

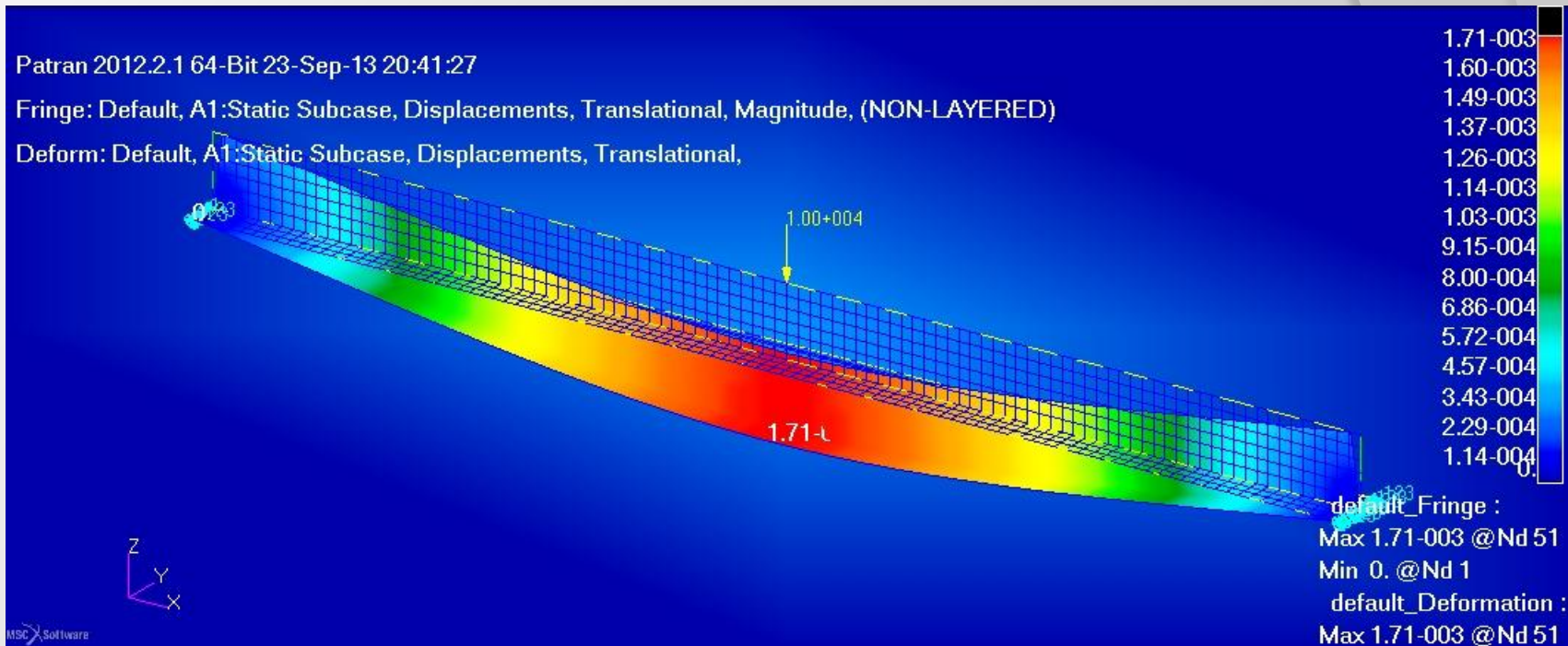
MECHANIKA STOSOWANA

WYTRZYMAŁOŚĆ MATERIAŁÓW

**LECH MURAWSKI
WYDZIAŁ MECHANICZNY
KPT**

**lemur@wm.am.gdynia.pl
pok. A213**

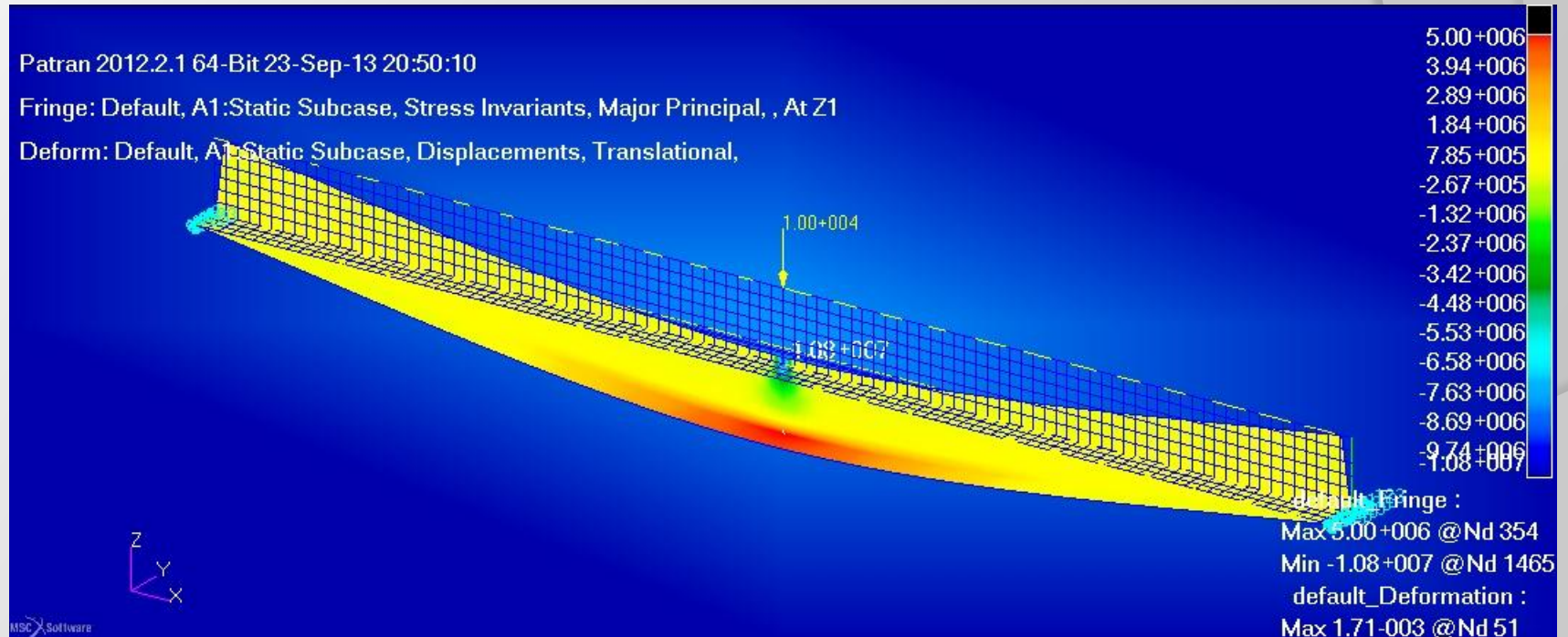
Wytrzymałość materiałów jest działem mechaniki ogólnej (dział fizyki) zajmujący się badaniem odkształceń i naprężeń rozpatrywanych ciał poddanych obciążeniom zewnętrznym w celu określenia przydatności części maszyn i konstrukcji do eksploatacji inżynierskiej.



Wytrzymałość materiałów bazuje na prawach mechaniki ogólnej ale jest w dużej mierze oparta o badania eksperymentalne – zależności empiryczne mające ograniczone zastosowanie.

Wytrzymałość materiałów bazuje na ciałach odkształcalnych z uwzględnieniem praw mechaniki ogólnej (zastosowanie zasady zeszywnienia).

Odkształcalność ciał można analizować na podstawie teorii sprężystości (prawo Hooke'a – zależność między odkształceniami a naprężeniami) lub teorii plastyczności.



Uproszczenia wytrzymałości materiałów

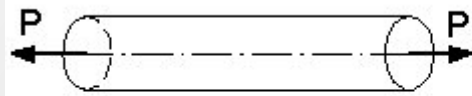
W większości przypadków stosuje się następujące uproszczenia:

- Materiał jest idealnie sprężysty (bez histerezy)
- Materiał jest jednorodny, izotropowy i ciągły (na bazie tej teorii nie można analizować konstrukcji kompozytowych)
- Naprężenia uśredniają się w przekrojach (zasada Saint-Venanta)
- Obciążenie można sprowadzić do kilku typowych przypadków (rozciąganie-ściskanie, zginanie, skręcanie, ścinanie, docisk ...)
- Można stosować zasadę superpozycji
- Większość części maszyn i konstrukcji można sprowadzić do prostych elementów, takich jak: pręty i belki proste i zakrzywione, płyty i membrany cienkościenne i grubościenne, elementy trójwymiarowe.

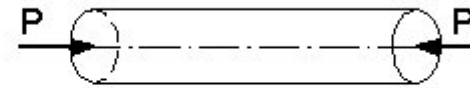
Podstawowe kryteria wytrzymałościowe:

- Obliczenia na naprężenia dopuszczalne (w tym zmęczeniowe)
- Obliczenia na odkształcenia dopuszczalne
- Obliczenia na stateczność
- Obliczenia na pełzanie

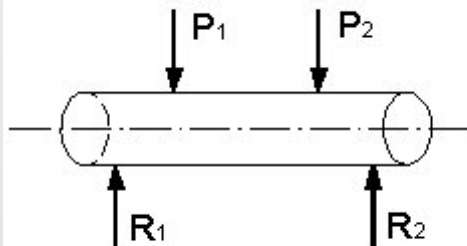
Klasyfikacja obciążeń



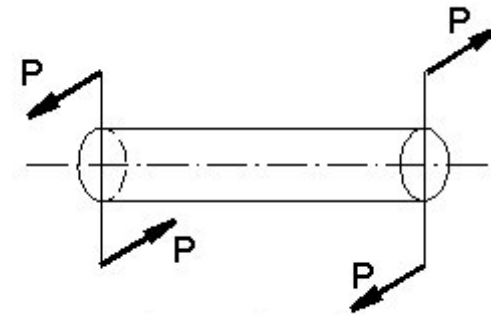
rozciąganie pręta



ściskanie pręta



zginanie pręta



skręcanie pręta

Podstawowe definicje

Obciążenie jest to oddziaływanie sił zewnętrznych na badaną konstrukcję lub maszynę.

Naprężenie jest to miara gęstości powierzchniowej sił wewnętrznych w badanym ciele.

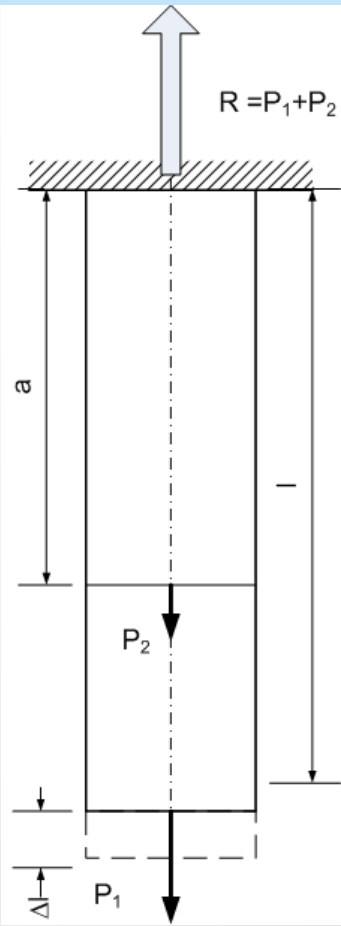
$$\vec{s} = \lim_{A \rightarrow 0} \frac{\vec{F}}{A}$$

$$\left[\frac{N}{m^2} \right] = [Pa] \rightarrow [MPa]$$

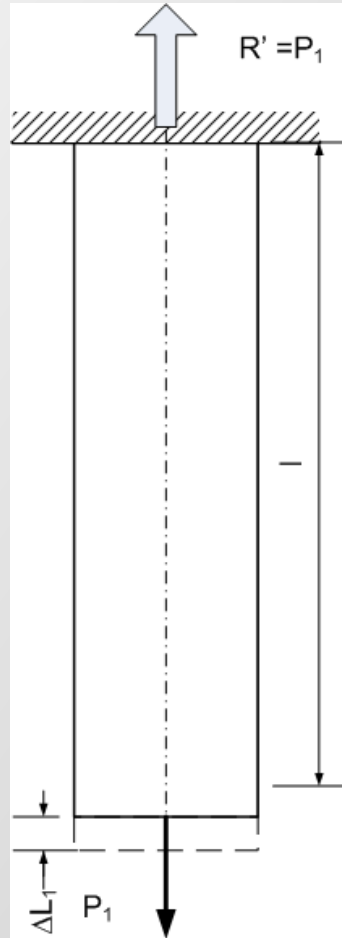
Wektor naprężenia można rozłożyć na składową normalną i styczną:

$$\vec{s} = \sigma \cdot \vec{n} + \tau \cdot \vec{t}$$

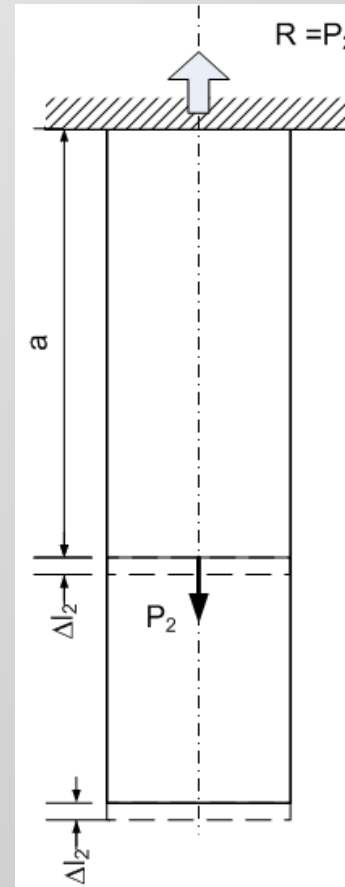
Zasada superpozycji



||



+



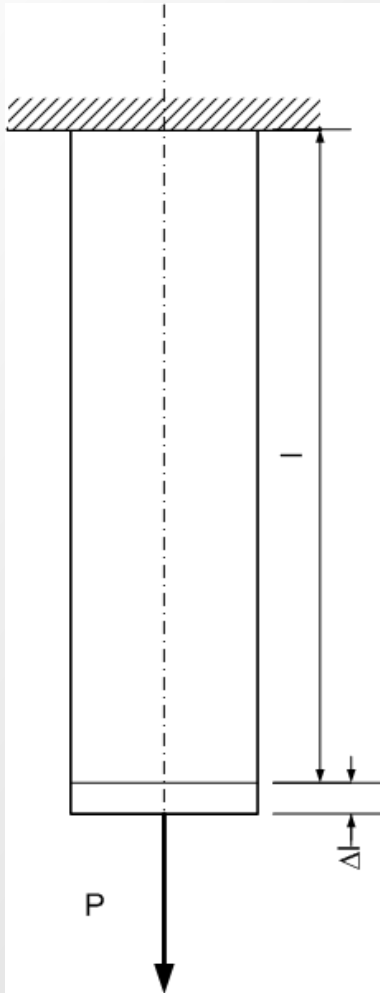
$$\Delta l_1 = \frac{P_1 l}{ES}$$

$$\Delta l_2 = \frac{P_2 a}{ES}$$

$$\Delta l = \Delta l_1 + \Delta l_2$$

$$\Delta l = \frac{P_1 l}{ES} + \frac{P_2 a}{ES}$$

Prawo Hooke'a



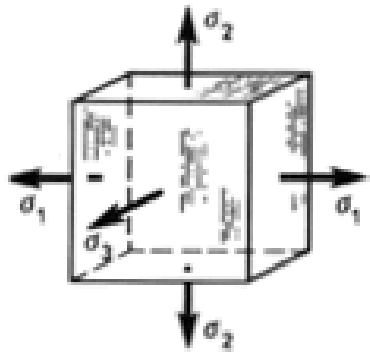
$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad \text{wydłużenie względne}$$

$$\sigma = \frac{P}{F} \quad \text{naprężenie}$$

$$\sigma = \varepsilon E \quad \text{prawo Hooke'a}$$

$$\Delta l = \frac{Pl}{EF}$$

Uogólnione prawo Hooke'a



$$\varepsilon'_1 = \frac{\sigma_1}{E} \quad \varepsilon'_2 = -\nu\varepsilon'_1 = -\nu\frac{\sigma_1}{E} \quad \varepsilon'_3 = -\nu\varepsilon'_1 = -\nu\frac{\sigma_1}{E}$$

$$\varepsilon''_1 = -\nu\varepsilon''_2 = -\nu\frac{\sigma_2}{E} \quad \varepsilon''_2 = \frac{\sigma_2}{E} \quad \varepsilon''_3 = -\nu\varepsilon''_2 = -\nu\frac{\sigma_2}{E}$$

$$\varepsilon'''_1 = -\nu\varepsilon'''_3 = -\nu\frac{\sigma_3}{E} \quad \varepsilon'''_2 = -\nu\varepsilon'''_3 = -\nu\frac{\sigma_3}{E} \quad \varepsilon'''_3 = \frac{\sigma_3}{E}$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} - \nu\frac{\sigma_2}{E} - \nu\frac{\sigma_3}{E} = \frac{1}{E} [\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)]$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E} - \nu\frac{\sigma_3}{E} - \nu\frac{\sigma_1}{E} = \frac{1}{E} [\sigma_2 - \nu(\sigma_3 + \sigma_1)]$$

$$\varepsilon_3 = \frac{\sigma_3}{E} - \nu\frac{\sigma_1}{E} - \nu\frac{\sigma_2}{E} = \frac{1}{E} [\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)]$$

Obliczenia wytrzymałościowe na naprężenia dopuszczalne

Obciążenia nominalne w żadnym punkcie konstrukcji nie mogą przekraczać naprężeń przyjętych za dopuszczalne:

$$\sigma_n \leq k$$

Naprężenia nominalne to naprężenia maksymalne określone obliczeniowo lub eksperymentalnie bez uwzględnienia spiętrzenia naprężeń.

Naprężenia dopuszczalne określa się osobno dla każdego rodzaju obciążeń:

- k_r dla rozciągania
- k_c dla ściskania
- k_g dla zginania
- k_t dla ścinania
- k_s dla skręcania
- k_d na nacisk powierzchniowy

Obliczenia wytrzymałościowe na naprężenia dopuszczalne

$$\sigma_n \leq k$$

$$k_r = \frac{Q_r}{x_w}$$

gdzie:

Q_r - granica plastyczności lub wytrzymałość na rozciąganie

x_w - całkowity współczynnik bezpieczeństwa

Całkowity współczynnik bezpieczeństwa uwzględnia pewność założeń, ważność elementu, jednorodność materiału, zachowanie wymiarów a w szczególności: naprężenia wstępne, obciążenia przewidywane i przypadkowe, niedoskonałość metod pomiarowych i obliczeniowych, skutki uszkodzeń, czas eksploatacji, kontrolę dokładności wymiarów, obciążenia dynamiczne i udarowe, spiętrzenie naprężeń.

Obliczenia wytrzymałościowe na naprężenia dopuszczalne

Dla rozciągania i ściskania (bez wyboczenia!):

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

$$\frac{F}{A} = E \frac{\Delta L}{L_0}$$

$$\frac{F}{\Delta L} = E \frac{A}{L_0}$$

Dla skręcania:

$$\tau = \frac{M_s}{W_0}$$

Dla zginania:

$$\sigma = \frac{M_g}{W_{x,y}}$$

Naprężenia zredukowane

Dla przykładu kostki sześciennej stwierdziliśmy że równoznaczny ze zniszczeniem stan płynięcia materiału nastąpi gdy

$$\sigma_1 = \sigma_{pl} \quad \text{Według hipotezy największych naprężeń normalnych} \quad \sigma_{red} = \sigma_1 \leq k_r$$

$$\sigma_1 = 1,43\sigma_{pl} \quad \text{Według hipotezy największych wydłużeń} \quad \sigma_{red} = \sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3) \leq k_r$$

$$\sigma_1 = 1,50\sigma_{pl} \quad \text{Według hipotezy największych naprężeń tnących} \quad \sigma_{red} = \sigma_1 - \sigma_3 \leq k_r$$

$$\sigma_1 = 1,73\sigma_{pl} \quad \text{Według hipotezy Hubera} \quad \sigma_{red} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \leq k_r$$

Naprężeniem zredukowanym σ_{red} nazywamy takie naprężenie (umowne) otrzymane po zastosowaniu przyjętej hipotezy wytrzymałościowej dla danego stanu naprężeń, **które jest równoważne z naprężeniem przy zwykłym rozciąganiu**

Obliczenia wytrzymałościowe sprowadzają się wówczas do sprawdzenia warunku

$$\sigma_{red} \leq k_r$$

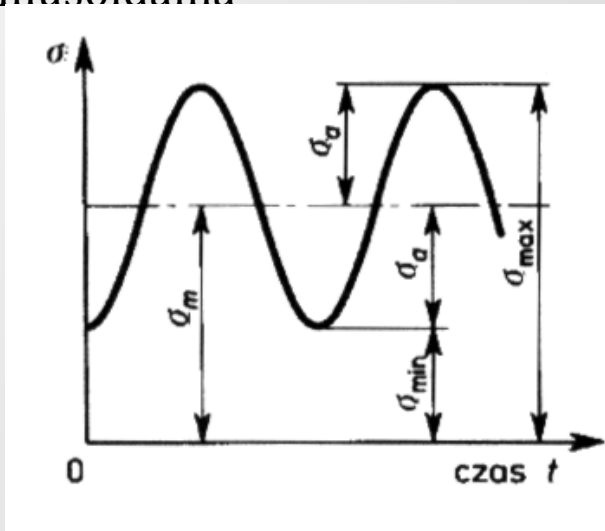
Zmęczenie materiałów

Elementy maszyn ulegają często zniszczeniu przy naprężeniach znacznie niższych od wytrzymałości doraźnej danego materiału otrzymanej z prób statycznych

Zniszczenie elementu zachodzi bez żadnych dostrzegalnych odkształceń plastycznych i związane jest z długotrwałą pracą przy obciążeniach zmiennych

Zjawisko obniżania się wytrzymałości przy naprężeniach zmiennych nosi nazwę *zmęczenia materiałów*

Zmienność naprężeń elementów maszyn można na ogół przybliżyć zależnością sinusoidalną



$$\sigma = \sigma_m + \sigma_a \sin(\omega t)$$

σ_m – naprężenie średnie cyklu

σ_a – amplituda zmian naprężeń

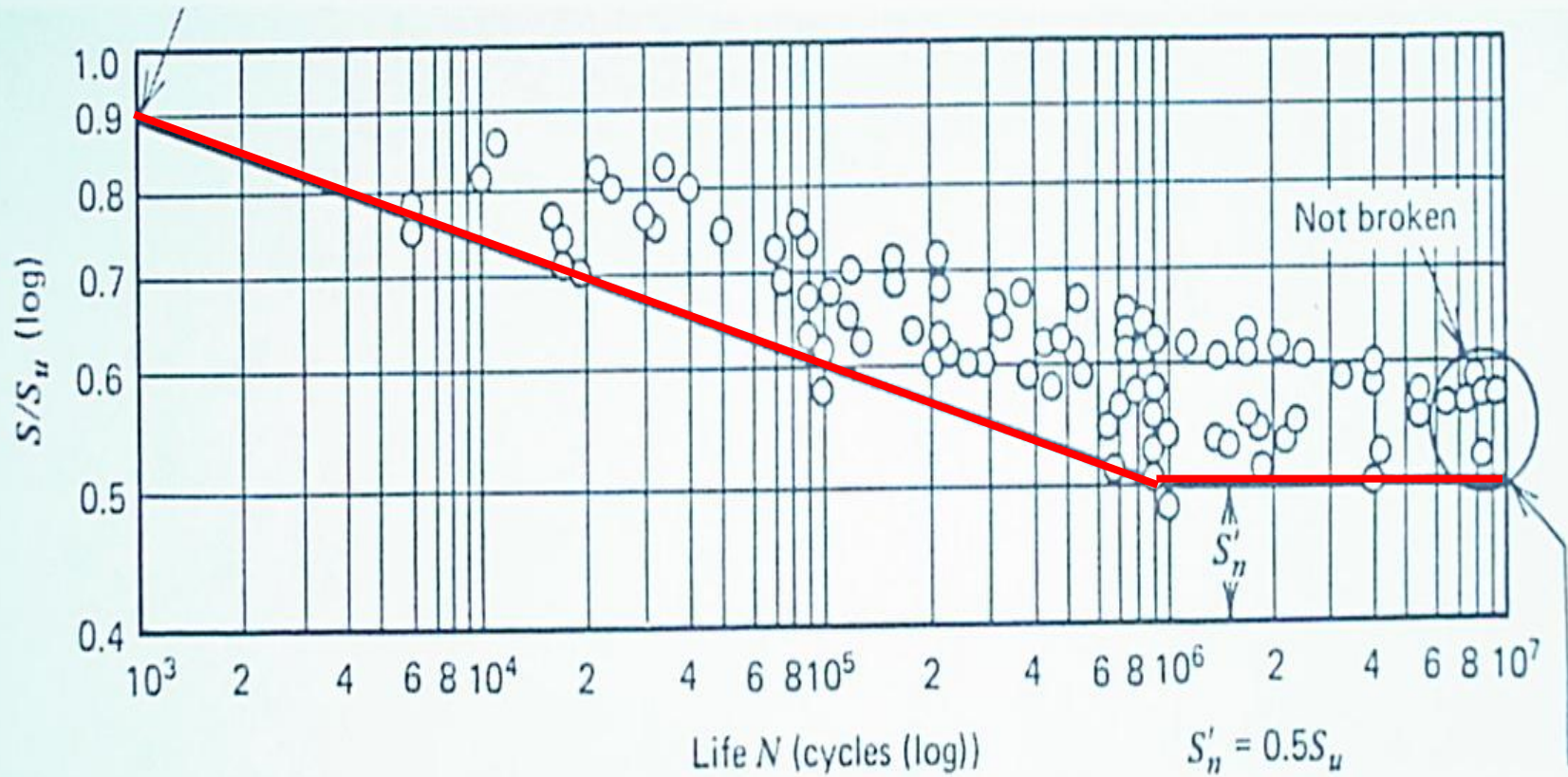
ω – pulsacja zmian naprężeń

$$\sigma_{max} = \sigma_m + \sigma_a \quad \sigma_{min} = \sigma_m - \sigma_a$$

$$\sigma_m = \frac{1}{2} (\sigma_{max} + \sigma_{min})$$

Obliczenia zmęczeniowe

Krzywa S-N (Wöhler) dla stali



Metody pomiarów

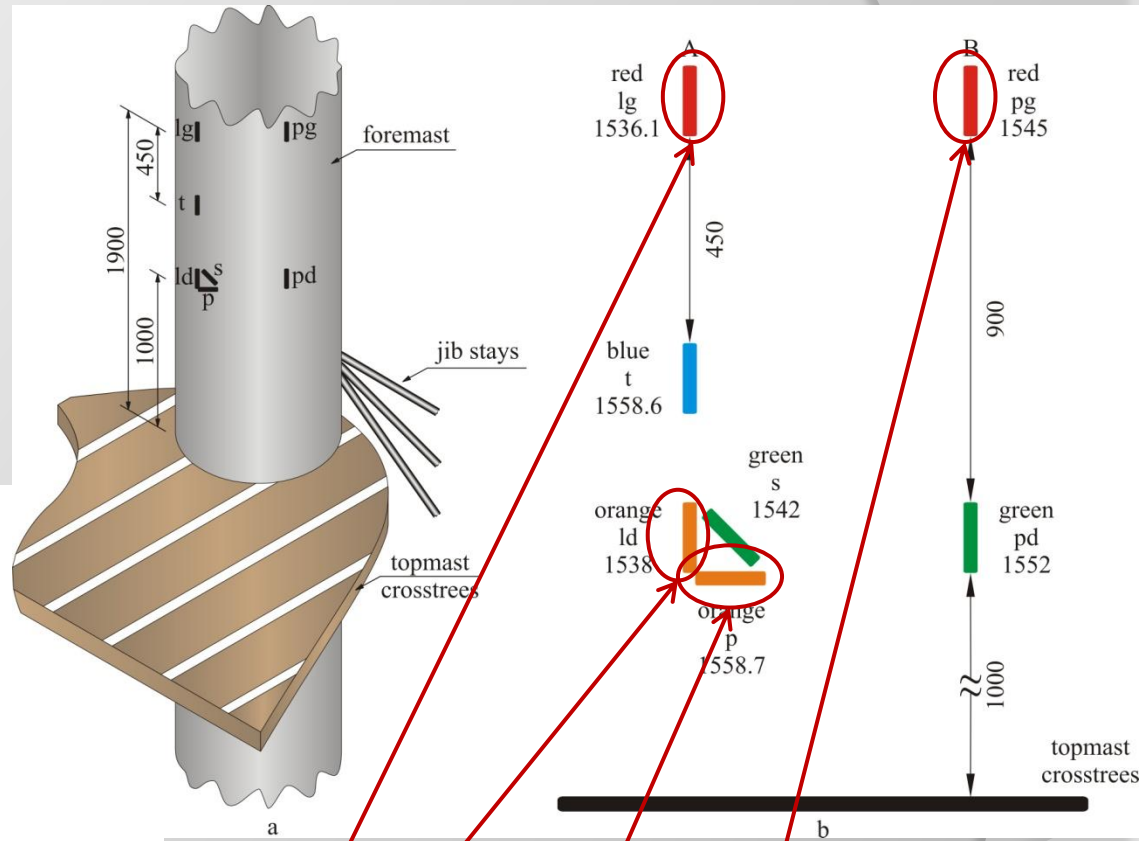
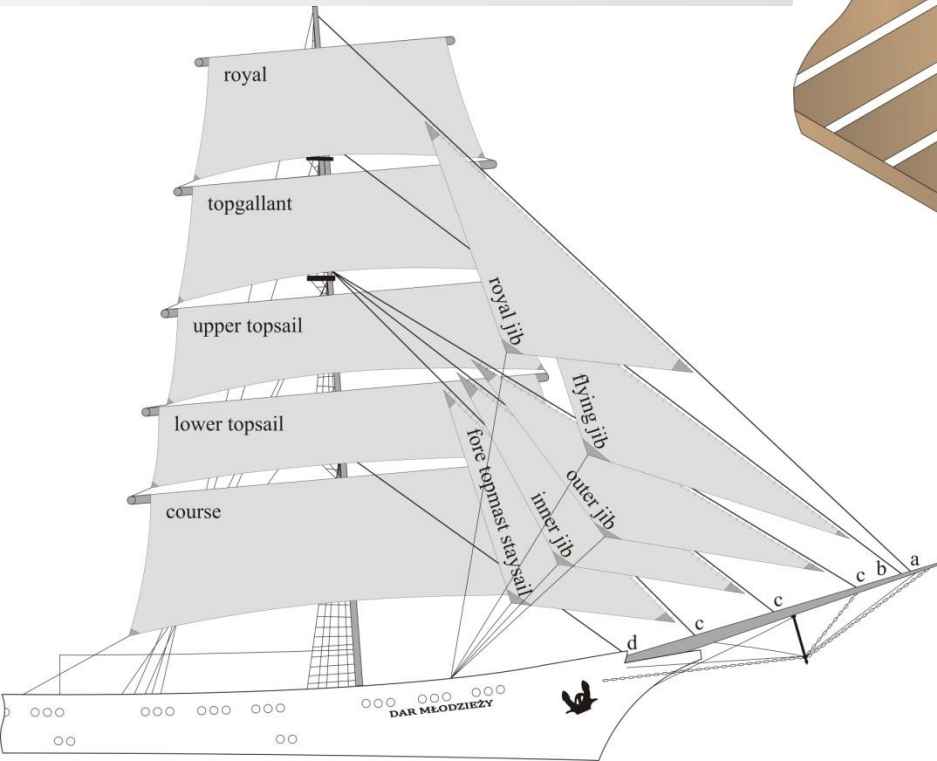


a)



b)

Metody pomiarów



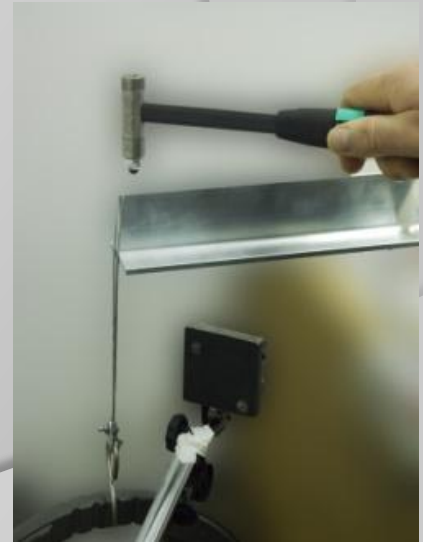
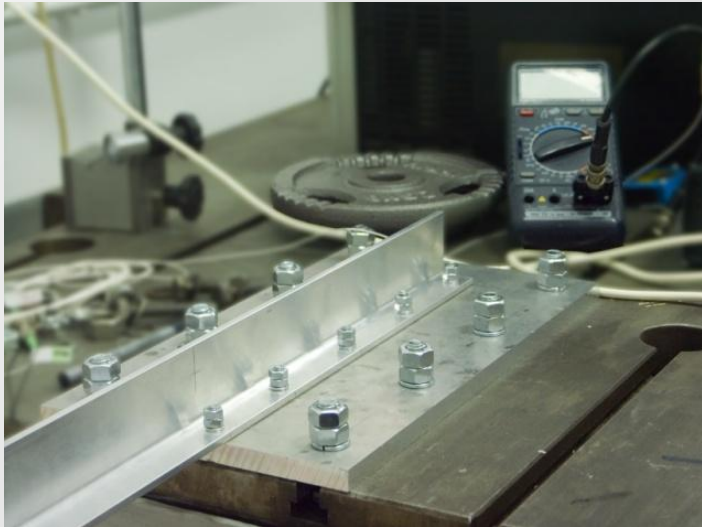
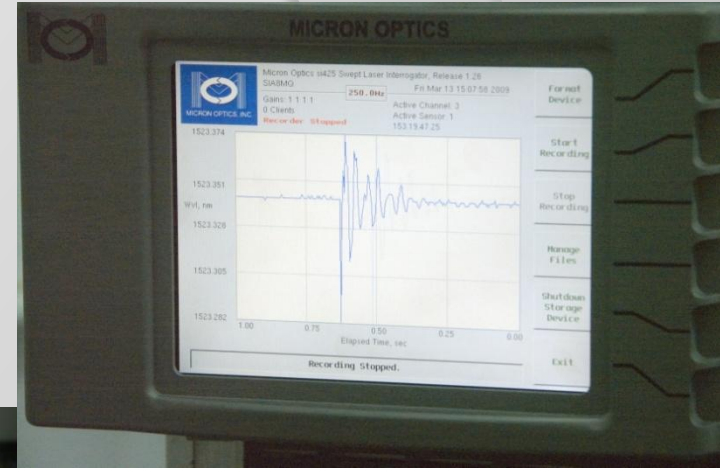
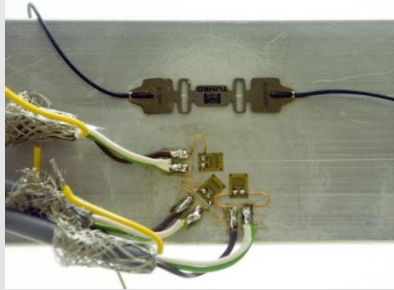
FBG 4

FBG 2

FBG 3

FBG 5

Metody pomiarów

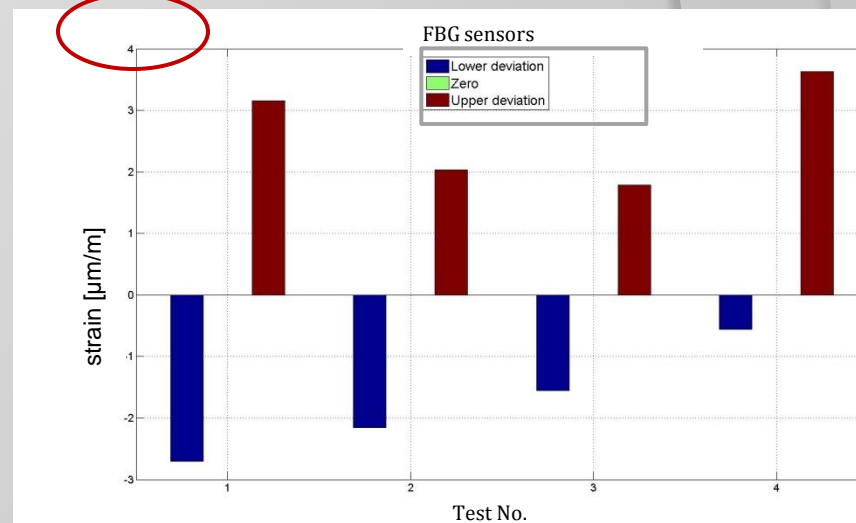
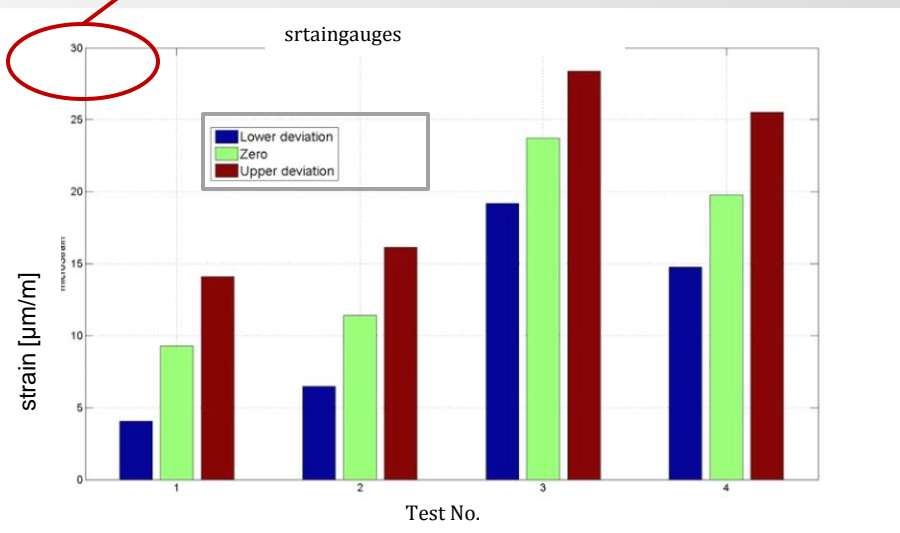
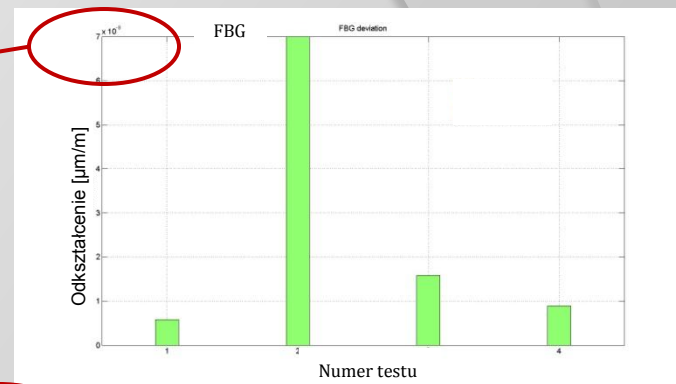


Metody pomiarów

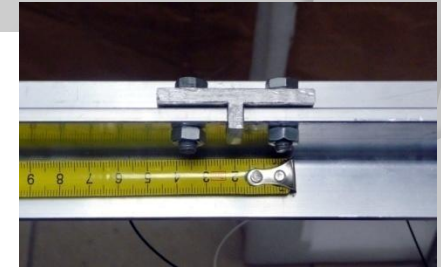
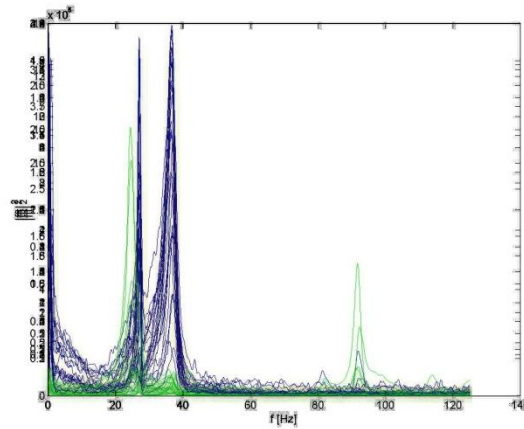
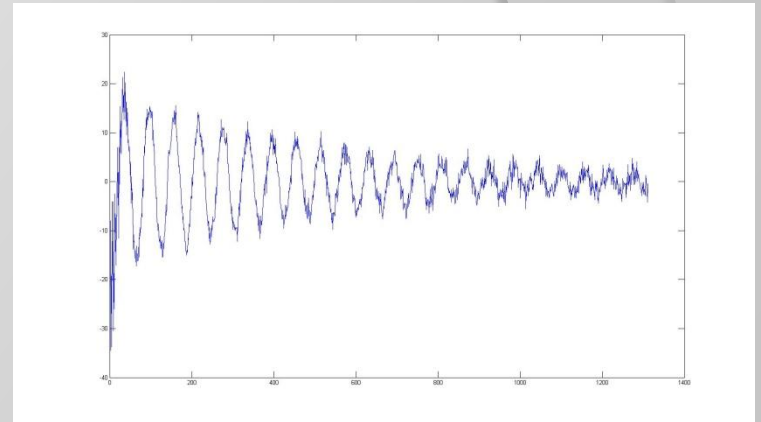
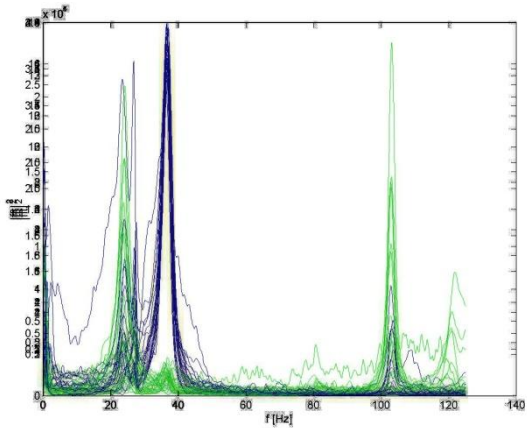
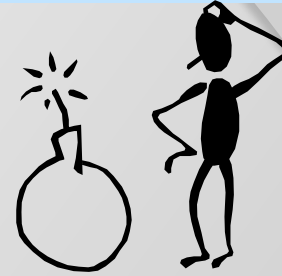
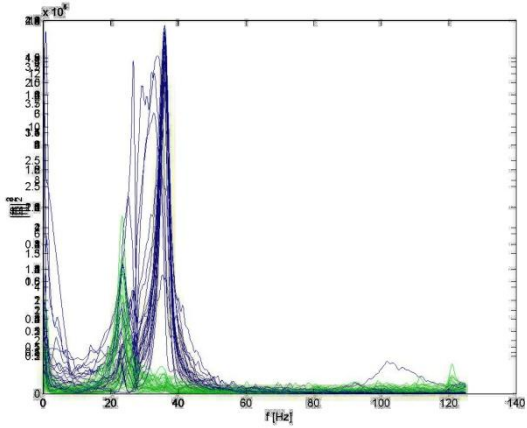
$7E-8 \mu\text{m}/\text{m}$

$30 \mu\text{m}/\text{m}$

$4 \mu\text{m}/\text{m}$



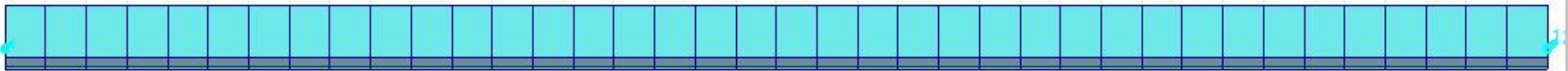
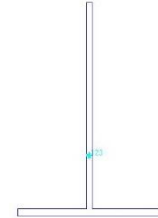
Metody pomiarów



Metoda Elementów Skończonych



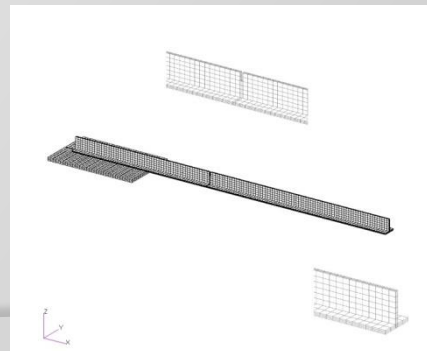
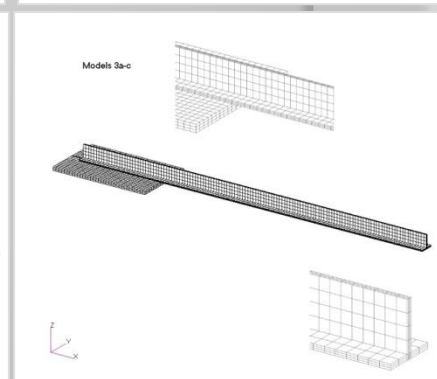
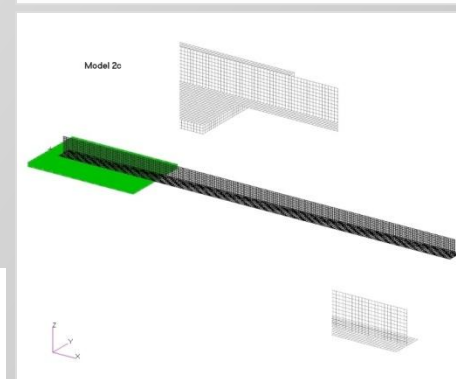
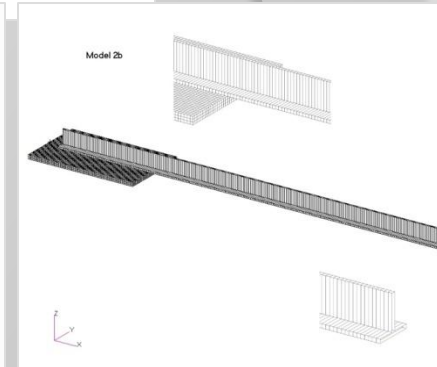
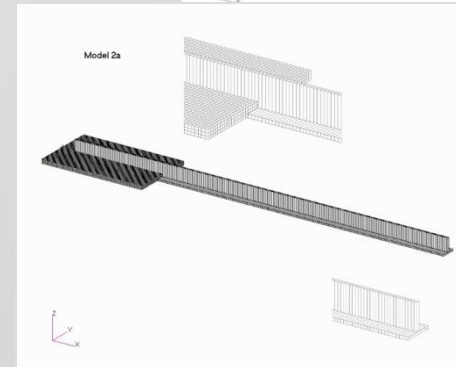
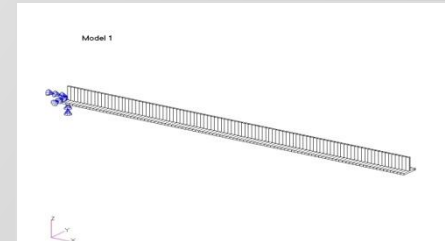
Metoda Elementów Skończonych (MES, ang. FEM, *Finite Element Method*) – metoda rozwiązywania układów równań różniczkowych, opierająca się na podziale dziedziny na skończone elementy (**dyskretyzacja**), dla których rozwiązanie jest przybliżane przez funkcje (**funkcje kształtu**), i przeprowadzaniu faktycznych obliczeń *tylko dla węzłów* tego podziału.



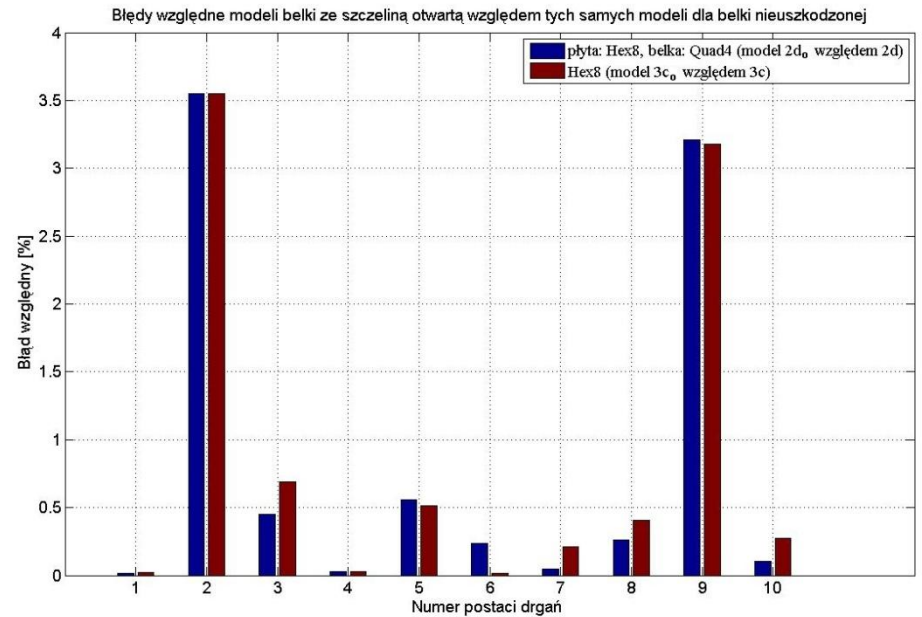
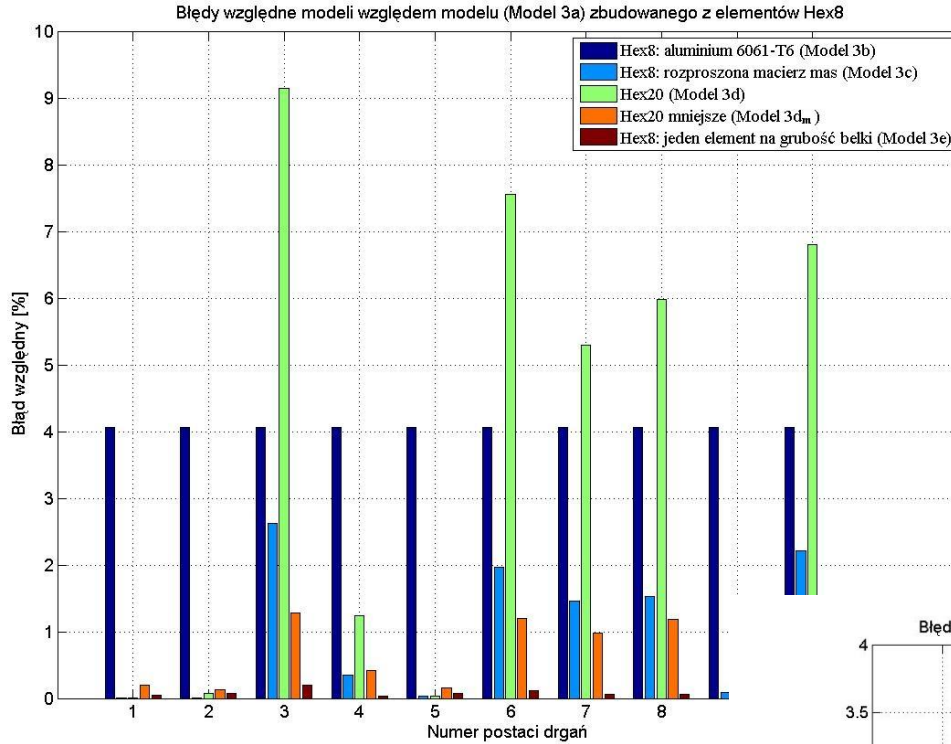
Metody obliczeń



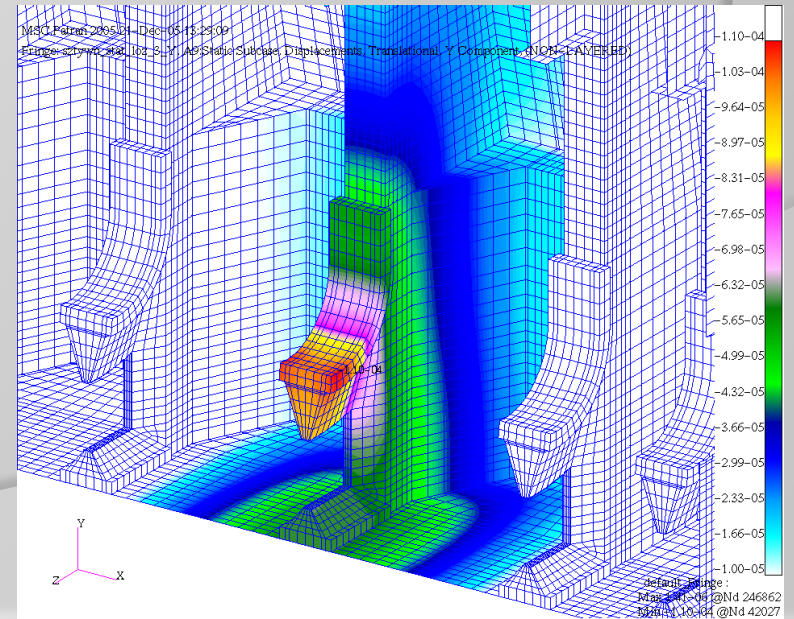
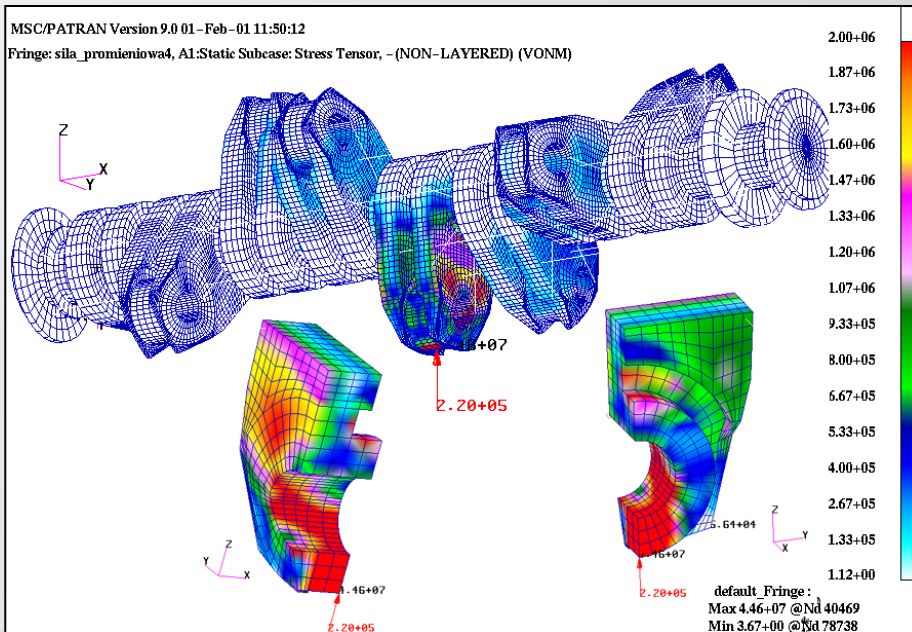
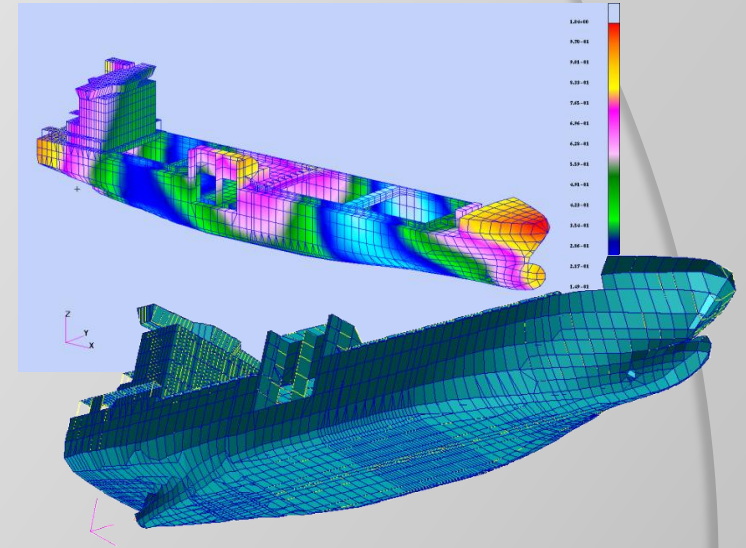
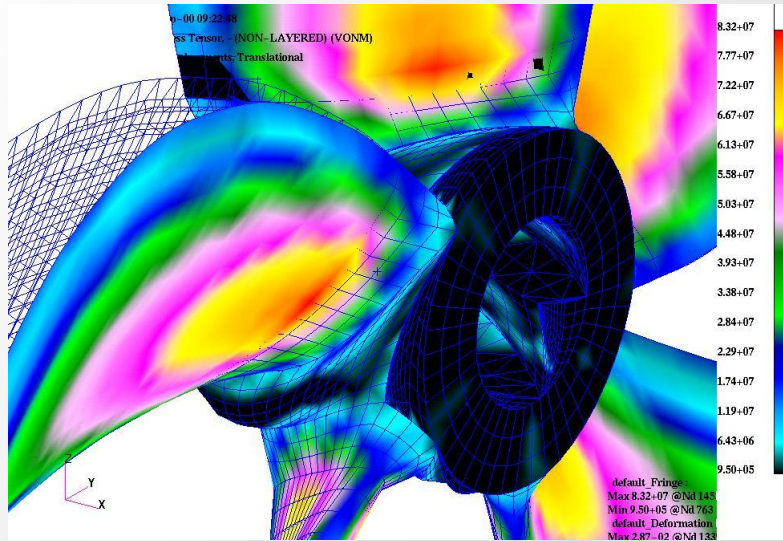
- **Model 1:** beam **Bar2**, d.o.f. 600
- **Model 2a:** mounting plate **Hex8**, beam - **Bar2**, d.o.f. 30366
- **Model 2b** = **2a** + offset
- **Model 2c:** mounting plate **Hex8**, beam **Quad4**, d.o.f. 27966
- **Model 2c_m** = **2c** concentrated, d.o.f. 67638
- **Model 2d** = **2c** coupled mass matrix
- **Model 3a** all model **Hex8**, d.o.f. 26664
- **Model 3a_m** = **3a** concentrated, d.o.f. 107427
- **Model 3b:** = **3a**, aluminum **6061-T6**, d.o.f. 26664
- **Model 3c:** = **3a**, coupled mass matrix, d.o.f. 26664
- **Model 3d** all model **Hex20**, d.o.f. 13803
- **Model 3d_m** = **3d** concentrated, d.o.f. 47640
- **Model 3e** = **3a** rare model, d.o.f. 15120
- **Model 2cU** = **2c** damaged beam



Metody obliczeń



Zastosowanie MES w okrętownictwie

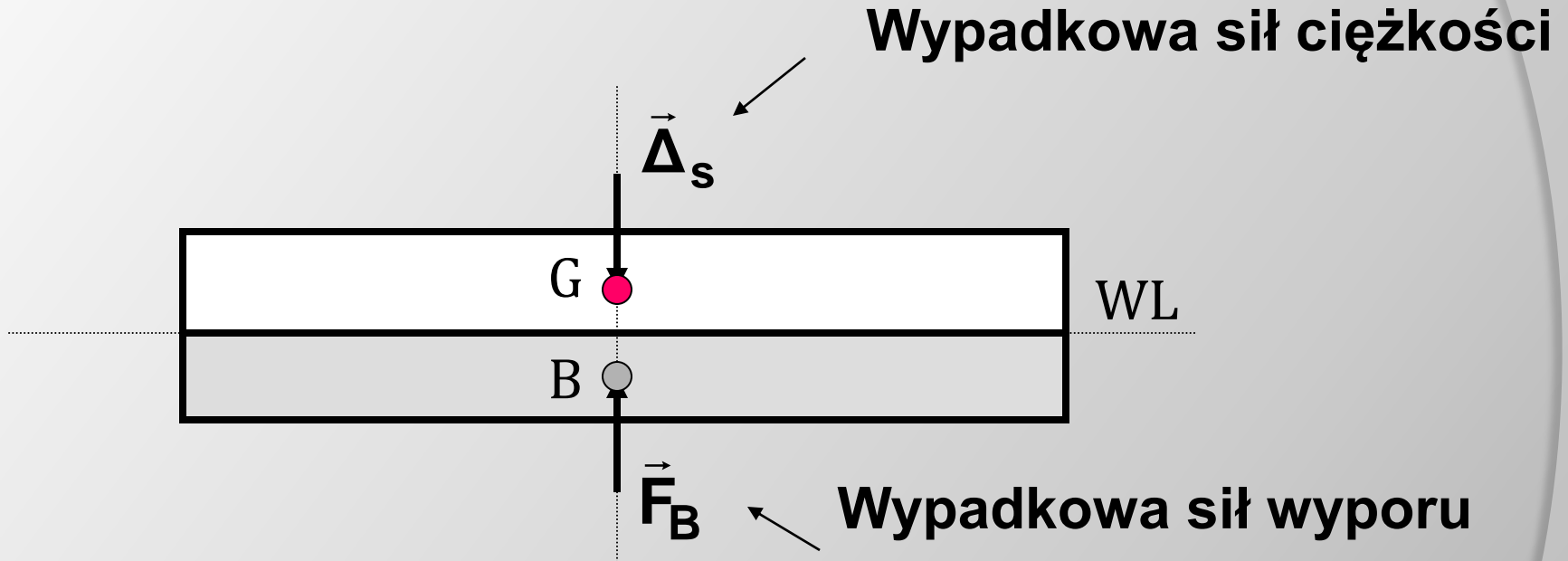


KONSTRUKCJA KADŁUBA OKRĘTOWEGO



Obciążenia konstrukcyjne

Rozkład sił ciężkości oraz sił wyporu:



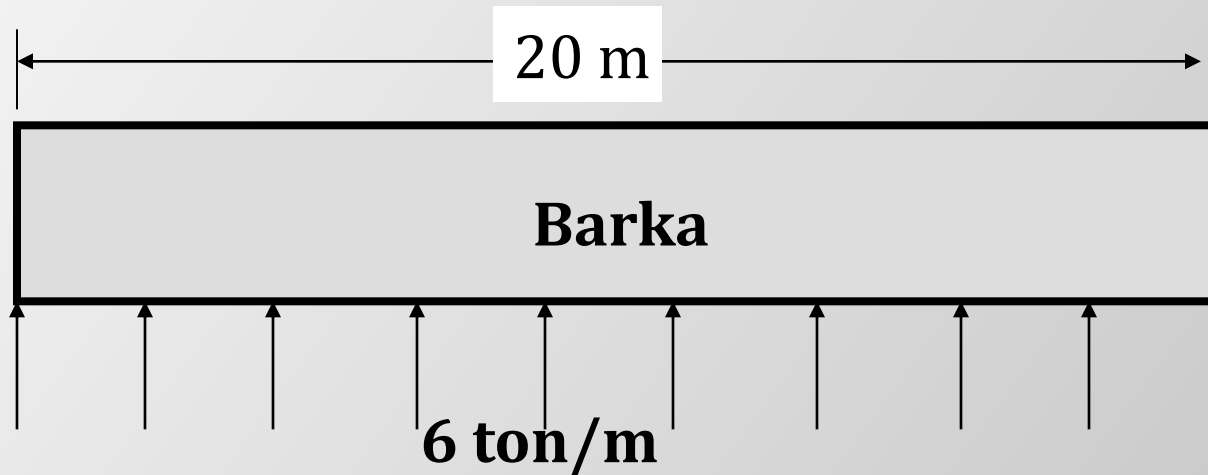
< Konstrukcja pływająca musi zostać zrównoważona >

- Obie wypadkowe muszą mieć równe wielkości.
- Obie wypadkowe muszą działać wzdłuż jednej linii.

Rozkłady sił

Rozkład sił wyporu

- Siły wyporu muszą być rozważane jako *obciążenie ciągłe*

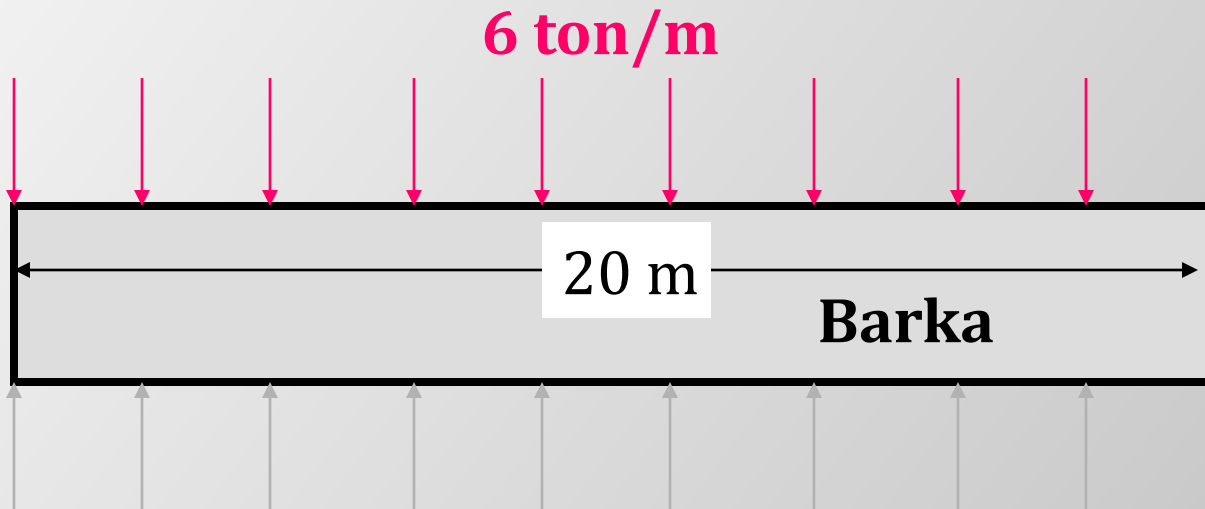


$$F_B = \frac{6 \text{ ton}}{\text{m}} \cdot 20 \text{ m} = 120 \text{ ton}$$

Równomierny
rozkład
obciążenia

Rozkład sił ciężkości

- Siły ciężkości muszą być rozważane jako *obciążenie ciągłe*
- Przypadek I : *Równomierny rozkład sił ciężkości*



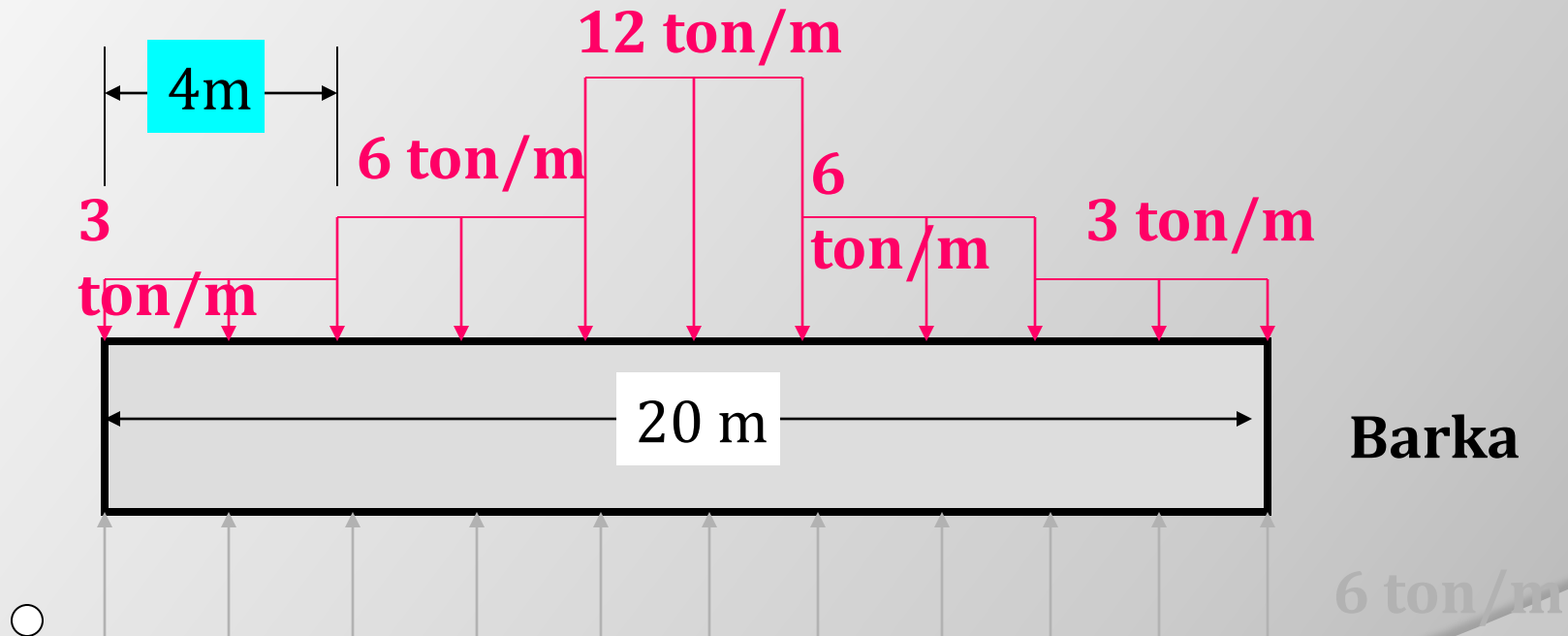
6 ton/m

$$\begin{aligned}\Delta_s &= \frac{6\text{ton}}{\text{m}} \cdot 20\text{m} = 120\text{ ton} \\ &= F_B\end{aligned}$$

Rozkłady sił

Rozkład sił ciężkości

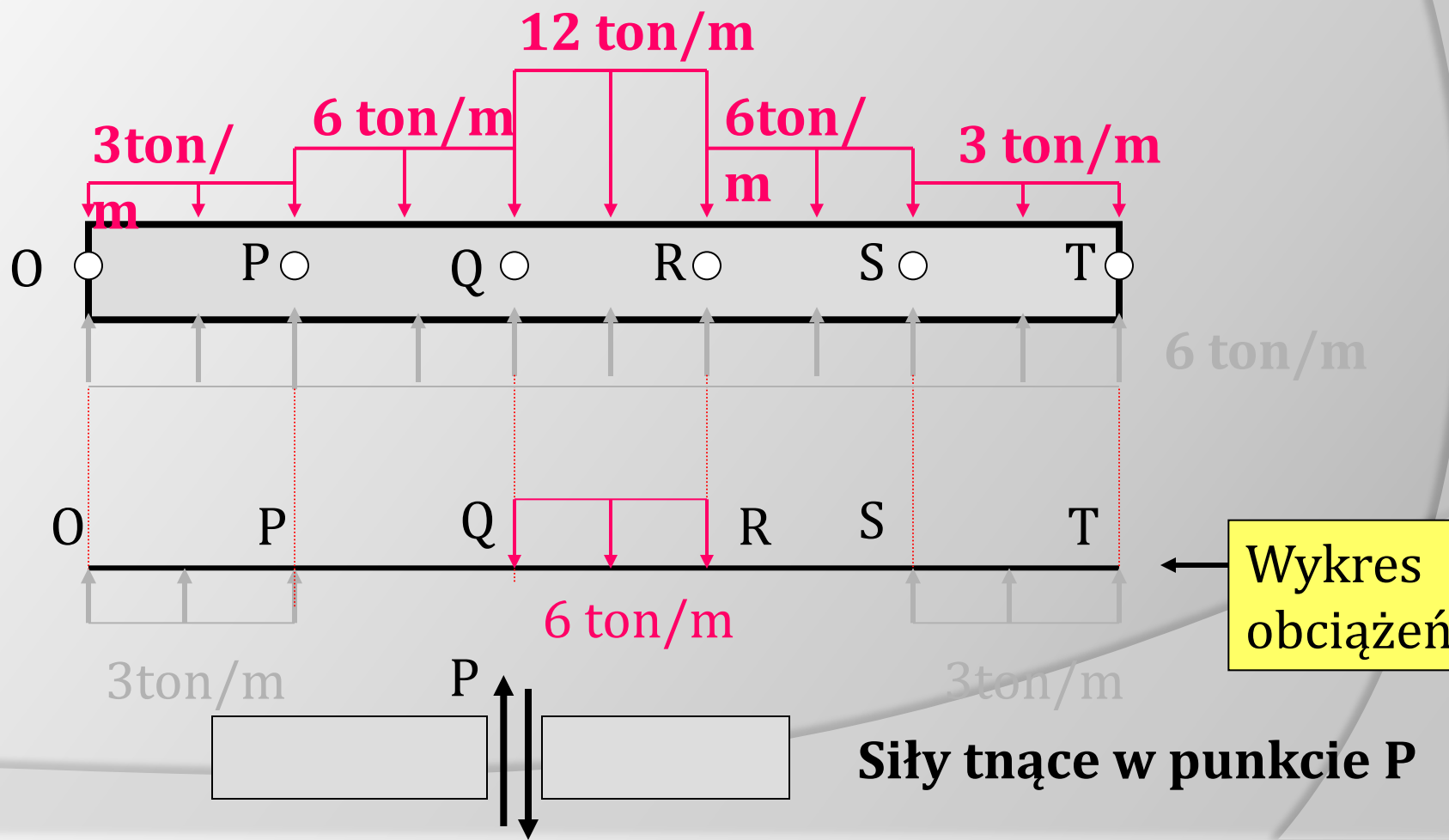
- Przypadek II : *nierównomierny rozkład sił ciężkości*



$$\Delta_s = \frac{3\text{ton}}{\text{m}} \cdot 4\text{m} + \frac{6\text{ton}}{\text{m}} \cdot 4\text{m} + \frac{12\text{ton}}{\text{m}} \cdot 4\text{m} + \frac{6\text{ton}}{\text{m}} \cdot 4\text{m} + \frac{3\text{ton}}{\text{m}} \cdot 4\text{m} = 120 \text{ ton} = F_B$$

Naprężenia tnące

- **Naprężenia tnące** występujące w punktach P, Q, R, S & T z powodu niezrównoważonych lokalnych sił.
- **Wykres obciążeń** może być narysowany poprzez pionowe sumowanie rozkładów sił.

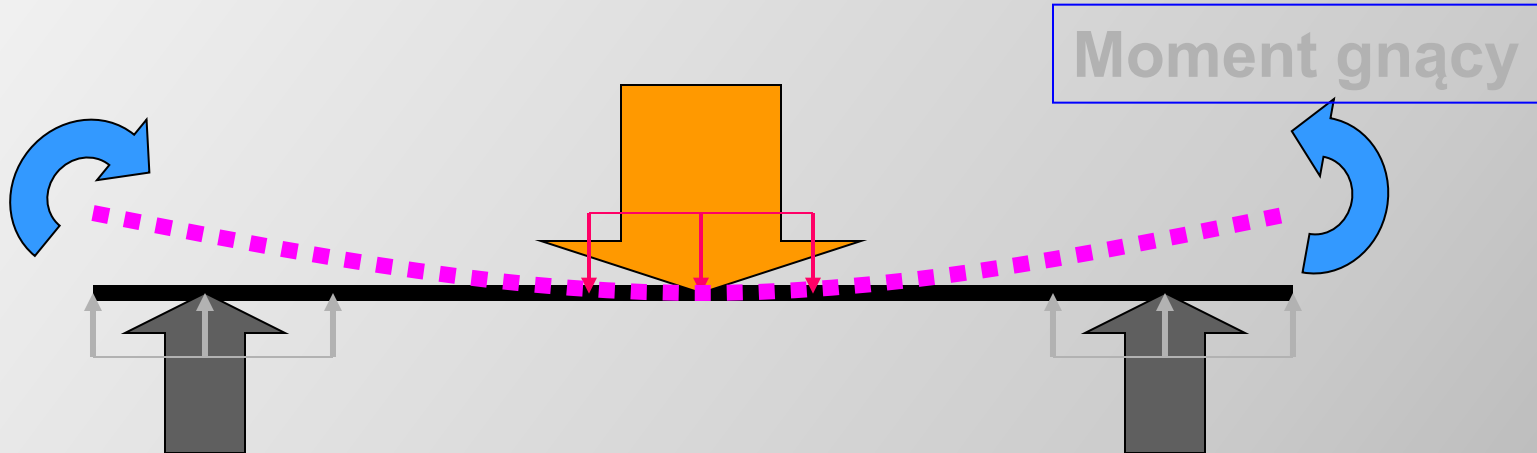


Jak opanować naprężenia tnące w kadłubie statku?

- Zmiana podwodnego kształtu kadłuba tak, aby rozkład sił wyporu był dopasowany do rozkładu sił ciężkości.
 - Taki kształt jest bardzo nieefektywny z punktu widzenia sił oporu kadłuba.
 - Zadanie to jest niewykonalne z uwagi na ciągłe zmiany stanów ładunkowych statku.
- ***Jak zapewnić dostateczną wytrzymałość kadłuba statku***, kiedy wysokie obciążenia naprężeniami tnącymi są nie do uniknięcia
Może to być zrealizowane poprzez:
 - *wykorzystanie materiałów o wysokiej wytrzymałości*
 - *zwiększenie przekroju efektywnego konstrukcji*

Wzdłużny moment gnący

- Nierówny rozkład obciążeń jest przyczyną *momentu gnącego*



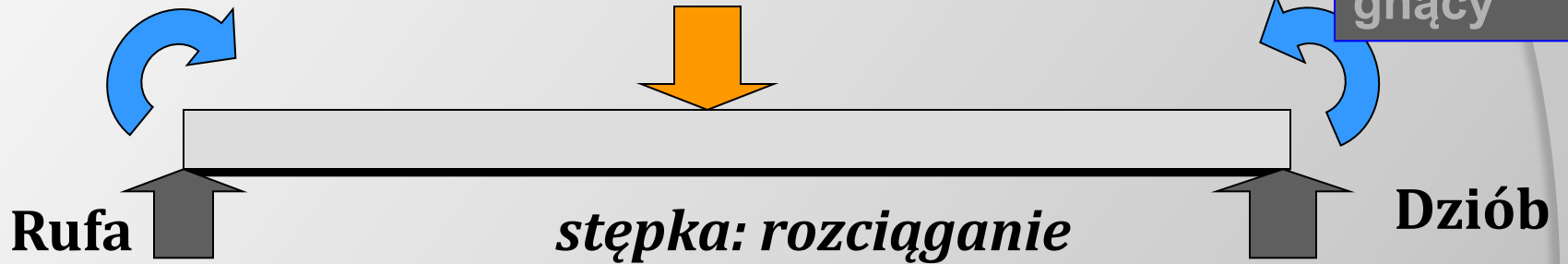
- Siły wyporu koncentrują się na dziobie i rufie statku.
 - Ciężar koncentruje się w środku kadłuba statku.
- Wzdłużny moment gnący może być przyczyną znacznych naprężeń w konstrukcji zwanych *naprężeniami gnącymi*

Wzdłużne naprężenia gnące

Wygięcie -

Sagging

Pokład otwarty: ściskanie

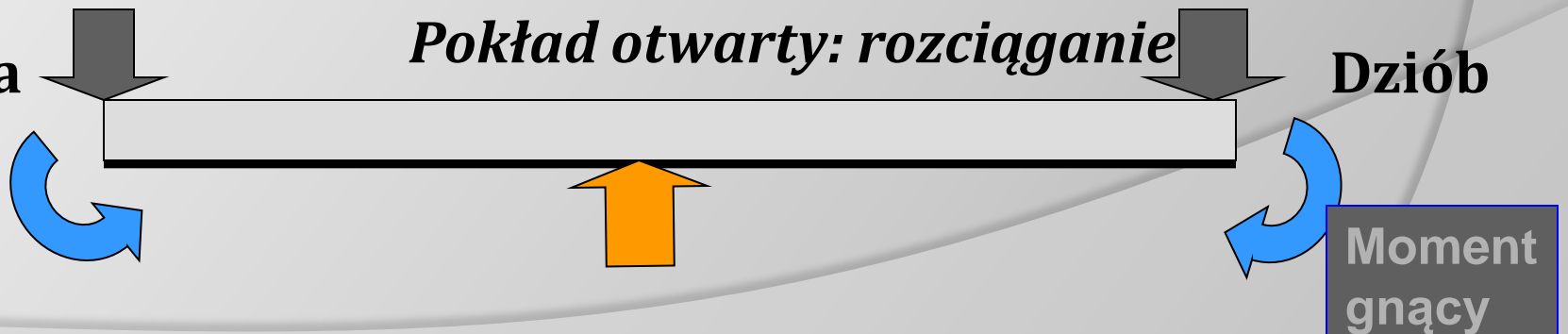


Przebiecie - Hogging

Rufa

Pokład otwarty: rozciąganie

Dziób



Stępka: ściskanie

Sagging & Hogging na fali

- Warunki: **Sagging**

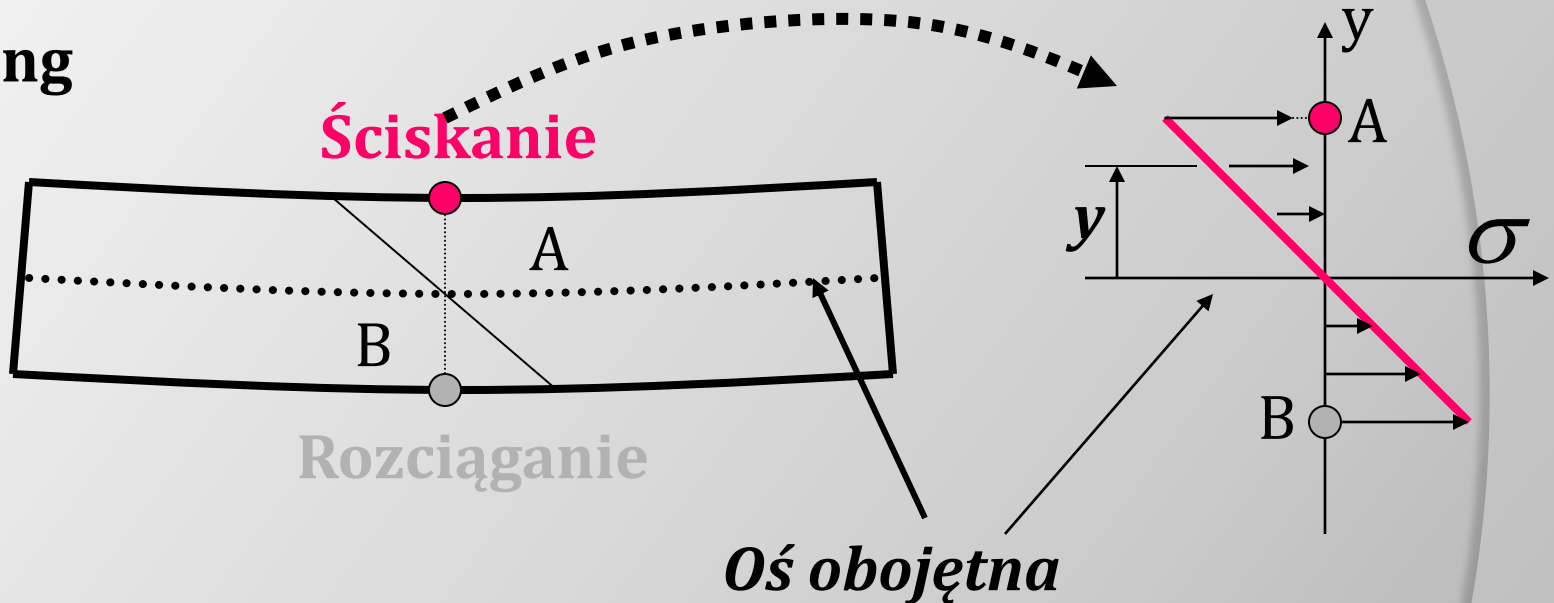


- Warunki: **Hogging**



Wyznaczanie naprężeń gnących

- Sagging



Naprężenia gnące:

$$\sigma = \frac{M y}{I}$$

M : Moment gnący

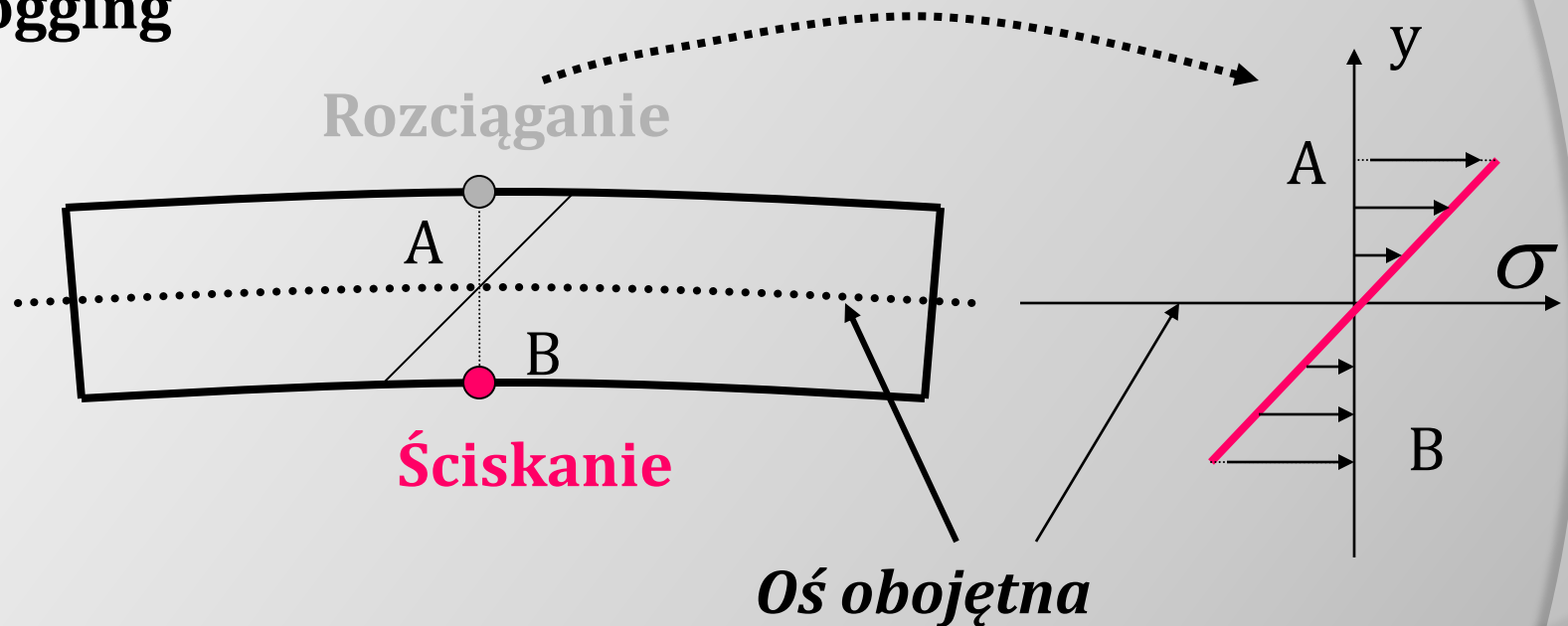
I : Moment bezwładności przekroju

y : Odległość od osi obojętnej

σ rozciągające (+) lub ściskające (-) naprężenie

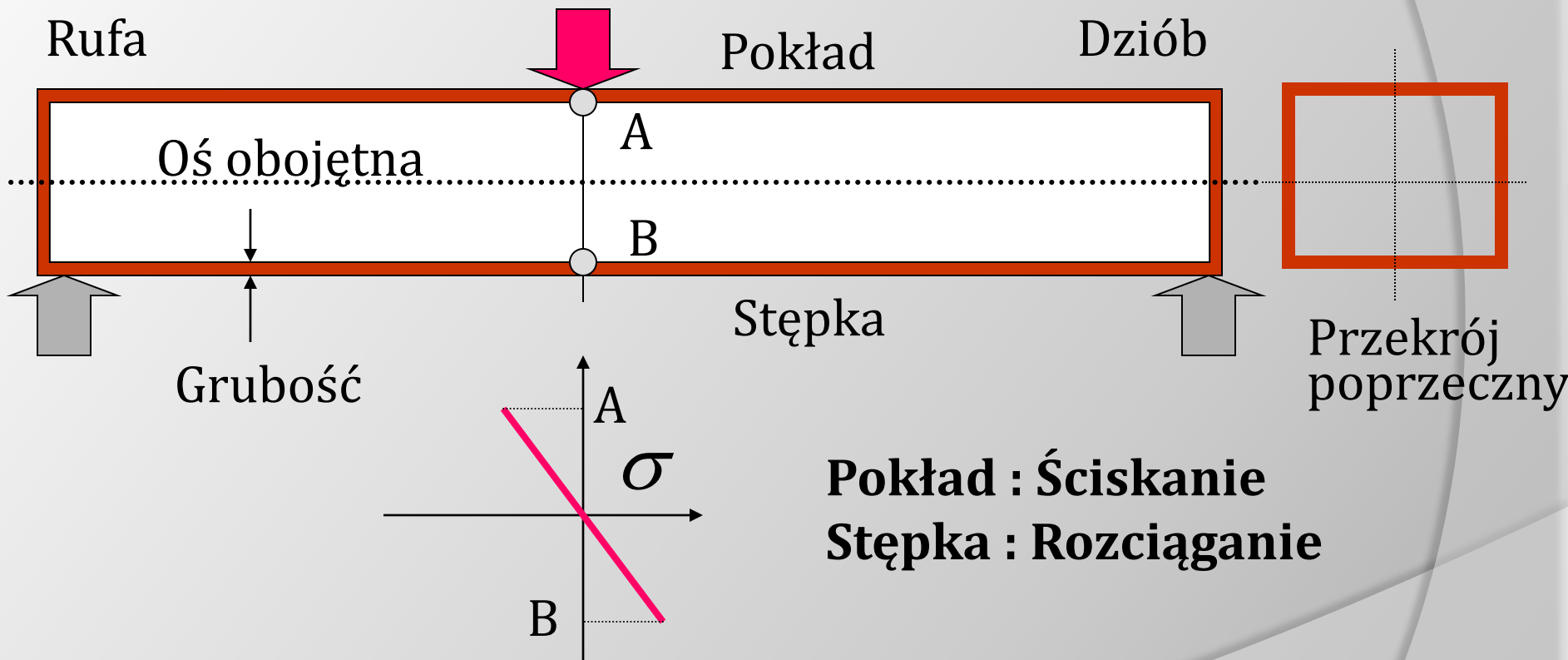
Wyznaczanie naprężeń gnących

- Hogging



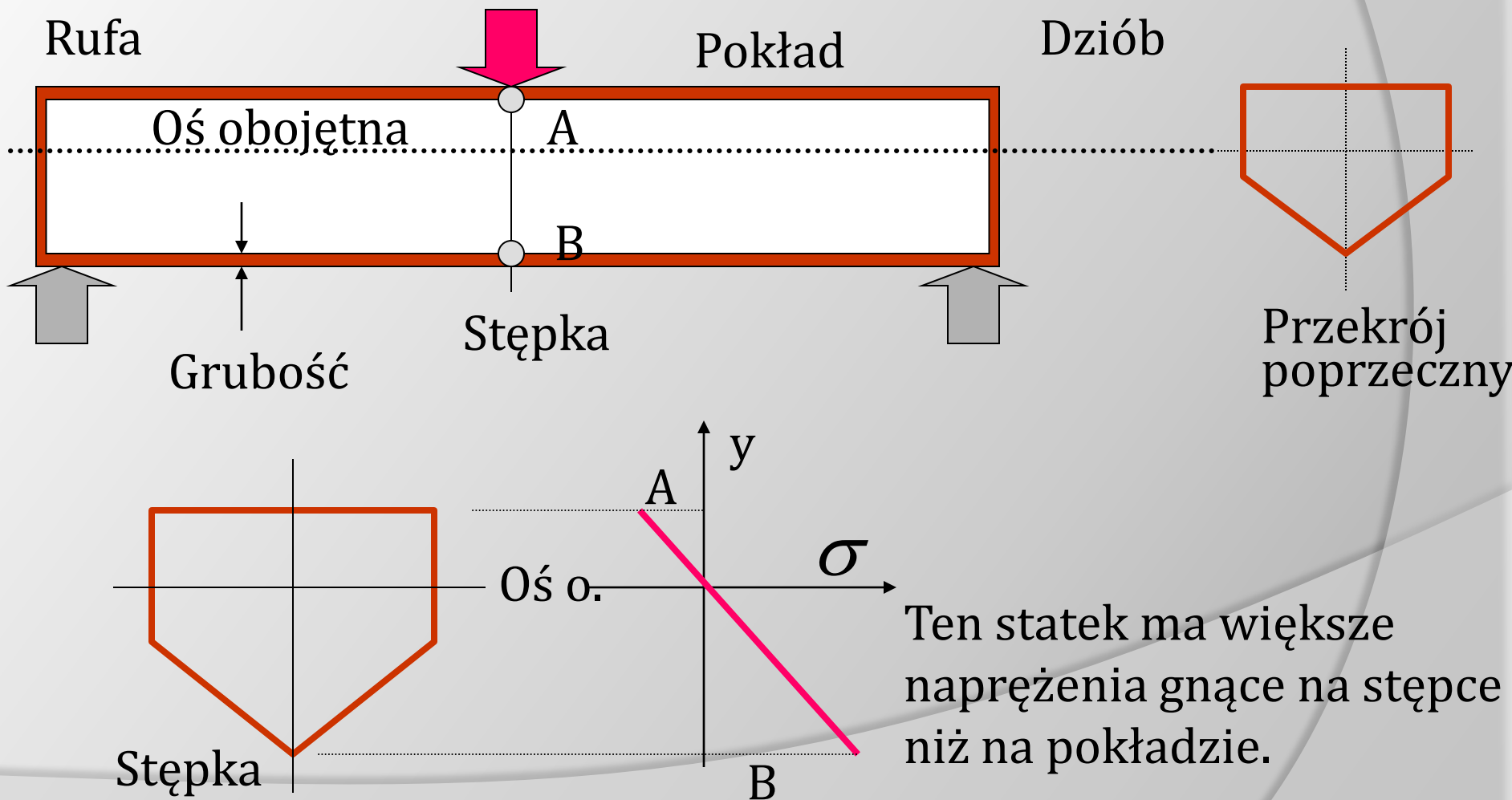
Oś obojętna : środek geometryczny przekroju poprzecznego lub przejście między ściskaniem a rozciąganiem

Przykład: Naprężenia gnące kadłuba statku



- *Statek może być w stanie „sagging” nawet na spokojnej wodzie.*
- *Najczęściej, moment gnący jest największy na śródkręciu.*

Przykład : Naprężenia gnące kadłuba statku



Ten statek ma większe naprężenia gnące na stępce niż na pokładzie.

Ograniczanie wpływu naprężeń gnących

- Moment gnący jest największy w rejonie śródkręcia statku.
- Statek ma największe naprężenia gnące na pokładzie otwartym lub w rejonie stępki.
- Naprężenia gnące mogą być ograniczone poprzez:
 - wyższą wytrzymałość stali
 - większe pola przekrojów wzdluzników

Wzajemne oddziaływanie elementów konstrukcji kadłuba

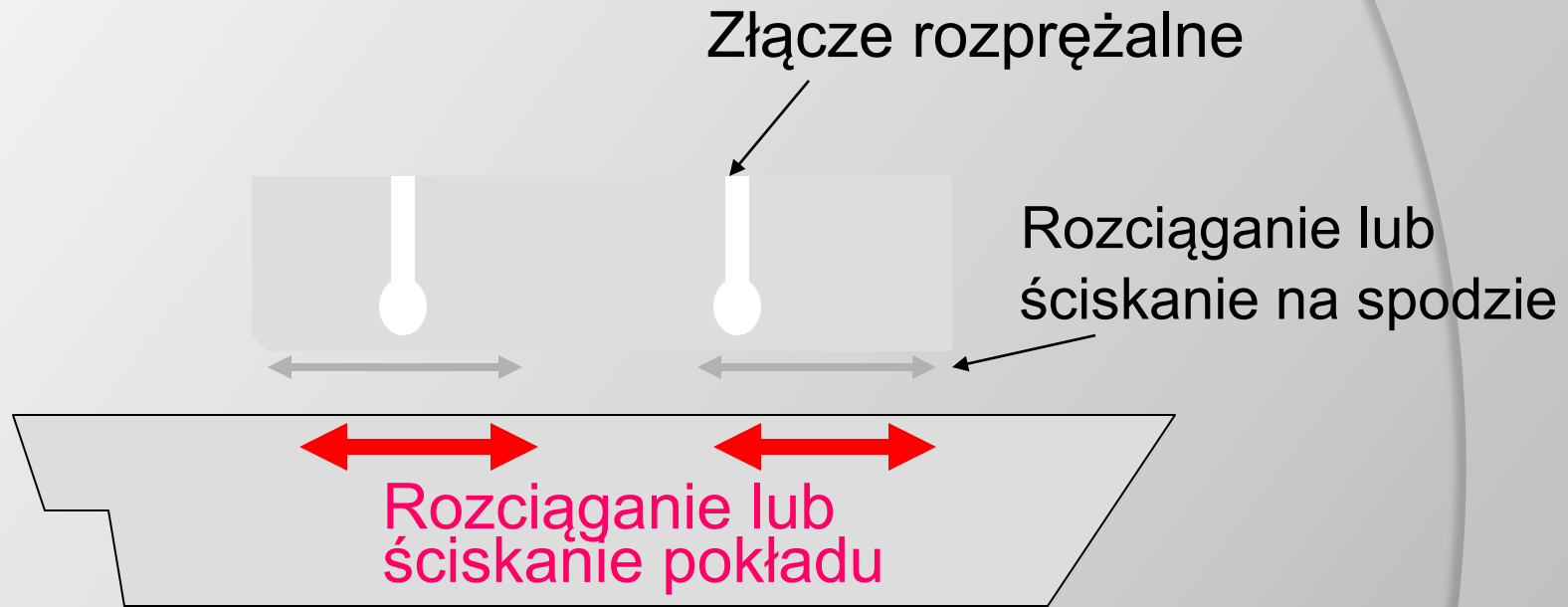
- Naprężenia gnące w nadbudówkach ciągłych są duże z powodu dużej odległości od osi obojętnej.
- W warunkach „sagging” lub „hogging”, występują duże naprężenia tnące pomiędzy pokładem kadłuba i dołem nadbudówki.
- Te naprężenia tnące są przyczyną pęknięć w rejonie ostrych narożników gdzie nadbudówka i kadłub jest połączony.



Te naprężenia mogą być ograniczone poprzez

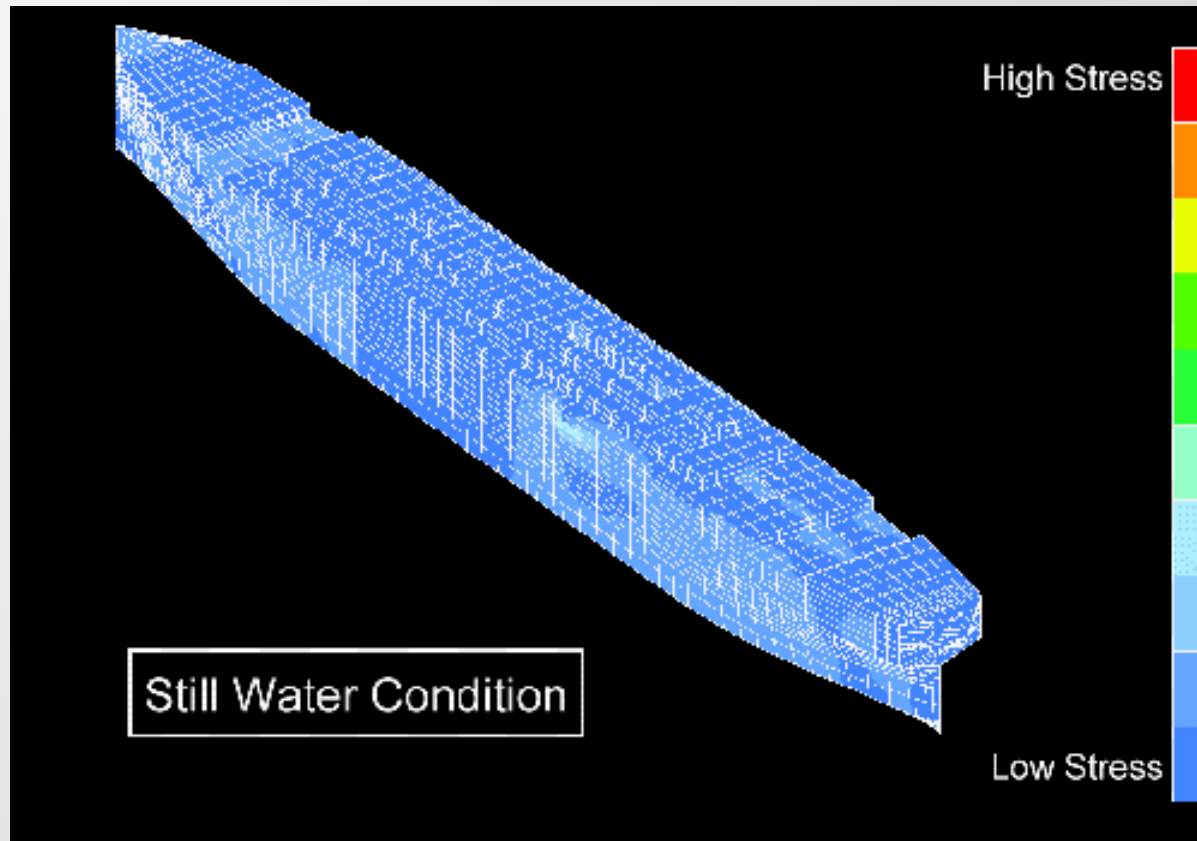
Złącza rozprężalne

Wyznaczanie naprężeń gnących



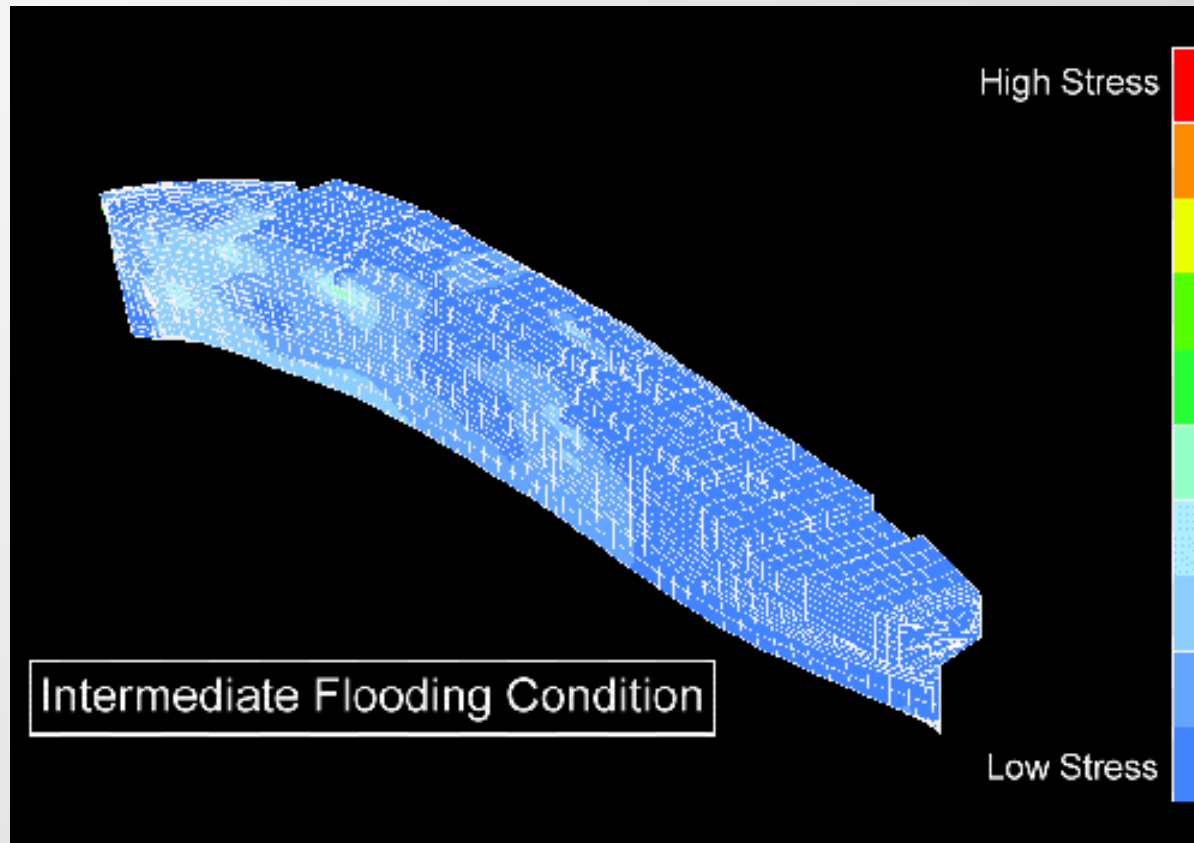
Poprzez zastosowanie złączy rozprężalnych, nadbudówka jest elastyczna i może być zginana wzdłuż kadłuba statku.

Titanic



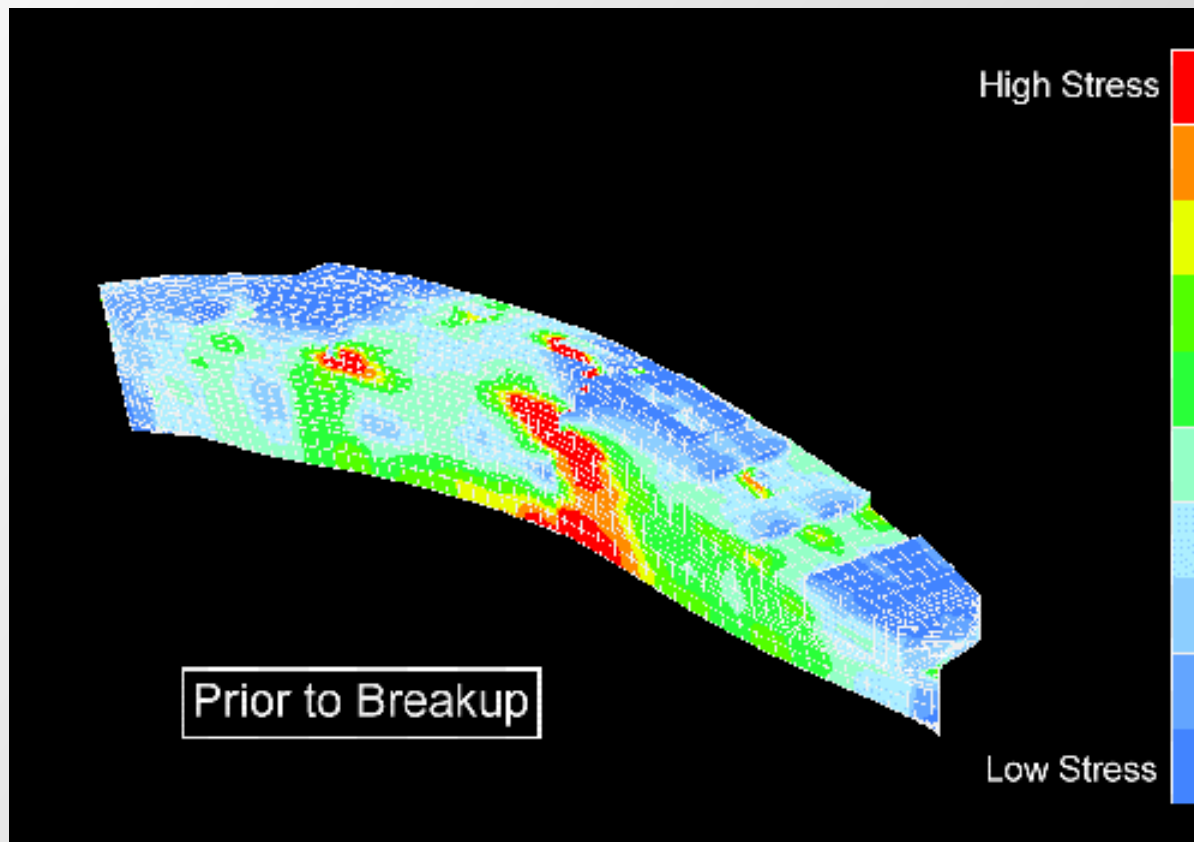
Statek na wodzie spokojnej. Woda podtrzymuje ciężar statku równomiernie wzdłuż jego długości. Uwaga: nieciągłości są przyczyną wzrostu naprężeń nawet na wodzie spokojnej - na przykład, wokół rufowych połączeń rozprężalnych (rejonny o jaśniejszym kolorze niebieskim).

Titanic



Tak mógł wyglądać statek w czasie gdy zostały zalane pierwsze trzy przedziały. Nierównowaga pomiędzy siłami ciężkości a wyporu spowodowało przegłębienie statku na dziób. Naprężenia są wyższe niż w przypadku gdy statek był na wodzie spokojnej. Wzrost naprężeń wokół dziobowych złączy rozprężalnych jest wyraźnie widoczny jasno niebieski kolor!

Titanic



Pole naprężeń statku tuż przed zatonięciem.

Pierwszych sześć przedziałów jest zalanych, rufa wynurzyła się.

Olbrzymia nierównowaga sił jest przyczyną silnego zginania kadłuba w rejonie śródokręcia.

Titanic

Olbrzymia nierównowaga sił spowodowała groźne zginanie kadłuba w rejonie śródkręcia. Większe naprężenia można zaobserwować wokół rufowych złączy rozprężalnych, w porównaniu z dziobowymi złączami. Podczas tonięcia, dziobowe złącza otworzyły się na tyle, że przerwały dwie warstwy rozpórek. Kadłub rozpadł się na trzy części. Środkowa część był długości 20 metrów i obejmowała rufowe złącza rozprężalne. To zostało potwierdzone w obliczeniach – duży rejon czerwonego koloru na rysunku.

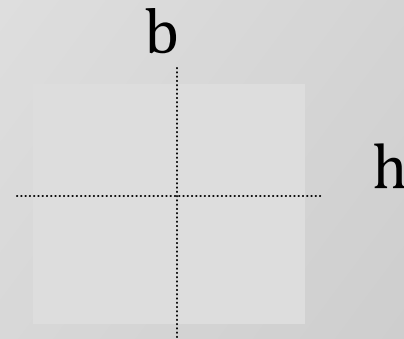
Titanic



Wokół pozostałości okien, duża szczelina w centrum fotografii jest jednym z dwóch złączy rozprężalnych Titanica. Jest to przykład konstrukcyjnych złączy do akomodacji nadmiernych naprężeń gnących statku.

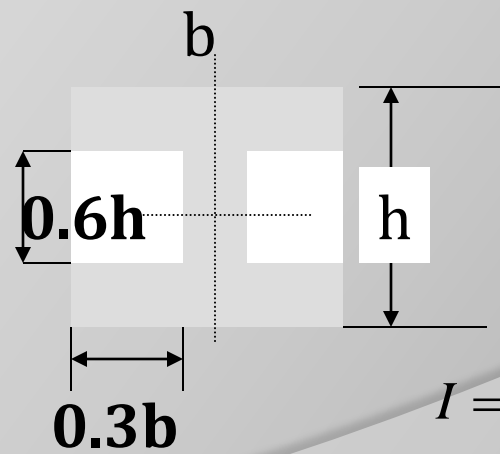
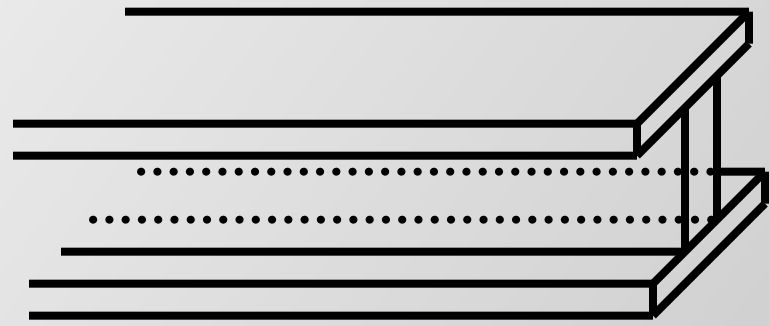
Przykład : Naprężenia gnące

- Belka pełna



$$I = \frac{1}{12}bh^3$$
$$m = \alpha \cdot bh$$

- Dwuteownik



$$I = \frac{0.8704}{12}bh^3$$
$$m = \alpha \cdot 0.64 \cdot bh$$

Inne obciążenia

Obciążenia hydrostatyczne

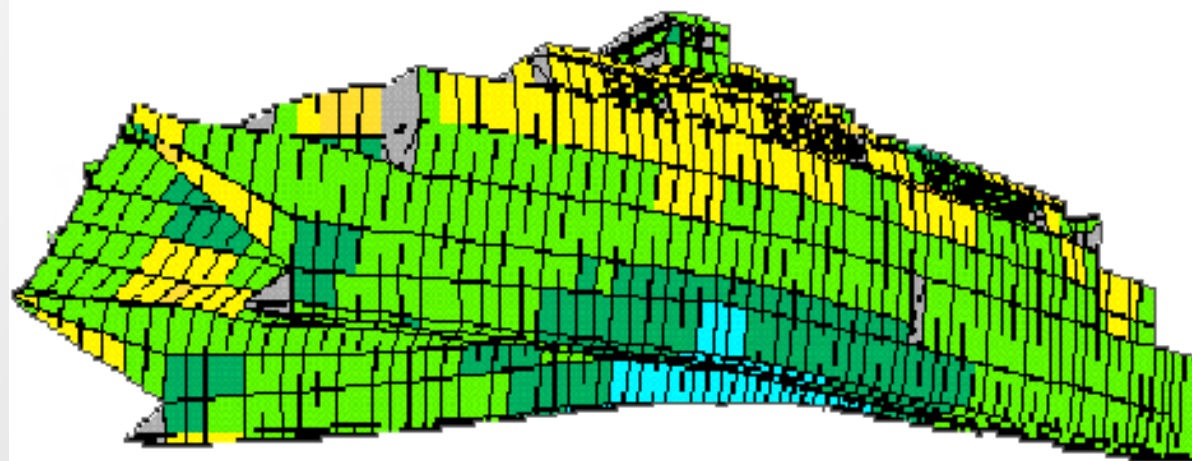
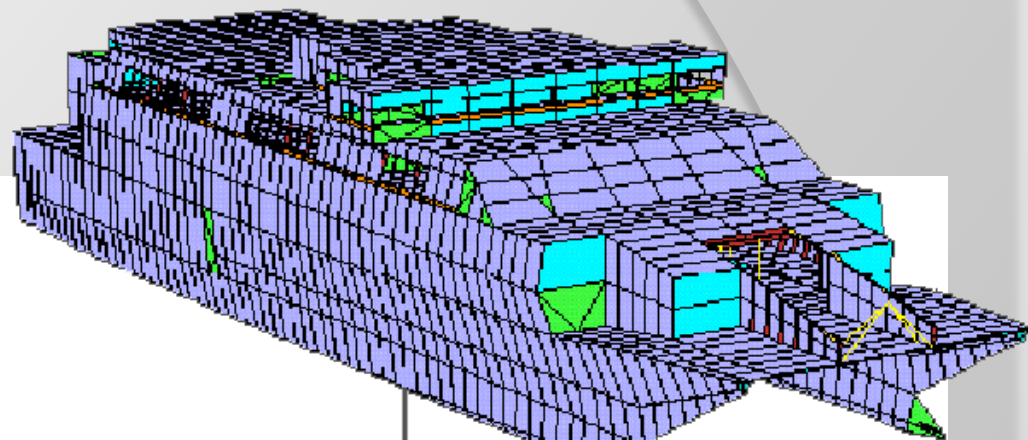
- Obciążenia wywołane ciśnieniem hydrostatycznym
- Obciążenia hydrostatyczne są bardzo ważne dla łodzi podwodnych
- *Ciśnienie hydrostatyczne* : $P_{\text{HydStatic}} = \rho gh$

Obciążenia od skręcania kadłuba statku

- Najczęściej te obciążenia nie są znaczące
- Mogą mieć wpływ na wytrzymałość statków z dużymi otworami w pokładzie otwartym (np. kontenerowce)

Szybki prom pasażerski

Analiza wytrzymałości



Obciążenia militarne

- Obciążenia od eksplozji lub uderzeń w powietrzu i w wodzie
- Okręty wojenne powinny być odporne na takie obciążenia
- Okręty wojenne przechodzą często testy *odporności na udary* podczas prób morskich

Konstrukcja kadłuba statku

Elementy konstrukcyjne

Wzdłużnik wysokowytrzymałościowy element konstrukcyjny biegnący wzdłuż długości kadłuba statku.

- **Stępka**

- Duży centralnie położony wzdłużnik
- Biegnący wzdłuż dna kadłuba statku

- **Poszycie kadłuba statku**

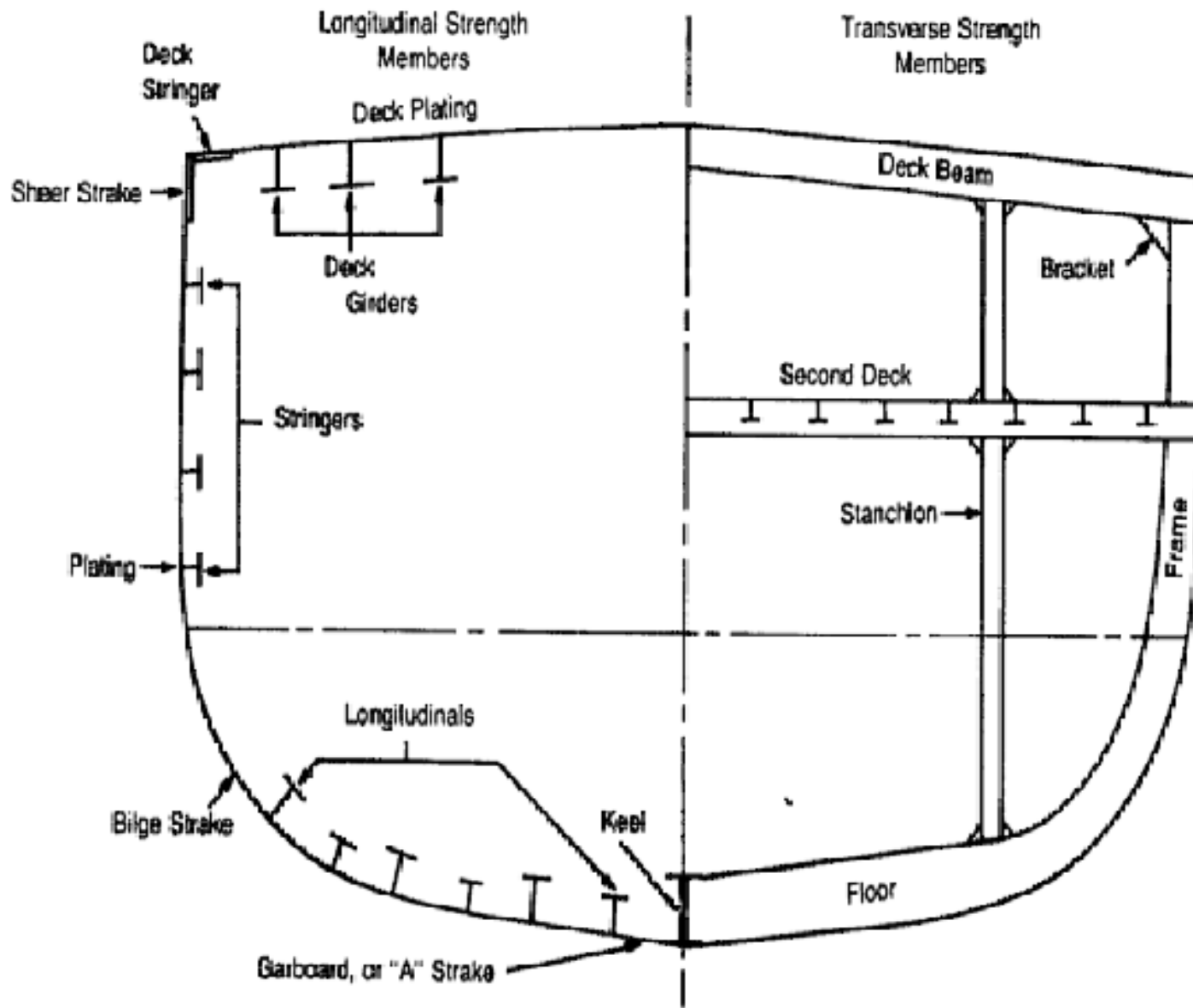
- Cienkie arkusze blachy pokrywające burty i dno statku.
- Wnosi znaczący wkład w wzdłużną wytrzymałość kadłuba.
- Przenoszące obciążenie hydrostatyczne (lub udar).

- **Wręg**

- Usztywnienia poprzeczne biegnące od stępki do pokładu.
- Przenoszący obciążenia hydrostatyczne, fale, udary, itp.

Elementy konstrukcyjne

- **Wzdłużnik burtowy**
 - **Usztywnienie biegnące wzdłuż burt statku.**
 - **Zwykle mniejsze od wzdłużników pokładowych i dennych.**
 - **Mające udział w wytrzymałości wzdłużnej.**
- **Pokładnik**
 - **Poprzeczny element usztywnienia pokładu, wręg.**
- **Pokładowy wzdłużnik**
 - **Wzdłużny element usztywnienia pokładu.**



Elementy konstrukcyjne

- **Dennik**

- Wręg biegnący od stępki do obła statku.
- Wręg może być połączony z dennikiem i stanowić jego część.

- **Wzdłużnik denny**

- Usztywnienie biegnące równoległe do stępki wzdłuż dna kadłuba.
- Przecina denniki pod kątem prostym.
- Jest ważnym składnikiem wytrzymałości wzdłużnej.

System usztywnień

- Zwiększenie wytrzymałości statku poprzez:
 - zastosowanie gęsto umiejscowionych usztywnień
 - zwiększenie grubości elementów poszycia i usztywnień

Zabiegi te zwiększają koszty, zmniejszają przestrzeń ładunkową i uniemożliwiają wzięcie większej ilości ekwipunku

Optymalizacja



- Wzdłużny system usztywnień
- Poprzeczny system usztywnień
- Mieszany system usztywnień

Wzdłużny system usztywnień

- Wzdłużny system usztywnień :
 - Wzdłużniki są rozmieszczone gęściej, ale o niższej wysokości.
 - Wręgi są rozmieszczone szerzej.
 - Główne elementy to: stępka, wszystkie wzdłużniki, poszycie.
- *Główna rola wzdłużników to: przeciwdziałanie wzdłużnym naprężeniom gnącym spowodowanym przez „sagging” i „hogging”.*
- Typowa fala oceaniczna ma 100 m długości. Statki o takiej i większej długości są zagrożone znaczącymi wielkościami naprężeń gnących.
- Statki o długości większej od 100 m powinny mieć większą ilość usztywnień wzdłużnych niż poprzecznych.

Poprzeczny system usztywnień

- Poprzeczny system usztywnień :
 - Wzdłużniki są rzadsze, ale wyższe.
 - Wręgi są rozmieszczone gęściej i w sposób ciągły.
- Główne elementy to: wręgi, denniki, pokładniki, poszycie.
- *Główna rola wzdłużników to*: przeciwdziałanie obciążeniu hydrostatycznemu.
- Statki o długości mniejszej od 100 m
lub łodzie podwodne.

Mieszany system usztywnień

- Połączenie wzdłużnego i poprzecznego systemu usztywnień
- **Cel:**
 - **Optymalizacja układu konstrukcyjnego dla danego, spodziewanego obciążenia**
 - **Ograniczenie kosztów**
- **Typowa kombinacja:**
 - **Wzdłużniki z niskimi wręgami**
 - **Wręgi główne (wysokie) co 3, 4 wręgi**

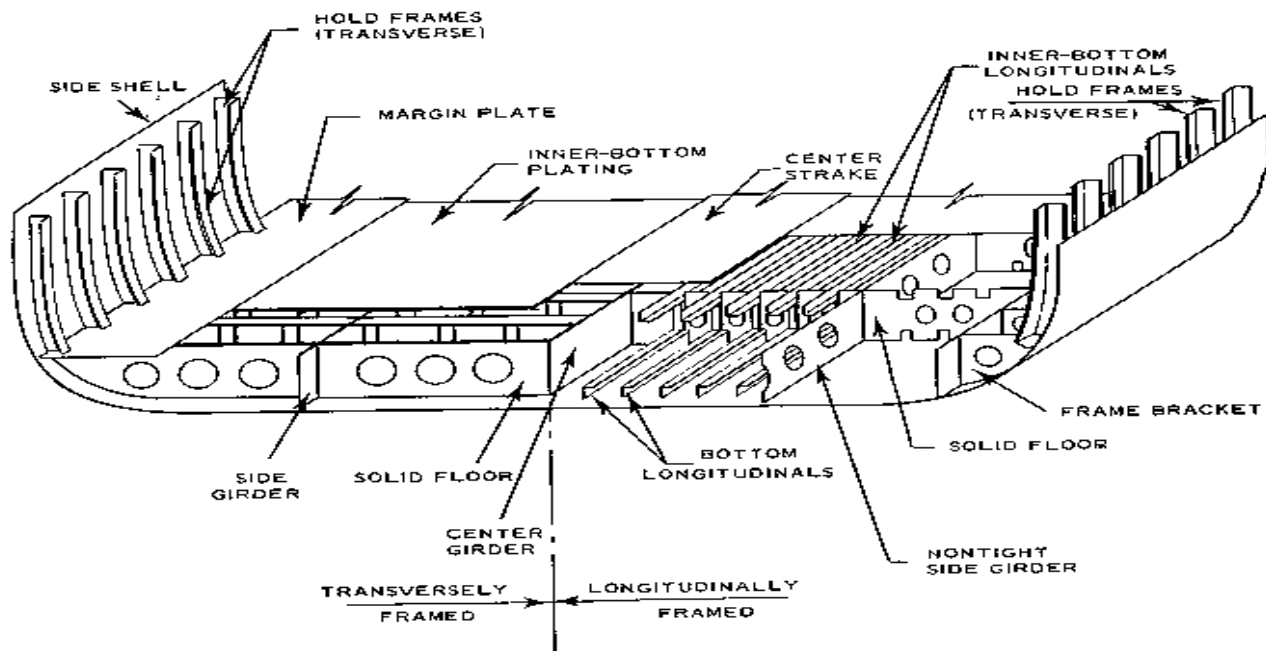


Figure 5-25. Double-bottom construction with transverse framing illustrated on the lefthand side and longitudinal framing on the righthand side. (From Taggart 1980.)

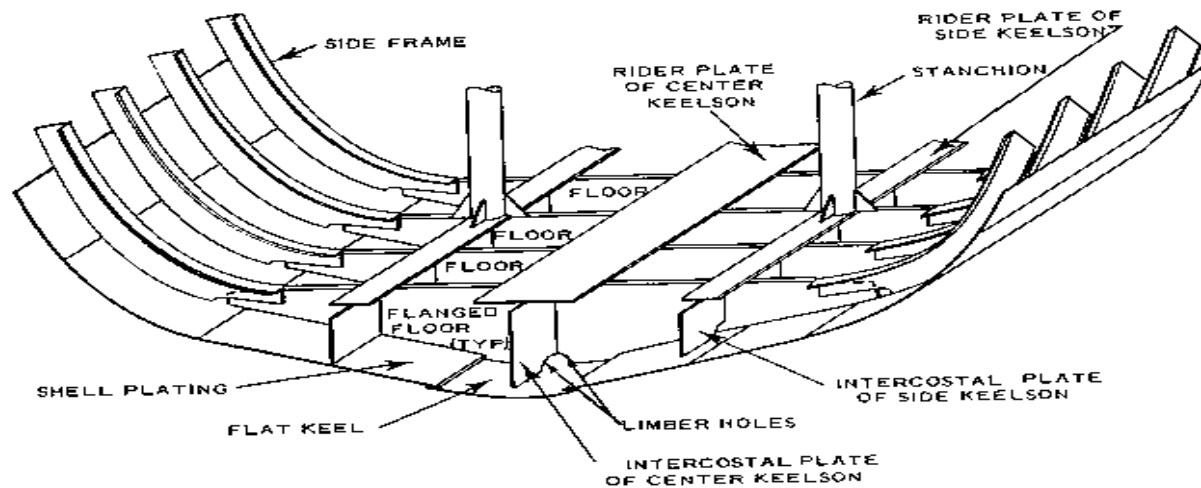


Figure 5-26. Single-bottom construction. (From Taggart 1980.)

Dno podwójne

- **Dwa wodoodporne dna, z pustą przestrzenią pomiędzy nimi, w celu przeciwdziałania:**
 - *ciśnieniu wody*
 - *naprężeniom gnącym*
 - *uszkodzeniom dna na mieliźnie lub podczas eksplozji.*
- **Dno podwójne dostarcza przestrzeni do magazynowania:**
 - paliwa
 - wody balastowej i pitnej
 - gładkie dno wewnętrzne jest wygodniejsze dla ładunku i wyposażenia oraz czyszczenia przestrzeni ładunkowych.

Gródź wodoszczelna

- Grodzie dzielą kadłub na wodoszczelne sekcje
- **Główna rola**
 - *Usztywnienie kadłuba*
 - *Ograniczenie zagrożenia w przypadku katastrof*
- Odpowiednie umiejscowienie grodzi umożliwia wypełnienie kryteriów stateczności statku w przypadku katastrofy.
- Grodzie zwykle są wzmocniane poprzez usztywnienia pionowe lub poziome.

Tryby uszkodzeń konstrukcji

1. Przekroczenie granicy plastyczności

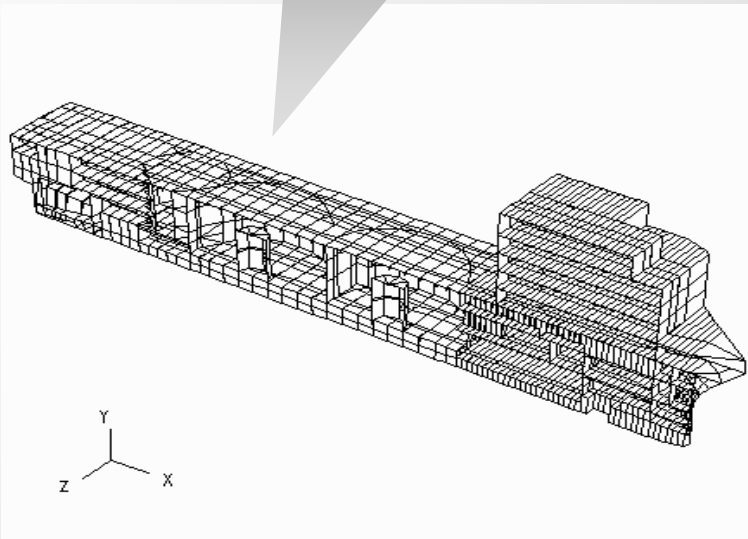
- *Wolna deformacja plastyczna elementów konstrukcyjnych spowodowana polem naprężeń przekraczających granicę plastyczności*
- W celu uniknięcia uplastycznienia, ustalono współczynniki bezpieczeństwa dla konstrukcji okrętowych.

Współczynnik bezpieczeństwa = 2 lub 3

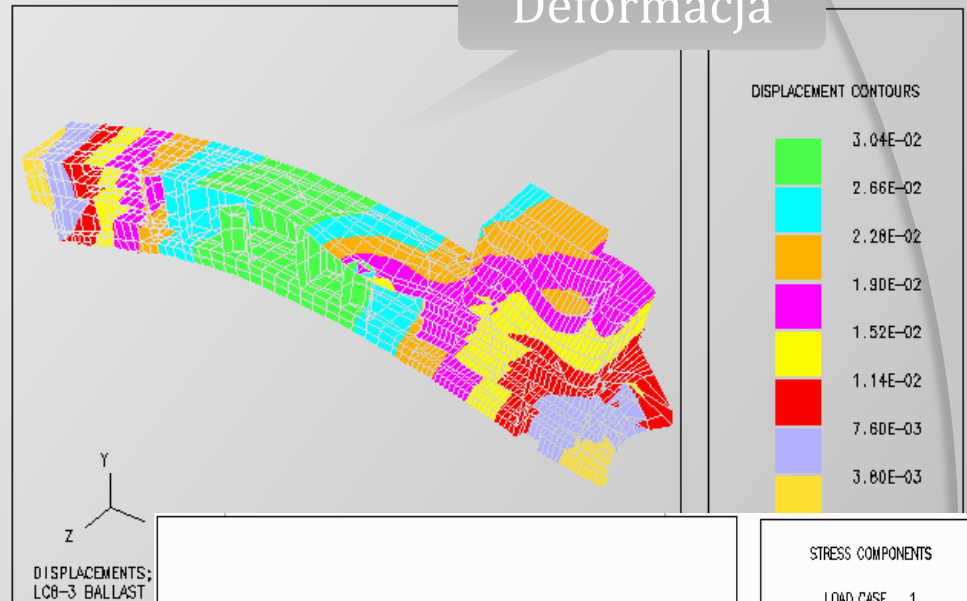
(Maksymalne naprężenie kadłuba statku nie przekroczy 1/2 lub 1/3 granicy plastyczności)

Analiza wytrzymałości kablownca

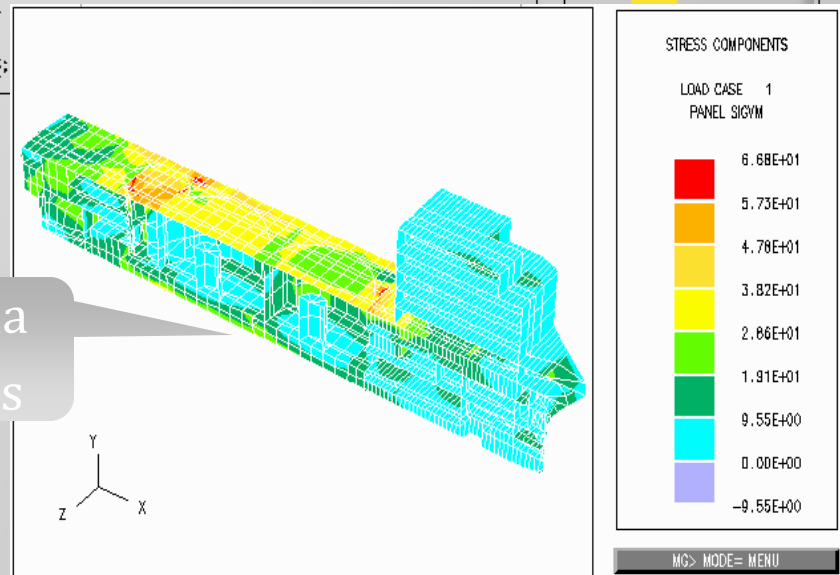
Model kadłuba



Deformacja



Naprężenia
Von Mises



2. Wyboczenie

- **Znaczna zmiana wymiarów oraz nagła utrata sztywności spowodowana ściskaniem długich pilersów lub płyt**
- **Obciążenia, które mogą spowodować wyboczenie: ładunek, falowanie, obciążenie uderzeniowe, itp.**

- **W szczególności:**

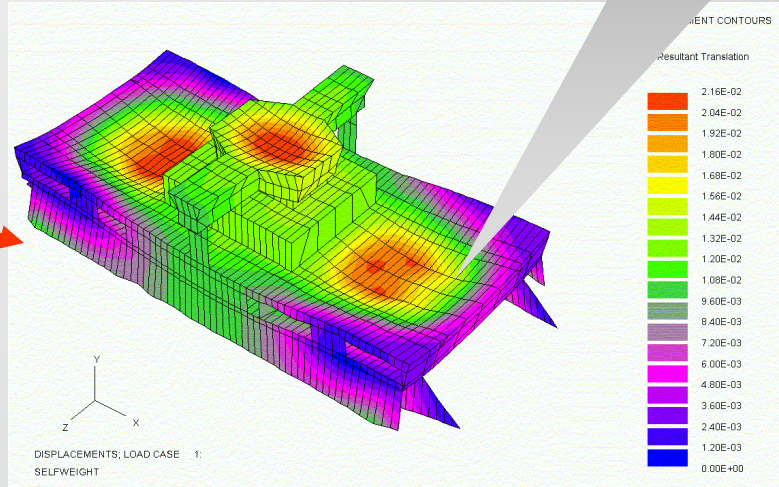
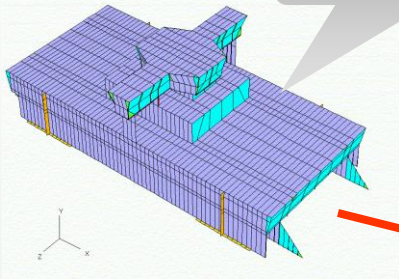
Wyboczenie pokładu : pod wpływem sagging lub hogging

Wyboczenie poszycia burt: przez fale, uderzenia, mieżizny

Wyboczenie pilersów: poprzez nadmierne obciążenie ściskającą siłą osiową

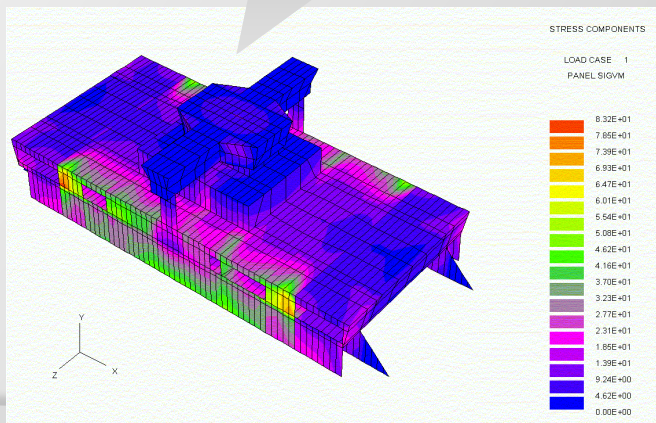
Wyboczenia na pokładzie promu

Model MES

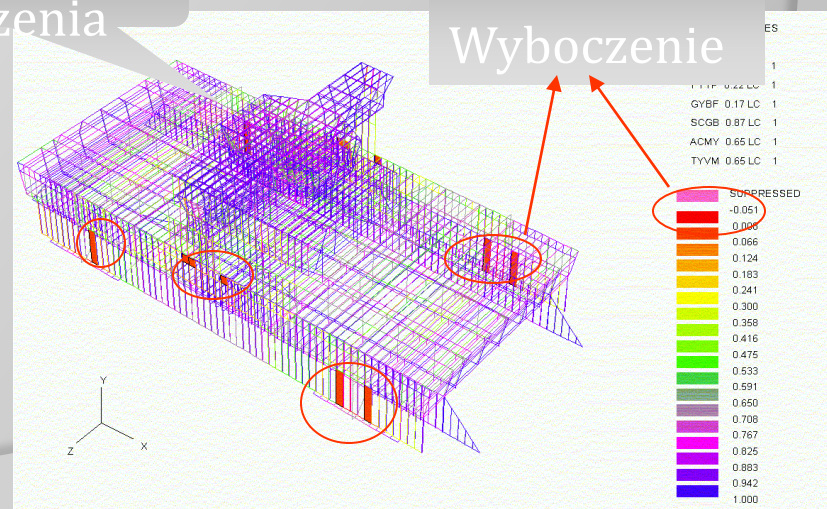


Odkształcenie pod wpływem ciężaru

Naprężenia



Wskaźniki wyboczenia



Wyboczenie

3. Uszkodzenie zmęczeniowe

- ***Uszkodzenie materiału spowodowane zmiennymi naprężeniami (cykliczna zmiana obciążenia)***
- **Limity wytrzymałości: naprężenia poniżej których nie występuje uszkodzenie zmęczeniowe**
- **Uszkodzenie zmęczeniowe może być spowodowane przez:**
 - **czynniki materiałowe (zanieczyszczenia, zawartość węgla, wady materiałowe)**
 - **wykończenie powierzchni**
 - **środowisko (korozja, zasolenie, zasiarczenie, wilgotność,...)**
 - **geometria (ostre naroża, nieciągłości)**
 - **jakość wykonania (spawanie, wykończenie)**
- **Zmęczenie powoduje pęknięcia kadłuba statku.**

4. Kruche pęknięcia

- *Nagłe, katastroficzne uszkodzenie z małym lub bez uplastycznienia*
- Kruche pęknięcie zależy od:
 - Materiału
 - Mała ciągliwość i duża zawartość węgla
 - Temperatury
 - Praca materiału poniżej temperatury przemiany
 - Geometrii
 - Punkty podatne na pęknięcia: ostre naroża, krawędzie
 - Typ / przebieg obciążenia
 - Rozciągające / uderzeniowe obciążenia są niebezpieczne

5. Pełzanie

- *Wolne plastyczne odkształcenie materiału spowodowane długotrwałe działającym polem naprężeń, którego wielkość jest poniżej granicy plastyczności.*
- **Przykład: struny fortepianowe**
- **Pełzanie nie ma większego znaczenia w konstrukcjach okrętowych.**

Dziękuję za uwagę!

