



Politechnika  
Śląska

# ANALIZY DOŚWIADCZALNE I OBLICZENIOWE CYLINDRYCZNYCH SZYB ZESPOLONYCH

---

mgr inż. Kinga Zemła

dr hab. inż. Marcin Kozłowski, prof. PŚ

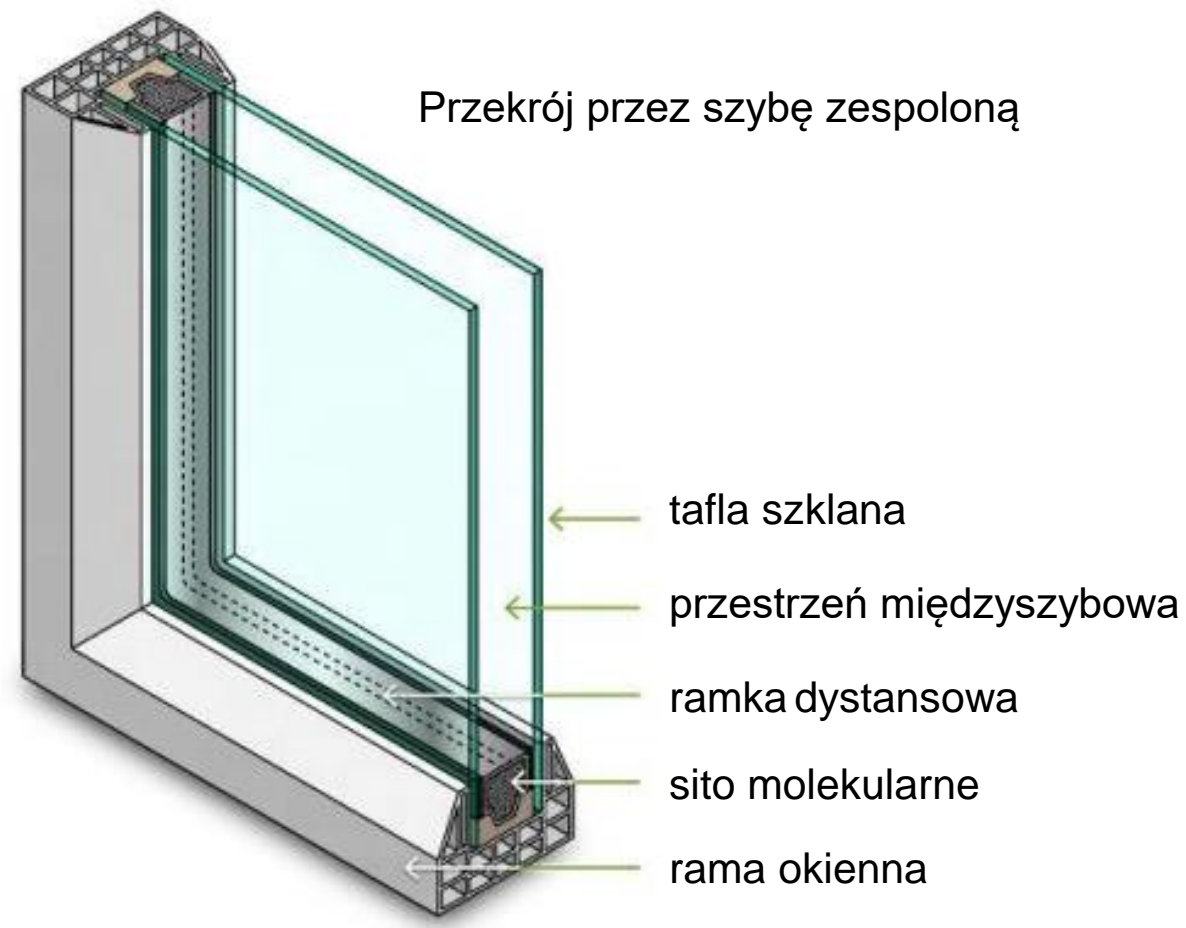
Wydział Budownictwa  
Politechnika Śląska

# Plan wystąpienia

- 1 Wprowadzenie
- 2 Badania szyb giętych
- 3 Analizy numeryczne
- 4 Porównanie szyb płaskich i giętych
- 5 Wnioski i dalsze prace



# Wstęp



Źródło: <https://jc-glass.en.made-in-china.com/product/mwstLKBvrTUO/China-Wholesale-Real-Factory-Silicone-Curved-Low-E-Tempered-Heat-Insulating-Insulation-Insulated-Glass.html>



# Zastosowanie szyb giętych



Biurowiec Zwycięstwa 52

Źródło: <https://www.officelist.pl/en/oferta/zwyciestwa-52>

# Wstęp

**Dlaczego analizowanie zespolonych szyb giętych jest istotne?**

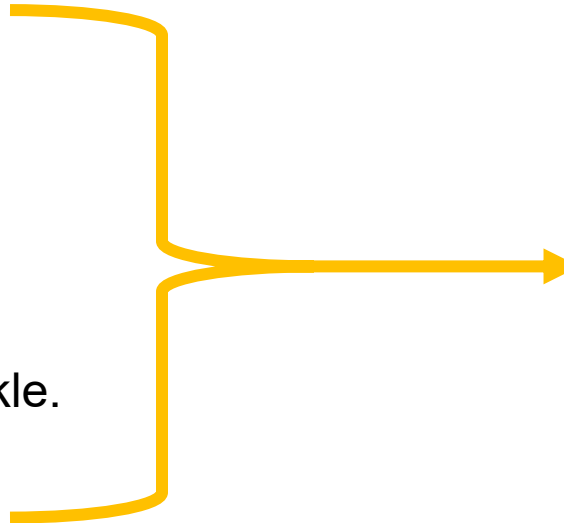


Źródło: <https://jc-glass.en.made-in-china.com/product/mwstLKBvrTUO/China-Wholesale-Real-Factory-Silicone-Curved-Low-E-Tempered-Heat-Insulating-Insulation-Insulated-Glass.html>

# Wstęp

Dlaczego analizowanie zespolonych szyb giętych jest istotne?

- Brak norm obliczeniowych,
- Analiza jest wymagająca,
- Zwiększone naprężenia w szkłe.

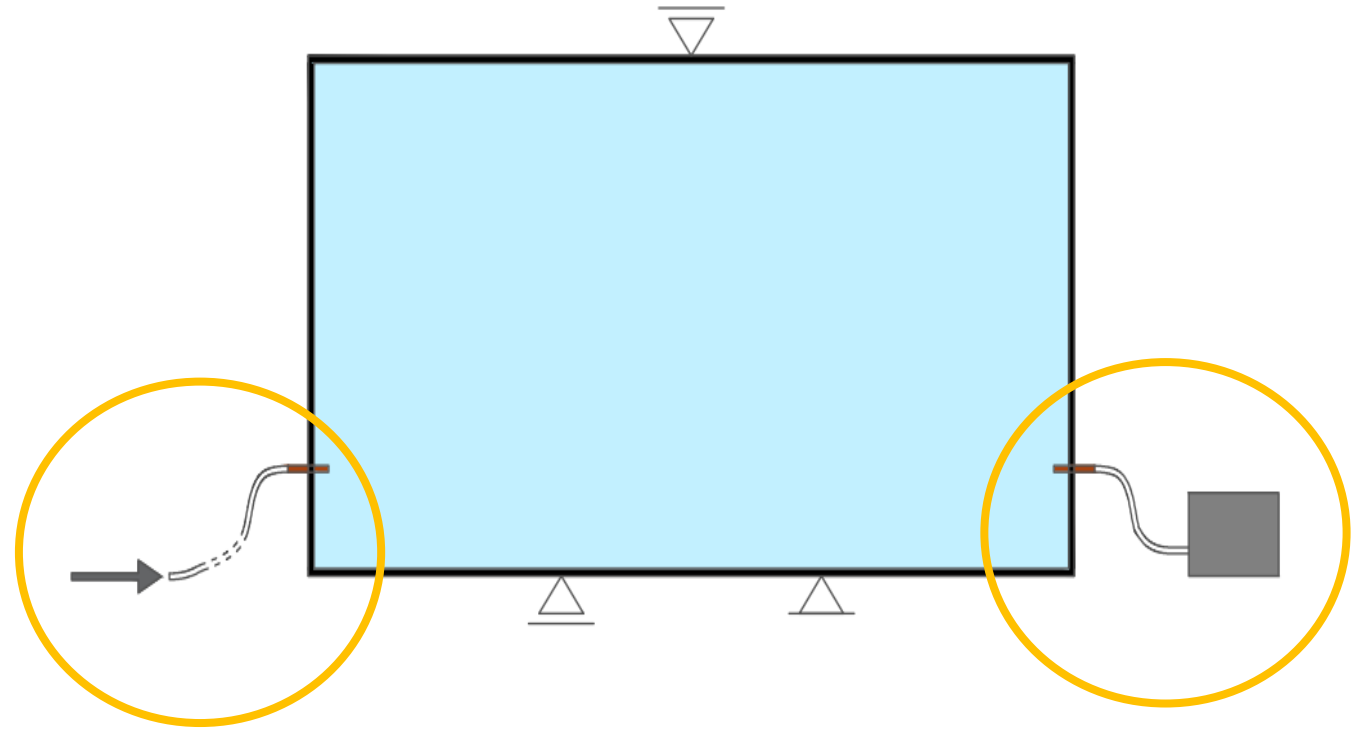


**Projekt badawczy  
MINIATURA 5**

# Badania szyb giętych

Stanowisko badawcze

- Zespalone szyby gięte (grubość 4 mm)
- Ciepła ramka (wysokości 16 mm)
- Mierzono: ciśnienie wewnętrzne, przemieszczenie

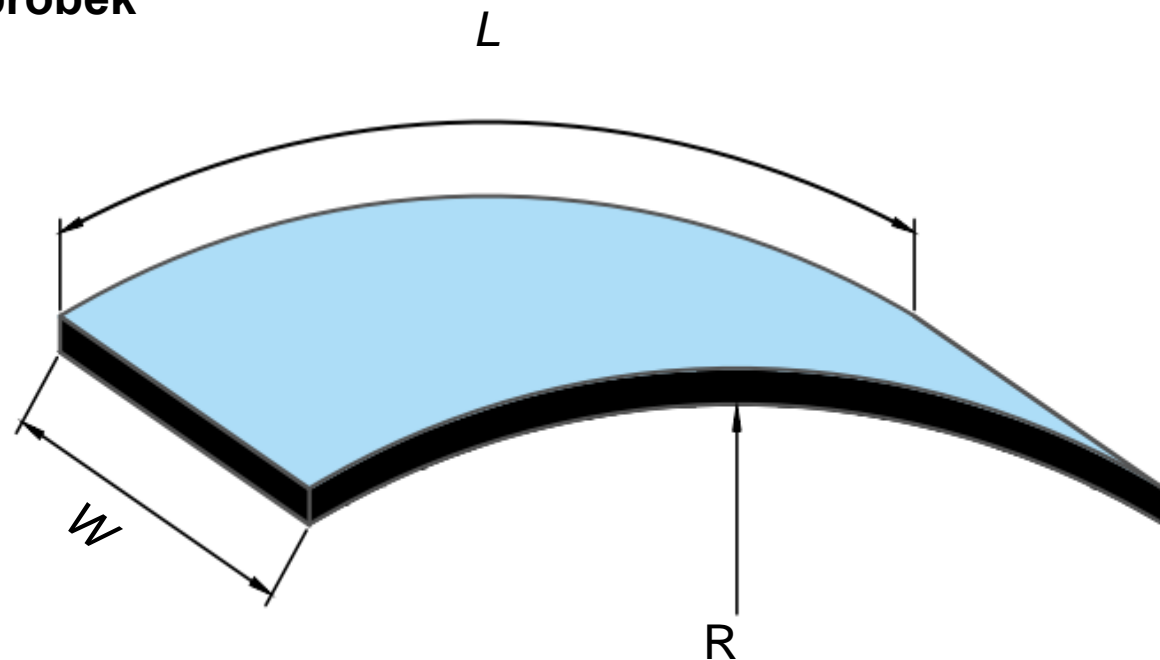


# Metodologia

Próbki szyb giętych w badaniach

## 7 typów próbek

Nazwa próbki	L [mm]	R [mm]	W [mm]	Ilość gazu [ml]
L500_R1500_T4	500	1500	500	±75
L500_R2500_T4	500	2500		
L1000_FLAT_T4	1000	0		±150
L1000_R1500_T4	1000	1500		±225
L1000_R2500_T4	1000	2500		±300
L1500_R1500_T4	1500	1500		
L1500_R2500_T4	1500	2500		

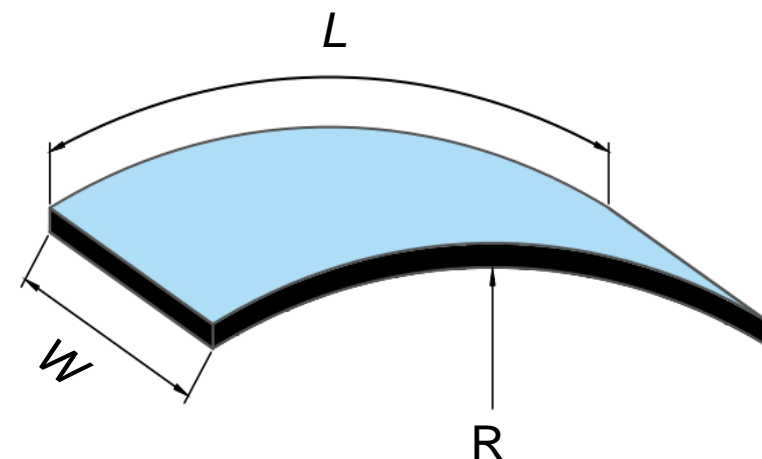




# Metodologia

Nazwa próbki	L [mm]	R [mm]	W [mm]	Ilość gazu [ml]
L500_R1500_T4	500	1500	500	±75
L500_R2500_T4	500	2500		
L1000_FLAT_T4	1000	0		±150
L1000_R1500_T4	1000	1500		±225
L1000_R2500_T4	1000	2500		±300
L1500_R1500_T4	1500	1500		
L1500_R2500_T4	1500	2500		

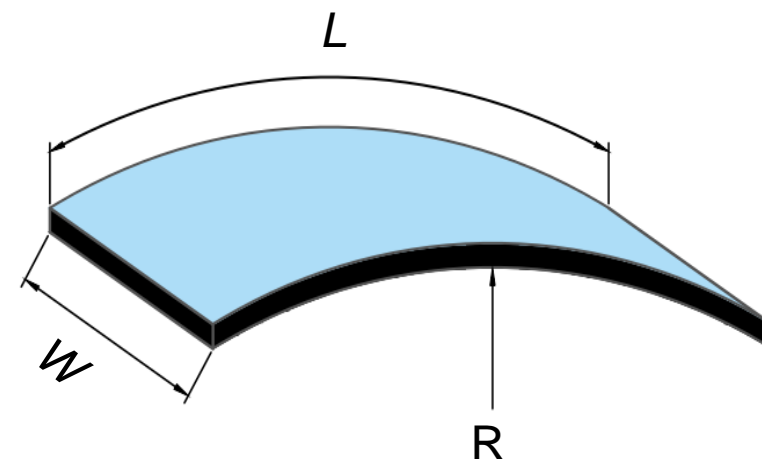
7 typów



# Metodologia

Nazwa próbki	L [mm]	R [mm]	W [mm]	Ilość gazu [ml]
L500_R1500_T4	500	1500	500	±75
L500_R2500_T4	500	2500		
L1000_FLAT_T4	1000	0		±150
L1000_R1500_T4	1000	1500		±225
L1000_R2500_T4	1000	2500		±300
L1500_R1500_T4	1500	1500		
L1500_R2500_T4	1500	2500		

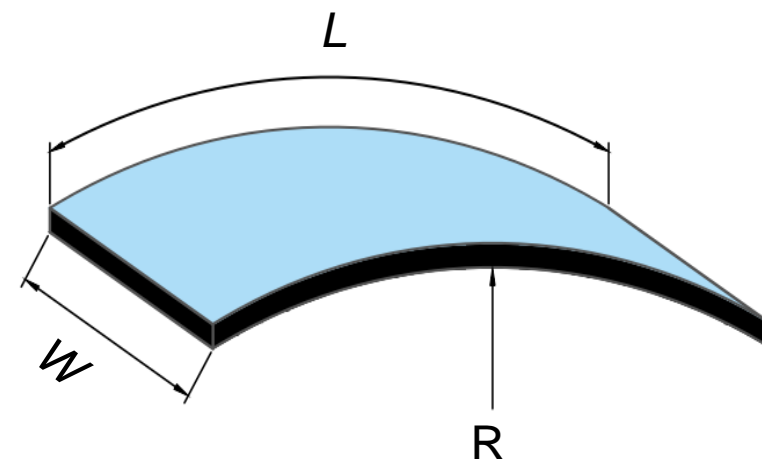
**500 ÷ 1500 mm**



# Metodologia

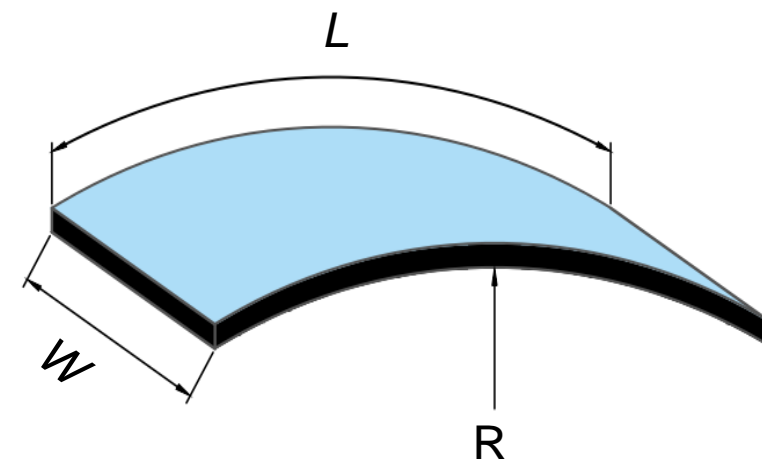
Nazwa próbki	L [mm]	R [mm]	W [mm]	Ilość gazu [ml]
L500_R1500_T4	500	1500	500	±75
L500_R2500_T4	500	2500		
L1000_FLAT_T4	1000	0		±150
L1000_R1500_T4	1000	1500		±225
L1000_R2500_T4	1000	2500		±300
L1500_R1500_T4	1500	1500		
L1500_R2500_T4	1500	2500		

**0 ÷ 2500 mm**



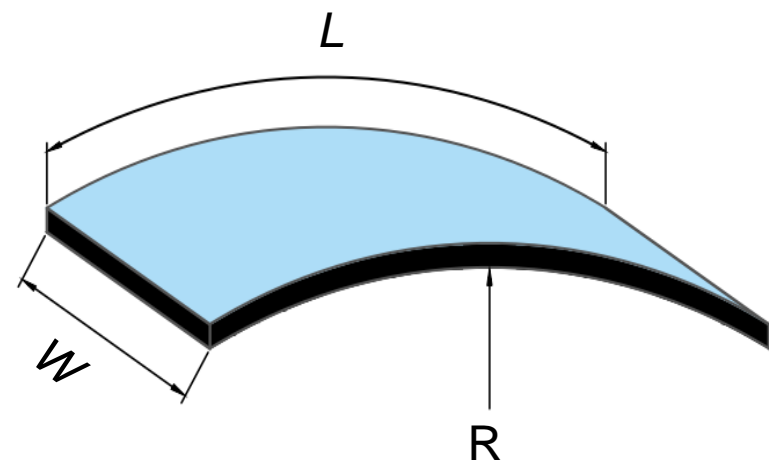
# Metodologia

Nazwa próbki	L [mm]	R [mm]	W [mm]	Ilość gazu [ml]
L500_R1500_T4	500	1500	<b>500</b>	
L500_R2500_T4	500	2500		±75
L1000_FLAT_T4	1000	0		±150
L1000_R1500_T4	1000	1500		±225
L1000_R2500_T4	1000	2500		±300
L1500_R1500_T4	1500	1500		
L1500_R2500_T4	1500	2500		



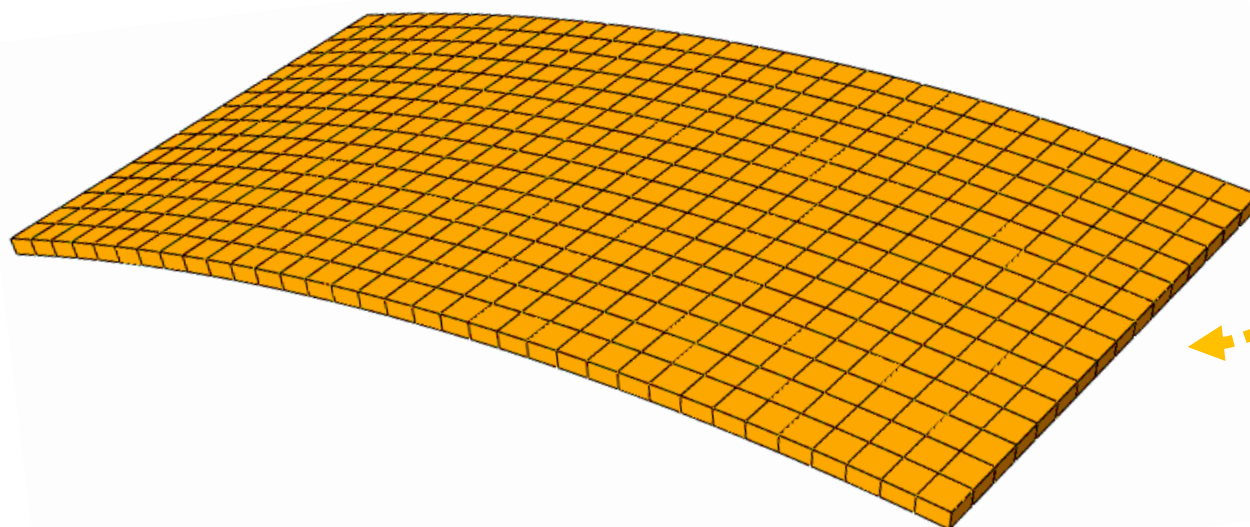
# Metodologia

Nazwa próbki	L [mm]	R [mm]	W [mm]	Ilość gazu [ml]
L500_R1500_T4	500	1500	500	
L500_R2500_T4	500	2500		±75
L1000_FLAT_T4	1000	0		±150
L1000_R1500_T4	1000	1500		±225
L1000_R2500_T4	1000	2500		±300
L1500_R1500_T4	1500	1500		
L1500_R2500_T4	1500	2500		



**75 ÷ 300 ml**

# Model numeryczny



```
frameHeight = 0.016
parameters = [[15, 2.5, 1.0, 0.5, 0.004, 0.0003, 1.0]]
```

```
for e,mainRadius,lengthArc,widthGlass,thickGlass,volFlowRate,amplTotal in parameters:
    mdb()
    angleMain = (lengthArc*360)/(2*pi*mainRadius)
    upperRadius = mainRadius - (thickGlass)
    bottomRadius = mainRadius + (frameHeight + thickGlass)
    lengthArcUpper = (angleMain/360)*2*pi*upperRadius
    lengthArcBottom = (angleMain/360)*2*pi*bottomRadius
    angleUpper = (lengthArcUpper*360)/(2*pi*upperRadius)
    angleBottom = (lengthArcBottom*360)/(2*pi*bottomRadius)
    distanceFromMiddleUpper = (math.sin(math.radians(angleUpper/4)))*upperRadius*2
    xCorrUpperGlass = (math.cos(math.radians(angleUpper/4)))*distanceFromMiddleUpper
    yCorrUpperGlass = (math.sin(math.radians(angleUpper/4)))*distanceFromMiddleUpper
    distanceFromMiddleBottom = (math.sin(math.radians(angleUpper/4)))*bottomRadius*2
    xCorrBottomGlass = (math.cos(math.radians(angleUpper/4)))*distanceFromMiddleBottom
    yCorrBottomGlass = (math.sin(math.radians(angleUpper/4)))*distanceFromMiddleBottom
    mdb.models['Model-1'].ConstrainedSketch(name='__profile__', sheetSize=1.0)
    mdb.models['Model-1'].sketches['__profile__'].Spot(point=(0.0, 0.0))
    mdb.models['Model-1'].sketches['__profile__'].Spot(point=(0.0, upperRadius))
    mdb.models['Model-1'].sketches['__profile__'].Spot(point=(0.0, bottomRadius))
    mdb.models['Model-1'].sketches['__profile__'].radialPattern(centerPoint=(0.0,
    0.0), geomList=(), number=2, totalAngle=(angleUpper/2), vertexList=(
    mdb.models['Model-1'].sketches['__profile__'].vertices[1], ))
    mdb.models['Model-1'].sketches['__profile__'].radialPattern(centerPoint=(0.0,
    0.0), geomList=(), number=2, totalAngle=(angleUpper/2), vertexList=(
    mdb.models['Model-1'].sketches['__profile__'].vertices[1], ))
    mdb.models['Model-1'].sketches['__profile__'].radialPattern(centerPoint=(0.0,
    0.0), geomList=(), number=1, totalAngle=(angleBottom/2), vertexList=(
    mdb.models['Model-1'].sketches['__profile__'].vertices[1], ))
    mdb.models['Model-1'].sketches['__profile__'].radialPattern(centerPoint=(0.0,
    0.0), geomList=(), number=3, totalAngle=(angleBottom/2), vertexList=(
    mdb.models['Model-1'].sketches['__profile__'].vertices[1], ))
    mdb.models['Model-1'].sketches['__profile__'].Arc3Points(point1=(
    -xCorrUpperGlass, (upperRadius - yCorrUpperGlass)), point2=(xCorrUpperGlass,
    (upperRadius - yCorrUpperGlass)), point3=(0.0, upperRadius))
    mdb.models['Model-1'].sketches['__profile__'].Arc3Points(point1=(
    -xCorrBottomGlass, (bottomRadius - yCorrBottomGlass)), point2=(xCorrBottomGlass,
    (bottomRadius - yCorrBottomGlass)), point3=(0.0, bottomRadius))
    mdb.models['Model-1'].sketches['__profile__'].Line(point1=(xCorrUpperGlass,
    (upperRadius - yCorrUpperGlass)), point2=(xCorrBottomGlass, (bottomRadius - yCorrBottomGlass)))
    mdb.models['Model-1'].sketches['__profile__'].Line(point1=(xCorrUpperGlass,
    (upperRadius - yCorrUpperGlass)), point2=(xCorrBottomGlass, (bottomRadius - yCorrBottomGlass)))
    mdb.models['Model-1'].sketches.changeKey(fromName='__profile__', toName=
    '__save__')
    mdb.models['Model-1'].ConstrainedSketch(name='__profile__', sheetSize=1.0)
    mdb.models['Model-1'].sketches['__profile__'].retrieveSketch(sketch=
    mdb.models['Model-1'].sketches['__save__'])
    del mdb.models['Model-1'].sketches['__save__']
    mdb.models['Model-1'].Part(dimensionality=THREE_D, name=
    'glassUnit', type=DEFORMABLE_BODY)
    mdb.models['Model-1'].parts['glassUnit'].BaseSolidExtrude(
    depth=widthGlass, sketch=mdb.models['Model-1'].sketches['__profile__'])
    del mdb.models['Model-1'].sketches['__profile__']
    mdb.models['Model-1'].parts['glassUnit'].RemoveCells(cellList=
    mdb.models['Model-1'].parts['glassUnit'].cells.getSequenceFromMask(
    mask=('[#1 ]', ), ))
    mdb.models['Model-1'].HomogeneousShellSection(idealization=NO_IDEALIZATION,
    integrationRule=SIMPSON, material='Glass', name='GlassSection',
    nodalThicknessField='', numIntPts=5, poissonDefinition=DEFAULT,
    preIntegrate=OFF, temperature=GRADIENT, thickness=0.004, thicknessField='',
    thicknessModulus=None, thicknessType=UNIFORM, useDensity=OFF)
    mdb.models['Model-1'].HomogeneousShellSection(idealization=NO_IDEALIZATION,
    integrationRule=SIMPSON, material='Spacer', name='AluSection',
    nodalThicknessField='', numIntPts=5, poissonDefinition=DEFAULT,
    preIntegrate=OFF, temperature=GRADIENT, thickness=0.01, thicknessField='',
    thicknessModulus=None, thicknessType=UNIFORM, useDensity=OFF)
    mdb.models['Model-1'].parts['glassUnit'].SectionAssignment(
    offset=0.0, offsetField='', offsetType=MIDDLE_SURFACE, region=Region(
    faces=mdb.models['Model-1'].parts['glassUnit'].faces.getSequenceFromMask(
    mask=('[#5 ]', ), )), sectionName='GlassSection', thicknessAssignment=
    FROM_SECTION)
    mdb.models['Model-1'].parts['glassUnit'].SectionAssignment(
    offset=0.0, offsetField='', offsetType=MIDDLE_SURFACE, region=Region(
    faces=mdb.models['Model-1'].parts['glassUnit'].faces.getSequenceFromMask(
    mask=('[#3a ]', ), )), sectionName='AluSection', thicknessAssignment=
    FROM_SECTION)
    mdb.models['Model-1'].rootAssembly.DatumCsysByDefault(CARTESIAN)
    mdb.models['Model-1'].rootAssembly.Instance(dependent=ON, name='glassUnit-1', part=
    mdb.models['Model-1'].parts['glassUnit'])
    mdb.models['Model-1'].Material(name='Glass')
    mdb.models['Model-1'].materials['Glass'].Elastic(table=((68640000000.0, 0.23),
    ))
    mdb.models['Model-1'].Material(name='Spacer')
    mdb.models['Model-1'].materials['Spacer'].Elastic(table=((4600000.0, 0.49),
    ))
    \\\n
```



# Wyniki

Próbka	Ilość gazu [ml]	Ciśnienie wewnętrzne z badań [Pa]	Ciśnienie wewnętrzne z numeryki [Pa]	Różnica
1000x500 R=1500	75	528.6	482.5	8.7%
	150	1066.8	960.1	10.0%
	225	1582.4	1435.7	9.3%
	300	2092.7	1906.7	8.9%
	-75	-543.1	-484.4	10.8%
	-150	-1064.3	-970.4	8.8%
	-225	-1556.3	-1464.0	5.9%
	-300	-2097.2	-1954.5	6.8%

# Wyniki

Próbka	Ilość gazu [ml]	Ciśnienie wewnętrzne z badań [Pa]	Ciśnienie wewnętrzne z numeryki [Pa]	Różnica
1000x500 R=1500	75	528.6	482.5	8.7%
	150	1066.8	960.1	10.0%
	225	1582.4	1435.7	9.3%
	300	2092.7	1906.7	8.9%
	-75	-543.1	-484.4	10.8%
	-150	-1064.3	-970.4	8.8%
	-225	-1556.3	-1464.0	5.9%
	-300	-2097.2	-1954.5	6.8%

9%

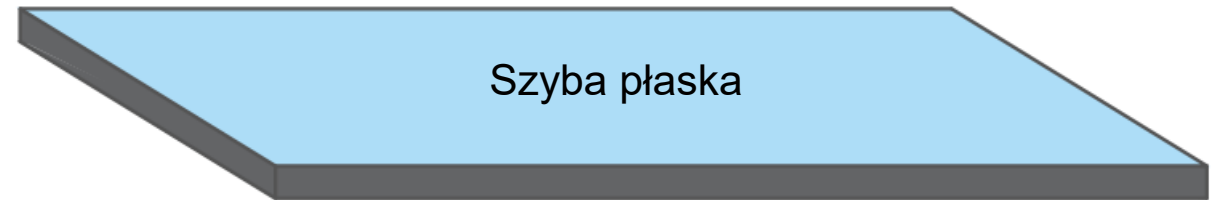
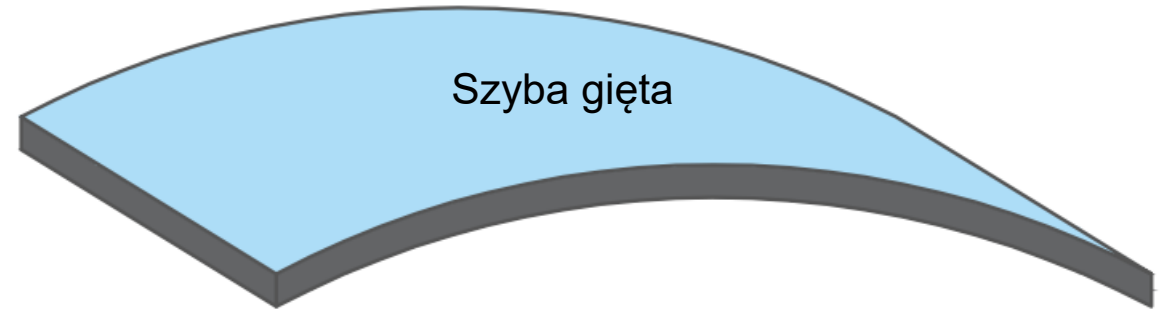
# Wyniki

Próbka	Ilość gazu [ml]	Ciśnienie wewnętrzne z badań [Pa]	Ciśnienie wewnętrzne z numeryki [Pa]	Różnica
1000x500 R=1500	75	528.6	482.5	8.7%
	150	1066.8	960.1	10.0%
	225	1582.4	1435.7	9.3%
	300	2092.7	1906.7	8.9%
	-75	-543.1	-484.4	10.8%
	-150	-1064.3	-970.4	8.8%
	-225	-1556.3	-1464.0	5.9%
	-300	-2097.2	-1954.5	6.8%

8%

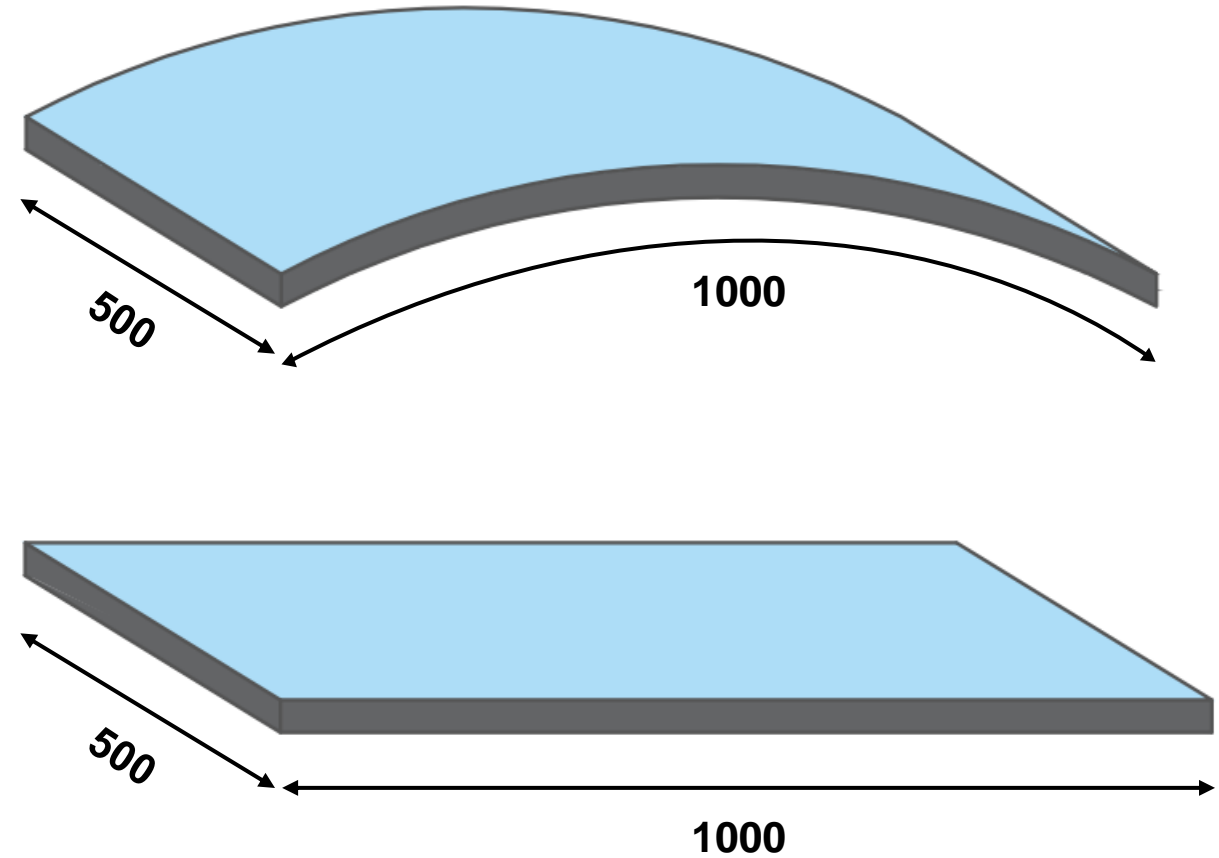
# Studium przypadku

- Porównanie szyby płaskiej oraz giętej
- Element- 1000x500 mm ( $R=1500$ )
- Obciążenia klimatyczne



# Studium przypadku

- Porównanie szyby płaskiej oraz giętej
- Element- 1000x500 mm ( $R=1500$ )
- Obciążenia klimatyczne



# Studium przypadku

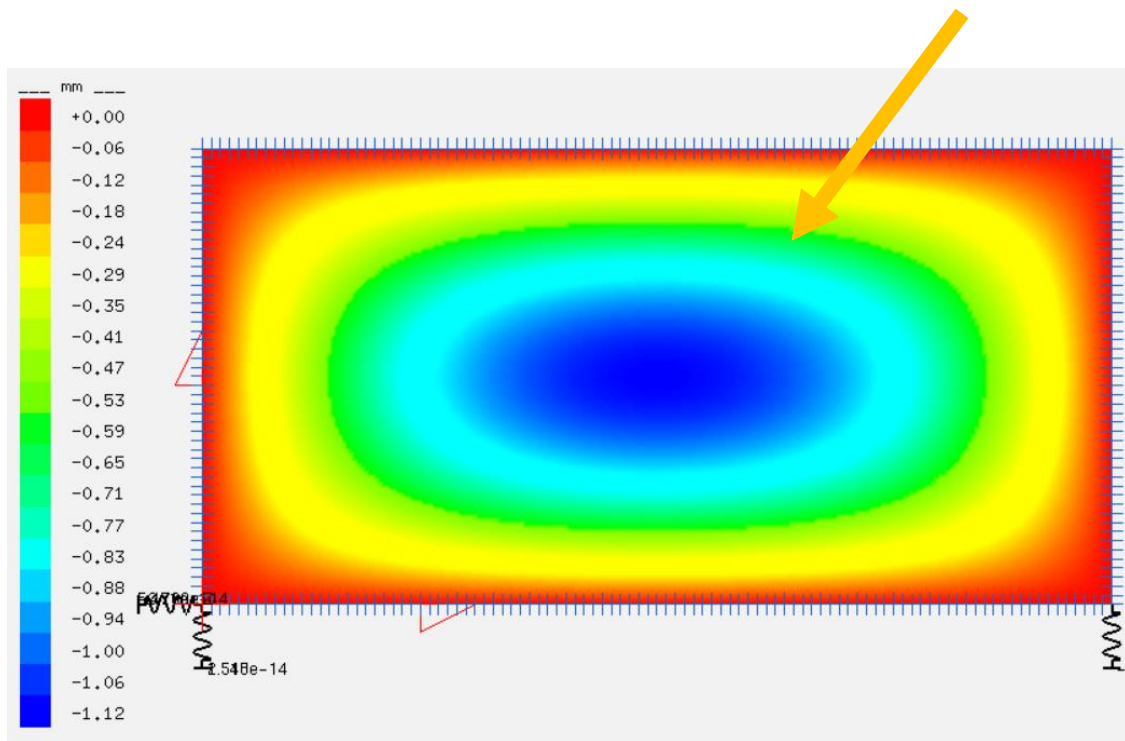
- Porównanie szyby płaskiej oraz giętej
- Element- 1000x500 mm (R=1500)
- Obciążenia klimatyczne

Kombinacja obciążenia	Różnica temperatury [K]	Zmiana ciśnienia atmosferycznego [kPa]
„Lato”	+20	-2.0
„Zima”	-25	+4.0

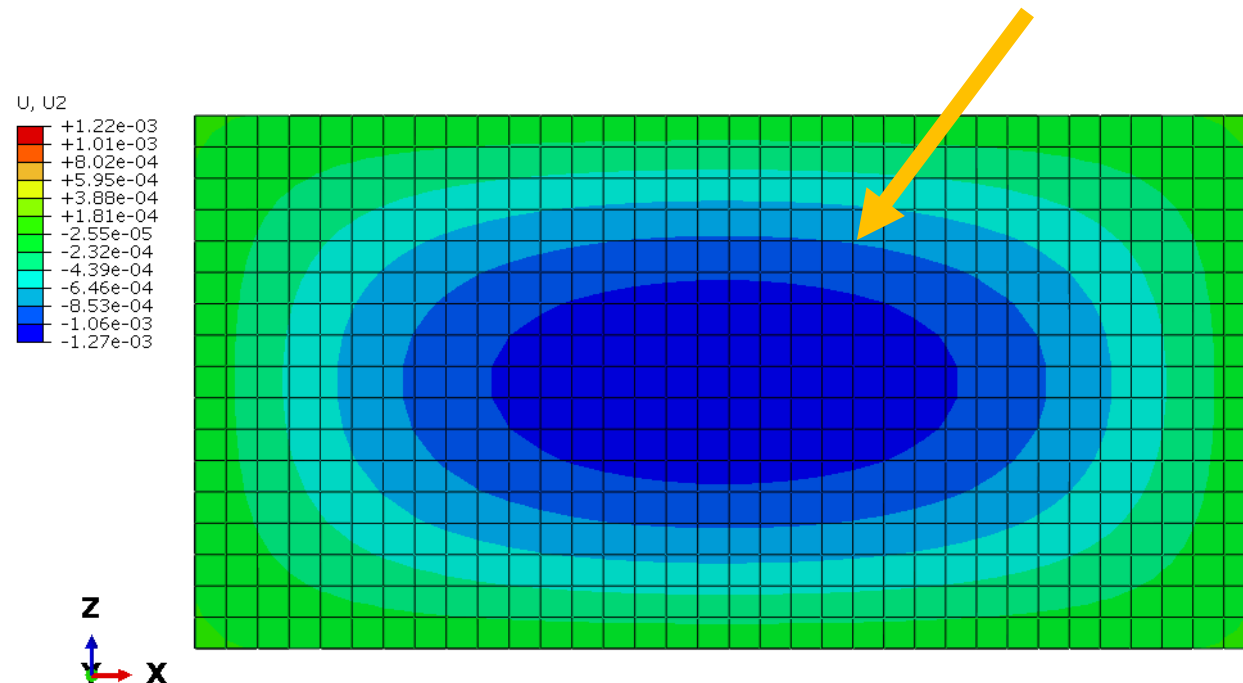


# Zespólna szyba płaska

Walidacja modelu- mapy przemieszczeń



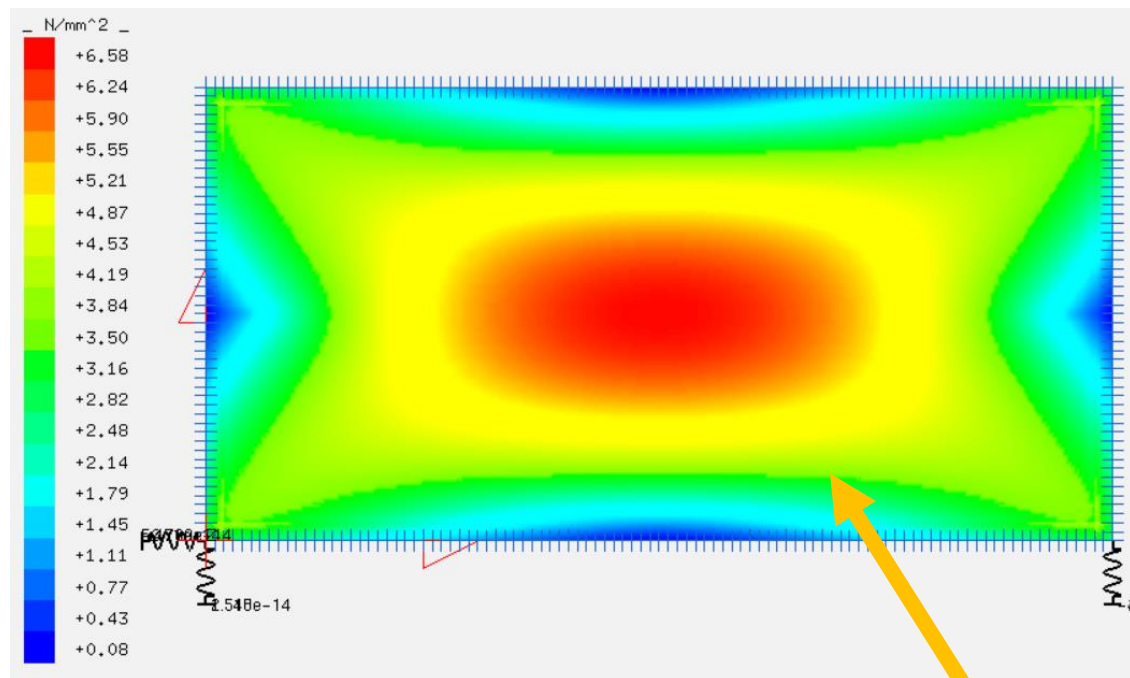
SJ MEPLA



ABAQUS

# Zespólona szyba płaska

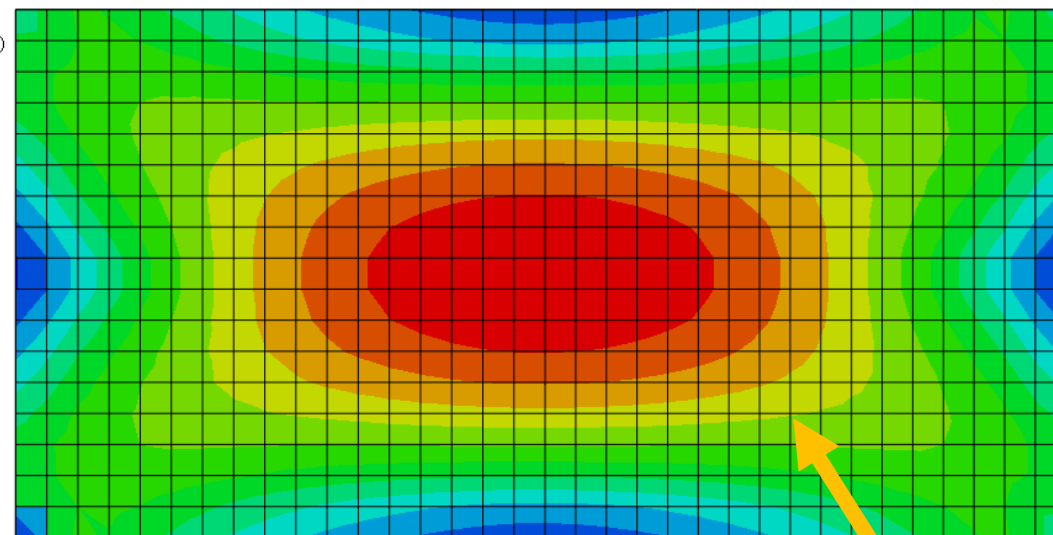
Walidacja modelu- mapy naprężeń głównych



SJ MEPLA

S, Max. Principal  
SNEG, (fraction = -1.0)  
SPOS, (fraction = 1.0)  
(Avg: 75%)

+	7.14e+06
+	6.54e+06
+	5.95e+06
+	5.35e+06
+	4.76e+06
+	4.16e+06
+	3.57e+06
+	2.97e+06
+	2.38e+06
+	1.78e+06
+	1.19e+06
+	5.95e+05
+	0.00e+00



ABAQUS

# Zespolona szyba płaska

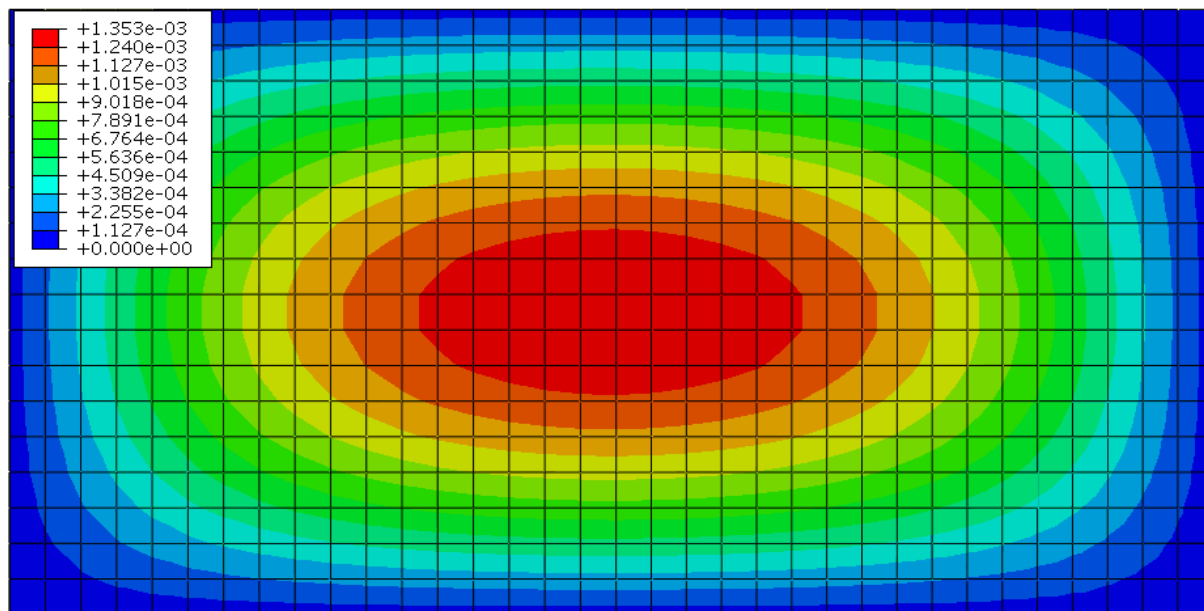
		Ciśnienie wewnętrzne [Pa]	Naprężenia [MPa]	Przemieszczenie [mm]
Lato	SJ Mepla	701	6,58	1,12
	ABAQUS	733	7,14	1,27
	Różnica	4.4%	7.8%	11.8%
Zima	SJ Mepla	-887	8,32	-1,41
	ABAQUS	-920	7,76	-1,58
	Różnica	3.6%	-7.2%	10.8%

# Zespolona szyba płaska

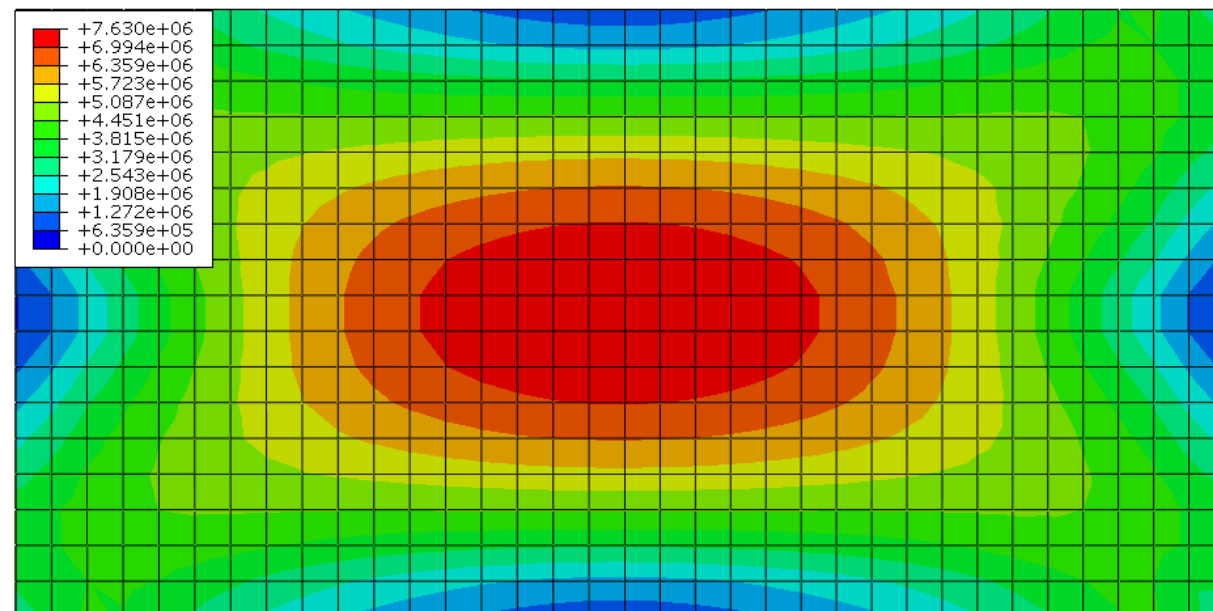
		Ciśnienie wewnętrzne [Pa]	Naprężenia [MPa]	Przemieszczenie [mm]
Lato	SJ Mepla	701	6,58	1,12
	ABAQUS	733	7,14	1,27
	Różnica	4.4%	7.8%	11.8%
Zima	SJ Mepla	-887	8,32	-1,41
	ABAQUS	-920	7,76	-1,58
	Różnica	3.6%	-7.2%	10.8%

# Zespólona szyba płaska

Model obliczeniowy z programu ABAQUS



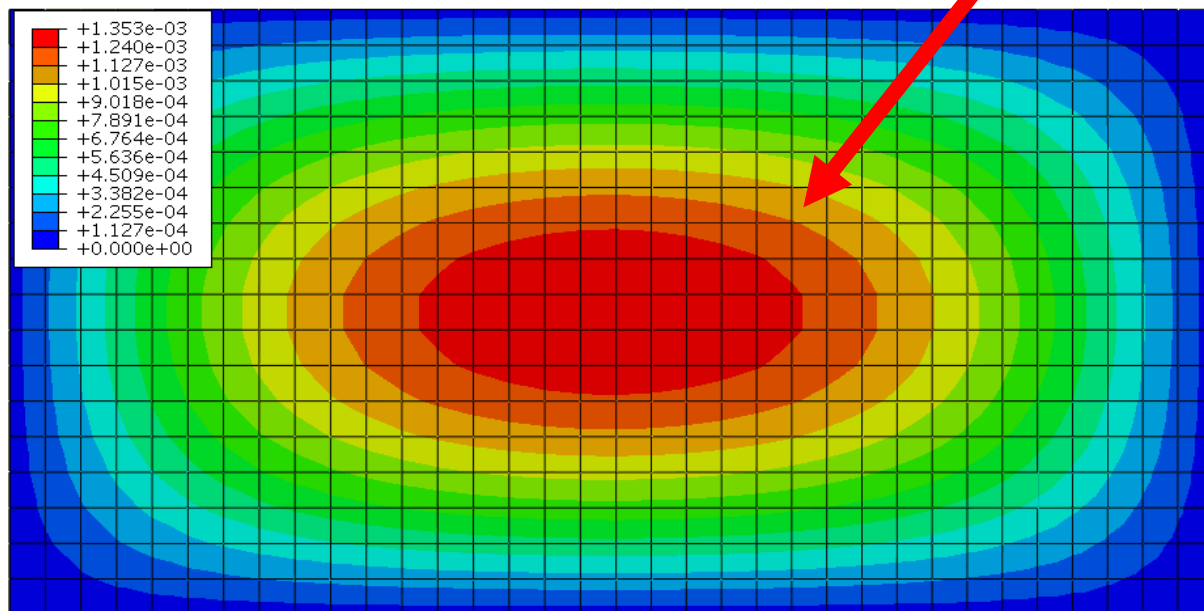
Przemieszczenia (Y)



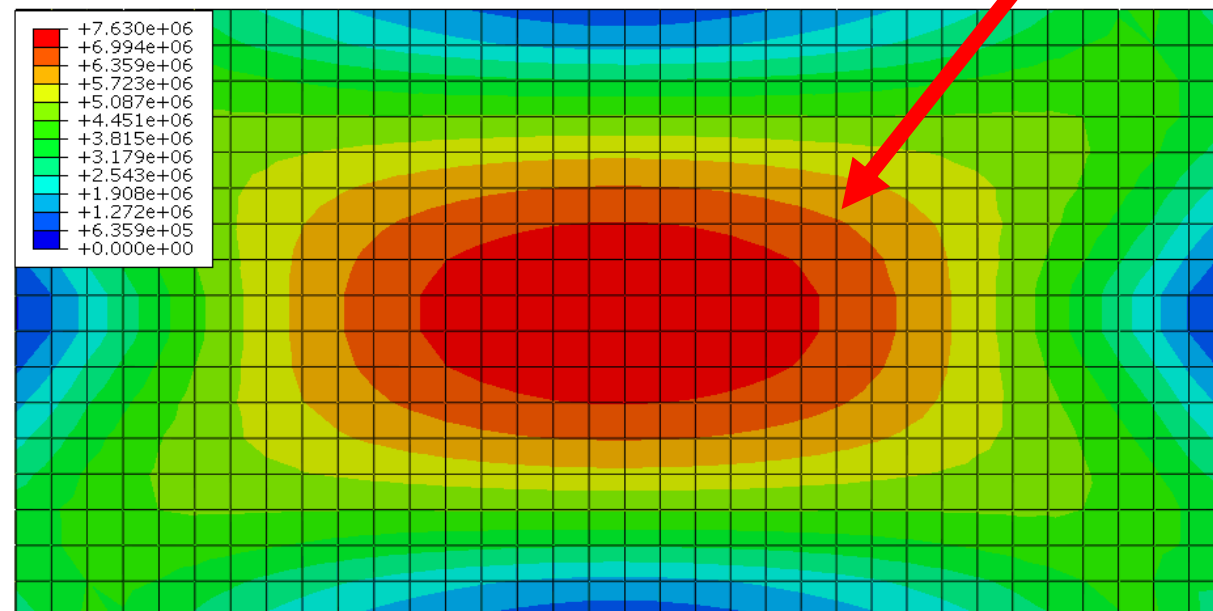
Napężenia główne rozciągające

# Zespolona szyba płaska

Model obliczeniowy z programu ABAQUS



Przemieszczenia (Y)

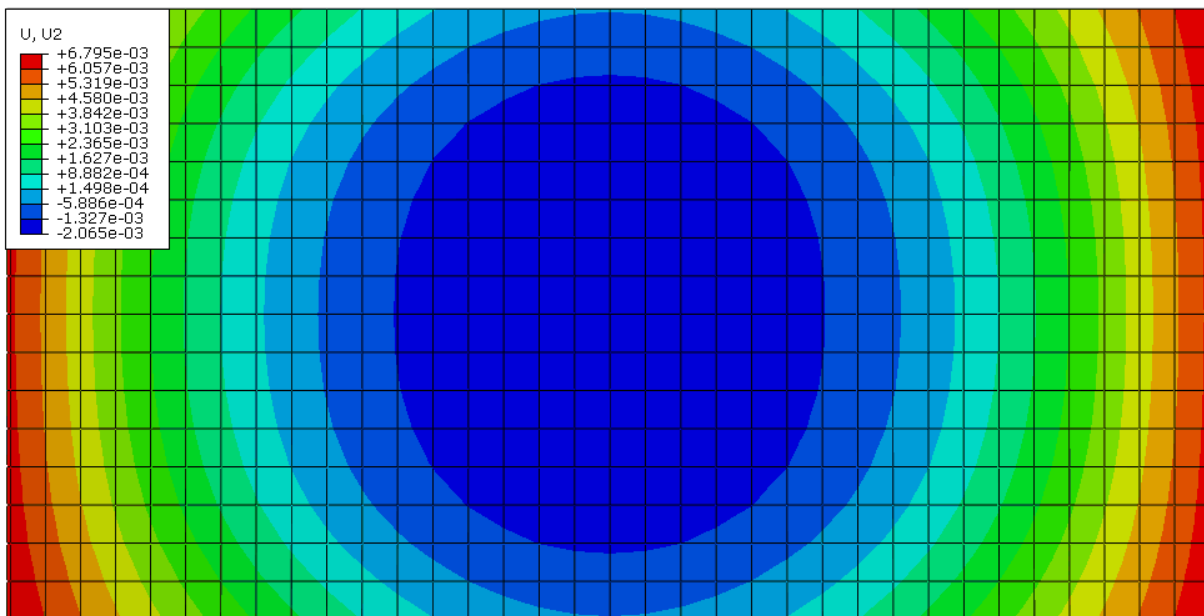


Napężenia główne rozciągające

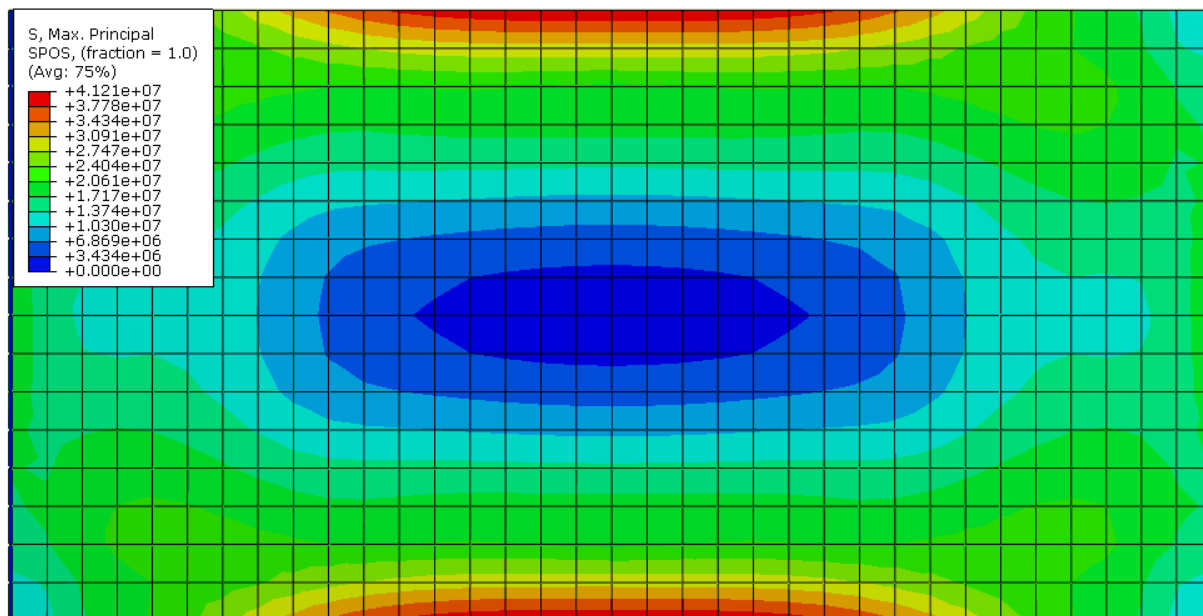


# Zespolona szyba gięta

Model obliczeniowy z programu ABAQUS



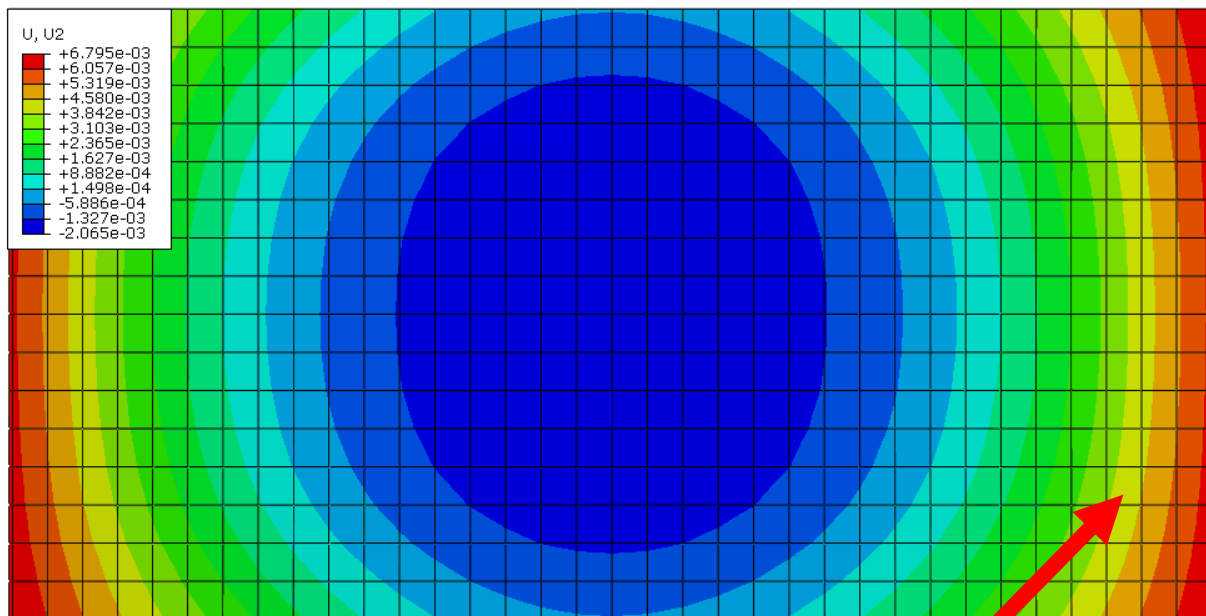
Przemieszczenia (Y)



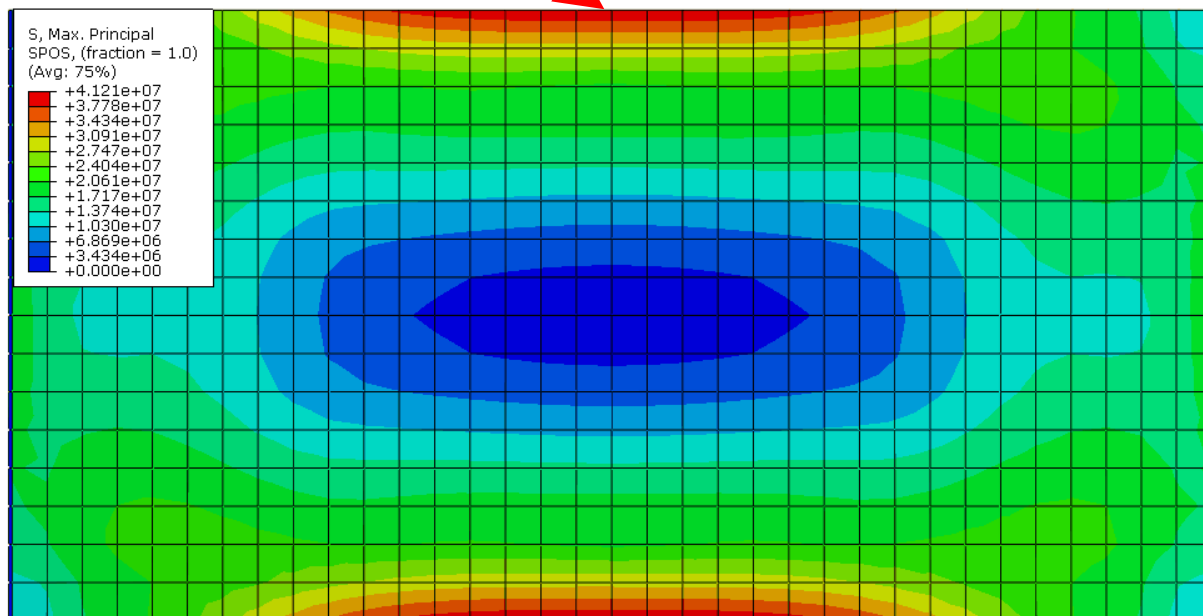
Napężenia główne rozciągające

# Zespolona szyba gięta

Model obliczeniowy z programu ABAQUS



Przemieszczenia (Y)



Napężenia główne rozciągające

# Porównanie szyby płaskiej i giętej

		Szyba płaska	Szyba gięta	Różnica wartości
Lato	Ciśnienie wewnętrzne [Pa]	1190	5680	477%
	Naprężenia główne [MPa]	7,63	41,21	540%
	Przemieszczenie [mm]	1,35	6,79	503%
Zima	Ciśnienie wewnętrzne [Pa]	-2870	-6250	218%
	Naprężenia główne [MPa]	8,89	51,46	579%
	Przemieszczenie [mm]	1,75	7,86	449%

# Porównanie szyby płaskiej i giętej

		Szyba płaska	Szyba gięta	Różnica wartości
Lato	Ciśnienie wewnętrzne [Pa]	1190	→ 5680	477%
	Naprężenia główne [MPa]	7,63	→ 41,21	540%
	Przemieszczenie [mm]	1,35	→ 6,79	503%
Zima	Ciśnienie wewnętrzne [Pa]	-2870	-6250	218%
	Naprężenia główne [MPa]	8,89	51,46	579%
	Przemieszczenie [mm]	1,75	7,86	449%

**507%**

# Porównanie szyby płaskiej i giętej

		Szyba płaska	Szyba gięta	Różnica wartości
Lato	Ciśnienie wewnętrzne [Pa]	1190	5680	477%
	Naprężenia główne [MPa]	7,63	41,21	540%
	Przemieszczenie [mm]	1,35	6,79	503%
Zima	Ciśnienie wewnętrzne [Pa]	-2870	-6250	218%
	Naprężenia główne [MPa]	8,89	51,46	579%
	Przemieszczenie [mm]	1,75	7,86	449%

# Porównanie szyby płaskiej i giętej

		Szyba płaska	Szyba gięta	Różnica wartości
Lato	Ciśnienie wewnętrzne [Pa]	1190	5680	477%
	Naprężenia główne [MPa]	7,63	41,21	540%
	Przemieszczenie [mm]	1,35	6,79	503%
Zima	Ciśnienie wewnętrzne [Pa]	-2870	→ -6250	218%
	Naprężenia główne [MPa]	8,89	→ 51,46	579%
	Przemieszczenie [mm]	1,75	→ 7,86	449%

**415%**



# Wnioski i dalsze prace

- Modele numeryczne = oszczędność czasu,
- Naprężenia, przemieszczenia, ciśnienie wewnętrzne- 5-krotny wzrost (szyby gięte),
- Zmiana lokalizacji naprężeń, przemieszczeń- krawędź szyby,

# Wnioski i dalsze prace

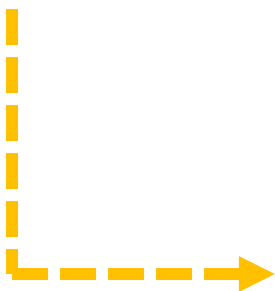
- Modele numeryczne = oszczędność czasu,
- Naprężenia, przemieszczenia, ciśnienie wewnętrzne- **5-krotny wzrost** (szyby gięte),
- Zmiana lokalizacji naprężeń, przemieszczeń- **krawędź** szyby,

# Wnioski i dalsze prace

- Modele numeryczne = oszczędność czasu,
- Naprężenia, przemieszczenia, ciśnienie wewnętrzne- **5-krotny wzrost** (szyby gięte),
- Zmiana lokalizacji naprężeń, przemieszczeń- **krawędź** szyby,

# Wnioski i dalsze prace

- Modele numeryczne = oszczędność czasu,
- Naprężenia, przemieszczenia, ciśnienie wewnętrzne- **5-krotny wzrost** (szyby gięte),
- Zmiana lokalizacji naprężeń, przemieszczeń- **krawędź** szyby,



- Rozwój modelu numerycznego,
- Opracowanie metody obliczeniowej.



NARODOWE CENTRUM NAUKI

# DZIĘKUJĘ ZA — UWAGĘ



mgr inż. Kinga Zemła  
Wydział Budownictwa  
Politechnika Śląska

Publikacja została zrealizowana w ramach projektu badawczego „Analiza wewnętrznego ciśnienie w szybach zespolonych giętych 3D” (2021/05/X/ST8/00168) finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki w ramach programu MINIATURA 5.



**E-mail**  
[kinga.zemla@polsl.pl](mailto:kinga.zemla@polsl.pl)



Politechnika  
Śląska

