

## WYBRANE METODY OCENY STANU TECHNICZNEGO ODWODNIENIA PODTORZA

---

Mirosława Bazarnik

dr inż., Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, tel.: 48 12 628 2677, e-mail: mbazarnik@pk.edu.pl

---

**Streszczenie.** *Utrzymanie podtorza w stanie umożliwiającym prawidłową eksploatację i ciągłość ruchu kolejowego wymaga wydajnego i efektywnego systemu odwodnienia. Sprawne odprowadzanie wody wzdłuż torowisk, oprócz zasadniczego znaczenia dla trwałości i stateczności podtorza, wpływa na prawidłowe działanie rozjazdów, urządzeń SRK i innych urządzeń zasilanych prądem elektrycznym. Nieodpowiednia konstrukcja drenażu lub brak właściwego utrzymania i konserwacji może prowadzić do awarii, wpływając na bezpieczeństwo ruchu i wzrost kosztów utrzymania. Artykuł przedstawia możliwości wykorzystania do oceny stanu odwodnienia struktury torowiska nieniszczących metod pomiarowych, takich jak skanowanie laserowe 3D oraz georadar.*

**Słowa kluczowe:** *odwodnienie podtorza, skanowanie laserowe 3D, georadar*

### 1. Wprowadzenie

Nieprawidłowe funkcjonowanie drenażu jest wskazywane jako jeden z głównych czynników wystąpienia awarii podtorza [15]. Wydajność systemu odwadniającego wzdłuż nowobudowanych i modernizowanych odcinków nie budzi wątpliwości. Jednak dawno powstałe fragmenty dróg kolejowych projektowano z uwzględnieniem mniej rygorystycznych wytycznych, w wyniku czego nie spełniają one obecnie obowiązujących norm. Z reguły drenaż sprowadza się do powierzchniowych rowów i kanałów odwadniających - często o zmniejszonej przepustowości, wynikającej z braku regularnie prowadzonych prac serwisowych. Niewłaściwe odprowadzanie wody może powodować zaostrenie problemów związanych z utrzymaniem podtorza oraz wymagać dodatkowych nakładów finansowych - niewspółmiernych do poziomu konserwacji. Identyfikacja miejsc niedrożnych i stosowanie odpowiednio szybko środków zaradczych, w dłuższej perspektywie pozwala ograniczyć wydatki na utrzymanie podtorza.

W kontekście stabilności i trwałości infrastruktury torowiska kolejowego kluczową rolę odgrywają takie elementy, jak: zrozumienie czynników wpływających na poprawność funkcjonowania systemu, rozpoznanie interakcji pomiędzy wgłębnym i powierzchniowym systemem drenażowym, właściwe rozpoznanie objawów niedostatecznego odwadniania podtorza oraz odpowiednia diagnostyka przyczyn awarii. W praktyce inżynierskiej brakuje precyzyjnych wytycznych, dotyczących

identyfikacji awarii na wczesnym etapie. Odpowiednio szybka i precyzyjna detekcja zmian pozwoliłaby na prawidłowe określenie zakresu wymaganych prac naprawczych i konserwacyjnych.

## 2. Woda a własności mechaniczne ośrodka gruntowego i podtorza

Negatywny wpływ wody na mechaniczne zachowanie się elementów strukturalnych drogi kolejowej został wykazany w licznych publikacjach [2,4,5,7,9,11,15]: niewłaściwe odprowadzenie wody może prowadzić do wzrostu ciśnienia w porach, powodując zmniejszenie wytrzymałości na ścinanie oraz nośności podtorza. Skutki niedostatecznego odwodnienia zależą od kształtu, wymiarów konstrukcji oraz miejscowych warunków gruntowo - wodnych, a także warunków meteorologicznych [15].

Podtorze oraz leżące pod nim warstwy gruntu są obciążone ruchem kolejowym. Na własności mechaniczne torowiska wpływają: stan początkowy, warunki hydrogeologiczne, temperatura oraz migracja wody (wilgoci) w wyniku oddziaływania atmosferycznego. Zmiany stosunków wodnych, w tym wzrost wilgoci, np.: na skutek opadów atmosferycznych, fluktuacji wilgotności względnej czy temperatury są odpowiedzialne za takie zjawiska jak infiltracja oraz parowanie, powodujące zmienność zawartości wody w gruncie. W przypadku torowisk kolejowych warstwy gruntu są zwykle nienasycone. Procesy obejmujące przepływ wody przez grunty nienasycone są złożone i trudne do oszacowania. Zagadnienie przepływu wody w tych warunkach były przedmiotem wielu rozważań [6,7,8,17]. W przypadku gruntów nienasyconych obecność w porach gruntowych zarówno wody, jak i powietrza, sprawia, że całkowita zmiana objętości próbki gruntu nie jest równa objętości wody odpływającej z porów. Zmiany objętościowe (pęcznienie czy osiadanie) z jednej strony zależą od sztywności ośrodka gruntowego, na którą wpływ ma wartość ciśnienia ssania i stan naprężenia, jak również od przepuszczalności wody i powietrza w zależności od wskaźnika porowatości i stopnia nasycenia ośrodka gruntowego [16]. Wnikanie wody do zagęszczonego, nienasyconego materiału zwiększa ciśnienie wody lub zmniejsza zasysanie, tym samym zmieniając efektywne ciśnienie kierunkowe i wpływając na zmiany wytrzymałości i sztywności warstw podbudowy i podłoża. Spadek wytrzymałości i sztywności może doprowadzić do deformacji powierzchni i wpłynąć na tempo pogarszania się stanu jakościowego linii kolejowej. Skutki negatywnego wpływu wody najbardziej zauważalne są dla słabo zagęszczonego materiału ziarnistego (w wyniku zmniejszenia wytrzymałości na ścinanie) oraz glin spoistych - pęczniejących (w wyniku szkodliwych zmian objętości) [18].

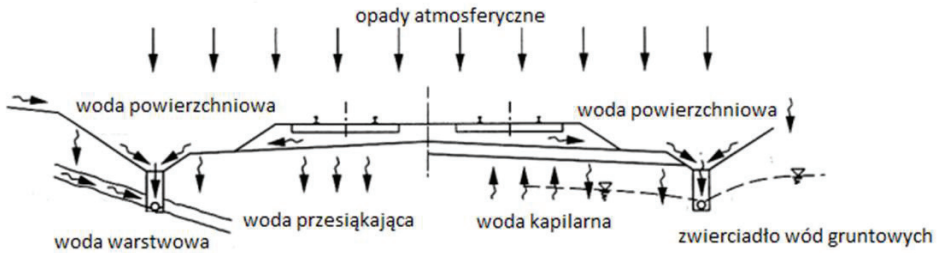
Przytoczone na podstawie danych literaturowych zagadnienia wpływu wody na własności mechaniczne ośrodka gruntowego pokazują jak istotną rolę odgrywa prawidłowe odprowadzanie wody i niedopuszczanie do jej przenikania w głąb struktury podtorza.

### 3. Odwodnienie podtorza

Głównym zadaniem odwodnienia podtorza jest zbieranie i odprowadzenie wód pochodzących z różnych źródeł (rys. 1) oraz przeciwdziałanie ich gromadzeniu się w obrębie konstrukcji jezdni kolejowej i korpusu budowli ziemnej [13].

Rodzaje wód i ich wpływ na strukturę podtorza przedstawiono schematycznie w tab. 1. Można wyróżnić [15]:

1. Wody powierzchniowe (opadowe, płynące i stojące);
2. Wody podziemne (przeływające, stagnujące, podsiąkające i infiltracyjne);
3. Wody gruntowe w przypowierzchniowych warstwach gruntu.



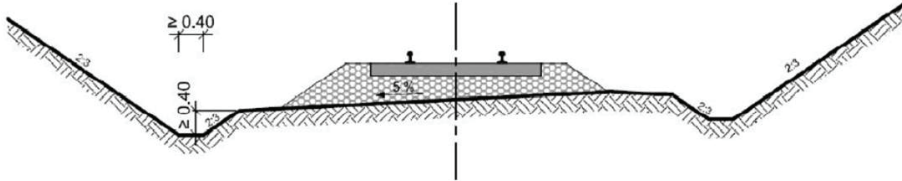
Rys 1. Schemat przepływu wód w podtorzu

Tabela 1. Wpływ wód na podtorze [15]

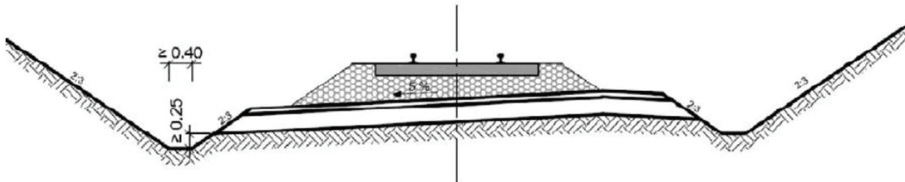
Rodzaj wód	Wpływ na podtorze
Wody powierzchniowe (opadowe, płynące i stojące)	Ablacja deszczowa (zmywanie gruntu ze skarpy lub stoku przez wody deszczowe), erozja, rozmycia i podmycia podtorza, podtopienia i zalania podtorza i toru
Wody podziemne (przeływające, stagnujące, podsiąkające i infiltracyjne)	Zwiększenie masy gruntu i jego obciążeń, zwiększenie sił działających na budowlę, zmniejszenie wytrzymałości gruntów spoistych z powodu ich zawilgoceń, zjawiska tiksotropii (upłynniania gruntów i zmniejszanie ich wytrzymałości pod wpływem drgań), zwiększone osiadania podłoża i podtorza, rozpelzanie nasypów, osuwiska
Wody w przypowierzchniowych warstwach gruntu	Odształcenia torowiska (koryta poprzeczne, niecki, worki i gniazda podsypkowe), wychłapki, wysadziny, soliflukcja gruntu skarp (powolne spęływanie gruntu na skarpach i stokach, m.in. na skutek okresowych zmian temperatury oraz przemarzania i odmarzania gruntu).

Wymagania dotyczące odwadniania podtorza ujęte są w Instrukcji Id-3, w sprawie warunków technicznych utrzymania podtorza kolejowego [19]. Zgodnie z instrukcją odwodnienie podtorza oraz znajdujących się w nim budowli i urządzeń powinno polegać na: właściwym ułożeniu przepuszczalnych i nieprzepuszczalnych gruntów w budowlu wraz z nadaniem im odpowiedniego kształtu oraz zastosowaniu niezbędnych urządzeń odwadniających (zbierających i odprowadzających wody

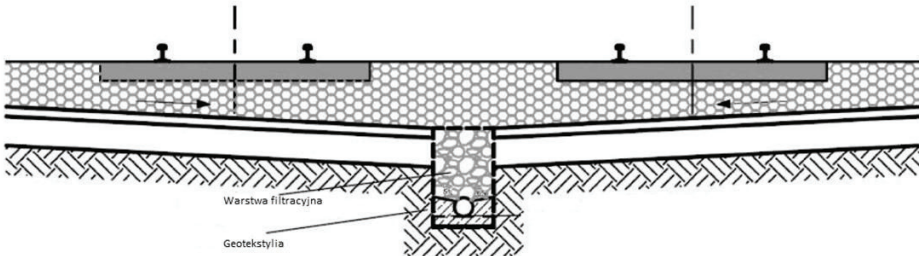
powierzchniowe i podziemne, chroniących podtorze przed podtopieniem i niszczącym działaniem wód sąsiadujących (cieków i zbiorników) [19]. W Polsce zasadniczym sposobem odwadniania jest odwodnienie powierzchniowe, realizowane przez stosowanie: drenaży liniowych naziemnych (rowy i korytka), drenaży liniowych podziemnych (ciągi drenarskie rurowe i sączi) oraz drenaży płytowych (warstwy filtracyjne torowiska). Przykłady odwodnień przedstawiono na rysunkach 2, 3 i 4.



Rys 2. Rów w przekroju poprzecznym przy konstrukcji nawierzchni bez warstwy ochronnej [20]



Rys 3. Rów w przekroju poprzecznym przy konstrukcji nawierzchni z warstwą ochronną [20]



Rys 3. Drenaż usytuowany między dwoma torami linii wielotorowej z ciągłym podłożem tłuczniowym [20]

Elementami składowymi odwodnienia linii kolejowych mogą być: rowy podłużne równoległe do trasy linii kolejowej, rowy stokowe, rowy opaskowe, odwodnienie wglębne i głębokie, ciągi drenarskie z przewodem rurowym lub bez, studnie kanalizacyjne i drenarskie, urządzenia retencyjne, geotekstylia, oraz filtry i drenaże o specjalnej budowie.

Do podstawowych mechanizmów awarii drenażu wglębnego lub powierzchniowego torów kolejowych można zaliczyć: blokowanie, kolapsację, uszkodzenia warstwy filtracyjnej oraz spadek wydajności [18].

1. Blokowanie - rury mają tendencję do zatykania się ze względu na nagromadzenie mułu oraz zarastania roślinnością. Do blokowania drenów i rowów mogą przyczynić się min.: erozja brzegów i zapaść, wegetacja roślinności, zamulanie oraz zmiany w gradiencie spadku.
2. Kolapsacja - zawalenie, spękanie lub zdeformowanie rur, studni lub włązów. Kolapsacja podpowierzchniowej infrastruktury odwadniającej może być spowodowana przez korozję materiału lub uszkodzenie w wyniku ruchu pojazdów. Często do zaostżenia zjawiska dochodzi w wyniku dynamicznego oddziaływania ruchu pociągów.
3. Uszkodzenia warstwy filtracyjnej - w konstrukcji torowiska kolejowego warstwa filtracyjna jest często umieszczana jako separator pomiędzy warstwami podtorza i podłoża lub podsypki, zarówno w celu odprowadzania wody na boki, jak i zapobiegania migracji drobnych cząstek w górę. Jednak warstwa ta może zostać zatkana przez nagromadzenie drobnych cząstek na powierzchni geowłókniny. To z kolei hamuje przenikanie wody do warstwy filtrującej. Pomimo dobrej przepustowości rur, zatkana warstwa filtracyjna spowoduje, że woda pozostanie na powierzchni toru lub nasyci grunt.
4. Wydajność - niekiedy urządzenia odprowadzające wodę mają zbyt niską wydajność, co może być spowodowane zmianą gradientu spadku, nieodpowiednią do wielkości spływu rur, niewystarczającą głębokością wykopów i studzienek, osiadaniami podłoża lub zakłóceniami struktury, niewłaściwym zaprojektowaniem.

Liczne przykłady wad odwodnienia zaprezentował E. Skrzyński w swoim artykule [15] – (rys. 5).



Rys. 5. Przykłady wad odwodnienia: zarośnięty rów odwadniający (po lewej) oraz niedrożny przepust (po prawej) [15]

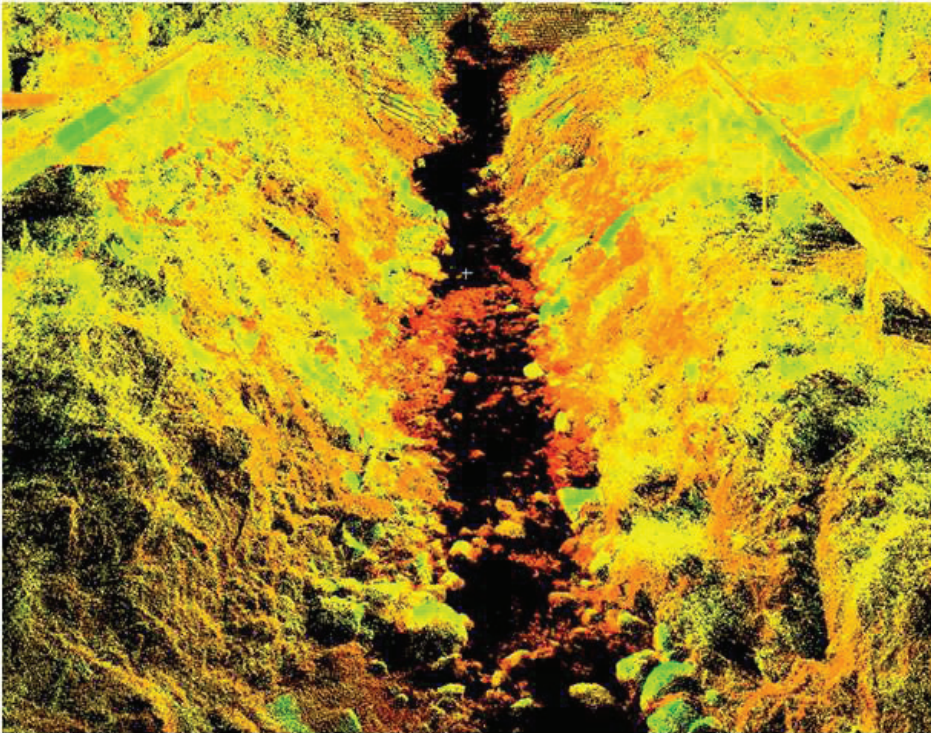
#### 4. Technika skanowania laserowego 3D

Technika skanowania laserowego 3D może być bardzo skutecznym narzędziem w analizie prawidłowego utrzymania elementów odwadniających torowisko (drenażu powierzchniowego) oraz określenia geometrii podtorza. Skanery laserowe zaliczane są do grupy aktywnych systemów teledetekcyjnych, działających na zasadzie pomiaru kierunku oraz odległości celu od urządzenia. Wyposażone są w układ

optyczny, który z zadaną częstotliwością, emituje wiązki światłne o ustalonej długości fali i określonym kierunku. Każde odbicie od przeszkody jest rejestrowane jako położenie punktu w przestrzeni, któremu przypisane są współrzędne X, Y, Z – początkowo w układzie lokalnym skanera, a następnie w docelowym układzie współrzędnych geodezyjnych prostokątnych płaskich. Efektem pomiaru jest zbiór punktów tzw. chmura punktów (z ang. point clouds), posiadających współrzędne geodezyjne oraz parametry intensywności odbicia [3]. Dzięki możliwości zamontowania skanera laserowego na platformie mobilnej pomiar obiektów infrastruktury odwadniającej wzdłuż linii kolejowej realizowany jest bez konieczności wstrzymania ruchu i z minimalną ingerencją w jego płynność. Pomiar wykonywany jest o wiele szybciej niż w przypadku metod tradycyjnych oraz pozwala na automatyzację wielu procesów obliczeniowych. Zastosowanie specjalistycznych narzędzi graficznych, opartych na zaawansowanych algorytmach obliczeniowych, pozwala na zamianę modeli punktowych w postać geometryczną, która w pełni oddaje charakter i formę inwentaryzowanych obiektów. Na podstawie uzyskanych chmur punktów opracowuje się tradycyjny model w postaci nieregularnej siatki trójkątów, których duża gęstość pozwala na generowanie modeli numerycznych. Z wygenerowanych powierzchni 3D możliwe jest wyodrębnienie profili 2D lub linii konturowych obiektów [3]. Technika skanowania pozwala na precyzyjne odwzorowanie geometrii badanego obiektu, a co za tym idzie, uchwycenie nawet niewielkich deformacji, zmian w mikrorzeźbie, procesów erozji i depozycji (rys. 6). Umożliwia określenie poprawności geometrycznej nasypów kolejowych oraz rowów i studzienek odwadniających. Pozwala na sprawdzenie gradientów i spadków hydraulicznych, określenie poziomu dna rowu odwadniającego i stanu uszkodzenia. Umożliwia wykrywanie lokalnych przewężeń spowodowanych deformacją, zarastaniem przez roślinność lub depozycją materiału. Wykonanie profili poprzecznych nasypów kolejowych daje możliwość określenia kształtu deformacji oraz zidentyfikowania przeszkód mogących zaburzać odpływ wody z torowiska. Możliwe jest zatem wyznaczenie dokładnych parametrów deformacji obiektów odwadniających wraz z prognozą ewolucji zachodzących procesów. Pozwala także na rozróżnianie różnych struktur materiałowych wynikających z tzw. intensywności odbicia wiązki sygnału pomiarowego.

Koncepcja wykorzystania skanowania laserowego do badania procesów deformacji opiera się na wykonaniu skanowania obiektu w kolejnych momentach czasowych  $T_i$ , zwłaszcza w okresach nasilenia zjawisk atmosferycznych i związanej z nimi erozji liniowej, np. po ulewnych deszczach, czy w czasie wiosennych roztopów [3]. W wyniku nałożenia na siebie dwóch skanów w lokalnym (jednakże tym samym) układzie współrzędnych geodezyjnych, tworzony jest model różnicowy. Modele wykonane w poszczególnych momentach czasu  $T_i$  powinny mieć jednakową rozdzielczość oraz dokładność. Na podstawie modelu różnicowego mogą być określane zmiany przepustowości (pojemności kanału) związane z procesami erozji/depozycji oraz formułowane prognozy rozwoju zachodzących zjawisk. Dzięki możliwości filtrowania sygnału odbitego od przeszkód w postaci roślinności uzyskujemy informacje o rzeczywistym ukształtowaniu obiektu nawet jeśli pokrywa

roślinna maskuje drobne defekty w mikrorzeźbie (tzw. chropowatość powierzchni) rowu odwadniającego [1]. Chropowatość jest kolejnym ważnym parametrem środowiskowym ponieważ wpływa na hydraulikę kanału poprzez zmianę prędkości przepływu i turbulencji. Zwiększona chropowatość spowalnia prędkość przepływu, wpływając w ten sposób na zdolność do erozji i transportu osadów [1]. Dzięki technice skanowania laserowego uzyskujemy możliwość oceny zjawisk zarówno pod kątem natężenia procesów, jak i zdarzeń inicjujących, a także zasięgu obszarowego ich występowania. Korzystanie z techniki skanowania laserowego wiąże się z koniecznością opracowania metodyki badań, doboru skanera, powiązania z układem odniesienia (ogólnym lub własnym obiektu), a także ustalenia rozdzielczości przestrzennej wykonywanej inwentaryzacji.

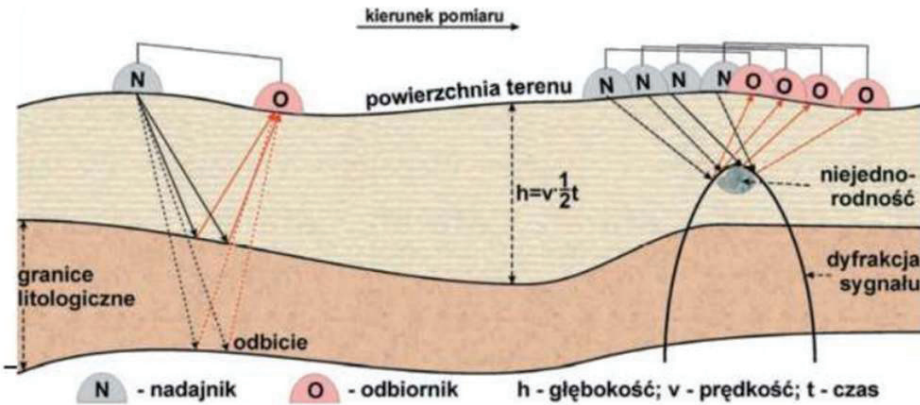


Rys. 6. Przykład zobrazowania rowu odwadniającego przy użyciu skanowania laserowego 3D [1]

## 5. Metoda georadarowa

Metoda georadarowa (GPR, ang. Ground Penetrating Radar) jest to wysokorozdzielcza, mobilna metoda geofizyczna, która pozwala na odzwierciedlenie struktury badanego ośrodka wraz z całą infrastrukturą podziemną [10,12]. Dostarcza informacji o przebiegu oraz wzajemnym rozkładzie struktur i obiektów podpowierzchniowych. Interpretacja uzyskanych danych umożliwia szacunkowe

określenie głębokości, wielkości, kształtu obiektów, a także w przybliżeniu materiału, z którego zostały wykonane. Jest to metoda nieniszcząca, która może być stosowana min. w badaniach linii kolejowych, mostów oraz obiektów środowiskowych. Pomiar georadarowy jest bardzo czułą metodą, wykorzystującą zjawisko odbicia impulsów fal radiowych na granicach fizycznych, różniących się wartościami stałej dielektrycznej i przewodności elektrycznej. Im kontrast między prędkością rozchodzenia się fali w obiekcie, a prędkością rozchodzenia się fali w otaczającym ośrodku jest większy, tym jest wyraźniejszy odczyt [12]. Pozwala to na zidentyfikowanie w gruncie np. obiektów drewnianych, kamiennych, metalowych czy betonowych, a także określenie ich położenia i głębokości naruszenia struktury oraz zmian. Zazwyczaj pomiar georadarowy wykonuje się tzw. powierzchniową metodą refleksyjną (odbicie sygnału) - gdzie nadajnik i odbiornik w stałej odległości od siebie przemieszczają się regularnie po powierzchni terenu, a punkt odbicia i pojedyncza trasa pomiarowa echa leży w połowie odległości między nadajnikiem i odbiornikiem, według schematu przedstawionego na rys. 7.



Rys 7. Schemat pomiaru metodą refleksyjną [10]

Istnieje wiele różnych długości fal elektromagnetycznych i częstotliwości anten, które mogą być wykorzystywane w badaniach GPR w zależności od tego, co badamy. W badaniach nawierzchni lub badaniach górnej części konstrukcji nawierzchni zaleca się stosowanie anteny o wysokiej częstotliwości (krótka długość fali), ponieważ zapewnia dane o wyższej rozdzielczości, dzięki którym użytkownik może rozróżnić cienkie warstwy. Głębokość penetracji dla wysokich częstotliwości anten (1,0 - 2,5 GHz) wynosi w przybliżeniu 0,5-1,2 m, a dla anten o niższej częstotliwości (400-500 MHz) wynosi około 1,5 - 4,0 m.

Badania GPR mogą posłużyć do wstępnego rozpoznania podłoża, lokalizacji ewentualnych zmian anomalnych np. stref rozluźnień w korpusie podtorza linii kolejowej oraz rozpoznania infrastruktury podziemnej, znajdującej się w bezpośrednim sąsiedztwie konstrukcji podtorza w tym drenażu wgłębny. Metoda GPR stanowi dobre narzędzie do identyfikacji wad podtorza, wynikających z nieprawidłowego odprowadzania wody, takich jak niecki, worki i gniazda podsypkowe,



wysadziny, płaszczyzny ścięć i osunięć skarp nasypów czy przekopów, sufozji, podcieków i zastoisk wodnych [10]. Bezinwazyjne badania georadarowe zapewniają w bardzo krótkim czasie informacje dotyczące stanu i struktury podtorza i podłoża bez wpływu na infrastrukturę kolejową. Pomiaru są szybkie, prowadzone przy użyciu poręcznego, łatwego w transporcie sprzętu, który przy wielokilometrowych pomiarach może być adaptowany do pojazdów szynowych. Pozwala to na mapowanie podziemnych sieci komunalnych (zarówno plastikowych /PE-HDPEPVC/, jak metalowych, żelbetowych itp.), lokalizację struktur podziemnych jak kanały i rury odwadniające, kolektory oraz wykrywanie zapadlisk i osiadań, a także analizę położenia zwierciadła wód gruntowych. Rezultatem badania georadarowego jest obraz strukturalny podtorza i podłoża linii kolejowej, bazujący na ciągłym pomiarze, a nie na interpolacji wyników z badań punktowych.

## 6. Podsumowanie

W artykule omówiono wpływ sprawnego działania systemu odwodnienia dla utrzymania podtorza kolejowego oraz możliwości zastosowania nowoczesnych niszczących technik pomiarowych do oceny stanu istniejącej struktury drenażowej. Szybka ocena zagrożeń wynikających ze złego odprowadzania wody i wilgoci ma kluczowe znaczenie dla utrzymania linii kolejowej i prowadzenia prac konserwacyjnych. Konieczne jest zwrócenie większej niż dotychczas uwagi na działania prewencyjne, polegające m.in. na: prowadzeniu systematycznego monitoringu i kontroli drożności urządzeń odwadniających. Omówione techniki pomiarowe pozwalają na szybkie rozpoznanie stanu podtorza i odwodnienia, a także identyfikację czynników stanowiących przyczynę awarii. Zarówno technika skanowania laserowego jak i GPR pozwalają na sprawne wykonanie pomiarów, dostarczających szerokiej gamy informacji np.: o geometrii rowów i kanałów odwadniających, detekcji spękań, przewężeń, miejsc kolapsacji, obecności miejsc niedrożnych.

Zaletą omawianych metod jest możliwość archiwizowania i przetwarzania danych, co umożliwia prawidłową interpretację zachodzących zjawisk i jest przydatne w kontroli, a także analizie zachodzących zmian.

## Bibliografia

- [1] Allred B. J. Redman J. D., (2010) Location of Agricultural Drainage Pipes and Assessment of Agricultural Drainage Pipe Conditions Using Ground Penetrating Radar *Journal of Environmental & Engineering Geophysics* 15(3) DOI: 10.2113/JEEG15.3.119.
- [2] Alobaidi I., Hoare D., (1994) Factors affecting the pumping of fines at the sub-grade—subbase interface of highway pavements. *A laboratory study*, *Geosynth. nt.*, 1 (2) (1994), pp. 221-259.

- [3] Bazarnik M., Możliwości aplikacyjne techniki naziemnego skanowania laserowego 3D w rekultywacji terenów górniczych, *Zeszyty Naukowe - Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN* 94, 149-160 (2016).
- [4] Brough, M.J., Ghataora, G., Stirling, A.B., et al. (2006) Investigation of railway track subgrade. Part 2: Case study. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport*, 159: (2): 83- 92.
- [5] Brough, M.J., Ghataora, G.S., Stirling, A.B., et al. (2003) Investigation of railway track subgrade. I: In-situ assessment. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport*, 156: (3): 145-154.
- [6] Cui Y. J., (2016) Unsaturated railway track-bed materials, *E3S Web of Conferences e3sconf/20160901001* 9, 01001 DOI: 10.1051/E- 2016.
- [7] Duong T. V., Tang A. M., Cui Y. J., NamTrinh V., Dupla J. C., Calon N., Canou J., Robinet A., (2013) Effects of fines and water contents on the mechanical behavior of interlayer soil in ancient railway sub-structure, *Soils and Foundations* vol. 53, (6), 2013, pp. 868-878 doi.org/10.1016/j.sandf.2013.10.006.
- [8] Fredlund D. G., Rahardjo H., *Soil mechanics for unsaturated soils*. John Wiley and Sons, INC, New York, 1993.
- [9] Indraratna B., Ionescu D., Christie H. D., (1998) Shear behavior of railway ballast based on large-scale triaxial tests *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 124 (5) (1998), pp. 439-449.
- [10] Kiszka P., (2008) Kompleksowe badania stanu technicznego podtorza i podłoża kolejowego. Wykorzystanie profilowania georadarowego w korelacji z klasycznymi badaniami geotechnicznymi. Materiały konferencyjne konferencji naukowo-technicznej „Problemy modernizacji i naprawy podtorza kolejowego”, s 35-52, Żmigród, 2008.
- [11] Li, Hyslip, J.P, Sussmann, T.R., et al. (2015) *Fault Tree for Poor Drainage Mechanisms of Railway Ballasted Track*, *Railway geotechnics*. CRC Press.
- [12] Maślakowski M., Zbiciak A., Józefiak K., Piotrowski T., (2015) Diagnostyka stanu podłoża i podtorza kolejowego metodą georadarową (GPR), *Badania* 12/2015 1045.
- [13] Mazurkiewicz R., *Odwodnienie stacyjnych torów przyperonowych*, *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej* 2005 Seria: Budownictwo z. 103 Nr kol. 1692
- [14] Moço Ferreira T., Fonseca Teixeira P., (2018) Impact of different drainage solutions in the behavior of railway trackbed layers due to atmospheric actions, *Challenge G: An even more competitive and cost efficient railway*, *Proceeding of World Congress of Railway Research*, 1-14, [http://railway-research.org/IMG/pdf/g1\\_texteira\\_paulo.pdf](http://railway-research.org/IMG/pdf/g1_texteira_paulo.pdf).
- [15] Skrzyński E., (2017) *Odwodnienie i jego wpływ na stabilność podtorza kolejowego*, *Prace Instytutu Kolejnictwa – Zeszyt* 153 (2017) 33-39.

- 
- [16] Skutnik Z., (2015) Budownictwa i Inżynierii Środowiska Badania gruntów nienasyconych – dotychczasowe doświadczenia i perspektywy rozwoju, Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 3/2015 2015-3\_176-185.
- [17] Tisler W., Szymkiewicz A., Ossowski R., (2014) Właściwości retencyjne, przewodność hydrauliczna i naprężenia efektywne w gruntach nienasyconych <http://iks.pn.sggw.pl/z31/art13.pdf>.
- [18] Usman K., Burrow M. P. N., Ghataora G. S., et al. (2017) Fault Tree for Poor Drainage Mechanisms of Railway Ballasted Track, Conference: Railway Engineering 2017 DOI: 10.25084/raileng.2017.0042.
- [19] Warunki techniczne utrzymania podtorza kolejowego Id-3. Załącznik do Zarządzenia nr 9 Zarządu PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. z dnia 4 maja 2009 r.
- [20] <https://odwodnienie.konferencjespecjalistyczne.pl/images/PDFy/Prezentacje/Odwodnienie20drog20kolejowych20w20Niemczech.20Ogolne20zasady20odwodnienia20kolei20oraz20stosowane20do20tego20celu20urzedzenia20odwadniajace-br1.pdf>.

