

Urządzenia zakończenia torów kolejowych

Dariusz KOWALCZYK¹

Streszczenie

Urządzenia zakończenia torów, są bardzo ważnymi konstrukcjami nie tylko w transporcie kolejowym. W artykule przedstawiono i opisano kilka przypadków zdarzeń najazdu pojazdów na urządzenia zakończenia torów (kozy oporowe, ang. buffer stop), w których wykazano istotny wpływ tych urządzeń na bezpieczeństwo, skuteczność ich konstrukcji oraz ograniczenie zniszczeń. Dokonano analizy wymagań urządzeń o starych konstrukcjach zakończenia torów według BN-79 9310-06 „Kozy oporowe” oraz obecnie obowiązujących przepisów. Przedstawiono wytyczne dla nowych projektowanych konstrukcji zakończenia toru, obowiązujących na liniach kolejowych PKP PLK, które opisano w dokumencie „Konstrukcje nawierzchni kolejowej – tom 1” 2021 r. Opisano przykłady konstrukcji urządzeń zakończenia torów: stałych (nieprzesuwnych) oraz samohamownych. Wykonano obliczenia MES typu explicity w programie ANSYS Mechanical R2023, symulujące przebieg zdarzeń najazdu pojazdu na kozioł oporowy (stały, nieprzesuwny). Poddano ocenie konstrukcję urządzeń zakończenia torów budowanych według wymagań normy branżowej BN-79 9310-06, które nadal często występują w infrastrukturze kolejowej.

Słowa kluczowe: kozioł oporowy, kozły oporowe samohamowne, kozły oporowe stałe

1. Wprowadzenie

Urządzenia zakończenia torów w zakresie rozwiązań konstrukcyjnych były już zapewne analizowane przez konstruktorów od momentu położenia pierwszych torów. W pierwszych aspektach analiz, celem tych rozwiązań było ograniczenie pracy pojazdów w zdefiniowanym obszarze działania (pracy w torze), zabezpieczenie pojazdów i wagonów przed wyjazdem z toru. Wraz z rozwojem kolei, transportu szynowego, podwyższeniem prędkości przejazdowych i masy przewożonych ładunków oraz rosnącą świadomością w zakresie bezpieczeństwa nastąpił również postęp w budowie urządzeń zakończenia torów.

Urządzenia zakończenia torów występują nie tylko w kolejnictwie, ale również w całym szerokorozumianym transporcie szynowym, jak: metro, tramwaje, bocznicie kolejowe i kopalnie. Pod pojęciem urządzenia zakończenia torów, w języku polskim i w codziennym nazewnictwie stosuje się sformułowanie „kozy oporowe”. Niniejsze określenie prawdopodobnie wynika z opublikowanej w 1979 roku normy branżowej BN-79 9310-06 [2], która definiowała podział tych konstrukcji jako „kozy oporowe to urządzenie z elementem zderzakowym wbudowane na końcu toru kolejowego, zabezpieczające przed

zjechaniem z tego toru taboru kolejowego”. W języku angielskim, urządzenia zakończenia toru określane są jako: *buffer stop* stosowane na kolei Brytyjskiej), *bumpers*, *bumper block*, albo *stopblock* (US).

Dokonując analizy literaturowej w zakresie zdarzeń na końcach linii kolejowych, jednym z najbardziej znanych przypadków jest wykolejenie (22 października 1895 roku) pociągu na stacji kolejowej Gare Montparnasse w Paryżu. Pociąg ekspresowy relacji Granville – Paris nie wyhamował na stacji, uderzył w urządzenie zakończenia torów, a następnie wykoleił się i przejechał kilkadziesiąt metrów przez budynek stacji [11, 13] (rys. 1). Podobne zdarzenie, udokumentowane fotograficznie miało miejsce w Dublinie w dniu 14 lutego 1900 roku, gdzie wykolejeniu uległ pociąg towarowy relacji Wexford – Dublin [5]. Na rysunku 2 widać część zniszczonego budynku, parowóz i fragment konstrukcji zakończenia toru. W przedstawionym zdarzeniu „... 38-tonowa lokomotywa zniszczyła betonowe zderzaki – urządzenie zakończenia toru – o grubości trzech stóp ...” [5]. Opisane zdarzenia są pierwszymi, dobrze udokumentowanymi wykolejeniami z urządzeniami zakończenia toru.

Interesującym przypadkiem w zakresie zakończenia torów, są zdarzenia na linii tramwajowej w Sydney (rys. 3). Ze względu na ukształtowanie terenu na

¹ Dr inż.; Instytut Kolejnictwa, Laboratorium Badań Materiałów i Elementów Konstrukcji; e-mail: dkowalczyk@ikolej.pl.

stacji końcowej AtholWharf, aż trzykrotnie wykoleiły się tramwaje i wpadły do wody, ostatni raz w dniu 22.01.1958 roku – port Sydney [1, 18].



Rys. 1. Wykolejenie na stacji Montparnasse w Paryżu w 1895 r. [6]

Zdarzeniem podobnego rodzaju na polskich liniach kolejowych, jest wykolejenie na stacji Zakopane w dniu 23.03.1979 r., gdzie pociąg nr 581 prowadzony przez lokomotywę ET21-469 nie zatrzymał się w obowiązującym miejscu i najechał na poduszkę piaskową i na kozioł oporowy (rys. 4). Lokomotywa, po rozbiciu kozła oporowego, ścięciu słupa trakcyjnego, części wiaty nad wejściem na perony zatrzymała się czołem na chodniku ulicy Kościuszki (obecnie po przebudowie ronda Armii Krajowej) [7]. Należy zaznaczyć, że stacja Zakopane jest stacją krańcową, a tory odstawkowe i tory manewrowe znajdują się od strony Poronina. Takie usytuowanie stacji Zakopane powoduje, że stacja krańcowa ma bezpośrednie zakończenie torów kozłami oporowymi. Na rysunku 5 przedstawiono obecne, zmodernizowane rozwiązania na stacji Zakopane, dotyczące urządzeń zakończenia torów.

Przypadki te pokazują, że rozwiązania zakończenia torów są bardzo istotne z punktu widzenia bezpieczeństwa i prawidłowego funkcjonowania transportu szynowego. Urządzenia te stanowią zabezpieczenie końca



Rys. 2. Wykolejenie pociągu na stacji w Dublinie Irlandia, 1900 r.; widoczny fragment urządzenia kończącego tor kolejowy znajduje się pod lokomotywą; Biblioteka Narodowa Irlandii [8]

a)



b)



Rys. 3. (a) Tramwaj po wykolejeniu, port Sydney, (b) zakończenie toru tramwajowego; Lindsay Bridge Collection [10]

torów kolejowych (np. bocznicy etc.) i ograniczają pojawienie się potencjalnych zagrożeń (np.: zniszczenia infrastruktury kolejowej, dworców, peronów).



Rys. 4. Wykolejenie pociągu na stacji Zakopane (23.03.1979 r.); lokomotywa nie wyhamowała w torach stacji, zniszczyła kozioł oporowy i wyjechała na ulicę Kościuszki [7]



Rys. 5. Stacja Zakopane – stacja krańcowa, obecne rozwiązanie w zakresie zakończenia torów (17.05.2024 r.) [fot. W. Kowalczyk]

1.1. Urządzenie zakończenia torów kolejowych (dokumenty odniesienia – wymagania)

Dokumentem, który wprowadzał podział konstrukcji dotyczących urządzeń zakończenia torów w polskim obszarze kolejowym była norma branżowa BN-79 9310-06 z 1979 roku. Norma ta wskazywała główny podział konstrukcji zakończenia torów na stałe (z urządzeniami zderzakowymi stałymi i sprężystymi) oraz na konstrukcje przesuwne (o działaniu impulsowym „z wleczonymi podkładami” – pisownia oryginalna z BN-79 9310-06). Przykładowy typ konstrukcji kozłów oporowych stałych, często występujący na liniach kolejowych PKP PLK, przedstawiono

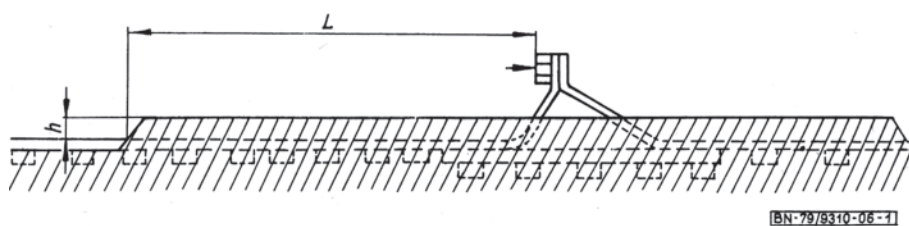
na rysunku 6. Konstrukcje te były zbudowane na podstawie wytycznych zawartych w normie BN-79 9310-06 [2]. W artykule „Application of buffer stops on railway sidings” [12], przedstawiono różne typy konstrukcji kozłów oporowych, w tym nowoczesne rozwiązania w zakresie konstrukcji, urządzeń zakończenia torów samohamownych wyposażonych dodatkowo w zderzaki i absorbery energii kinetycznej.

Norma BN-79 9310-06 [2] opisuje pojęcia dotyczące konstrukcji zakończenia toru, poniżej przytoczono kilka ważniejszych definicji:

- Kozioł oporowy – urządzenie z elementem zderzakowym wbudowane na końcu toru kolejowego, zabezpieczające tabor kolejowy przed zjechaniem z tego toru.
- Kozioł oporowy ulegający zniszczeniu w przypadku awarii – urządzenie wbudowane na końcu toru. W przypadku najechania taboru kolejowego z prędkością przekraczającą prędkość przyjętą w obliczeniach statycznych konstrukcji kozła, urządzenie ulega zniszczeniu, a tabor zjeżdża z toru.
- Kozioł oporowy niszczący tabor kolejowy w przypadku awarii – urządzenie wbudowane na końcu toru. W przypadku najechania taboru kolejowego z prędkością przekraczającą prędkość bezpieczną dla taboru przy zetknięciu się z przedmiotami trwale umiejscowionymi, powoduje zniszczenie taboru.
- Kozioł oporowy stały – urządzenie wbudowane na końcu toru w sposób trwały, powodujące zatrzymanie najeżdżającego taboru.
- Kozioł oporowy przesuwny – urządzenie wbudowane na końcu toru, które w przypadku najeżdżania na nie taboru kolejowego przesuwają się wzdłuż osi toru powodując zatrzymanie najeżdżającego taboru.

Na rysunku 6 przedstawiono schematyczny rysunek stałego kozła oporowego, który jest zamieszczony w normie BN-79 9310-06 [2]. Należy zaznaczyć, że parametry L i h nie są zdefiniowane i opisane w tym dokumencie, również nie przedstawiono ich wartości (lub zakresu).

Obecne wymagania w zakresie zakończenia torów na liniach kolejowych PKP PLK są określone w nowym dokumencie: „Standardy techniczne, Tom I – Załącznik ST-T1-A8, Konstrukcja nawierzchni kolejowej wersja z 2021 roku” [17]. Zapisy w niniejszym dokumencie regulują kwestie zakończeniem toru



Rys. 6. Przykład zakończenia toru – stały kozioł oporowy opisany w normie branżowej BN-79 9310-06 [2]

„... Przy projektowaniu nawierzchni kolejowej każdy tor niepołączony z innym torem powinien być zakończony kozłem oporowym ...”. Dokument ten wprowadza również bardziej szczegółową (uaktualnioną) klasyfikację kozłów oporowych na różnego typu konstrukcje w zależności od rozwiązania technicznego, funkcjonalności kozła oporowego i wymagań związanych z parametrami eksploatacji toru. Główna kategoryzacja urządzeń zakończenia toru, to konstrukcje stałe (nieprzesuwne): betonowe, stalowe (wykonane z szyn lub kształtowników) oraz konstrukcje przesuwne (samohamowne): cierne, hydrauliczne i mieszane.

Wymieniony dokument wymaga od konstruktorów zaprojektowania urządzenia, które będzie absorbować minimalną ilość energii kinetycznej (zależnej od parametrów eksploatacyjnych linii kolejowej) z uwzględnieniem zdefiniowanego współczynnika bezpieczeństwa w zależności od warunków zabudowy danego urządzenia. Należy zaznaczyć, że w normie BN-79 9310-06 [2] nie opisano wymagań w tym obszarze. Energia kinetyczna (założenia projektowe),

którą ma zaabsorbować urządzenie zakończenia torów w danym zdarzeniu wynika ze wzorów (1) i (2).

$$E_K = \frac{m \cdot v^2}{2} [J] \quad (1)$$

gdzie:

E_K – energia kinetyczna pojazdu [J],

m – masa [kg],

v – prędkość [m/s⁻¹],

$$W \geq k \cdot E_K [J] \quad (2)$$

gdzie:

W – minimalna wymagana energia absorpcji kozła oporowego [J],

k – współczynnik bezpieczeństwa.

Poszczególne parametry projektowe dla kozłów oporowych wynikają z zapisów dokumentu ST-T1-A8 konstrukcja nawierzchni kolejowej [17], tj. masa, prędkość, przyspieszenia (tabl. 1–3).

Tablica 1

Współczynnik bezpieczeństwa w zależności od miejsca zabudowy kozła oporowego (urządzenia zakończenia torów) [17]

Współczynnik k	Opis
1,2	<ul style="list-style-type: none"> dla ruchu pociągów towarowych dla jazd manewrowych
1,5	<ul style="list-style-type: none"> dla ruchu pociągów pasażerskich dla ruchu pociągów towarowych jeżeli bezpośrednio za (do 30 m) lub w pobliżu kozła oporowego znajduje się infrastruktura
1,8	<ul style="list-style-type: none"> dla ruchu pociągów towarowych, jeżeli bezpośrednio za (do 30 m) od kozła oporowego znajdują się: zabudowa mieszkaniowa, ciągi komunikacyjne, infrastruktura użyteczności publicznej
2,0	<ul style="list-style-type: none"> urwiska lub inne przeszkody, na których najechanie przez pojazd może powodować bardzo duże straty ekonomiczne

Tablica 2

Prędkości najazdu pojazdów, dane do założeń projektowych dla kozła oporowego (urządzenia zakończenia torów) [17]

Prędkości pojazdów		Prędkość w zależności od typu ruchu
2,8 [m/s]	10,08 [km/h]	<ul style="list-style-type: none"> tory, po których odbywa się jazda tylko pociągów towarowych tory, po których odbywają się tylko jazdy manewrowe tory – ochronne dla przebiegów pociągów towarowych
4,2 [m/s]	15,12 [km/h]	<ul style="list-style-type: none"> tory, po których odbywa się jazda pociągów pasażerskich tory ochronne dla przebiegów pociągów osobowych

Tablica 3

Masa pojazdów, dane do założeń projektowych dla kozła oporowego (urządzenia zakończenia torów) [17]

Masa pojazdu [t]	Rodzaj pojazdów szynowych
80	<ul style="list-style-type: none"> • autobusy szynowe
200	<ul style="list-style-type: none"> • elektryczne zespoły trakcyjne
400	<ul style="list-style-type: none"> • elektryczne zespoły trakcyjne dużych prędkości • elektryczne zespoły trakcyjne w trakcji podwójnej • pociągi pasażerskie (składy max. 8 wagonowe)
800	<ul style="list-style-type: none"> • elektryczne zespoły trakcyjne dużych prędkości w trakcji podwójnej • pociągi pasażerskie (składy max. 16 wagonowe)
1000	<ul style="list-style-type: none"> • pociągi towarowe

Urządzenia zakończenia torów występujące w zabudowie na liniach kolejowych PKP PLK, to w przeważającej liczbie są tzw. kozły oporowe stałe (z lat 70–90. XX w.). Istnieje wiele różnych rozwiązań i odmian tych konstrukcji, przykłady przedstawiono na rysunkach 7 i 8.



Rys. 7. Przykładowa konstrukcja urządzenia zakończenia torów na stacji Warszawa Wschodnia [fot. W. Kowalczyk]

Urządzenia zakończenia torów są stosowane na liniach kolejowych na całym świecie, przykładową konstrukcję stosowania na liniach kolejowych w Japonii (stacja Nagasaki) przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Urządzenie zakończenia torów – stałe (nieprzesuwne) na stacji Nagasaki, Japonia [fot. M. Peryt]



Rys. 8. Kozły oporowe stałe (nieprzesuwne) – konstrukcje według normy BN-79 9310-06 na stacji Warszawa Grochów [fot. D. Kowalczyk]

1.2. Urządzenie zakończenia torów kolejowych – konstrukcje samohamowne

Samohamowne konstrukcje zakończenia torów należy zaliczyć do nowoczesnych rozwiązań coraz częściej stosowanych w budowie dróg kolejowych [3], metrze czy bocznicach kolejowych. Poniżej przedstawiono przykładową samohamowną konstrukcję zakończenia torów zabudowaną na stacji Warszawa Główna (rys. 10) oraz w metrze (rys. 11).



Rys. 10. Kocioł oporowy samohamowny – stacja Warszawa Główna [fot. W. Kowalczyk]



Rys. 11. Kocioł oporowy samohamowny – metro M2 [fot. D. Kowalczyk]

Praca konstrukcji samohamownych kocioł oporowych polega na zamianie przekazanej energii kinetycznej w tarcie oraz częściową absorpcję energii, np. przez: zderzaki, absorbery lub elementy przeznaczone do trwałej deformacji (tzw. strefa zgniotu). Dla konstrukcji tego typu wymagane jest, aby w zakresie oddziaływania dynamicznego najeżdżającego pojazdu, część konstrukcji była sztywna (przenosiła siły uderzenia), natomiast elementy hamujące zmniejszyły energię kinetyczną kocioła oporowego w wyniku tarcia. Na rysunku 10 widać 5 elementów hamujących zamontowanych na konstrukcji kocioła oporowego oraz 5 kolejnych na szynie (łącznie 10 na jednej szynie).

Zdolność zatrzymania pojazdu przez kocioł oporowy samohamowny, to jego zdolność do pochłaniania energii kinetycznej. W przypadku konstrukcji zakończenia torów typu samohamownego, jest to praca szczęk hamujących W_a , tj. siły hamowania F_i na drodze hamowania l_i (wzór 3).

$$W_a = \sum_{i=1}^n F_i \cdot l_i \quad (3)$$

gdzie:

W_a – praca szczęk hamulców w urządzeniu zakończenia torów kolejowych,

F_i – siła tarcia poszczególnego elementu hamującego (pojedynczej szczęki hamującej),

l_i – droga jaką pokonał element hamujący F_i .

W bilansie energii pracy kocioła oporowego należy uwzględnić czy jest to konstrukcja posiadająca dodatkowe amortyzatory lub inne elementy pochłaniające energię (np.: przewidziana strefa zgniotu i deformacji elementów zamontowanych w zderzaku kocioła oporowego) oraz deformację samej konstrukcji podczas zderzenia. Niniejsze czynniki są również istotne z punktu widzenia pracy urządzenia zakończenia torów a tym samym wpływają na końcową, projektową i możliwą do zaabsorbowania, energię kinetyczną (wzór 4).

$$W = W_a + W_d + W_{am} \quad (4)$$

gdzie:

W – całkowita energia, która może zostać zaabsorbowana przez kocioł oporowy,

W_a – praca szczęk hamulców w urządzeniu zakończenia torów kolejowych,

W_d – energia zaabsorbowana w wyniku plastycznego odkształcenia konstrukcji kocioła oporowego (urządzenia zakończenia torów),

W_{am} – energia zaabsorbowana przez amortyzatory pojazdu lub inne urządzenia, elementy.

2. Urządzenie zakończenia torów kolejowych stałe, nieprzesuwne – obliczenia MES (Metoda elementów skończonych)

Symulacje numeryczne MES (ang. FEM – *Finite Element Method*) są często wykorzystywane do pozyskiwania danych o procesach trudnych, kosztownych i niebezpiecznych do przeprowadzenia eksperymentalnie, dlatego ten sposób sprawdzenia zastosowano do oceny konstrukcji kocioł oporowych. Porównując zapisy normy branżowej BN-79 9310-06 z roku 1979 [2], z obowiązującymi wymaganiami określonymi w załączniku ST-T1-A8 konstrukcja nawierzchni kolejowej z 2021 r. [17], najważniejszą zmianą jest zdefiniowanie wymagań pochłaniania energii dla danej konstrukcji zakończenia toru (tzw. kocioła oporowego) oraz bardziej szczegółowy podział dotyczący rozwiązań konstrukcyjnych. Ze względu na fakt, że obecnie istnieje jeszcze dużo konstrukcji kocioł oporowych stałych zabudowanych w torach (wykonanych według wymagań normy branżowej BN-79 9310-06 [2]), autor artykułu

wykonał obliczenia MES, których celem było określenie pracy niniejszych obiektów podczas zderzenia (najeżdżania pojazdu na konstrukcję zakończenia toru) oraz ocenę tych konstrukcji na podstawie uzyskanych wyników symulacji MES.

Dokonując obserwacji opisanych konstrukcji stałych koźłów oporowych zabudowanych w torze można stwierdzić, że jest ich wiele odmian, jednak podstawowa część konstrukcji jest taka sama i składa się z wygiętych profili szynowych (szyny 49E1 lub 60E1 [14]). W programie SolidWorks stworzono model 3D takiej konstrukcji, a następnie wykonano obliczenia MES. Określenie parametrów siatki i zdefiniowanie warunków brzegowych oraz przeprowadzenie obliczeń wykonano w programie Ansys Mechanical 2023R1. Przedstawione symulacje MES dotyczą przypadków obciążeń (zderzeń) pojazdów z koźłami oporowymi stałymi bez warstwy podsypki pokrywającej tor. Niniejsze uproszczenie miało na celu ocenę głównej konstrukcji części koźła oporowego. Należy również zaznaczyć, że norma BN-79 9310-06 [2] nie definiuje długości podsypki na torze, jaka powinna znajdować się przed koźłem oporowym.

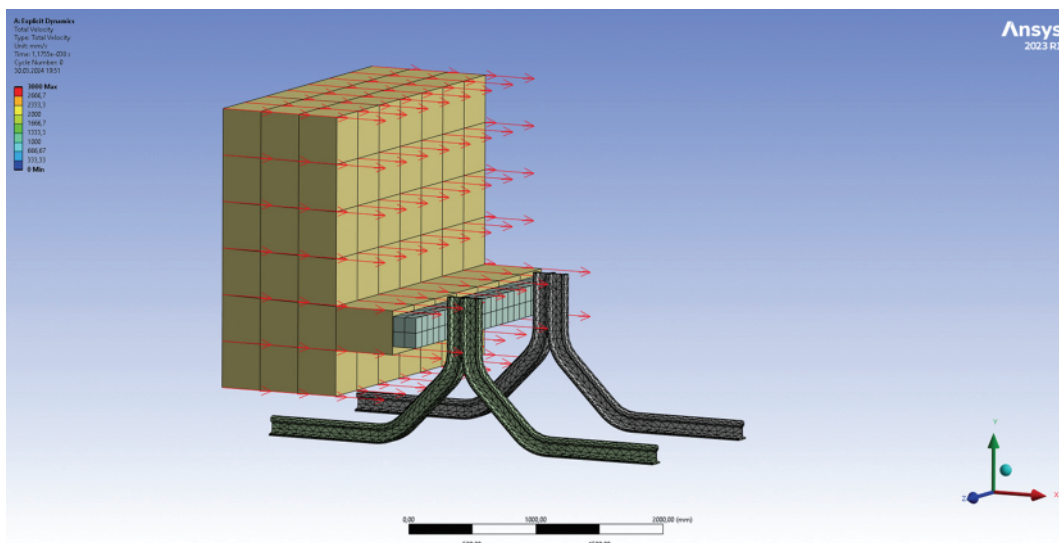
Symulacja 1

W symulacji zderzenia najeżdżającego pojazdu na konstrukcję (koźła oporowego) zdefiniowano następujące warunki brzegowe: utwierdzono fragmenty szyn w torze, zastosowano kontakt powierzchniowy belki poprzecznej koźła oporowego z powierzchnią najeżdżającego pojazdu. W konstrukcji koźła

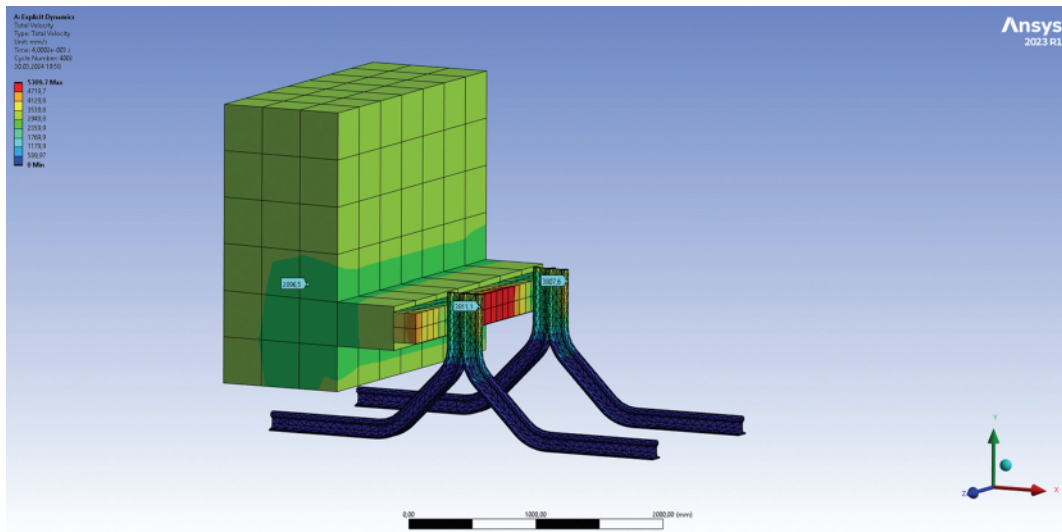
zastosowano profil szyny 49E1 wykonanej ze stali R260 ($R_m = 880$ MPa). W częściach końcowych szyn, w miejscu ich łączenia stopkami do siebie i na wysokości zderzaka, zastosowano połączenia kontaktowe stałe (ang. *bonded*), zastosowano rozstaw toru wynoszący 1435 mm. Wysokość zderzaka (belka poprzeczna koźła oporowego) na wysokości 960 mm od powierzchni toczonej główki szyny [4, 15]. Prędkość najeżdżającego pojazdu to 3 m/s, masa 50 ton (energia do wyhamowania to 225 000 [J]; $v = 10,8$ km/h). Zdefiniowane warunki brzegowe przedstawiono na rysunkach 12–15. Ze względu na fakt, że celem symulacji MES [19] jest analiza pracy konstrukcji koźła oporowego, zastosowano uproszczoną siatkę bryły najeżdżającego pojazdu (większe wymiary elementów siatki i zdefiniowano ją jako bryłę sztywną). Symulację wykonano w programie Ansys Mechanical 2023R1 [1] z zastosowaniem solvera typu *explicit*.

Wnioski do Symulacji 1

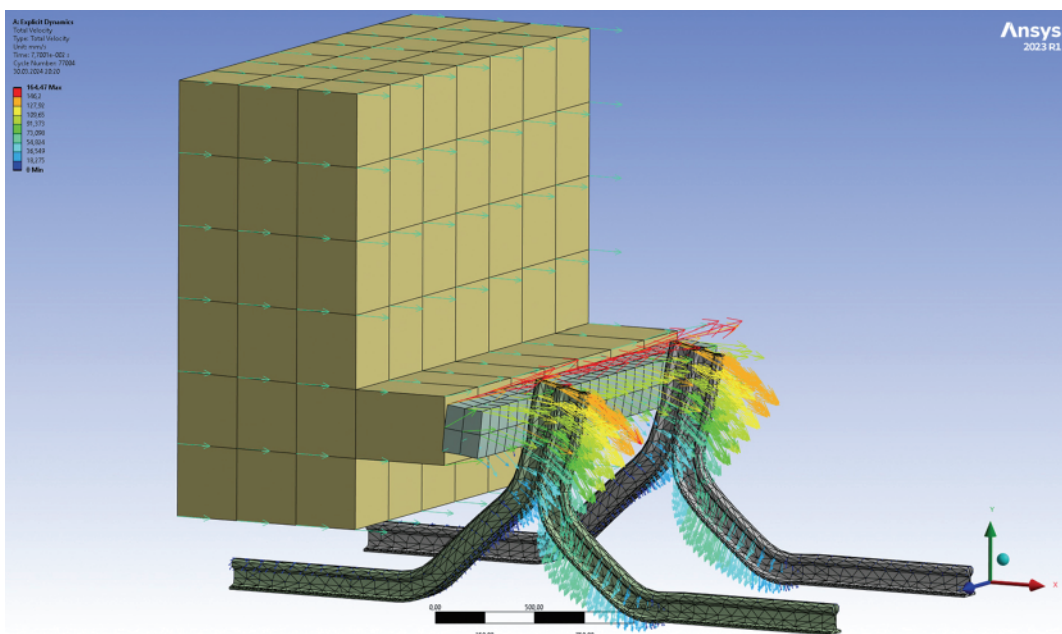
Jak wynika z przedstawionej symulacji, konstrukcja koźła oporowego w następstwie zderzenia przejmuje część energii kinetycznej pojazdu najeżdżającego, która to zostaje zamieniona na deformację konstrukcji (patrz rys. 14). Część tej energii jest ponownie zamieniana na energię kinetyczną pojazdu (z przeciwnym wektorem prędkości). W niniejszym przypadku dla zdefiniowanych warunków brzegowych podczas zdarzenia zostało zaabsorbowane około 85% energii kinetycznej pojazdu (względem energii najeżdżającego pojazdu).



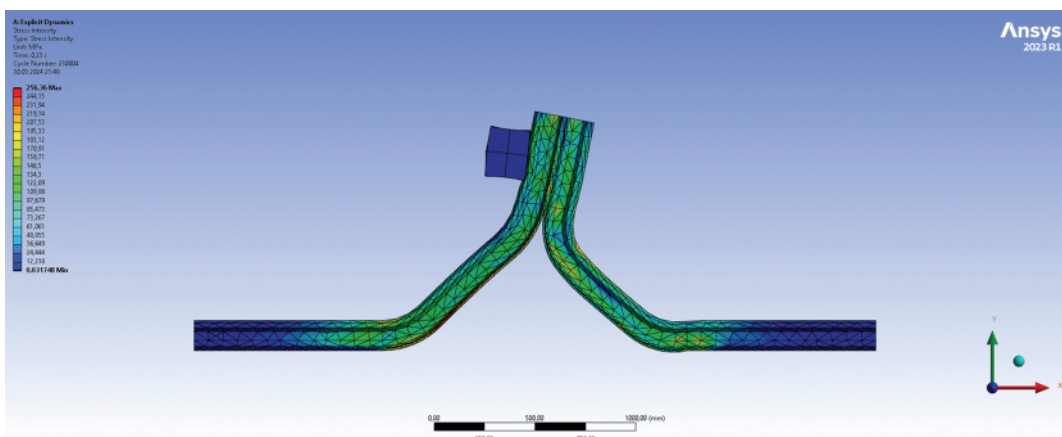
Rys. 12. Rozkład prędkości (symulacja 1) poszczególnych elementów dla czasu $t = 0,007$ [s]; opracowanie własne]



Rys. 13. Rozkład prędkości (symulacja 1) poszczególnych elementów dla czasu $t = 0,03$ [s]; opracowanie własne



Rys. 14. Rozkład prędkości (symulacja 1) poszczególnych elementów dla czasu $t = 0,077$ [s]; opracowanie własne



Rys. 15. Rozkład pól naprężeń (symulacja 1) dla czasu $t = 0,22$ [s]; opracowanie własne

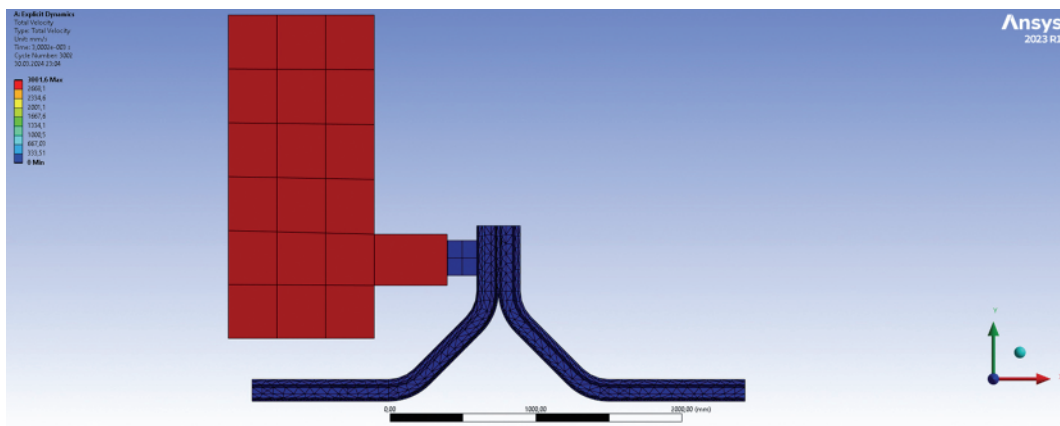
Symulacja 2

W Symulacji 2 (rys. 16–19) zdefiniowano te same warunki brzegowe, co w Symulacji 1, różnica polega na usunięciu podparcia pod szynami za kozłem oporowym (niniejsze odzwierciedla słaby stan konstrukcji, słabe podparcie konstrukcji zakończenia toru).

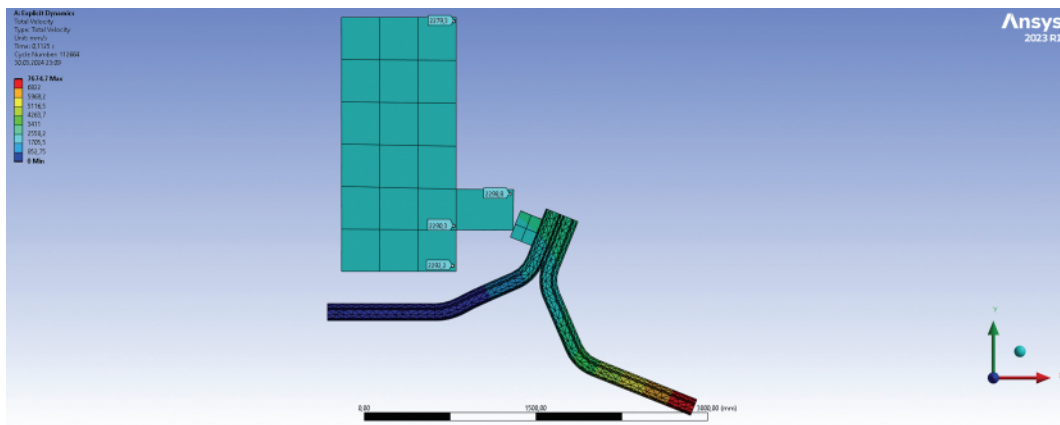
Wnioski do Symulacji 2

Słabe podparcie konstrukcji za kozłem oporowym skutkuje najechaniem pojazdu na kozioł

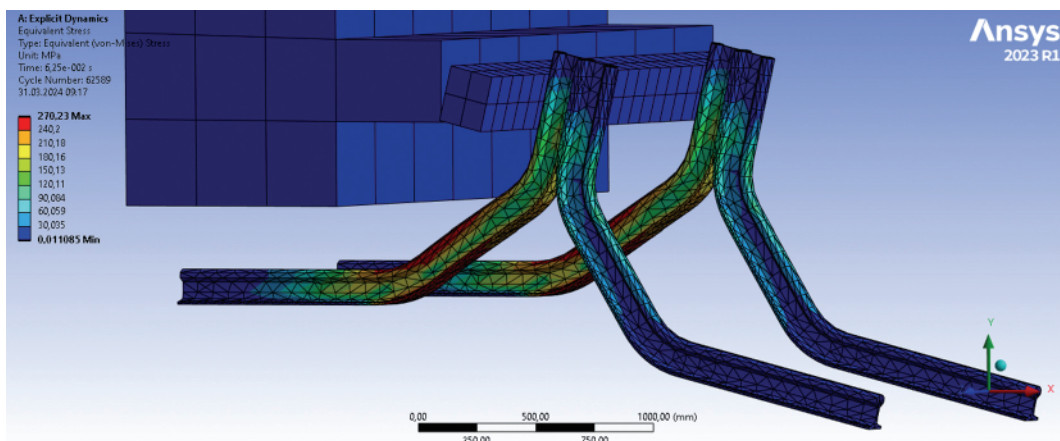
oporowy i wytraceniem tylko nieznacznej prędkości (prędkość z $v = 3000$ [mm/s] dla czasu $t = 0$ [s] do $v = 1685$ [mm/s] dla czasu $t = 0,2375$ [s]). Spowoduje to zaabsorbowanie tylko nieznacznej ilości energii kinetycznej (względem Symulacji 1). Najechanie pojazdu na kozioł oporowy nie jest zdarzeniem pożądanym, gdyż dochodzi tylko do częściowej absorpcji energii kinetycznej pojazdu przez kozioł oporowy i powstaje większa strefa zagrożenia związana z wykolejeniem (większa strefa niebezpieczeństwa).



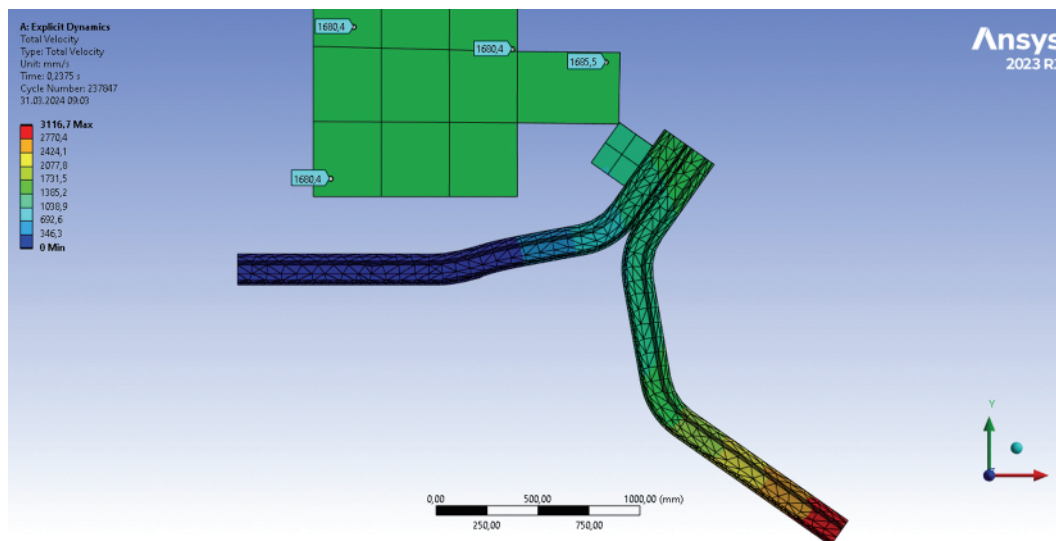
Rys. 16. Rozkład prędkości (symulacja 2) poszczególnych elementów układu dla czasu $t = 0,003$ [s]; opracowanie własne



Rys. 17. Rozkład prędkości (symulacja 2) poszczególnych elementów układu dla czasu $t = 0,1125$ [s]; opracowanie własne



Rys. 18. Rozkład pól naprężeń w konstrukcji kozła oporowego (symulacja 2) dla czasu $t = 0,062$ [s]; opracowanie własne



Rys. 19. Rozkład prędkości poszczególnych elementów układu (symulacja 2) dla czasu $t = 0.2375$ [s]; opracowanie własne

Symulacja 3

Symulacja nr 3 (rys. 20, 21) dotyczyła odzwierciedlenia najazdu na urządzenie zakończenia toru, które miało miejsce 21.10.2021 r. na stacji Enfield Town w Londynie.

Prędkość w chwili najazdu pojazdu typu 710 na urządzenie zakończenia torów na stacji Enfield Town wynosiła 12 km/h [7]. W zdarzeniu uczestniczyły 2 jednostki ETZ – typu 710 (elektryczne zespoły trakcyjne), których masa wynosiła około 140 ton (jeden pojazd). Szacowana energia kinetyczna uderzenia wynosiła około 1600 kJ. Na rysunku 20 widoczne jest zniszczenie konstrukcji urządzenia zakończenia torów, a także wyrwane podkłady kolejowe z toru. Na podstawie rysunków 20, 21 można stwierdzić, że konstrukcja zakończenia toru jest urządzeniem stałym (nieprzesuwным). Zastosowany w symulacji model kozła oporowego jest w związku z tym konstrukcją podobną. Celem przeprowadzonej symulacji nr 3

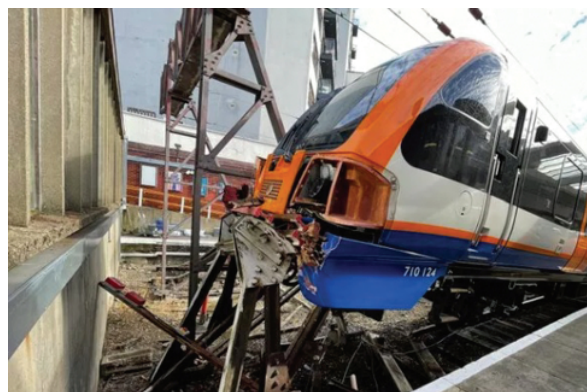
było odtworzenie próby przebiegu uderzenia pojazdu w urządzenie zakończenia toru i analiza uzyskanych wyników w kontekście zdjęć wykonanych na miejscu po zdarzeniu. Poniżej przedstawiono wyniki Symulacji nr 3.

Symulacja 3 – zdefiniowane warunki brzegowe

Bezpośrednia prędkość pojazdu przed kontaktem z kozłem oporowym wynosiła 12 km/h, co odpowiada około 3333 mm/s; rysunki 22–28. W symulacji zdefiniowano pojazd najeżdżający – EZT typu 710 jako bryłę sztywną. Celem symulacji była analiza pracy urządzenia zakończenia toru podczas zderzenia (w warunkach rzeczywistych zderzenia deformacji ulegają elementy pojazdu, a część energii kinetycznej jest absorbowana przez tzw. strefę zgniotu). W symulacji wybrano warunek najbardziej niekorzystny, co znaczy, że cała energia kinetyczna pojazdu została przekazana na konstrukcję kozła oporowego.

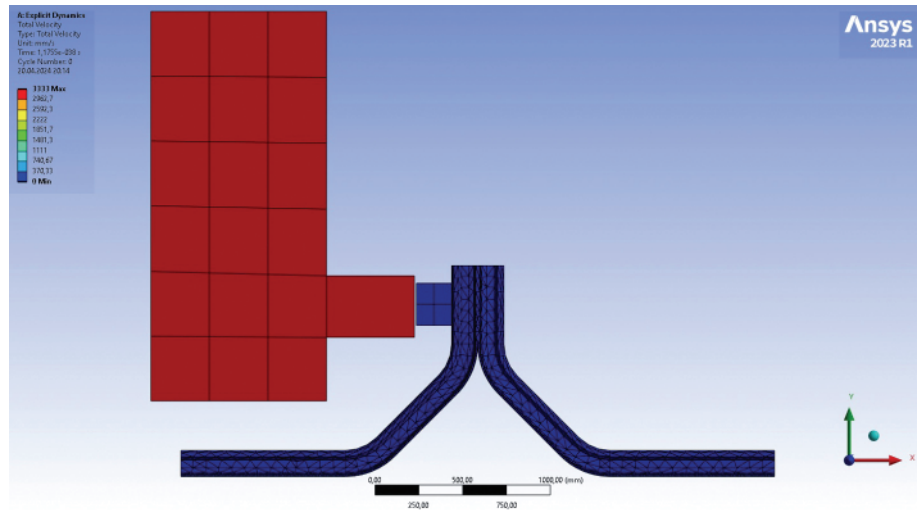


Rys. 20. Wykolejenie pociągu (12.10.2021 r.) w Londynie na Enfield Town – najazd na stały kozioł oporowy (*buffer stop*) [9]

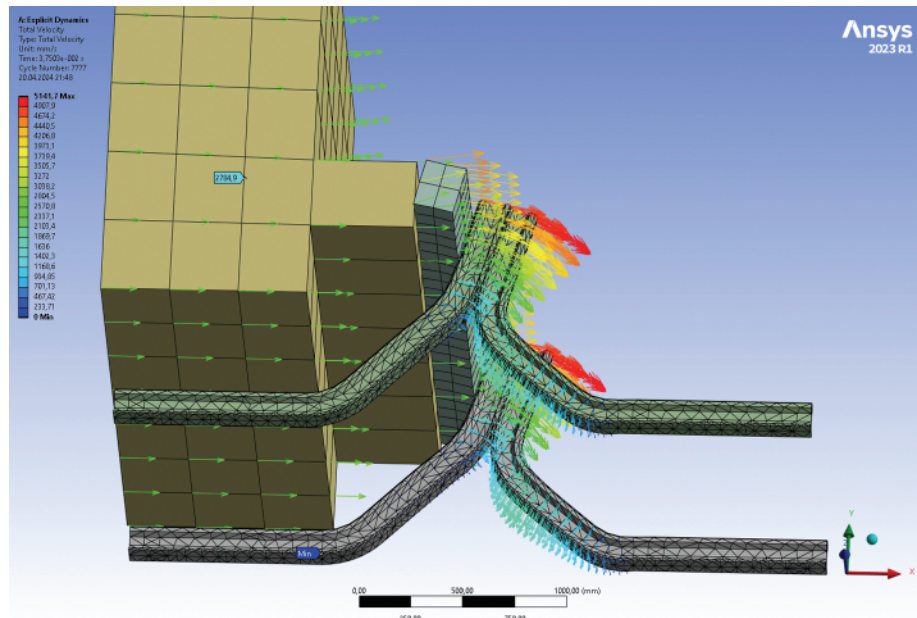


Rys. 21. Wykolejenie pociągu (12.10.2021 r.) w Londynie na Enfield Town; najazd na stały kozioł oporowy (*buffer stop*), widok od strony peronu [9]

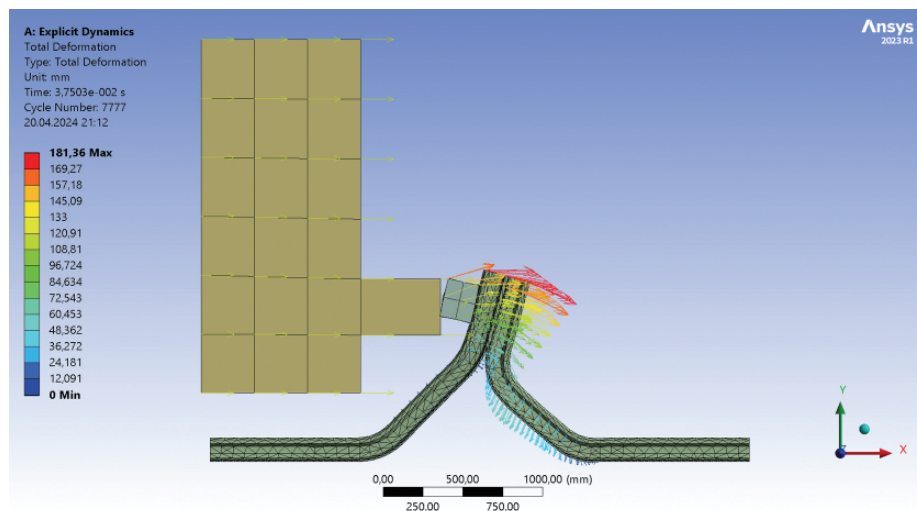
Rys. 22. Wykolejenie pociągu na stacji Enfield Town w Londynie (symulacja 3) – przebieg zdarzenia $t = 0$ [s]; opracowanie własne

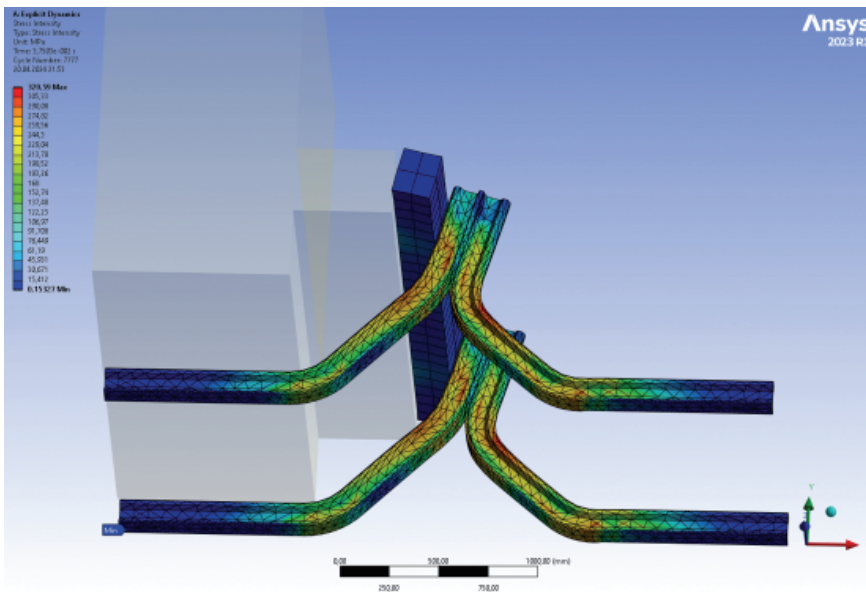


Rys. 23. Wykolejenie pociągu na stacji Enfield Town w Londynie (symulacja 3) – przebieg zdarzenia: $t = 0,0375$ [s], rozkład prędkości dla poszczególnych węzłów; opracowanie własne

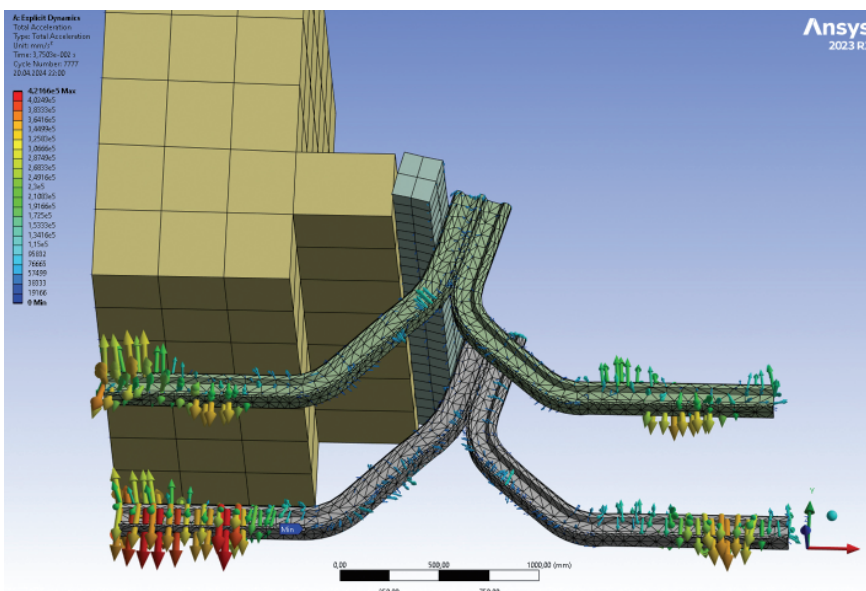


Rys. 24. Wykolejenie pociągu na stacji Enfield Town w Londynie (symulacja 3) – przebieg zdarzenia: $t = 0,0375$ [s], rozkład przemieszczeń węzłów [mm]; opracowanie własne

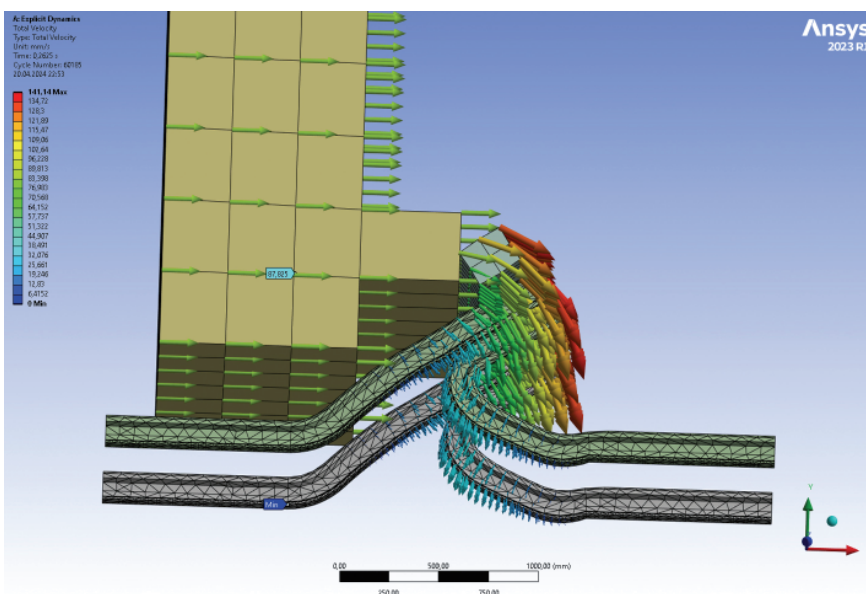




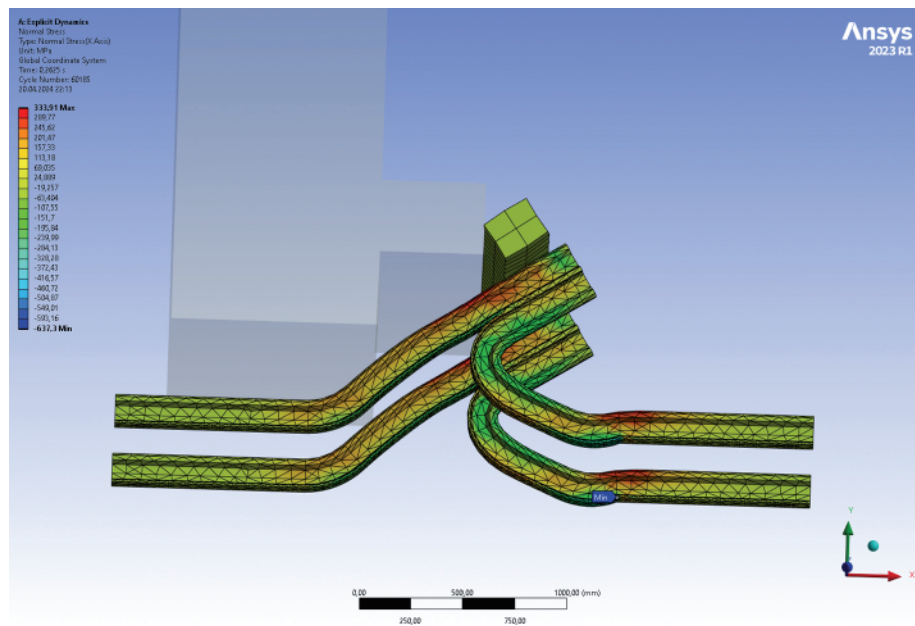
Rys. 25. Wykolejenie pociągu na stacji Enfield Town w Londynie (symulacja 3) – przebieg zdarzenia: $t = 0,0375$ [s], rozkład pól naprężeń; opracowanie własne



Rys. 26. Wykolejenie pociągu stacji Enfield Town w Londynie (symulacja 3) – przebieg zdarzenia: $t = 0,0375$ [s], rozkład przyspieszeń w węzłach; opracowanie własne



Rys. 27. Wykolejenie pociągu w Londynie na Enfield Town (symulacja 3); przebieg zdarzenia: $t = 0,2625$ [s], rozkład prędkości w węzłach; opracowanie własne



Rys. 28. Wykolejenie pociągu w Londynie na Enfield Town (symulacja 3); przebieg zdarzenia: $t = 0,2625$ [s], rozkład naprężeń normalnych; opracowanie własne

Wnioski do Symulacji 3

- $t = 0$ s – wyniki (rys. 22) – rozkład prędkości w poszczególnych obiektach, konstrukcja zakończenia toru: $v = 0$ mm/s; prędkość najeżdżającej bryły – pojazd EZT_710 (o masie około 140 ton) wynosi: $v = 3333$ mm/s;
- $t = 0,0375$ s – wyniki (rys. 23) – kontakt pojazdu EZT_710 z urządzeniem zakończenia toru, przekazanie energii kinetycznej, rozkład prędkości w poszczególnych węzłach obiektów. Prędkość pojazdu zmniejszyła się z 3333 mm/s do 2784 mm/s;
- $t = 0,0375$ s – wyniki (rys. 24) – rozkład przemieszczeń w węzłach, z wykonanych obliczeń wynika, że urządzenia zakończenia toru w czasie $t = 0,0375$ s od zderzenia uległo odkształceniu o 181 mm;
- $t = 0,0375$ s – wyniki (rys. 25) – rozkład pól naprężeń konstrukcji kozła oporowego, w części konstrukcji występują naprężenia powyżej 320 MPa;
- $t = 0,0375$ s – wyniki (rys. 26) – rozkład przyspieszeń w węzłach w odniesieniu do zdjęć (wykonanych w Londynie na stacji Enfield Town po zdarzeniu) pokazuje przyczynę uszkodzenia i wyrwania podkładów (rys. 20–21);
- $t = 0,2625$ s – wyniki (rys. 27) – rozkład przyspieszeń w węzłach, prędkość pojazdu EZT_710 wynosi 87,8 mm/s, co stanowi 0,03% prędkości początkowej. Niniejsze wskazuje, że całe zderzenie trwało około 0,26 s. Rysunek 28 przedstawia rozkład pól naprężeń w konstrukcji kozła oporowego po zdarzeniu.

Wykolejenie pociągu na stacji Enfield Town, jak również obliczenia MES potwierdzają, że sztywne

konstrukcje kozłów oporowych dobrze spełniają funkcję ochrony końca toru. Konstrukcja kozła oporowego spełniła swoją rolę w zakresie zabezpieczenia końca toru, ograniczając strefę zagrożenia przed uderzeniem pojazdu EZT_710 w budynek stacji.

3. Wnioski

Symulacja 1 wykazała, że konstrukcja stałego kozła oporowego opisana w normie BN-79 9310-06 bez zdefiniowanych wymagań w zakresie pochłaniania energii, jest rozwiązaniem dobrym w zakresie urządzenia zakończenia torów. Jednak w myśl nowych przepisów opisanych w Załączniku ST-T1-A8 [17], ocena danej konstrukcji jest już zależna od określonych parametrów związanych z eksploatacją toru oraz poruszającego się po nim taboru.

Jak wykazano w Symulacji 2, bardzo ważnym aspektem jest stan kozła oporowego, w przypadku konstrukcji źle podpartych, źle umocowanych (np.: na starych drewnianych podkładach), prawdopodobnie w przypadku najeżdżania pojazdu na taką konstrukcję ilość pochłoniętej energii kinetycznej może być mniejsza. Taki typ najazdu na kozioł oporowy jest zdarzeniem niepożądanym, gdyż może doprowadzić do jego niekontrolowanego przebiegu o większym promieniu zagrożenia.

W Symulacji 3 uzyskano dobrą zgodność wyników ze zdjęciami wykonanymi po zdarzeniu (wykolejeniu pojazdu EZT typu 710) i przedstawionymi na nich uszkodzeniami i zniszczeniami. Analiza explicity wykonana w programie Ansys, przy zdefiniowanych warunkach brzegowych symulacji odwzorowującą przebieg

zdarzenia na stacji Enfield Town w Londynie dobrze odzwierciedla uszkodzenia konstrukcji zakończenia toru, wyjaśnia przyczynę wyrwania podkładów z toru oraz najazd pojazdu na koziół oporowy.

Wnioski pokazują, jak dużym wsparciem przy analizie zdarzeń czy próbach odtworzenia przebiegu wykolejenia są obecne środowiska obliczeniowe MES. Mogą również posłużyć do przeprowadzenia symulacji i analiz w celu projektowania lepszych i bardziej wytrzymałych urządzeń zakończenia torów.

Uwarunkowania infrastrukturalne, środowiskowe i inne czynniki nie zawsze umożliwiają zastosowanie nowoczesnych konstrukcji samohamownych zakończenia toru. Ponieważ charakter pracy konstrukcji samohamownych wymaga długich torów niezbędnych do zaabsorbowania energii kinetycznej najeżdżającego pojazdu (rys. 6), stałe konstrukcje urządzeń zakończenia torów (nieprzesuwne) nadal będą miały zastosowanie w infrastrukturze kolejowej. Niniejszy artykuł potwierdza, że stałe (nieprzesuwne) konstrukcje kozłów oporowych projektowane i budowane w latach 80–90. XX w., nadal spełniają swoją rolę w zakresie bezpieczeństwa zakończenia toru (w przypadku właściwego ich utrzymania).

Literatura

- ANSYS Mechanical 2023R2 – Mechanical Object Reference, 2023.
- BN-79 9310-06: Kozły oporowe.
- Bugarín M., Díaz-De-Villageas J.-M.: *Conception of buffer stop blocks*, [pdf], 2001.
- Gamon W.: *Zderzaki kolejowe – podział, wymagania, projektowanie, badania*, Część II, Wymagania, TTS Technika Transportu Szynowego, 2014, nr 4.
- <https://m.independent.ie/life/remembering-the-dramatic-st-valentines-day-when-a-train-crashed-through-a-dublin-station/a1466954327.html>.
- <https://mx-schroeder.medium.com/that-one-the-1895-paris-montparnasse-france-train-derailment-f0f382715383>.
- <https://wszechocean.blogspot.com/2017/03/zakopane-23iii1979-roku.html>.
- <https://www.dublinlive.ie/news/history/valentines-day-1900-train-crashed-23090897>.
- <https://www.standard.co.uk/news/crime/london-overground-driver-enfield-town-derailment-b1010890.html>.
- <https://www.theguardian.com/australia-news/gallery/2019/jul/28/dying-days-sydney-tram-network-in-pictures>.
- Katastrofa kolejowa na Gare Montparnasse – Wikipedia, wolna encyklopedia, https://pl.wikipedia.org/wiki/Katastrofa_kolejowa_na_Gare_Montparnasse.
- Kędra Z.: *Application of buffer stops on railway sidings*, Logistyka, Tom nr 6, 2009.
- L'Accident de la Gare Montparnasse, La Nature, Nr 1171 s. 369, 1895.
- PN-EN 13674-1: Szyny kolejowe o masie większej niż 46 kg/m.
- PN-EN 15551:2023: Kolejnictwo – Tabor kolejowy – Zderzaki.
- Rusiński E., Czmochoński J.: *Zaawansowana metoda elementów skończonych w konstrukcjach nośnych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2000.
- Standardy Techniczne, Tom I, Załącznik st-t1-a8 konstrukcja nawierzchni kolejowej wersja z 2021 roku.
- Ticher M.: *Erased from history: how Sydney destroyed its trams for love of the car*, The Guardian, 2019.07.28. Available at: <https://www.theguardian.com/australia-news/2019/jul/28/erased-from-history-how-sydney-destroyed-its-trams-for-love-of-the-car>.
- Zienkiewicz O.C.: *The Finite Element Method in engineering Science*, McGraw Hill, New York, 1971.