

# Systemy szynowe na płycie

## montowane na obiektach inżynierskich

### Całościowe podejście do projektowania

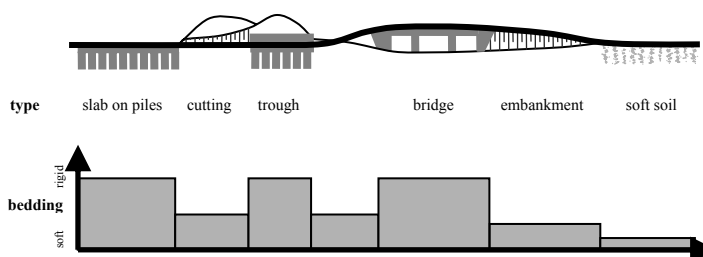
Wolfgang Frühauf, Jörg Jungwirth, Matthias Scholz, Andreas Röder, Hermann Stoiberer

*Kolejom dużych prędkości (o prędkości do 350 km/h), systemy szynowe na płycie betonowej zapewniają dobre osiągi oraz trwałą wysoki komfort jazdy. Konieczna jest wytężona praca zespołowa, a także bliska współpraca inżynierów budownictwa lądowego ze specjalistami z branży geotechniki, po to by konstrukcja systemów szynowych na płycie betonowej była niezawodna. Projektowanie bezpodsypkowej nawierzchni szynowej wymaga holistycznego podejścia w celu zoptymalizowania sztywności pionowej nawierzchni szynowej na całej jej długości z uwzględnieniem różnych elementów konstrukcji (nasyt, mosty, koryta itd.) Niniejszy artykuł zawiera przegląd różnych konstrukcji nawierzchni szynowej na płycie betonowej z uwzględnieniem warunków środowiskowych i geologicznych podłoża. Autorzy artykułu szczególną uwagę zwrócili na podłoża słabonośne i przejścia między odcinkami nawierzchni szynowej na płycie o różnej sztywności pionowej. Artykuł jest zmodyfikowaną wersją referatu wygłoszonego na V. Konferencji Naukowo-Technicznej „Problemy modernizacji i budowy podtorza kolejowego” Wrocław - Szklarska Poręba, 14-15 października 2010 r.*

#### Wstęp

W przypadku nawierzchni szynowej na płycie, podsypka, która służy do rozkładu obciążenia zostaje zastąpiona betonem lub asfaltem, które zapewniają większą stabilność konstrukcji. Dla porównania wystarczy powiedzieć, że te dwa materiały są twardsze. W efekcie trzeba zapewnić niezbędną sprężystość umieszczając sprężyste elementy pod szynami lub pod podkładami kolejowymi. Takie rozwiązanie jest bardzo trwałe i wymaga niewielkiej ilości zabiegów utrzymaniowych.

Bezpodsypkowa nawierzchnia szynowa wymaga gruntu rodzimego, który nie ulega deformacji, ani osiadaniu. Podziemna część konstrukcji bezpodsypkowej nawierzchni szynowej musi być zabezpieczona przez konstrukcję ziemną aż do głębokości minimum 2,5 m poniżej płyty nośnej. Dlatego też wyzwaniem dla projektanta nawierzchni szynowej bezpodsypkowej jest zastosowanie właściwego i odpowiedniego systemu konstrukcji ziemnej. Wysokie wymagania dotyczące konstrukcji ziemnych powodują wzrost kosztów budowlanych i materiałowych w porównaniu z nawierzchnią szynową z podsypką. Rzetelne uwzględnienie osiadania konstrukcji ziemnych w dłuższej perspektywie czasowej w wyliczeniach i w projekcie torowiska przyniesie korzyści w postaci dłuższej eksploatacji oraz niższych kosztów utrzymania nawierzchni szynowej na płycie. W artykule opisano, na podstawie doświadczeń firmy projektowo-konsultingowej SSF, jak radzić sobie ze zmiennością sztywności pionowej i jak kontrolować osiadanie w dłuższej perspektywie czasowej. Podstawowymi elementami konstrukcji



1. Różne konstrukcje nawierzchni szynowej na płycie z różnymi współczynnikami sprężystości podłoża

ziemnej są nasypy lub przekopy pod linię kolejową. W dalszej kolejności bierze się pod uwagę torowisko na płycie na mostach i w korytach. Szczególnie ważne jest przejście pomiędzy poszczególnymi odcinkami nawierzchni szynowej na płytach z różnymi współczynnikami pionowymi sprężystości podbudowy – np. dla sztywnych mostów czy też dla miękkich konstrukcji ziemnych – ponieważ stanowi to nieciągłość w przypadku nawierzchni szynowej bezpodsypkowej (rys. 1).

#### Znormalizowane konstrukcje nawierzchni szynowych na płycie

Kodeksy budowlane zawierają niewiele informacji na temat koncepcji dotyczących konstrukcji nawierzchni szynowych na płycie. Znormalizowany jest tylko układ nawierzchni szynowej na płycie w nasypie i w przekopach pod linię kolejową. We wszystkich pozostałych przypadkach zastosowań nawierzchni szynowych na płycie na mostach, w korytach lub w przypadku zastosowania specjalnych konstrukcji w miękkiej ziemi, a także przejść, wymagany

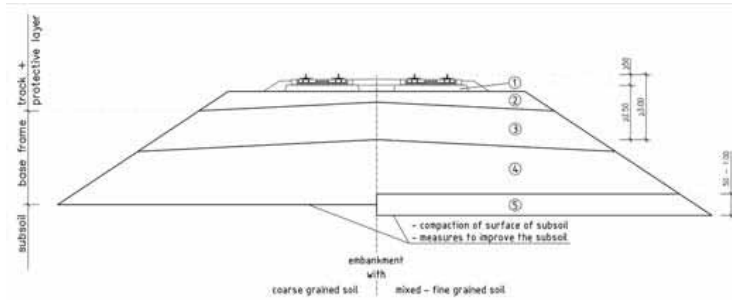
jest geniusz techniczny do opracowania odpowiednich rozwiązań.

Najczęściej używaną konstrukcją ziemną jest nasyp. Nasyp, składający się z warstwy ochronnej oraz innych warstw wypełniających np. obszary przejściowe, musi być zbudowany w bardzo dokładny sposób, zgodnie z przepisami.

Aby zminimalizować możliwość osiadania, warstwy i zbocze nasypu muszą być wykonane zgodnie z poniższym rysunkiem. W efekcie otrzymujemy konstrukcję ziemną o wysokiej stabilności i niewielkim osiadaniu, która posiada wystarczającą odporność na wpływ warunków atmosferycznych.

Należy unikać naprzemiennego układu warstw, tj. jedna warstwa ziemi spoistej, druga warstwa ziemi niespoistej (układ warstwowy naprzemienny). Nie mniej jednak, jeśli konieczne jest naprzemienne ułożenie warstw ziemi spoistej i niespoistej, każda warstwa spoistej ziemi musi być zbudowana z warstwą podtorza, o nachyleniu poprzecznym wynoszącym 2,5 % na zewnątrz. Ułożenie warstw pokazano na rys. 2. Podano również standardowe przepisy dotyczące materiałów oraz stopień zagęszczenia.

Podłoże gruntowe musi być zagęszczone zgodnie z wymaganiami, aby uniknąć długoterminowego osiadania lub też nawet przyspieszyć osiadanie. Jeśli wymagania nie mogą być spełnione przy użyciu standardowych metod zagęszczania, lub gdy grunt o potrzebnych parametrach jest niedostępny, należy użyć metod stosowanych do podtorza lub przyspieszających osiadanie. Grunt należy wymienić, jeśli nośność istniejącego gruntu jest niewystarczająca. Miękki, spoisty grunt lub gleba organiczna w podłożu powinny być wymienione do głębokości przynajmniej 4 m poniżej górnej krawędzi torów. Należy rozważyć i zweryfikować konsekwencje działań konstrukcyjnych, takich jak: wykonywanie wykopów czy też wypełnianie ziemią i/lub obniżenie poziomu wód gruntowych.



#### Requirements:

LAYER	KG	Ev2	Ev <sub>d</sub>	D <sub>pr</sub> coarse grained soil	D <sub>pr</sub> mixed-fine grained soil
① hydraulic bonded layer: HBL	—	—	—	—	—
② frost protection layer: FPL	2	120 MN/m <sup>2</sup>	50 MN/m <sup>2</sup>	1,00	1,00
③ subgrade material ± 3,00m	—	60 MN/m <sup>2</sup>	—	1,00	1,00
④ subgrade material	—	45 MN/m <sup>2</sup>	—	0,98	1,00
⑤ if necessary improvement of surface of subsoil	—	—	—	—	0,98

## Przekopy pod linię kolejową

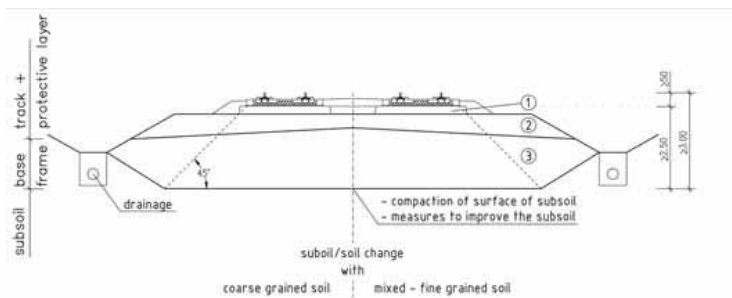
Również dla przekopów pod linię kolejową obowiązują te same surowe przepisy. Układ warstw pokazano na rys. 3. Podobnie do wymogów stawianych nasypom, wymagany układ warstw i zagęszczanie muszą być zagwarantowane minimum 3 m pod torowiskiem. Podłoże musi być trwałe i mieć odpowiednią nośność w połączeniu z niewielkim osiadaniem. Plastyczny spoisty grunt musi zostać zastąpiony lub należy zastosować inne metody do podtorza, aby uniknąć wpływu plastycznego gruntu na podłoże. Plastyczny grunt powoduje duże i niekontrolowane osiadanie konstrukcji, w zależności od stosunków wodnych oraz zdolności odwadniania.

Metody wykonywania posadowień na mało-nośnym gruncie są przeważnie skomplikowane. Dlatego też z warstwami mało-nośnego gruntu można sobie poradzić stosując pale wiercone lub wbijane, w celu stworzenia posadowienia w głębszej warstwie gruntu o wystarczającej nośności. Zazwyczaj w przypadku przekopów pod linię kolejową potrzebny jest układ odwadniania po obydwu stronach toru. Kąt nachylenia skarpy musi być wykonany zgodnie z przepisami lub odpowiednio wzmocniony przy pomocy kotew, słupów lub innych umocnień.

## Budowanie na gruntach słabonośnych

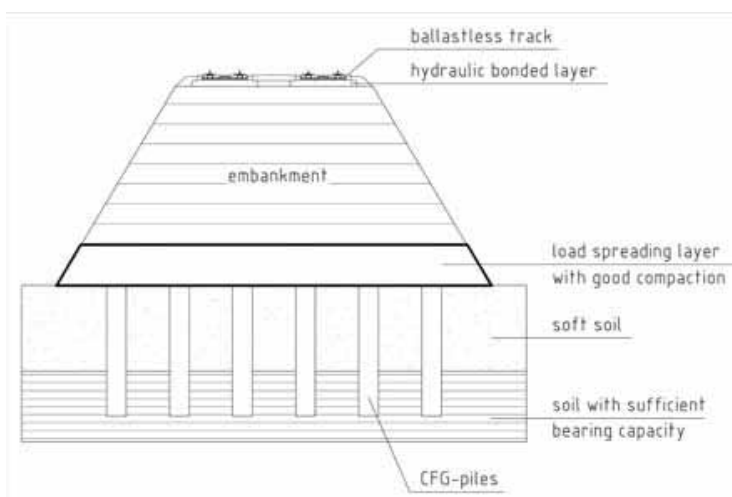
Na etapie projektowania często omawia się i wykonuje obliczenia dla wielu wariantów wzmocnienia podłoża przy użyciu różnych metod zagęszczania. Grunt jest zagęszczany poprzez przemieszczanie ukośne otaczającego gruntu. Należy wyliczyć wielkość osiadania i czas ustania tego procesu, następnie na tej podstawie należy opracować instrukcję zagęszczania gruntu. Istnieje jednak jedna zaawansowana, a jednocześnie prosta metoda po-

### 2. Przekrój przez nasyp



LAYERS	KG	Ev2	Ev <sub>d</sub>	D <sub>pr</sub> coarse grained	D <sub>pr</sub> mixed-fine grained
① hydraulic bonded layer: HBL	—	—	—	—	—
② frost protection layer: FPL	2	120 MN/m <sup>2</sup>	50 MN/m <sup>2</sup>	1,00	1,00
③ subgrade material ± 3,00m	—	60 MN/m <sup>2</sup>	—	0,98	0,97

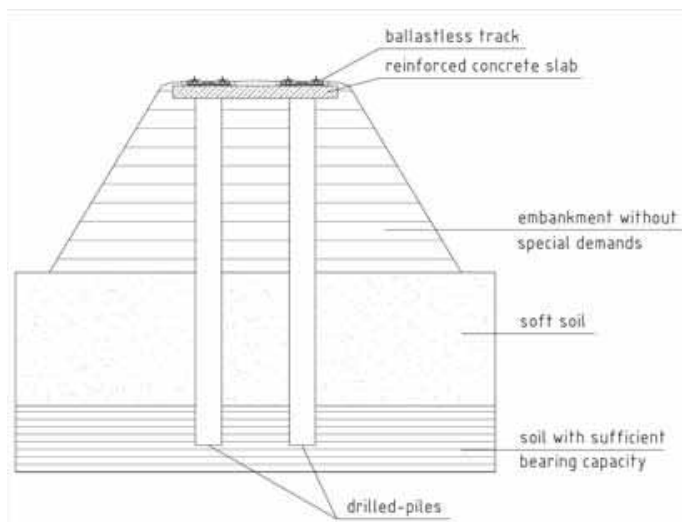
### 3. Przekrój przez przekop pod linię kolejową



4. Pale CFG (mieszanka cementu, popiołów lotnych, żwiru) w celu wzmocnienia podłoża



5. Wbijanie pali na linii kolejowej relacji Norymbergia – Ingolstadt dla nawierzchni szynowej bezpodсыpkowej



6. Przekrój przez nawierzchnię szynową bezpodсыpkową na palach



7. Wykonywanie systemu z wykorzystaniem płyt i pali dla nawierzchni szynowej bezpodсыpkowej

legająca na użyciu kolumn z mieszaniny cementu, popiołów lotnych i żwiru (CFG) oraz prostych kolumn z kamieni (rys. 4).

Do wykonania kolumn z CFG używa się świdra ziemnego w celu zbudowania kolumn cementowych poprzez przesunięcie otaczającego gruntu. Grunt z przemieszczeniem ukośnym wzmacnia otaczającą glebę. Metodę tę można stosować w pobliżu wrażliwych konstrukcji, takich jak: istniejące budynki lub konstrukcje w trakcie budowy.

Możliwość kontrolowania współczynnika zagęszczenia mleka cementowego prowadzi do powstania efektu rozkładu obciążenia pomiędzy gruntem, a kolumnami wykonanymi z CFG. W efekcie można osiągnąć znaczne oszczędności, jeśli chodzi o wymaganą głębokość kolumn. W przeciwieństwie do kolumn kamiennych, w przypadku kolumn z CFG nie ma ograniczeń, jeśli chodzi o naprężenia własne. W efekcie nie ma ryzyka, że obciążona kolumna ulegnie deformacji z powodu stanu podbudowy w otaczającym gruncie. Umiejętność kontroli efektywnego współczynnika zagęszczenia mleka cementowego pozwala na utrzymanie racjonalnego stosunku pomiędzy współczynnikiem gruntu a kolumną.

Warstwę rozkładającą obciążenie można ułożyć na górze kolumn z CFG. Pozwala to uniknąć stosowania drogiej głowicy pali i płyt betonowych. W klasycznej metodzie z zastosowaniem pali, współczynnik sprężystości gruntu jest zanedbywalny w stosunku do współczynnika sprężystości betonu. Oznacza to, że obciążenie na górze gruntu rozkłada się pomiędzy kolumnami i gruntem zgodnie ze stosunkiem współczynnika sprężystości poprzednio zdefiniowanym.

## Nawierzchnia szynowa bezpodсыpkowa na palach

Niezbędne są specjalne rozwiązania na odcinkach, gdzie występują trudności natury geotechnicznej bądź hydrologicznej, gdy zastosowanie innych metod nie jest możliwe lub zbyt drogie czy też nieodpowiednie ze względu na grafik robót. Aby uniknąć problemu długookresowego osiadania i niewiadomego zagęszczenia gruntu, bezpodсыpkową nawierzchnię można zaprojektować na palach.

Główną cechą projektową tej metody, opracowanej przez SSF, jest to, że nawierzchnia szynowa jest wspierana przez płytę żelbetonową, która posadowiona jest bezpośrednio na słupach (rys. 5, rys. 6 oraz rys. 7). Ciężar własny i obciążenie powodowane przez przejeżdżające pociągi rozkładają się w płycie nawierzchni szynowej i są przyjmowane przez płytę betonową. Obciążenie jest przenoszone na pale.

W efekcie wszystkie siły wywołane przez szynę są przenoszone przez tę konstrukcję.

Nie ma tutaj wpływu spowodowanego problematycznym podłożem bądź też jakością wsadu ziemnego w nasypie. W efekcie wymagania odnośnie gruntu, jaki jest używany do budowy nasypu oraz jakości podłoża są niższe. Nasyp musi jedynie wytrzymać ciężar własny, natomiast grunt użyty w nasypie jest jedynie materiałem wypełniającym.

Tego typu konstrukcja jest bardzo sztywna i nie występuje w niej prawie w ogóle zjawisko osiadania. Wybrany system jest całkowicie niezależny od jakości ziemi użytej jako materiał w nasypie. W efekcie konstrukcja jest porównywalna do mostów pod względem osiadania i sztywności. Musi jednak zostać zainstalowane przejście do normalnego nasypu lub przekopu pod linię kolejową.

### Koryto

Koryto stosuje się w przypadku konstrukcji powstających metodą przekopu pod linię kolejową, gdy w terenie panują trudne warunki geologiczno-hydrologiczne lub w bliskim sąsiedztwie stromych skarp lub budynków i na obszarach wymagających zastosowania konstrukcji podporowych. W takich warunkach często kąt nachylenia skarpy jest niewielki i występuje woda gruntowa lub, w najgorszym przypadku, woda gruntowa pod ciśnieniem hydrostatycznym zalewa konstrukcję. W przypadku plastycznego gruntu należy oczekiwać szybkiego i niekontrolowanego osiadania konstrukcji, w zależności od ilości dopływającej wody oraz zdolności odwadniania. Ponadto w przypadku niektórych rodzajów plastycznego gruntu, takiego jak glina, mają one tendencję do pęcznienia w czasie rozładowywania obciążenia przy usuwaniu wierzchnich warstw gruntu. Konstrukcja musi wytrzymać duże parcie gruntu, zarówno boczne jak i pionowe. Siła wyporu zgodnie z prawem Archimidesa oraz ciśnienie rozprężania gruntu są częstokroć większe niż ciężar własny i mają tendencję do powodowania utraty stabilności. Aby kontrolować długoterminowe osiadanie w plastycznym gruncie firma SSF opracowała nowatorskie rozwiązanie. Jest nim koryto na palach dla systemów nawierzchni szynowych na płytach, które jest podobne do rozwiązania dla nawierzchni szynowej na palach przedstawionego powyżej.

To oryginalne rozwiązanie projektowe zostało zastosowane dla nowej linii kolejowej relacji Norymbergia – Ingolstadt, na odcinku w pobliżu wsi Offenbau. Zbudowano dwa koryta o długości 326 m każde i jedno koryto asymetryczne, w celu zabezpieczenia skarpy i stabilizacji pobliskiej autostrady o całkowitej długości 488 m (rys. 8 oraz rys. 9).



8. Początek prac nad korytem w kierunku południowym



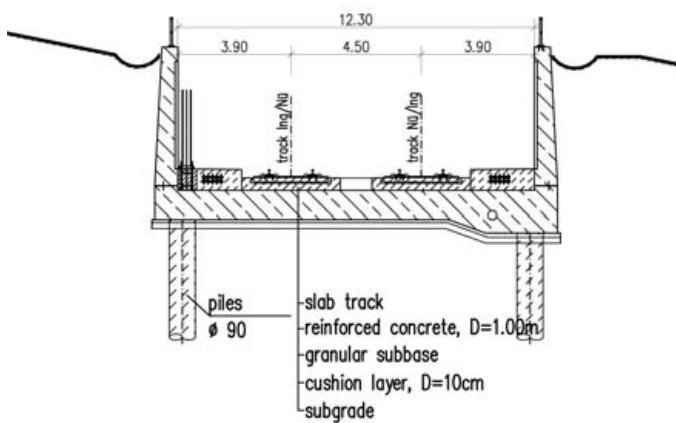
9. Koryto przejściowe Lohen – koryto w kierunku południowym

### Projekt konstrukcji

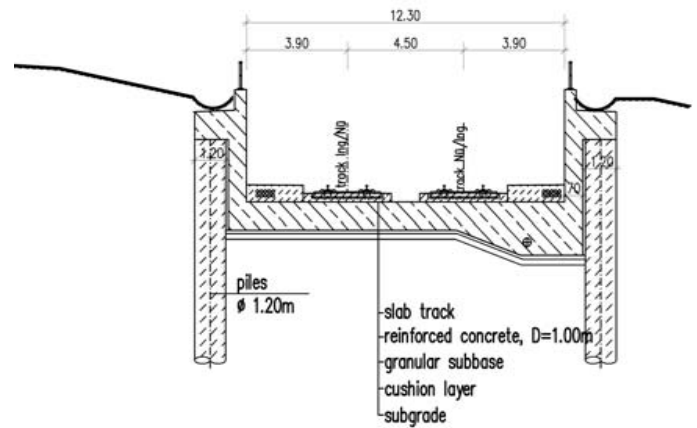
W zależności od warunków geologicznych i pobliskich konstrukcji stosuje się różne metody budowlane. W przypadku otwartego wykopu ze swobodnymi skarpami płyta fundamentowa wykonana z betonu zbrojonego spoczywa bezpośrednio na palach, a ściany oporowe są zasypywane (rys. 10). Gdy w fazie początkowej pale pełnią rolę ścian oporowych dla wykopu, koryto z betonu zbrojonego jest budowane pomiędzy ścianami i jest podpierane na górnych końcach ścian bocznych przy pomocy małych wsporników (rys. 11). System nawierzchni szynowej na płycie jest umieszczany na płycie fundamentowej, co jest rozwiązaniem porównywalnym do nawierzchni szynowej na płycie na mostach.

W przypadku zjawiska pęcznienia, często występującego w gruntach gliniastych, pod korytem należy zastosować warstwę amortyzującą, aby uniknąć negatywnego obciążenia konstrukcji. Warstwa amortyzująca powinna poradzić sobie z pochłonięciem zjawiska pęcznienia do maksymalnych przewidywalnych wartości (w przypadku wsi Offenbau - 80 mm) bez powodowania dużych naprężeń.

W czasie budowy warstwa amortyzacyjna musi podtrzymywać tylko ciężar własny konstrukcji i obciążenie budowlane. Gdy grunt pęcznieje, a ciśnienie rozprężania przekracza wartość graniczną ok. 70 kN/m<sup>2</sup> warstwa amortyzująca powinna być plastyczna, aby uniknąć nadmiernego obciążania koryta. Na przykład pianka mineralna posiada wymagane własności sprężynująco-plastyczne.



10. Przekrój przez koryto z otwartym wykopem i skarpią



11. Przekrój przez koryto z palami użytymi jako ściany oporowe



12. Most nad kanałem Ren-Men

## Pale

Na plastycznym podłożu koryto musi być podtrzymywane na palach, aby uniknąć niekontrolowanego osiadania torowiska. Jeśli przewidywane jest pęcznienie gruntu lub podniesienie się poziomu wód gruntowych, to konstrukcja pali wymaga szczegółowej analizy, gdyż w takim przypadku pale mogą pracować na rozciąganie. Obciążenia wywołane przejazdem pociągów mogą w konsekwencji powodować obciążenie zmienne pali. Dlatego też projekt musi uwzględnić zmęczenie pali.

Z powodu pęcznienia gruntu, wytrzymałość na tarcie pali będzie tylko potrzebna w przypadku większych odkształceń. Ponadto, ponieważ zjawisko pęcznienia zachodzi

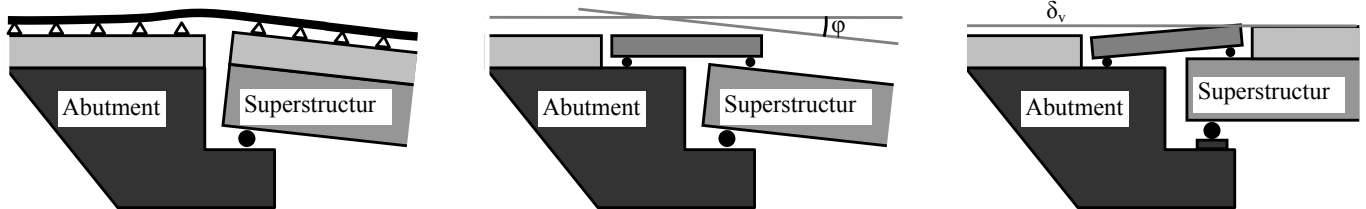
głównie w górnych warstwach gruntu, to w palach będzie występować ujemne tarcie powierzchniowe wzdłuż pobocznicy pala. Dlatego też przy wymiarowaniu pali muszą być uwzględnione siły skierowane do góry. W związku z powyższym generalnie obciążenie rozciągające jest czynnikiem decydującym o projekcie, a nie obciążenie ściskające powodowane ciężarem własnym konstrukcji. Naprężenia rozciągające powstające w palach nakładają się na wypór wód gruntowych zgodnie z prawem Archimidesa, pęcznienie gruntu (tylko tej części, która jest przekazywana przez warstwę amortyzacyjną), ujemne tarcie powierzchniowe spowodowane pęczniącym gruntem, pomniejszone o ciężar własny konstrukcji.

Zbudowanie nawierzchni szynowej na

płyce w korycie posadowionym na palach daje sztywność torowiska porównywalną do systemów nawierzchni szynowej na płycie na mostach i sprawia, że prawie nie występują osiadania zależne od czasu. Aby zapewnić gładkie przejście do sąsiednich odcinków szyn o innej sztywności lub własnościach osiadania należy zaprojektować właściwe przejścia między odcinkami.

## Mosty

Oprócz ogólnych aspektów nawierzchni szynowych na płycie posadowionych na konstrukcjach ziemnych omówionych powyżej, należy uwzględnić specjalny wymóg dla nawierzchni szynowych na płycie na mostach (rys. 12). Istnieją specjalne wymagania



13. a) duże siły oddolne; b) wyrównanie ruchu obrotowego końca dźwigara; c) wyrównanie przesunięcia pionowego

## Odształcenia mostu

Konstrukcja mostu zapewnia wymaganą podstawę wolną od osiadania dla systemu nawierzchni szynowej na płycie, lecz ruchy mostu wymagają szczegółowej analizy. Odształcenia wzdłużne konstrukcji mostu są powodowane zmianami temperatury. Obciążenie taborem kolejowym powoduje odkształcanie się dźwigarów mostowych i stąd ruch obrotowy sekcji na końcach dźwigarów. W przypadku mostów betonowych należy uwzględnić odkształcenia konstrukcji spowodowane pęczaniem i kurczeniem się materiału.

W konsekwencji systemu nawierzchni szynowych na płycie położone na mostach muszą być dostosowane do specjalnych warunków technicznych panujących na mostach. W Niemczech tylko systemy nawierzchni szynowych na płycie posiadające specjalne aprobaty („Zustimmung im Einzelfall”) są dopuszczone do stosowania na mostach.

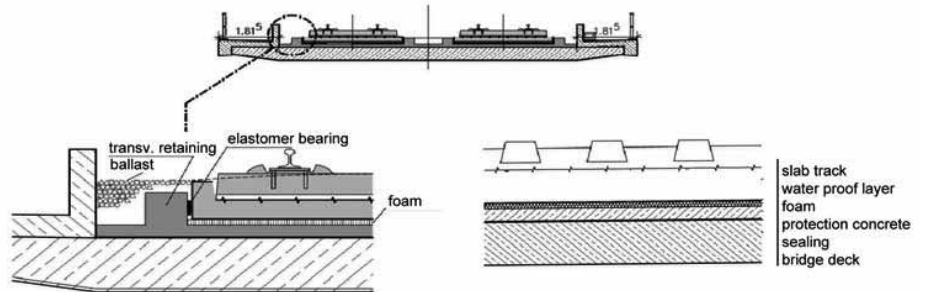
Ruch obrotowy na końcach dźwigarów mostowych spowodowany obciążeniem taborem kolejowym powinien być ograniczony do 2 ‰. Siły wyporu spowodowane zgęstą szyną przechodzącą przez łączenia muszą zostać sprawdzone, aby uniknąć zerwania mocowania szyn do konstrukcji mostu i naprężeń w szynach przekraczających wartości graniczne. Rozszerzanie podłużne musi zostać przejęte przez wewnętrzne naprężenie w szynie, nie powodując jego przekroczenia.

Duże siły wyporu na przyczółkach mostu mogą być zredukowane przez dopasowanie konstrukcji elementów przejściowych. Można to osiągnąć zmniejszając odległość pomiędzy podporami lub zmniejszając sztywność podpór. Ponadto elementy konstrukcyjne, takie jak wsporniki przyczółków mostu lub dźwigary przejściowe, mogą być dostosowane tak, aby zapewnić łagodne przejście (rys. 13 a – c).

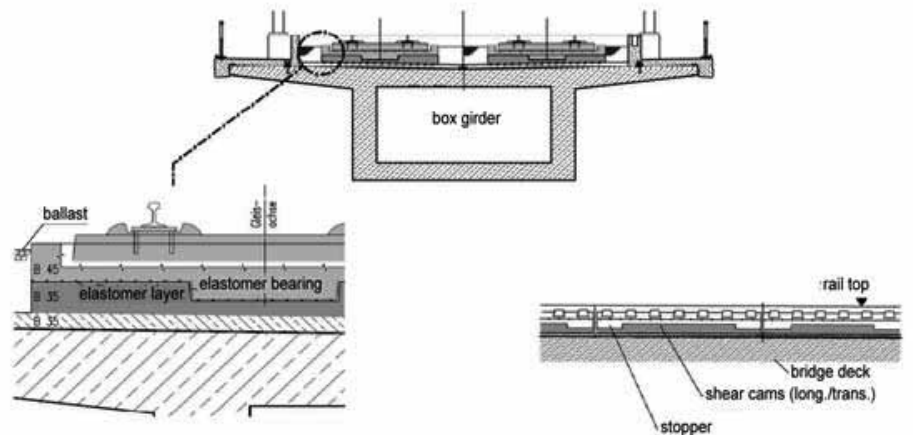
## Typy konstrukcji

Jeśli chodzi o projekt konstrukcji i szczegółową specyfikację nawierzchni szynowej na płycie na mostach, to generalnie należy mosty podzielić na dwie kategorie: mosty o rozpiętości do 25 m oraz mosty o rozpiętości powyżej 25 m.

W przypadku mostów krótkich (do 25



14. Typowa konstrukcja nawierzchni szynowej na płycie mostu krótkiego (< 25 m)



15. Typowa konstrukcja nawierzchni szynowej na płycie dla mostu długiego (> 25 m)



16. Typowa konstrukcja nawierzchni szynowej na płycie dla mostu długiego (> 25 m)

maty oraz tworzywa piankowego sztywnego, aby zapobiec propagacji sił wzdłużnych i zniwelować sprężynowanie i osiadanie pomiędzy szynami a konstrukcją (rys. 13).

W przypadku długich mostów (ponad 25 m) nawierzchnia szynowa musi być przymocowana do konstrukcji mostu. Następuje to zazwyczaj przy pomocy rozwiązań przytrzymujących nawierzchnię szynową (rys. 14). Projekt i specyfikacja muszą być zgodne z wymaganiami zmian temperatury oraz odkształcenia konstrukcji na złączu; co więcej należy również uwzględnić gradienty temperatury, zjawiska pełzania i kurczenia się materiałów.

W przypadku stosowania rozjazdów na mostach, używa się odcinków płyt o długości większej niż 6,5 m, aby uniknąć odkształceń krzyżownicy oraz końcówek zwrotnicy. Do przytwierdzenia płyt w kierunku podłużnym i poprzecznym służy specjalny mechanizm.

Podobnie jak w przypadku mostów z nawierzchnią szynową podsypkową, przekraczających pewną długość rozszerzania, należy zaprojektować złącza kompensacyjne, które będą przejmować rozszerzenia wzdłużne na przyczółkach mostu. Do złącz kompensacyjnych zaliczamy, w zależności od długości rozszerzania i szacowanego ruchu obrotowego końcówki dźwigara, dźwigar przejściowy, a także złącze szynowe.

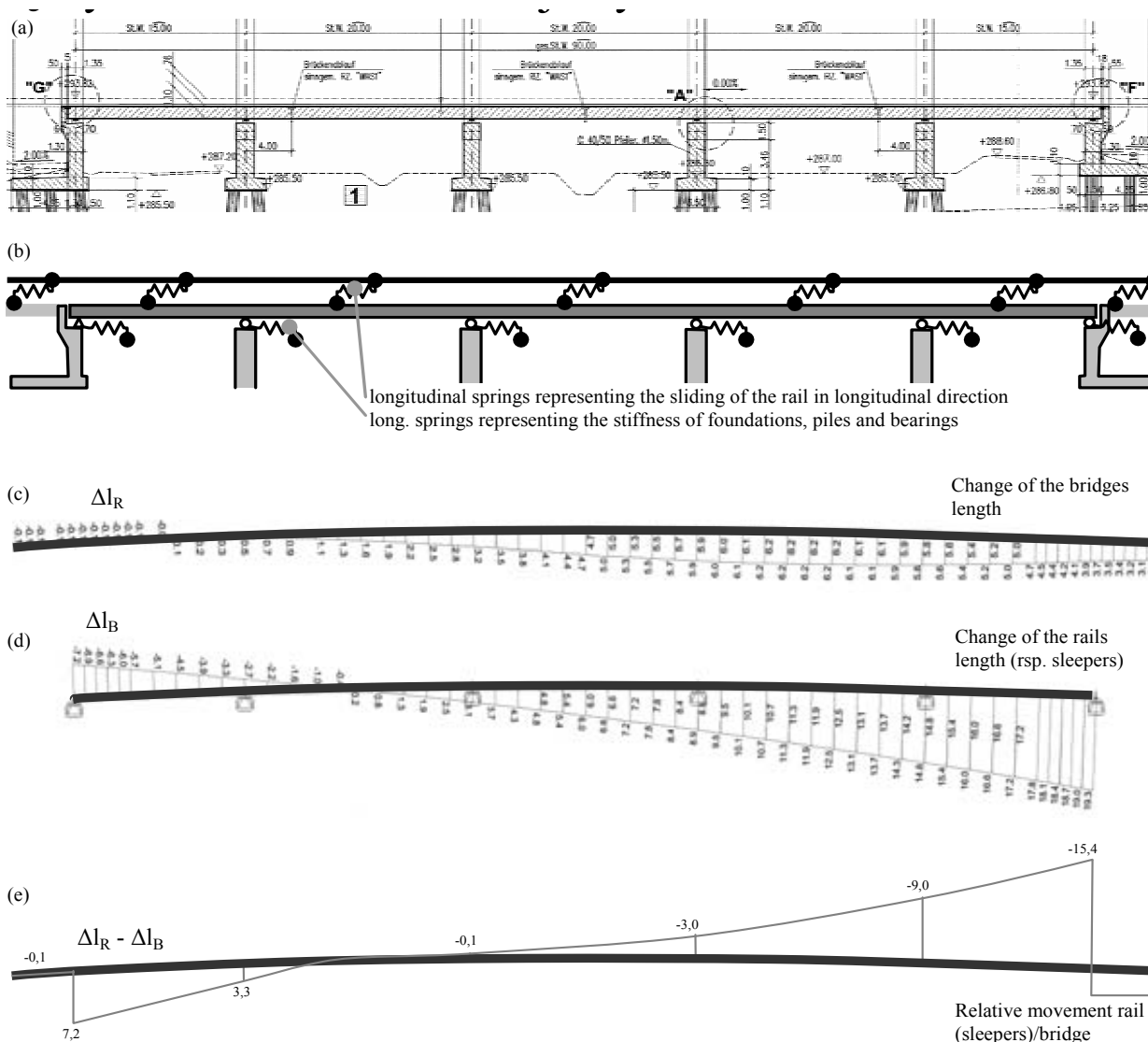
Obecnie istnieje duża różnorodność systemów nawierzchni szynowych na płycie do zastosowań na mostach. Jednym z przykładów jest system BÖGL, który został wdrożony przez firmę SSF przy projektowaniu mostu Schwarzhachtal (rys. 15 oraz rys. 16) oraz mostu nad kanałem Ren-Men.

## Naprężenia wzdłużne w szynach

W przypadku szyn bezстыkowych spawanych (CWR) na mostach mogą się pojawić dość znaczne naprężenia wzdłużne w szynach i względne przesunięcia z powodu wahań temperatury, przyspieszenia i hamowania, a także z powodu pełzania i kurczenia się materiałów. Powyższe naprężenia są spowodowane wzajemnym oddziaływaniem na siebie powierzchni mostu i nawierzchni szynowej. Naprężenia te muszą być ograniczone, ponieważ stanowią one dodatkowe naprężenia w stosunku do naprężeń w szynach, które tak czy inaczej występowałyby na normalnym odcinku szyn.

Ogólnie rzecz biorąc: te problemy można by było rozwiązać instalując w szynie moduł rozszerzania szyny. Powyższe rozwiązanie nie jest jednak atrakcyjne dla torowiska kolei dużych prędkości, ponieważ moduły rozszerzania szyny powodują miejscowe zakłócenia sztywności pionowej szyny, a także geometrii torów, co wymagałoby intensywnych zabiegów utrzymaniowych. Alternatywnym i jednocześnie bardzo skutecznym rozwiązaniem jest użycie tzw. złączy o zerowej tolerancji na pełzanie (zero longitudinal restraint - ZLR), przypadające na ustaloną długość szyny. Metoda ta, znajdująca się w fazie rozwijania, już dowiodła swojej skuteczności przy realizacji kilkunastu projektów, lecz nie jest to jeszcze metoda znormalizowana.

Zbiór norm niemieckich DIN – Fb.101, Załącznik K zawiera podstawowe informacje na temat analizy sprawdzającej naprężeń wzdłużnych w szynach kolejowych. Iteracyjna analiza nieliniowa przewiduje obliczenie sił, z jakimi oddziałuje łożysko na oś oraz naprężeń w szynie. Należy uwzględnić poślizg



17 a – e. Analiza przesunięcia się mostu kolejowego w Füllbach z uwzględnieniem temperatury w wariacie obciążenia

na szynie kolejowej, a także sztywność konstrukcji. W celu zagwarantowania stabilności szyny, dodatkowe dopuszczalne naprężenia w szynie spowodowane reakcją konstrukcji na różne oddziaływania podlegają następującym ograniczeniom:

- Nawierzchnia szynowa podsypkowa: 72 N/mm<sup>2</sup> dla rozciągania oraz 92 N/mm<sup>2</sup> dla ściskania;
- Nawierzchnia szynowa na płycie: 92 N/mm<sup>2</sup> dla rozciągania i ściskania.

Ponadto rozciąganie względne musi być ograniczone do 4 mm dla przyspieszania i hamowania oraz do 30 mm dla złącza kompensacyjnego na końcu dźwigarów.

Firma SSF przeprowadziła obliczenia wzdluznych naprężeń w szynie kolejowej w ramach wielu projektów kolejowych np. most przez rzekę Füllbach (rys. 17a), który jest ciągłym mostem dźwigarowym (15 + 20 + 20 + 20 + 15), wykonanym z betonu sprężonego. Analiza została przeprowadzona przy zastosowaniu iteratywnej nieliniowej metody elementów skończonych. Konstrukcja została uproszczona do konstrukcji z prętów.

Sporządzono model wzajemnego oddziaływania szyny kolejowej z konstrukcją przy pomocy sprężyn na około 50 odcinkach, używając w tym celu właściwego parametru krzywej sprężyny. Sztywność podziemnej części konstrukcji jest również modelowana przy pomocy sprężyn (rys. 17b).

Wyniki są pokazane dla temperatury warianu z obciążeniem. Na rys. 17c–e pokazano przemieszczenie mostu, przemieszczenie szyny kolejowej i względne przemieszczenie między mostem a torami kolejowymi.

## Nawierzchnia szynowa na płycie na mostach z betonu

W celu wykonania systemów nawierzchni szynowej na płycie na mostach z betonu stosuje się pośrednią zbrojoną płytę na izolacji powierzchni mostu. Płyta pośrednia chroni izolację mostu i powoduje korzystny rozkład wewnętrznych naprężeń.

Na powierzchni zbrojonej płyty znajdują się krzywki poślizgowe w celu przekazywania sił wzdluznych i poprzecznych powstałych wskutek obciążenia taborem (rys. 18). Doświadczenie uczy, że dodatnie (w górę) krzywki są lepsze niż ujemne (w dół) krzywki. W przyszłości korzystnym rozwiązaniem może okazać się bezpośrednia inte-



18. Typowa konstrukcja nawierzchni szynowej na płycie na mostach betonowych: nadbudowa nawierzchni szynowej na płycie, wypełnienie betonem płyty, warstwa elastomerów, płyta pośrednia zbrojona, warstwa ochronna za betonem, izolacja na poziomie mostu, poziom mostu

gracja nawierzchni szynowej na płycie z nawierzchnią mostu. Takie rozwiązanie zmniejszyłoby znacznie masę własną i w efekcie koszty betonowych mostów kolejowych.

## Nawierzchnia szynowa na płycie na mostach stalowych

Podobnie jak w mostach betonowych, krzywki są wtapiane na powierzchni mostów stalowych, aby zapewnić przekazywanie obciążeń poziomych (rys. 19). Pomiędzy konstrukcją nawierzchni szynowej na płycie, a powierzchnią mostu kładziona jest warstwa elastomerów dla rozłączania pokrywającego również krzywki. Sama nawierzchnia szynowa na płycie składa się z reguły z prefabrykowanymi płytami betonowymi oraz wypełnienia betonowego.



19. Typowa konstrukcja nawierzchni szynowej na płycie na mostach stalowych: nadbudowa, nawierzchni szynowej na płycie, wypełnienie betonem płyty, warstwa elastomerów, izolacja na poziomie mostu, poziom mostu

## Nawierzchnia szynowa na płycie w tunelu

Pierwszym zastosowaniem nawierzchni bezpodsypkowej była instalacja nawierzchni szynowej na płycie w tunelach. Już obecna solidna płyta denna tunelu, a także wymóg budowy torowiska na niskiej wysokości zapewniają najlepsze warunki do zastosowania nawierzchni szynowej na płycie na nowo budowanych liniach. W przypadku powiększenia szerokości tunelu w istniejących tunelach (przykładowo w czasie specjalnych instalacji elektrycznych) niska wysokość konstrukcji jest główną korzyścią (rys. 20).



20. Tunel Gögelsbuch

Wymogiem pomyślnej realizacji nawierzchni szynowej na płycie są odpowiednie warunki geologiczne. Przede wszystkim własności mas skalnych muszą pozwalać na instalację nawierzchni szynowej na płycie. Tunel w miejscu obrywu skalnego lub osuwiska, lub w obszarach z możliwością pęcznienia i rozszerzania się gruntu wyklucza zastosowanie nawierzchni szynowej na płycie.

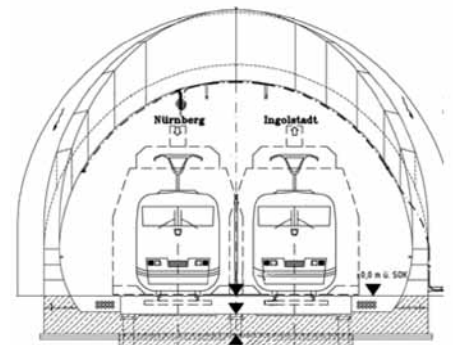
Ogólnie rzecz biorąc, wszystkie typy konstrukcji nawierzchni szynowej bezpodsypkowej stosowane na konstrukcjach ziemnych mogą być również stosowane w tunelach. Budując nawierzchnię szynową na płycie w tunelach zazwyczaj wystrzegamy się warstw wiązanych spoiwem hydraulicznym; warstwy betonu o zmniejszonej grubości są stosowane bezpośrednio na spodzie tunelu. W szczególności grubość warstwy betonowej, która normalnie wynosi 30 cm, powinna zostać zmniejszona do 15 cm, w celu położenia jej bezpośrednio na dolną płytę tunelu.

## Tworzenie się pęknięć

Warunki atmosferyczne w tunelach są korzystne dla nawierzchni szynowych bezpodsypkowych z płytami betonowymi. Temperatura w tunelu jest dość jednorodna, za wyjątkiem miejsc znajdujących się około 100 m przy wjazdach do tunelu. W efekcie można zredukować lub nawet zaniechać stosowania zbrojenia płyty betonowej, pozwalającego uniknąć pęknięć.

Ważnym aspektem jest tworzenie się pęknięć w warstwie betonu na złączach w tunelu. Warstwa betonowa musi być zbudowana ze spoiną lub musi być dodatkowo zbrojona. W przypadku nierównych spągów w tunelu niezbędne jest zastosowanie warstwy poziomującej przed wylaniem betonu.

## Instalacje techniczne



21. Przekrój przez tunel Gögelsbuch

Projektowanie odcinka tunelu (rys. 21), niezależnie od tego, czy jest budowany jako tunel z jedną czy dwoma liniami kolejowymi, wymaga podejścia całościowego do projektowania z dogłębną analizą następujących zagadnień:

- wybór typu nawierzchni szynowej na płycie;
- odwodnienie;
- skrajnia z uwzględnieniem dróg ewakuacji i wyjść awaryjnych;
- instalacje sygnalizacyjne i elektryczne.

Dla bezpieczeństwa eksploatacji linii kolejowych należy przyjąć przepisy p-poż. i na wypadek katastrofy kolejowej. Wymagane



elementy wyposażenia to na przykład prowadnica dla wykołojonych pociągów lub zdolność torowiska do jazdy po nim gumowymi oponami. Powyższe wymagania mogą być łatwo spełnione przy zastosowaniu konstrukcji z nawierzchnią szynową na płycie.

## Przejścia

Nawierzchnia szynowa na płycie w porównaniu z tradycyjną nawierzchnią szynową na podsypce posiada znacznie wyższą sztywność pionową. W efekcie zmiany w sztywności podziemnej części konstrukcji stają się ważniejsze dla pionowej reakcji konstrukcji całego torowiska. Odpowiednie przejścia nawierzchni szynowej na płycie na mostach na sąsiednią nawierzchnię szynową na płycie na konstrukcjach ziemnych, przekopach i w tunelach lub nawet na odcinki nawierzchni szynowej z podsypką muszą być odpowiednio zaprojektowane, aby zapewnić wysoki komfort jazdy oraz uniknąć uszkodzeń z powodu skutków dynamicznych. Różnice w osiadaniu poszczególnych konstrukcji o wysokiej sztywności, takich jak mosty, i konstrukcji o niskiej sztywności, takich jak nasypy, muszą być zmniejszone przez zastosowanie specjalnych obszarów przejściowych. Konstrukcję mostu można potraktować, jako nieciągłość nasypu. Sprężynowanie i osiadanie mogą się zupełnie różnić w takich miejscach przerwania ciągłości. Na osiadanie mostu ma głównie wpływ sztywność posadowienia pali, szacowana na poziomie bliskim zero lub maksymalnie kilka milimetrów (< 2 mm) w czasie eksploatacji. Natomiast konstrukcja ziemna w czasie eksploatacji może osiąść maksymalnie 20 milimetrów. Aby złagodzić różnice na obszarze przejściowym bardzo ważne jest wzmocnienie podłoża pomiędzy sztywną i mniej sztywną konstrukcją torowiska. Każdy punkt nieciągłości sztywności wymaga specjalnego wymogu odnośnie przejścia.

Zazwyczaj w przypadku linii kolei dużych prędkości istnieją następujące przejścia:

- konstrukcja ziemna – most;
- konstrukcja ziemna – tunel lub koryto;
- konstrukcja ziemna – przepusty;
- różne typy nawierzchni szynowej bezpodsypkowej;
- nawierzchnia szynowa bezpodsypkowa – nawierzchnia szynowa podsypkowa.

Standardowym rozwiązaniem dla przejść od jednego rodzaju konstrukcji do drugiego są kliny przejściowe znajdujące się po bardziej sztywnej stronie pomiędzy podłożem, konstrukcją ziemną i warstwami sprężynującymi. Długość klinów powinna wynosić cztery razy wysokość najwyższego pobliskiego budynku lub wysokość nasypu lub minimum 20 m ( $4 \times H > 20$  m). Kształt klina przejściowego zależy od podłoża oraz właściwości podłoża, takich jak na przykład nośność

podłoża. Obszary przejściowe muszą być zaprojektowane dla każdego rodzaju wyżej wymienionych przejść w odmienny sposób. Główne parametry projektowe są podane w wytycznych kolei niemieckich (DB).

## Przejście między konstrukcją ziemną a mostem

Aby uzyskać jednakowe osiadanie konstrukcji mostu i konstrukcji ziemnej obydwie budowle powinny mieć ten sam typ posadowienia. Z tyłu przyczółka mostu należy wykonać klin składający się z ziemi zmieszanej z cementem, o zawartości cementu 3 – 5% (rys. 22). Długość zasyпки zależy od podłoża. Minimalna długość powinna wynosić cztery razy wysokość nasypu lub ponad 20 m, gdy zasyпка i nasyp powstają w tym samym czasie.

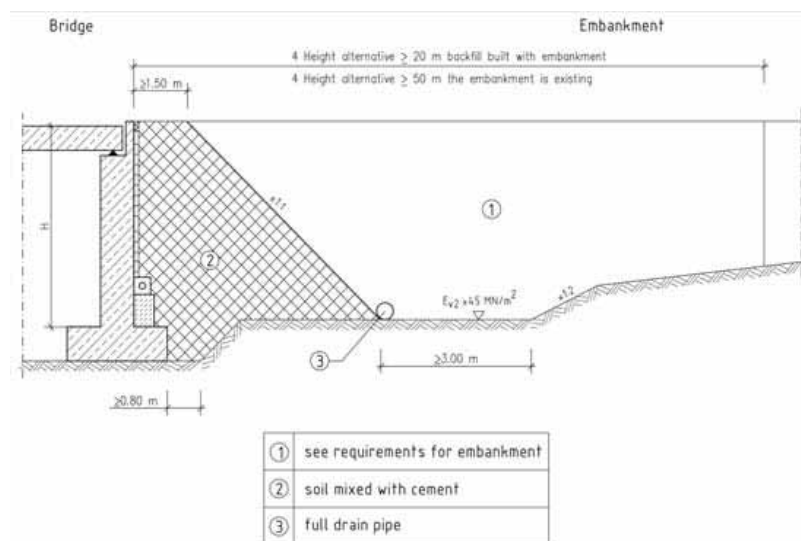
## Przejście: konstrukcja ziemna – tunel lub koryto

Firma projektowo-konsultingowa SSF opracowała niezawodny sposób na zmniejszenie różnicy sztywności między sztywną konstrukcją, a torowiskiem posadowionym na

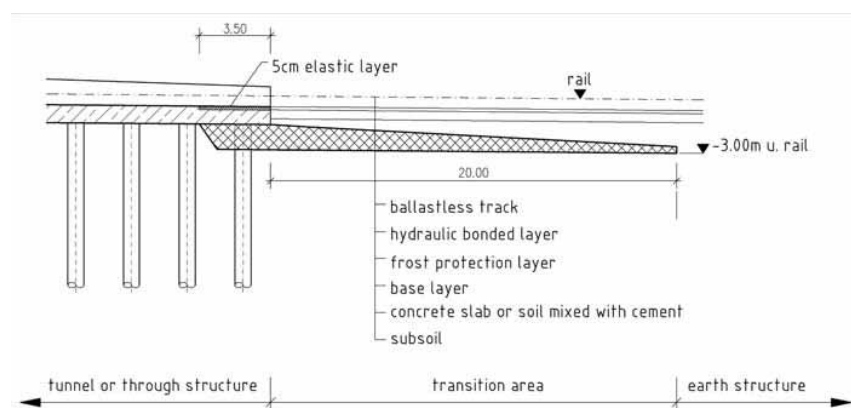
gruncie rodzimym. Koncepcja projektowa polega na tym, aby włożyć sprężynującą warstwę (płytę piankową) pod nawierzchnię szynową bezpodsypkową, znajdującą się na końcu dolnej płyty betonowej (rys. 23). Minimalna długość płyty piankowej wynosi 3,50 m i skierowana jest bezpośrednio na dolną płytę tunelu lub koryta. W zależności od podłoża oraz nośności gruntu, należy rozważyć wykonanie klina, wykonanego z ziemi i cementu. Jeśli posadowienie tunelu lub koryta jest bardzo sztywne np. posadowienie na palach, to obszar przejściowy wykonany z betonu jest przydatny.

## Przejście pomiędzy nawierzchnią szynową bezpodsypkową a nawierzchnią szynową podsypkową

Przejście pomiędzy zupełnie odmiennymi konstrukcjami torowiska – nawierzchnią szynową na podsypce, a nawierzchnią szynową bezpodsypkową – musi być bardzo gładkie jeśli chodzi o istotną różnicę w sztywności systemów nawierzchni szynowych (rys. 24). Ten obszar przejściowy należy zaprojektować przy użyciu modelu obliczeniowego dla wygasających osiadań. Firma SSF specjalizuje



22. Przejście między mostem a nasypem



23. Przejście pomiędzy konstrukcją ziemną a tunelem lub korytem

się w tego rodzaju projektowaniu i modelowaniu dla różnych typów torów.

Wymagania funkcjonalne dla obszaru przejściowego muszą być spełnione w następujący sposób:

- Przejście do nawierzchni szynowej na podsypce musi być zlokalizowane na jednorodnym podłożu, o dużej nośności i niewielkim osiadaniu.
- Połączenie warstw o różnej nośności na końcu nawierzchni szynowej na płycie z nawierzchnią szynową na podsypce wykonuje się przy pomocy kotew i kołków ustalających.

Konieczne jest powiększenie podstawy cementowej na końcu nawierzchni szynowej na płycie, w celu usztywnienia konstrukcji torowiska pod nawierzchnią szynową na podsypce. Należy zastosować przyklejenie podsypki. Odległość pomiędzy podkładami kolejowymi wynosi maksymalnie 60 cm. Dodanie dodatkowych szyn na określonej długości nawierzchni szynowej na podsypce również zwiększa sztywność.

Dodatkowe czynności:

- Dopasowanie sprężynujących złączy do nawierzchni szynowej na płycie.
- Zmniejszenie sztywności w punktach, gdzie stosowane są złącza na nawierzchni szynowej na płycie.
- Dopasowanie konstrukcji przyczółków w podłożu oraz zastosowanie klina ziemi wzbogaconej cementem, typowego materiału stosowanego jako zasypka, o zawartości cementu 3 – 5 %.

## Podsumowanie

W celu zaprojektowania nawierzchni szynowej bezpodsypkowej konieczne jest zastosowanie rozwiązań dla nawierzchni szynowej na płycie, dopasowanych do różnych warunków geologicznych i różnego przebiegu torów. W obecnie obowiązujących przepisach kolei niemieckich DB AG zawarte są podstawowe wytyczne odnośnie projektowania konstrukcji ziemnych z opisem tylko standardowego zastosowania. Aby uzupełnić te przepisy, firma SSF opracowała projekty nawierzchni szynowej na

płycie dostosowane do trudnych warunków geologicznych – np. plastyczny grunt, a także projekty nawierzchni szynowej na płycie do stosowania na mostach i w korytach. Podejścia projektowe zostały przedstawione i omówione w niniejszym artykule wraz z niezbędnymi przejściami pomiędzy różnymi odcinkami nawierzchni szynowej na płycie.

Na terenach o małonośnym podłożu, słaby grunt zazwyczaj się usuwa. W przypadku dużych ilości słabego gruntu koszt prac ziemnych może być bardzo wysoki. Wykopowania można uniknąć stosując nawierzchnię szynową na palach lub wzmacniając podłoże przy zastosowaniu pali CFG (mieszanka cementu, popiołów lotnych i żwiru). Metoda ta stabilizuje osiadanie gruntu w dłuższej perspektywie czasowej i zapobiega eksplozji kosztów budowlanych oraz transportowi masowemu na dużą skalę.

Kolejnym zastosowaniem na miękkim gruncie są koryta, używane w przypadkach, gdy torowisko jest nieco niżej niż naturalna powierzchnia, a standardowe przekopy pod linię kolejową są niemożliwe z powodu warunków granicznych lub wód gruntowych. W tym przypadku ściany oporowe stabilizują pobliski teren, a pale pomagają uniknąć osiadania gruntu w dłuższej perspektywie czasowej. Jeśli zachodzi taka potrzeba, pali można również użyć jako ściany oporowej w czasie budowy.

Na mostach standardowe systemy nawierzchni szynowej na płycie muszą zostać tak dostosowane, aby umożliwić przekazywanie sił wzdłużnych, których źródłem są hamujące i przyspieszające pociągi. Również nośność mostu należy wziąć pod uwagę, aby uniknąć szczytowych wartości naprężeń w szynach, które mogą spowodować złamanie lub wyboczenie. Konieczne jest szczególnie sprawdzenie naprężeń w szynach z uwzględnieniem wszystkich stosowanych wariantów obciążenia.

Sztywność pionowa – współczynnik sprężystości podbudowy – wyżej wymienionych konstrukcji nawierzchni szynowej na płycie różni się zasadniczo. Nawierzchnia szynowa na płycie na moście czy też na palach jest o wiele bardziej sztywna niż na konstruk-

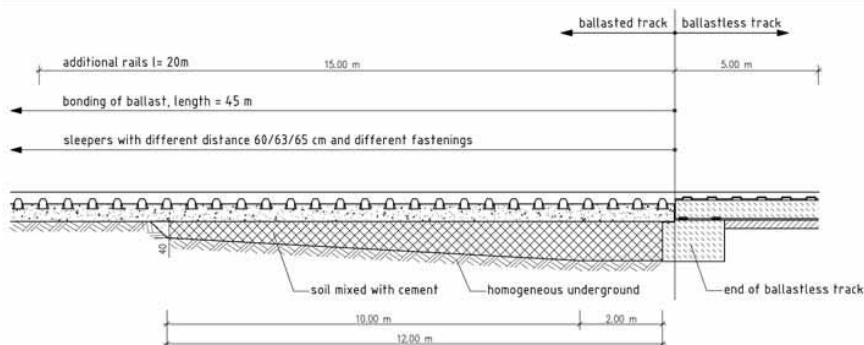
cjach ziemnych. Również różni się osiadanie gruntu w dłuższej perspektywie czasowej. Dlatego też, należy zaprojektować przejścia w celu zniwelowania tych różnic i zapewnienia komfortowej jazdy. Budowa obszarów przejściowych ma taki sam stopień złożoności, jak konstrukcja każdego obiektu inżynierskiego.

Autorzy artykułu wykazali konieczność zastosowania całościowego podejścia do projektowania, uwzględniającego naprężenia wzdłużne w szynach, a także sztywność pionową każdego odcinka nawierzchni szynowej na płycie. Projekt konstrukcji każdego odcinka musi uwzględniać charakterystykę najbliższego odcinka, w celu optymalizacji parametrów całego systemu. Analizę należy przeprowadzić biorąc pod uwagę nie tylko jeden odcinek lub jedną konstrukcję, lecz cały szlak kolejowy ze wszystkimi odcinkami. Tylko takie podejście zapewni konstrukcję statyczną i ekonomiczną w eksploatacji. ◀

## Literatura

- [1] Claus Göbel, Klaus Lieberenz, Handbuch Erdbauwerke der Bahnen: Grundlagen, Planung, Bemessung, Ausführung, Entwässerung, Ertüchtigung, Instandhaltung, Eurailpress Verlag (2004)
- [2] Eisenmann J., Leykauf G.: Feste Fahrbahn für Schienenbahnen, Betonkalender 2000, BK 2, S. 291–326. Ernst & Sohn, Berlin, 2000
- [3] Anforderungskatalog zum Bau der Festen Fahrbahn, Deutschen Bahn AG
- [4] Richtlinie 804, Eisenbahnbrücken und sonstige Ingenieurbauwerke, Deutschen Bahn AG, maj 2003
- [5] Richtlinie 836, Erdbauwerke und sonstige geotechnischen Bauwerke planen, bauen und instand halten, Deutsche Bahn AG, wrzesień 2003
- [6] Richtlinie 853, Eisenbahntunnel planen, bauen und instand halten, Deutsche Bahn AG, Stand September 2003
- [7] DIN-Fachbericht 101: Einwirkungen auf Brücken, Beuth Verlag, marzec 2003
- [8] DIN-Fachbericht 102: Betonbrücken, Beuth Verlag, marzec 2003
- [9] DIN-Fachbericht 103: Stahlbrücken, Beuth Verlag, marzec 2003
- [10] A. Städing, T. Kroker: Das Teilsicherheitskonzept im Tunnelbau, Musterberechnungen nach Ril 853 und Vergleich mit dem Globalsicherheitskonzept, listopad 2003

Dipl.-Ing. Wolfgang Frühauf,  
DR.-Ing. Jörg Jungwirth,  
Dipl.-Ing. Dipl.-Betw. Matthias Scholz,  
Dipl.-Ing. Andreas Röder CEng MIEI,  
Dipl.-Ing. Hermann Stoiberer  
biuro inżynierskie SSF Ingenieure



24. Obszar przejścia między nawierzchnią szynową bezpodsypkową a nawierzchnią szynową na podsypce