



**Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie**  
**Instytut Inżynierii Lądowej**  
**Katedra Hydrotechniki, Technologii i Organizacji Robót**

## **Wykorzystanie narzędzi opartych na uczeniu maszynowym w systemie monitorowania stanu technicznego konstrukcji mostowych**

**dr hab. Roman Tracz, profesor SGGW**

## Plan

Wprowadzenie

Monitorowanie stanu obiektów mostowych

Uczenie maszynowe w systemie monitoringu mostów

Metodologia

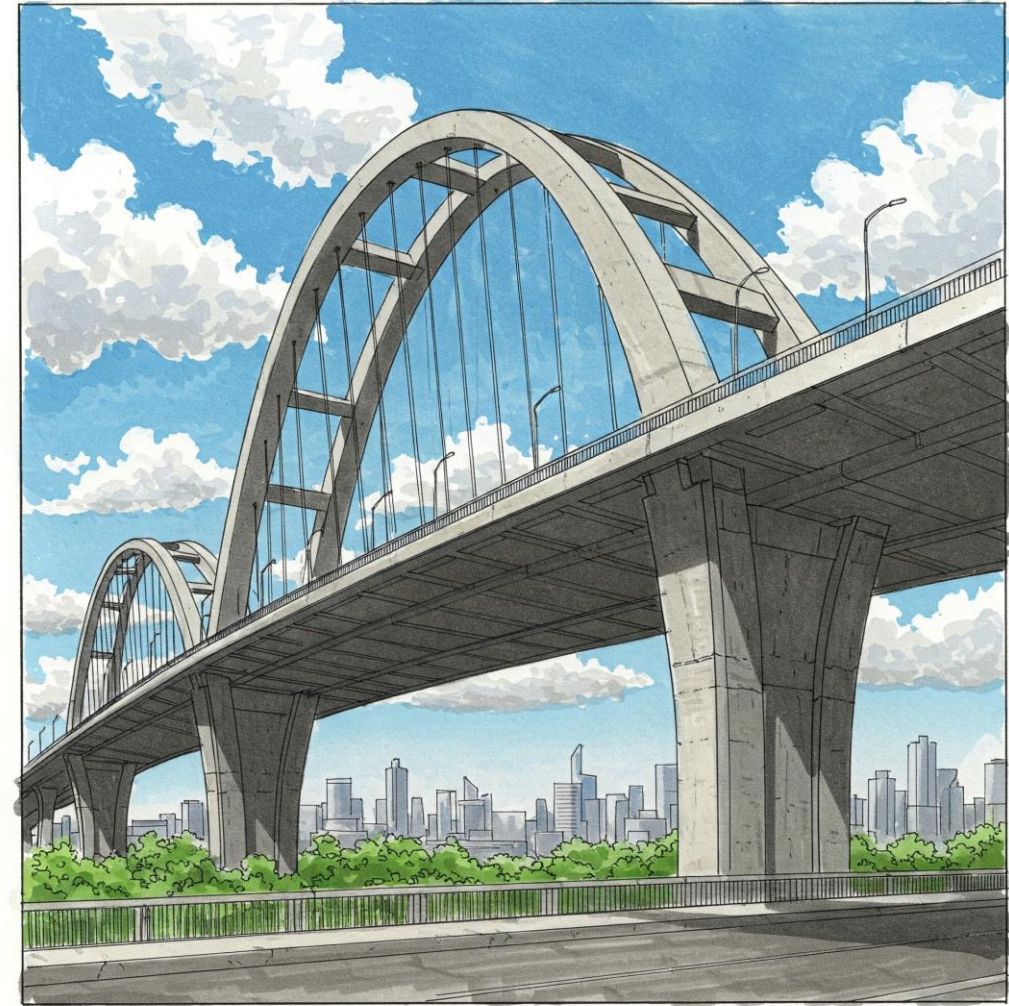
- przyczynowo-skutkowe zależności między zewnętrznymi objawami uszkodzeń a przyczynami ich powstawania
- ocena ilościowa stanu technicznego elementów konstrukcyjnych mostu

Wyniki badań

- przyczynowo-skutkowe zależności
- ocena ilościowa stanu technicznego elementów konstrukcyjnych mostu

Podsumowanie

- ▶ Trach, R., Tyvoniuk, V., Wierzbicki, T., Trach, Y., Kowalski, J., Szymanek, S., Dziecioł, J., Statnyk, I., & Podvornyi, A. (2025). Using AI-Based Tools to Quantify the Technical Condition of Bridge Structural Components. *Applied Sciences*, 15(3), 1625. <https://doi.org/10.3390/app15031625>
- ▶ Trach, R., Ryzhakova, G., Trach, Y., Shpakov, A., & Tyvoniuk, V. (2023). Modeling the Cause-and-Effect Relationships between the Causes of Damage and External Indicators of RC Elements Using ML Tools. *Sustainability*, 15(6), 5250. <https://doi.org/10.3390/su15065250>



Źródło. Wygenerowano przez Gemini 2.0

## Obiekt badań

**Obiektem badań** są obiekty mostowe, w tym mosty, wiadukty i estakady wykonane z betonu.

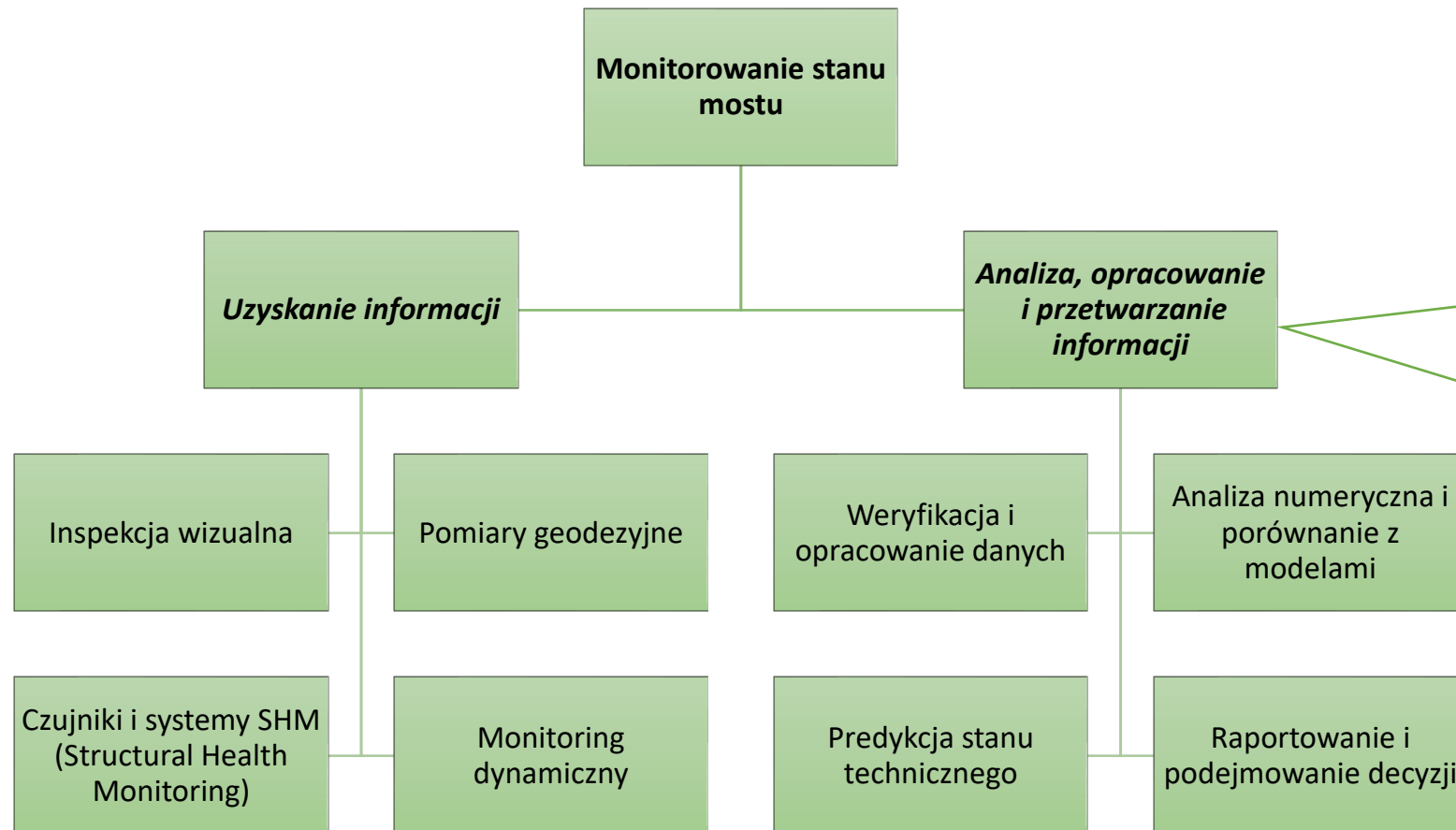
Podział drogowych obiektów mostowych, tuneli i przejść podziemnych na drogach krajowych zarządzanych przez GDDKiA (stan na 20.11.2016r.)

| Rodzaj materiału konstrukcyjnego                                                               | Liczba       |       | Długość        |       | Powierzchnia     |       |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|-------|----------------|-------|------------------|-------|
|                                                                                                | Szt.         | %     | m              | %     | m <sup>2</sup>   | %     |
| stal                                                                                           | 1 029        | 13.97 | 91 812         | 22.19 | 1 295 721        | 22.81 |
| beton zbrojony                                                                                 | 3 255        | 44.21 | 105 726        | 25.55 | 1 247 885        | 21.97 |
| beton sprężony                                                                                 | 3 018        | 40.99 | 215 478        | 52.09 | 3 128 542        | 55.09 |
| kamień, cegła, beton                                                                           | 61           | 0.83  | 687            | 0.17  | 7 369            | 0.13  |
| pozostałe (tymczasowe)                                                                         | 0            | 0     | 0              | 0     | 0                | 0     |
| <b>Ogółem</b>                                                                                  | <b>7 363</b> |       | <b>413 703</b> |       | <b>5 679 518</b> |       |
| w tym: tunele i przejścia podziemne – 184 szt. / dług. - 7029 m / pow. – 71 684 m <sup>2</sup> |              |       |                |       |                  |       |

Źródło. <https://www.gov.pl/web/gddkia/dane-statystyczne>

## Monitorowanie stanu obiektów mostowych

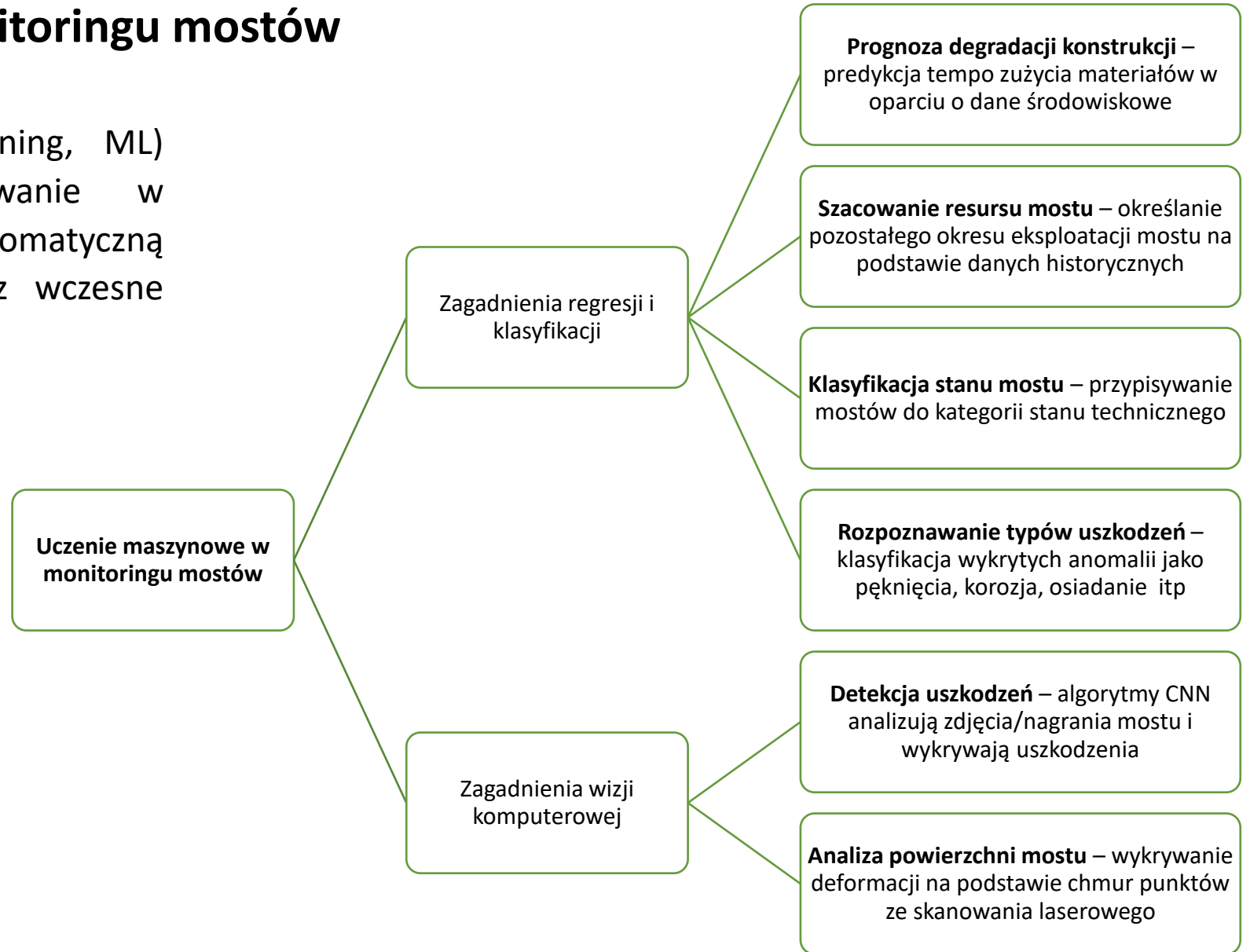
**Monitorowanie stanu obiektów** mostowych to kluczowy element ich eksploatacji, który pozwala na wczesne wykrywanie uszkodzeń i optymalizację kosztów utrzymania. Wykorzystanie monitoringu pozwala na wydłużenie żywotności mostów, zwiększenie bezpieczeństwa użytkowników i ograniczenie kosztów remontów.



Źródło. Wygenerowano przez Chatgpt 4.0

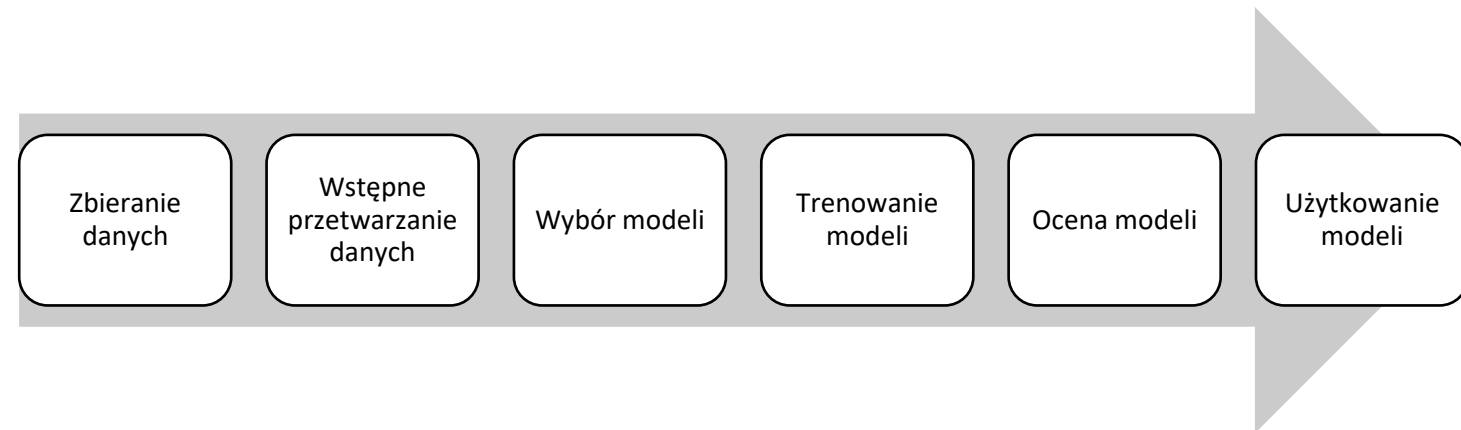
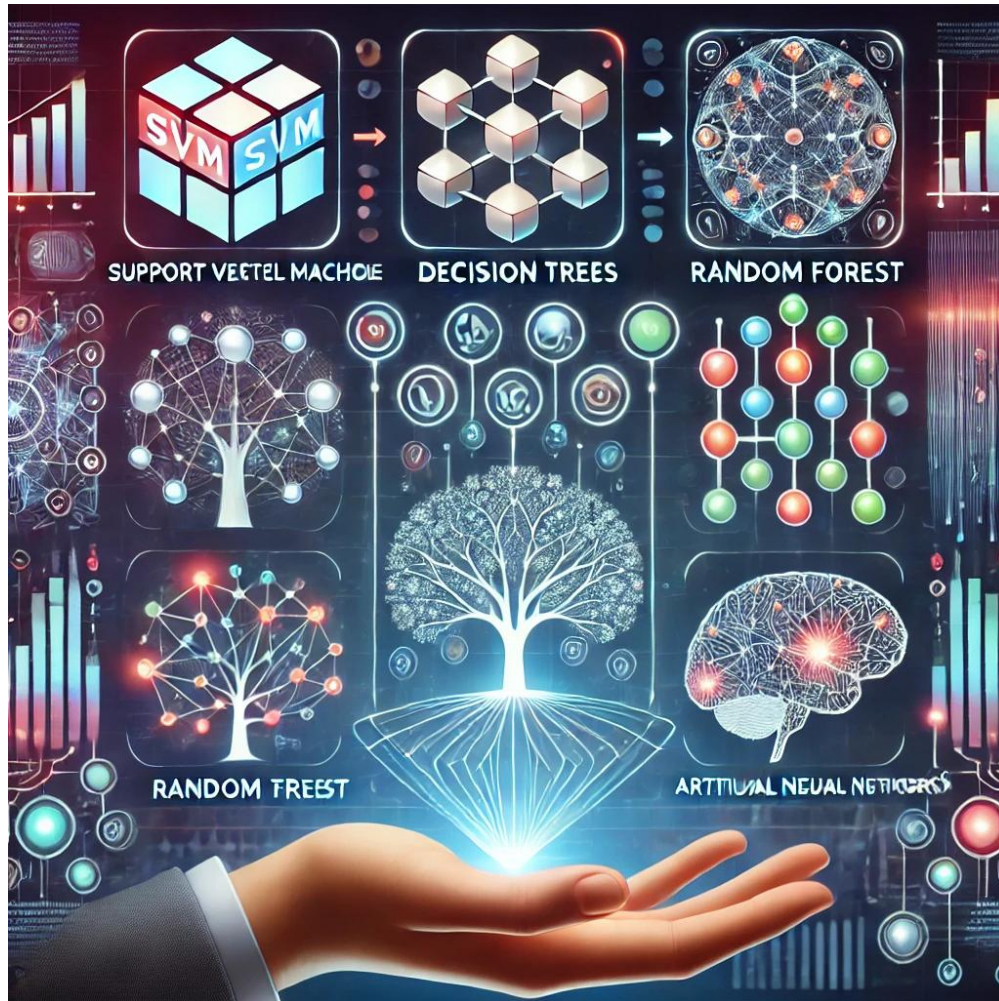
## Uczenie maszynowe w monitoringu mostów

**Uczenie maszynowe** (Machine Learning, ML) znajduje coraz szersze zastosowanie w monitoringu mostów, umożliwiając automatyczną analizę dużych zbiorów danych oraz wczesne wykrywanie anomalii w konstrukcjach.



## Metodologia

W obu badaniach wykorzystano następujące algorytmy uczenia maszynowego: **regresja wektorów nośnych (SVR)**, **drzewa decyzyjne (DT)**, **las losowy (RF)** oraz **sztuczne sieci neuronowe (ANN)**.



Źródło. Wygenerowano przez Chatgpt 4.0

## Metodologia

|                                                                                                    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Błąd średniokwadratowy ( <b>MSE - Mean Squared Error</b> ) został użyty jako funkcja straty modelu |
| $\text{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y'_i - y_i)^2.$                                            |
| $y_i$ — rzeczywista wartość zmiennej docelowej<br>$y'_i$ — wartość przewidziana przez model        |
| Do porównania efektywności modeli użyto:                                                           |
| Średni absolutny błąd procentowy ( <b>MAPE - Mean Absolute Percentage Error</b> )                  |
| $\text{MAPE} = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \left  \frac{y_i - y'_i}{y_i} \right .$                |
| Współczynnik determinacji ( <b>R<sup>2</sup> - Coefficient of Determination</b> )                  |
| $R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - y'_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y}_i)^2}.$                                  |
| $\bar{y}_i$ — średnia wartość rzeczywistej zmiennej docelowej.                                     |

### Przyczynowo-skutkowe zależności między zewnętrznymi objawami uszkodzeń a przyczynami ich powstawania

**Zależności przyczynowo-skutkowe** mogą być proste lub złożone i występować w różnych kontekstach – od fizyki i inżynierii po nauki społeczne i ekonomię. Identyfikacja tych zależności jest kluczowa dla zrozumienia mechanizmów danego procesu, przewidywania jego wyników oraz podejmowania świadomych decyzji.

Na podstawie informacji uzyskanych z inspekcji wizualnej możliwe jest zbadanie zależności przyczynowo-skutkowych między zewnętrznymi objawami uszkodzeń a przyczynami ich powstawania.

Na przykład, jeśli inspekcja wizualna ujawnia:

- pęknięcia na powierzchni konstrukcji żelbetowej wzdłuż zbrojenia
- eksfoliację warstwy ochronnej betonu
- przebarwienia lub plamy na powierzchni betonu
- ... i inne

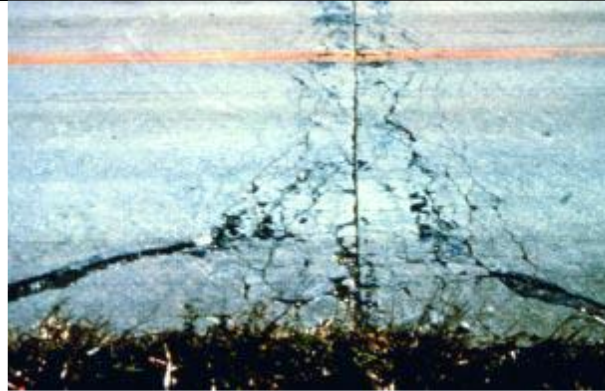
Objawy zewnętrzne

to ewentualną przyczyną powstania tego uszkodzenia betonu może być korozja zbrojenia.

Przyczyna



Rys. 1. Korozja stali zbrojeniowej jest najczęstszą przyczyną degradacji betonu.



Rys. 10. Pękanie typu D jest formą pogorszenia jakości nawierzchni spowodowanego zamrażaniem i rozmrażaniem.



Rys. 6. Cykle zamrażania i rozmrażania mogą powodować łuszczenie się powierzchni betonu.



Rys. 22. Częstą formą przeciążenia jest występowanie spoin na krawędziach płyt.

**Celem tego badania** było określenie możliwych przyczyn powstania defektów w elementach betonowych na podstawie identyfikacji zewnętrznych objawów z wykorzystaniem narzędzi uczenia maszynowego.

Na podstawie przeglądu i analizy literatury zawierającej związki przyczynowo-skutkowe między zewnętrznymi objawami uszkodzeń a przyczynami ich powstawania, stworzono bazę danych zależności.

### Przyczynowo-skutkowe zależności między zewnętrznymi objawami uszkodzeń a przyczynami ich powstawania

Wybrano sześć przyczyn defektów: **korozję zbrojenia (1), przeciążenia konstrukcyjne (2), agresję siarczanową (3), reakcję alkaliczno-kruszywową (4), cykle zamrażania i rozmrażania (5) oraz oddziaływanie chlorków (6)**, które stanowią zmienne wyjściowe w bazie danych.

Do każdej z przyczyn przypisano odpowiednie objawy zewnętrzne.

- Korozja zbrojenia – 8 objawów zewnętrznych,
- Przeciążenia konstrukcyjne – 8 objawów zewnętrznych,
- Agresja siarczanowa – 6 objawów zewnętrznych, z czego 3 pokrywają się z poprzednimi przyczynami,
- Reakcja alkaliczno-kruszywowa – 4 objawy zewnętrzne, z czego 3 pokrywają się z poprzednimi przyczynami,
- Cykle zamrażania i rozmrażania – 6 objawów zewnętrznych, z czego 5 pokrywają się z poprzednimi przyczynami,
- Oddziaływanie chlorków – 6 objawów zewnętrznych, z czego 5 pokrywają się z poprzednimi przyczynami.

Sekcja Inżynieria Przedsięwzięć Budowlanych KILiW PAN

Przyczynowo-skutkowe zależności między zewnętrznymi objawami uszkodzeń a przyczynami ich powstawania

Przykład zmiennych wejściowych i wyjściowych użytych w modelach ML

|                                         |                                      |                                                |                                      |                                                                                |                                                             |       |                                                  |                                                           |                                                                      |                                                                                          |                               |                                       |                             |                                   |                                |                                               |                              |                                     |                                        |                            |                                 |                                  |           |
|-----------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------|---------------------------------|----------------------------------|-----------|
| Bezpośrednie pęknięcia wzdłuż zbrojenia | Eksfoliacja warstwy ochronnej betonu | Odpryskiwanie fragmentów betonu w formie łusek | Wyrwanie stożkowego fragmentu betonu | Rozwarstwienie materiału cementowego w płaszczyźnie równoległej do powierzchni | Pęknięcia w miejscu połączenia, na krawędzi i przy otworach | Plamy | Powstawanie małych ubytków na powierzchni betonu | Pęknięcie ukośne pod kątem 45° do osi elementu betonowego | Pęknięcie poprzeczne pod kątem prostym do dłuższego wymiaru elementu | Równoległe pęknięcia rozpoczynające się w dolnych/górnyc h strefach wysokiego naprężenia | Pęknięcia w strefie ściskanej | Pęknięcia ukośne w strefie podporowej | Pęknięcia od sił normalnych | Ugięcia elementów konstrukcyjnych | Wypukłość ściskanego zbrojenia | Losowe i wielokrotne pęknięcia na powierzchni | Inkrustacja soli mineralnych | Erozja stosunkowo dużej powierzchni | Pęknięcia a wzoru siatki (tzw. mapowe) | Węzłowa propagacja pęknięć | Pęknięcia a typu D (D-cracking) | Zmiana koloru powierzchni betonu | Przyczyny |
| x1                                      | x2                                   | x3                                             | x4                                   | x5                                                                             | x6                                                          | x7    | x8                                               | x9                                                        | x10                                                                  | x11                                                                                      | x12                           | x13                                   | x14                         | x15                               | x16                            | x17                                           | x18                          | x19                                 | x20                                    | x21                        | x22                             | x23                              | y         |
| 0.1                                     | 1                                    | 10                                             | 1                                    | 10                                                                             | 0.12                                                        | 1     | 1                                                | 0                                                         | 0                                                                    | 0                                                                                        | 0                             | 0                                     | 0                           | 0                                 | 0                              | 0                                             | 0                            | 0                                   | 0                                      | 0                          | 0                               | 0                                | 1         |
| 2.4                                     | 1                                    | 67.5                                           | 12.5                                 | 67.5                                                                           | 0.17                                                        | 1     | 1                                                | 0                                                         | 0                                                                    | 0                                                                                        | 0                             | 0                                     | 0                           | 0                                 | 0                              | 0                                             | 0                            | 0                                   | 0                                      | 0                          | 0                               | 0                                | 1         |
| ...                                     | ...                                  | ...                                            | ...                                  | ...                                                                            | ...                                                         | ...   | ...                                              | ...                                                       | ...                                                                  | ...                                                                                      | ...                           | ...                                   | ...                         | ...                               | ...                            | ...                                           | ...                          | ...                                 | ...                                    | ...                        | ...                             | ...                              | ...       |
| 0                                       | 0                                    | 0                                              | 0                                    | 0                                                                              | 0                                                           | 0     | 0                                                | 0.95                                                      | 0.95                                                                 | 0.095                                                                                    | 1                             | 1                                     | 1                           | 1                                 | 1                              | 0                                             | 0                            | 0                                   | 0                                      | 0                          | 0                               | 0                                | 2         |
| 0                                       | 0                                    | 0                                              | 0                                    | 0                                                                              | 0                                                           | 0     | 0                                                | 0.3                                                       | 0.3                                                                  | 0.03                                                                                     | 1                             | 1                                     | 0.5                         | 1                                 | 1                              | 0                                             | 0                            | 0                                   | 0                                      | 0                          | 0                               | 0                                | 2         |
| ...                                     | ...                                  | ...                                            | ...                                  | ...                                                                            | ...                                                         | ...   | ...                                              | ...                                                       | ...                                                                  | ...                                                                                      | ...                           | ...                                   | ...                         | ...                               | ...                            | ...                                           | ...                          | ...                                 | ...                                    | ...                        | ...                             | ...                              | ...       |
| 1.2                                     | 0                                    | 0                                              | 6.5                                  | 0                                                                              | 0.22                                                        | 0     | 0                                                | 0                                                         | 0                                                                    | 0                                                                                        | 0                             | 0                                     | 0                           | 0                                 | 0                              | 1                                             | 1                            | 12                                  | 0                                      | 0                          | 0                               | 0                                | 3         |
| 1.3                                     | 0                                    | 0                                              | 7                                    | 0                                                                              | 0.23                                                        | 0     | 0                                                | 0                                                         | 0                                                                    | 0                                                                                        | 0                             | 0                                     | 0                           | 0                                 | 0                              | 1                                             | 1                            | 13                                  | 0                                      | 0                          | 0                               | 0                                | 3         |
| ...                                     | ...                                  | ...                                            | ...                                  | ...                                                                            | ...                                                         | ...   | ...                                              | ...                                                       | ...                                                                  | ...                                                                                      | ...                           | ...                                   | ...                         | ...                               | ...                            | ...                                           | ...                          | ...                                 | ...                                    | ...                        | ...                             | ...                              | ...       |
| 0.8                                     | 1                                    | 0                                              | 0                                    | 0                                                                              | 0.15                                                        | 0     | 0                                                | 0                                                         | 0                                                                    | 0                                                                                        | 0                             | 0                                     | 0                           | 0                                 | 0                              | 0                                             | 0                            | 0                                   | 0.45                                   | 0.075                      | 0                               | 0                                | 4         |
| 3.6                                     | 1                                    | 0                                              | 0                                    | 0                                                                              | 0.28                                                        | 0     | 0                                                | 0                                                         | 0                                                                    | 0                                                                                        | 0                             | 0                                     | 0                           | 0                                 | 0                              | 0                                             | 0                            | 0                                   | 1.85                                   | 0.15                       | 0                               | 0                                | 4         |
| ...                                     | ...                                  | ...                                            | ...                                  | ...                                                                            | ...                                                         | ...   | ...                                              | ...                                                       | ...                                                                  | ...                                                                                      | ...                           | ...                                   | ...                         | ...                               | ...                            | ...                                           | ...                          | ...                                 | ...                                    | ...                        | ...                             | ...                              | ...       |
| 0                                       | 0                                    | 17.5                                           | 2.5                                  | 0                                                                              | 0                                                           | 1     | 0                                                | 0                                                         | 0                                                                    | 0                                                                                        | 0                             | 0                                     | 0                           | 0                                 | 0                              | 0                                             | 0                            | 4                                   | 0.25                                   | 0                          | 1                               | 0                                | 5         |
| 0                                       | 0                                    | 105                                            | 20                                   | 0                                                                              | 0                                                           | 1     | 0                                                | 0                                                         | 0                                                                    | 0                                                                                        | 0                             | 0                                     | 0                           | 0                                 | 0                              | 0                                             | 0                            | 78                                  | 2                                      | 0                          | 1                               | 0                                | 5         |
| ...                                     | ...                                  | ...                                            | ...                                  | ...                                                                            | ...                                                         | ...   | ...                                              | ...                                                       | ...                                                                  | ...                                                                                      | ...                           | ...                                   | ...                         | ...                               | ...                            | ...                                           | ...                          | ...                                 | ...                                    | ...                        | ...                             | ...                              | ...       |
| 0                                       | 0                                    | 10                                             | 1                                    | 10                                                                             | 0                                                           | 0     | 0                                                | 0                                                         | 0                                                                    | 0                                                                                        | 0                             | 0                                     | 0                           | 0                                 | 0                              | 0                                             | 1                            | 1                                   | 0                                      | 0                          | 0                               | 1                                | 6         |
| 0                                       | 0                                    | 97.5                                           | 18.5                                 | 97.5                                                                           | 0                                                           | 0     | 0                                                | 0                                                         | 0                                                                    | 0                                                                                        | 0                             | 0                                     | 0                           | 0                                 | 0                              | 0                                             | 1                            | 75                                  | 0                                      | 0                          | 0                               | 1                                | 6         |

## Ocena ilościowa stanu technicznego elementów konstrukcyjnych mostu

W Polsce „Instrukcja przeprowadzania przeglądów drogowych obiektów inżynierskich” ustala system kontroli obiektów inżynierskich zarządzanych przez GDDKiA (przeglądy bieżące, przeglądy podstawowe, przeglądy rozszerzone, przeglądy szczegółowe, ekspertyzy) oraz określają między innymi częstotliwość, cel, sposób przeprowadzania i dokumentowania przeglądów.

W celu ujednolicenia sposobu oceny obiektów inżynierskich przez różnych inspektorów mostowych, Generalny Dyrektor Dróg Krajowych i Autostrad wprowadził „Zasady stosowania skali ocen punktowych stanu technicznego i przydatności do użytkowania drogowych obiektów inżynierskich”. W opracowaniu zawarto wytyczne, wskazówki i przykłady, którymi – uwzględniając własną wiedzę i doświadczenie – powinien się kierować inspektor mostowy, oceniając poszczególne elementy obiektów inżynierskich.

Zasady oceny stanu technicznego  
obiektów mostowych

| Ocena | Stan           | Opis stanu elementu                                                                              |
|-------|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 5     | odpowiedni     | bez uszkodzeń i zanieczyszczeń możliwych do stwierdzenia podczas przeglądu                       |
| 4     | zadowalający   | wykazuje zanieczyszczenia lub pierwsze objawy uszkodzeń pogarszających wygląd estetyczny         |
| 3     | niepokojący    | wykazuje uszkodzenia, których nienaprawienie spowoduje skrócenie okresu bezpiecznej eksploatacji |
| 2     | niedostateczny | wykazuje uszkodzenia obniżające przydatność użytkową, ale możliwe do naprawy                     |
| 1     | przedawaryjny  | wykazuje nieodwracalne uszkodzenia dyskwalifikujące przydatność użytkową                         |
| 0     | awaryjny       | uległ zniszczeniu lub przestał istnieć                                                           |

## Ocena ilościowa stanu technicznego elementów konstrukcyjnych mostu

Elementy obiektu mostowego,  
podlegające ocenie

|                                          |                                          |
|------------------------------------------|------------------------------------------|
| 1. Nasypy i skarpy                       | 12. Urządzenia dylatacyjne               |
| 2. Dojazdy w obrębie skrzydeł            | 13. Przyczółki                           |
| 3. Nawierzchnia jezdni                   | 14. Filary                               |
| 4. Nawierzchnia chodników i krawężniki   | 15. Koryto rzeki i przestrzeń podmostowa |
| 5. Balustrady, bariery ochronne i osłony | 16. Przeguby                             |
| 6. Belki podporęczowe i gzymsy           | 17. Konstrukcje oporowe i skrzydełka     |
| 7. Urządzenia odwadniające               | 18. Urządzenia ochrony środowiska        |
| 8. Izolacja pomostu                      | 19. Zakotwienia cięgien                  |
| 9. Konstrukcja pomostu                   | 20. Cięgna                               |
| 10. Konstrukcja dźwigarów głównych       | 21. Urządzenia obce                      |
| 11. Łożyska                              |                                          |

Informacje o zestawach danych

| Źródło danych                                                    | Ilość zmiennych wejściowych | Liczba rekordów w zestawie danych |
|------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| Tablica 3.9. Ocena pomostu o konstrukcji z betonu                | 12                          | 346                               |
| Tablica 3.13. Ocena dźwigarów betonowych                         | 13                          | 404                               |
| Tablica 3.20. Ocena przyczółków i<br>Tablica 3.21. Ocena filarów | 11                          | 312                               |

## Ocena ilościowa stanu technicznego elementów konstrukcyjnych mostu

**Celem tego badania** było opracowanie modelu opartego na ML do ilościowej oceny stanu technicznego elementów konstrukcyjnych mostu na podstawie danych uzyskanych z inspekcji wizualnej.

| Lp. | Rodzaj uszkodzeń                                                                       |   |                                               | Zakres uszkodzeń [%]                                  |     |    |    |      | Przykładowe kody uszkodzeń |                |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------|---|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----|----|----|------|----------------------------|----------------|
|     |                                                                                        |   |                                               | 0                                                     | ≤ 5 | 10 | 20 | ≥ 30 |                            |                |
| 1   | Zanieczyszczenia mające wpływ na:                                                      |   | a                                             | estetykę                                              |     | 5  |    | 4    |                            | NB, OB         |
| b   |                                                                                        |   | trwałość                                      |                                                       | 5   | 4  | 3  |      |                            |                |
| 2   | Wegetacja roślin                                                                       |   |                                               | 5                                                     | 4   |    | 3  |      | WB                         |                |
| 3   | Przecieki, zacieki                                                                     |   |                                               | 5                                                     | 4   | 3  |    | 2    | CB                         |                |
| 4   | Uszkodzenia powłok antykorozyjnych                                                     |   |                                               | 5                                                     | 4   |    | 3  |      | AB                         |                |
| 5   | Korozja betonu:                                                                        |   | a                                             | osady, wykwyty                                        |     | 5  | 4  | 3    | 2                          | KB, OB, UB, ZB |
|     |                                                                                        |   | b                                             | łuszczenie, miejscowe zniszczenie struktury materiału |     | 5  | 4  | 3    | 2                          |                |
| 6   | Korozja zbrojenia:                                                                     |   | a                                             | strzemion                                             |     | 5  | 4  | 3    | 2                          | KZ             |
|     |                                                                                        |   | b                                             | prętów głównych                                       |     | 5  | 3  | 2    | 1                          | KZ             |
| 7   | Korozja cięgien sprężających w przekroju betonowym i/lub zakotwień                     |   |                                               | 5                                                     | 3   | 2  |    | 1    | AP, KP, AS, KS             |                |
| 8   | Zerwanie drutów, splotów lub kabli sprężających znajdujących się w przekroju betonowym |   |                                               | 5                                                     | 2   |    | 1  |      | RP, UP                     |                |
| 9   | Rysy w pomoście żelbetonowym:*                                                         | a | skurczowe (siatka spękań)                     |                                                       | 5   | 4  |    | 3    |                            | RB             |
|     |                                                                                        | b | wzdłuż korodującego zbrojenia                 |                                                       | 5   | 3  |    |      |                            |                |
|     |                                                                                        | c | wytrzymałościowe/przeciążeniowe o rozwarości: | do 0.2 (0.3)**mm                                      | 5   | 4  |    |      |                            |                |
|     |                                                                                        |   |                                               | od 0.2 (0.3)** do 1.0 mm                              | 5   | 3  |    | 2    |                            |                |
|     |                                                                                        |   |                                               | ponad 1.0 mm                                          | 5   | 2  |    | 1    |                            |                |

| Lp. | Rodzaj uszkodzeń                                                                                                                |   |                                                         | Zakres uszkodzeń [%] |     |    |    |      | Przykładowe kody uszkodzeń         |
|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|---------------------------------------------------------|----------------------|-----|----|----|------|------------------------------------|
|     |                                                                                                                                 |   |                                                         | 0                    | ≤ 5 | 10 | 20 | ≥ 30 |                                    |
| 10  | Rysy w pomoście z betonu sprężonego:*                                                                                           | a | skurczowe oraz w spójnościach/stykach technologicznych  | 5                    | 4   | 3  |    |      | RB                                 |
|     |                                                                                                                                 | b | sprężenie pełne i ograniczone                           | 5                    | 2   | 1  |    |      |                                    |
|     |                                                                                                                                 | c | sprężenie częściowe lub rysy dopuszczone w projekcie*** | 5                    | 4   | 3  |    |      |                                    |
|     |                                                                                                                                 |   | ponad 0.1 mm                                            | 5                    | 2   |    |    |      |                                    |
| 11  | Ubytki betonu                                                                                                                   |   |                                                         | 5                    | 4   | 3  | 2  |      | UB                                 |
| 12  | Przemieszczenia, deformacje elementów pomostu                                                                                   |   |                                                         | 5                    | 2   |    |    |      | PB, DB                             |
| 13  | Zniszczenie części pomostu                                                                                                      |   |                                                         | 5                    | 0   |    |    |      | UB, ZB                             |
| 14  | Uszkodzenia elementów wzmacniających, np. stalowych płaskowników, taśm lub mat z włókien kompozytowych oraz dodatkowych podparć |   |                                                         | 5                    | 3   | 2  | 1  | 0    | LM, UM, RM, LS, KS, US, RS, DS, PS |

Źródło. Zasady stosowania skali ocen punktowych stanu technicznego i przydatności do użytkowania drogowych obiektów inżynierskich. Tablica 3.9. Ocena pomostu o konstrukcji z betonu.

# Sekcja Inżynieria Przedsięwzięć Budowlanych KILiW PAN

## Ocena ilościowa stanu technicznego elementów konstrukcyjnych mostu

Przykład zestawu danych wykorzystywana do oceny stanu płyty pomostu

| Przecieki | Uszkodzenia powłok antykorozyjnych | Korozja betonu | Korozja zbrojenia | Korozja cięgien sprężających | Zerwanie drutów, splotów lub kabli | Rysy w pomoście żelbetowym (0.2 - 1.0) | Rysy w pomoście żelbetowym ( > 1.0) | Ubytki betonu | Przemieszczenia, deformacje elementów pomostu | Zniszczenie części pomostu | Uszkodzenia elementów wzmacniających | Ocena stanu |
|-----------|------------------------------------|----------------|-------------------|------------------------------|------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------|---------------|-----------------------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|-------------|
| $x_1$     | $x_2$                              | $x_3$          | $x_4$             | $x_5$                        | $x_6$                              | $x_7$                                  | $x_8$                               | $x_9$         | $x_{10}$                                      | $x_{11}$                   | $x_{12}$                             | $y$         |
| 0         | 0                                  | 0              | 0                 | 0                            | 0                                  | 0                                      | 0                                   | 0             | 0                                             | 0                          | 0                                    | 5           |
| ...       | ...                                | ...            | ...               | ...                          | ...                                | ...                                    | ...                                 | ...           | ...                                           | ...                        | ...                                  | ...         |
| 1         | 4                                  | 1              | 1                 | 0                            | 0                                  | 0                                      | 0                                   | 1             | 0                                             | 0                          | 0                                    | 4           |
| 1         | 1                                  | 1              | 3                 | 0                            | 0                                  | 0                                      | 0                                   | 1             | 0                                             | 0                          | 0                                    | 4           |
| ...       | ...                                | ...            | ...               | ...                          | ...                                | ...                                    | ...                                 | ...           | ...                                           | ...                        | ...                                  | ...         |
| 8         | 20                                 | 6              | 6                 | 6                            | 0                                  | 1                                      | 0                                   | 10            | 0                                             | 0                          | 1                                    | 3           |
| 11        | 23                                 | 9              | 6                 | 6                            | 0                                  | 1                                      | 0                                   | 10            | 0                                             | 0                          | 1                                    | 3           |
| ...       | ...                                | ...            | ...               | ...                          | ...                                | ...                                    | ...                                 | ...           | ...                                           | ...                        | ...                                  | ...         |
| 30        | 0                                  | 20             | 20                | 10                           | 5                                  | 30                                     | 5                                   | 30            | 5                                             | 0                          | 6                                    | 2           |
| 42        | 0                                  | 32             | 34                | 22                           | 12                                 | 35                                     | 13                                  | 36            | 12                                            | 0                          | 12                                   | 2           |
| ...       | ...                                | ...            | ...               | ...                          | ...                                | ...                                    | ...                                 | ...           | ...                                           | ...                        | ...                                  | ...         |
| 0         | 0                                  | 0              | 19                | 30                           | 20                                 | 0                                      | 30                                  | 0             | 0                                             | 0                          | 20                                   | 1           |
| 0         | 0                                  | 0              | 21                | 31                           | 20                                 | 0                                      | 30                                  | 0             | 0                                             | 0                          | 27                                   | 1           |
| ...       | ...                                | ...            | ...               | ...                          | ...                                | ...                                    | ...                                 | ...           | ...                                           | ...                        | ...                                  | ...         |
| 0         | 0                                  | 0              | 0                 | 0                            | 0                                  | 0                                      | 0                                   | 0             | 0                                             | 5                          | 30                                   | 0           |

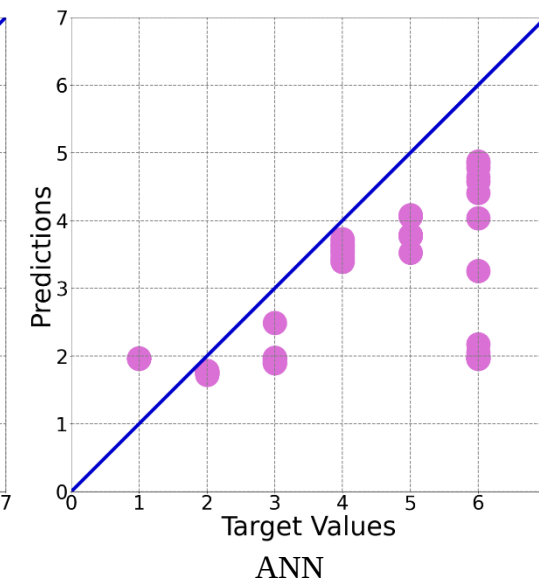
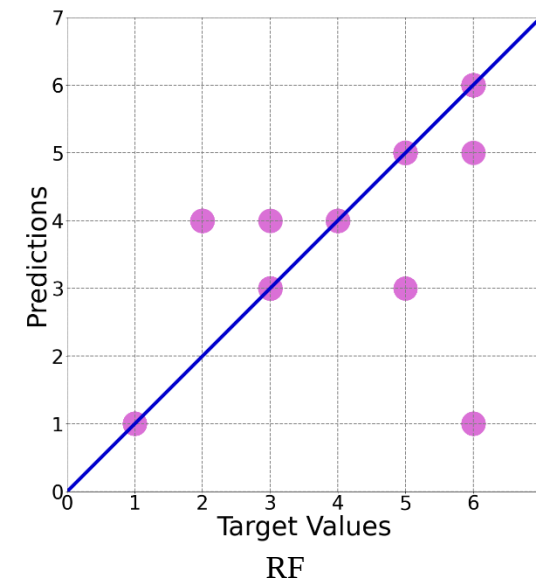
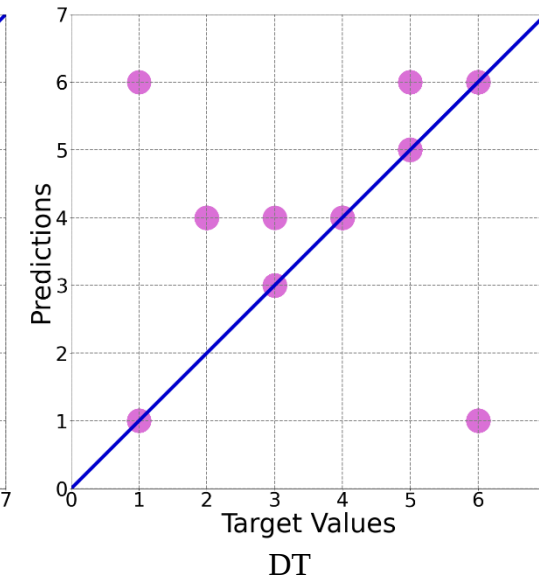
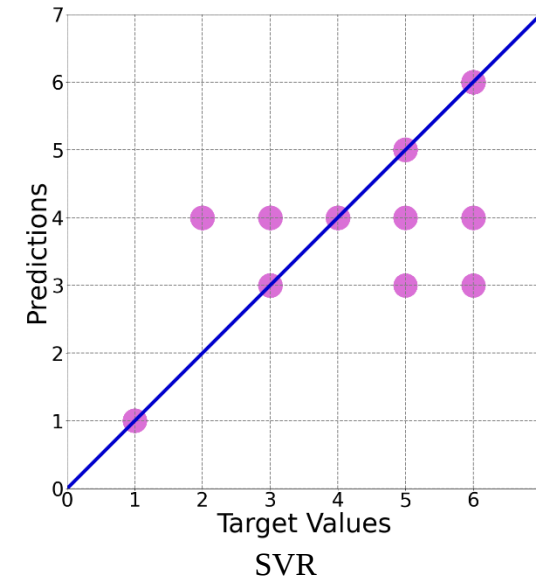
Warszawa, 17 marca 2025 roku

## Przyczynowo-skutkowe zależności między zewnętrznymi objawami uszkodzeń a przyczynami ich powstawania

Rozrzut wartości przewidywanych i docelowych

Porównanie efektywności modeli ML

| Wskaźniki | Model | SVR    | DT     | RF     | ANN    |
|-----------|-------|--------|--------|--------|--------|
| MAPE, %   |       | 21.34  | 41.5   | 31.67  | 20.21  |
| $R^2$     |       | 0.5694 | 0.3485 | 0.4872 | 0.6416 |

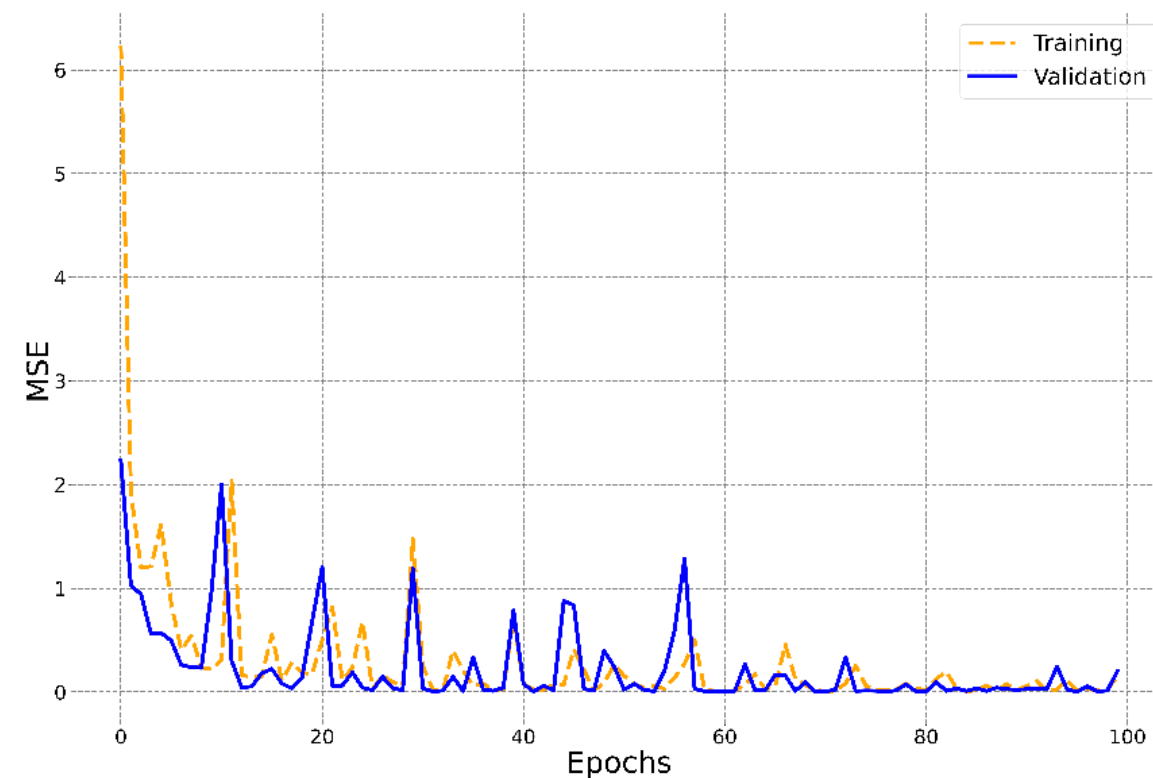


## Przyczynowo-skutkowe zależności między zewnętrznymi objawami uszkodzeń a przyczynami ich powstawania

### Porównanie efektywności modeli ANN

| Model                  | ANN1    | ANN2  | ANN3    | ANN4    | ANN5  | ANN6    |
|------------------------|---------|-------|---------|---------|-------|---------|
| Aktywator              | Sigmoid | ReLU  | softmax | Sigmoid | ReLU  | softmax |
| Algorytm optymalizacji | SGD     | SGD   | SGD     | ADAM    | ADAM  | ADAM    |
| $R^2$                  | 0.641   | 0.408 | 0.394   | 0.969   | 0.921 | 0.956   |
| MAPE, %                | 20.12   | 19.14 | 19.86   | 3.38    | 8.09  | 3.97    |

Porównanie wyników dla zbiorów danych treningowych i walidacyjnych dla najlepszego (ANN4) modelu.



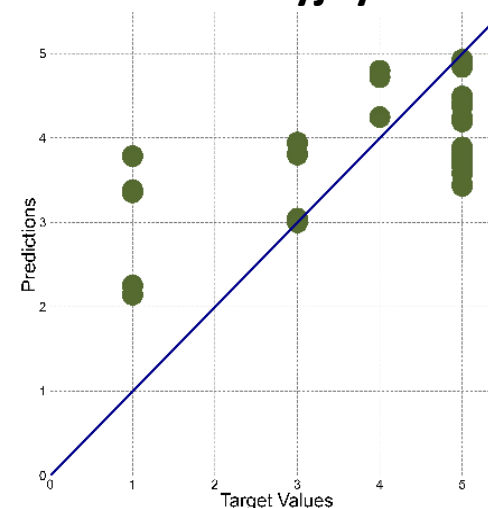
## Przyczynowo-skutkowe zależności między zewnętrznymi objawami uszkodzeń a przyczynami ich powstawania

### Weryfikacja modelu ANN

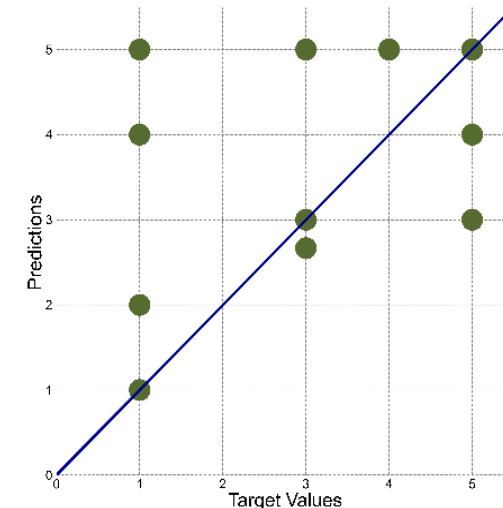
| Numer zbioru danych | Wartość docelowa, $y$ | Wartość przewidywana, $y'$ | Odchylenie $\Delta y$ , % |
|---------------------|-----------------------|----------------------------|---------------------------|
| 1                   | 1                     | 0.998                      | 0.169                     |
| 2                   | 1                     | 0.998                      | 0.184                     |
| 3                   | 2                     | 1.988                      | 0.622                     |
| 4                   | 2                     | 1.999                      | 0.073                     |
| 5                   | 3                     | 3.003                      | 0.114                     |
| 6                   | 3                     | 2.870                      | 4.349                     |
| 7                   | 4                     | 4.041                      | 1.019                     |
| 8                   | 4                     | 4.191                      | 4.783                     |
| 9                   | 5                     | 3.534                      | 29.316                    |
| 10                  | 5                     | 5.880                      | 17.592                    |
| 11                  | 6                     | 5.933                      | 1.109                     |
| 12                  | 6                     | 5.933                      | 1.109                     |

## Ocena ilościowa stanu technicznego elementów konstrukcyjnych mostu

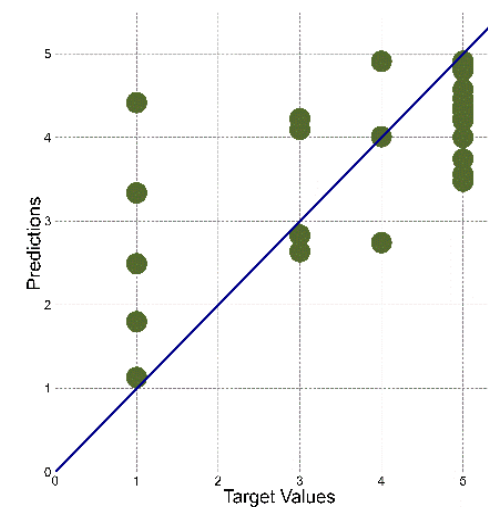
Rozrzut wartości przewidywanych i docelowych



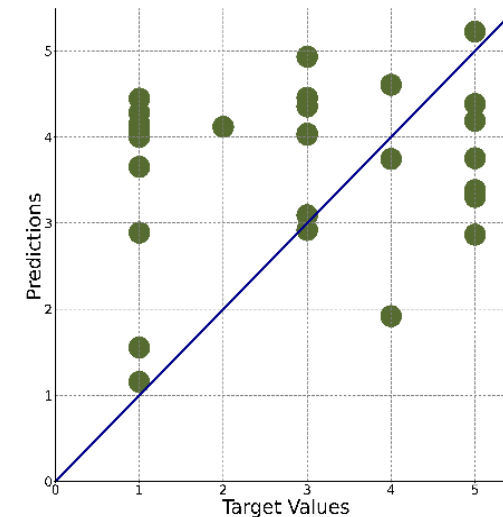
RF



DT



SVR



ANN

Porównanie efektywności modeli ML

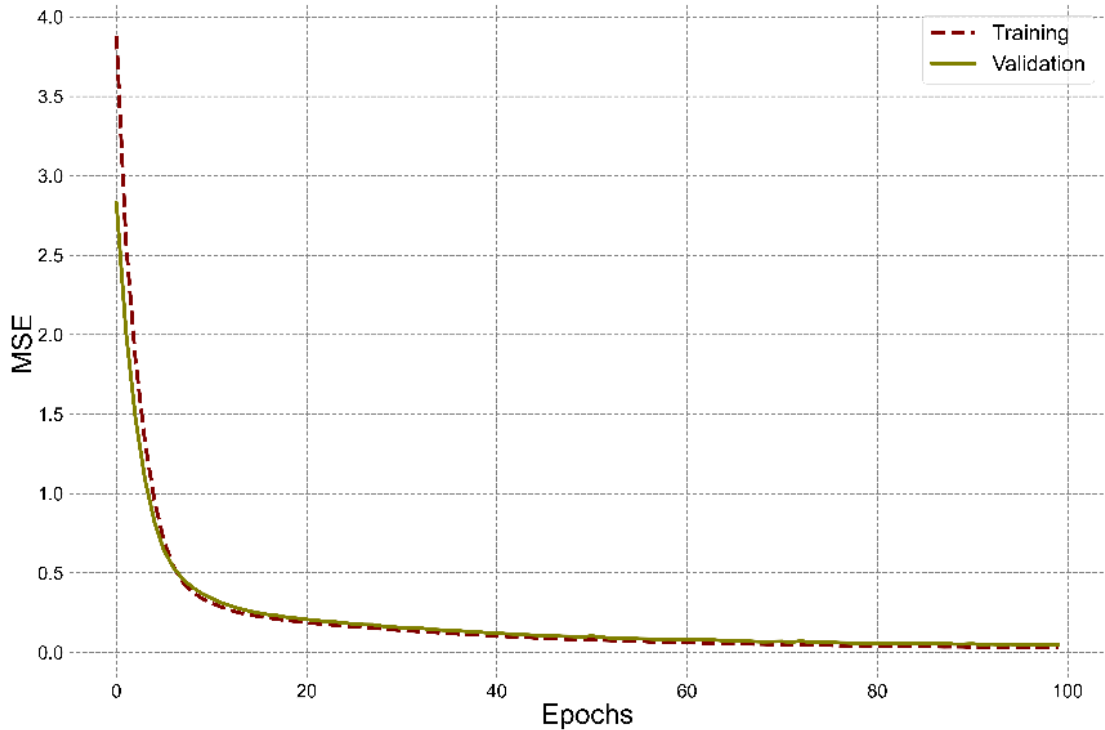
| Model          | SVR   | DT    | RF    | ANN   |
|----------------|-------|-------|-------|-------|
| Wskaźniki      |       |       |       |       |
| MAPE, %        | 27.87 | 50.05 | 39.23 | 26.63 |
| R <sup>2</sup> | 0.673 | 0.437 | 0.585 | 0.750 |

## Ocena ilościowa stanu technicznego elementów konstrukcyjnych mostu

### Porównanie efektywności modeli ANN

| Modeli                 | ANN 1   | ANN 2   | ANN 3   | ANN 4 | ANN 5   | ANN 6 | ANN 7 | ANN 8   | ANN 9 |
|------------------------|---------|---------|---------|-------|---------|-------|-------|---------|-------|
| Aktywator              | Sigmoid | Sigmoid | Sigmoid | ReLU  | ReLU    | ReLU  | tanh  | tanh    | tanh  |
| Algorytm optymalizacji | SGD     | RMSprop | Adam    | SGD   | RMSprop | Adam  | SGD   | RMSprop | Adam  |
| R <sup>2</sup>         | 0.895   | 0.912   | 0.900   | 0.983 | 0.994   | 0.989 | 0.959 | 0.966   | 0.967 |
| MAPE, %                | 13.3    | 13.0    | 13.1    | 6.0   | 3.5     | 4.6   | 9.8   | 8.1     | 8.0   |

Porównanie wyników dla zbiorów danych treningowych i walidacyjnych dla najlepszego (ANN 5) modelu.



## Ocena ilościowa stanu technicznego elementów konstrukcyjnych mostu

### Weryfikacja modelu ANN

| x1 | x2 | x3 | x4 | x5 | x6 | x7 | x8 | x9 | x10 | x11 | x12 | Wartość docelowa, y | Wartość przewidywana, y' | Odchylenie $\Delta y, \%$ |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|---------------------|--------------------------|---------------------------|
| 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0   | 15  | 35  | 0                   | 0.052                    | 5.28                      |
| 0  | 0  | 0  | 21 | 31 | 20 | 0  | 30 | 0  | 0   | 0   | 27  | 1                   | 1.004                    | 0.446                     |
| 32 | 0  | 22 | 25 | 14 | 9  | 34 | 9  | 33 | 9   | 0   | 10  | 2                   | 2.002                    | 0.106                     |
| 17 | 26 | 12 | 12 | 6  | 0  | 1  | 0  | 10 | 0   | 0   | 1   | 3                   | 2.993                    | 0.227                     |
| 1  | 1  | 2  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0   | 0   | 0   | 4                   | 4.015                    | 0.389                     |
| 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0   | 0   | 0   | 5                   | 4.886                    | 2.27                      |

## Special Issue

### Technology and Organization Applied to Civil Engineering

#### Message from the Guest Editors

Modern construction is more than impressive buildings; it focuses on new technologies, materials, and effective management. From planning to maintenance, innovations boost efficiency, reduce environmental impact, and enhance functionality. Technological advancements and modern management revolutionize the industry, making processes faster, safer, and more energy-efficient. These innovations create durable and economical buildings. This Special Issue on "Technology and Organization Applied to Civil Engineering" invites research on this promising area. Recommended topics include:

- Technology of construction works
- Management in construction works
- Planning and programming investments
- Modern materials and technologies
- Automation and digitization in construction
- Operation and maintenance of facilities
- Economics in planning and design
- Machine learning in civil engineering
- Socio-economic concepts in projects
- Scientific models in construction engineering
- Decision-making in project management

Submit your work to advance civil engineering through innovative technology and management.

#### Guest Editors

Dr. Marzena Lendo-Siwicka

Prof. Dr. Roman Trach

Dr. Grzegorz Wrzesinski

#### Deadline for manuscript submissions

20 August 2025



## Applied Sciences

an Open Access Journal  
by MDPI

Impact Factor 2.5  
CiteScore 5.3



[mdpi.com/si/208688](https://mdpi.com/si/208688)

*Applied Sciences*  
MDPI, Grosspeteranlage 5  
4052 Basel, Switzerland  
Tel: +41 61 683 77 34  
[appls@mdpi.com](mailto:appls@mdpi.com)

[mdpi.com/journal/appls](https://mdpi.com/journal/appls)



*applied sciences*

an Open Access Journal by MDPI

IMPACT  
FACTOR  
2.5

CITESCORE  
5.3

## Technology and Organization Applied to Civil Engineering

#### Guest Editors

Dr. Marzena Lendo-Siwicka, Prof. Dr. Roman Trach, Dr. Grzegorz Wrzesinski

# Special Issue

[mdpi.com/si/208688](https://mdpi.com/si/208688)

Invitation to submit

## Special Issue

### Innovative Risk Management and Sustainable Practices in Construction

#### Message from the Guest Editors

The realization of a low-carbon economy and the attainment of global targets in reducing the impact of climate change necessitate the consideration of sustainability risks within the risk management framework. Companies across various industries are currently challenged to align their business operations with sustainability requirements due to pressures stemming from regulatory bodies, market forces, and consumer demands. This issue also has implications for one of the largest sectors, the construction industry. We invite submissions of original research and reviews focused on various topics, such as the ones outlined below:

- Risk assessment and management;
- Innovative contracting models;
- Advanced and sustainable materials;
- Green building certifications/sustainability assessments;
- Life cycle assessment (LCA) and/or life cycle costing (LCC);
- Renewable energy integration;
- Waste management;
- Water conservation;
- Technological integration;
- Innovative contracting models;
- Data-driven decision making;
- Green infrastructure and construction;
- Risk management and innovative approaches;
- Reducing the weight of sustainable practices.

#### Guest Editors

Dr. Marzena Lendo-Siwicka

Dr. Katarzyna Pawluk

Dr. Anna Markiewicz

#### Deadline for manuscript submissions

15 December 2025



## Sustainability

an Open Access Journal  
by MDPI

Impact Factor 3.3  
CiteScore 6.8



[mdpi.com/si/211303](https://mdpi.com/si/211303)

*Sustainability*  
MDPI, Grosspeteranlage 5  
4052 Basel, Switzerland  
Tel: +41 61 683 77 34  
[sustainability@mdpi.com](mailto:sustainability@mdpi.com)

[mdpi.com/journal/  
sustainability](https://mdpi.com/journal/sustainability)



# sustainability

an Open Access Journal by MDPI

IMPACT  
FACTOR  
3.3

CITESCORE  
6.8

## Innovative Risk Management and Sustainable Practices in Construction

#### Guest Editors

Dr. Marzena Lendo-Siwicka, Dr. Katarzyna Pawluk, Dr. Anna Markiewicz

# Special Issue

[mdpi.com/si/211303](https://mdpi.com/si/211303)

Invitation to submit

Dziękuję za uwagę