

## NUMERYCZNA ANALIZA MOSTKÓW ŁADUNKOWYCH

Norma PN EN 1398:2009 [1] wskazuje ogólne wytyczne dotyczące oceny mostków ładunkowych. Dokument ten nie wskazuje precyzyjnie metod obliczeń odwołując się jedynie do stwierdzenia, że obliczenia należy wykonać zgodnie z ogólnie przyjętymi zasadami. W artykule przedstawiono koncepcję obliczeń statycznych bazującą na analizie numerycznej z wykorzystaniem metody elementów skończonych. W uzupełnieniu do wymagań normy przedstawiono ogólne zasady wykonania modelu obliczeniowego

i omówiono problem przygotowanie danych w szczególności modelu materiału stali. Przedstawione wyniki obliczeń stanowią wstęp do dalszej analizy i mogą być użyteczne do oceny mostków ładunkowych przy zastosowaniu podobnych metod obliczeń.

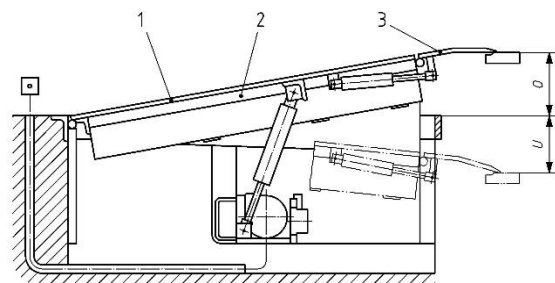
### WSTĘP

Mostki ładunkowe przeznaczone są do zapewnienia ciągłości frontu przeładunkowego ze środków transportu zewnętrznego do miejsc składowania wewnętrznego. Od niezawodności technicznej tych urządzeń zależy sprawność usług transportowych w niewątpliwym punkcie procesu transportu, tj. podczas przeładunku towarów. Zadaniem mostków jest wyrównanie różnic wysokości ciągu transportowego ze skrzyń ładunkowych pojazdów do ramp przeładunkowych magazynów. Od niezawodności i wytrzymałości mostków zależy nie tylko komfort przeładunku, ale przede wszystkim bezpieczeństwo wykonywania prac. Współczesne mostki ładunkowe to złożone urządzenia wyposażone często w napędy mechaniczne pracujące w cyklu automatycznym. Złożoność tych urządzeń komplikuje niekiedy obliczeniową ocenę ich nośności i stateczności. Obecnie najsukursniejszą metodą oceny obliczeniowej złożonych mechanizmów są obliczenia numeryczne. W artykule przedstawiony zostanie przykład obliczeń numerycznych wybranego modelu mostka ładunkowego.

### 1. Wymagania, obciążenia i kryteria oceny

Mostki ładunkowe z definicji normy PN-EN 1398:2009 [1] są to urządzenia statyczne bądź ruchome służące do wypełnienia przestrzeni pomiędzy dkiem rozładunkowym lub podobnym obszarem rozładunkowym oraz powierzchnią ładunkową pojazdu, który może znajdować się na różnych poziomach. Norma [1] obejmuje mosty ładunkowe używane przez ludzi i/lub sprzęt transportowy z napędem silnikowym (np. wózki widłowe) jako ścieżki ruchu pomiędzy samochodami ciężarowymi, zarówno pojazdów drogowych jak i torowych, oraz części budynków, takich jak doki załadunkowe.

Budowę typowego mostka ładunkowego z napędem mechanicznym przedstaw rys 1.



- 1- Płyta pomostowa
- 2- Element nośny
- 3- Najazd

Rys. 1. Konstrukcja mostka ładunkowego [1]

Mostki ładunkowe mogą być osadzone w specjalnie przygotowanych kanałach zlokalizowanych cokole rampy lub wysunięte na zewnątrz cokołu tworząc dostawioną niezależną konstrukcję.

#### 1.1. Obciążenia

Techniczne aspekty i wymagania dotyczące zasad kształtowania mostów przeładunkowych przedstawiono w artykule [2]. W zakresie obliczeń statycznych, norma [1] wymaga by mostki były konstruowane tak aby wytrzymać wszelkie obciążenia i siły podczas obsługi w warunkach statycznych zgodnych z zakresem użytkowania. W przypadku mostków o szerokości większej niż 1,25m mostki powinny być tak aby wytrzymać przejazd wózkiem widłowym lub podobnym urządzeniem transportu poziomego. W zakresie obciążeń i ładunków rozróżnia dwa podstawowe zakresy obciążeń:

a) Obciążenia główne, tj.: ciężar własny, obciążenie znamionowe (wózek + ładunek) oraz efekty dynamiczne wynikające z awaryjnego zatrzymania mostka ładunkowego.

b) Obciążenia dodatkowe, tj.: obciążenie wiatrem, siły powstające przy hamowaniu i ruszaniu wózka, siły bezwładności oraz obciążenia udarowe.

W przypadku zalecanych metod obliczeń, norma [1] podaje laconicznie, że obliczenia należy dokonywać zgodnie z ogólnie przyjętymi zasadami

W obliczeniach stosowane są obciążenia w kombinacjach z odpowiednimi współczynnikami zestawione w zależności od trybu pracy. W tabelicy 1 przedstawiono tabelę kombinacji obciążeń i wartości współczynników bezpieczeństwa według normy [1]

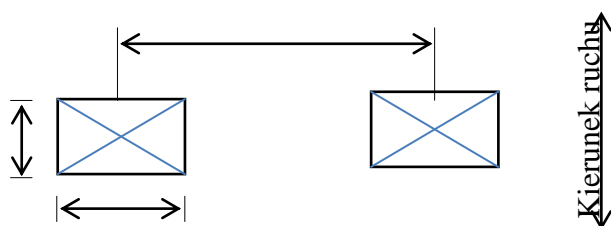
Opis tabelicy 1:

A – Ciężar własny dotyczy wszystkich elementów stałych i ruchomych mostka

B – Obciążenie znamionowe ze współczynnikiem dynamicznym rozpatruje się w dwóch wariantach:

Przy szerokości pomostu  $b \leq 1,25m$  przyjmuje się obciążenie skupione działające na pojedynczej powierzchni styku wyznaczonej jak w pkt b) przyjmując nacisk osi na jedną powierzchnię

Przy szerokości pomostu  $b > 1,25m$  przyjmuje się obciążenie na jedną oś wózka. Nacisk osi działa na dwa prostokątne obszary kontaktowe na 1 m odległości bocznej. Wielkość powierzchni styku [mm<sup>2</sup>] wyprowadza się z obciążenia koła [N] podzielone przez 2 [N/mm<sup>2</sup>]. Proporcja prostokątnej powierzchni styku powinna wynosić  $W:L = 3:2$ . Oznaczenie powierzchni styku przedstawia rys. 2



Rys. 2. Oznaczenie powierzchni styku

C, D – Zabezpieczenie przed osiągnięciem granicy plastyczności stali uzyskuje się przez zastosowanie współczynnika bezpieczeństwa 1,5 W przypadkach obciążeń, w których obciążenia główne i dodatkowe są połączone, współczynnik bezpieczeństwa wynosi 1,33.

E - siła bezwładności uwzględnia oddziaływania wywołujące zmiany prędkości ruchomych części, w szczególności, gdy mostek porusza się z prędkością operacyjną do położenia końcowego w którymkolwiek kierunku lub gdy jest używane automatyczne urządzenie bezpieczeństwa.

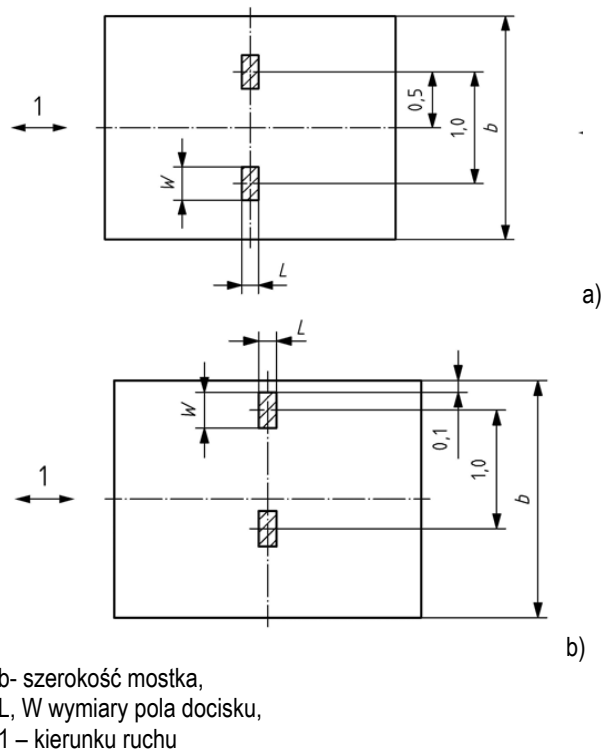
F – Przy naporze wiatru przyjmuje się obciążenie o wartości 1,0kPa

G - obciążenie dotyczy pionowo złożonych i zatrzaśniętych mostków ładunkowych, Obciążenie odwzorowane jest siłą liniową o wartości 1,0kN/m przyłożoną na wysokości 1,0m nad górną częścią

linii zawiasowej mostka. W przypadku mostków krótszych niż 1,0m, obciążenie przykładane jest do górnej krawędzi mostka

H - Obciążenia przy hamowaniu i ruszaniu przyłożone jest na poziomie pomostu w obszarze powierzchni styku wózka z pomostem. Wartość obciążenia wynosi 30% obciążenia znamionowego wózka.

Obliczenia powinno się wykonywać z uwzględnieniem warunków operacyjnych. Wiąże się to z rozłożeniem obciążenia znamionowego (wraz z efektami dynamicznymi) w dwóch wariantach położenia: obciążenie polem docisku w układzie symetrycznym i niesymetrycznym - rys. 3.



Rys. 3. Warianty rozłożenia obciążenia, a) symetryczny, b) niesymetryczny.

Tryb pracy	Główne obciążenia		C	D	Dodatkowe obciążenia			
	A	B			E	F	G	H
Mostek w użyciu	1	1,4	1,33	1,5	-	-	-	0,3
Ruch przejściowy, mostek w położeniu zapamiętanym	1	1,4	1,33	1,5	-	-	-	0,3
Mostek w położeniu zapamiętanym, brak obciążenia znamionowego, może wystąpić obciążenie wiatrem	1	-	1,33	1,5	-	1	1	0
Sytuacja wyjątkowa, zatrzymanie awaryjne	1	1	1	1	1,4	-	-	0

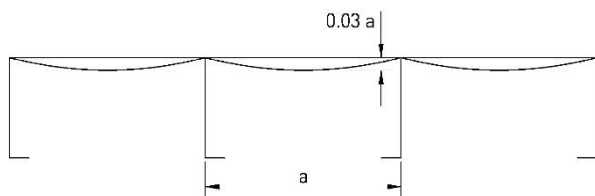
A- Ciężary własne  
 B- Obciążenie znamionowe  
 C- Zabezpieczenie przed granicą plastyczności (współczynnik ładunków łączonych)\*  
 D- Zabezpieczenie przed granicą plastyczności (czynnik ładunków niełączonych) \*  
 E- Siły bezwładności  
 F- Niedziałający, obciążenie wiatrem (kN/m<sup>2</sup>)  
 G- Obciążenia udarowe (na 1 m)  
 H- Obciążenia przy hamowaniu i ruszaniu (współczynnik) \*\*

\* Współczynnik bezpieczeństwa przeciwko granicy plastyczności wynosi 1,33 gdy główne i dodatkowe obciążenia są łączone, lub 1,5 gdy nie są łączone  
 \*\* Obciążenia przy hamowaniu i ruszaniu działają kierunkowo.

Tab.1. Kombinacja obciążeń [1]

## 1.2. Kryteria oceny

Ocena użyteczności polega na sprawdzeniu odkształceń trwałych powstałych w wyniku oddziaływania obciążeń znamionowych na blachę pomostu. Odkształcenie trwałe nie powinno przekraczać 3% szerokości podparcia blachy. Szerokość podparcia blachy odnosi się do rozstawów poprzecznych wzmocnień pomostu – rys 4.



Rys. 4. Ocena odkształceń trwałych postu.

Ocena nośności polega na wykazaniu, że przy oddziaływaniu odpowiednich obciążeń (patrz tabl. 1) nie zostanie przekroczona wartość granicy plastyczności stali podzielona przez współczynnik 1,5. Możliwy jest też wariant, w którym obciążenia główne i dodatkowe są łączone. Wówczas można zastosować współczynnik bezpieczeństwa o wartości 1,33 w odniesieniu do granicy plastyczności stali. Kryterium nośności dotyczy wszystkich elementów konstrukcyjnych mostka

## 2. ZAŁOŻENIA DO OBLICZEŃ STATYCZNYCH

Norma [1] nie wskazuje jednoznacznie metod obliczeń. Przy złożonych, wieloelementowych konstrukcjach najskuteczniejszymi

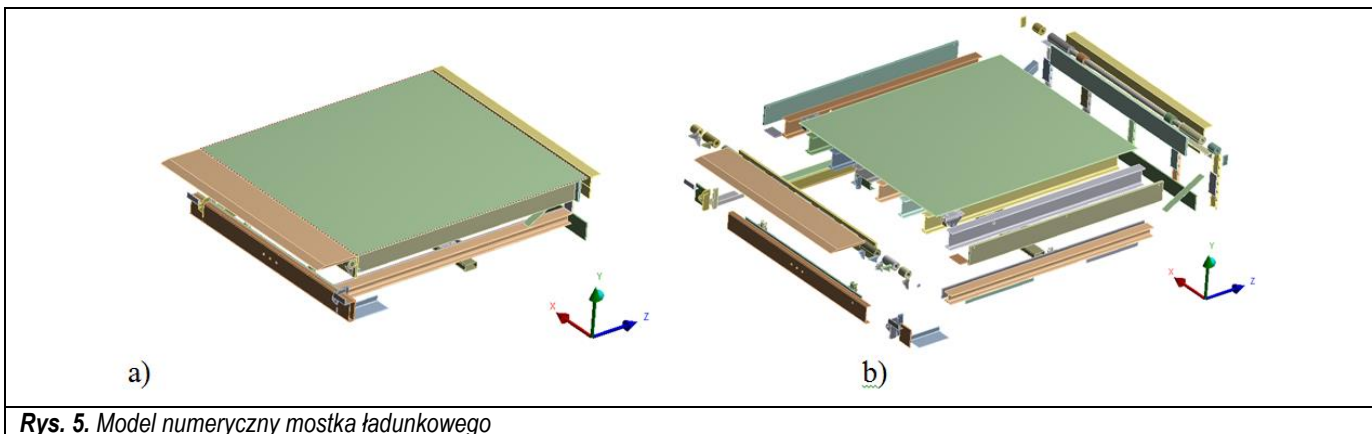
metodami obliczeń są metody numeryczne. Przy zastosowaniu tych metod można analizować układy mostków ze wszystkimi nośnymi elementami konstrukcji (płyta, żebra, sworznie, łączniki, itp.). Metody numeryczne pozwalają na dokładne odwzorowanie konstrukcji bez wprowadzania nadmiernych uproszczeń. Przykład modelu numerycznego mostka ładunkowego przyjętego do obliczeń przedstawiono na rys. 5.

Na rysunku 5a) widoczny jest model w pozycji rozłożonej i zapamiętanej, rysunek 5b) przedstawia rozłożenie części składowych mostka. Konstrukcja zawiera kilkadziesiąt części składowych połączonych ze sobą w różny sposób (spawanie, połączenia sworzniowe, śrubowe).

Aby prawidłowo przeprowadzić obliczenia oprócz geometrii modelu mostka, warunków podparcia i obciążenia niezbędna są dane związane z modelem materiału. W pkt 1.2 zestawiono kryteria oceny, z których wynika, że w zakresie użyteczności należy sprawdzić odkształcenie. Ta właściwość (w przypadku dużych obciążeń) powinna być wyznaczana przy zastosowaniu sprężysto – plastycznego modelu materiału. Warunki nośności również odnoszą się do granicy plastyczności materiału. W zależności od dokładności obliczeń i dopuszczalnego poziomu odkształceń norma [3] podaje cztery modele materiału stali:

- model sprężysto – plastyczny bez wzmocnienia
- model sprężysto – plastyczny z minimalnym wzmocnieniem,
- model sprężysto – plastyczny z liniowym wzmocnieniem
- model realistyczny uzyskany w wyniku modyfikacji eksperymentalnej zależności naprężenie odkształcenie ( $\sigma - \epsilon$ )

Graficzną prezentację modeli stali zestawiono w tabelicy 2  
E - moduł Younga,  $f_y$  – granica plastyczności,  $\epsilon$  - odkształcenie  
Najprostszym w zastosowaniu jest model sprężysto – plastyczny



Rys. 5. Model numeryczny mostka ładunkowego

Model stali z półką plastyczną		
Model stali ze wzmocnieniem		

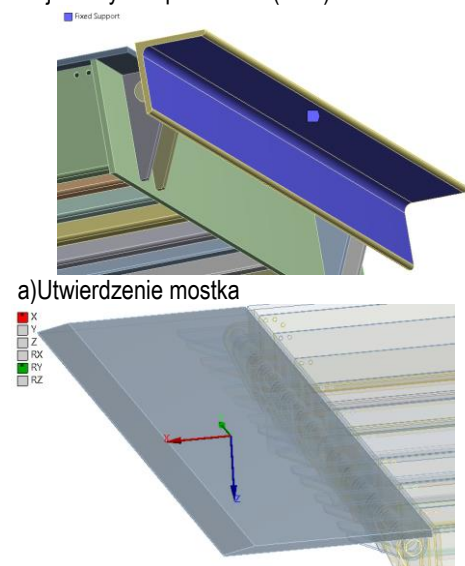
Tab. 2 Graficzna prezentacja modeli materiału stali

bez wzmocnienia (a), najbardziej skomplikowanym i wymagającym badań laboratoryjnych to model realistyczny (d).

Przyjęcie sprężysto – plastycznego modelu materiału wymusza zastosowanie nieliniowych metod obliczeń. Najczęściej używaną metodą jest iteracyjny algorytm obliczeń Newtona – Raphsona [4],

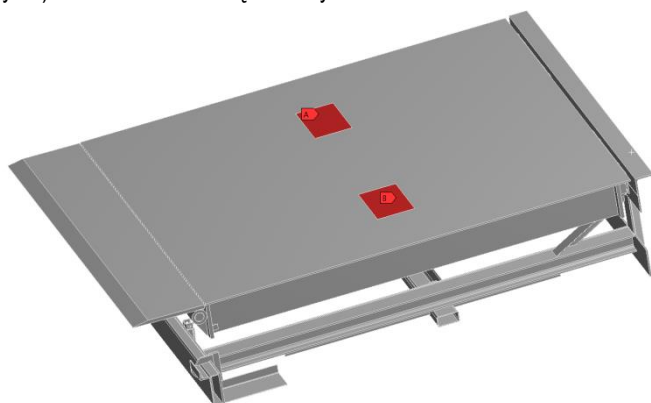
### 3. PRZYKŁAD OBLICZEŃ

Obliczenia wykonano programem Ansys. Do obliczeń nośności i użyteczności przyjęto model mostka ładunkowego jak na rys. 5. Model numeryczny został utworzony z wykorzystaniem sześciennych elementów objętościowych elementu typu Solid186 [4], z 20 węzłami i trzema stopniami swobody w każdym węźle. Założono sprężysto – plastyczny model z minimalnym wzmocnieniem stali gatunku S355. Jako warunki podparcia przyjęto utwierdzenie kątownika podtrzymującą część zawiasową z jednej strony (rys. 6a), a z drugiej strony (rys. 6b) tj. w miejscu podparcia płyty najazdowej na zamodelowano kontakt ze zwolnionymi stopniami swobody umożliwiającymi przesuw płyty wzdłuż podłużnej osi mostka (oś X) i obrót poprzeczny w miejscu styku z podłożem (oś Y)



b) płyta najazdowa (X, Ry zwolnione stopnie swobody)  
**Rys. 6. Podparcie modelu**

Do prezentacji wyników przyjęto obciążenia w kombinacji mostek w użyciu (patrz tab. 1) w symetrycznym ułożeniu pól docisku (rys.7). Znamionowe obciążenie wynosi 85kN.

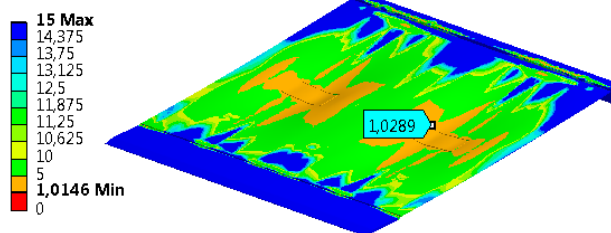


**Rys. 7. Pole obciążenia mostka.**

Obliczenia wykonano stosując algorytm obliczeń Newtona – Raphsona. Poniżej zestawiono wyniki obliczeń. Na rys 8a) przedstawiono mapę wykorzystania kryterium plastyczności ze współ-

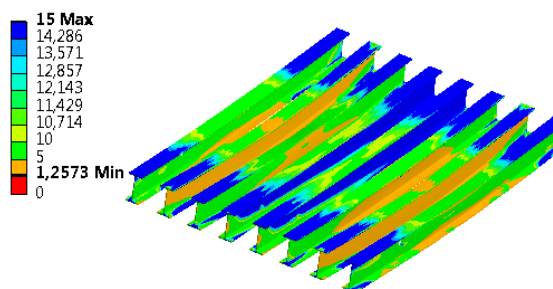
czynnikiem 1,5 (nominalna granica plastyczności podzielona przez współczynnik 1,5) w odniesieniu do płyty pomostu i na rys.8b) w odniesieniu do konstrukcji wsporczej.

**D: obciążenie centryczne 205x307**  
Safety Factor  
Type: Safety Factor  
Time: 1  
2015-09-30 15:03



a) płyta pomostowa

**D: obciążenie centryczne 205x307**  
Safety Factor  
Type: Safety Factor  
Time: 1



b) konstrukcja wsporcza

**Rys. 8. Wyniki obliczeń nośności**

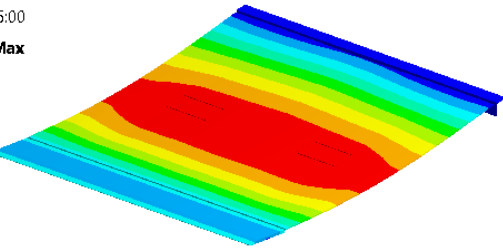
Warunek nośności jest zachowany, jeśli minimalny współczynnik wyężenia jest większy od wartości 1,0. W analizowanym przykładzie w najbardziej wyężonym obszarze płyty pomostowej spełnione jest kryterium nośności z 3% zapasem. W doniesieniu do podkonstrukcji pyty pomostowej zapas nośności wynosi około 26% . Na rys 9 przedstawiono wyniki obliczenia deformacji trwałych, tj. po usunięciu obciążenia. Wyniki zaprezentowano w odniesieniu do płyty pomostowej (rys. 9a) oraz konstrukcji wsporczej płyty (rys.9b).



## D: obciążenie centryczne 205x307

Total Deformation 3  
Type: Total Deformation  
Unit: mm  
Time: 2  
2015-09-30 15:00

0,04278 Max  
0,038027  
0,033274  
0,02852  
0,023767  
0,019013  
0,01426  
0,0095067  
0,0047534  
0 Min

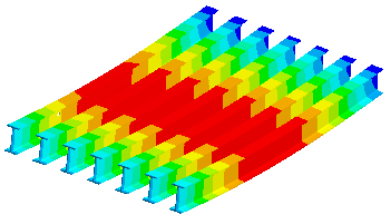


### a) płyta pomostowa

## D: obciążenie centryczne 205x307

Total Deformation 4  
Type: Total Deformation  
Unit: mm  
Time: 2  
2015-09-30 15:01

0,042745 Max  
0,038575  
0,034405  
0,030235  
0,026066  
0,021896  
0,017726  
0,013556  
0,0093864  
0,0052166 Min



### b) konstrukcja wsporcza

#### Rys. 9. Mapy odkształceń trwałych

Szerokość płyty pomostowej wynosi 1,5m. Szerokość oparcia (odległość między zebrami konstrukcji wsporczej) wynosi  $a=250\text{mm}$ . Maksymalne dopuszczalne trwałe przemieszczenie nie powinno przekraczać  $250 \cdot 0,03 = 7,5\text{mm}$ . W analizowanym przykładzie odkształcenie trwałe wynosi  $0,043\text{mm}$  i jest znacznie mniejsze niż dopuszczalne wynikające z kryterium przemieszczenia.

## PODSUMOWANIE

Ocena nośności i użyteczności mostków ładunkowych realizowana za pomocą obliczeń numerycznych powinna być poprzedzona odpowiednim przygotowaniem danych. Oprócz geometrii, warunków podparcia bardzo istotne jest przygotowanie odpowiedniego modelu materiału. Ma to szczególne znaczenie w przypadku, gdy obciążenia są duże i mogą prowadzić do powstawania lokalnych obszarów uplastycznienia materiału. Przedstawione w pkt 3 wyniki obliczeń dotyczą tylko jednego wariantu rozłożenia obciążenia. Do pełnej oceny nośności i użyteczności mostka transportowego wg normy [1] należy przeprowadzić obliczenia przy niesymetrycznym obciążeniu oraz przy zastosowaniu kombinacji obciążeń wynikających z warunków użytkowania wg tablicy 1.

## BIBLIOGRAFIA

1. PN EN 1398:2009 Dock levellers. Safety requirement.
2. Ł. Wojciechowski. Elementy wyposażenia magazynowych frontów przeładunkowych. <http://www.oknoserwis.pl/art,167,,maszyny,wydarzenia.html>
3. PN-EN 1993-1-5. Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-5 Blachownice
4. Theory Reference for Mechanical APDL Mechanical Application. Ansys, Inc. April 2009.

### Numerical analysis of dock levellers

Standard PN-EN 1398: 2009 [1] indicates the general guidelines for the assessment of dock levellers. This document does not precisely indicate the calculation methods. Standard referring only to find that the calculations should be performed in accordance with generally accepted rules. The article presents the concept of static calculations based on numerical analysis using finite element method. In addition to the standard requirements, in the paper are shown the general rules for implementation the calculation model and discussed the problem of data preparation especially model of steel. The calculation results are the introduction for further analysis and may be useful for evaluating dock levellers using similar methods of calculation.

Autorzy:

dr inż. **Artur Piekarczyk** - Instytut Techniki Budowlanej, Zakład Konstrukcji i Elementów Budowlanych, 00-611 Warszawa, ul. Filtrowa 1, e-mail: konstrukcje@itb.pl