

# Konstrukcje metalowe II

## Wykład II

### Konstrukcje powłokowe - zbiorniki

## Spis treści

Elementy prętowe i powłokowe → #t / 3

Przykłady → #t / 9

Niezawodność konstrukcji → #t / 17

Zbiorniki: wstępne wymiarowanie → #t / 39

Stany graniczne → #t / 58

Wymagania techniczne → #t / 90

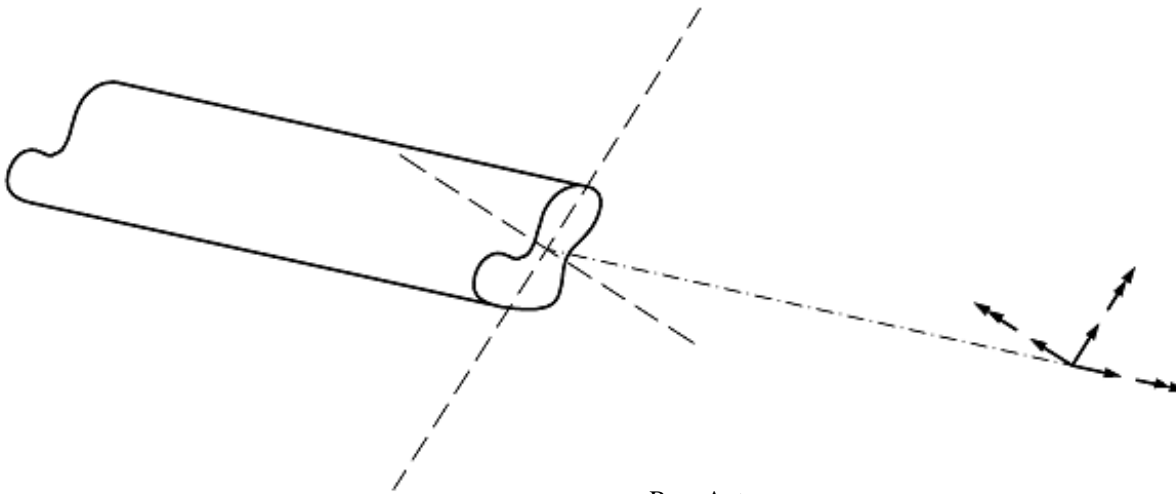
Dodatkowe zjawiska → #t / 94

Zagadnienia egzaminacyjne → #t / 97

# Elementy prętowe i powłokowe

Pręt:

$10 \cdot \max \text{ wymiar przekroju} \leq \text{długość elementu}$



Rys: Autor

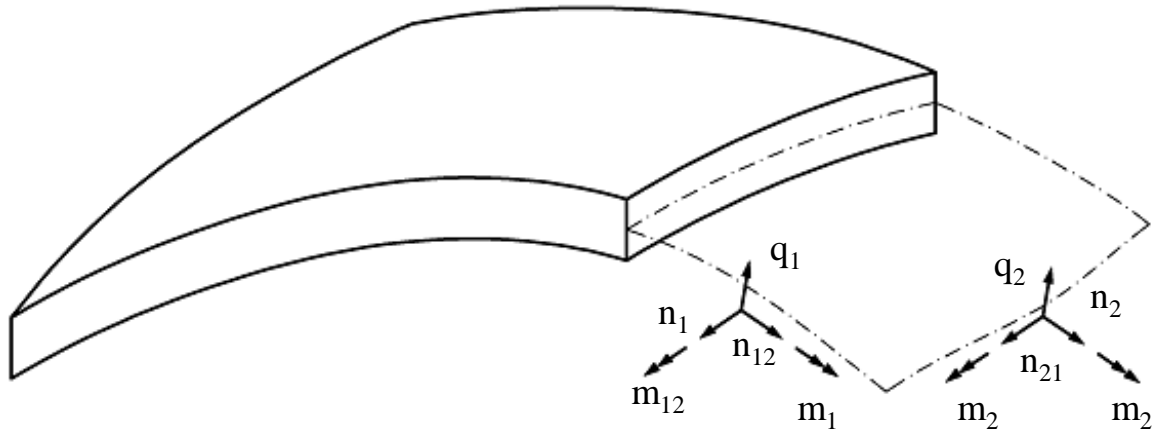
$$T_{\sigma} = \begin{matrix} \sigma_{11} & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{21} & \sigma_{22} & \tau_{23} \\ \tau_{31} & \tau_{32} & \sigma_{33} \end{matrix}$$

Geometria przekroju ( $A, A_v, J_y \dots$ )

$$\begin{matrix} N & V_1 & V_2 & M_1 & M_2 & M_T \\ & [kN] & & [kNm] & & \end{matrix}$$

# Powłoka

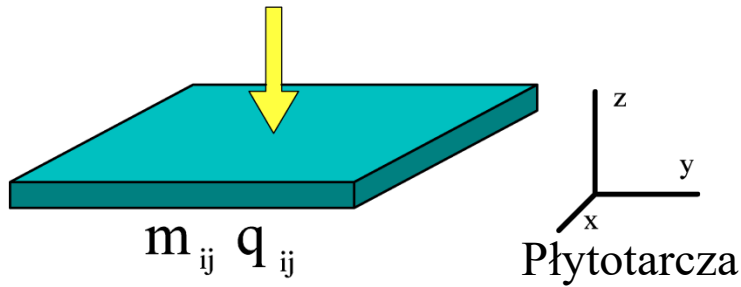
$10 \cdot \text{grubość} \leq \text{min długość w płaszczyźnie}$



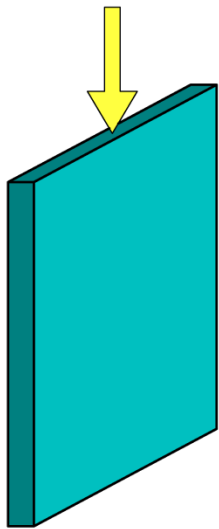
Rys: Autor

$$T_{\sigma} = \begin{matrix} \sigma_{11} & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{21} & \sigma_{22} & \tau_{23} \\ \tau_{31} & \tau_{32} & \sigma_{33} \end{matrix} \quad \begin{matrix} \text{Grubość powłoki} \\ n_1 & n_{12} & q_1 & n_2 & n_{21} & q_2 & m_1 & m_{12} & m_2 & m_{21} \\ \text{[kN / m]} & & & & & & \text{[kNm / m]} & & & \end{matrix}$$

Płyta

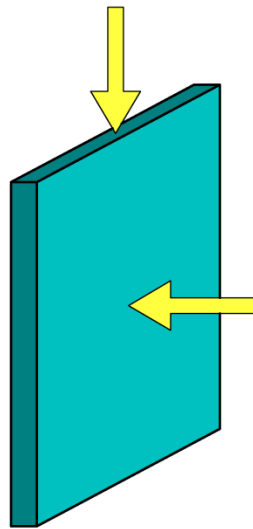


Płytotarcza



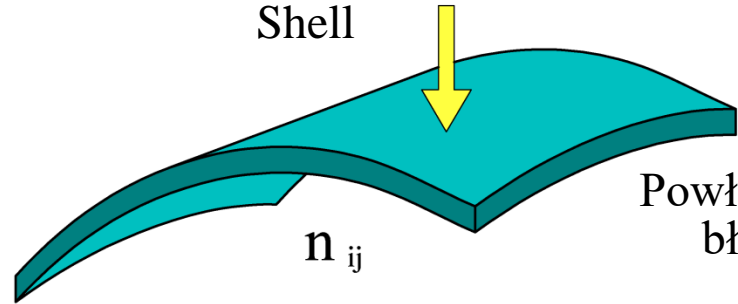
$n_{ij}$

Tarcza

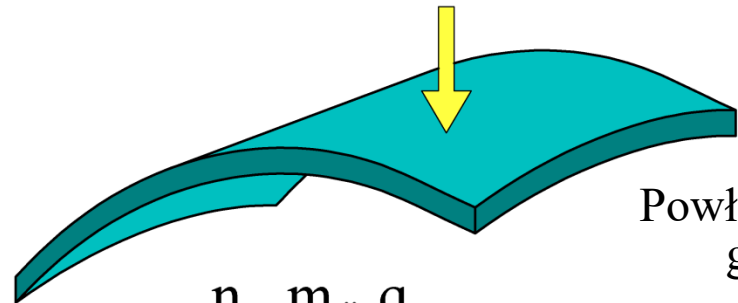


$n_{ij} m_{ij} q_{ij}$

Shell

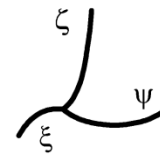


Powłoka – stan błonowy

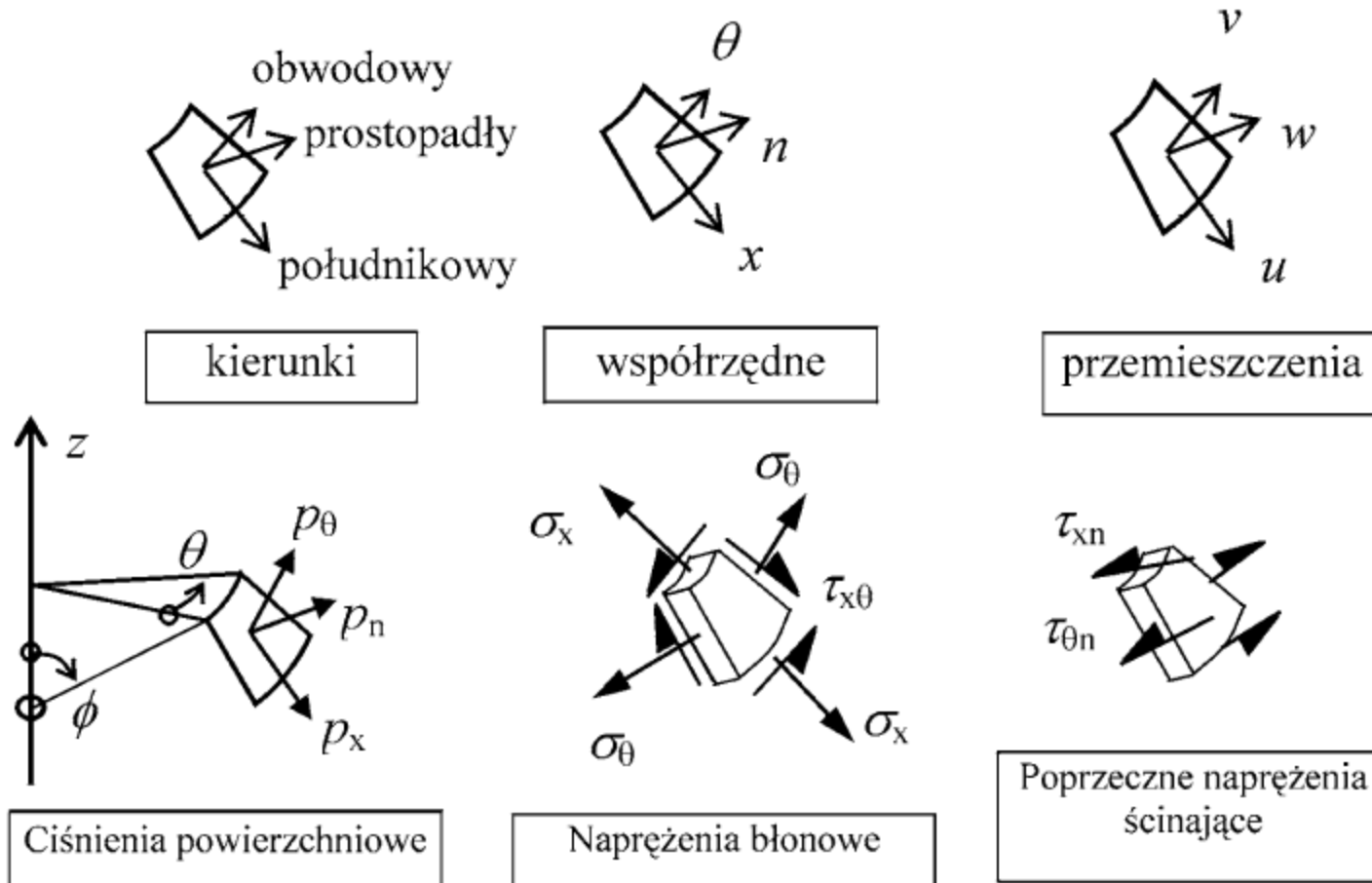


Powłoka – stan giętny

$n_{ij} m_{ij} q_{ij}$



Rys: Autor



EN 1993-1-6 (6.3), (6.4)

$$\sigma_{x, Ed} = (n_{x, Ed} / t) \pm [m_{x, Ed} / (t^2 / 4)] \quad ; \quad \sigma_{\theta, Ed} = (n_{\theta, Ed} / t) \pm [m_{\theta, Ed} / (t^2 / 4)]$$

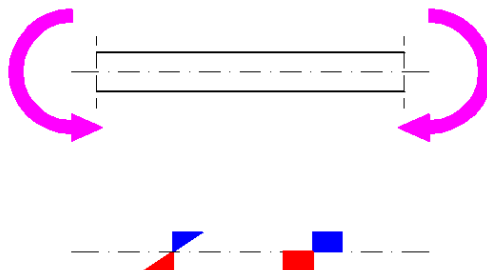
$$\tau_{x\theta, Ed} = (n_{x\theta, Ed} / t) \pm [m_{xq, Ed} / (t^2 / 4)] \quad ; \quad \tau_{xn, Ed} = (q_{xn, Ed} / t) \quad ; \quad \tau_{\theta n, Ed} = (q_{\theta n, Ed} / t)$$

Zależności między uogólnionymi siłami przekrojowymi a naprężeniami

Najprawdopodobniej na wykładach z Teorii płyt i powłok wzory te przedstawione były w odmiennej formie:

$$\sigma_{x, Ed} = (n_{x, Ed} / t) \pm [m_{x, Ed} / (t^2 / 6)] \quad \text{zamiast} \quad \sigma_{x, Ed} = (n_{x, Ed} / t) \pm [m_{x, Ed} / (t^2 / 4)];$$
$$\sigma_{\theta, Ed} = (n_{\theta, Ed} / t) \pm [m_{\theta, Ed} / (t^2 / 6)] \quad \text{zamiast} \quad \sigma_{\theta, Ed} = (n_{\theta, Ed} / t) \pm [m_{\theta, Ed} / (t^2 / 4)];$$
$$\tau_{x\theta, Ed} = (n_{x\theta, Ed} / t) \pm [m_{x\theta, Ed} / (t^2 / 6)] \quad \text{zamiast} \quad \tau_{x\theta, Ed} = (n_{x\theta, Ed} / t) \pm [m_{x\theta, Ed} / (t^2 / 4)]$$

Wynika to z różnicy w założeniach: współczynnik 1/6 przyjęty jest dla zakresu sprężystego; dla zakresu plastycznego jest to 1/4.



Rys: Autor

# Przykłady

## Silosy EN 1993-4-1

Rys: wakro.com.pl



Rys: gpd24.pl



Rys: altimex.pl

# Rurociągi EN 1993-4-3

Rys: wikipedia



Rys: iniekt-system.pl

# Kominy EN 1993-3-2



Rys: dept-wp.nmsu.edu



Rys: carrasquilloassociates.com



Rys: vertical.sk

Słupy energetyczne  
EN 50341-1  
EN 1993-3-1



Rys: inzynieria.com

Turbiny wiatrowe  
IEC 61 400  
EN 1993-3-1



Rys: wikipedia

Wieże oświetleniowe  
EN 1993-3-1



Rys: ls-group.prom.ua

Wieże telekomunikacyjne  
EN 1993-3-1



Rys: towerproduct.com

# Zbiorniki EN 1993-4-2 EN 14 015



Rys: kbpomorze.pl



Rys: sinkos.pl



Rys: ko.pwr.wroc.pl

## Zbiorniki EN 12 285

## Zbiorniki PN B 03211



Rys: tanksandvessels.com



Rys: petroconsulting.pl



Rys: jaso.com.pl

## Zbiorniki EN 12 285

# Zbiorniki PN B 03211

Rys: wikipedia



# Wieże ciśnień PN B 03211 EN 1993-3-1

Rys: wikipedia

# Galerie powłokowe

EN 1993-1-1

EN 1993-1-5

EN 1993-1-6



Rys: tsman.com



Rys: mwconveyor.com

# Niezawodność konstrukcji

EN 1990 podaje podział konstrukcji na klasy konsekwencji (omawiany na I stopniu studiów)

Dla sześciu rodzajów konstrukcji wyróżniono odrębne definicje.



Rys: wikipedia

Konstrukcje powłokowe

Konstrukcje powłokowe lub prętowe

Odrębne zasady (inne niż w EN 1990)

Odrębne zasady nie mające zastosowania w Polsce

1993-3 Wieże, maszty, kominy:

1993-3-1 Wieże i maszty

1993-3-2 Kominy

1993-4 Silosy, zbiorniki, rurociągi:

1993-4-1 Silosy

1993-4-2 Zbiorniki

1993-4-3 Rurociągi

## Zasady ogólne

Klasa	Opis	Przykład
CC3	<b>Wysokie</b> zagrożenie ludzkiego życia lub <b>bardzo duże</b> konsekwencje społeczne, ekonomiczne i środowiskowe	Widownie, budynki użyteczności publicznej, których konsekwencje zniszczenia są wysokie
CC2	<b>Przeciętne</b> zagrożenie ludzkiego życia lub <b>znaczne</b> konsekwencje społeczne, ekonomiczne i środowiskowe	Budynki mieszkalne i biurowe oraz budynki użyteczności publicznej, których konsekwencje zniszczenia są przeciętne
CC1	<b>Niskie</b> zagrożenie ludzkiego życia lub <b>małe lub nieznaczne</b> konsekwencje społeczne, ekonomiczne i środowiskowe	Budynki rolnicze w których ludzie zazwyczaj nie przebywają oraz szklarnie

EN 1990 tab B1

## Nadzór w trakcie projektowania i wykonania; EN 1990, tab. B1 + B4 + B5

Klasa konsekwencji	Poziom nadzoru przy projektowaniu	Charakterystyka	Minimalne zalecenia	Poziom inspekcji (przy wykonaniu)	Charakterystyka	Wymagania
CC3	DSL3	Nadzór zaostrożony	Sprawdzenie przez stronę trzecią (inną jednostkę projektową)	IL3	Inspekcja zaostrożona	Inspekcja przez stronę trzecią
CC2	DSL2	Nadzór normalny	Sprawdzenie wg procedur jednostki projektowej	IL2	Inspekcja normalna	Inspekcja wg procedur jednostki wykonawczej
CC1	DSL1	Nadzór normalny	Autokontrola (przez autora projektu)	IL1	Inspekcja normalna	Autoinspekcja

## Maszy i wieże – klasy niezawodności (RC) (ten sam numer co CC)

Klasa niezawodności	Opis
RC3	Maszy i wieże na terenach miejskich, lub w innych miejscach, gdy straty w ludziach wskutek ewentualnego zniszczenia są bardzo prawdopodobne; znaczące wieże i maszty telekomunikacyjne, których konsekwencje zniszczenia mogą być bardzo poważne.
RC2	Wszystkie maszty i wieże nie zaliczone do RC1 i RC3
RC1	Maszy i wieże na mało zaludnionych otwartych terenach wiejskich, wieże i maszty w sytuacji gdy straty w ludziach wskutek ewentualnego zniszczenia są mało prawdopodobne.

EN 1993-3-1 tab. A.1

Częściowe współczynniki bezpieczeństwa dla obciążeń stałych i zmiennych			
Efekt oddziaływań	Klasa niezawodności	Oddziaływania stałe	Oddziaływania zmienne
niekorzystny	RC3	1,2	1,6
	RC2	1,1	1,4
	RC1	1,0	1,2
korzystny	RC1, RC2, RC3	1,0	0,0
Sytuacje wyjątkowe		1,0	1,0

EN 1993-3-1 tab. A.2

## Kominy – klasa niezawodności (RC) (ten sam numer co CC)

Klasa niezawodności	Opis
RC3	Kominy w miejscach strategicznych, takich jak siłownie nuklearne lub gęsto zaludnione tereny miejskie; wysokie kominy na terenach tradycyjnie przemysłowych o bardzo dużych społecznych i ekonomicznych konsekwencjach zniszczenia.
RC2	Wszystkie kominy nie zaliczone do RC1 i RC3
RC1	Kominy na otwartych terenach wiejskich, których zniszczenie nie powoduje szkód; kominy niższe niż 16 m na terenach mało zaludnionych.

EN 1993-3-2 tab. A.1

Klasa niezawodności	Amplituda drgań poprzecznych
RC3	0,05 D
RC2	0,10 D
RC1	0,15 D

EN 1993-3-2 tab. 7.1

(D – średnica komina)

Częściowe współczynniki bezpieczeństwa dla obciążeń stałych i zmiennych			
Efekt oddziaływań	Klasa niezawodności	Oddziaływania stałe	Oddziaływania zmienne
niekorzystny	RC3	1,2	1,6
	RC2	1,1	1,4
	RC1	1,0	1,2
korzystny	RC1, RC2, RC3	1,0	0,0
Sytuacje wyjątkowe		1,0	1,0

EN 1993-3-2 tab. A.2

## Zbiorniki – klasy konsekwencji (CC)

Klasa konsekwencji	Opis
CC3	Zbiorniki na ciecze i gazy płynne toksyczne lub wybuchowe; zbiorniki o dużej pojemności na ciecze palne lub szkodliwe dla środowiska wodnego w terenie zabudowanym
CC2	Zbiorniki o średniej pojemności na ciecze palne lub szkodliwe dla środowiska wodnego w terenie zabudowanym
CC1	Zbiorniki dla rolnictwa i zbiorniki na wodę

„Średnia pojemność” = zgodnie z nieoficjalną definicją  $\leq 10.000 \text{ m}^3$

EN 1993-4-2 2.2

Klasa konsekwencji	Powłoka cylindryczna	Powłoka prostopadłościenna
CC3	+ analiza numeryczna (MES)	Nieliniowa analiza płyt zginanych i błonowa teoria rozciągania
CC2	+ teoria membranowa z teorią zgięciową lub + analiza numeryczna (MES)	Liniowa analiza płyt zginanych i błonowa teoria rozciągania lub Nieliniowa analiza płyt zginanych i błonowa teoria rozciągania
CC1	+ teoria membranowa oraz + uproszczone formuły dla wyznaczenia lokalnego zginania	Równowaga statyczna sił błonowych i belkowa teoria zginania

EN 1993-4-2 4.2.2 4.3.3

Częściowe współczynniki bezpieczeństwa dla obciążeń stałych i zmiennych			
Efekt oddziaływań	Klasa konsekwencji	Oddziaływania stałe	Oddziaływania zmienne
niekorzystny	CC3	1,50 (1,35)	1,65
	CC2	1,35	1,50
	CC1	1,20 (1,35)	1,35
korzystny	CC1, CC2, CC3	1,0	0,0
Sytuacje wyjątkowe		1,0	1,0

T. Michałowski, M. Piekarczyk, Selected Issues of Special Steel Structures, Cracow University of Technology 2019

## Silosy – klasy konsekwencji (CC)

Klasa konsekwencji	Opis
CC3	<p>Silosy o pojemności 5 000 ton, posadowione bezpośrednio na gruncie lub silosy z fartuchem sięgającym poziomu gruntu</p> <p>lub</p> <p>Silosy podparte punktowo o pojemności przekraczającej 1 000 ton</p> <p>lub</p> <p>Silosy o pojemności przekraczającej 200 ton w sytuacjach jak poniżej:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>a) opróżnianie niecentryczne</li><li>b) lokalne obciążenie odcinkowe</li><li>b) napełnianie niecentryczne</li></ul>
CC2	Wszystkie silosy objęte EN 1993-4-1 nie należące do CC1 lub CC3
CC1	Silosy o pojemności między 10 a 100 ton

EN 1993-4-1 tab 2.1

## Silosy – klasy oceny oddziaływań (AAC)

Klasa oceny oddziaływań	Opis
AAC3	Silosy o pojemności powyżej 10 000 ton lub Silosy o pojemności powyżej 1 000 ton w sytuacjach jak poniżej: a) niecentryczne opróżnianie $e_0 / d_c > 0,25$ b) silosy niskie o mimośrodku górnego stożka nasypu $e_t / d_c > 0,25$
AAC2	Wszystkie silosy objęte EN 1993-4-1 nie należące do AAC1 lub AAC3
AAC1	Silosy o pojemności poniżej 100 ton

EN 1991-4 tab 2.1

Klasa konsekwencji	Powłoka cylindryczna	Powłoka prostopadłościenna
CC3	+ analiza numeryczna (MES)	Nieliniowa analiza płyt zginanych i błonowa teoria rozciągania
CC2	+ teoria membranowa z teorią zgięciową lub + analiza numeryczna (MES)	Liniowa analiza płyt zginanych i błonowa teoria rozciągania lub Nieliniowa analiza płyt zginanych i błonowa teoria rozciągania
CC1	+ teoria membranowa oraz + uproszczone formuły dla wyznaczenia lokalnego zginania	Równowaga statyczna sił błonowych i belkowa teoria zginania

EN 1993-4-2 4.2.2 4.3.3

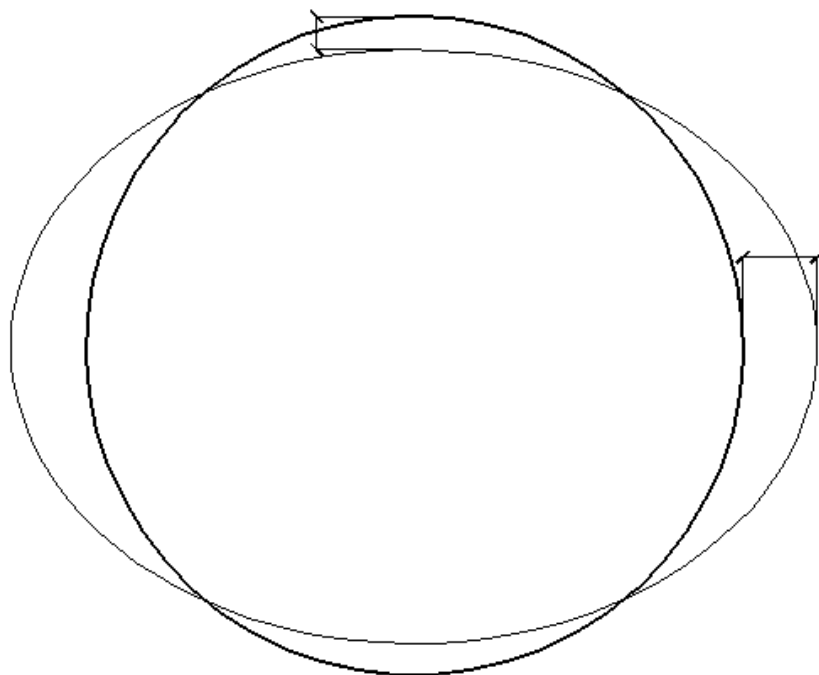
Częściowe współczynniki bezpieczeństwa dla obciążeń stałych i zmiennych			
Efekt oddziaływań	Klasa konsekwencji	Oddziaływania stałe	Oddziaływania zmienne
niekorzystny	CC3	1,50 (1,35)	1,65
	CC2	1,35	1,50
	CC1	1,20 (1,35)	1,35
korzystny	CC1, CC2, CC3	1,0	0,0
Sytuacje wyjątkowe		1,0	1,0

T. Michałowski, M. Piekarczyk, Selected Issues of Special Steel Structures, Cracow University of Technology 2019

Dodatkowo z CC związane są klasy jakości wykonania (EN 1993-4-1 tab. 5.1)

Klasa jakości	Parametr jakości	Uwagi
Normalna (C)	$\sqrt{rt} / 16$	Dla silosów CC1
Wysoka (B)	$\sqrt{rt} / 25$	
Najwyższa (A)	$\sqrt{rt} / 40$	Wyłącznie dla silosów CC3

## EN 1993-1-6 8.7.2



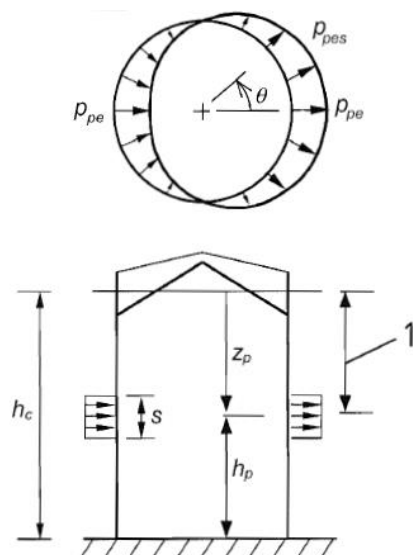
Rys: Autor

Imperfekcje przyjmuje w postaci zastępczych odkształceń powłoki. Kształt przyjmuje się w nawiązaniu do postaci wyboczenia owalizującego. Nie jest jasno sprecyzowane, jakie są wartości imperfekcji. Podczas analizy można oprzeć się na EN 14015 rozdział 16 (dopuszczalne wartości imperfekcji podczas budowy zbiorników).

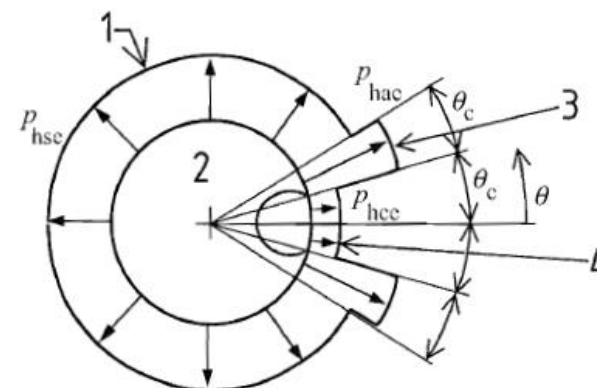
## Klasy oceny oddziaływań AAC

Im wyższy numer klasy, tym bardziej skomplikowanie (bliższe rzeczywistym) schematy obciążeń silosów są brane pod uwagę.

Przykład obciążeń dla AAC3:



Rys: EN 1991-4 fig. 5.4



Rys: EN 1991-4 fig. 5.5

## Rurociągi – klasy ważności (IC)

Klasa ważności	Opis
IC4	Wyjątkowe zagrożenie ludzkiego życia lub wyjątkowe konsekwencje społeczne, ekonomiczne i środowiskowe (~ CC3 według EN 1990)
IC3	Wysokie zagrożenie ludzkiego życia lub wysokie konsekwencje społeczne, ekonomiczne i środowiskowe (~ CC3 według EN 1990)
IC2	Przeciętne zagrożenie ludzkiego życia lub przeciętne konsekwencje społeczne, ekonomiczne i środowiskowe (~ CC2 według EN 1990)
IC1	Niskie zagrożenie ludzkiego życia lub małe lub nieznaczne konsekwencje społeczne, ekonomiczne i środowiskowe (~ CC1 według EN 1990)

EN 1998-4 2.1.4

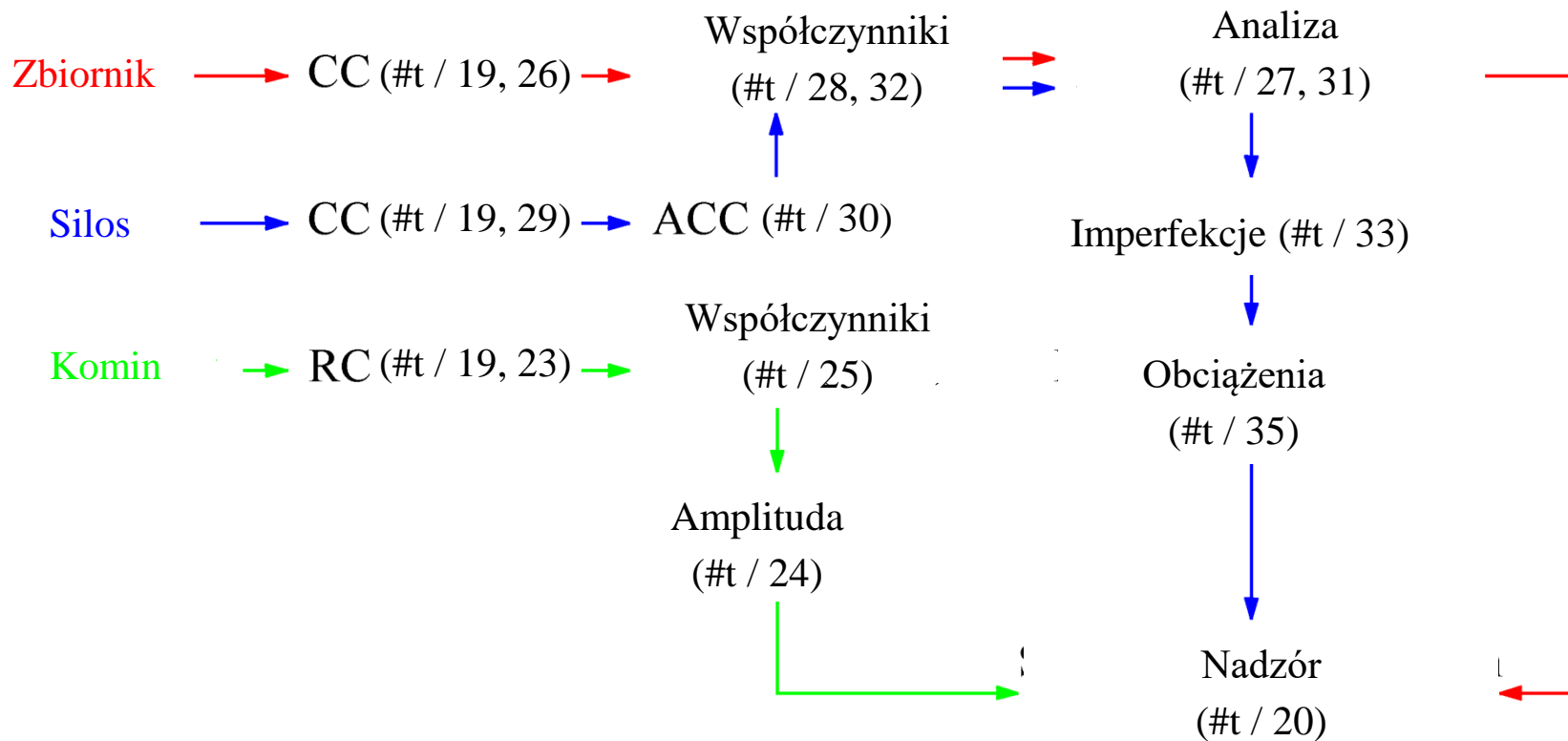
Reguły ważne dla trzęsień ziemi (poza Polską)

Klasa ważności	Współczynniki bezpieczeństwa przy oddziaływaniach sejsmicznych
IC4	$\gamma_I = 1,6$
IC3	$\gamma_I = 1,2$
IC2	$\gamma_I = 1,0$
IC1	$\gamma_I = 0,8$

EN 1998-4 2.1.4

Te same zasady dotyczą zbiorników i silosów przy obciążeniach sejsmicznych;

# Zbiornik, silos, komin – najczęściej wznoszone konstrukcje powłokowe



Rys: Autor

# Zbiorniki: wstępne wymiarowanie



Rys: sinkos.pl

EN 1993-4-2

EN 14 015

PN B 03211



Rys: kbpomorze.pl



Rys: ko.pwr.wroc.pl

Podstawową normą dla zbiorników jest EN 1993-4-2. Norma EN 14 015 jest przywoływana w EN 1993-4-2 jako norma uzupełniająca. Stara Polska Norma PN B 03211 może być traktowana jako pomoc przy wstępnym przyjmowaniu geometrii. Wszystkie te trzy normy oparte są na odmiennych założeniach.

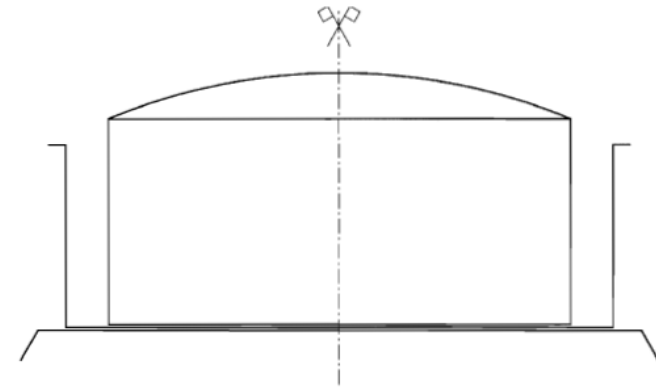
Norma	Metoda	$f_k$	Współczynniki bezpieczeństwa
EN 1993-4-2	Metoda stanów granicznych	5%	Dwa odrębne: dla obciążeń i dla materiału, liczony w odniesieniu do kwantyli
EN 14 015	Metoda naprężeń dopuszczalnych	5%	Tylko jeden, dla proporcji między efektem obciążeń i nośnością
PN B 03211	Metoda stanów granicznych	2%	Dwa odrębne: dla obciążeń i dla materiału, liczony w odniesieniu do kwantyli

Z każdą metodą obliczeń związane są inne normy obciążeń. Obliczenia prowadzone według EN 14 015, prowadzone przy użyciu obciążeń i współczynników podawanych w Eurokodach, dadzą zawyżone grubości powłoki zbiornika. Przywołanie normy EN 14 015 w Eurokodach jest niekonsekwencją.

Klasa Konsekwencji	Sposób analizy			
	Przybliżona		Dokładna	
	EN 1993-1-6 app A, B, C	EN 1993-4-2, EN 14 015	MES i EN 1993-1-6	Metody przybliżone jako wstępne dane dla MES
CC1	+	+	(+)	(+)
CC2	+	+	+	+
CC3			+	+

Wzory uproszczone można stosować, gdy (EN 1993-4-2 11):

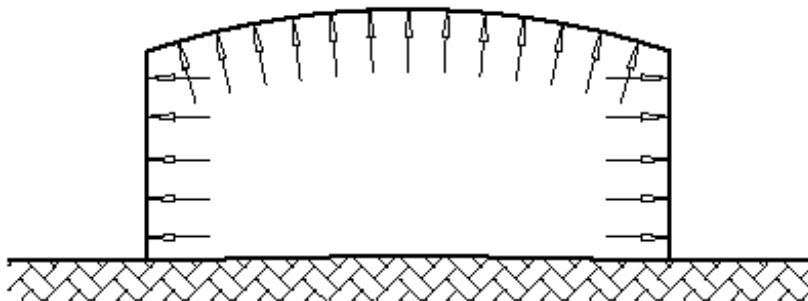
- konstrukcja zbiornika ma formę przedstawioną na rysunku poniżej;
- jedynymi oddziaływaniami wewnątrz zbiornika są ciśnienie cieczy oraz ciśnienie gazu nad lustrem cieczy;
- maksymalny obliczeniowy poziom cieczy nie przewyższa górnego brzegu walcowego płaszcza;
- nie jest wymagane uwzględnianie następujących oddziaływań: termicznych, sejsmicznych i wyjątkowych ani oddziaływań spowodowanych nierównomiernym osiadaniem fundamentów i podatnością połączeń;
- z wyjątkiem pasa przy pierścieniu okapowym grubość każdego pasa nie jest mniejsza niż grubość pasa nadbudowanego;
- wartość obliczeniowa naprężeń obwodowych w płaszczu zbiornika nie przekracza  $435 \text{ N/mm}^2$ ;
- w przypadku dachu sferycznego jego promień krzywizny wynosi od 0,8 do 1,5-krotnej średnicy zbiornika;
- w przypadku dachu stożkowego jego spadek wynosi od 1:5 przy podparciu obwodowym do 1:3 przy braku podpór wewnętrznych;
- nominalne nachylenie dna zbiornika nie przekracza 1:100;
- dno jest podparte na całej powierzchni lub na gęsto rozmieszczonych równoległych dźwigarach;
- charakterystyczne ciśnienie wewnętrzne jest nie mniejsze niż  $-8,5 \text{ mbar}$  i nie przekracza  $60 \text{ mbar}$ ;
- przewidywana liczba cykli obciążeń jest wystarczająco mała, aby nie zachodziło ryzyko zniszczenia zmęczeniowego.



Rys: Autor

# Obciążenia istotne dla nośności zbiornika

Rys: przelom.pl



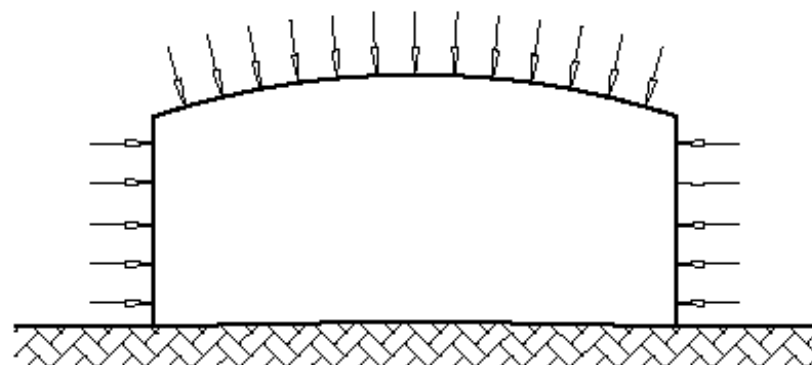
Rys: Autor



# Obciążenia istotne dla stateczności zbiornika

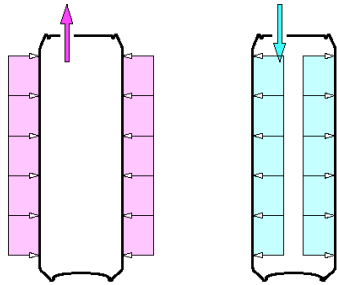


Rys: journalism.columbia.edu



Rys: Autor

## Dwa przypadki: ssanie i wdmuchiwanie powietrza do puszki



Rys: T. Michałowski, M. Piekarczyk, Selected Issues of Special Steel Structures, Cracow University of Technology 2019

Obliczenia uproszczone:

Dach

Pierścień brzegowy

Powłoka cylindryczna

Włazy, króćce

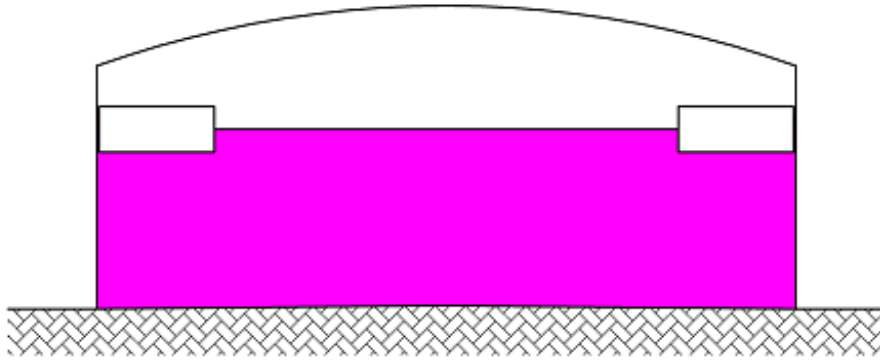
Dno

Stateczność globalna

Fundamenty

Dach stały i pływający EN 14 015 załącznik C

Tylko dach pływający EN 14 015 załącznik D



Rys: Autor



Rys: Autor

## Powłoka samonośna



Rys: cstindustries.com

### Powłoka szkieletowa

EN 1993-4-2 11.2.2, 11.2.3, 11.2.4

- ◆ Pokrycie dachu
- ◆ Krokwie
- ◆ Pierścień zwornikowy
- ◆ Stężenia
- ◆ Słupy podpierające



Rys: artson.net

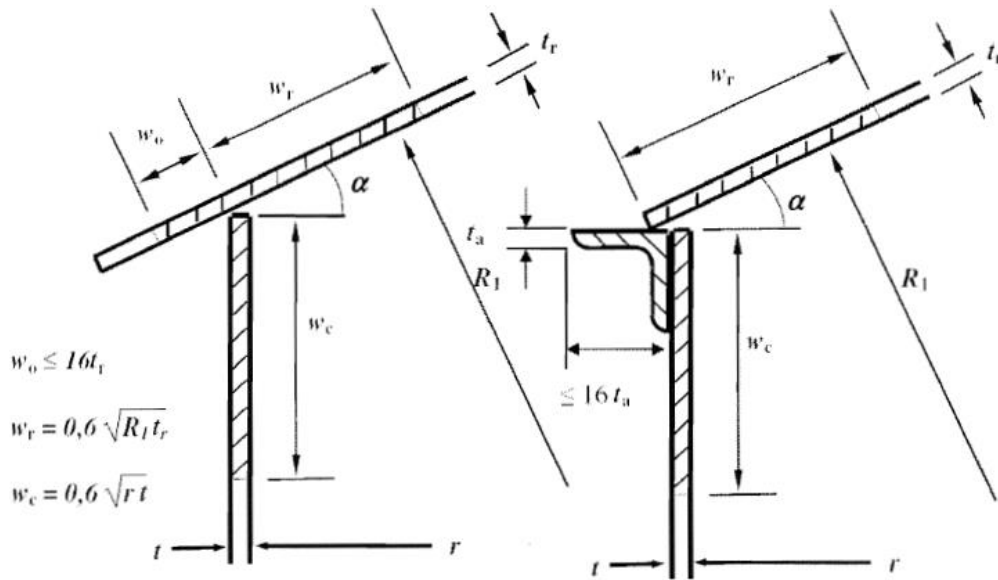
## Pierścień brzegowy

Nośność

Stateczność

Interakcja z krokwiemi

Zbiornik z dachem pływającym

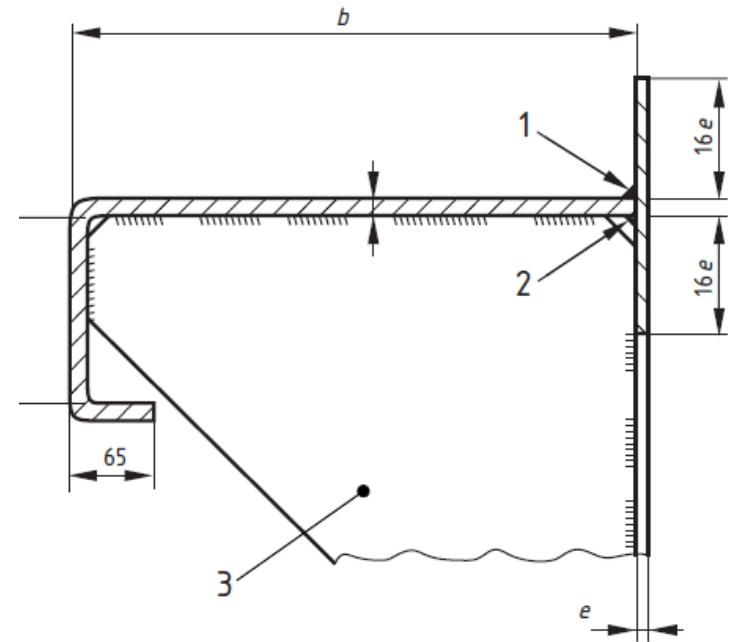


Rys: EN 1993-4-2 fig. 11.4, EN 14 015 fig. 8

Dla dachu stałego

Dla dachu pływającego:

EN 14015 (7)



e) Formed plate

Key

1 Continuous fillet weld

2 Intermittent weld

3 Bracket

Rys: EN 14015 fig J1

EN 1993-4-2 [A]

EN 14 015 [B]

PN B 03210 [C]

Rodzaj dachu	Nośność powłoki	Stateczność powłoki	Pierścień zwornikowy	Pierścień brzegowy
Stożkowy samonośny	[A] – tak [B] – tak [C] – nie	[A] – nie [B] – tak [C] – nie	[A] – tak [B] – nie [C] – nie	[A] – tak [B] – tak [C] – tak
Stożek podparty	[A] – nie [B] – nie [C] – nie	[A] – nie [B] – nie [C] – nie	[A] – tak [B] – nie [C] – nie	[A] – tak [B] – nie [C] – nie
Kopuła samonośna	[A] – tak [B] – tak [C] – nie	[A] – tak [B] – tak [C] – nie	[A] – tak [B] – nie [C] – nie	[A] – tak [B] – tak [C] – nie
Kopuła podparta	[A] – tak [B] – nie [C] – nie	[A] – nie [B] – nie [C] – nie	[A] – tak [B] – nie [C] – nie	[A] – tak [B] – nie [C] – nie

## Powłoka cylindryczna

Nośność

Stateczność

Pierścienie pośrednie

Faza I: próba wodna (test szczelności; czasami trzeba doszczelnić zbiornik)

Obciążenie: parcie wody

Czas trwania: 1 tydzień – 1 miesiąc

Faza II: eksploatacja

Obciążenie: parcie paliwa, nadciśnienie, korozja

Czas trwania: wiele lat (zazwyczaj przyjmuje się 50)

Jest możliwe, że po wzniesieniu zbiornik nie jest całkiem szczelny. Hermetyczność musi być sprawdzona przed rozpoczęciem eksploatacji. Robi się to próbą wodną; straty związane z ewentualnym wyciekami wody są nieporównywalnie mniejsze niż w przypadku wycieku paliwa.



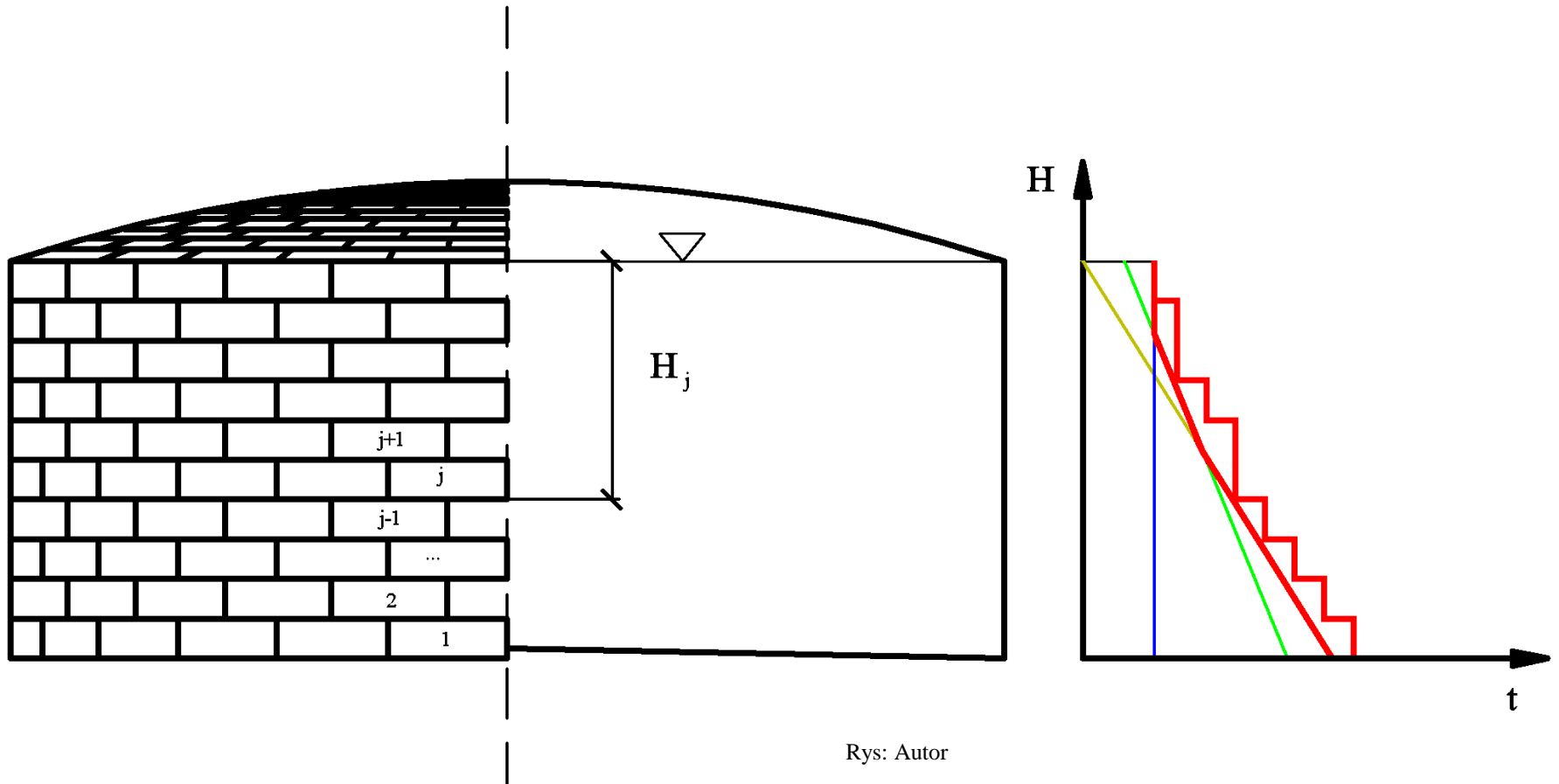
Rys: Rys.tepco.co.jp



Rys: Rys.tepco.co.jp

Gęstość wody (zatem i wartość ciśnienia hydrostatycznego) jest inna niż paliwa (zazwyczaj mniejsza). Próba wodna trwa zbyt krótko, by pojawiły się ubytki korozyjne. W próbie wodnej nie ma potrzeby analizować nadcisnienia.

$$t = \max (t_{\min} ; t_I ; t_{II})$$



Rys: Autor

Włazy

Króćce

Dno

Stateczność globalna

Fundamenty

Rys: dystrybutory-paliw.pl

## Włazy króćce



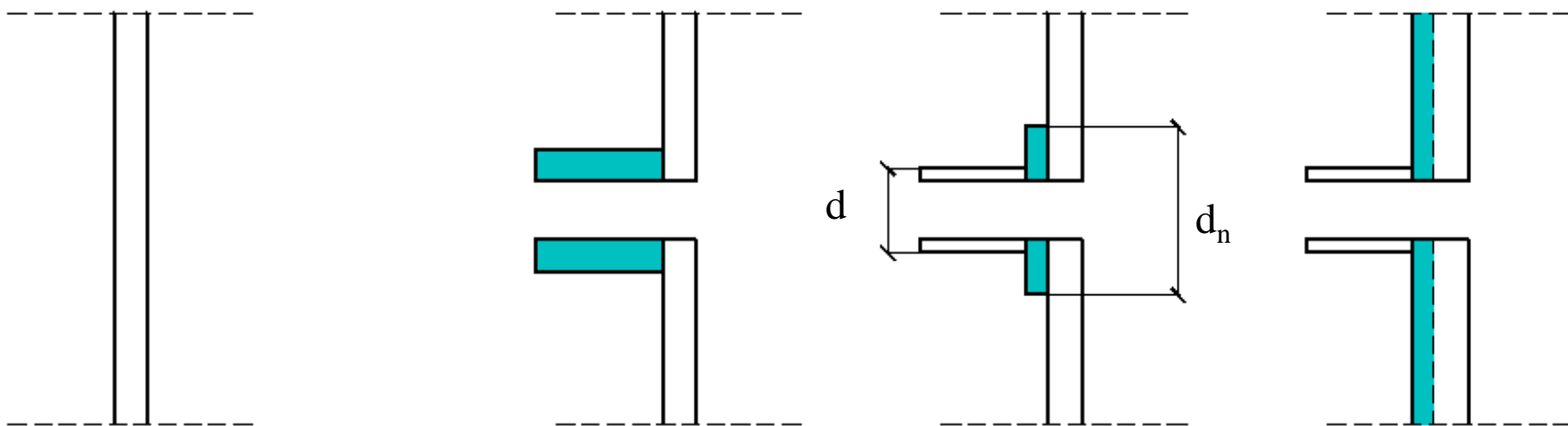
EN 1993-4-2 5.4.6  
EN 14015 13.1 – 13.9

Rys: formoplast.com

Powłoka musi być lokalnie grubsza

## Trzy metody wzmocnienia płaszczka:

- Przewymiarowany przekrój króćca / pierścienia wjazdu;
- Wzmocnienie lokalne ( $1,5 d \leq d_n \leq 2,0 d$ );
- Grubszy panel płaszczka;



Rys: Autor

## Stany graniczne

Analiza wyników MES:

EN 1993-1-6

EN 1993-1-7

Zniszczenie plastyczne (LS1)

Nieprzystosowanie plastyczne (zmęczenie niskocyklowe) (LS2)

Niestateczność (LS3)

Zmęczenie (wysokocyklowe) (LS4)

Stan graniczny użytkowania

<b>EN 1990</b>	<b>EN 1993-1-6, EN 1993-1-7</b>
EQU LS	Stateczność globalna (#t / 82)
STR LS	LS1 (#t / 60-61, 81) LS3 (#t / 67-73, 81)
FAT LS	LS2 (#t / 62-66, 81) LS4 (#t / 74-81)
GEO LS	Fundamenty (#t / 83-84)
SLS	SLS (#t / 85)

## Zniszczenie plastyczne (EN 1993-1-6 6)

$$\sigma_{x, Ed} = (n_{x, Ed} / t) \pm [m_{x, Ed} / (t^2 / 4)] \quad ; \quad \sigma_{\theta, Ed} = (n_{\theta, Ed} / t) \pm [m_{\theta, Ed} / (t^2 / 4)]$$

$$\tau_{x\theta, Ed} = (n_{x\theta, Ed} / t) \pm [m_{xq, Ed} / (t^2 / 4)] \quad ; \quad \tau_{xn, Ed} = (q_{xn, Ed} / t) \quad ; \quad \tau_{\theta n, Ed} = (q_{\theta n, Ed} / t)$$

$$\sigma_{eq, Ed} = \sqrt{[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2 + 3(\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2 + \tau_{23}^2)]} \leq f_{eq, Rd} = f_{yd}$$

Warunek dla powłoki:

$$\sigma_{eq,Ed} / f_{eq,Rd} \leq 1,0$$

Jest tu pełna analogia z warunkami

$$N_{Ed} / N_{Rd} \leq 1,0 \quad \text{lub} \quad M_{Ed} / M_{Rd} \leq 1,0$$

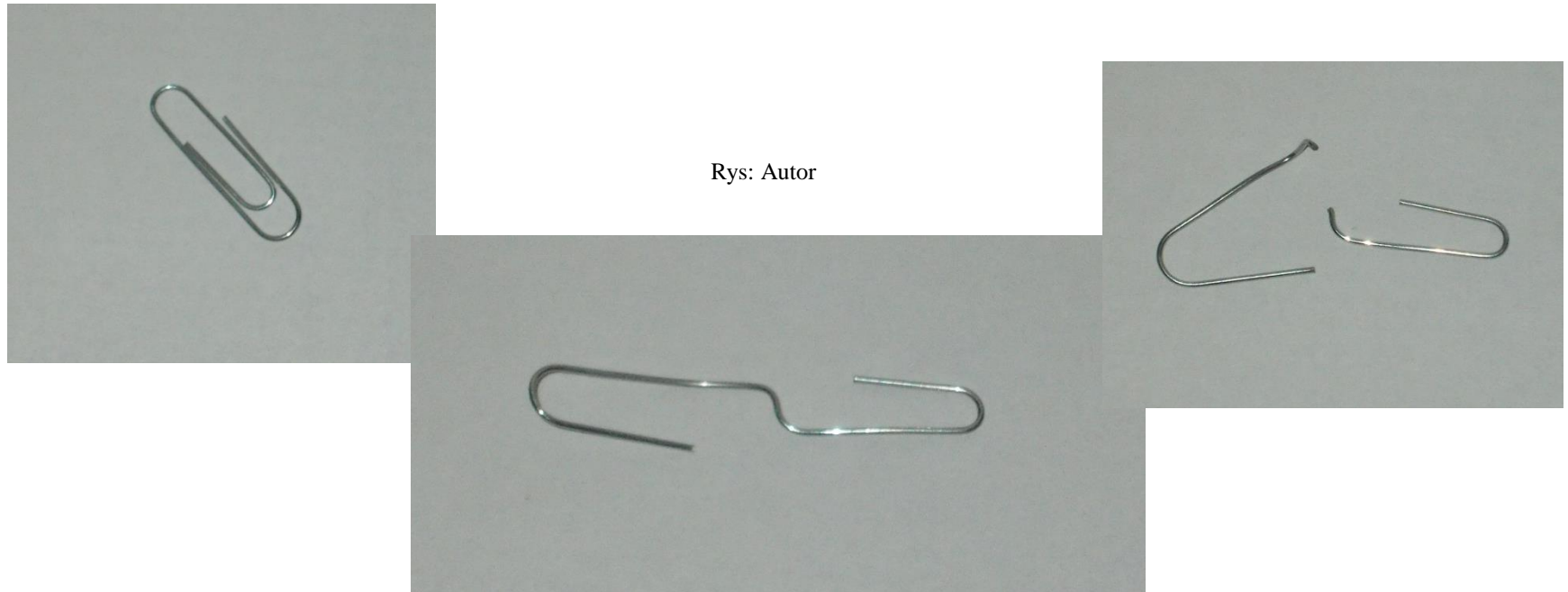
dla pręta.

## Nieprzystosowanie plastyczne (EN 1993-1-6 7)

$$\Delta\sigma_{\text{eq,Ed,i}} = \sqrt{[\Delta\sigma_{1,i}^2 + \Delta\sigma_{2,i}^2 - \Delta\sigma_{1,i} \Delta\sigma_{2,i} + 3\Delta\tau_{12,i}^2]} \leq \Delta f_{\text{eq,Rd,i}} = 2f_{\text{yd}}$$

$\Delta\sigma_{1,i}$  ,  $\Delta\tau_{1,i}$  – amplituda między dwoma przeciwnymi, najbardziej skrajnymi stanami napreżeń

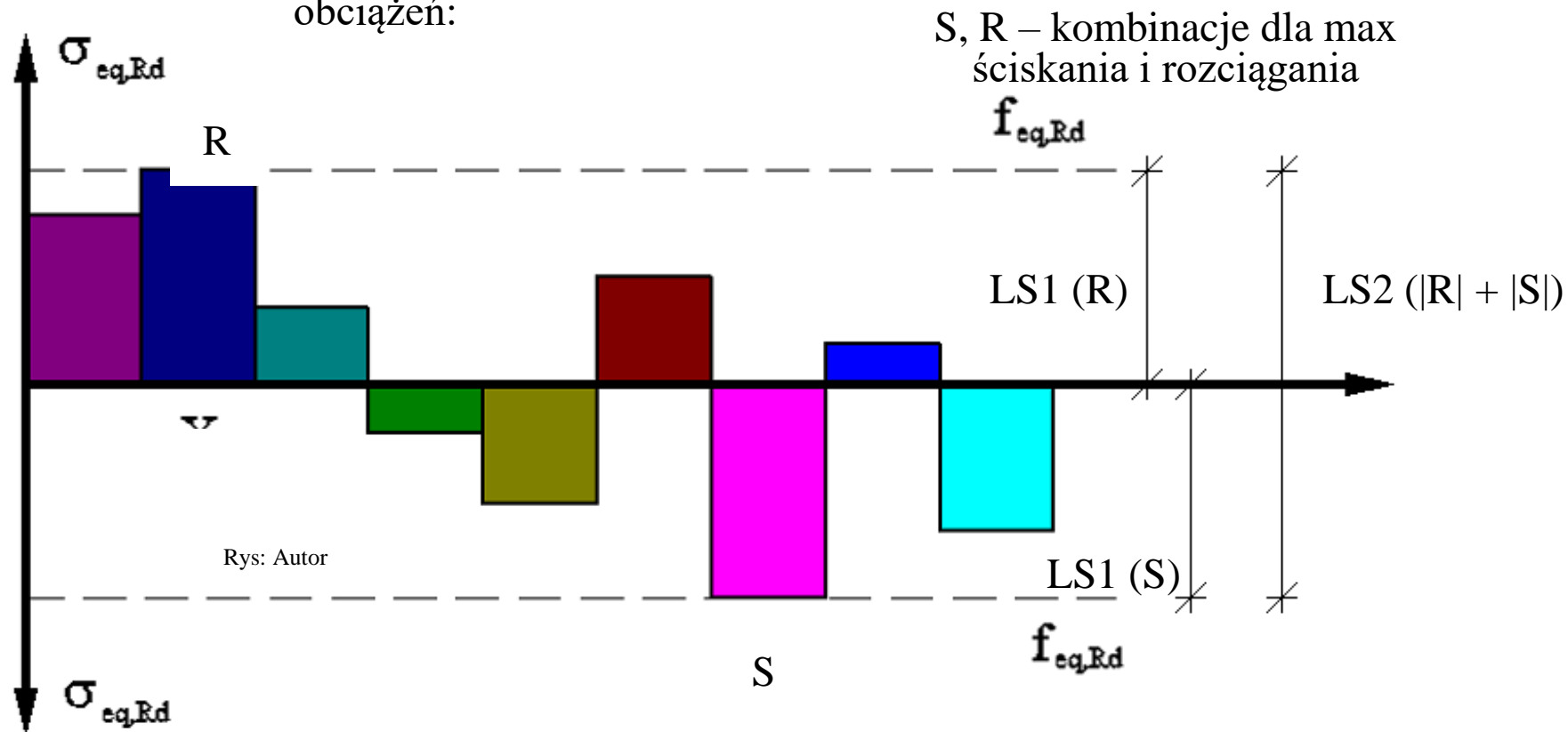
Tu brak jest analogii do obliczeń elementów prętowych



Rys: Autor

Przykładem może być zabawa w zginanie spinacza

Naprężenia pochodzą z dwu kombinacji obciążeń:



LS1 (R) - LS1 dla kombinacji R; naprężenie zastępcze nie większe niż  $f_y$

LS1 (S) - LS1 dla kombinacji S; naprężenie zastępcze nie większe niż  $f_y$

LS2 ( $|R| + |S|$ ) – LS2 dla zmiany R-S; naprężenie zastępcze nie większe niż  $2f_y$

Czy  $LS2 (R + S) = LS1 (R) + LS1 (S)$  czy też niet?

$$\text{LS1(T): } \sigma_{\text{eq,Ed,T}} = \sqrt{[\sigma_{1T}^2 + \sigma_{2T}^2 - \sigma_{1T} \sigma_{2T} + 3(\tau_{12T}^2 + \tau_{13T}^2 + \tau_{23T}^2)]} \leq f_{yd}$$

$$\text{LS1(C): } \sigma_{\text{eq,Ed,C}} = \sqrt{[\sigma_{1C}^2 + \sigma_{2C}^2 - \sigma_{1C} \sigma_{2C} + 3(\tau_{12C}^2 + \tau_{13C}^2 + \tau_{23C}^2)]} \leq f_{yd}$$

$$\text{LS2: } \Delta\sigma_{\text{eq,Ed,i}} = \sqrt{[\Delta\sigma_{1,i}^2 + \Delta\sigma_{2,i}^2 - \Delta\sigma_{1,i} \Delta\sigma_{2,i} + 3\Delta\tau_{12,i}^2]} \leq 2f_{yd}$$

$$\Delta\sigma_{a,i} = |\sigma_{ai,T}| + |\sigma_{ai,C}|$$

$$\Delta\tau_{ai} = |\tau_{ai,T}| + |\tau_{ai,C}|$$

$$[\text{LS2}(|C|+|T|)]^2 \leq 4f_{yd}^2$$

$$\begin{aligned} [\text{LS2}(|C|+|T|)]^2 &= [\text{LS1 (T)}]^2 + [\text{LS1 (C)}]^2 + \\ &+ 2(|\sigma_{1T}||\sigma_{1C}|) + 2(|\sigma_{2T}||\sigma_{2C}|) - |\sigma_{1T}||\sigma_{2C}| - |\sigma_{2T}||\sigma_{1C}| + 3 (|\tau_{1T}||\tau_{1C}| + |\tau_{2T}||\tau_{2C}| + |\tau_{3T}||\tau_{3C}|) \leq \\ &\leq f_{yd}^2 + f_{yd}^2 + 2f_{yd}^2 \end{aligned}$$

$$[\text{LS2 (T + C)}]^2 = [\text{LS1 (T)}]^2 + [\text{LS1 (C)}]^2 + \Delta \leq f_{yd}^2 + f_{yd}^2 + 2f_{yd}^2$$

$$[\text{LS2 (T + C)}]^2 = [\text{LS1 (T)}]^2 + [\text{LS1 (C)}]^2 + \Delta \leq f_{yd}^2 + f_{yd}^2 + 2f_{yd}^2$$

LS1 (T) może być **nie** spełniony ( $> f_{yd}$ ), ale ciągle LS2 może być **spełniony** (LS1 (C) i  $\Delta$  małe)

LS1 (C) może być **nie** spełniony ( $> f_{yd}$ ), ale ciągle LS2 może być **spełniony** (LS1 (T) i  $\Delta$  małe)

LS1 (T) i LS1 (C) mogą być **spełnione** ( $\leq f_{yd}$ ), a mimo to LS2 może być **nie** spełniony ( $\Delta$  bardzo duże)

Warunek dla LS2  $\neq 2 \cdot$  (warunek dla LS1):

$$\text{LS2} = \text{LS1}_T + \text{LS1}_C \text{ +/- dodatek}$$

## Niestateczność (EN 1993-1-6 8)

Analogia – stateczność interakcyjna elementu prętowego:

EN 1993-1-1 6.3.3

$$N_{Ed} / (\chi_i N_{Rd}) + k_{yi} M_{yEd} / (\chi_{LT} M_{yRd}) + k_{zi} M_{zEd} / M_{zRd} \leq 1,0 \quad i = y, z$$

$N_{Ed}$ ,  $M_{yEd}$ ,  $M_{zEd}$  – efekty obciążenia

$N_{Rd}$ ,  $M_{yRd}$ ,  $M_{zRd}$  – nosności

$\chi_y$ ,  $\chi_z$ ,  $\chi_{LT}$  – współczynniki wyboczeniowe;  $\chi_{gh} = \chi_{gh}$  (smukłość, imperfekcje)

$k_{yy}$ ,  $k_{yz}$ ,  $k_{yy}$ ,  $k_{zz}$  – współczynniki interakcji;  $k_{ij} = k_{ij} (\chi_{gh} R_{rd})$ ,

EN 1993-1-6 8:

$$(\sigma_{x,Ed} / \sigma_{x,Rd})^{k_x} - k_i (\sigma_{x,Ed} / \sigma_{x,Rd}) (\sigma_{\theta,Ed} / \sigma_{\theta,Rd}) + (\sigma_{\theta,Ed} / \sigma_{\theta,Rd})^{k_\theta} + (t_{xq,Ed} / \tau_{x\theta,Rd})^{k_t} \leq 1,0$$

$\sigma_{x,Ed}, \sigma_{\theta,Ed}, \tau_{x\theta,Ed}$  – efekty obciążenia

$\sigma_{x,Rd}, \sigma_{\theta,Rd}, \tau_{x\theta,Rd}$  - nośności

$\chi_f$  – współczynniki wyboczeniowe;  $\chi_f = \chi_f$  (smukłość, imperfekcje)

$k_x, k_\theta, k_\tau, k_i$  – współczynniki interakcji;  $k_f = k_f(\chi_f)$ ,

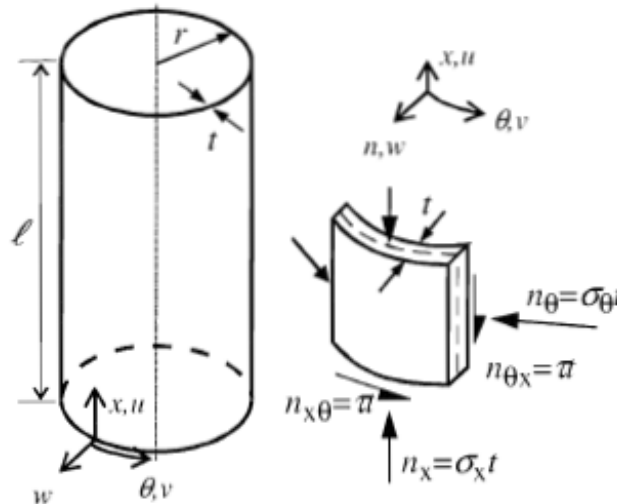
$$\sigma_{x,Rd} = \chi_x f_{yk} / \gamma_{M1}$$
$$\sigma_{\theta,Rd} = \chi_{\theta} f_{yk} / \gamma_{M1}$$
$$\tau_{x\theta,Rd} = \chi_{\tau} f_{yk} / (\gamma_{M1} \sqrt{3})$$

współczynniki wyboczeniowe i interakcji → 1993-1-6, 8.5.2, 8.5.3, załącznik D

Współczynniki wyboczeniowe  $\chi_f$  zależą od bezwymiarowej smukłości powłoki:

$$\omega = L / \sqrt{r t}$$

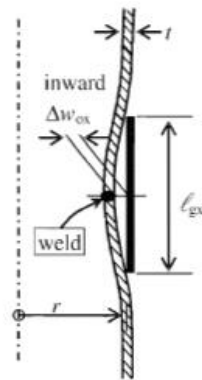
Rys: EN 1993-1-6 fig. D1



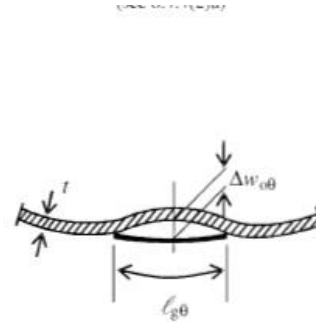
$\omega$  rośnie  $\rightarrow \chi_f$  maleje  $\rightarrow$  nośność dla LS3 maleje

# Imperfekcje są bardzo ważne dla LS3

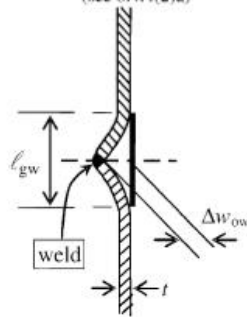
Rys: EN 1993-1-6 fig. 8.4



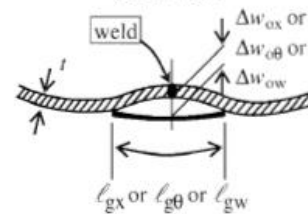
c) First measurement on a meridian across a weld (see 8.4.4(2)a)



d) Second measurement on circumferential circle (see 8.4.4(2)b)

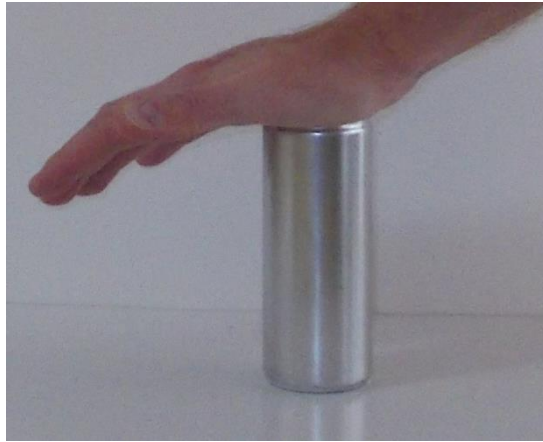


e) Second measurement across a weld with special gauge (see 8.4.4(2)c)



f) Measurements on circumferential circle across weld (see 8.4.4(2)c)

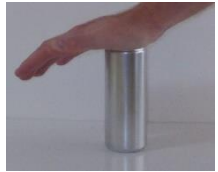
# LS3 dla naprężeń obwodowych i południkowych.





Rys: T. Michałowski, M. Piekarczyk, Selected Issues of Special Steel Structures, Cracow University of Technology 2019



l [m]	$\omega$	Krytyczne naprężenie południkowe $\sigma_{x, Rd}$ [MPa]	Krytyczne naprężenie obwodowe $\sigma_{\theta, Rd}$ [MPa]	Krytyczne naprężenie ścinające $\tau_{x\theta, Rd}$ [MPa]
10	48.795	178.726	19.797	68.354
7	31.157	181.067	28.282	76.980
4	19.518	183.213	49.493	89.056



Rys: T. Michałowski, M. Piekarczyk, Selected Issues of Special Steel Structures, Cracow University of Technology 2019

Klasa jakości wykonania  	Krytyczne naprężenie południkowe $\sigma_{x, Rd}$ [MPa]	Krytyczne naprężenie obwodowe $\sigma_{\theta, Rd}$ [MPa]	Krytyczne naprężenie ścinające $\tau_{x\theta, Rd}$ [MPa]
Normalna (C) → #t / 33	183.213	49.493	89.056
Wysoka (B) → #t / 33	188.803	64.341	95.857
Najwyższa (A) → #t / 33	192.027	74.239	98.896

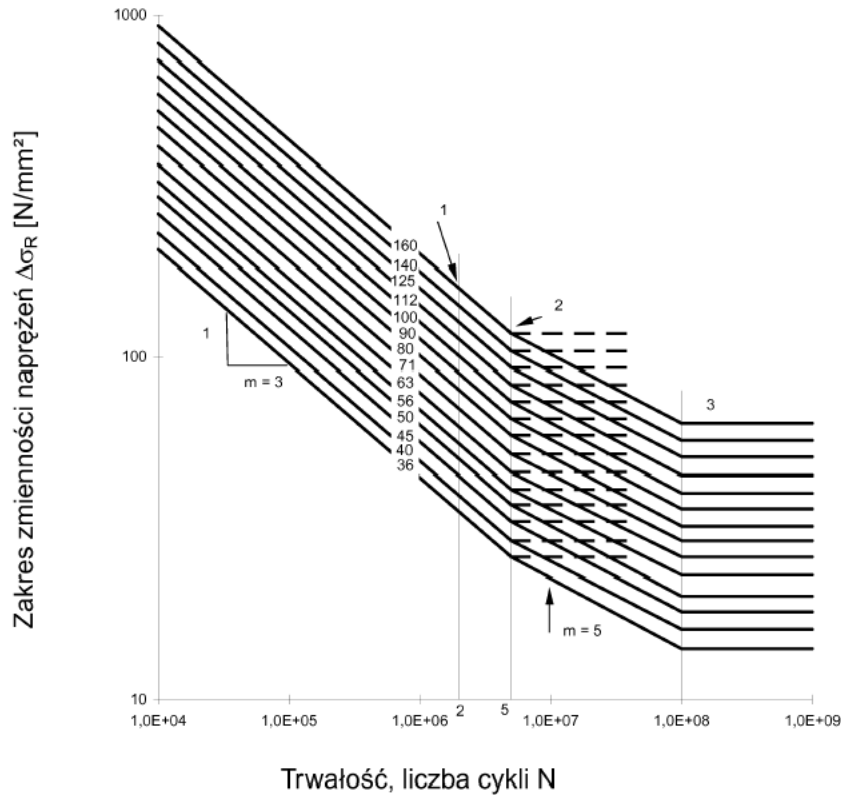
## Zmęczenie LS4 (EN 1993-1-6 9)

$$\gamma_{Ff} \Delta\sigma_E / (\sigma_R / \gamma_{Mf}) \leq 1,0$$
$$\gamma_{Ff} \Delta\tau_E / (\tau_R / \gamma_{Mf}) \leq 1,0$$

Identyczne zasady obowiązują dla konstrukcji prętowych (np. estakad podsuwnicowych)

Rys: EN 1993-1-9 fig.7.1

Nośność zależy od ilości cykli obciążenia  $N_R$



### EN 1993-1-9 7.1 (2)

- 1 Kategorie zmęczeniowe  $\Delta\sigma_C$
- 2 Wytrzymałość zmęczeniowa trwała przy stałej amplitudzie  $\Delta\sigma_D$
- 3 Wytrzymałość zmęczeniowa trwała  $\Delta\sigma_L$

$$\Delta\sigma_R = \Delta\sigma_C \sqrt[m]{2 \cdot 10^6 / N_R}$$

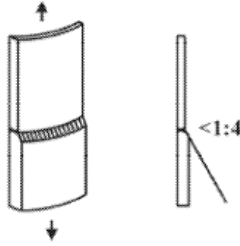
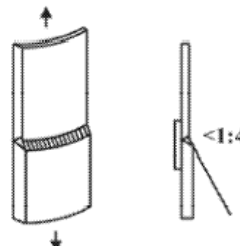
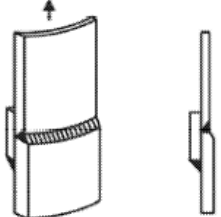
$$\Delta\tau_R = \Delta\tau_C \sqrt[m]{2 \cdot 10^6 / N_R}$$

$$m = 3 \text{ dla } N_R = 100\,000 - 5\,000\,000$$

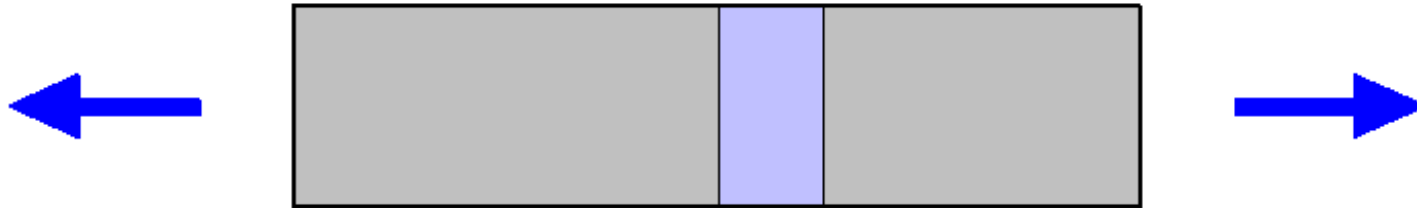
$$m = 5 \text{ dla } N_R = 5\,000\,000 - 100\,000\,000$$

$$\Delta\sigma_R, \Delta\tau_R \text{ stałe dla } N_R > 100\,000\,000$$

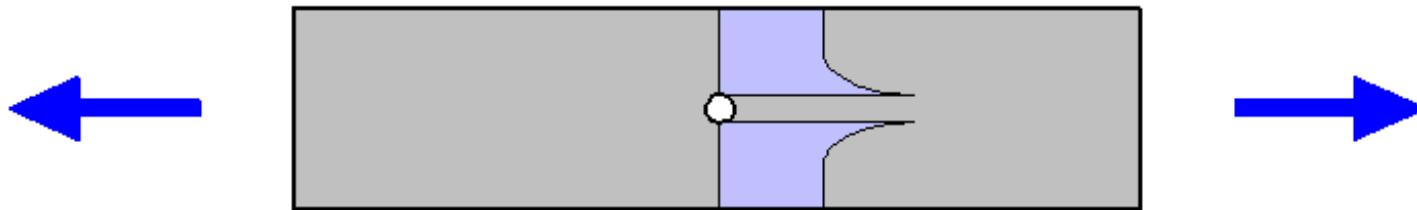
EN 1993-3-2 tab. C1 dla elementów powłokowych (także rodzaj karbu)

<p>EN 1993-1-9 Tablica 8.3 Szczegół 4 i 7</p>	
<p>EN 1993-1-9 Tablica 8.3 Szczegół 14</p>	
<p>EN 1993-1-9 Tablica 8.3 Szczegół 16 (&lt;math&gt;&lt;1:4&lt;/math&gt;)</p>	

Wokół karbów dochodzi do koncentracji naprężeń



Rys: Autor

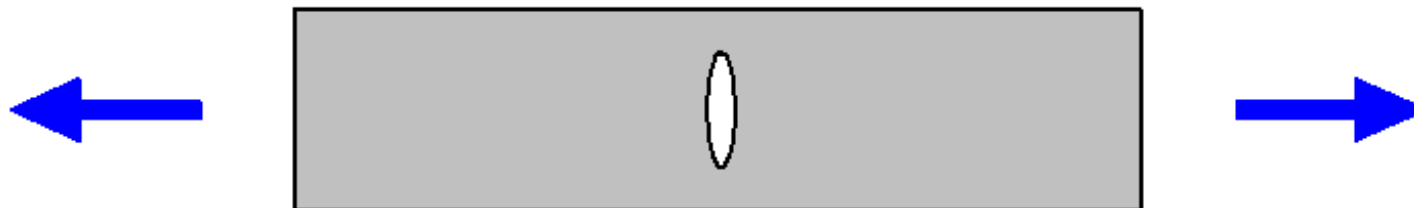


$$\sigma_{Ed} \leq f_y \quad \text{lecz} \quad \mu \sigma_{Ed} \geq f_y$$

$\mu$  współczynnik koncentracji naprężeń  
 $\sigma_{Ed}$  naprężenie dla przekroju idealnego

Duża wartość naprężenia przy granicy karbu powoduje lokalne zniszczenie materiału i rozrastanie się karbu

Przy wielu cyklach obciążeń uszkodzenie powiększa się aż do całkowitego rozerwania elementu. Nośność zmęczeniowa jest bardzo ważna dla wszystkich konstrukcji narażonych na obciążenia cykliczne i dynamiczne.



Rys: Autor

Obliczenia prowadzone są jak dla przekroju idealnego:

$$\mu \sigma_{Ed} \leq f_y$$

$$\sigma_{Ed} \leq f_y / \mu$$

$$\Delta\sigma_E \leq \sigma_R / (\gamma_{Mf} \gamma_{Ff})$$

$$\gamma_{Ff} \Delta\sigma_E / (\sigma_R / \gamma_{Mf}) \leq 1,0$$

Dla LS4 obliczenia prowadzi się dla wartości charakterystycznych obciążenia

LS2 – przypadek dla niskiej liczby cykli obciążenia ( $< 10\ 000$ ); zniszczenie uzależnione od wytrzymałości materiału;

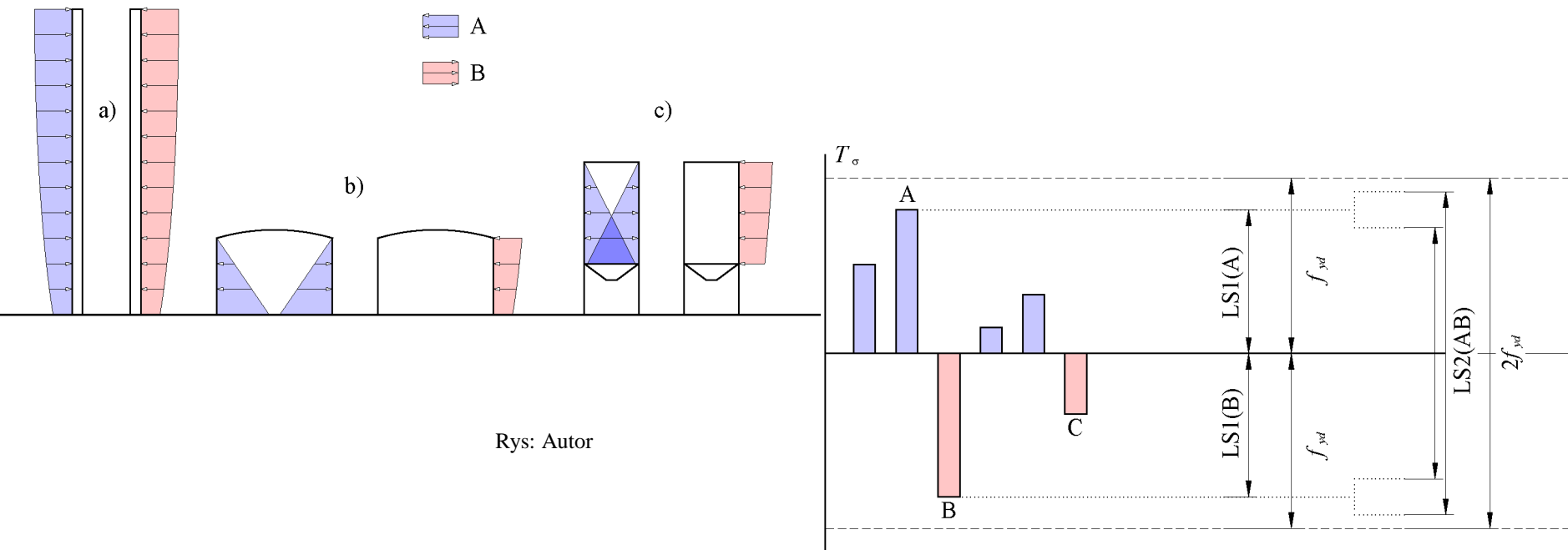
LS4 - przypadek dla wysokiej liczby cykli obciążenia ( $> 10\ 000$ ); zniszczenie uzależnione od wytrzymałości zmęczeniowej, a nie od wytrzymałości materiału;

50 lat = 18 263 dni.

Komin – tysiące cykli obciążenia od wiatru każdego dnia → wiele milionów cykli w ciągu 50 lat

Zbiornik, silos – w przypadku **niezwykłe intensywnej** wystąpi kilka cykli pełny-pusty w ciągu dnia →  $18\ 000 \leq$  liczba cykli  $\leq 100\ 000$  w ciągu 50 lat.

Zatem w normalnych warunkach (niezbyt intensywna eksploatacja) → liczba cykli  $< 10\ 000$  przez 50 lat



	LS1	LS2	LS3	LS4
Komin	Istotne	Istotne	Istotne	Istotne
Zbiornik	Istotne	Może być pominięte	Istotne	Warunkowo pomijalne
Silos	Istotne	Może być pominięte	Istotne	Warunkowo pomijalne

# Stateczność globalna

EN 1993-4-2 11.5

Zbiornik nie może być uniesiony, przesunięty ani obrócony. Pod uwagę bierzemy ciężar własny pustego zbiornika, nadciśnienie, parcie wiatru na cylinder i ssanie wiatru na dachu.

$W$  – wypadkowa parcia na cylinder

$S$  – wypadkowa ssania na dachu

$G_k$  – ciężar własny pustego zbiornika (wartość charakterystyczna)

$O$  - nadciśnienie

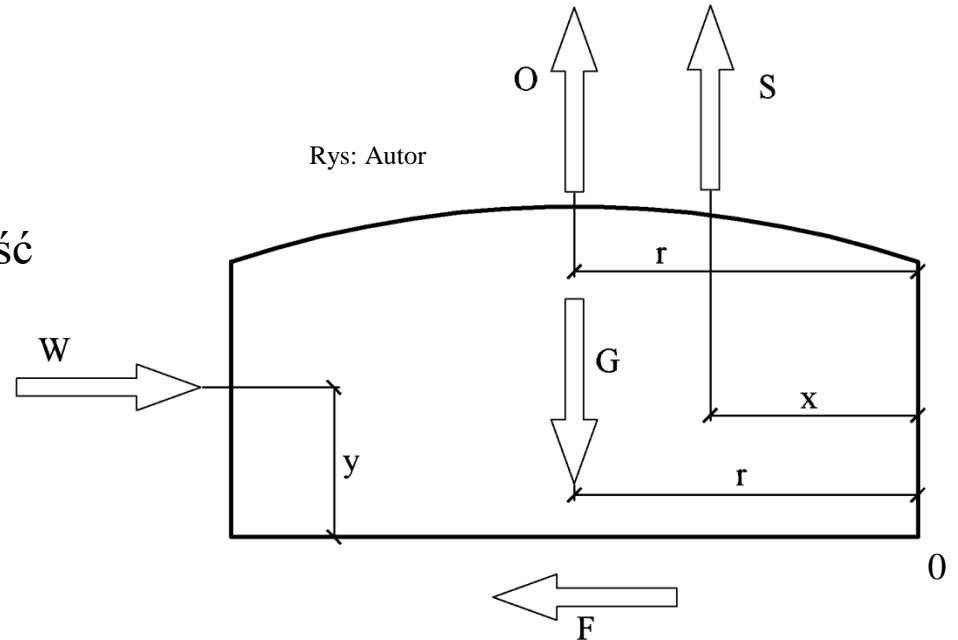
$F_k$  - tarcie (wartość charakterystyczna)

Wymagania:

Brak unoszenia:  $O + S < G_k$

Brak przesuwu:  $W < F_k$

Brak obrotu wokół punktu 0:  $W y + S x + O r < G_k r$



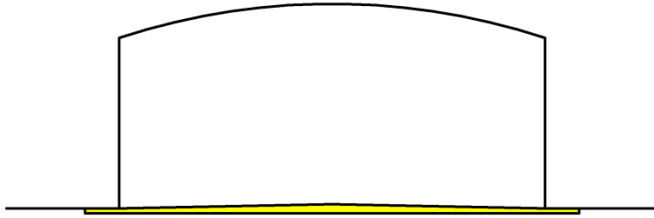
$$O = \pi r^2 p_{\text{over}}$$

$$F_k = (G_k - S - O) \mu$$

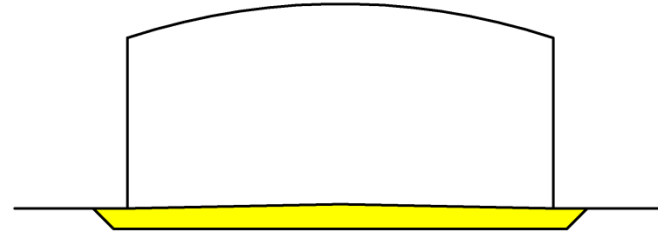
$$\mu = 0,3$$

# Fundament

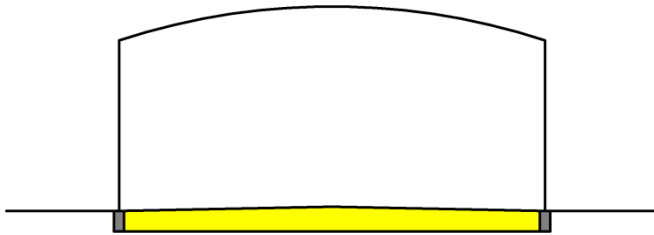
Warunki gruntowe:



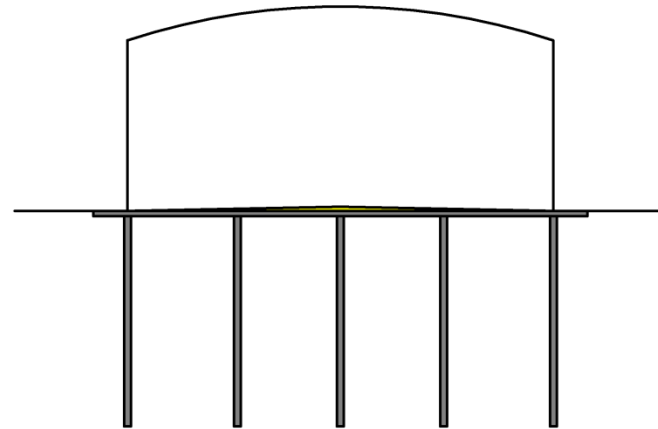
Bardzo dobre (grunt niespoisty nośny);  
wymiana gleby na poduszkę piaskową  
(+/- 30 cm)



Dobre (spoisty nośny); poduszka piaskowa do  
głębokości przemarzania (+/- 120 cm)



Złe (spoisty nienośny, niespoisty nienośny);  
pierścień żelbetowy pod płaszczem oraz  
poduszka piaskowa do głębokości  
przemarzania (+/- 120 cm)



Bardzo złe (nasypy, torfy); poduszka  
piaskowa, płyta żelbetowa, pale

Rys: Autor

Warunki gruntowe	Fundament	
	Spełnione warunki stateczności globalnej	Niespełnione warunki stateczności globalnej
Bardzo dobre	Poduszka piaskowa ~ 30 cm	Pierścień żelbetowy
Dobre	Poduszka piaskowa ~ 120 cm	
Złe	Pierścień żelbetowy	
Bardzo złe	Płyta żelbetowa i pale	

# Stan graniczny użytkowania

## EN 1993-4-2 2.9.3, 9.4

### 2.9.3 Stany graniczne użytkowalności

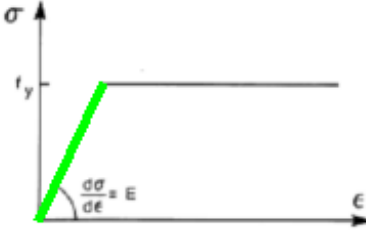
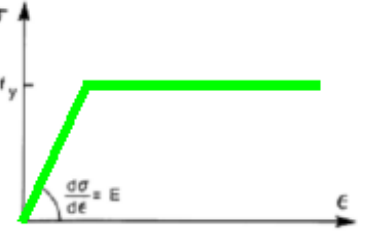
- (1) Szczegółowe obliczenia z uwzględnieniem kombinacji oddziaływań nie są wymagane, jeśli spełnione są odpowiednie uproszczone kryteria użytkowalności.
- (2) Przy weryfikacji użytkowalności ma zastosowanie współczynnik  $\gamma_{Mser}$ .

**UWAGA:** Wartości  $\gamma_{Mser}$  mogą być określone w Załączniku krajowym. Zaleca się przyjmować  $\gamma_{Mser} = 1$ .

### 9.4 Stany graniczne użytkowalności

- (1) Stany graniczne użytkowalności w odniesieniu do zbiorników prostopadłościennych dotyczą:
  - deformacji i ugięć, które mogłyby niekorzystnie wpłynąć na eksploatację konstrukcji;
  - odkształcalności, ugięć lub drgań, które mogłyby doprowadzić do zniszczenia elementów niekonstrukcyjnych.
- (2) Aby nie dopuścić do powyższych zjawisk, odkształcenia, ugięcia i drgania podlegają odpowiednim ograniczeniom.
- (3) Stosowne wartości graniczne ustala się między projektantem, zamawiającym i odpowiednimi władzami, biorąc pod uwagę przeznaczenie zbiornika i rodzaj przechowywanej cieczy.

## Analiza sprężysta i plastyczna

Analiza	Klasy przekroju	Zależność odkształcenie-napężenie
Sprężysta	I, II, III, IV	
Plastyczna	I	

Różne wzory na nośność dla obu rodzajów analizy.

Rys: Autor

Metoda analizy	odkształcenia	$\sigma \leftrightarrow \varepsilon$	imperfekcje
Liniowa analiza sprężysta (LA)	Małe	Liniowa	Nie
Liniowo sprężysta analiza bifurkacyjna (LBA)	Małe	Liniowa	Nie
Geometrycznie nieliniowa analiza sprężysta (GNA)	Duże	Liniowa	Nie
Analiza fizycznie nieliniowa (MNA)	Małe	Nonlinear	Nie
Analiza fizycznie i geometrycznie nieliniowa (GMNA)	Duże	Nieliniowa	Nie
Geometrycznie nieliniowa analiza sprężysta z imperfekcjami (GNIA)	Duże	Liniowa	Tak
Analiza fizycznie i geometrycznie nieliniowa z imperfekcjami (GMNIA)	Duże	Nieliniowa	Tak

EN 1993-1-6 1.3.5

Spośród wielu dopuszczalnych metod MES, tylko jedna jest uniwersalna  
(liniowa analiza sprężysta):

Metoda analizy	LS1	LS2	LS3	LS4
LA	+	+	+	+
LBA			+	
GNA		+	(+)	+
MNA	+	+	+	
GMNA	+	+	(+)	
GNIA			(+)	
GMNIA			+	

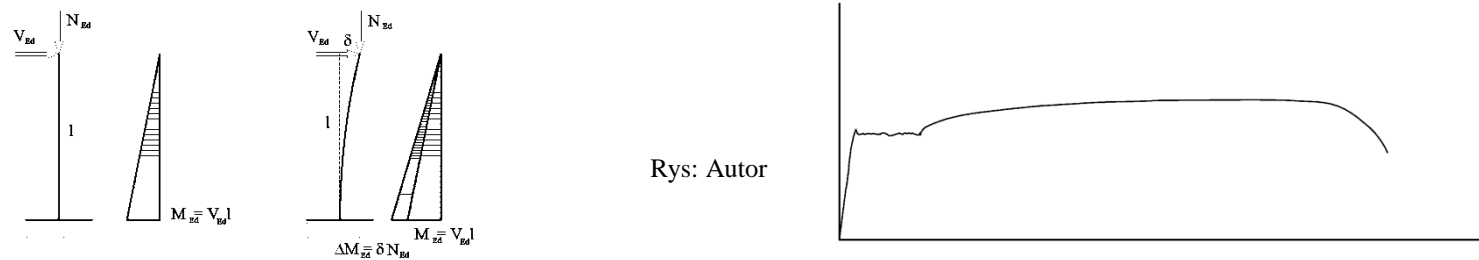
+ dopuszczalna

(+) warunkowo dopuszczalna

EN 1993-1-6 1.3.5

**Obliczenia I rzędu** (analiza geometrycznie liniowa, zakres małych odkształceń):  
uwzględniana jest tylko początkowa geometria konstrukcji (początkowa macierz sztywności)

**Obliczenia II rzędu** (analiza geometrycznie nieliniowa, analiza P-Δ, zakres dużych odkształceń): uwzględniana jest zmiana geometrii konstrukcji pod wpływem obciążenia i dodatkowe siły przekrojowe („momenty na mimośrodkach”; obciążenia są przykładane stopniowo i po każdym kroku przeliczana jest na nowo macierz sztywności z uwagi na deformacje konstrukcji)



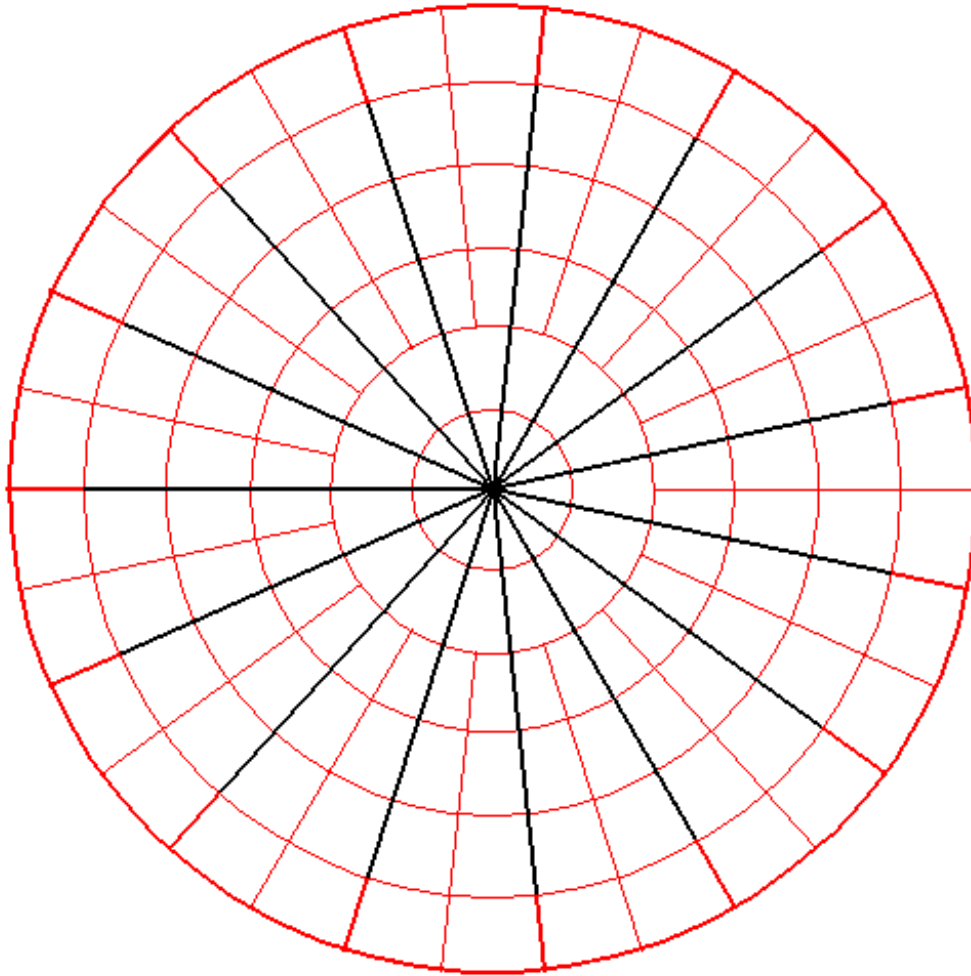
Rys: Autor

**Analiza materiałowo liniowa** (analiza fizycznie liniowa, analiza sprężysta): model materiału uwzględniający tylko zakres liniowo-sprężysty  $\sigma = E \varepsilon$

**Analiza materiałowo nieliniowa** (analiza fizycznie nieliniowa, analiza plastyczna): model materiału uwzględniający po zakresie liniowo-sprężystym także część nieliniową (najczęściej tylko półkę plastyczną; w przypadkach obliczeń zaawansowanych także wzmocnienie materiału, pęknięcie, reologię, zmianę parametrów w spoinie w porównaniu z materiałem rodzimym, współpracę w przypadku zespolenia różnych materiałów...).

## Wymogi techniczne

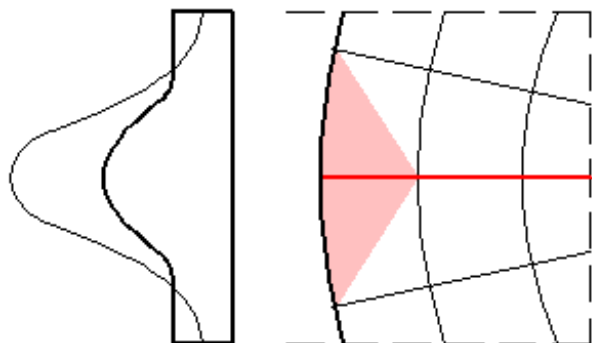
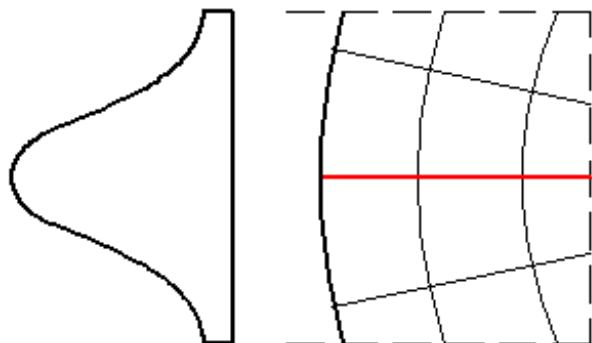
Rys: Autor



Panele pokrycia dachu spawane są do siebie nawzajem, ale nie do krokwi. Tylko zewnętrzny pierścień spawany jest do krokwi.

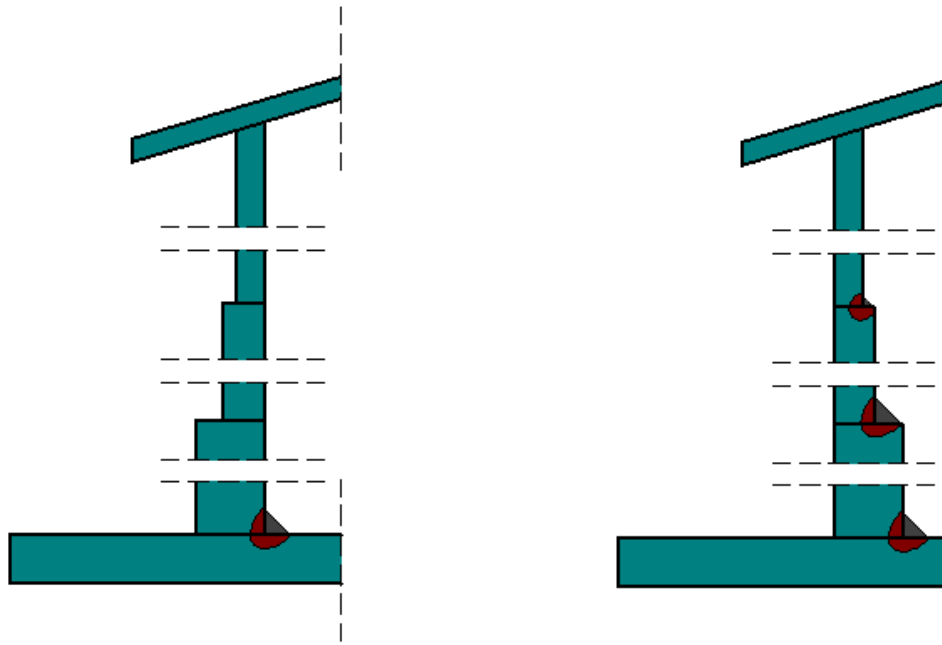
Przy obciążeniu ciężarem własnym, śniegiem, parciem wiatru i podciśnieniem, panele opierają się na krokwiach..

Brak jest współpracy między krokwiami a panelami przy nadciśnieniu i ssaniu wiatru. Dzięki temu w razie awarii (duże nadciśnienie) dach zostaje łatwo rozszczelniony, bez uszkodzenia pozostałej części konstrukcji.



Dzięki przyspawaniu paneli ostatniego pierścienia do krokwi i pierścienia brzegowego, siła osiowa z krokwi jest łagodniej rozprowadzana po pierścieniu brzegowym. Dzięki temu unika się koncentracji naprężeń w miejscu łączenia krokwi z pierścieniem.

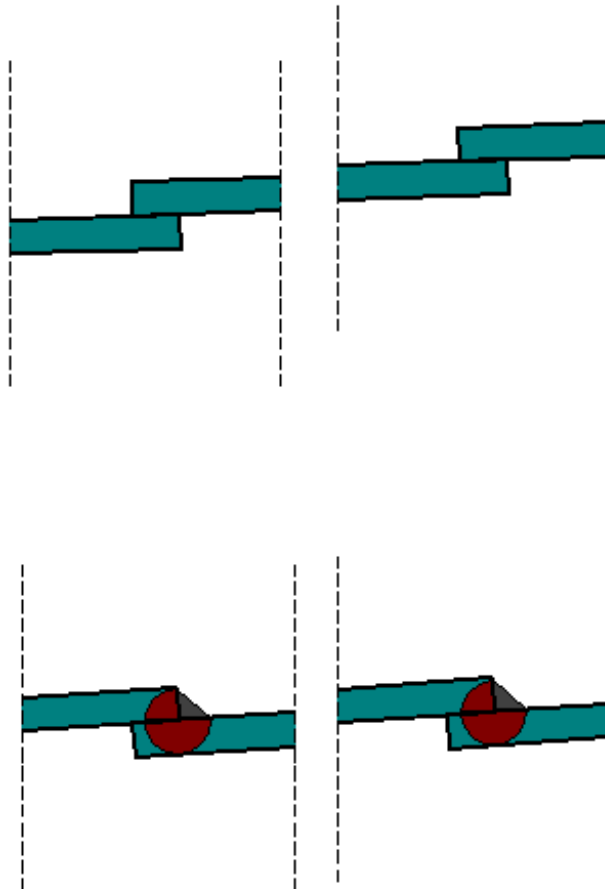
Rys: Autor



Rys: Autor

Wewnętrzna powierzchnia płaszczka powinna być gładka. „Półki” związane ze wzrastającą grubością paneli płaszczka powinny znajdować się na zewnątrz. Unika się gromadzenia zanieczyszczeń na „półkach” wewnątrz zbiornika; pod warstwami zanieczyszczeń łatwo rozwija się korozja.

Rys: Autor



Z tego samego powodu zakładki paneli dna powinny układać się w spadku ku obwodowi.

## Dodatkowe zjawiska

Gatunek stali

S 235 RJ

S 235 – stal,  $f_y = 235$  MPa

RJ – stopień odporności na udar

Udarność = zdolność to zaabsorbowania energii bez zniszczenia materiału.

Udarność jest badana młotem Charpy'ego.

Dla niektórych gatunków stali istnieje ryzyko zniszczenia w niskiej temperaturze nawet przy stosunkowo małym obciążeniu



Rys: journalism.columbia.edu

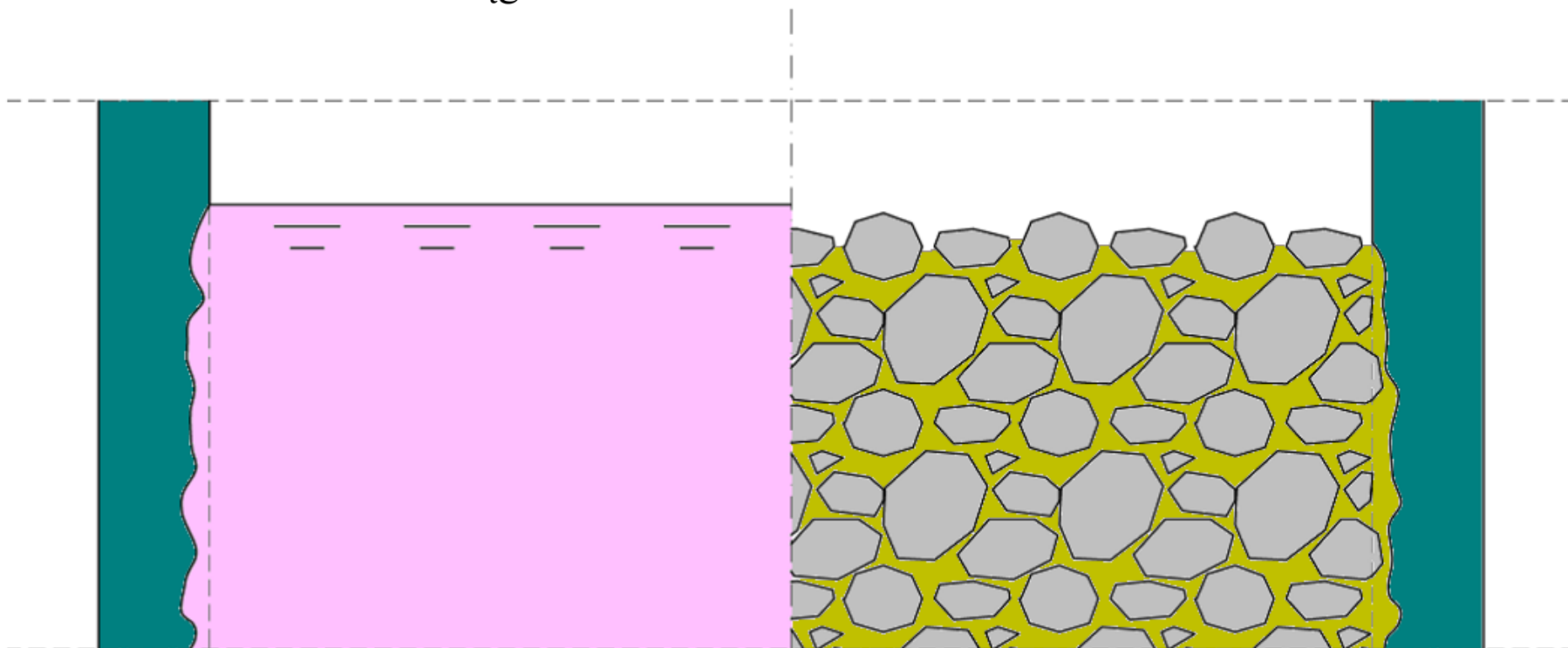
Rys: acellent.com



Udarność jest bardzo ważna dla konstrukcji, narażonych na niskie temperatury.

Korozja – agresja chemiczna związków zawartych w cieczach i gazach; zachodzi w zbiornikach i rurociągach

Erozja – ścieranie przez materiał stały w silosach



Rys: Autor

Naddatek korozyjny:

$$X \text{ [mm / rok]} \cdot Y \text{ [rok]} = XY \text{ [mm]}$$

## Zagadnienia egzaminacyjne

Znaczenie klas konsekwencji dla zbiorników

Zależność między wysokością a grubością powłoki zbiornika

Stany graniczne dla zbiorników

Typy analizy w przypadku zbiorników

Analiza fizycznie liniowa i nieliniowa – podobieństwa i różnice

Analiza geometrycznie liniowa i nieliniowa – podobieństwa i różnice

Dziękuję za uwagę

© 2025 dr inż. Tomasz Michałowski

[tmichal@pk.edu.pl](mailto:tmichal@pk.edu.pl)