

Konstrukcje ziemne dla nawierzchni bezpodсыpkowych na trasach kolei dużych prędkości

Wolfgang Frühauf, Christian Schmitt,
Matthias Scholz,
Andreas Röder, Hermann Stoiberer

System sztywnych nawierzchni bezpodсыpkowych stanowi skuteczne, trwałe oraz wysokiej jakości rozwiązanie dla kolei dużych prędkości na trasach o prędkości do 350 km/h. Przy opracowywaniu konstrukcji nawierzchni bezpodсыpkowych na etapie projektowania bardzo istotna jest współpraca inżynierów budownictwa lądowego ze specjalistami z branży geotechniki. Firma SSF Ingenieure opracowała różnorodne projekty kolei dużych prędkości z zastosowaniem sztywnej nawierzchni bezpodсыpkowej, począwszy od etapu projektowania do ukończenia konstrukcji, łącznie z nadzorem inwestorskim.

* 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, podсыпка, która służy do rozkładu obciążenia zostaje zastąpiona betonem lub asfaltem, które zapewniają większą stabilność konstrukcji. Należy nadmienić, że w porównaniu z innymi materiałami, materiały te są mało elastyczne. Niezbędną sprężystość osiąga się umieszczając elastyczne elementy pod szynami lub pod podkładami kolejowymi. Taka konstrukcja jest bardzo trwała i wymaga niewielkiej ilości nakładów utrzymaniowych.

Bezpodсыpkowa nawierzchnia szynowa wymaga podłoża, które niemal nie podlega deformacji i osiadaniom. Podziemna część konstrukcji bezpodсыpkowej 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 bezpodсыpkowej jest zastosowanie właściwego i odpowiedniego systemu konstrukcji ziemnej. Wysokie wymagania stawiane konstrukcjom ziemnym prowadzą do wzrostu kosztów budowlanych i materiałowych w porównaniu z nawierzchnią szynową z podсыpką. 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.

Podstawową konstrukcją systemu nawierzchni bezpodсыpkowej jest system wielowarstwowy. System ten składa się z płyty, związanej spoiwem hydraulicznym warstwy nośnej, warstwy zabezpieczającej przed za-

marzaniem, konstrukcji ziemnej oraz podłoża. W efekcie zastosowania tej konstrukcji sztywność każdej z warstw wzrasta w miarę malejącej odległości do szyny. (rys. 1).

W artykule opisano na podstawie doświadczeń firmy projektowo-konsultingowej SSF jak kontrolować osiadanie w dłuższej perspektywie czasowej. Podstawowymi elementami konstrukcji ziemnej są nasypy lub przekopy pod linię kolejową. Szczególnie ważne jest przejście pomiędzy poszczególnymi odcinkami nawierzchni szynowej na mostach i konstrukcji ziemnej, ponieważ stanowi ono nieciągłość w przebiegu nawierzchni szynowej bezpodсыpkowej.

Kolej Niemiecka Deutsche Bahn AG (DB AG) opracowała wspólnie z DB Netz AG główne uregulowania i wytyczne dla konstrukcji sztywnych nawierzchni bezpodсыpkowych, które stanowią:

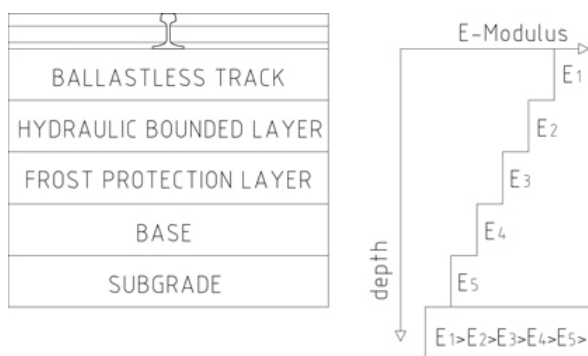
- Katalogi zawierające podstawowe wymagania dla systemów sztywnych nawierzchni bezpodсыpkowych;
- Wytyczna 804: mosty kolejowe oraz inne obiekty inżynierskie;

- Wytyczna 836: projektowanie, budowa i utrzymanie konstrukcji ziemnych.

Program rozpoznania geotechnicznych

Dla projektowania nowo budowanych linii kolejowych niezbędne jest stosowanie programu badawczego, w celu zapewnienia wysokiej jakości prac konstrukcyjnych. Zastosowanie programu rozpoznania geotechnicznych jest konieczne tak szybko, jak jest to możliwe, najpóźniej jednak w momencie rozpoczęcia etapu projektowania. Standardowym przepisem obowiązującym w Niemczech przy realizacji projektów kolejowych jest wytyczna Deutsche Bahn 836: Projektowanie i budowa konstrukcji ziemnych („Design and construction of earthwork”). Prowadzone rozpoznania mają na celu ustalenie geotechnicznych i hydrogeologicznych parametrów oraz parametrów dotyczących mechaniki gruntów.

Wykonywane badania muszą być przeprowadzane na tyle szczegółowo, by nie pozostawiały możliwości interpretacji uży-



1. Podstawowa konstrukcja i sztywność nawierzchni bezpodсыpkowych

skanych danych. Wyczerpujące rozpoznanie geotechniczne jest niezbędne dla projektantów i doradców, w celu zaprojektowania ekonomicznych i trwałych konstrukcji. Z tego względu firma SSF współpracuje od początku procesu projektowania ze specjalistami z dziedziny geotechniki.

Program rozpoznawczy geotechnicznych powinien opisywać rodzaj, stan i lokalizację badanego gruntu, płytę posadowienia oraz możliwości wykorzystania wydobytego gruntu, jako materiał konstrukcyjny do wykonywania nasypów kolejowych i innych konstrukcji ziemnych, łącznie z rozpoznaniem panujących stosunków wód gruntowych i określeniem warunków odwodnienia podtorza. Należy dokonać rozpoznania oraz analizy panujących stosunków hydrogeologicznych oraz oddziaływania na sąsiadujące obiekty inżynierskie.

Według wytycznej 836 Deutsche Bahn należy w taki sposób określić ilość przeprowadzanych bezpośrednich badań, żeby uwzględnione zostały w nich wszystkie rodzaje gruntu.

Dla każdego wykopu lub każdej sekcji budowlanej wymagane jest wykonanie przynajmniej trzech bezpośrednich rozpoznawczych badań gruntu budowlanego.

W celu uzyskania wiarygodnych wyników, co jest niezmiernie istotne w przypadku projektów kolei dużych prędkości, należy dokonać rozpoznania na głębokości minimum 5 m pod równią nasypu kolejowego, w zależności od homogeniczności gruntu. Odstęp pomiędzy wierceniami rozpoznawczymi powinien wynosić mniej niż 50 m. Odwierty badawcze należy wykonać po obu stronach projektowanej trasy toru. W przypadku, gdy grunt jest jednorodny, odstęp między wierceniami można zwiększyć do 100 m.

Osiadania

W przypadku budowy ziemnych mogą wystąpić sprężyste (odwracalne) i plastyczne (nieodwracalne) odkształcenia podłoża.

Sprężyste odkształcenia gruntu, często nazywane osiadaniami sprężystymi, powodowane są głównie przez obciążenia taborem kolejowym. Tego typu odkształcenia powracają do pierwotnego stanu, jak tylko na konstrukcję ziemną przestaje oddziaływać obciążenie.

Przejmowane przez konstrukcję szyn i podkładów oraz tłuczeń sprężyste odkształcenia obciążają głównie strukturę nośną. Aby naprężenie torów nie zostało przekroczone, należy ograniczyć obciążenia działające na szynę. Ograniczenie sprężystych deformacji nawierzchni może nastąpić przez zapewnienie odpowiedniej pojemności obciążeniowej systemu szyn oraz dzięki specjalnie, odpowiednio do wymaganej pojem-

ności obciążeniowej, zaprojektowanym warstwowemu ochronnym.

Nieodwracalne odkształcenia rozumiane są jako podnoszenie i osiadanie gruntu. Podnoszenie gruntu spowodowane jest zdolnością pęcznienia gruntu. Do dużych podnoszeń dojść może przykładowo przy wykonywaniu głębokich wykopów, wykonanych w warstwach gruntu o dużej zdolności pęcznienia. W warunkach obciążenia gruntu, zależnie od czasu oddziaływania obciążenia oraz zdolności filtracyjnych gruntu, dochodzi do nieodwracalnych osiadań i kompresji (kurczenia) gruntu. Każde obciążenie gruntu lub podłoża prowadzi do powstania osiadań i powoduje zagęszczenie gruntu w konstrukcji ziemnej oraz w podłożu. W przypadku, gdy osiadania są zbyt duże, może nastąpić ujemne oddziaływanie na konstrukcję szyn. Z tego powodu budowie ziemne należy konstruować w ten sposób, aby zminimalizować osiadania.

Istnieją 3 rodzaje osiadań:

- osiadanie gruntu,
- osiadanie nasypu kolejowego,
- osiadanie w wyniku obciążenia taborem kolejowym,
- podnoszenie w wyniku wykonania wykopów i odciążenia gruntu.

Największą część osiadań wynika z osiadań podłoża i samej konstrukcji ziemnej. Osiadania powodowane obciążeniem taboru kolejowego mogą, w porównaniu z powyższymi, zostać pominięte.

Dopuszczalne osiadania podczas eksploatacji kolei ograniczają się do 15 mm. Zastosowanie systemu sztywnej nawierzchni bezpodsypkowej umożliwia korektę położenia do 20 mm.

Najważniejszym zadaniem inżyniera, świadczącego usługi doradcze jest nie tylko przestrzeganie aktualnych przepisów, lecz również uwzględnianie przy projektowaniu najnowszego stanu techniki. Jedynie przy zastosowaniu sprawdzonych metod budowlanych oraz opracowaniu właściwego projektu, będącego podstawą realizacji inwestycji, można zapewnić wystąpienie niewielkich osiadań.

W obliczeniach osiadań stopień odkształcenia nie powinien zostać przekroczony. Wydobyty grunt może zostać użyty do bu-

dowy konstrukcji, jeśli:

- przewidywane odkształcenia i / lub stopień przesunięcia nie zostały przekroczone,
- odkształcenia nie prowadzą do uszkodzenia samego gruntu,
- odkształcenia nie mają wpływu na komfort jazdy i bezpieczeństwo,
- odkształcenia nie powodują uszkodzenia sąsiadujących konstrukcji, na które wpływa deformacja gruntu.

W celu stałego zapewnienia dokładnego położenia drogi torowej, należy przeprowadzić obliczenia osiadań i różnicy osiadań oraz dokonać ich redukcji do bezpiecznego poziomu, przy zastosowaniu odpowiednich działań konstrukcyjnych.

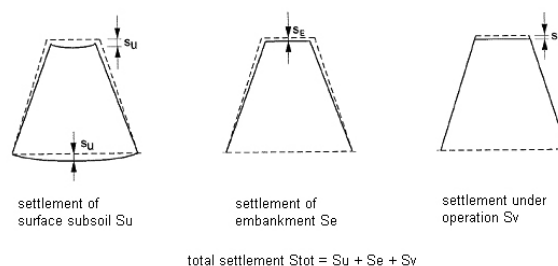
Spełnienie wymagań, dotyczących jakości gruntu, może spowodować zmniejszenie osiadań; osiadaniami nie można jednak całkowicie zapobiec. Ponadto należy ustalić występujące osiadania oraz porównać je z wartościami granicznymi zawartymi w wytycznych. Pomiaru i obserwacji osiadań należy dokonywać przy zastosowaniu odpowiedniego modelu. Obliczenia osiadań oraz ich analiza muszą zostać oparte na najnowszym krajowym i międzynarodowym rozpoznaniu i wytycznych. Ich wykonanie należy do doświadczonego zespołu inżynierskiego. Istotne przy tym jest ustalenie rozmiaru i przebiegu warstw gruntu w podłożu. Informacje te są niezbędne do sporządzenia prognozy ostatecznych osiadań.

Obserwacja i analiza osiadań

Generalnie ujmując, osiadania muszą być obserwowane. Osiadania należy postrzegać jako funkcję zarejestrowanych w czasie obciążeń. Obserwacja osiadań powinna zawierać wykres osiadań dla każdej warstwy gruntu, w celu możliwości ustalenia istotnego efektu osiadań. Program badawczy musi obejmować zarówno osiadania podłoża, jak i osiadania nasypów kolejowych.

Nasyp kolejowy

Najczęściej stosowaną konstrukcją ziemną jest nasyp. Nasyp, składający się z warstwy ochronnej oraz innych warstw wypełniających np. obszary przejściowe, musi być zbu-



2. Rodzaje osiadań w nasypach kolejowych

dowany w bardzo dokładny sposób, zgodnie z obowiązującymi przepisami. W celu zmniejszenia potencjalnych osiadań, warstwy i skarpy nasypu muszą być wykonane zgodnie z rysunkiem 3. W efekcie otrzymujemy konstrukcję ziemną o wysokiej stabilności i niewielkim osiadaniu, która posiada wystarczającą odporność na wpływ warunków atmosferycznych.

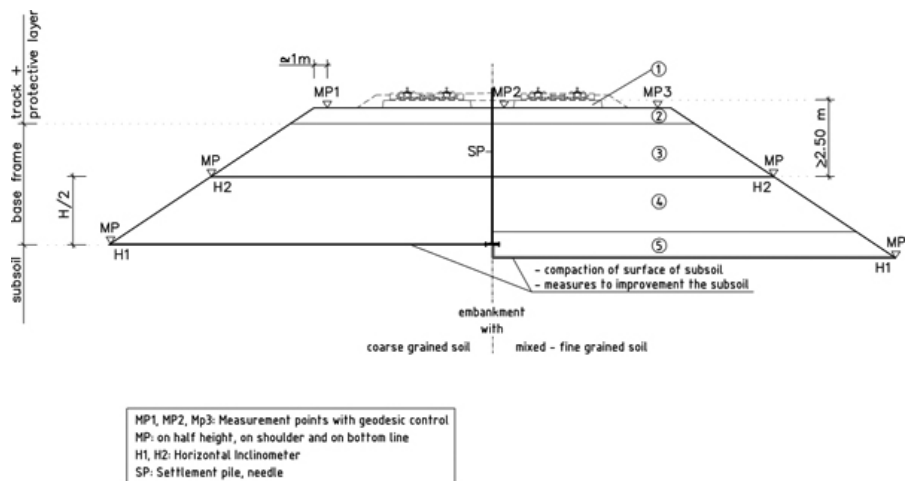
Unikać należy naprzemiennego układu warstw tj. jedna warstwa ziemi spójnej, druga warstwa ziemi niespójnej (układ warstwowy naprzemienny). Niemniej jednak, jeśli konieczne jest naprzemienne występowanie spójnej i niespójnej warstwy ziemi, wszystkie warstwy spójne budowane są z zachowaniem zewnętrznego nachylenia poprzecznego, wynoszącego 2,5 %. Ułożenie warstw przedstawione zostało na rys. 4. Standardowe przepisy dotyczące materiałów oraz stopień zagęszczenia zostały zdefiniowane.

Podłoże gruntowe musi być zagęszczone zgodnie z wymaganiami, aby uniknąć długoterminowego osiadania lub nawet spowodować przyspieszenie osiadań. Jeśli wymagania nie mogą zostać spełnione przy zastosowaniu standardowych metod zagęszczania lub gdy grunt o wymaganych parametrach nie jest dostępny, należy użyć metod wzmacniania podłoża gruntowego lub przyspieszających osiadanie. Istniejący grunt należy wymienić, jeśli jego nośność jest niewystarczająca. Grunt miękki, spisty i organiczny należy wymienić do głębokości przynajmniej 4 m poniżej górnej krawędzi szyny. Ponadto przy dokonywaniu obliczeń należy rozważyć i zweryfikować następstwa takich działań konstrukcyjnych jak wydobywanie gruntu, wypełnianie ziemią i/lub obniżenie poziomu wód gruntowych.

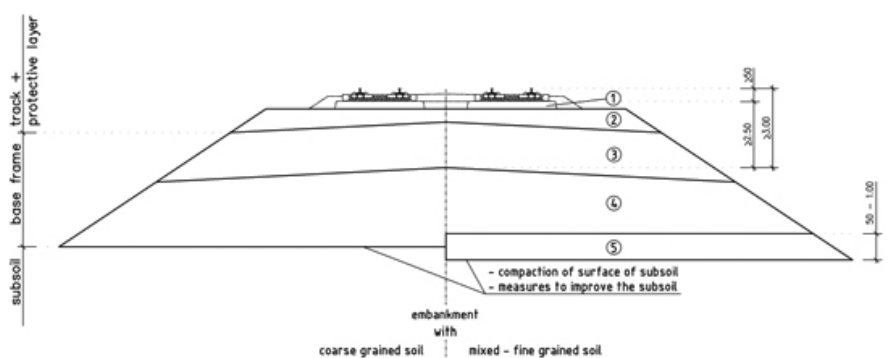
Przekopy pod linię kolejową

Również w odniesieniu do przekopów pod linię kolejową obowiązują te same surowe przepisy. Układ warstw został przedstawiony na rys. 5. Podobnie jak w przypadku wymogów stawianych nasypom, również dla przekopów należy zapewnić wymagany układ warstw i zagęszczanie gruntu na głębokości przynajmniej 3 m pod torowiskiem. Podłoże musi zapewniać trwałość w całym okresie użytkowania oraz wykazywać odpowiednią nośność i niewielkie osiadania. Miękki spisty grunt musi zostać zastąpiony lub należy zastosować inne metody do podtorza, aby uniknąć wpływu miękkiego gruntu na podłoże. Miękki grunt powoduje duże i niekontrolowane osiadanie konstrukcji, w zależności od ilości wody oraz zdolności odwadniania.

Metody wykonania posadowienia na miękkim gruncie są przeważnie skomplikowane. Dlatego też z warstwami miękkiego



3. Przekrój dla prowadzenia badań i obserwacji w nasypach kolejowych



Requirements:

| LAYER | KG | Ev2 | Ev4 | D _{pr} coarse grained soil | D _{pr} mixed-fine grained soil |
|--|----|-----------------------|----------------------|--|---|
| ① hydraulic bonded layer: HBL | — | — | — | — | — |
| ② frost protection layer: FPL | 2 | 120 MN/m ² | 50 MN/m ² | 1,00 | 1,00 |
| ③ subgrade material $\approx 3,00m$ | — | 60 MN/m ² | — | 1,00 GW, GI, GE, SW, SI | 1,00 GU, GT, SU, ST |
| ④ subgrade material | — | 45 MN/m ² | — | 0,98 | 1,00 GU, GT, SU, ST 0,97 and na $\leq 0,12$ GU, GT, SU, ST, UL, UM, TL |
| ⑤ if necessary improvement of surface of subsoil | — | — | — | — | 0,98 GW, GI, GE, SW, SI, SE |

4. Przekrój nasypu kolejowego

gruntu można sobie poradzić wykonując pale wiercone lub wbijane, w celu stworzenia posadowienia w głębszej warstwie gruntu o wystarczającej nośności. Zazwyczaj w przypadku przekopów pod linię kolejową potrzebny jest system drenażu po obydwu stronach toru. Kąt nachylenia skarpy musi być wykonany zgodnie z przepisami lub odpowiednio wzmocniony przy pomocy kotew, słupów lub innych umocnień.

Przejścia

Zmiana sztywności podtorza nawierzchni bezpodsypkowej musi następować rów-

nomiennie z podłoża sztywnego w miękkie i na odwrót, przebiegając przy tym przez warstwy gruntu o różnych parametrah osiadań i sztywności. Różnice osiadań między konstrukcjami o wysokiej sztywności takimi jak mosty, a strukturami charakteryzującymi się niską sztywnością jak nasypy kolejowe należy zmniejszyć poprzez zastosowanie specjalnych obszarów przejściowych. Konstrukcję mostu można potraktować jako nieciągłość nasypu. Sprężynowanie i osiadanie mogą się całkowicie różnić w takich miejscach przerwania ciągłości.

Na osiadanie mostu ma głównie wpływ sztywność posadowienia na palach, szaco-

wana na poziomie bliskim zero lub maksymalnie kilka milimetrów (< 2 mm) w czasie eksploatacji. Natomiast osiadania struktury ziemnej w czasie eksploatacji mogą osiągnąć maksymalnie 20 milimetrów. Aby złągodzić różnice na obszarze przejściowym bardzo ważne jest, aby wzmocnić podłoże pomiędzy sztywną i mniej sztywną konstrukcją torowiska. Każdy punkt nieciągłości sztywności wymaga specjalnego wymogu odnośnie przejścia.

Zazwyczaj w przypadku linii dużych prędkości istnieją następujące przejścia:

- konstrukcja ziemna – most,
- konstrukcja ziemna – tunel lub koryto,
- konstrukcja ziemna – przepusty,
- różne typy nawierzchni szynowej bezpodsytkowej,
- nawierzchnia szynowa bezpodsytkowa –
– nawierzchnia szynowa podsypkowa.

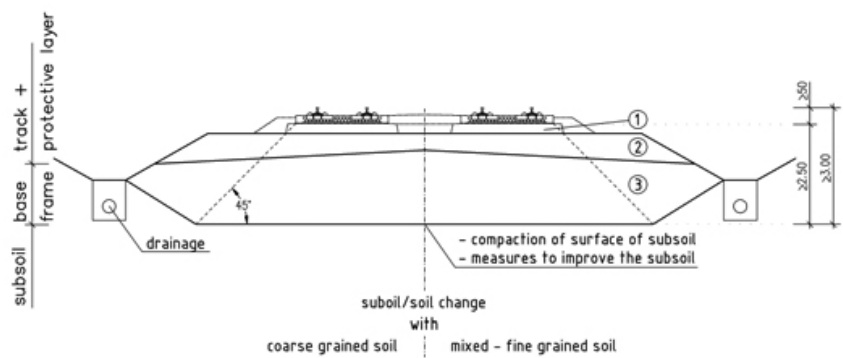
Standardowym rozwiązaniem dla obszarów przejściowych jest zastosowanie przejścia w formie klina, wbudowane po sztywniejszej stronie, pomiędzy podłożem, konstrukcją ziemną i warstwą elastyczną.

Długość umocnienia powinna być czterokrotnie większa od wysokości sąsiadującego obiektu inżynierskiego lub wysokości nasypu ($4 \times H$ lub minimum 20 m).

Dokładna forma klina przejściowego zależy od rodzaju podłoża i jego właściwości, np. nośności. Dla każdego z wymienionych rodzajów przejść obszary przejściowe muszą zostać zaplanowane w inny sposób. Główne parametry ich projektowania zawarte są w wytycznych kolei niemieckich Deutsche Bahn. Wymiarowanie z uwzględnieniem osiadań powinno zostać zaprojektowane i obliczone przez biuro inżynierskie. Przejście między strukturą ziemną a mostem pokazuje rysunek 6.

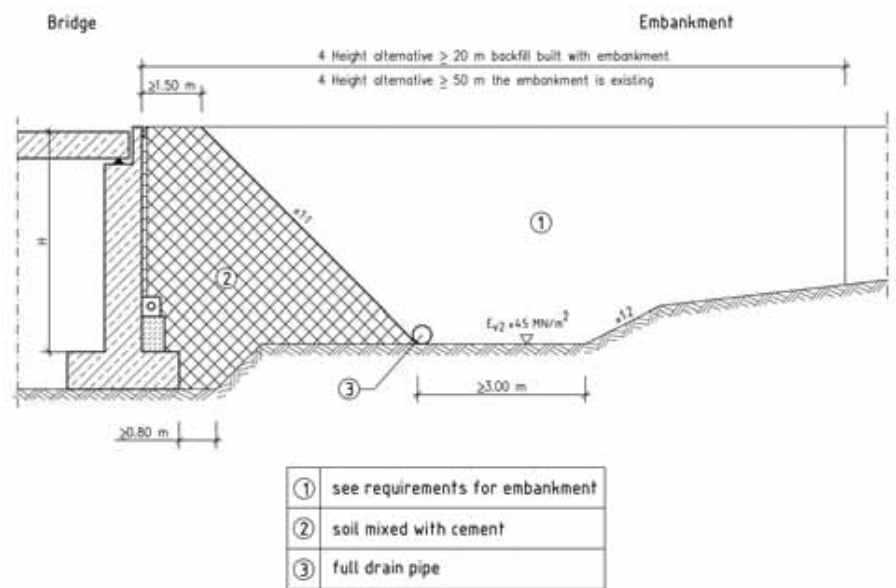
Aby uzyskać jednakowe osiadanie konstrukcji mostu i struktury ziemnej, obydwie budowle powinny mieć ten sam typ posadowienia. Z tyłu przyczółka mostu należy wykonać klin składający się z ziemi zmieszanej z cementem, o zawartości cementu 3 – 5%. Długość zasypki zależy od podłoża. Minimalna długość powinna wynosić czterokrotną wysokość nasypu lub ponad 20 m, gdy zasypka i nasyp powstają w tym samym czasie. Przejście: struktura ziemna – tunel lub koryto pokazuje rysunek 7.

Firma SSF opracowała niezawodny sposób na zmniejszenie różnicy sztywności między sztywną konstrukcją a torowiskiem posadowionym na gruncie rodzimym. Koncepcja projektowa polega na tym, aby zamieścić warstwę elastyczną (płytę piankową) pod nawierzchnią szynową bezpodsytkową, znajdującą się na końcu dolnej płyty betonowej. Minimalna długość płyty piankowej wynosi 3,50 m i skierowana jest bezpośrednio na dolną płytę tunelu lub koryta. W zależności od podłoża oraz jego nośności,



| | LAYERS | KG | E_{v2} | E_{vd} | D_{Pr} coarse grained | D_{Pr} mixed-fine grained |
|---|--------------------------------|----|-----------------------|----------------------|-------------------------|--|
| ① | hydraulic bonded layer: HBL | — | — | — | — | — |
| ② | frost protection layer: FPL | 2 | 120 MN/m ² | 50 MN/m ² | 1,00 | 1,00 |
| ③ | subgrade material $\geq 3,00m$ | — | 60 MN/m ² | — | 0,98 | 0,97 GU, GT, SU, ST 0,97 and $n_{a \leq 0,12}$ GU, GT, SU, ST, UL, UM, TL |

5. Przekrój przez przekop pod linię kolejową



6. Przejście między mostem a nasypem

należy wziąć pod uwagę zastosowanie 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 wart zastosowania. Wymiarowanie z uwzględnieniem osiadań powinno zostać zaprojektowane i obliczone przez biuro inżynierskie.

Inne rodzaje przejść

Przejście pomiędzy nawierzchnią szynową bezpodsytkową a nawierzchnią szynową podsypkową pokazuje rysunek 8.

Przejście pomiędzy zupełnie odmiennymi konstrukcjami torowiska – nawierzchnią szynową na podsypce, a nawierzchnią szynową bezpodsytkową – musi następować bezproblemowo, jeśli chodzi o ważną różnicę w sztywności systemów nawierzchni szynowych. Ten obszar przejściowy powinien zostać zaprojektowany przy użyciu modelu obliczeniowego dla zanikających osiadań. SSF specjalizuje 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 warstwy związanej spoiwem hydraulicznym 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 bezpodsypkowej.
- Zmniejszenie sztywności w punktach gdzie stosowane są złącza na nawierzchni bezpodsypkowej.
- Dopasowanie konstrukcji przyczółków w podłożu oraz zastosowanie klina ziemi wzbogaconej cementem, typowego materiału stosowanego jako zasyпка, o zawartości cementu 3 – 5%.

Przepusty w nasypie kolejowym

Przepusty w nasypie kolejowym prawie nie mają wpływu na osiadania, jeśli ich konstrukcja betonowa w podtorzu nasypu znajduje się na głębokości poniżej 3 m pod górną krawędzią szyny. Rozpiętość poniżej 2 m przy przykryciu większym niż 2,30 m oznacza brak zakłóceń osiadań i sztywności konstrukcji ziemnej. W kierunku podłużnym nie istnieje żadna rzeczywista różnica sztywności między nasypem kolejowym a przepustem.

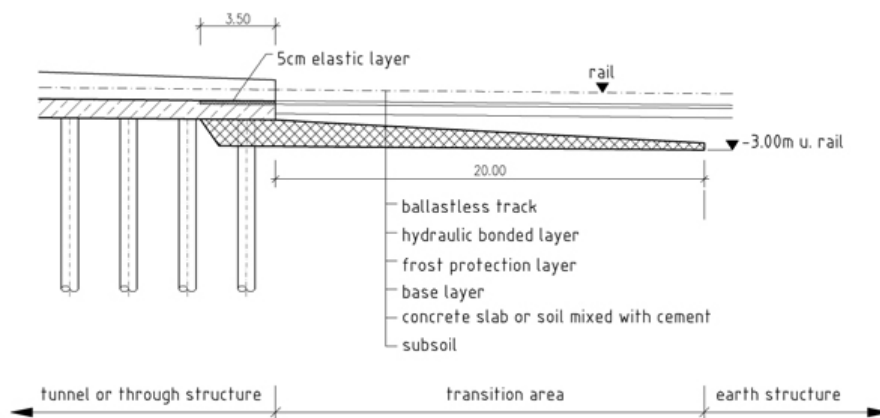
Rodzaje sztywnej nawierzchni bezpodsypkowej

Systemy sztywnych nawierzchni bezpodsypkowych mogą się różnić, w zależności od danego systemu, wysokością konstrukcji. Różnica wysokości konstrukcji musi zostać zrekompensowana przy zastosowaniu warstw przejściowych. I tak warstwa związana spoiwem hydraulicznym może być modyfikowana, w celu wyrównania różnicy wysokości. Stosowanie dodatkowych zabiegów w podłożu nie jest wymagane.

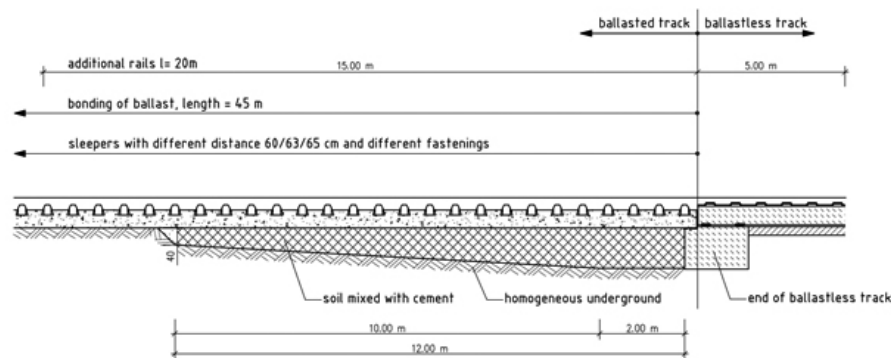
Konstrukcje na gruntach miękkich

Działania mające na celu przyspieszenie osiadań

Osiadania należy przyspieszyć w szczegó-



7. Przejście pomiędzy konstrukcją ziemną a tunelem lub korytem



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

ności na gruntach sponitych, w celu ograniczenia wartości granicznych dopuszczalnych osiadań. Nośność tego gruntu wzrasta bowiem, a jego ścisłość maleje wraz ze wrastającym odwadnianiem gruntu. Jedną z najskuteczniejszych metod, stosowanych do konsolidacji nasyconych, osadowych gruntów, jest metoda pionowego drenażu, połączona z obciążeniem gruntu.

Zdobyte przez SSF doświadczenie w zakresie świadczenia usług konsultingowych z obszaru posadowień na gruntach miękkich, może zostać zastosowane również przy wielu innych projektach budowlanych, zlokalizowanych na gruntach sponitych, charakteryzujących się słabą nośnością i konsolidacją (rodzaj gruntu glina, iły). Tego typu grunty (naturalne grunty aluwialne) charakteryzują się silnym osiadaaniem i konsolidacją w warunkach oddziaływania na nie obciążenia. Ze względu na ich słabą odporność na ścinanie, w wyniku procesu osiadań i konsolidacji gruntu może dojść do zachwiania stabilności gruntu.

Metoda konsolidacji gruntów sponitych polega na ich wstępnym obciążeniu. Sprawdzonej metodą służącą do minimalizowania przewidywanych osiadań jest wprowadzenie

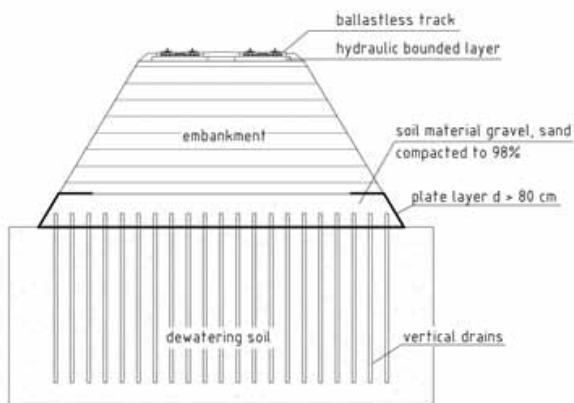
nie ekwiwalentnego wstępnego obciążenia przed budową danej konstrukcji. Grunty sponite charakteryzują się bardzo słabą przepuszczalnością, co oznacza, że długo może potrwać zanim związana woda wystąpi z gruntu.

Z tego powodu obciążenie stosuje się często w połączeniu z pionowym drenażem o typowym rozstawie 0,8 x 0,8 m do 2,0 x 2,0 m (rysunek 9 i 10).

Zastosowanie drenażu pionowego jest bardzo skuteczne na głębokościach ponad 10 m. W tych warunkach brzegowych rozstaw może ulec powiększeniu i może nastąpić zmniejszenie ilości koniecznych drenaży. Równocześnie bezpiecznie może zostać osiągnięty w ciągu danego czasu wstępnie określony stopień zagęszczenia gruntu.

Drenaże pionowe instalowane są w gruntach miękkich przy zastosowaniu metody zabijania drenów.

Rura drenażowa wprowadzona zostaje na wymaganą głębokość. Na końcu drenażu znajdują się specjalna stopa, za pomocą której rura drenażowa zostaje zakotwiona w gruncie. Po zakotwieniu rura osłonowa może zostać wyciągnięta.



9. Drenaż pionowy



10. Wykonywanie pionowego drenażu w gruncie miękkim - posadowienie nasypu kolejowego

Metody wzmocnienia podtorza

Na etapie projektowania często omawia się i wykonuje obliczenia dla wielu wariantów wzmocnienia podłoża przy użyciu różnych metod zagęszczania. Grunt jest zagęszczany poprzez pchanie ukośne otaczającej gleby. 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 polegająca na użyciu kolumn z mieszaniny cementu, popiołów lotnych i żwiru (CFG) oraz prostych kolumn z kamieni (rys. 11).

Do wykonania kolumn z CFG używa się świdra ziemnego w celu zbudowania kolumn cementowych poprzez przesunięcie otaczającego gruntu. Grunt z przemieszczeniem ukośnym wzmocnia 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.

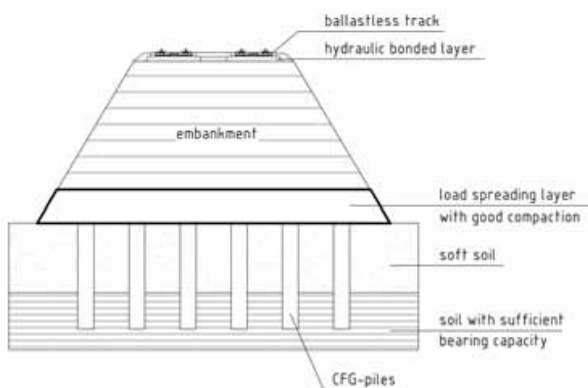
W przeciwieństwie do kolumn kamiennych, w przypadku kolumn z CFG nie ma ograniczeń, jeśli chodzi o naprężenie własne. W efekcie nie ma ryzyka, że obciążona kolumna ulegnie deformacji z powodu stanu podbudowy w otaczającym gruncie. Umiejętność kontroli efektywnego współczynnika zagęszczenia mleka cementowego pozwala na utrzymanie racjonalnego stosunku pomiędzy współczynnikiem gruntu, a kolumną. Jego opracowanie i obliczenie posłuży biurowi inżynierskiemu do wykonania obliczeń gruntu i charakterystyki projektu.

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

Nawierzchnia szynowa bezpodsytkowa na palach

Niezbędne są specjalne rozwiązania na odcinkach, gdzie występują trudności natury geotechnicznej bądź hydrologicznej, gdy zastosowanie innych metod nie jest możliwe lub jest zbyt drogie, lub też nieodpowiednie ze względu na grafik robót. Aby uniknąć problemu długookresowego osiadania oraz niewiadomego zagęszczania gruntu, bezpodsytkowa nawierzchnia szynowa może zostać zaprojektowana na palach.

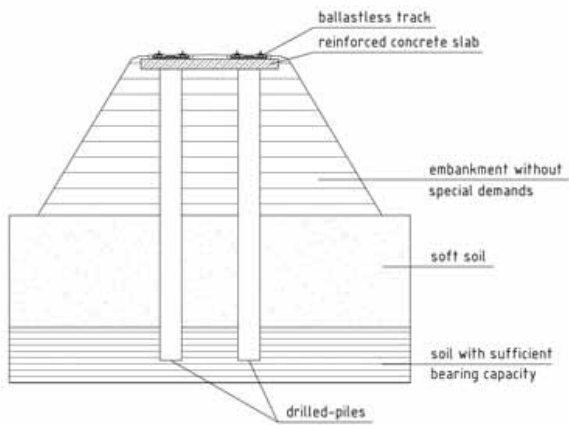
Główną cechą projektową tej metody, opracowanej przez SSF dla kolei dużych prędkości na odcinku Norymberga-Ingolstadt, jest to, że nawierzchnia szynowa jest wspierana przez płytę żelbetową, która posadowiona jest bezpośrednio na palach (rys. 12, rys. 13 oraz rys. 14). Ciężar własny i obciążenie dynamiczne powodowane przez przejeżdżające pociągi rozkładają się w płycie nawierzchni szynowej i są przejmowane przez płytę betonową. Obciążenie jest przenoszone na pale. W efekcie wszystkie siły wywołane przez szynę są przenoszone przez tę konstrukcję. Nie ma tutaj wpływu



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



12. Wbijanie pali na linii kolejowej relacji Norymbergia – Ingolstadt dla nawierzchni szynowej bezpodsytkowej



13. Przekrój nawierzchni bezpodsypkowej na palach



14. Wykonywanie systemu z wykorzystaniem płyt i pali dla nawierzchni szynowej bezpodsypkowej

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 ziemia użyta 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 gruntu użytego jako materiał w nasypie. W efekcie konstrukcja jest porównywalna do mostów pod względem osiadania i sztywności. Musi jednak zostać wykonane przejście do normalnego nasypu lub przekopu pod linię kolejową.

Podsumowanie

W aktualnych przepisach Deutsche Bahn AG, zawarte są podstawowe wytyczne dla projektowania typowych ziemnych konstrukcji budowlanych.

Jako uzupełnienie tych uregulowań wprowadzone i przedstawione zostały inne metody postępowania. Firma SSF Ingenieure przedstawiła model gruntu z istotnymi parametrami, do obliczania osiadań oraz osiadań w czasie. Na tym modelu rozpatrywany zostaje odcinek podłużny. Obliczenia uwzględniają właściwości osiadań oraz osiadania dla każdej budowli i obiektu budowlanego. W celu możliwości oceny akceptowalnych odkształceń sztywnej nawierzchni bezpodsypkowej, przed rozpoczęciem projektu należy sporządzić modele obliczeniowe dla całego odcinka oraz dokonać niezbędnych obliczeń.

Postępowanie takie prowadzi do powstania skutecznych i ekonomicznych konstrukcji ziemnych, umożliwiających obniżenie kosztów inwestycji i jednocześnie gwarantujących wysoką jakość konstrukcji. Zaprezentowane w artykule rozwiązania opracowane

zostały przy użyciu zintegrowanego modelu obliczeniowego.

Projektowanie w miękkich warstwach gruntu wykracza poza przypadki standardowe. W obszarach, w których występują grunty miękkie, dokonuje się z reguły wydobycia tych warstw gruntu. Efektywne skutki przynosi jedynie wymiana gruntu w pokaźnym zakresie. Dokonanie wydobycia tych warstw gruntu jest możliwe, jednak kosztowne. W celu uniknięcia wzrostu kosztów i transportu gruntu na dalekie odległości, opracowane zostały przez projektantów specjalne konstrukcje inżynierskie, które pozwalają rozwiązać ten problem.

Działaniami, jakie można podjąć w celu redukcji kosztów, jest zastosowanie systemu płyt i pali oraz kolumn żwirowych i popiołu lotnego, będących stosowną metodą dla rozwiązania problemów, panujących w tych warunkach.

W celu sprawdzenia wybranych metod konstrukcyjnych i działań, mających na celu poprawę nośności gruntu, konieczne jest przeprowadzenie całościowych obliczeń. Obliczenia te muszą zawierać prognozę osiadań oraz ocenę różnic osiadań.

Ze względu na występowanie dużej ilości krzyżowań nowobudowanych tras dużych prędkości z innymi drogami komunikacyjnymi, ich budowa wymaga zastosowania złożonych modeli obliczeniowych. Wiele różnych obiektów i konstrukcji na oraz pod linią kolejową musi zostać uwzględnionych w tych modelach. Mosty, tunele, koryta, nasypy kolejowe oraz inne budowle ziemne różnią się, bowiem osiadaniami i sztywnością. Między różnymi budowlami wymagane jest zastosowanie konstrukcji przejściowych, których konstrukcja jest tak samo złożona, jak w przypadku innych obiektów inżynierskich.

Opracowanie omawianych modeli, przeprowadzenie obliczeń osiadań oraz zaprojektowanie konstrukcji ziemnej należy powierzyć inżynierowi, który stworzy obiekt za-

pewniający wysoki komfort jazdy na budowanej w przyszłości trasie kolejowej, niskie koszty utrzymania i wysokie bezpieczeństwo. ◀

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, wrzesień 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, Dipl.-Ing. Christian Schmitt,
Dipl.-Ing. Dipl.-Betw. Matthias Scholz,
Dipl.-Ing. Andreas Röder,
Dipl.-Ing. Hermann Stoiberer
biuro inżynierskie SSF Ingenieure*