

# METODYKA OCENY RYZYKA NA ETAPIE BUDOWY I EKSPLOATACJI KOLEJOWYCH NAWIERZCHNI BEZPODSYPKOWYCH<sup>1</sup>

---

**Sławomir Grulkowski**

dr inż., Adiunkt; Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Katedra Transportu Szynowego; ul. Narutowicza 11/12, 80 – 233 Gdańsk; tel.: 0 58 348 6089, e-mail: slawi@pg.gda.pl

---

**Jerzy Zariczny**

mgr inż., Asystent; Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Katedra Transportu Szynowego; ul. Narutowicza 11/12, 80 – 233 Gdańsk; tel.: 0 58 348 6089, e-mail: jerzagic@pg.gda.pl

---

*Streszczenie: W artykule przedstawiono propozycję wykorzystania metody FMEA do oceny ryzyka w kolejowych nawierzchniach bezpodsyPKowych*

*Słowa kluczowe: FMEA, analiza ryzyka, nawierzchnia bezpodsyPKowa*

## 1. Wstęp

Kolejowe nawierzchnie bezpodsyPKowe, (których głównym elementem jest betonowa płyta jezdna) są budowlami, które wyróżniają się przede wszystkim wykorzystaniem niestandardowych technologii inżynierskich, a także stosowaniem bardzo rygorystycznych kryteriów wymiarowych i jakościowych w czasie ich wytwarzania. Wysokie wymagania konstrukcyjne w połączeniu ze znacznymi wymiarami, obciążeniami, znaczną liczbą elementów tworzących te konstrukcje oraz specyfiką miejsca wytwarzania, prowadzą do tzw. znacznego potencjału błędu. Aby sprostać tym wysokim wymaganiom trzeba realizować cele i spełniać wszelkie wymogi techniczne już na poziomie uprzemysłowionych procesów wytwórczych poszczególnych elementów systemu. Do oceny błędów i ryzyka w tym przypadku można więc wykorzystywać liczne analogie z postępowaniem, jakie praktykuje się w przemyśle produkcyjnym.

Omawiana poniżej metoda FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) pozwala na dobrze zorganizowane podejście do analizy i obiektywną ocenę błędów i potencjalnych zagrożeń. Metoda ta ma na celu zapobieganie skutkom wad, które mogą wystąpić w fazie projektowania oraz w fazie wytwarzania [5].

Metoda oceny jakości produktu FMEA była stosowana na szeroką skalę już w czasie budowy nawierzchni bezpodsyPKowych według różnych technologii na liniach kolejowych w Niemczech pod koniec dwudziestego wieku.

---

<sup>1</sup> Wkład Autorów w publikację: Sławomir Grulkowski – 50%, Jerzy Zariczny – 50%

W interesie firm budowlanych powinno być zastosowanie i rozwój kompleksowych metod oceny wykonanej inwestycji, obejmujących cały proces produkcji: etap inwentaryzacji i pomiarów, etap projektowania oraz samej budowy. Głównym kryterium przemawiającym za metodą FMEA jest systematyka oceny oraz możliwość porównywania jakości wykonania poszczególnych elementów i etapów realizacji inwestycji.

## 2. Metoda FMEA

### 2.1. Założenia metody

Istotą metody analizy przyczyn i skutków powstających wad w konstrukcji jest postępowanie według ściśle określonych reguł, których kolejność jest następująca:

- 1) czynności wstępne (powołanie członków zespołu, wybór i zdefiniowanie obiektu badań);
- 2) dekompozycja wyrobu/procesu;
- 3) analiza potencjalnych błędów;
- 4) analiza skutków błędów;
- 5) analiza przyczyn błędów;
- 6) wyznaczenie wskaźników:
  - R – ryzyko wystąpienia błędu,
  - Z – znaczenie błędu,
  - W – możliwość wykrycia błędu;
- 7) wyznaczenie liczby priorytetowej ryzyka:  $RPN = Z \times R \times W$  ;
- 8) ustalenie rankingu błędów;
- 9) wyselekcjonowanie błędów krytycznych;
- 10) zaplanowanie i podjęcie działań zapobiegawczych;
- 11) nadzorowanie skuteczności wprowadzonych działań prewencyjnych;

W tabeli 1 przedstawiono przykłady analizowanych błędów w czasie budowy i eksploatacji nawierzchni bezpodspkowej.

Tabela 1. Źródła potencjalnych błędów i związanego z nimi ryzyka {1, 2, 3}

Proces/konstrukcja	Prawdopodobne problemy i zagrożenia
Podstawowe pomiary geodezyjne	Zmiany usytuowania punktów namiarowych toru Utrata lub zniszczenie punktów namiarowych toru Błąd urządzenia Błędy systemowe i obliczeniowe Błędy w instalacji urządzenia pomiarowego Błąd sieci
Dokładność/ niedokładność wymiarów płyty lub koryta	Koryto zbyt wysokie Koryto zbyt głębokie Nieprawidłowe pochylenie przekroju poprzecznego Nieprawidłowy przekrój wzdłużny koryta Wypiętrzone górne krawędzie koryta Zanieczyszczenie powierzchni

Usytuowanie podkładów	Szerokość toru Odległość między podkładami Ukosowanie podkładów Pochylenie szyn na podkładach Uszkodzenia powierzchni podkładów
Szyny	Wymiary szyn – tolerancje produkcyjne (głównie profil szyny) Prostoliniowość szyn Uszkodzenia szyn Zanieczyszczenie stopki szyny Zanieczyszczenie główki szyny
Zbrojenie betonu	Betonowa otulina zbrojenia Odległości (od koryta, od podkładów, od betonowej warstwy nośnej Istniejące ubytki i uszkodzenia betonu Połączenie z gruntem
Wbudowanie betonu wypełniającego	Skład betonu Wpływ podkładów na monolityczność konstrukcji Wpływ luk powietrznych pod podkładami Zagęszczanie betonu po wylaniu Obróbka, wyrównanie powierzchni Deszcz Schnięcie betonu Niska temperatura

Procesy są skonstruowane i zbadane pod kątem błędów i potencjalnych zagrożeń. Każdy poszczególny błąd, wada lub potencjalne ryzyko są oceniane osobno według trzech kategorii, przy czym każdej kategorii przypisano wartości od 1 do 10. Kategorie są następujące:

- Występowanie (R),
- Znaczenie (Z),
- Wykrywalność (W) [4].

## 2.2. Występowanie

Prawdopodobieństwo wystąpienia błędu lub ryzyka (według ocen szacunkowych sekcji R) jest klasyfikowane na podstawie opisów w tabeli 2. Zawsze trzeba jednak wziąć pod uwagę następujące aspekty:

- wystąpienie błędu odnosi się do przyczyny błędu,
- wysokie wartości ocen wskazują niepewne elementy funkcjonalne wyrobu (procesu) lub brak kontroli nad etapami realizowanego projektu,
- częstość występowania błędów można poprawić jedynie przez zmiany konstrukcyjne oraz w procesach produkcyjnych,
- w przypadku nawierzchni bezpodsypkowych trzeba uwzględnić również różne zakłócenia w czasie procesu technologicznego budowy, jak też od niekorzystnych warunków atmosferycznych.

Takie podejście stanowi rozszerzenie standardowej metody FMEA, stosowanej w typowym przemyśle.

Tabela 2. Klasyfikacja prawdopodobieństwa pojawienia się uszkodzenia R

Ocena R	Wyjaśnienie
1	Prawdopodobieństwo uszkodzenia żadne Przyczyna błędu (błąd) nie występuje. Prawidłowa budowa i struktura elementu oraz procesu wykonawczego (udział błędu $\approx 0$ )
2 – 3	Prawdopodobieństwo awarii bardzo małe. Technologia lub konstrukcja są sprawdzone i wypróbowane. Technologia lub konstrukcja są statystycznie kontrolowane: ( $1/20\ 000 < (\text{prawdopodobieństwo wystąpienia uszkodzenia}) < 1/2\ 000$ )
4 – 6	Prawdopodobieństwo awarii jest niskie Proces / konstrukcja z niewielkimi wadami (wady) ( $1/2\ 000 < (\text{prawdopodobieństwo wystąpienia uszkodzenia}) < 1/200$ )
7 – 8	Prawdopodobieństwo awarii jest umiarkowane Projektowanie i budowa stanowią dużo problemów. Stosowanie rozwiązań porównywalnych doprowadziło do powtarzających się błędów. Tolerancja prawidłowego funkcjonowania elementu jest niewielka: do $\pm 1$ jednostki błędu. ( $1/200 < (\text{prawdopodobieństwo wystąpienia uszkodzenia}) < 1/20$ )
9 – 10	Prawdopodobieństwo uszkodzenia jest duże. Proces lub struktura bardzo niepewne. Porównywalne rozwiązania niedostępne lub bez możliwości uwzględnienia ich. Błędy występują w dużej skali. ( $50\% < \text{prawdopodobieństwo awarii}$ )

### 2.3. Znaczenie

Pojęcie znaczenia zorientowane jest na opis i ocenę skutków powstałego błędu. W tabeli 3 umieszczono propozycję opisu i klasyfikacji tzw. oceny Z.

Ocena Z opisuje, w jakim stopniu tzw. „klient” (klient końcowy lub wewnętrzny organ kontrolny przy procesach złożonych – łańcuchowych) traktuje konsekwencje błędu. Trzeba przy tym pamiętać, że to jest subiektywna ocena klienta. Znaczenie błędu oparte jest na określeniu konsekwencji błędu i może zostać zmienione wyłącznie przez ingerencję w konstrukcję elementu lub zmiany w procesie produkcyjnym.

W przypadku nawierzchni bezpodсыpkowych płytowych ocena Z powinna kłaść szczególny nacisk zwłaszcza na skutki błędów lub odchyłeń wymiarowych w przekrojach płyt jezdnych i wpływające na nie problemy organizacyjno-technologiczne (np. kosztocłonność, opóźnienia, inne utrudnienia) [1].

Tabela 3. Klasyfikacja wartości oceny znaczenia błędu Z

Ocena Z	Wyjaśnienie
1	Brak wpływu błędu lub uszkodzenia na funkcjonowanie elementu (co najwyżej wpływ ledwo dostrzegalny): Błąd nie ma wpływu na bieżące zachowanie konstrukcji lub procesu oraz na dalszą eksploatację całości lub części elementu
2 – 3	Niewielki wpływ zidentyfikowanego błędu: Efekt błędu jest nieznaczny. Nieistotna odczuwalność w eksploatacji. Można zaobserwować niewielkie zakłócenia funkcjonowania systemu
4 – 6	Uciążliwy wpływ błędu na system. Wyzwała się niezadowolone zarządcy lub klienta. Eksploatatorzy czują się zagrożeni i niepewni. Zauważalne są zakłócenia funkcjonowania systemu i awaryjność. W przyszłości konieczne są poprawki lub ograniczenia eksploatacji

7 – 8	Poważny wpływ błędu na system. Powstają duże problemy z funkcjonowaniem elementu lub systemu, a każdy następny etap jest „obciążony” powstałym wcześniej błędem. Wymagane jest poprawienie elementu lub wymiana
9 – 10	Bardzo duży i poważny wpływ błędu na skuteczność działania systemu lub elementu. Prowadzi do uszkodzenia produktu (9) lub może mieć wpływ na bezpieczeństwo i / lub zgodność funkcjonowania z przepisami (10)

#### 2.4. Wykrywalność

Możliwość wykrycia, identyfikacji i interpretacji błędu została opisana przy pomocy oceny  $W$  (tabela 4). Należy wyjść z założenia, że zawsze wystąpiła przyczyna błędu i punkty oceny przyznaje się za prawdopodobieństwo ich wykrycia, za skuteczność narzędzi pomiarowych lub też równorzędnych przedsięwzięć diagnostycznych. Ocena  $W$  opisuje w jakim stopniu przyczyna błędu może zostać zidentyfikowana przed przekazaniem elementu do następnego etapu produkcyjnego (względnie do klienta) lub przed dalszym używaniem elementu, a przez to ograniczyć możliwość awarii całego systemu. Błędy projektowe, które zostały wykryte przez wewnętrzne jednostki kontrolne przedsiębiorstwa wykonawczego (w czasie planowania produkcji) ocenia się na  $W = 9$ , natomiast jeżeli wykrycie błędu nastąpi po przekazaniu elementu klientowi ostatecznemu (zewnętrznemu) wówczas ocena wynosi  $W = 10$  (koszty dodatkowe). Wykrywalność błędu można poprawić poprzez zmiany konstrukcji elementów, poznanie przebiegu niebezpiecznych zjawisk i ulepszanie metod badawczych. Przy łączeniu elementów informacja o wykryciu błędu oraz o potencjalnych zagrożeniach jest bardzo ważnym elementem całego urządzenia lub procesu, gdyż pozwala na identyfikowanie zagrożeń i błędów w mechanizmach lub bardziej skomplikowanych konstrukcjach [3].

Tabela 4. Klasyfikacja wykrywalności {2, 3}.

Ocena $W$	Wyjaśnienie
1	Bardzo wysoka wykrywalność błędu. Błąd można zidentyfikować poprzez obserwacje lub proste czynności eksploatacyjne (np. identyfikacja nieistniejącego punktu pomiarowego) $E > 99,99\%$
2 – 5	Wykrywalność umiarkowana Cecha wadliwa jest widoczna okiem nieuzbrojonym (np. betonowa płyta nośna jest za wysoka) $99,7\% < E < 99,99\%$
6 – 8	Niski poziom wykrywalności. Wymagane tradycyjne badania (testy, badania, pobieranie próbek, np. spadek masy betonu) $98\% < E < 99,7\%$
9	Bardzo niski poziom wykrywalności. Możliwe wykrycie wady tylko specjalnymi metodami (np. wykrywanie pustek powietrznych pod podkładami). $90\% < E < 98\%$
10	Nie ma możliwości wykrycia błędu. Nie ma możliwości zweryfikowania błędu, jego sprawdzenia lub wykrycia

### 3. Ocena ryzyka

Priorytet ryzyka RPN (Risk Priority Number) oblicza się przez pomnożenie trzech liczb  $Z \times R \times W$ . Ta wielkość służy przede wszystkim jako punkt odniesienia dla tworzenia wagi (lub rankingu) potencjału błędu i ryzyka. Poprawa sytuacji jest głównie zalecana dla tych przyczyn, które otrzymały dużą ocenę priorytetów ryzyka. Priorytet ryzyka można zmniejszyć przez zmniejszenie każdego punktu oceny R, Z lub W, jednak zaleca się pewną gradację procesów:

- 1) najpierw zmniejszać grupę Z, dotyczącą oceny wagi problemu;
- 2) następnie zmniejszać grupę R, dotyczącą ryzyka wystąpienia błędu;
- 3) ostatecznie ingerować w grupę W, dotyczącą poziomu wykrywalności wady lub awarii [4, 5].

### 4. Zastosowanie FMEA

Główną korzyścią z zastosowania metodologii FMEA jest ustrukturyzowane opracowanie faz analizy, w tym przede wszystkim: przetwarzanie i ocena błędów, ich występowanie, wpływ i wykrywalność. Działania naprawcze na rzecz wyeliminowania lub ograniczenia ryzyka związanego z błędami często nasuwają się same w bardzo prosty sposób, dzięki strukturalnej analizie potencjalnych błędów i ryzyk. Czynności korygujące i zapobiegawcze, można wprowadzić bezpośrednio na budowie lub uwzględnić wcześniej, już w fazie projektowania lub na etapie planowania i przygotowania produkcji.

Metodyka FMEA może być bardzo efektywnym narzędziem dla porównywania rozwiązań technologicznych (i związanych z nimi ryzyk) w ramach różnych – branych pod uwagę – scenariuszy (np. wpływ awarii elementów na niezawodność systemu). Dzięki niej można obiektywnie ocenić skuteczność naprawy uszkodzonego systemu lub elementu, względnie udokumentować prawidłowość wyboru technologii lub elementu alternatywnego.

Szczególne znaczenie wykazuje ta metodyka przy wykorzystaniu pełnym i przekrojowym do badania niezawodności jakiegoś przedsięwzięcia. Ta metodyka pomaga pokonać bariery emocjonalne przy ocenie elementu lub systemu, a dzięki wyartykułowaniu wspólnych korzyści wymaga podejścia rzeczowego i obiektywnego [7].

### 5. Zastosowanie FMEA w kolejowych nawierzchniach bezpodsypkowych

Konstrukcja nawierzchni bezpodsypkowej wyróżnia się dużą liczbą warunków otoczenia, które mają bezpośredni wpływ na niezawodność eksploatacji, a tym samym na poziom ryzyka:

- postępujący proces budowlany (stale zmieniające się warunki, mosty, tunele, roboty ziemne);

- logistyka (zaopatrzenie ruchomego placu budowy);
- pogoda (deszcz, wahania temperatury, mróz, wiatr);
- zależność od różnych etapów technologicznych (pomiar, budowa toru, wyposażenie linii, wylanie betonu na płytę);
- drgania i wibracje powstające wskutek działalności budowlanej lub efektów środowiskowych.

W praktyce jest niemożliwe lub nieużyteczne, by w sposób ciągły w pełni monitorować wszystkie wpływy w standardowych procesach eksploatacji. Bardziej ekonomicznie jest, aby ustalenia dotyczące wczesnego diagnozowania problemów i prawidłowego reagowania na pojawiające się problemy były przygotowane przez pracowników i wynikały z doświadczeń eksploatacyjnych. W całym systemie FMEA z założenia istnieje możliwość oceny skutków zdarzenia jeszcze przed jego wystąpieniem, w odniesieniu do danego zagrożenia oraz zastosowania odpowiednich środków zapobiegawczych [6].

## 6. Podsumowanie

Sama metodologia i sposób postępowania według FMEA są na tyle uniwersalne, że doświadczenie analizy błędów nabyte np. przy budowie drogi kolejowej bezpodsypkowej, daje się łatwo zastosować do realizacji innych budowli, np. kubaturowych i na odwrót.

Celem postępowania FMEA jest zminimalizowanie ryzyka, które zawsze towarzyszy każdemu etapowi budowy, czy to w wyniku mniejszej wrażliwości konstrukcji na błędy (projektowe lub wykonawcze), czy też w wyniku postępującego uprzemysłowienia procesów produkcyjnych (bez zwracania uwagi na lokalne zróżnicowanie wymagań). Metoda FMEA pomaga zachować odpowiedni poziom wydajności na miejscu budowy, wraz z zachowaniem długoterminowego poziomu jakości samej konstrukcji nawierzchni bezpodsypkowej.

## Literatura

- [1] Ablinger, P., Ganzheitliches Prozessdesign im Bereich der Bahntechnik. Eisenbahningenieur 52, 9/2001.
- [2] Ablinger, P.; Rhomberg, H.; Kleboth, C., Spezifische Anforderungen an die Herstellung des Füllbetons bei Festen Fahrbahnen. Eisenbahningenieur 52, 9/2001.
- [3] Ablinger, P., Vermessen und Einrichten von Festen Fahrbahnen – Systemkonzept. Eisenbahningenieur 52, 9/2001.
- [4] Folejewska A., Analiza FMEA – zasady, komentarze, arkusze. Verlag Dashofer, 2011 (e-book).

- [5] Huber Z., Analiza FMEA procesu. Internetowe Wydawnictwo Złote Myśli, Gliwice, 2007 (e-book).
- [6] Schubert, M., FMEA – Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse – Leitfaden. Deutsche Gesellschaft für Qualität e. V 1993.
- [7] Urbaniak M., Zarządzanie jakością. Difin, Warszawa, 2004.