

- 1) zapewniają niezmienną sztywność toru nawet po silnym zawilgoceniu gruntów podtorza,
- 2) ograniczają ugięcia szyn do 2–3 mm, nawet przy naciskach osi taboru równych 205 kN.

W przypadku linii kolejowych dużych prędkości stosuje się odcinki przejściowe:

- podtorze gruntowe – most, tunel lub koryto betonowe,
- podtorze gruntowe – przepust,
- nawierzchnia podsypkowa – nawierzchnia bezpodsypkowa.



Rys. 13. Zasada działania urządzenia AICS-SS kompensującego osiadania; na podstawie [16]

Standardowymi konstrukcjami odcinków przejściowych na takich liniach są przejścia w postaci klinów z odpowiednich gruntów [8]. Najczęściej zaleca się, aby odcinek przejściowy składał się z dwóch stref: sztywniejszej przy obiekcie, zbudowanej z kruszywa lub gruntu stabilizowanego cementem oraz mniej sztywnej zbudowanej z gruntu dobrej jakości. Długość odcinka przejściowego przy obiekcie inżyneryjnym powinna być czterokrotnie większa od wysokości obiektu lub wysokości nasypu, ale nie mniejsza niż 20 m [10, 21]. W przypadku przepustów zaleca się, aby warstwa gruntu nad przepustem miała grubość co najmniej 2,3 m. Stwierdzono bowiem, że przepusty betonowe o rozpiętości do 2 m zabudowane w podtorzu gruntowym na głębokości 3 m mierzonej od główki szyny praktycznie nie wpływają na osiadania toru, gdyż sztywność nasypu na całej jego długości pozostaje praktycznie niezmienna. Nie zaleca się stosowania odcinków przejściowych uniemożliwiających bądź utrudniających utrzymanie nawierzchni – takie odcinki powinny być wykonane zawsze w podtorzu tak, aby wszystkie prace utrzymaniowe, np. oczyszczanie podsypki i regulacje położenia toru, mogły być prowadzone bez utrudnień na całej długości toru. Jednak, jak już wspomniano, problem zmiennej sztywności toru w rejonach obiektów inżyneryjnych, zwłaszcza na liniach dużych prędkości, nie został dotychczas skutecznie rozwiązany.

5. Inne przyczyny osiadań nasypów

5.1. Wciskanie podsypki w grunty podtorza

Na liniach zarządzanych przez PKP PLK S.A., na których podtorze nie było modernizowane, często obserwuje się okresowe rozgęszczanie się gruntów i wciskanie się podsypki w grunty górnych warstw podtorza. Przyczyną tych zjawisk mogą być [26]:

- nieodpowiednie właściwości gruntu znajdującego się bezpośrednio pod podsypką, w tym podatność gruntu na drgania (okresowe rozgęszczanie i zagęszczanie, tiksotropia),
- okresowe zmiany objętości gruntu podtorza na skutek zmian wilgotności, temperatury lub przemarzania i odmarzania.

Z powodu tych zjawisk następują okresowe i trwałe zmiany położenia torowiska, wynikające między innymi ze zmian geometrycznego kształtu podtorza podczas rozgęszczania i zagęszczania gruntu znajdującego się bezpośrednio pod podsypką oraz oczyszczania przyzmy podsypki tłuczniowej za pomocą oczyszczarek tłuczni.

Przebieg zjawisk zależy przede wszystkim od rodzaju gruntu stykającego się z podsypką oraz obciążenia tego gruntu (m.in. od grubości warstwy podsypki). Grunty spójne, takie jak iły, gliny i pyły, nie są odporne na wodę, przemarzanie i drgania. W rezultacie, po zawilgoceniu następuje ich wypieranie i lawinowe narastanie nierówności toru w płaszczyźnie poziomej i pionowej. Tworzą się wychłapki,

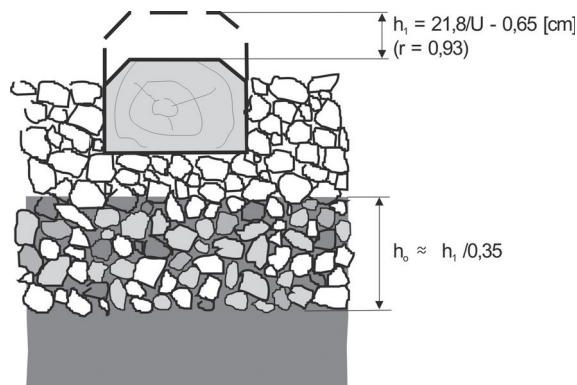
później zaś niecki i worki podsypkowe. Jeśli warstwa podsypki jest cienka, może ona zostać wypchnięta w okienkach pomiędzy podkładami, natomiast powstające worki podsypkowe mogą doprowadzić do wystąpienia osuwisk skarp nasypów i zawężenia nieumocnionych ziemnych rowów bocznych. Obecnie takie sytuacje na liniach zarządzanych przez spółkę PKP PLK S.A. pojawiają się rzadko.

Grunty niespoiste drobnoziarniste, takie jak piaski pylaste, piaski drobne i średnie, ulegają głównie przemieszczeniom pionowym, co ujawnia się w zmianach położenia wysokościowego toru i uszkodzeniach podkładów, takich jak złamanie i wyrywanie wkrętów. Grunty takie łatwo rozgęszczają się pod wpływem drgań, ale osiadania toru stabilizują się, gdy grubość warstwy podsypki jest duża lub gdy nastąpiło już dostateczne zagłębienie jej ziaren w grunt podtorza. Podtorze z takich gruntów jest najczęściej uznawane za dobre, gdyż ma dostateczną nośność, rzadko występują wychłapki lub nadmierne odkształcenia toru. Niekiedy jedynym objawem jest „zatopienie” podkładów w podsypce. Torowisko jednak stopniowo zmienia kształt, a podkłady podparte w środkowych częściach łatwiej ulegają uszkodzeniom przypisywanym zazwyczaj wadom elementów nawierzchni.

Grunty niespoiste gruboziarniste, takie jak grube piaski, pospółki i niesort kamienny, są zazwyczaj odporne na wodę oraz mróz i nie rozgęszczają się pod wpływem drgań. Opory penetracji podsypki w takie grunty są duże, nie występują więc dodatkowe osiadania toru.

Wciskanie się ziaren podsypki w podtorze rozpoczyna się w strefach największych obciążeń dynamicznych, tzn. pod szynami. Ponieważ torowisko jest okresowo odciążane, w najwyższych warstwach podtorza występują również naprężenia rozciągające, powodujące rozluźnianie się gruntów. Grunty penetrują w podsypkę, co powoduje separację jej ziaren, zmniejszenie tarcia pozornego i w rezultacie zmniejszenie nośności podsypki.

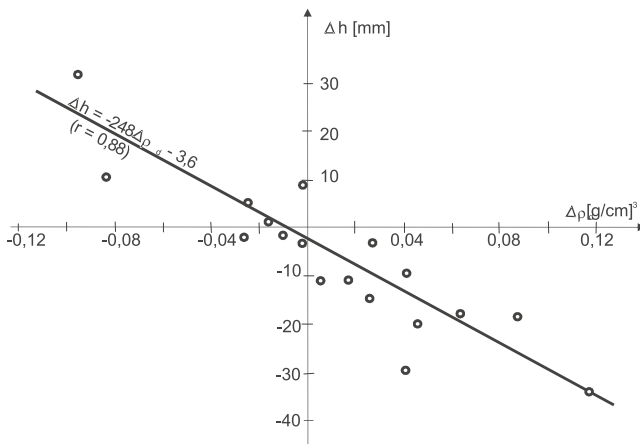
Wciskanie się podsypki tłuczniowej w drobnoziarniste grunty podtorza, takie jak piaski i drobne pospółki, na osiadanie podkładów ilustruje rysunek 14. Osiadania te mogą być duże, znacznie większe od dopuszczalnych tolerancji położenia wysokościowego toru, a grubości warstwy podsypki wymieszanej z gruntem zależą od uziarnienia gruntu i obciążeń.



Rys. 14. Wpływ wskaźnika różnoziarności gruntu podtorza U na wciskanie się podsypki tłuczniowej w podtorze [24, 26]

W badaniach przeprowadzonych na Centralnej Magistrali Kolejowej stwierdzono, że grubość warstwy podsypki wymieszanej z drobnoziarnistą pospółką nie przekracza 5 cm, a mieszanie się obu materiałów występuje tylko wtedy, gdy grubość warstwy podsypki pod podkładem jest mniejsza od 25 cm [8]. Stwierdzono również, że grunty górnych warstw podtorza o wskaźniku różnoziarnistości $U < 3,0$ nie uzyskują w eksploatacji dostatecznego zagęszczenia (z tych względów obecnie do budowy warstw ochronnych torowisk najczęściej zaleca się stosowanie gruntów o wskaźnikach różnoziarnistości U większych od 3 lub 5, a na liniach dużych prędkości większych od 6 lub 10).

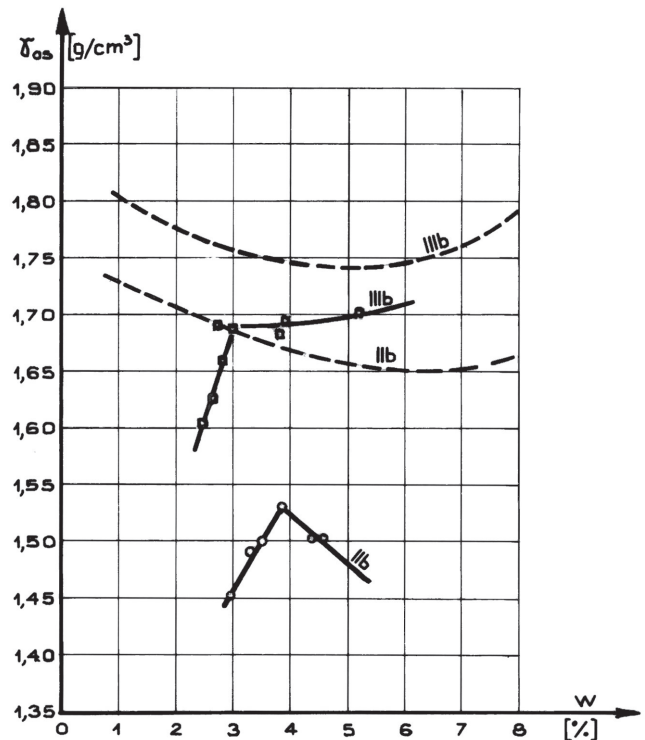
Zjawisko rozgęszczania się drobnoziarnistych niespoistych gruntów podtorza opisano między innymi w pracach [20, 27]. Stwierdzono w nich między innymi, że okresowe rozgęszczanie się niespoistych gruntów górnych warstw podtorza, takich jak piaski, może dotyczyć warstwy gruntu o grubości do 50 cm i powodować pionowe przemieszczenia torowiska sięgające nawet kilku centymetrów, a więc znacznie większe od dopuszczalnych odkształceń toru (rys. 15). W rezultacie, podczas kolejnych cykli rozgęszczania i zagęszczania gruntów górnych warstw podtorza, narastają trwałe nierównomierne odkształcenia torowiska w płaszczyźnie pionowej podłużnej. Wpływ tych odkształceń na odkształcenia toru może być różny, zależny od wzajemnego układu nierówności.



Rys. 15. Wpływ zmian gęstości objętościowej szkieletu gruntowego $\Delta\rho_d$ piasków warstw ochronnych torowiska pod wpływem drgań i zmian wilgotności na pionowe przemieszczenia torowiska Δh w eksploatacji [20, 22, 27]

Dowiedziano również, że charakter krzywych zagęszczalności równoziarnistych piasków średnich, dawniej stosowanych powszechnie do budowy warstw filtracyjnych na liniach PKP, może zależeć od sposobu ich obciążania (rys. 16). Piaski na odcinkach doświadczalnych po zmniejszeniu wilgotności do 3–4% zmniejszały masę objętościową szkieletu gruntowego, a więc rozgęszczały się, co powodowało narastanie odkształceń torowiska. Szybkość narastania odkształceń torowiska zależała od liczby cykli rozgęszczania i zagęszczania gruntu oraz stopnia rozgęszczenia

w każdym z nich. Jeśli grunt był rozgęszczony w większym stopniu, przyrost odkształceń torowiska podczas późniejszego zagęszczania gruntu był odpowiednio większy.



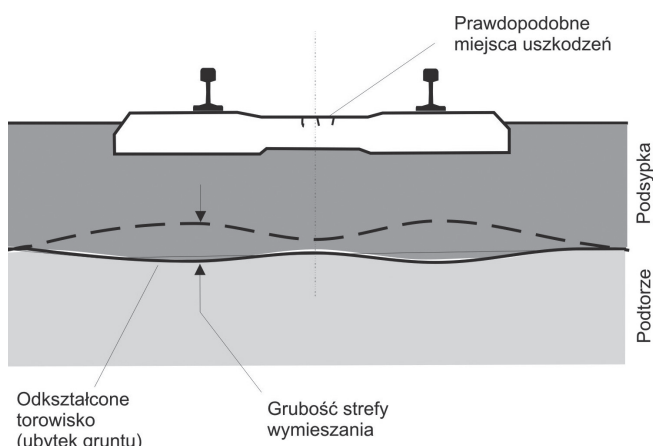
Rys. 16. Gęstości objętościowe szkieletu gruntowego γ_{os} w funkcji wilgotności w gruntach górnych warstw podtorza [20, 27]: linie ciągłe – wyniki z odcinków doświadczalnych, linie kreskowane – wyniki z laboratoryjnych badań normalną metodą Proctora, IIb – nasyp z żużla wielkopiecowego, IIIb – nasyp z piasku

Negatywne skutki wciskania się podsypki w drobnoziarniste niespoiste grunty charakteryzują wady na linii Poznań – Szczecin, na której pomimo grubej warstwy podsypki oraz prawidłowego układu geometrycznego toru, stwierdzono lawinowe narastanie uszkodzeń podkładów betonowych [5, 25]. Ponieważ te uszkodzenia zaczęły ujawniać się bezpośrednio po oczyszczeniu podsypki, wykonanym w 1990 r. podczas naprawy głównej nawierzchni, można było przyjąć, że w czasie tych prac wycięto resztki starej żwirowej warstwy ochronnej torowiska, co zapoczątkowało wciskanie się podsypki w podtorze zbudowane przeważnie z piasków pylastych oraz piasków drobnych z domieszkami humusu, żwiru, piasku gliniastego i gliny. Spowodowało to niekorzystne podparcie podkładów (rys. 17).

Wciskanie podsypki w niespoiste grunty podtorza obserwuje się jeszcze na wielu liniach zarządzanych przez spółkę PKP PLK S.A., a czynnikami decydującymi o stopniu rozgęszczenia gruntu jest jego uziarnienie, zwłaszcza stosunek zawartości ziaren o różnych wymiarach, wilgotność gruntu oraz grubość warstwy podsypki. Określenie długości linii, na których występuje zjawisko mieszania się podsypki z niespoistymi gruntami podtorza nie jest możliwe. Wiadomo jednak, że dawniej do budowy warstw ochron-

nych torowisk powszechnie stosowano piaski i pospółki. Z analizy 2663 archiwalnych przekrojów poprzecznych podtorza na różnych liniach przewidzianych do modernizacji wynika, że [25]:

- w 47% przekrojów poprzecznych znajduje się podsypka zanieczyszczona piaskiem,
- przeciętna grubość warstwy podsypki wymieszanej z piaskiem wynosi około 18 cm (oznacza to osiadanie toru równe około 6 cm).



Rys. 17. Wciskanie się podsypki w drobnoziarniste niespoiste grunty podtorza [5, 25]

Wartości te mogą być nieco zawyżone z powodu często go zaliczania do strefy wymieszania innych zanieczyszczeń podsypki, takich jak usypy z wagonów lub produkty ścierania tłuczni.

5.2. Gnicie pni drzew

W podręczniku [28] prof. A. Wasiułyński stwierdził: ... *Pod niskimi nasypami pnie drzew wyciętych należy karczować, aby uniknąć miejscowych osiadań torowiska wskutek gnicia pni...*

Obecnie umocnienie biologiczne, a zwłaszcza korzenie drzew i krzewów, są również istotnym czynnikiem wpływającym na stateczność podtorza gruntowego. Umocnienia takie są jednak trudne do utrzymania w przypadku przebudowy podtorza. Dlatego w przypadkach koniecznych, przed karczowaniem drzew na skarpach należy sprawdzić stateczność skarp i zapewnić odpowiednie zagęszczenie gruntu po karczowaniu. Najczęściej przyjmuje się, że karczowanie pni jest konieczne, jeśli ich grubość przekracza 8 cm lub gdy nasyp ma wysokość mniejszą od 2 m. Niewykarczowane pnie powinny być ścinane nie wyżej niż 10 cm nad powierzchnią terenu.

W praktyce, o sposobie usuwania drzew i krzewów podczas budowy lub modernizacji podtorza, powinno się decydować na etapie projektowania robót, ponieważ z dotychczasowych doświadczeń, np. modernizacji trasy E-30 wynika, że usuwanie drzew wraz z korzeniami na skarpach

modernizowanego podtorza, powoduje często nadmierne rozgęszczenie gruntów oraz trudne do opanowania osuwiska i wycieki wody. Z drugiej strony zaś pozostawienie pni utrudnia schodkowanie skarp i stoków przy poszerzaniu podtorza oraz powoduje dodatkowe osiadania, trwające 20 do 40 lat.

5.3. Soliflukcja

Pewien wpływ na stan długo eksploatowanych nasypów kolejowych ma soliflukcja, czyli powolne spełzanie gruntu ze skarp. Zsuwanie to następuje pod wpływem siły ciężkości na skutek ślizgania się odtającej warstwy gruntu po powierzchni przemarzniętego podłoża, a także na skutek zmian objętości gruntu powodowanych przez zmiany temperatury i wilgotności (grunt podczas przemarzania rozszerza się we wszystkich kierunkach, natomiast przy odmarzaniu osiada pionowo). Zjawisko to powoduje, że siły utrzymujące jądro nasypu zmniejszają się, co prowadzi do stopniowego rozluźnienia gruntu części środkowej nasypu i zwiększenia jego osiadań.

6. Zapobieganie osiadaniom

Osiadaniom podtorza gruntowego zapobiega się różnymi metodami. Na istniejących liniach zaleca się stosowanie umocnień opisanych między innymi w pracy [18], przepisach [11] oraz zaleceniach [8]. W przypadku podtorza nowo budowanego lub dobudowywanego zaleca się prognozować osiadania i oceniać możliwości usuwania skutków tych osiadań przez regulację położenia toru w eksploatacji. Zależnie od wyników prognoz zaleca się:

- omijanie rejonów gruntów słabonośnych,
- odczekanie do zakończenia osiadań budowli, np. po dodatkowym dociążeniu budowanego nasypu,
- zmniejszenie obciążeń eksploatacyjnych podtorza, np. poprzez zmniejszenie nacisków osi taboru,
- budowę nasypów z lżejszych materiałów,
- przeniesienie obciążeń na dolne stabilne warstwy gruntu, np. przez palowanie, budowle inżynierskie i temu podobne.

Znacznie trudniejsze, ze względu na duży wpływ zmiennych warunków geologicznych, hydrologicznych i klimatycznych, jest spełnienie wymagań dotyczących osiadań na liniach dużych prędkości. Z tego względu podtorze gruntowe na takich liniach buduje się tylko wtedy, gdy nasypy są niezbyt wysokie a podłoże dostatecznie wytrzymałe. Konstrukcja podtorza nie różni się wtedy zasadniczo od podtorza na innych liniach, jednak w celu zwiększenia jego stateczności i trwałości, stosuje się mniejsze nachylenia skarp, dba o właściwe wykonawstwo robót z wykorzystaniem specjalnie dobranej materiałów, a zwłaszcza o zagęszczenie gruntów. Ponadto, ze względu na zwiększone obciążenia dynamiczne gruntów podtorza i odmienny rozkład

naprężeń eksploatacyjnych w podłożu podkładów, większe wymagania stawia się najwyższej znajdującym się warstwowi budowli, na których spoczywa nawierzchnia.

Podstawowym wymaganiem na liniach dużych prędkości jest zagwarantowanie akceptowalnych osiadań torowiska od chwili zabudowy nawierzchni do końca przewidywanego jej użytkowania. Podczas eksploatacji nawierzchni konwencjonalnej zbyt duże osiadania lub ich nierównomierność, mogą powodować konieczność regulacji położenia toru przez zwiększenie grubości warstwy podsypki, co nie sprzyja stabilności jego położenia. Natomiast nadmierne osiadania w przypadku nawierzchni bezpodsypkowej mogą zupełnie uniemożliwić korektę położenia wysokościowego toru lub spowodować uszkodzenia podbudowy płytowej. Dopuszczalne wartości osiadań torowisk na liniach dużych prędkości najczęściej przyjmuje się [1, 19]:

- 30 mm w przypadku nawierzchni konwencjonalnych,
- 15 mm w przypadku nawierzchni bezpodsypkowych (przy możliwej korekcie położenia toru do 20 mm).

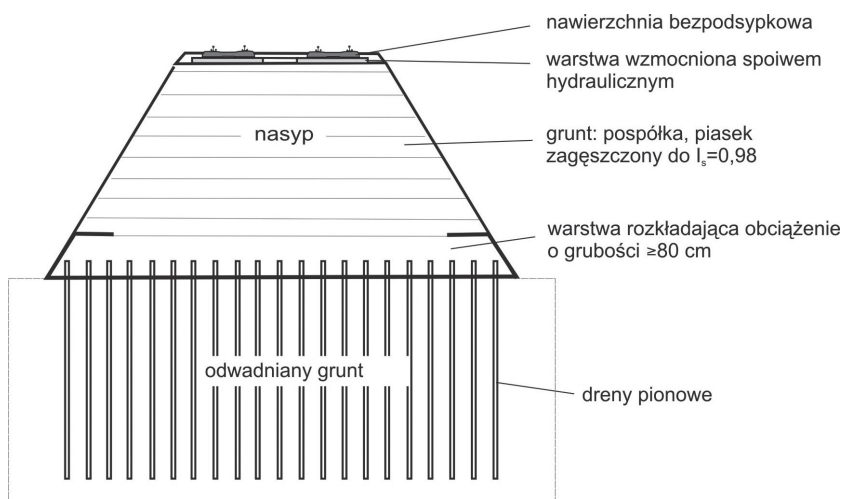
Ostre wymagania dotyczące osiadań podtorza na liniach dużych prędkości powodują między innymi konieczność:

- 1) szczegółowego rozpoznania podłoża gruntowego na trasie projektowanej linii w odstępach nie większych niż 50 m, do głębokości co najmniej 5 m zależnie od zróżnicowania gruntów, po obu stronach projektowanej trasy linii albo w trzech punktach w każdym przekroju poprzecznym (w przypadku potwierdzonej jednorodności podłoża odstępów można zwiększyć do 100 m);
- 2) ograniczenia wysokości nasypów i głębokości przekopów; różnice rzędnych torowiska i terenu nie powinny przekraczać:
 - 25–30 m – w przypadku nasypów (dla nawierzchni bezpodsypkowych w niezbyt korzystnych warunkach wodno-gruntowych, wysokości nasypów zaleca się ograniczyć nawet do 5 m, gdyż okresy stabilizacji nasypów wyższych mogą okazać się zbyt długie),
 - 30–35 m – w przypadku przekopów,

- 10–12 m – w przypadku przyczółków mostów i wiaduktów;
- 3) wymiany lub wzmocnienia gruntów słabonośnych i gruntów podlegającym osiadaniom do głębokości co najmniej 3–4 m,
 - 4) śledzenia osiadań budowanego podtorza (na przykład w przypadku nawierzchni bezpodsypkowych zaleca się śledzenie osiadań przez okres co najmniej 6 miesięcy i budowę nawierzchni dopiero po stwierdzeniu osiągnięcia 90% prognozowanych osiadań).

Jeśli podłoże gruntowe nie jest dostatecznie wytrzymałe, stosuje się różne wzmocnienia lub zastępuje się podtorze gruntowe obiektami inżynierskimi, takimi jak wiadukty i tunele. Obiekty te są droższe, ale nie mają większości negatywnych cech podtorza gruntowego, gdyż obciążenia eksploatacyjne są przenoszone na głębiej położone, stabilne warstwy podłoża. Podparcie nawierzchni jest wtedy sztywniejsze niż w przypadku budowli ziemnej, co powoduje większy hałas i szybsze zużywanie się elementów nawierzchni w eksploatacji. Konieczne jest wówczas stosowanie elementów amortyzujących i częstsze szlifowanie szyn. Przykładowo w pracy [10] stwierdza się, że jeśli wymagania dotyczące osiadań podtorza dla nawierzchni bezpodsypkowej nie mogą być spełnione, to należy rozważyć budowę nawierzchni konwencjonalnej albo zastosować odpowiednie wzmocnienie podtorza lub podłoża, np.:

- wzmocnienie gruntu – metoda zalecana w przypadku niewielkiej miąższości warstwy słabego gruntu,
- wymiana gruntu – metoda zalecana w przypadku miąższości warstwy słabego gruntu do 4 m,
- drenaż pionowy wraz ewentualnym dociążeniem wstępnym (rys. 18) – metoda zalecana w przypadku potrzeby konsolidacji gruntów do głębokości większych niż 10 m, przy czym przyspieszenie osiadań podłoża na gruntach słabonośnych można uzyskać przez wstępne obciążenie i zastosowanie pionowych drenów o typowym rozstawie od $0,8 \times 0,8$ m do $2,0 \times 2,0$ m,



Rys. 18. Drenaż pionowy; opracowano na podstawie [10]

- wzmocnienie podtorza kolumnami z pospółki lub żwiru stabilizowanego cementem oraz popiołami lotnymi (rys. 19) – metoda ta jest zalecana w przypadku sąsiedztwa budowli wrażliwych na osiadanie,
- umieszczenie nawierzchni kolejowej na płycie żelbetowej spoczywającej na palach (rys. 20).

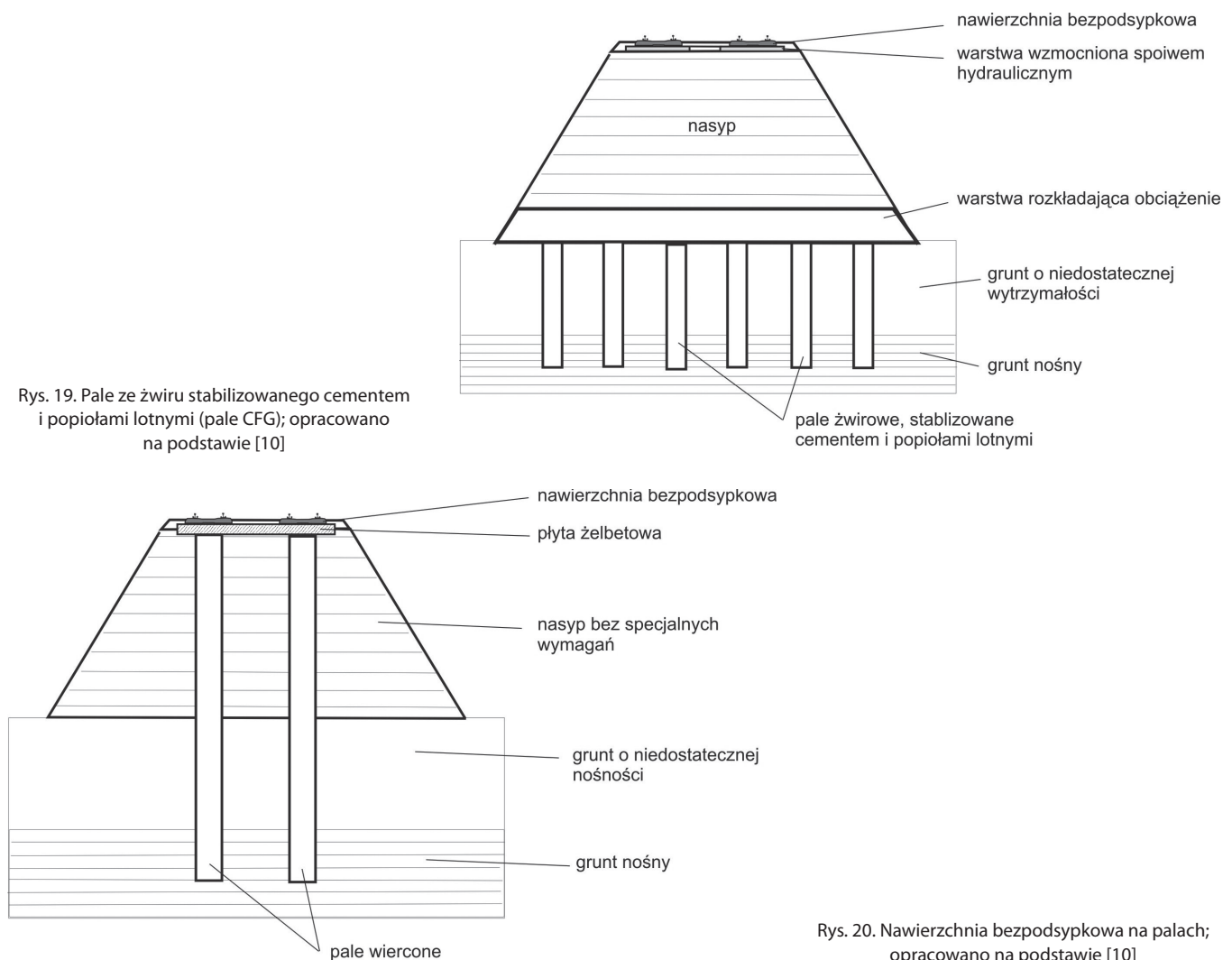
Rozwiązanie według rysunku 20 likwiduje wiele problemów związanych ze zbyt długim okresem osiadania podtorza gruntowego, gdyż nawierzchnia bezpodsytkowa jest posadowiona na palach wierconych, sięgających stabilnego podłoża. Wymagania dotyczące jakości gruntu do budowy nasypu są wtedy niewielkie, gdyż grunt jest wtedy jedynie materiałem wypełniającym. Nawierzchnia bezpodsytkowa jest jednak bardzo sztywna, porównywalna pod względem sztywności i osiadań do mostów. Konieczna jest więc budowa odpowiednich stref przejściowych.

W każdym przypadku zapobieganie nadmiernym osiadanom podtorza wymaga prawidłowego rozpoznania podłoża gruntowego, w tym określenia stopnia złożoności warunków wodno-gruntowych. Określenie budowy ośrodka

gruntowego oraz zlokalizowanie wszystkich jego nieciągłości i anomalii klasycznymi metodami geotechnicznymi nie jest możliwe ze względu na punktowy charakter tych badań. Można wówczas wykorzystać nieniszczące metody geofizyczne, na przykład metodę GPR (*Ground Penetrating Radar*).

7. Podsumowanie

Problemy związane z wykorzystaniem gruntów do budowy podtorza znane są od początków istnienia kolei. Od dawna było wiadomo, że odkształcenia podtorza w dużym stopniu zależą od warunków wodno-gruntowych podłoża, rodzajów gruntów i wysokości nasypów oraz technologii ich budowy, w tym rodzaju sprzętu używanego do transportu i zagęszczania gruntu. Później stwierdzono, że wzrost sztywności podtorza zmniejsza zarówno osiadania toru, jak i jego nierównomierne odkształcenia. Duże moduły odkształcenia podtorza nie zawsze jednak zapewniały zmniejszenie odkształceń toru, gdyż te odkształcenia narastały również



z innych powodów, takich jak osiadania podłoża lub nasypu, niszczenie podsypki, niejednorodność podłoża podkładów, niewłaściwe uziarnienie gruntu warstwy ochronnej torowiska itp. Stwierdzono również, że podtorze gruntowe, określane jako jednorodne i ustabilizowane, nie jest w pełni stabilne i charakteryzuje się dużą zmiennością. Dlatego określenie „ustabilizowane podtorze” nie jest ściśle, nawet jeśli stosuje się je do określenia podtorza eksploatowanego od dawna.

Obecnie, osiadania podtorza gruntowego zarówno te trwałe jak i sprężyste, często określają możliwości eksploatacji toru, zwłaszcza w rejonach obiektów inżynierskich na liniach dużych prędkości. Dużą rolę odgrywają niedoceniane dawniej parametry gruntów znajdujących się bezpośrednio pod podsypką, takie jak zagęszczenie i wskaźnik różnoziarnistości, wpływające na stabilność górnych warstw podtorza w eksploatacji. Na przykład, na wielu liniach kolejowych zarządzanych przez spółkę PKP PLK S.A., przyczyną dużych osiadań toru oraz uszkodzeń elementów nawierzchni nadal jest wciskanie się podsypki tłuczniowej w grunty górnych warstw podtorza. Dlatego przed wszelkimi robotami nawierzchniowymi powinno się zwracać szczególną uwagę na grunty mało spoiste oraz niespoiste, takie jak piaski pylaste, drobne i średnie, gdyż dobry stan toru może wynikać jedynie z ustabilizowania osiadania wskutek dostatecznie głębokiego wciśnięcia się ziaren podsypki w podtorze lub samoistnego wytworzenia się w eksploatacji warstwy przejściowej pomiędzy podsypką i podtorzem. Roboty nawierzchniowe, takie jak oczyszczanie podsypki, mogą naruszyć istniejącą równowagę. W przypadku stwierdzenia niekorzystnych gruntów górnych warstw powinny być rozpatrzone rozwiązania takie, jak podniesienie toru przed oczyszczarką tłuczniową w celu ochrony wytworzonej w eksploatacji warstwy przejściowej, rozplantowanie istniejącej podsypki lub zabudowa warstwy ochronnej torowiska zapewniającej spełnienie wszystkich wymagań.

Pomimo licznych wad, podtorze gruntowe nadal jest sprawdzonym podparciem nawierzchni na kolejach konwencjonalnych, zarówno na liniach eksploatowanych z mniejszymi prędkościami pociągów, jak na liniach dużych prędkości (większość zbudowanych już linii dużych prędkości ma konwencjonalną nawierzchnię na podsypce). Podczas projektowania, budowy, przebudowy oraz utrzymania podtorza gruntowego nie warto więc oszczędzać, bowiem podtorze powinno być budowlą trwałą, użytkowaną co najmniej 100 lat [8, 11].

Bibliografia

1. Analiza standardów technicznych dla kolei dużych prędkości w Polsce, opracowanie propozycji zmian w instrukcjach i legislacji krajowej. Etap III, Opracowanie leksykonu interoperacyjności oraz poprawek i uzupełnień do standardów. Tom I, Droga szynowa. Praca Instytutu Kolejnictwa nr 4522/12. Warszawa, wrzesień 2012.
2. Badania identyfikacyjno-geotechniczne podtorza i podłoża toru doświadczalnego PKP z Żmigrodzie. Instytut Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej. Raport serii SPR nr 90/95. Wrocław 1995.
3. BN-64/8931-02: Drogi samochodowe. Oznaczanie modułu odkształcenia nawierzchni podatnych i podłoża przez obciążenie płytą.
4. Buczek M.: *Koparki jednonaczyniowe. Technologia robót i eksploatacja*. Arkady. Warszawa, 1980.
5. Cejmer J., Skrzyński E.: *Określenie przyczyn pęknięcia podkładów betonowych typu INBK-7 na linii Poznań – Szczecin*. Praca CNTK nr 4094/11. Warszawa 2004.
6. Cyunel B., Kulczycki B.: *Kolejowe budowle ziemne, T. II – Technologia, organizacja budowy i modernizacji*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 1987.
7. Drogi kolejowe (Praca zbiorowa pod red. J. Sysaka). Państwowe Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1982.
8. Earthworks and track bed for railway lines. Code 719 R (3rd edition). International Union of Railways 2008.
9. Fijałek M.H.: *Geneza i charakterystyka techniczna Toru Doświadczalnego w Żmigrodzie*. Prace Instytutu Kolejnictwa 2016, z. 150.
10. Frühauf W. i in.: *Konstrukcje ziemne dla nawierzchni bezpodsypkowych na trasach kolei dużych prędkości*. Przegląd Komunikacyjny 2010, nr 7–8.
11. Id-3. Warunki techniczne utrzymania podtorza kolejowego. Załącznik do Zarządzenia Nr 9/2009 Zarządu PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. z dnia 4 maja 2009 r.
12. Katastrofa kolejowa w Reptowie, dostęp online 9.01.2019 na https://pl.wikipedia.org/wiki/Katastrofa_kolejowa_w_Reptowie.
13. Lenczewski S., Sokalski K., Gajkiewicz A.: *Roboty ziemne*. Arkady. Warszawa, 1961.
14. Lipko C., Skrzyński E.: *Ocena jakości i metody wzmocnienia podłoża na linii CMK przy v = 200 km/h*. Opracowanie CNTK nr 1180/28. Warszawa, 1991.
15. Mazurek T.: *Budowa kolei*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności. Warszawa, 1964.
16. Muramoto K.: *Development of Automatic Irregularity-Correcting Sleepers*. Railway Technology Avalanche No. 41, December 27, 2012.
17. Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 10 września 1998 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle kolejowe i ich usytuowanie. Dz.U. 1998 nr 151 poz. 987 z późn. zm.
18. Skrzyński E., Sikora R.: *Kolejowe budowle ziemne. T.1, Utrzymanie i naprawy*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności. Warszawa, 1990.
19. Skrzyński E., Zelek Z.: *Określenie minimalnej grubości warstwy podsypki na stacjach rozrządowych*. Opracowanie COBiRTK nr 3194/12. Warszawa, 1986.
20. Skrzyński E.: *Badania odkształceń nowo wybudowanych nasypów w początkowym okresie eksploatacji*. Opracowanie COBiRTK nr 3022/12. Warszawa, 1974.
21. Skrzyński E.: *Odcinki przejściowe przy obiektach inżynierskich*. Referat na XV jubileuszową ogólnopolską kon-

- ferencję naukowo-techniczną „Drogi Kolejowe 2009”. Warszawa, 7–9 października 2009.
22. Skrzyński E.: *Osiadania toru w początkowym okresie jego eksploatacji*. Praca CNTK nr 6739/22. Warszawa, 1999.
23. Skrzyński E.: *Podtorze kolejowe*. Kolejowa Oficyna Wydawnicza. Warszawa, 2010.
24. Skrzyński E.: *Podtorze na liniach kolejowych dużych prędkości*. Problemy Kolejnictwa 2013, z. 161.
25. Skrzyński E.: *Stabilność podtorza na styku z podsypką tłuczniową*. Referat na XIV Konferencję Naukową „Drogi kolejowe 2007”. Poznań-Rosnówko, 19-20.10.2007.
26. Skrzyński E.: *Stabilność podtorza na styku z podsypką tłuczniową*. Referat na IV Międzynarodową Konferencję Naukowo-Techniczną „Problemy modernizacji i naprawy podtorza kolejowego”. Wrocław – Żmigród, 29–30 maja 2008.
27. Skrzyński E.: *Wpływ pionowych odkształceń nowo wybudowanych nasypów na eksploatowaną nawierzchnię kolejową* (rozprawa doktorska). Politechnika Poznańska. Instytut Inżynierii Lądowej. Poznań, 1975.
28. Wasiutyński A.: *Drogi żelazne* (wydanie drugie uzupełnione). Wydawnictwa Naukowe Komisji Wydawniczej T-Wa Bratniej Pomocy Studentów Politechniki Warszawskiej. Warszawa, 1925.
29. Wiłun Z.: *Zarys geotechniki*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności. Warszawa, 1976.