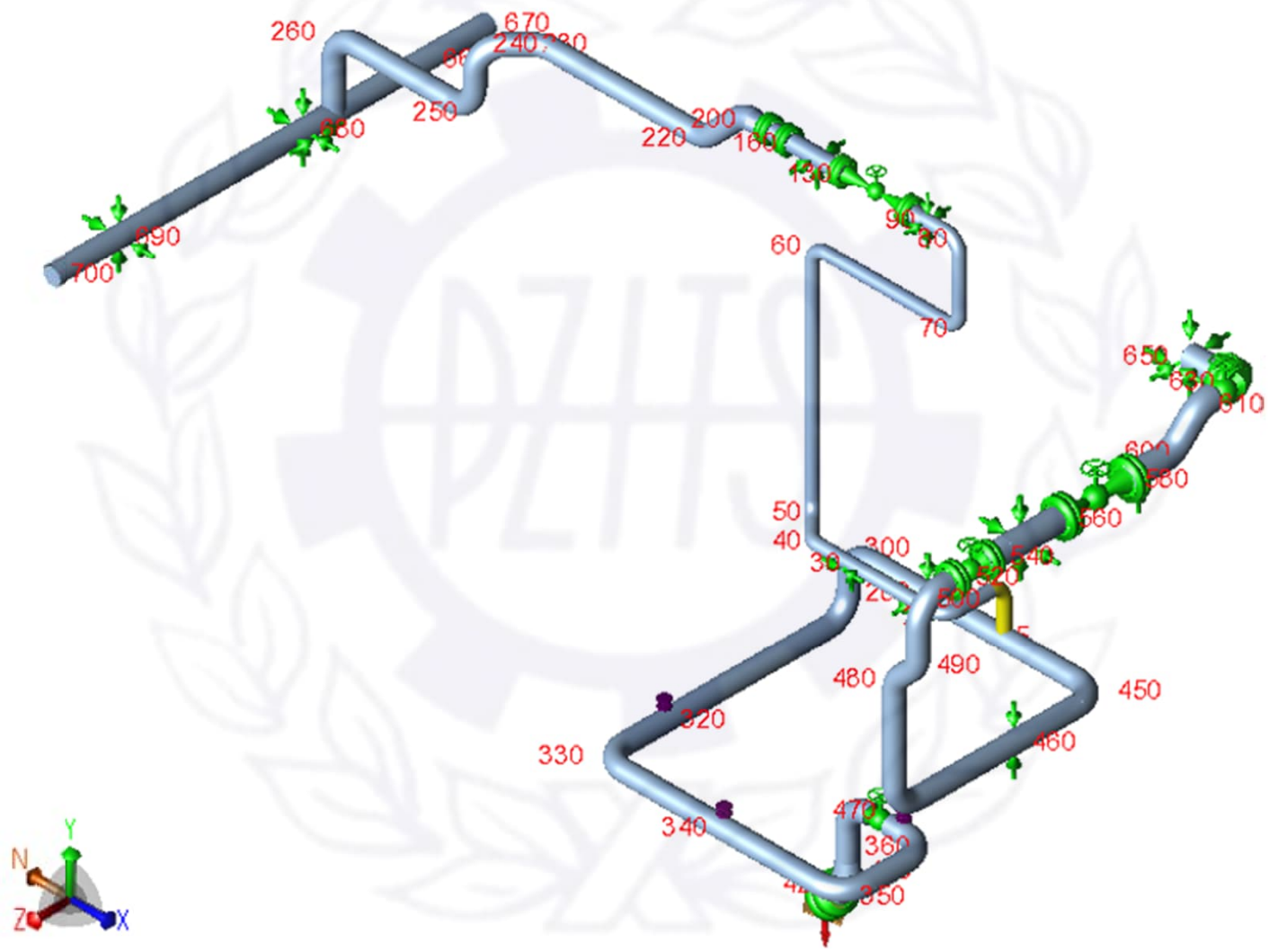
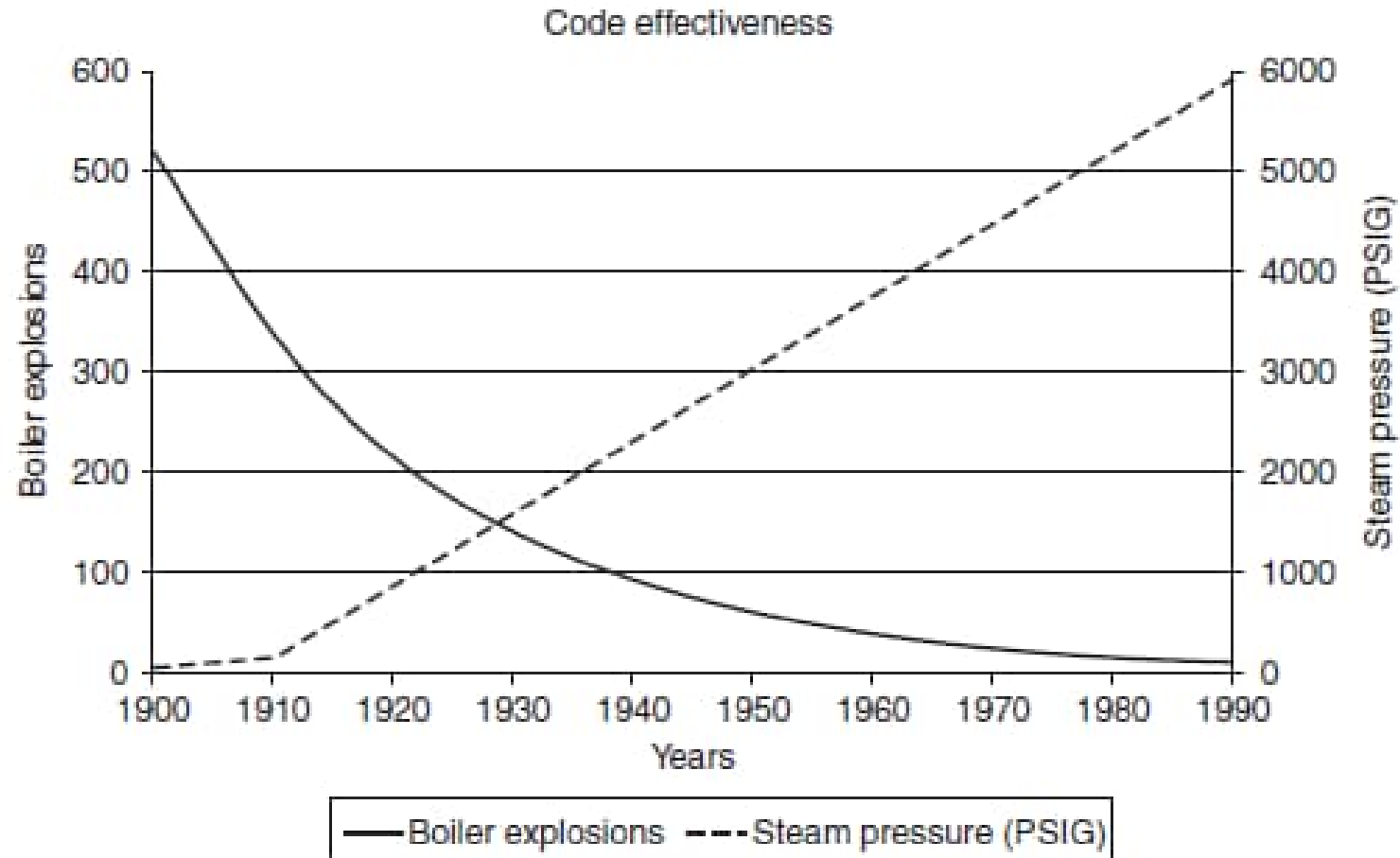


Wibracje sprężarki gazu

Studium przypadku



Liczba awarii oraz ciśnienie systemów parowych w XX wieku (Ellenberger, *Boiler and Pressure Vessel Code*, 2005)

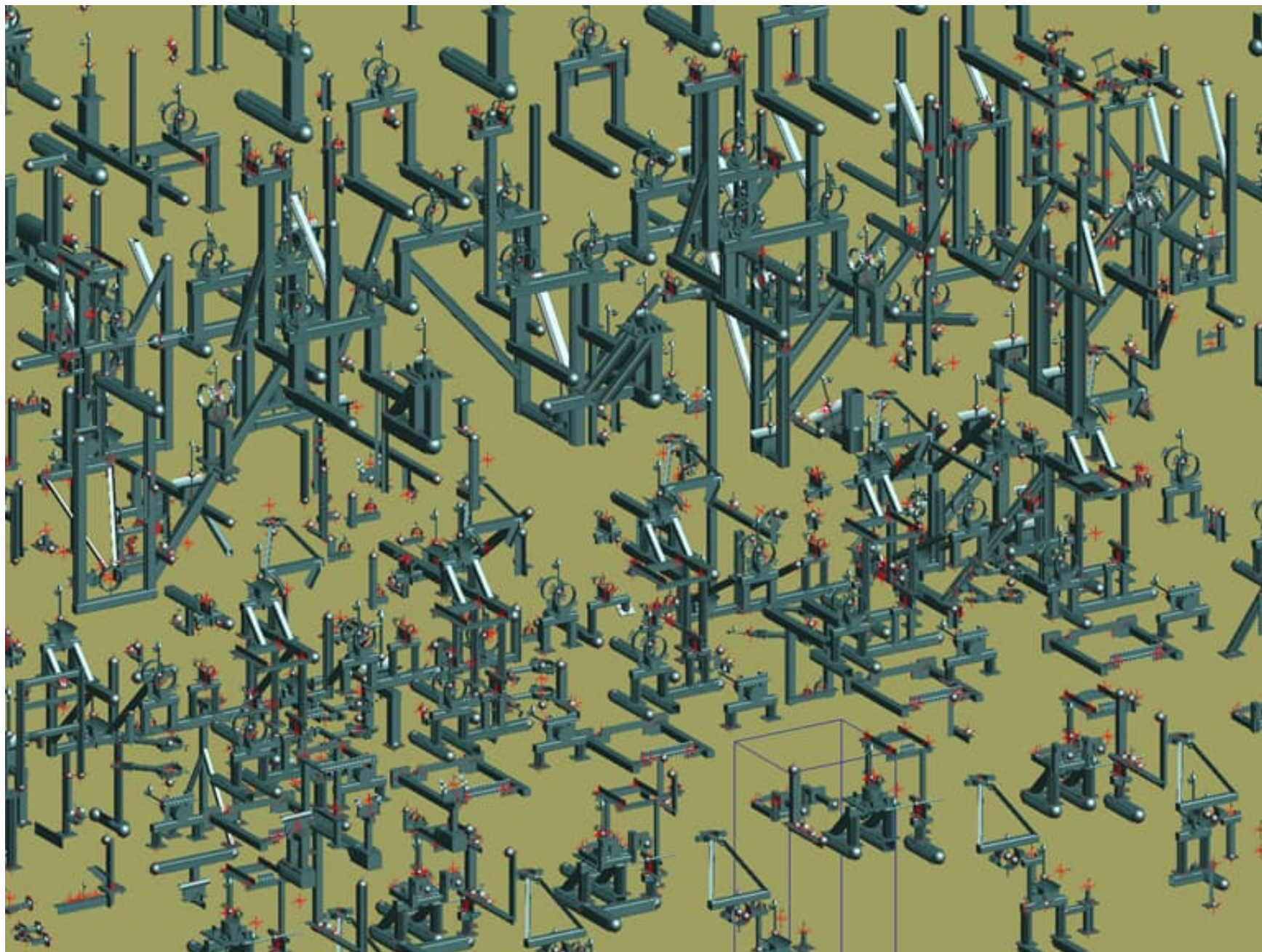


Podczas próbnego uruchomienia turbosprężarki o parametrach pracy $PS=500$ bar zaobserwowano duże wibracje na podporach głównego systemu gazowego. Stwierdzono pęknięcie sprężyny podparcia sprężynowego oraz zgięcie podpory przesuwnej. Uznano za konieczne wyłączenie sprężarki. Zdarzenie miało miejsce na początku poprzedniej dekady.

Podjęto następujące środki zaradcze:

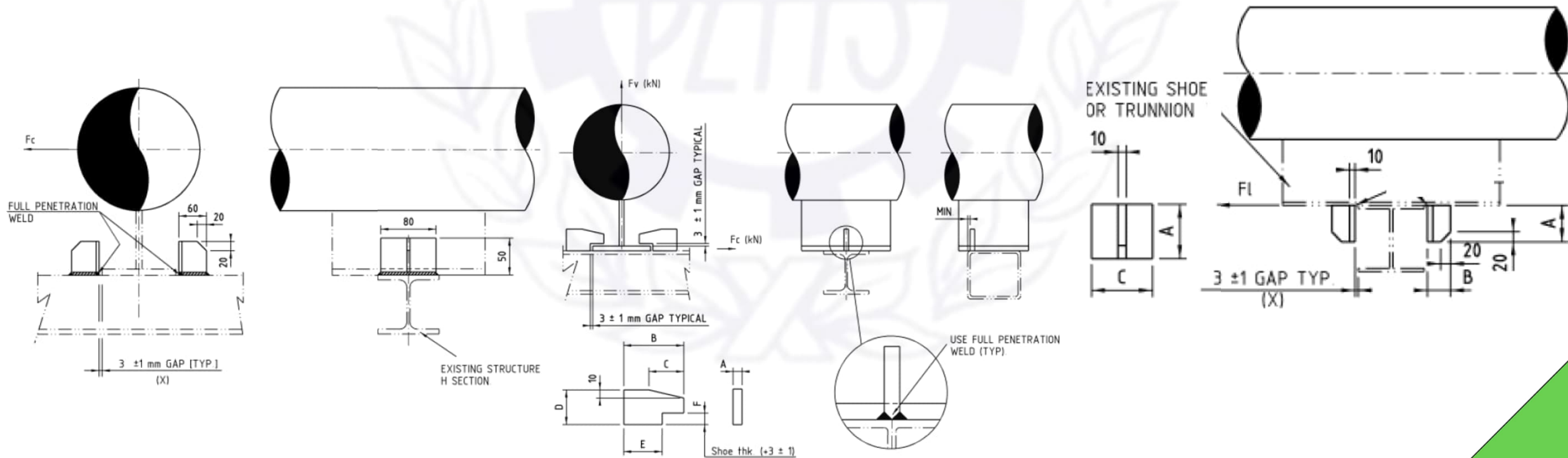
- Wykonano pełne obliczenia naprężeń rurociągów,
- Określono czy konieczna jest zmiana typu lub miejsca podpory tak, aby zapewnić pełną funkcjonalność układu,
- Sprężarka została w pewnym momencie została przesunięta o 4 mm niżej niż początkowo. Należało określić konsekwencje tego zdarzenia.

Do analizy użyto kodu ASME B 31.3 Process Piping.

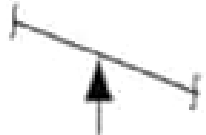

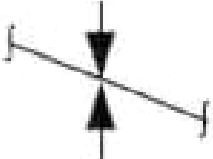







Z punktu widzenia obliczeń wytrzymałościowych rurociągów można wymienić kilka najważniejszych i najczęściej używanych funkcji podpór:

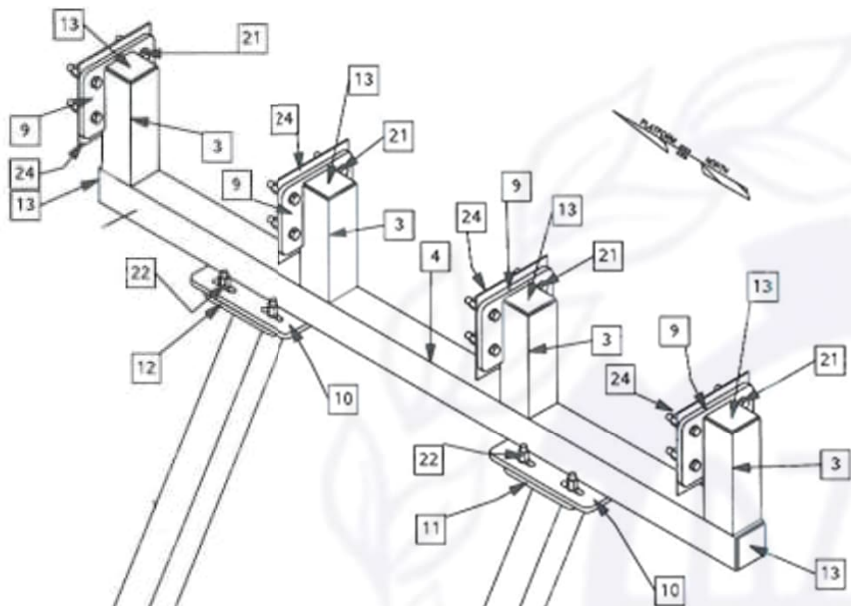
- Blokowanie pionowego ruchu rurociągu w dół. Kod funkcji: **RS**.
- Punkt stały blokujący sześć stopni swobody. Kod funkcji: **ANC**.
- Blokowanie przesunięcia rurociągu wzdłuż jego osi. Kod funkcji: **LS**.
- Blokowanie przesunięcia rurociągu prostopadle do jego osi. Kod funkcji: **LG**
- Blokowanie pionowego ruchu rurociągu w górę. Kod funkcji: **HD**
- Podpora sprężynowa służy do przenoszenia obciążeń pionowych. Kod funkcji: **SS**



Podstawowym narzędziem kontrolującym naprężenia w rurociągu są sposoby blokowania jego ruchów. Najczęściej spotykane oznaczenia funkcji podpór na izometrykach stresowych przedstawiono na poniższym rysunku. Domyślnie szczelina pozwalająca swobody ruch rurociągu wynosi 3 mm. Podpory sprężynowe będą omawiane w dalszej części, więc na tym etapie poprzestano na rozróżnieniu dwóch podstawowych typów.

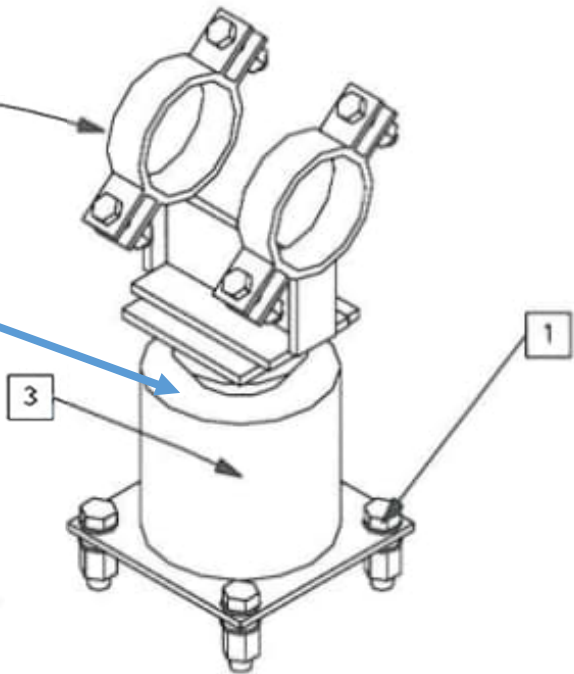
	Rest: RS	Podparcie dolne		Variable spring support	Podpora sprężynowa zmienna
	Rest - Hold Down: RS, HD	Podparcie dolne i blokada ruchu w górę		Constant spring support	Podpora sprężynowa stała
	Line - Guide: LG	Podparcie ruchu boczego w poziomie		Anchor: ANC	Blokada 6 stopni swobody
	Line - Stop: LS	Podparcie ruchu osiowego w poziomie		Hold - Down: LS	Blokada ruchu w górę

Technologia podparć rurociągów



Funkcja: HD
Hold Down

Funkcja: SS
Podpora sprężynowa
zmienna



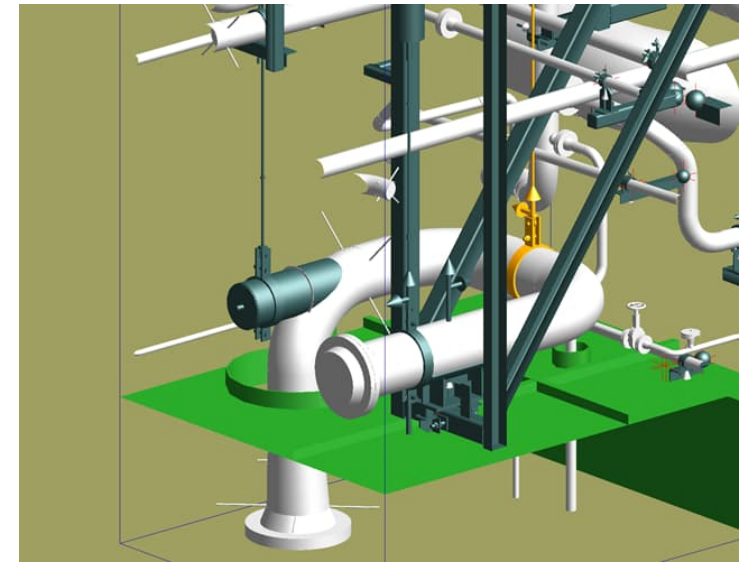
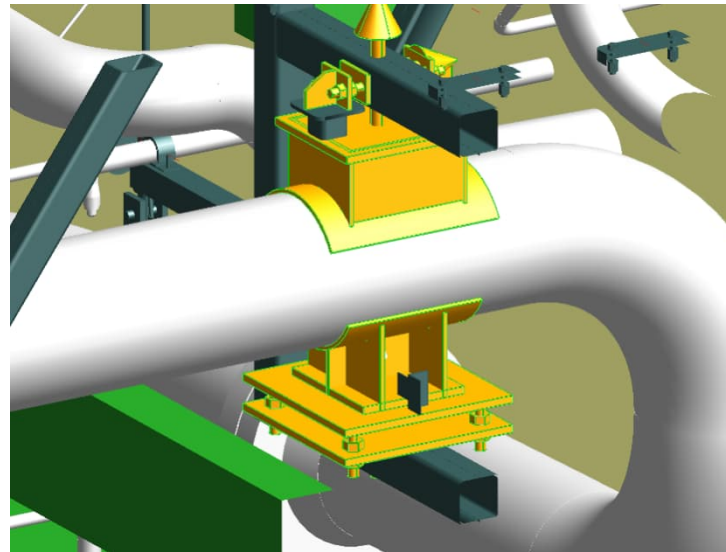
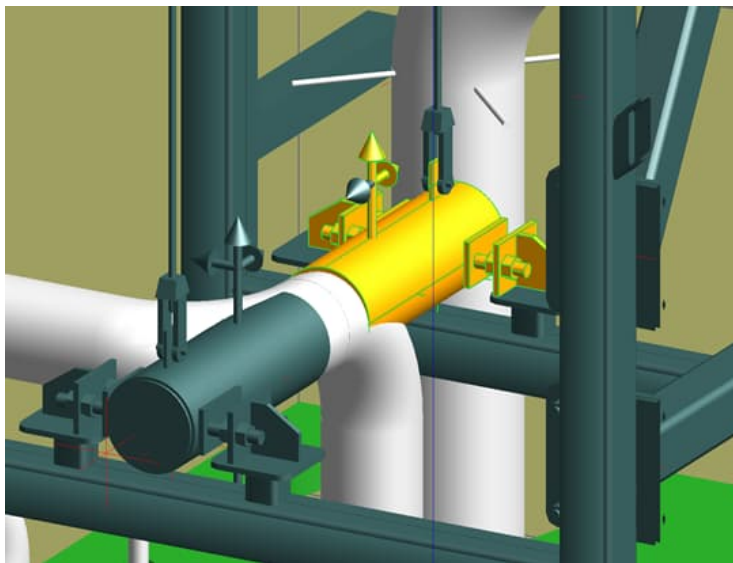
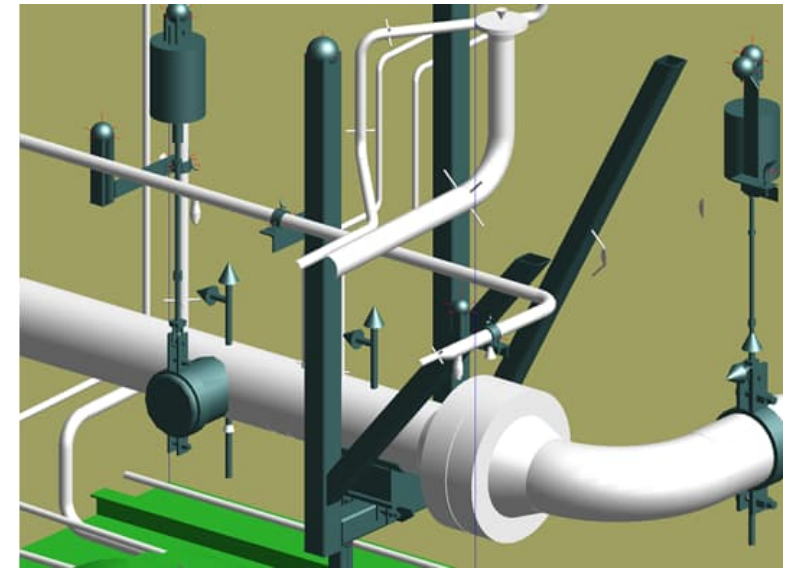
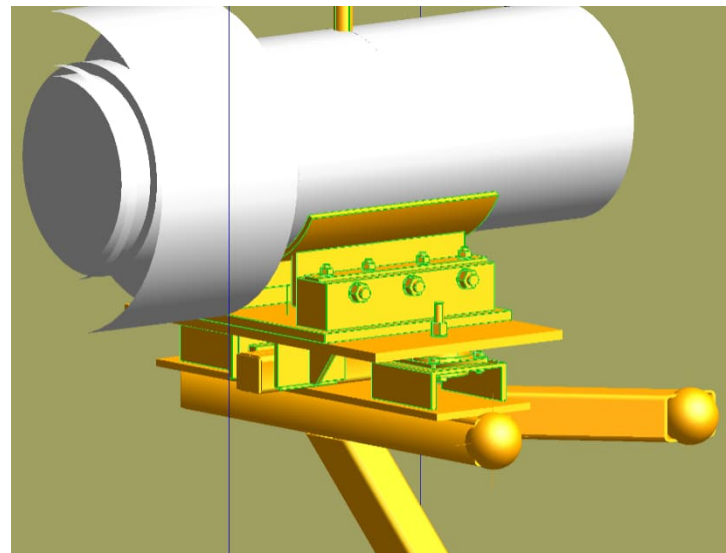
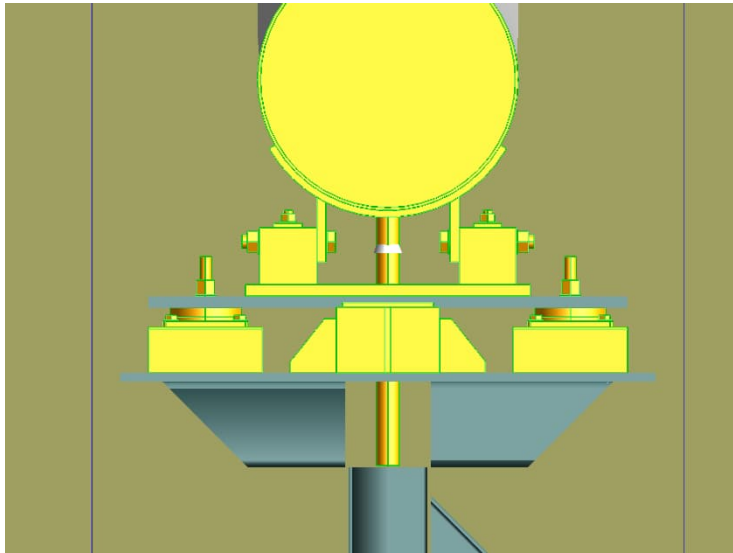
Funkcja: LS
Line Stop

Funkcja: LG
Line Guide

Funkcja: RS
Rest



Technologia podparć rurociągów

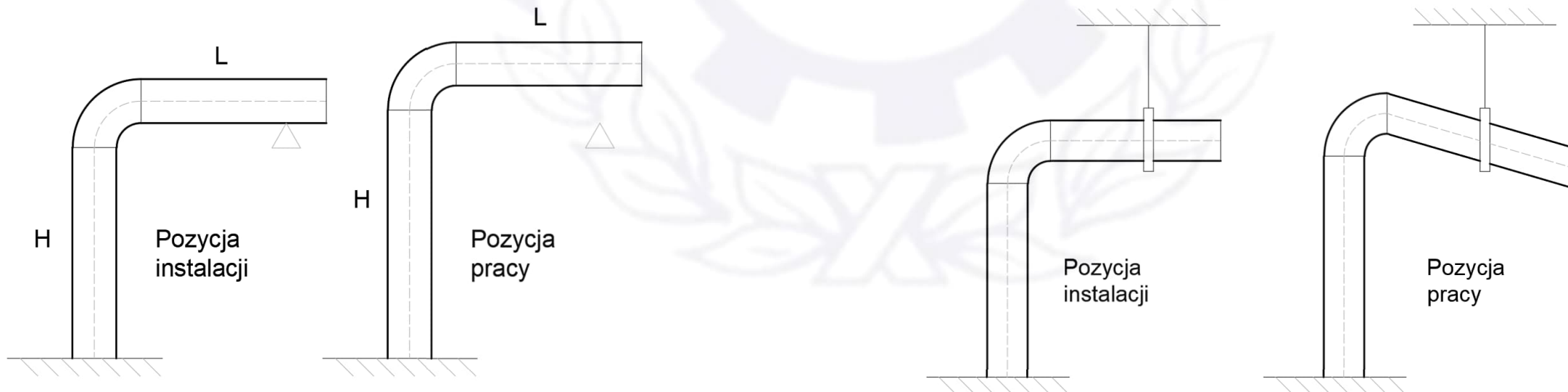


Aby wytłumaczyć zasadę pracy podpór sprężystych należy wyobrazić sobie rurowciąg stojący na podporze ślizgowej w warunkach instalacji bez obciążenia temperaturą. Drugi koniec rurowciągu jest przymocowany do punktu stałego, gdzie blokowane są wszystkie sześć stopni swobody. W takim momencie siła działająca na obie podpory pochodzi od łącznej masy rurowciągu.

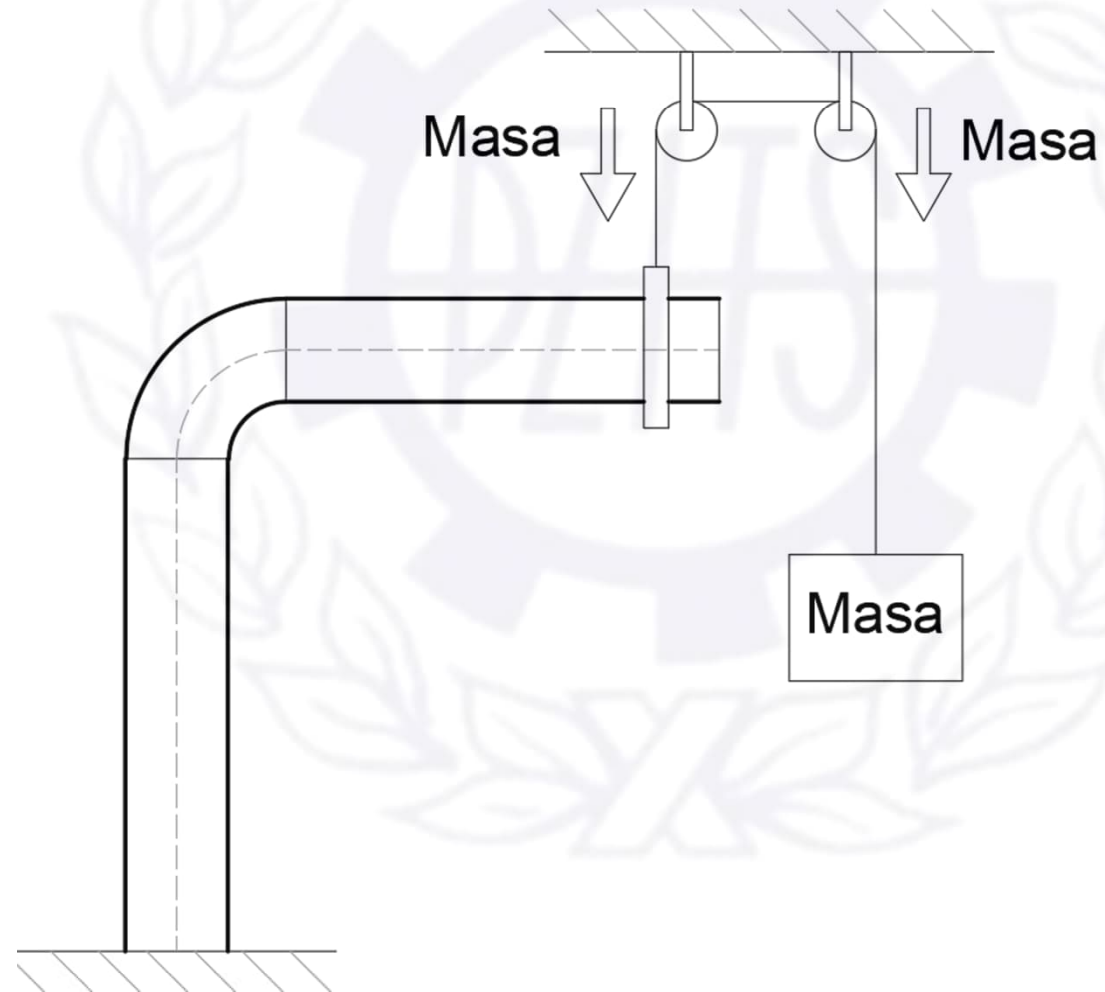
W momencie rozpoczęcia podgrzewania się odcinki pionowy i poziomy wydłużają się. W pewnym momencie rurowciąg pionowy wydłuża się na tyle, że odcinek poziomy traci kontakt z podporą. W takiej sytuacji pojawią naprężenie w łuku oraz moment utwierdzenia na punkcie stałym.

Głównym zastosowaniem podpór sprężystych jest kompensacja dużych odkształceń termicznych rurowciągów pracujących pod wysoką lub niską temperaturą.

Drugim miejscem jest kompensacja odkształceń powstałych od przesuwania się całych aparatów, takich jak na przykład króćce dużych zbiorników magazynowych.



Jedyną możliwością, aby rura była podparta zarówno w stanie początkowym jak i końcowym jest podpora na sprężynie, która będzie w jakiś sposób podążała za ruchami rurociągu. Schemat takiej podpory przedstawiono poniżej.



Wielkość podpory sprężystej dobieramy na siłę pionową o **wartości** jak dla zimnej instalacji (lub w stanie początkowym), ale w **momencie**, gdy termiczne odkształcenia uzyskają wartości obliczeniowe czyli dla stanu gorącego (lub końcowego).

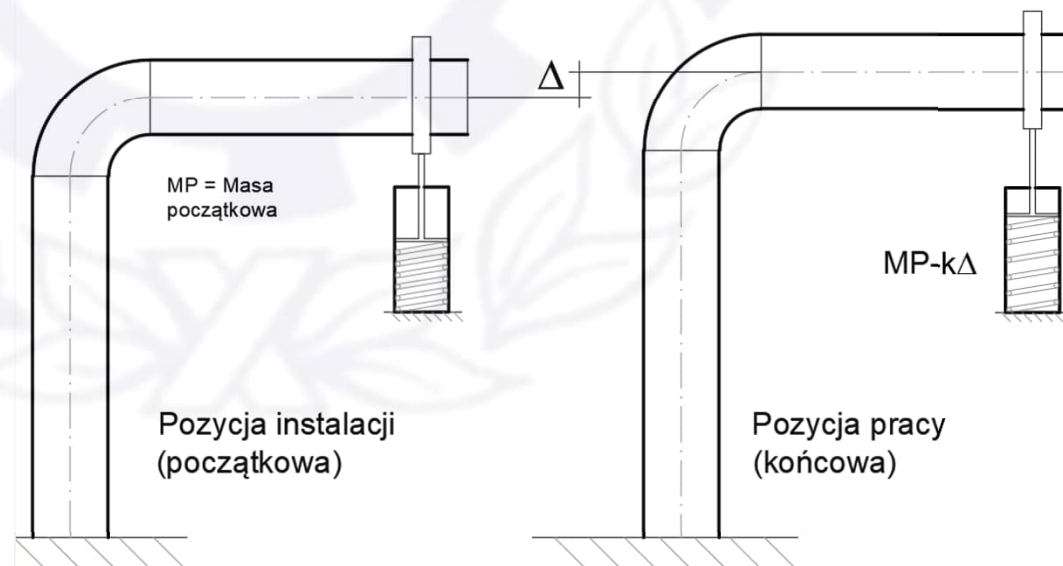
Polegając tylko na intuicji przeważnie ustawilibyśmy punkt pracy w środku operacyjnego zakresu pracy, czyli pomiędzy największym i najmniejszym ściśnięciem sprężyny w podporze. Niestety w rzeczywistości układy rurociągów z podporami sprężystymi są zbilansowane tylko albo w chwili instalacji SUS (cold load), albo w czasie pracy OPE (Hot load).

HOT LOAD – jest porządnym obciążeniem w warunkach pracy. Obciążenie końcowe lub operacyjne

COLD LOAD – jest ustawieniem napięcia sprężyny, tak aby uzyskać obciążenie o wartości HOT LOAD w stanie pracy: Obciążenie początkowe lub instalacyjne.

$$CL = HL + k\Delta$$

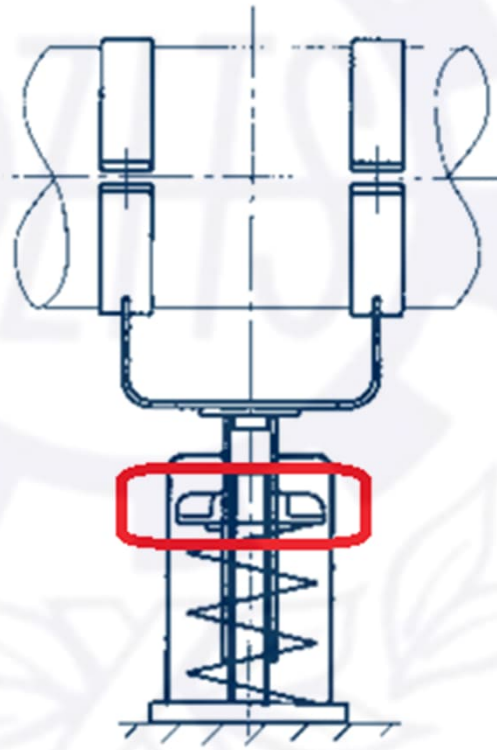
W stanie instalacji (początkowym) sprężyna podpory (na szkicu po prawo) jest ściśnięta przez masę rurociągu. W stanie pracy (końcowym) sprężyna jest mniej ściśnięta ponieważ rurociąg podnosi się w górę.



Podczas doboru podpory sprężystej interesuje nas siła w punkcie podparcia w trakcie pracy. Producent ściska sprężynę podczas produkcji za pomocą przesuwanych pierścieni do wartości siły podanej przez projektanta. Jest to tzw **Preset Load**. Od tej siły będzie się odejmowała siła o wartości $k \times D$. Po przesunięciu się w górę o wartość D w warunkach pracy (końcowych) będzie się ona równała sile na podporze rurociągu. W zależności od algorytmu doboru Preset Load równe jest Cold Load czyli sile w warunkach początkowych.

HL – obliczone z programu
 Δ – obliczone z programu
k – stała sprężyny producenta

$$CL = HL + k\Delta$$



 **LISEGA**

$$F(H) = 3,62 \text{ kN}$$

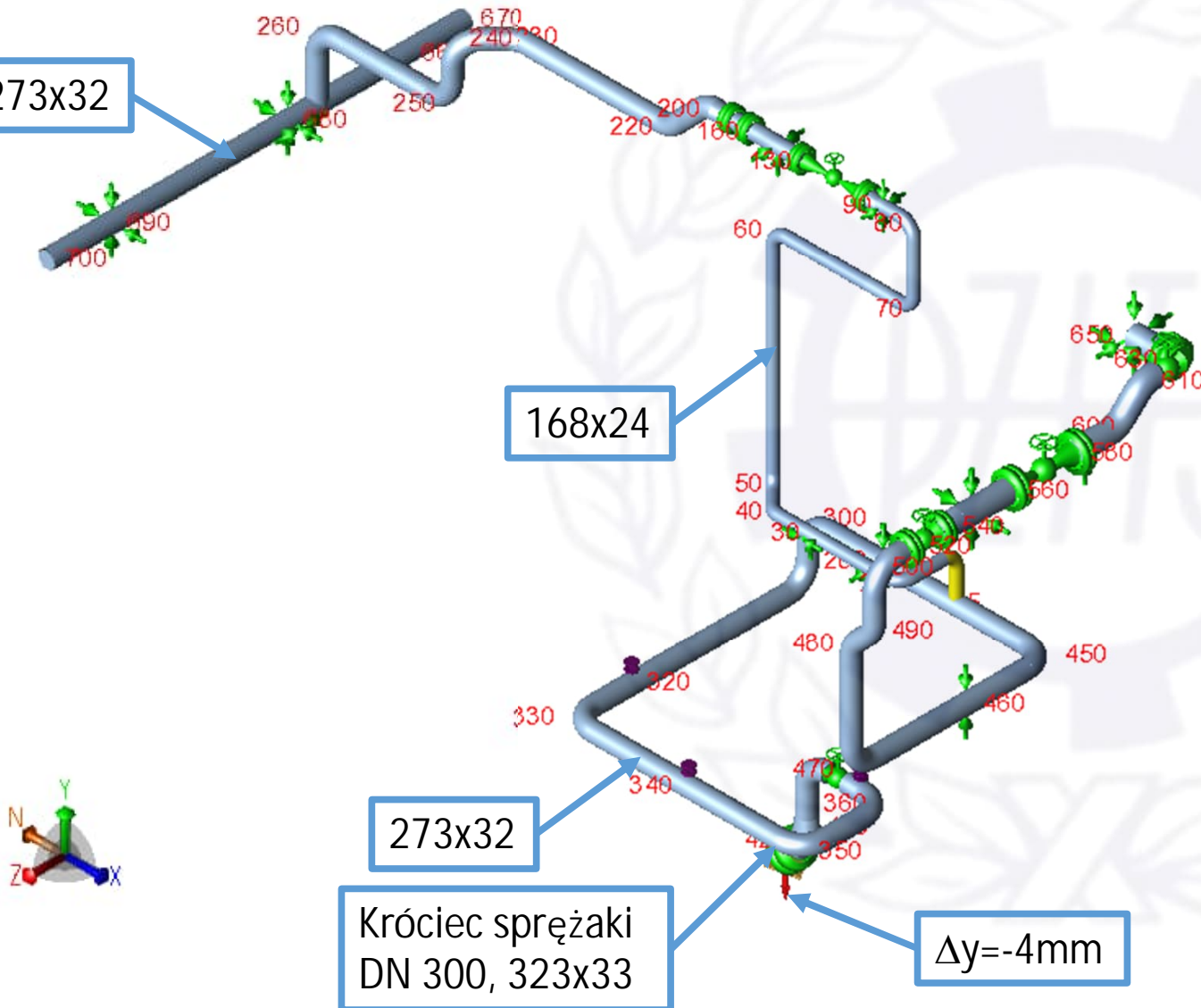
$$F(C) = 3,70 \text{ kN}$$

$$F(P) = 3,70 \text{ kN}$$

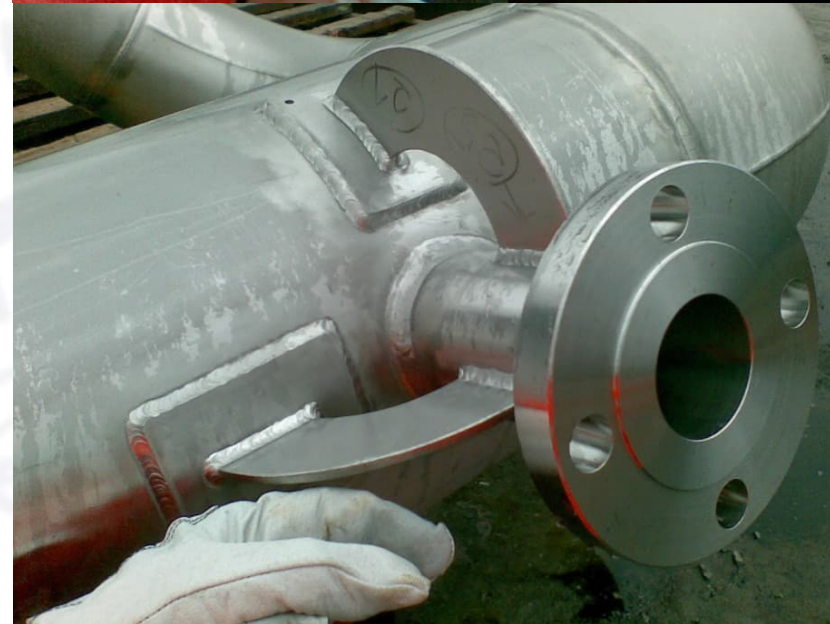
Model obliczeniowy

W celu weryfikacji obliczeń wykonano model systemu rurociągów w programie CaesarII. Poniżej przedstawiono tabelę z parametrami obliczeniowymi instalacji.

Oznaczenie	Jed.	Wartość
Materiał	-	A 790
Naddatek na korozję	mm	0
Klasa ciśnienia	-	#4500
Szereg wymiarowy	-	Sch 120
Ciśnienie obliczeniowe	barg	500
Temperatura obliczeniowa górna	C	130
Temperatura obliczeniowa dolna	C	-46
Dopuszczalne naprężenie od przesunięcia, Sa	MPa	309



Zdjęcia spoin



Rozróżnia się trzy rodzaje obciążeń: trwałe (ang. sustained loads), incydentalne (ang. occasional loads) oraz wyjątkowe (ang. exceptional loads).

Obciążenia trwałe to:

- Pochodzące od masy w stanie postoju, czyli masa rurociągu, zaworów czy izolacji,
- Pochodzące od masy w stanie pracy, na przykład od przyspieszenia związanego z przechyłem instalacji, na przykład na statku,
- Ciśnienie zewnętrzne i wewnętrzne,
- Rozszerzalność termiczna rurociągu,
- Odziaływanie podparć rurociągów, takie jak sztywność podparcia jak i ruch podłoża,
- Obciążenie śniegiem i lodem instalacji pracującej na stałe w warunkach arktycznych

Naprężenia dopuszczalne dla obciążeń trwałych dla danego materiału w danej temperaturze i ilości cykli poniżej 7000 zdefiniowane są w normach projektowych.

Do obciążeń incydentalnych zalicza się:

- Uderzenie hydrauliczne,
- Przepływ dwufazowy,
- Obciążenie wiatrem, śniegiem i lodem
- Wpływ trzęsienia ziemi,
- Wibracje i kawitacja,
- Obciążenie podczas otwarcia zaworów bezpieczeństwa,

Naprężenia dopuszczalne dla obciążeń incydentalnych zależą od częstości i czasu ich wystąpienia. Jeżeli wystąpią nie więcej niż przez 10 godzin w jednym bloku i nie 100 godzin rocznie to naprężenie dopuszczalne wynosi 1,33 naprężenia dla obciążeń trwałych opisanych powyżej. Jeżeli jest to odpowiednio 50 godzin/blok i 500 godzin w roku, to mnożnik jest mniejszy i wynosi 1,2. Dla obciążeń typu drugorzędnych i trwa jednorazowo nie dłużej niż 50 godzin i nie więcej niż 500 h/rok, dopuszczalne jest przekroczenie ciśnienia znamionowego lub dopuszczalnego naprężenie obliczeniowe ciśnieniowe w temperaturze stanu podwyższonego o nie więcej niż 20%.

Obciążenia wyjątkowe nie definiuje się ściśle w normach, ponieważ ta klasyfikacja zależy od decyzji projektanta. Dla przykładu można wskazać obciążenie od uderzenia obiektem latającym lub spadającym kontenerem, czyli tak zwane drop object loads. Zgodnie z poniższą interpretacją obciążenia pochodzące od przesunięć punktów statycznych podczas trzęsienia ziemi należą do tej kategorii.

Zarówno w dyrektywie ciśnieniowej PED jak i ASME rozróżnia się trzy rodzaje naprężenia w rurociągach:

- Naprężenia podstawowe odpowiedzialne za deformację plastyczną i w konsekwencji plastyczne pęknięcie materiału,
- Naprężenie podrzędne powodujące niestabilną deformację prowadzącą do przyrostowego pęknięcia,
- Chwilowe naprężenia szczytowe powodujące zmęczeniowe zniszczenie.

Naprężenie podstawowe (ang. primary **stress**) jest spowodowane przez obciążenie trwałe, takie jak masa. Niebezpieczeństwo związane z tymi obciążeniami polega na tym, że po przekroczeniu granicy plastyczności nie ma możliwości zatrzymania się procesu uplastycznienia. Proces ten rozpoczyna się lawinowo aż do zerwania materiału. Jeżeli będziemy stopniowo zwiększać masę, to naprężenie i odkształcenie w zakresie sprężystym będzie zgodne z prawem Hooke'a. Po przejściu granicy plastyczności materiał rurociągu znacznie mniej lub bardziej gwałtownie i niekontrolowanie się uplastyczniać. W rezultacie naprężenie trwałe jest ograniczone granicą plastyczności materiału. Jeśli w całym przekroju rurociągu jest przekroczona granica plastyczności, to tylko usunięcie obciążenia masą może zabezpieczyć przed zniszczeniem materiału, **co nie jest możliwe w rzeczywistej instalacji.**

Naprężenie podrzędne (ang. secondary **stress**) powstają w konstrukcji w wyniku ograniczenia możliwości przesuwu w osi rurociągu, czego typowym zjawiskiem jest rozszerzalność cieplna materiału lub inne obciążenia powodujące przemieszczenie rurociągu. W rezultacie to odkształcenie materiału balansuje obciążenie przemieszczeniem, a powstałe naprężenie jest wynikowe i zależy od cech materiału. Proces odkształcania się materiału zakończy się, gdy przemieszczenie będzie zakończone, co oznacza, że nie nastąpi gwałtowne i niekontrolowane odkształcenie się materiału. W związku z tym zjawiskiem lokalne odkształcenie w systemie rurociągów są źródłem samoograniczających się naprężeń. Dodatkowo uważa się, że naprężenia podrzędne nie powodują plastycznego zniszczenia materiału. Naprężenie mogą osiągnąć granicę plastyczności bez widocznej deformacji powłoki rurociągu i zniszczenie materiału jest oceniane przez dopuszczalny zakres odkształcenia, a nie naprężenia. W rzeczywistości projektowej naprężenia podrzędne bardzo rzadko powodują przekroczenie granicy plastyczności. Z drugiej strony tradycyjnie rzecz ujmując to analiza wytrzymałościowa rurociągów jest oparta o analizę naprężeń w powłoce rurociągów, a nie odkształceń, których analiza jest bardziej skomplikowana. W związku z tym w analizie używa się naprężenia zredukowanego w zakresie sprężystym (ang. elastic equivalent stress). Do zmęczeniowego zniszczenia wymagana jest duża ilość cykli, co wypadku odkształceń od temperatury zwykle nie występuje.

Naprężenia podrzędne są klasyfikowane jako naprężenia spowodowane przez ograniczenia przemieszczeń. Naprężenia szczytowe natomiast (ang. pick stress) są takie, które z reguły nie powodują odkształceń, a co za tym idzie wysokiego poziomu naprężenia. Poza obszarem techniki nuklearnej tego typu naprężenia są rzadko rozpatrywane.

Wyniki analizy – Kategorie naprężenia



Stresses

Point:	FS07
	(Branch)
Sustained (Max) -	N/mm ²
Stress:	9
Allow.:	138
Ratio:	0.06
Combin.:	GR + Max P{4}
Expansion (Max) -	N/mm ²
Stress:	20
Allow.:	207
Ratio:	0.10
Combin.:	TR:Amb to T1{1}
Occasional (Max) -	N/mm ²
Stress:	104
Allow.:	183
Ratio:	0.57
Combin.:	SUS+OCC (SAM+INERTIA) X
Hoop (Max) -	N/mm ²
Stress:	13
Allow.:	117
Ratio:	0.11
Combin.:	Max P{1}

Use PgDn, PgUp keys to roll thru categories

Naprężenia trwałe (sustain) są takimi, które pozostaną systemie na zawsze. Jakakolwiek uchybienie w montażu lub przy produkcji rury powoduje przekroczenie powyżej 100 % . Mają one też drugą bardzo złą cechę. Należą do rodziny primary loads, czyli takich, których przekroczenie spowoduje zniszczenie konstrukcji bo następuje dodatnie sprzężenie zwrotne.

Można akceptować naprężenia od obciążeń sporadycznych do wartości 99%, ale nigdy dla obciążeń trwałych.

Obciążenie od przemieszczenia (expansion), czyli secondary stress nie powoduje niekontrolowanego uplastycznienia, tak jak to się ma z obciążeniami trwałymi (typu sustain). Dlatego choć uważam to za inżynierskie szaleństwo, to 99% wyężenia dla displacement stress nie jest do natychmiastowego odrzucenia. Należy zwrócić uwagę projektantowi aby zdecydowanie zmniejszył tą wartość.

Maximum sustained stress

Point	:	T02
Stress	N/mm2	: 111.69
Allowable	N/mm2	: 113.33
Ratio	:	0.99
Load combination	:	GR + Max P{1}

Maximum displacement stress

Point	:	Z10
Stress	N/mm2	: 241.75
Allowable	N/mm2	: 245.37
Ratio	:	0.99
Load combination	:	Max Range

Maximum hoop stress

Point	:	Z10
Stress	N/mm2	: 61.18
Allowable	N/mm2	: 113.33
Ratio	:	0.54
Load combination	:	Max P{1}

W analizie użyto 38 statycznych kombinacji obciążenia oraz dodatkowo obciążenie wybuchem o wartości 20 kPa / 0,2 bara.

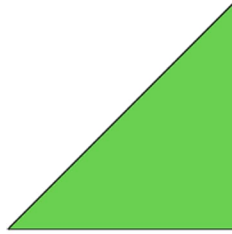
Podczas sprawdzania tego typu obliczeń w pierwszym rzędzie należy zwrócić uwagę na wartość naprężeń stałych (ang. primary stress), które oznaczone są jako SUS (ang. sustain). Dopuszczalna wartość współczynnika wykorzystania materiału (ang. ratio) nie powinien przekraczać 50%, choć wartość ta nie jest nigdzie normowana.

- 1 (HGR) W
- 2 (HGR) W+T1+P1
- 3 (OPE) W+T1+P1+H
- 4 (OPE) W+T2+P1+H
- 5 (OCC) W+T1+P1+H+WIN1
- 6 (OCC) W+T1+P1+H+WIN2
- 7 (OCC) W+T1+P1+H+WIN3
- 8 (OCC) W+T1+P1+H+WIN4
- 9 (OCC) W+T2+P1+H+WIN1
- 10 (OCC) W+T2+P1+H+WIN2
- 11 (OCC) W+T2+P1+H+WIN3
- 12 (OCC) W+T2+P1+H+WIN4
- 13 (SUS) W+P1+H
- 14 (OPE) W+D1+T1+P1+H
- 15 (OPE) W+D1+T2+P1+H
- 16 (SUS) W+D1+P1+H
- 17 (SUS) W+H
- 18 (OCC) CASE NOT ACTIVE
- 19 (OCC) CASE NOT ACTIVE
- 20 (OCC) CASE NOT ACTIVE
- 21 (OCC) CASE NOT ACTIVE
- 22 (OCC) CASE NOT ACTIVE
- 23 (OCC) CASE NOT ACTIVE
- 24 (OCC) CASE NOT ACTIVE
- 25 (OCC) CASE NOT ACTIVE
- 26 (OCC) L26=L13+L18
- 27 (OCC) L27=L13+L19
- 28 (OCC) L28=L13+L20
- 29 (OCC) L29=L13+L21
- 30 (OCC) L30=L13+L22
- 31 (OCC) L31=L13+L23
- 32 (OCC) L32=L13+L24
- 33 (OCC) L33=L13+L25
- 34 (EXP) L34=L3-L13
- 35 (EXP) L35=L4-L13
- 36 (EXP) L36=L3-L4
- 37 (OCC) L37=L5,L6,L7,L8,L9,L10,L11,L12
- 38 (OCC) L38=L3,L4,L13

*** CODE COMPLIANCE EVALUATION PASSED ***

Highest Stresses: (KPa)			
Ratio (%):	48.7		@Node	595	LOADCASE: 13 (SUS) W+P1+H
Code Stress:	98365.3		Allowable Stress:	201838.7	
Axial Stress:	85505.9		@Node	410	LOADCASE: 13 (SUS) W+P1+H
Bending Stress:	18634.7		@Node	150	LOADCASE: 13 (SUS) W+P1+H
Torsion Stress:	3681.7		@Node	359	LOADCASE: 13 (SUS) W+P1+H
Hoop Stress:	192954.1		@Node	410	LOADCASE: 13 (SUS) W+P1+H
Max Stress Intensity:	270828.3		@Node	420	LOADCASE: 13 (SUS) W+P1+H

Nazwa typu kombinacji



Analiza projektu rurociągów w programie Caesar II w warunkach obliczeniowych pokazała, że istniejące podparcia rurociągów jest zasadniczo prawidłowe, o ile wszystkie ich funkcje są utrzymane w praktyce. Kontrola wykazała jednak, że tak nie jest i konieczne były działania naprawcze na kilku podporach.

W przypadku pierwszej podpory P1, która był najbardziej narażony na wibracje, analiza wykazała, że funkcję LG i HD można ustawić bez szczeliny. Podpora będzie nadal mogła przesuwać się osiowo, aby dostosować się do rozszerzeń ale nie na boki. Funkcja HD będzie w tym przypadku również przeciwdziałać podnoszeniu, które w przeciwnym razie wydaje się występować z powodu zmniejszonego ciężaru na najbliższym zaworze. Dodatkowa podkładka stalowa (shim plate) jest również wymagana pod podporą, aby wyeliminować istniejące szczeliny i zapewnić funkcję RS tej podpory.

Podpora druga P2 musi być również spoczywać na konstrukcji (shim plate), tak aby uchwyt podpory spoczywał na konstrukcji nośnej.

Wszystkie podkładki dystansowe (shim plate) w rurociągu muszą zostać wymienione tak, aby obejmowały całą szerokość pod uchwytami podpór i co najmniej całą szerokość belki podporowej. W ten sposób podpory będą zapewniały lepszą i pełniejszą funkcję RS tych podpór. Istniejące podkładki pod podporami były generalnie zbyt wąskie i niewystarczająco stabilne.

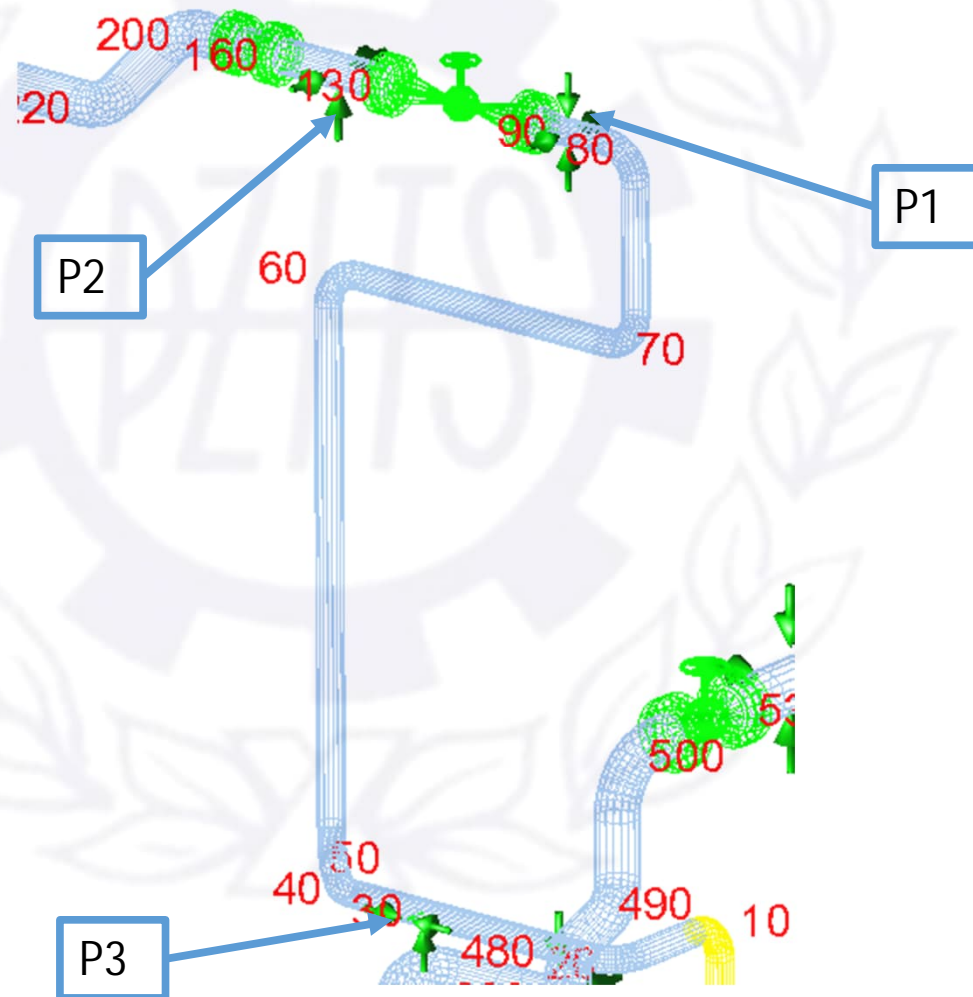
Podpory sprężynowe na linii można zachować w dotychczasowym typie i ustawieniu, ale wymienić na nowe, aby zapewnić funkcjonalność.

Najistotniejsza usterka związana z problemem drgań została znaleziona na podporze P3, gdzie w profilu konstrukcji pod podporą wystąpiło pęknięcie, przez co była ona niestabilna poprzecznie. Naturalną przyczyną pęknięcia jest przeciążenie (z powodu błędu projektowego konstrukcji podpory) spowodowane brak stężeń profilu pod podporą. Naprawa miała ogromne znaczenie dla stabilności rury.

Podsumowanie

Analiza drgań została przeprowadzona na podstawie istniejących podpór i stwierdzono, że najniższa częstotliwość drgań własnych wynosi 5,03 Hz, a zatem jest to minimalna granica 5 Hz.

Dla systemu pracującego jak to miało miejsce bez podpory (szczelina w funkcji RS) określone dwie częstotliwości własne są zbyt niskie i wynoszą 1,47 Hz i 2,18 Hz. W ten sposób potwierdzono roboczą tezę bo w obszarze, w którym zaobserwowano najwięcej drgań (między węzłami 80 i 200 przy zaworze) właśnie brak było prawidłowo działających podpór rurociągów.



Podsumowanie

Rurociąg jest podłączona do sprężarki króćcu węzła 440.

Z powodu brak prawidłowej funkcji podparcia, kołnierz został poddany działaniu momentem zginającym 5483 Nm z odpowiadającą mu siłą osiową 4207 N. Zostało to obliczone za pomocą metody Blicka i Kelloga. Jest to w zakresie maksymalnego dopuszczalnego momentu zginającego wynoszącego 176 281 Nm.

Redukcja obciążenia króćca osiągnięta jest marginalna, i wynosi 5210 Nm i siły osiowej 897 N.

Stwierdzono również, że obciążenie od wybuchu jest prawidłowe przy momencie zginającym 118 941 Nm i sile osiowej 51 649 N. Jak widać z tabeli, potwierdzono, że stan całkowitego obciążenia króćca sprężarki był nieco wyższy, ale nie ma to dalszych konsekwencji w scenariuszu wybuchowym.

Kierunek siły	Wariant z uszkodzoną podporą	Wariant z naprawioną podporą
F _x	3664	2200
F _y	-9616	-3468
F _z	3678	4915

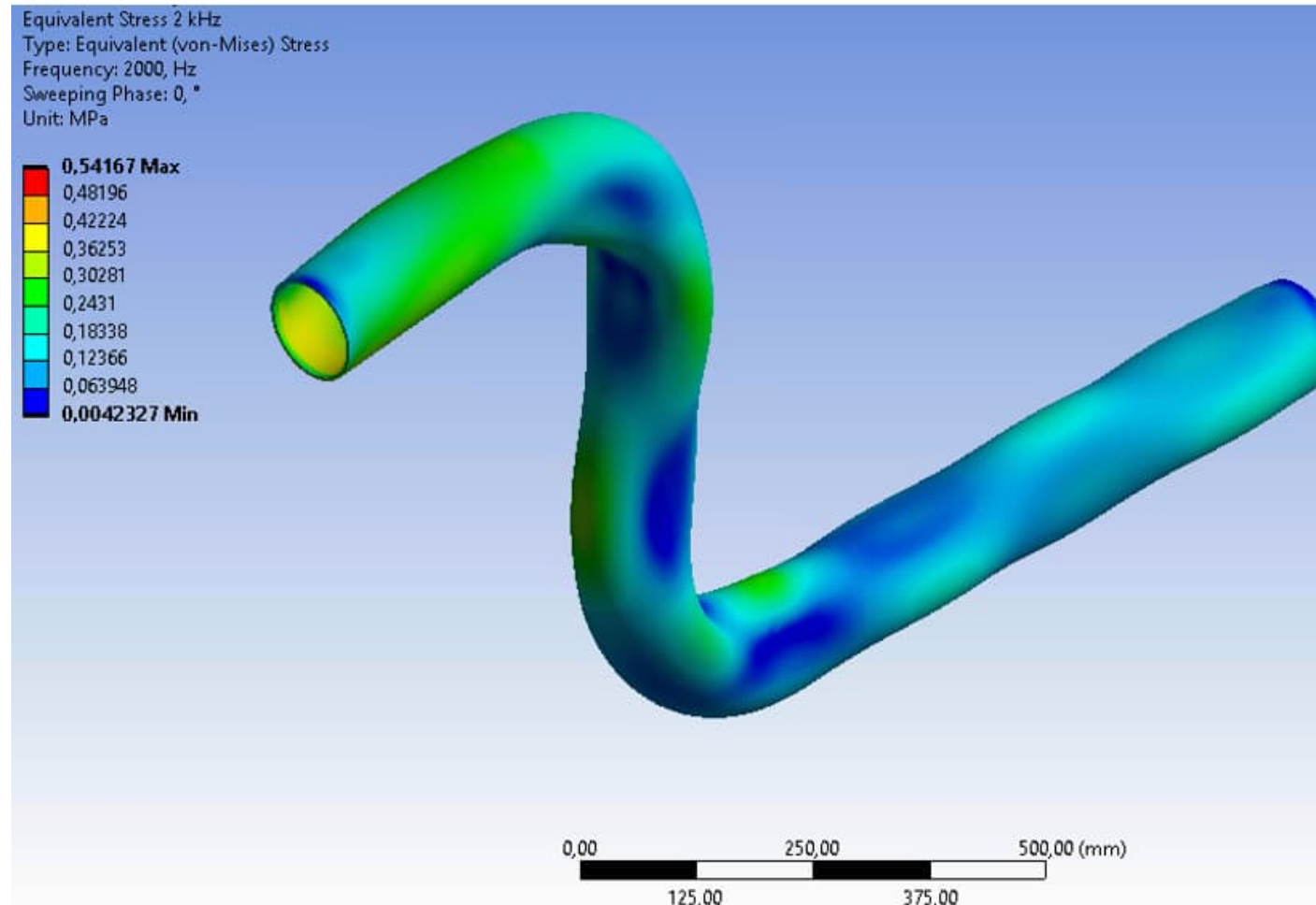
Suplement Zmęczenie akustyczne (Acoustically Inducted Vibration)

Tego typu zmęczenie jest zjawiskiem, który należy brać pod uwagę także w rurociągach, choć najczęściej jest ono kojarzone z techniką lotniczą. Dotyczy ono przede wszystkim rurociągów procesowych o dużych średnicach większych niż 250 mm o bardzo dużej prędkości przepływu medium. Spadek ciśnienia na oporach miejscowych są proporcjonalne do kwadratu prędkości, więc przy dużych prędkościach pojawia się w związku z ich istnieniem także bardzo duży hałas wysokich częstotliwości. Przekłada się on na wibracje obwodowe o niewielkiej amplitudzie, ale wysokiej częstotliwości. W konsekwencji wystąpienia tego zjawiska (ang. Acoustically Inducted Vibration AIV) szybko zostaje wyczerpany zapas zmęczeniowy materiału rurociągu. Najbardziej narażone są rurociągi flar, zaworów bezpieczeństwa turbokompresorów, miejsca lokalizacji zwężeń przekroju takie jak grzybki zaworów regulacyjnych, spawane elementy rurociągu takie jak trójniki, weldolety i podpory.

W latach 80 XX wieku Carrucci i Muller zaproponowali metodę oceny podatności rurociągów na zmęczenie typu AIV, która doczekała się bogatej literatury. Jednym z głównych elementów jest wykres (ważny tylko dla konkretnego typu stali) oszacowujący zakres bezpiecznej pracy rurociągów. Należy zwrócić uwagę, że zgodnie z nim o wystąpieniu zjawiska AVI możemy mówić powyżej 150 dB mocy akustycznej oraz dla średnic większych niż DN 250. Nie oznacza to, że w wypadku konkretnej instalacji, której koszty awaryjnego postoju mogą być olbrzymie, nie należy te dwa warunki brzegowe znacznie obniżyć. Jest to jak zawsze zależy do wiedzy i doświadczenia projektanta. Cały problem jest w prawidłowym określeniu wartości ciśnienia wewnętrznego fali akustycznej generowanej wywnętrz rurociągu podczas wystąpienia zjawiska AIV.

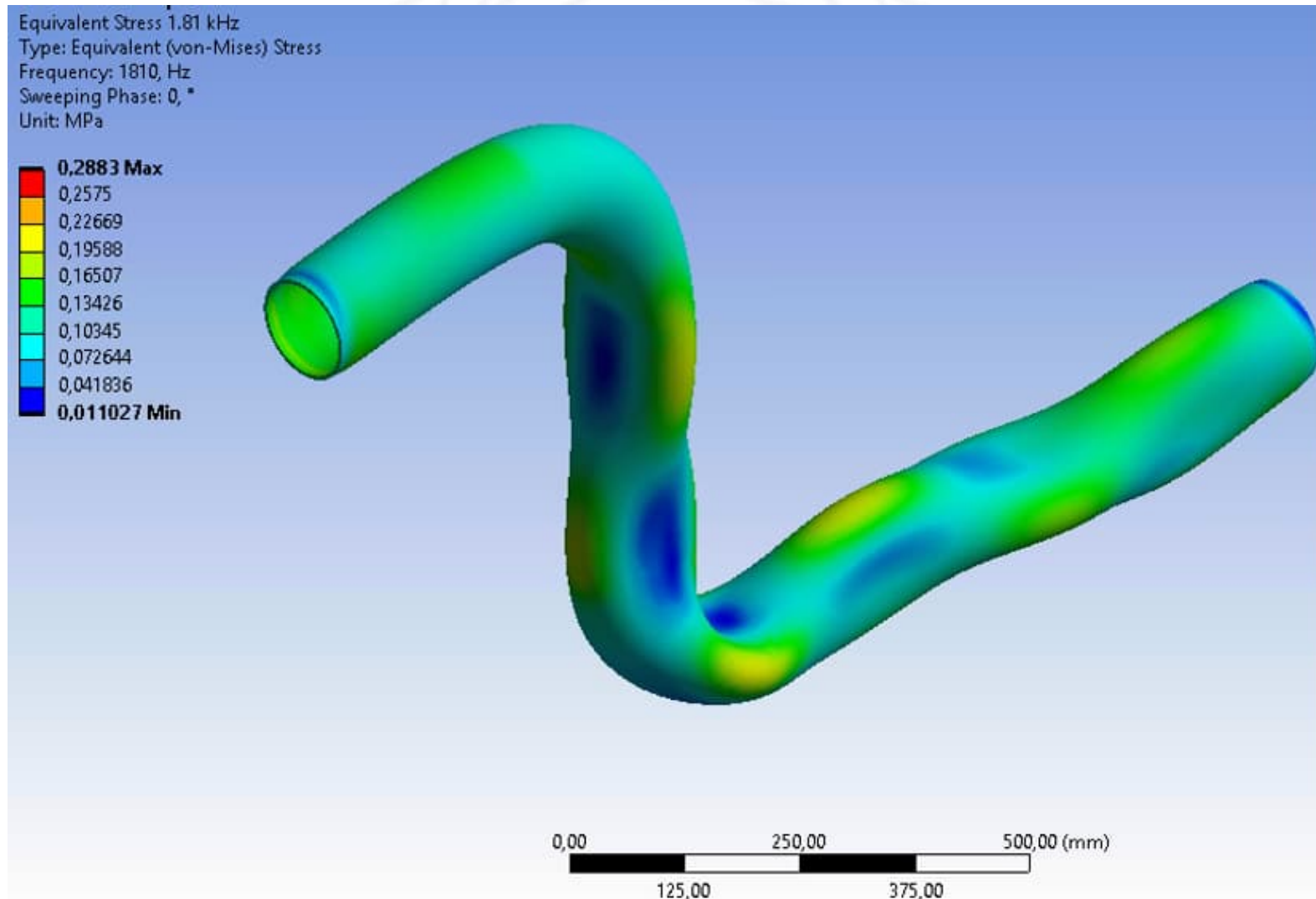
Suplement Zmęczenie akustyczne (Acoustically Induced Vibration)

Poniżej przedstawiam prostą symulację działania zmęczenia akustycznego. Jest to odcinek rurociągu zamocowany na dwóch końcach i poddany ciśnieniu wewnętrznemu. Naprężenie zredukowane w odcinkach rurociągu zmienia się w zależności od częstotliwości, a wartość maksymalną wykazuje przy 1240 Hz.



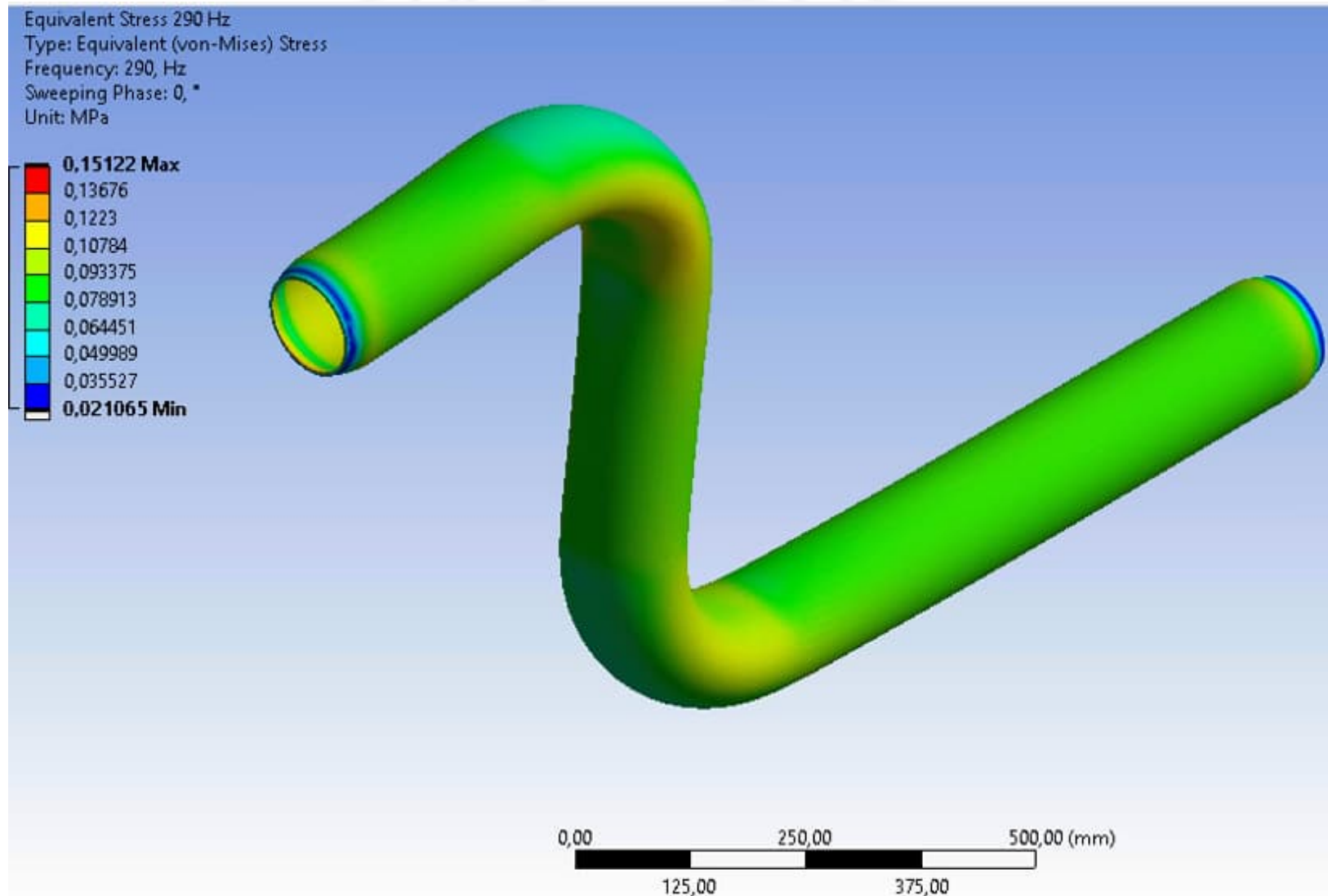
Suplement

Zmęczenie akustyczne (Acoustically Inducted Vibration)



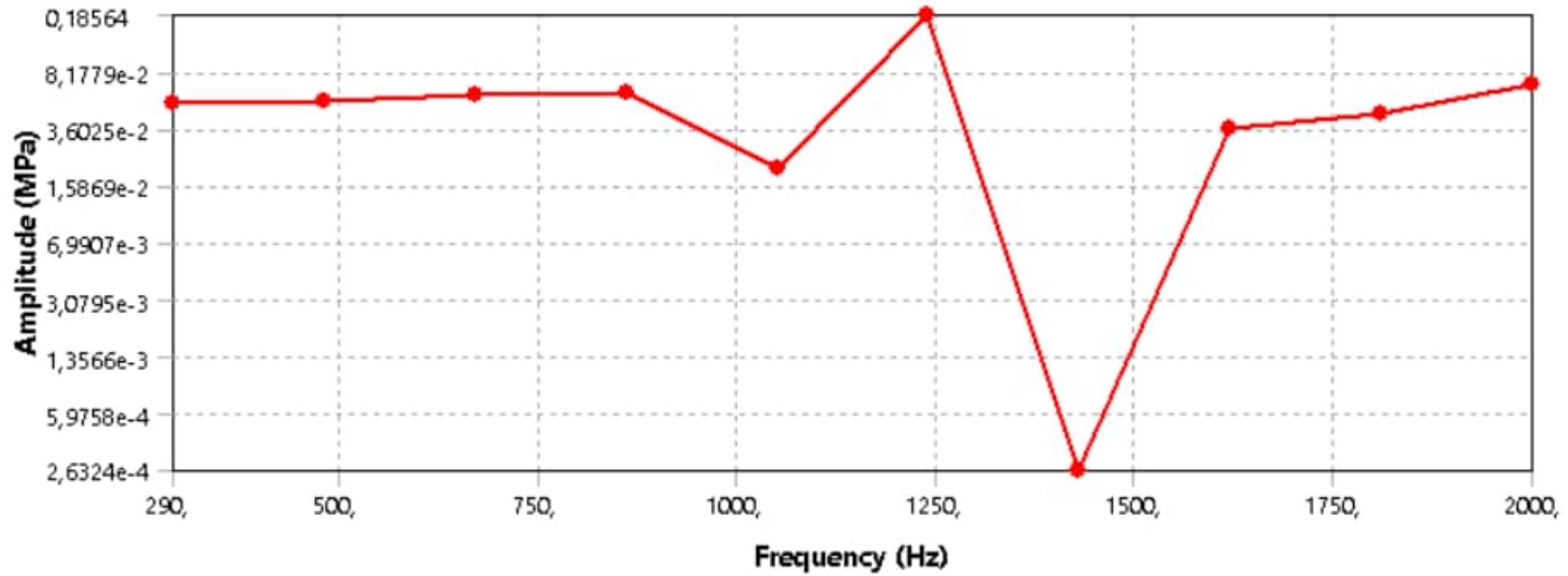
Suplement

Zmęczenie akustyczne (Acoustically Inducted Vibration)



Suplement

Zmęczenie akustyczne (Acoustically Inducted Vibration)



- dr inż. w zakresie inżynierii mechanicznej - spawalnictwo i mechaniki pęknięcia
- Rzecznawca Stowarzyszenia Inżynierów Mechaników Polskich SIMP w zakresie: kotły parowe i zbiorniki ciśnieniowe (501), spawalnictwo i łączenie metali (209) i urządzenia klimatyzacyjne i chłodnicze (404).
- Ekspert Naczelnej Organizacji Technicznej nr AA070 - Inżynieria mechaniczna
- Międzynarodowy inżynier i inspektor spawalniki IWE i IWI-C
- Uprawnienia projektowe i wykonawcze Wa 307/01 w zakresie instalacji, sieci i urządzeń wodnych, kanalizacyjnych, wentylacji i klimatyzacji, ciepłych i gazowych
- Rzecznawca Polskiej Izby Inżynierów Budownictwa w zakresie sieci i urządzeń wodnych, kanalizacyjnych, wentylacji i klimatyzacji, ciepłych i gazowych
- Certyfikat kompetencji LE w zakresie chłodnictwa i pomp ciepła w zakresie projektowania oraz czynności w/g PN - EN 13313
- Rzecznawca Polskiego Stowarzyszenia Rzecznawców i Biegłych Sądowych
- Weryfikowany przez Mazowiecką Izbę Inżynierów Budownictwa kandydat na biegłego sądowego
- Inżynier Europejski EUR ING FEANI