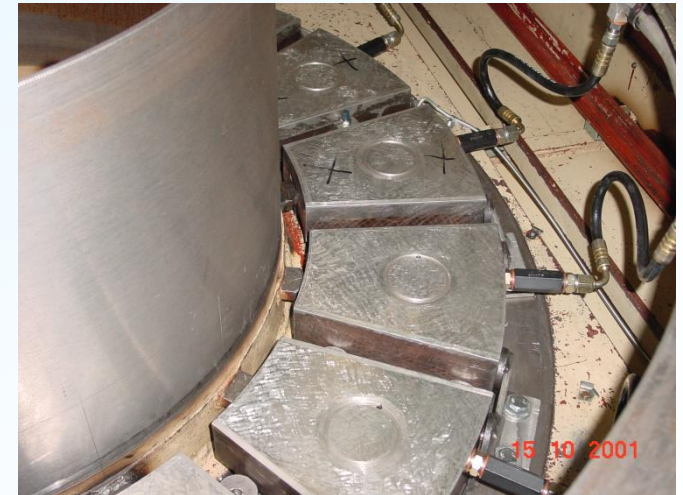
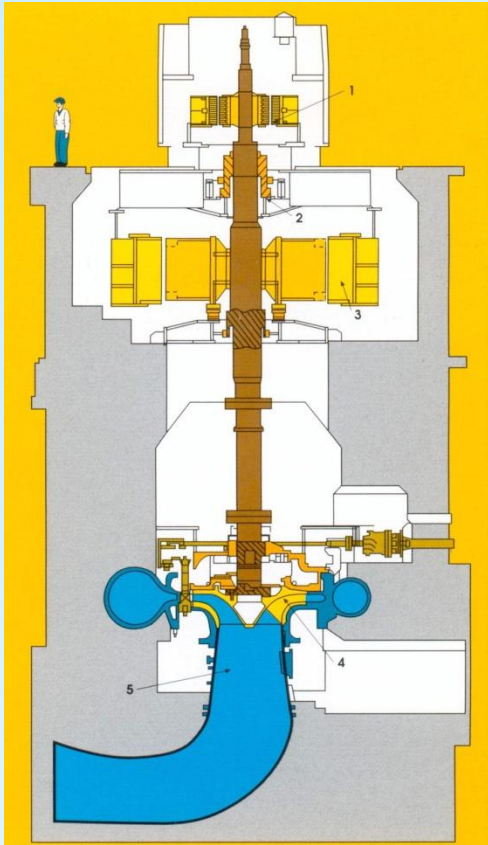
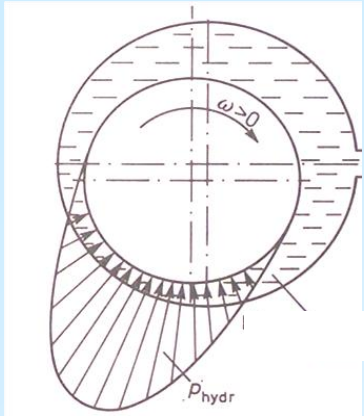


# Hydrodynamiczne łożyska wzdłużne hydrozespołów o pionowych wałach



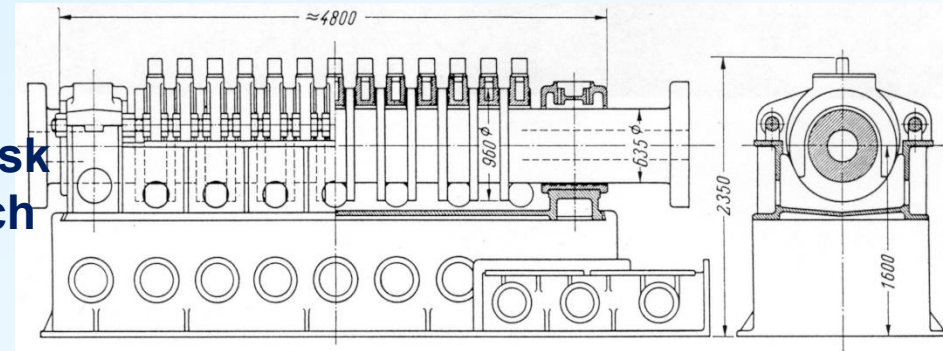
Michał Wasilczuk ze współpracownikami  
Politechnika Gdańska,  
Wydział Mechaniczny

# Wprowadzenie – łożyska poprzeczne i wzdłużne

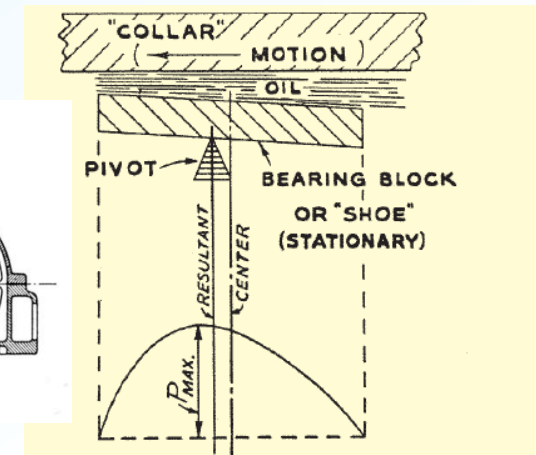
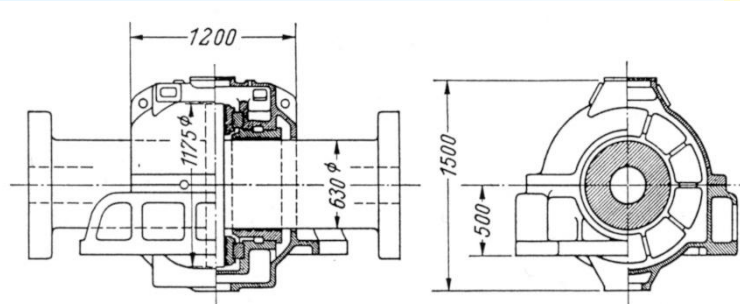


W łożysku poprzecznym wystarczającym warunkiem powstawania smarowania hydrodynamicznego było smarowanie łożysko złożone z czopa zabudowanego z niewielkim luzem w cylindrycznej panwi.

Zdroworoządkowe konstruowanie łożysk wzdłużnych w postaci współpracujących ze sobą płaskich równoległych powierzchni nie dawało dobrych rezultatów i łożyska musiały posiadać nawet kilkanaście powierzchni tarcia



Publikacje Reynoldsa były podstawą wynaleźienia łożysk z wahliwymi klockami przez Kingsbury'ego i Michella



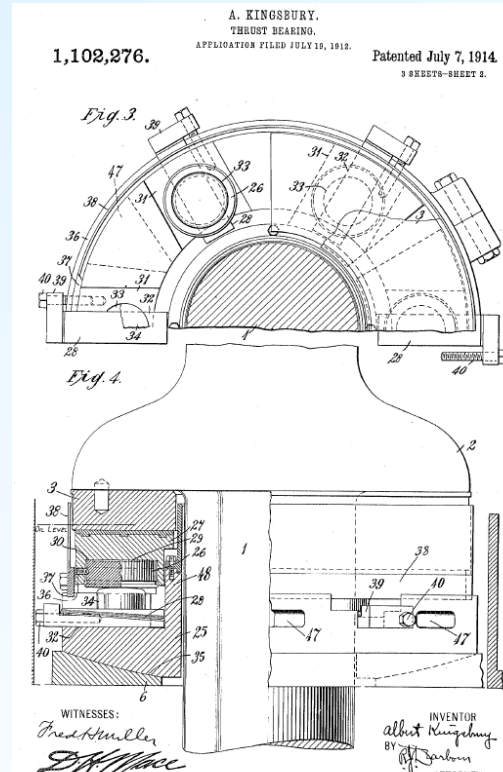
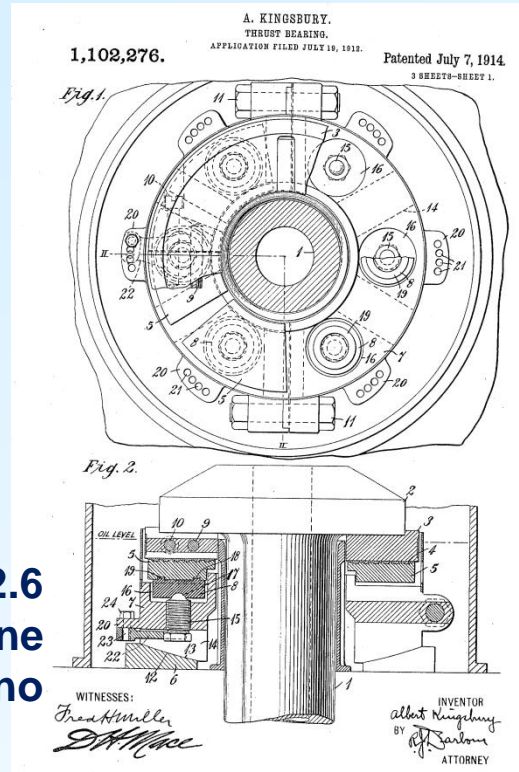
# Historia – łożyska wzdłużne z wahlowymi klockami



Albert Kingsbury (USA) patent 1910 badania dośw. od r 1898



Elektrowania wodna Holtwood – 1912  
220 ton łożysko 1.2 m średnicy (p=2.6 Mpa), w 1950 roku zostało zachowane do dalszej pracy - nie wymieniono żadnej części



**Kingsbury, Inc.**  
The Best Support In The Business.

10385 Drummond Road  
Philadelphia, PA 19154 USA  
Telephone: 1-215-824-4000  
Fax: 1-215-824-4999  
www.kingsbury.com

# Historia – łożyska wzdłużne z wahliwymi klockami

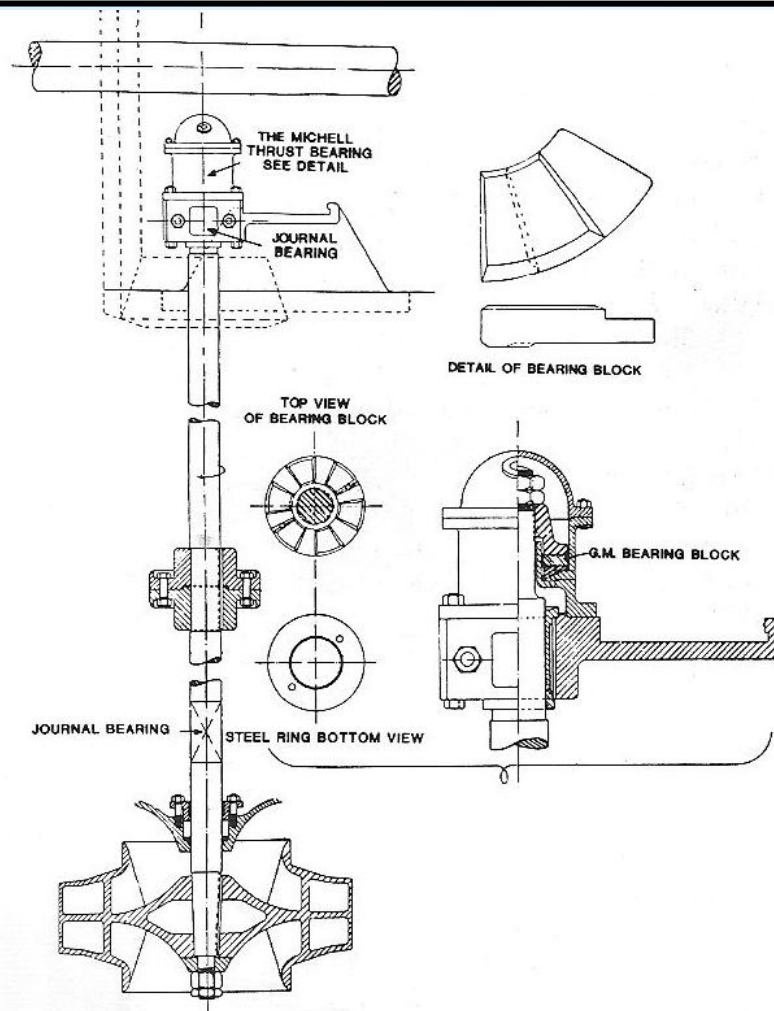


A.G.M. Michell (Australia)

- 1905 – patent
- 1907 - łożysko zainstalowane w pompie wodnej w Cohuna 200 obr/min 1.5 MPa
- 1913 i 1914 pierwsze aplikacje okrętowe
- 1920 powstaje firma Michell Bearings (w Newcastle, UK)

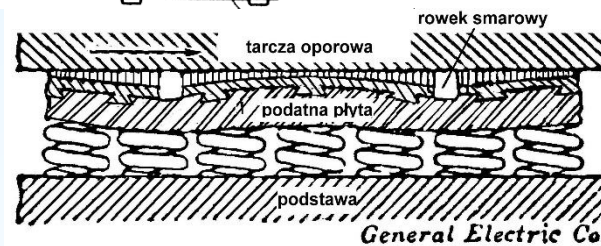
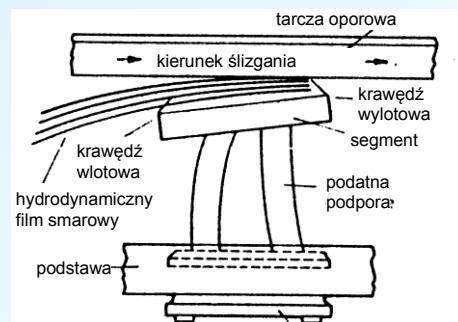
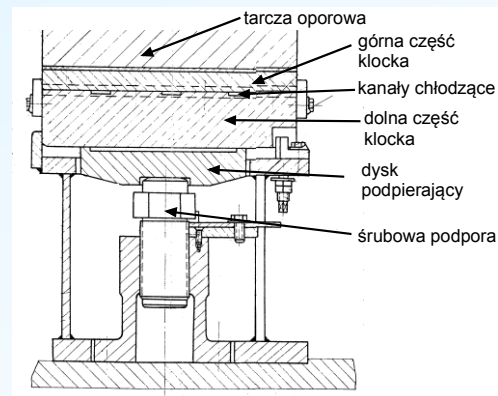
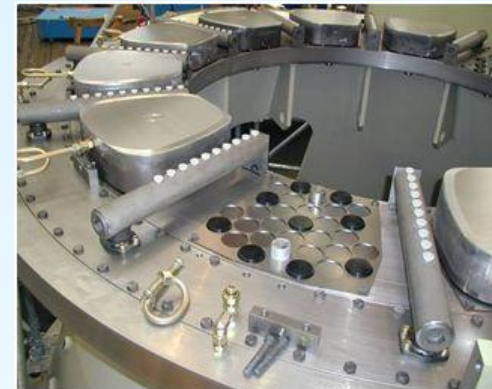


## Michell Bearings

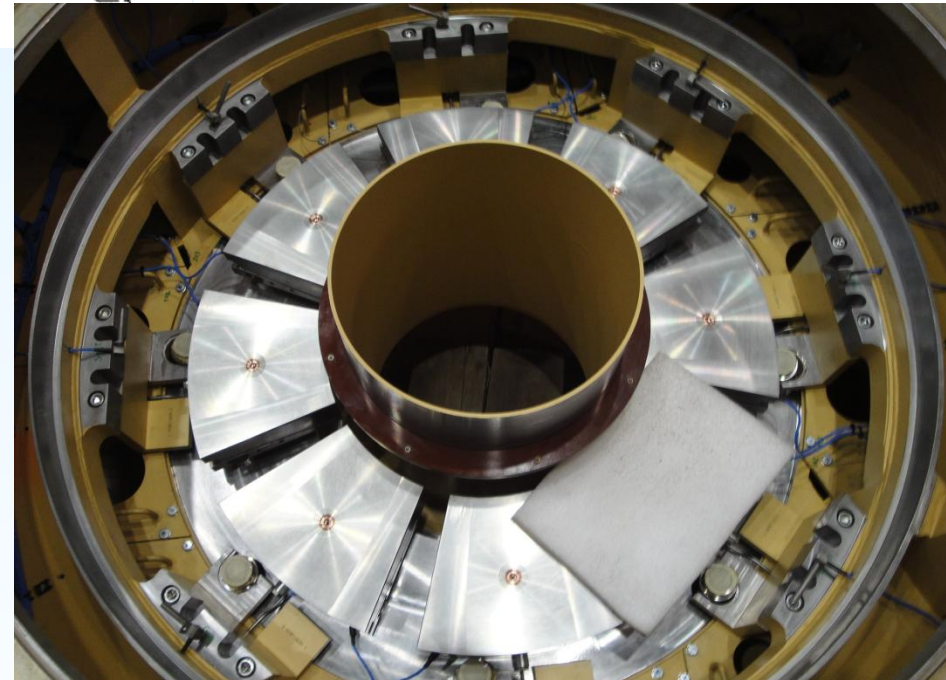
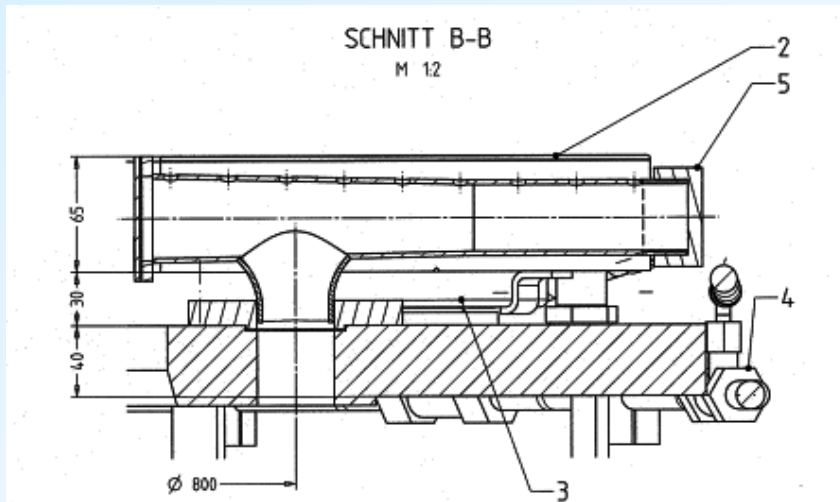
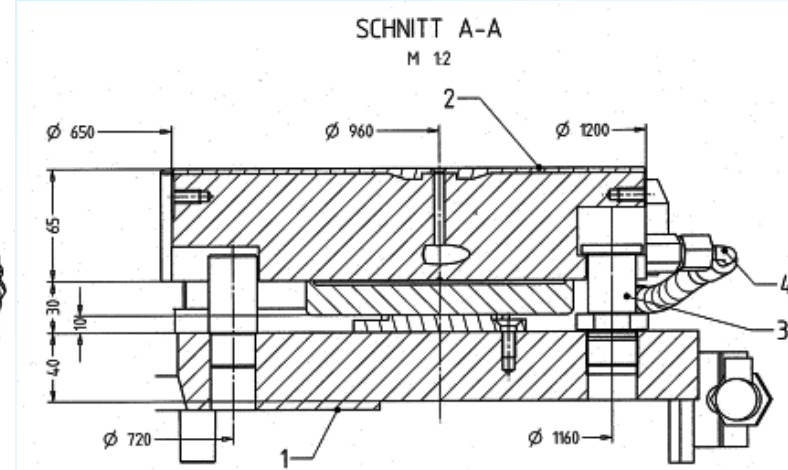
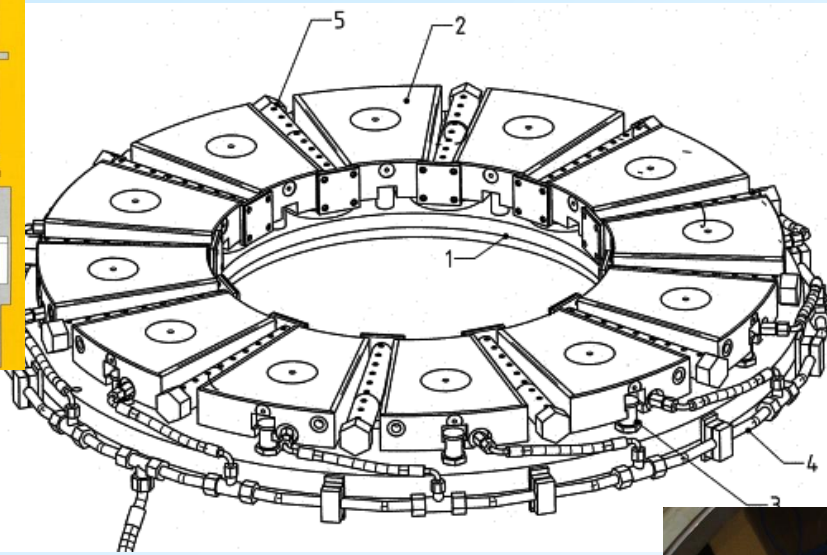
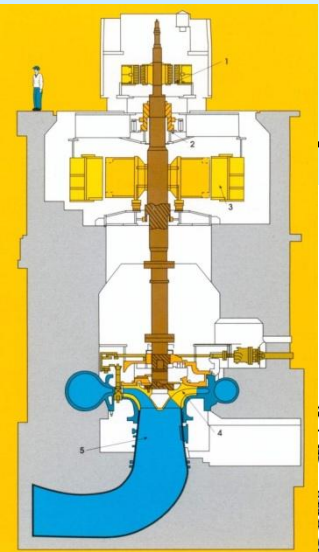


MICHELL VERTICAL THRUST BEARING FOR A CENTRIFUGAL PUMP. INSTALLED AT COHUNA ON THE MURRAY RIVER, VICTORIA, 1907

# Łożyska wzdłużne z wahliwymi klockami podparcia klocków



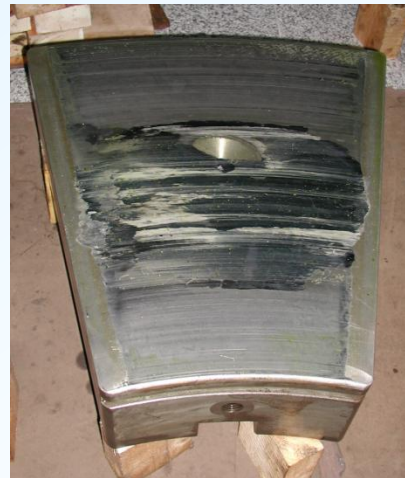
# Łożysko wzdłużne turbiny wodnej



# Duże hydrodynamiczne łożyska wzdluzne - kilka faktów

---

- grubość warstwy oleju oddzielająca ruchomą tarczę od nieruchomej powierzchni klocka 20-50  $\mu\text{m}$  (mniej niż grubość włosa)
- prędkość względna nawet 30-40 m/s (ponad 100 km/h)
- ilość ciepła generowanego w filmie smarowym łożyska – zbliżona niekiedy do 1MW (gęstość strumienia ciepła do około 400 kW/m<sup>2</sup> )
- obciążenia osiowe do kilkuset ton - średnie naciski do 5-6 MPa
- średnice nawet ponad 5 metrów (Trzy Przełomy – Chiny) - w Polsce EW Włocławek 3.4 m
- skutki awarii – wielotygodniowe przestoje hydrozespołów o mocy kilkuset MW



# Hydrodynamiczne łożyska wzdluzne - zjawiska fizyczne

## Tarcza oporowa:

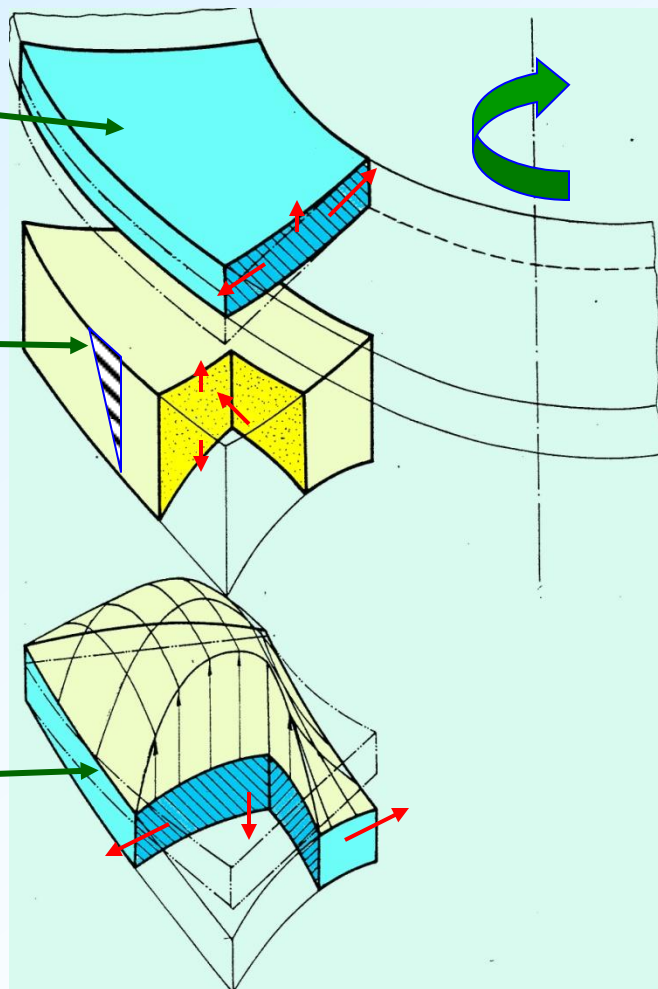
przejmowanie ciepła z filmu  
przewodzenie ciepła  
konwekcja ciepła do otaczającego oleju i  
do wału  
odkształcenia termosprężyste

## Film smarowy:

utworzony pomiędzy odkształconą sekcją i tarczą  
przepływ środka smarowego (laminarny lub turb.)  
generowanie ciśnienia hydrodynamicznego  
generowanie ciepła w wyniku ścinania (zmiana temp.,  
i właściwości środka smarowego)  
oddawanie ciepła

## Sekcja łożyska (segment):

oddziaływanie ciśnienia w filmie - odkształcenia spręż.  
przejmowanie części ciepła z filmu, przewodzenie  
ciepła, oddawanie ciepła do otaczającego oleju,  
rozkład temperatury - odkształcenia termiczne



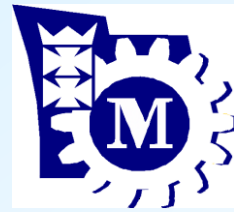
## Dodatkowo przestrzeń między segmentami:

mieszanie środka smarowego dostarczanego z układu smarowania  
ze smarem wypływającym z poprzedniego segmentu





# Poglądowy obraz zjawisk



# Problemy w łożyskach wzdłużnych

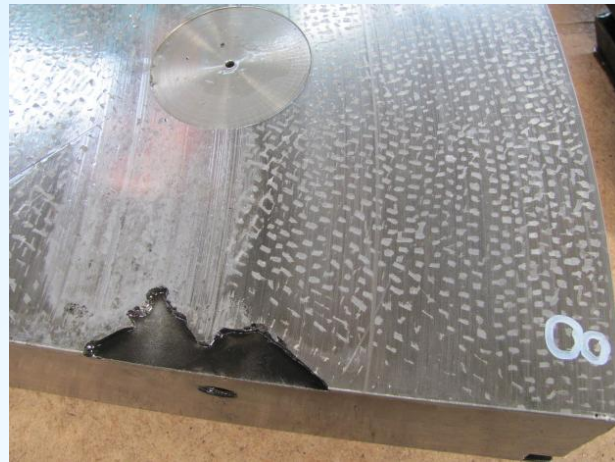
---

- nadmierne odkształcenia segmentów – nieprawidłowy kształt szczeliny smarowej, **Zmiany konstrukcji klocków i sposobu podparcia**
- nierównomierny rozkład obciążenia – przeciążenie niektórych segmentów **Zmiany konstrukcji sposobu podparcia dokładniejsza regulacja**
- niewystarczająca odporność stopu łożyskowego na podwyższoną temperaturę - zjawiska termiczne, płynięcie stopu **Obniżanie temperatury, zmiany materiałów łożyskowych (m. in. PTFE)**
- niewystarczająca obciążalność podczas rozruchu i wybiegu maszyny - awarie podczas rozruchu **Wprowadzanie hydrostatycznego smarowania, ale także zmiany materiałów łożyskowych np PTFE**
- błędy konstrukcyjne - trudny montaż i regulacja, częste uszkodzenia elementów **Udoskonalanie konstrukcji elementów i podzespołów**

**Według szacunków ubezpieczycieli awarie łożysk w maszynach wodnych powodują około 40% strat podczas eksploatacji**

**20 lat współpracy z energetyką wodną - ocena przyczyn i usuwanie skutków SZEŚCIU awarii łożysk wzdłużnych w dużych elektrowniach wodnych w Polsce**

**Nie tylko w Polsce - w podobnym czasie z literatury i osobistych kontaktów znane są nam informacje o około 10 awariach w dużych elektrowniach wodnych na świecie – kilka razy byliśmy proszeni o pomoc**

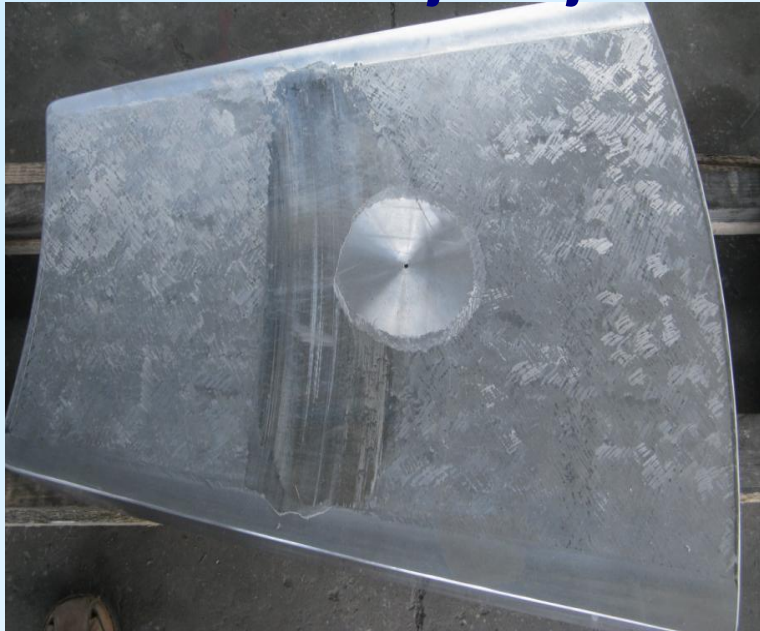




# Dygresja – konsekwencje awarii



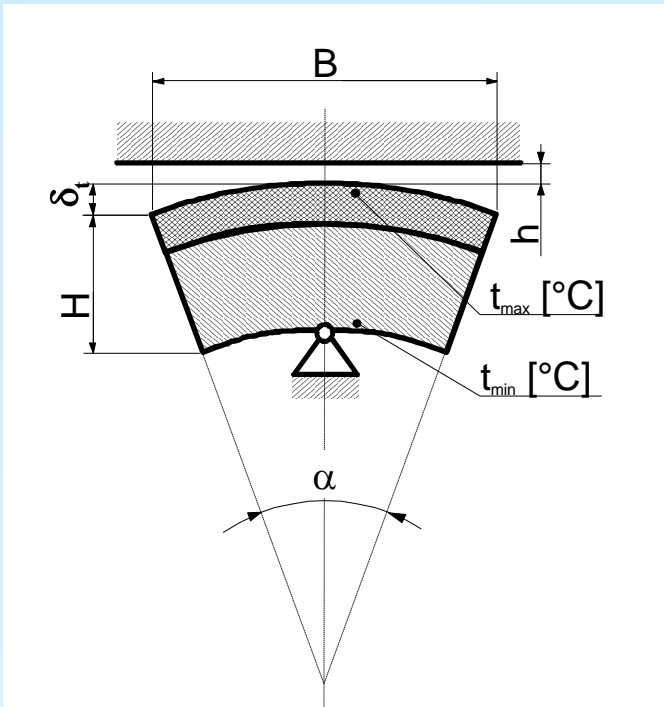
Przykład awarii - usunięcie skutków i przyczyn awarii - skala uszkodzeń segmentów była niewielka (fot.) opóźnia oddanie maszyny do użytku po remoncie o co najmniej 4 miesiące.



## Skutki finansowe:

przy mocy 50 MW generowane jest 1200 MWh energii elektrycznej na dobę o hurtowej cenie ok. 200 zł/MWh, zatem **DOBOWY PRZYCHÓD WYNOSI 240 000 ZŁ**, a miesięczny 7.5 mln zł, nie uwzględniając kosztów przywrócenia poprzedniego stanu technicznego. <sup>12</sup>

# Okształcenia termiczne



Okształcenia są proporcjonalne do:

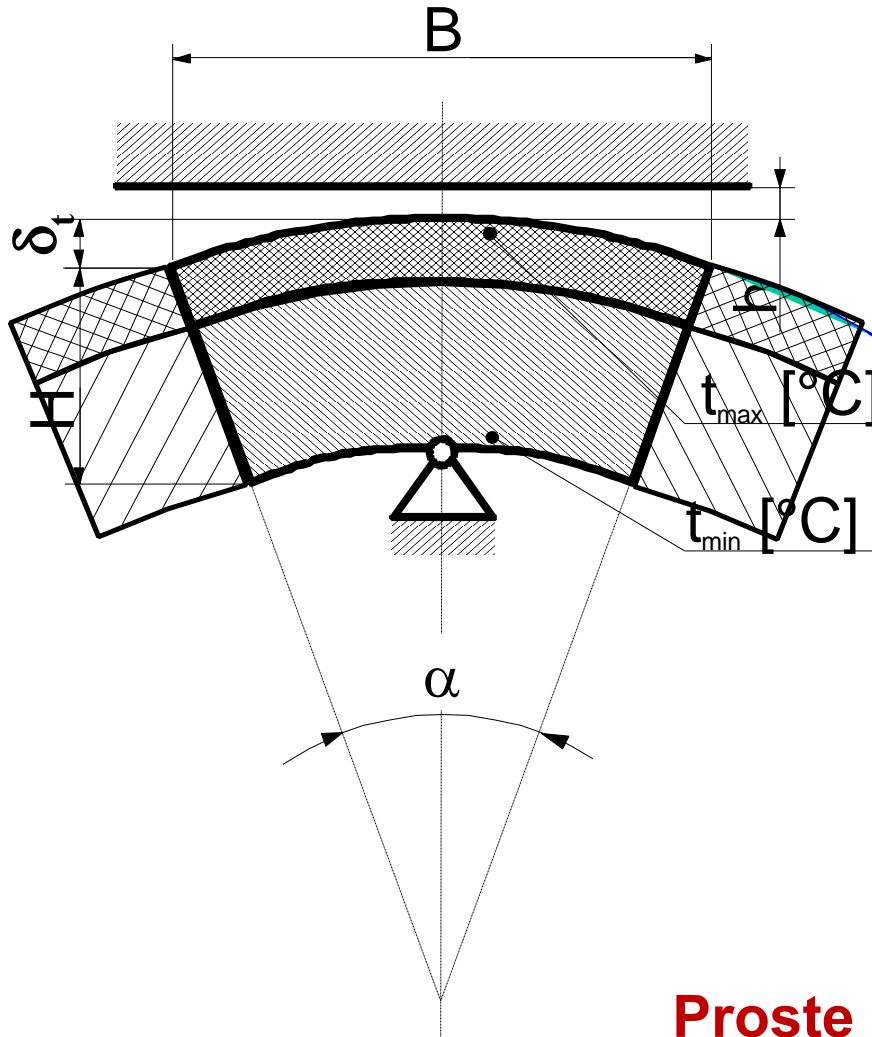
- szerokości klocka,
- grubości klocka,
- różnicy temperatur
- współczynnika rozszerzalności cieplnej

$$\delta_t = \frac{B^2 \cdot \lambda \cdot (t_{\max} - t_{\min})}{8 \cdot H}$$

Ciepło generowane w filmie  
ogrzewa klocek i powoduje że  
wierzch jest cieplejszy niż spód.  
Segment się deformuje.

**Deformacje wpływają na kształt szczeliny  
smarowej i właściwości łożyska**

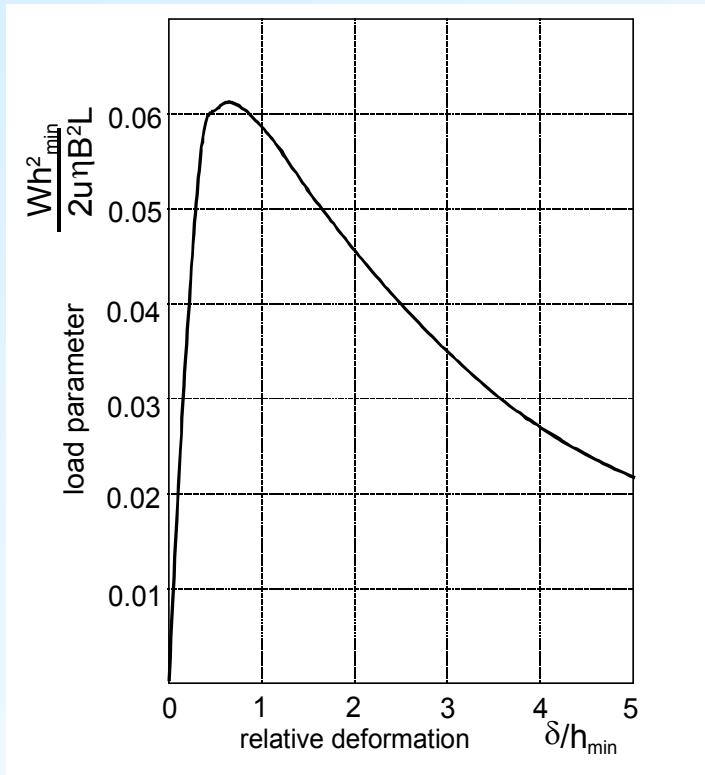
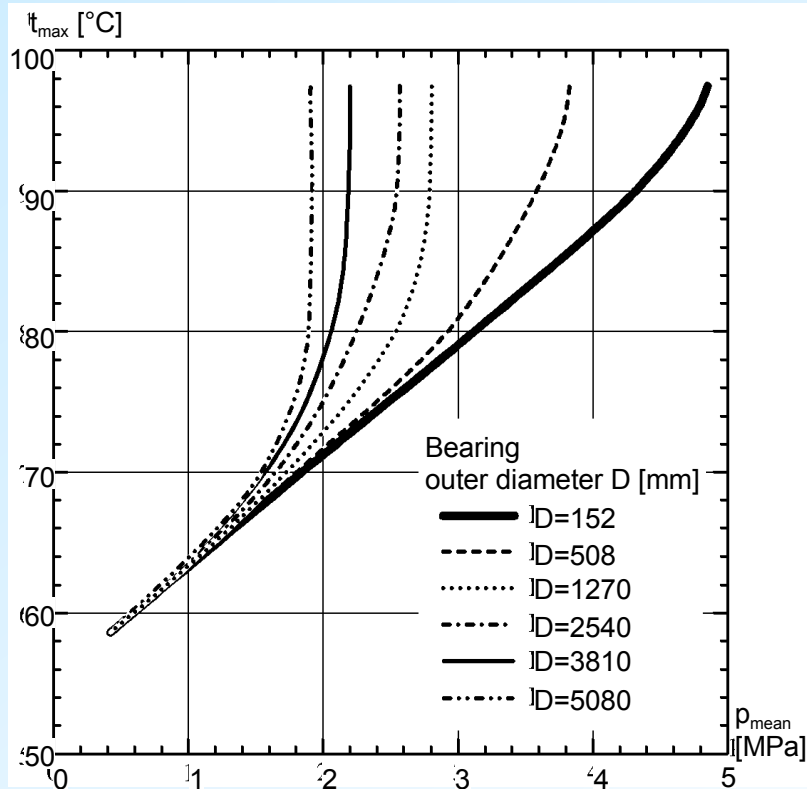
# Odształcenia termiczne c.d.



**Proste powiększanie rozmiarów klocka łożyskowego „nic nie daje”**

# Odształcenia termiczne c.d.

$$\delta_t = \frac{B^2 \cdot \lambda \cdot (t_{\max} - t_{\min})}{8 \cdot H}$$

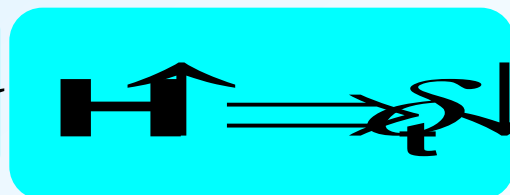
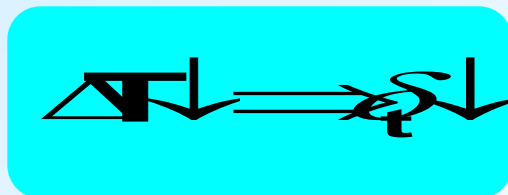
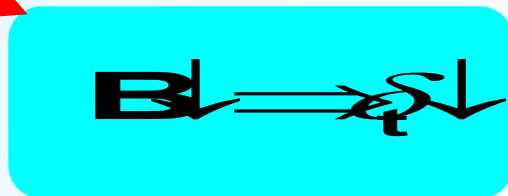
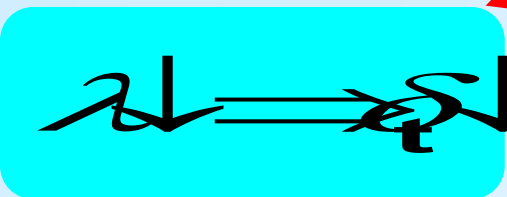


**Dlatego (wzór) odkształcenia termiczne są groźniejsze w dużych łożyskach – efekt skali**

**Zazwyczaj odkształcenia pogarszają nośność, ale w przypadku łożysk z symetrycznie podpartymi klockami są niezbędne i muszą być starannie kontrolowane**

# Wniosek

$$\delta_t \sim \lambda \times \Delta T \times \frac{B^2}{H}$$

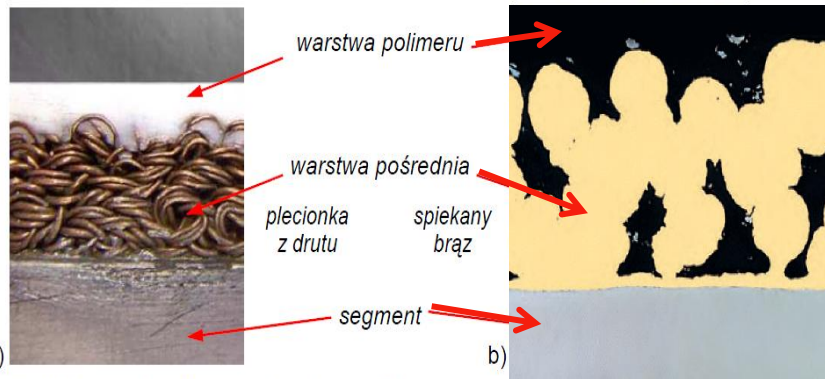
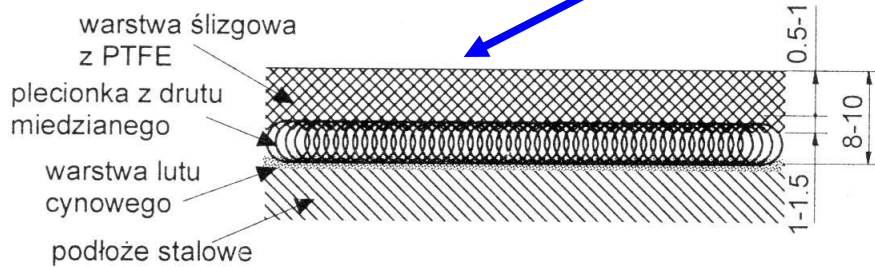
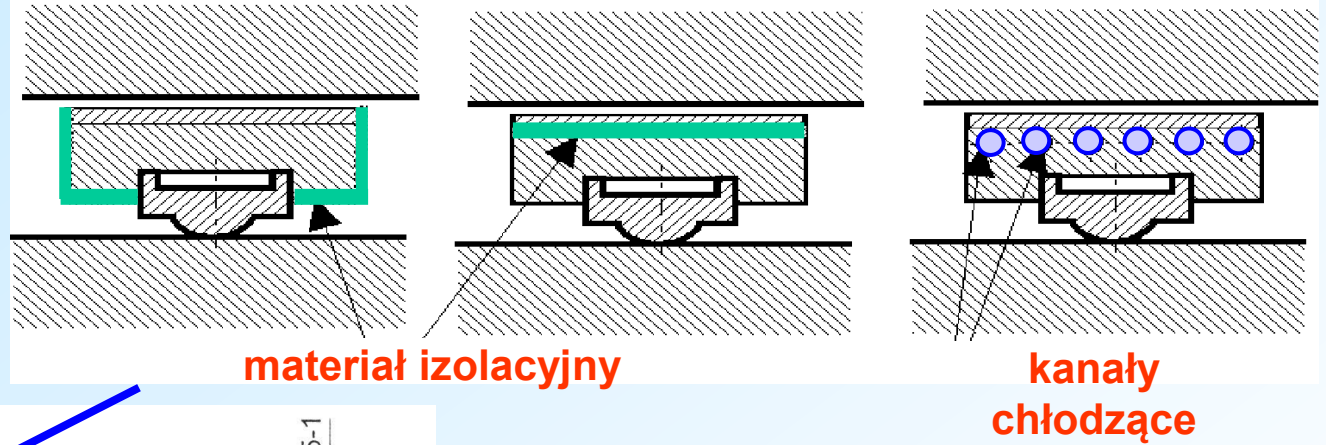
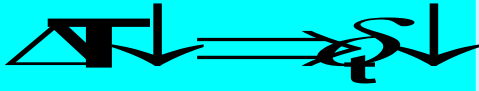


?

To nie działa – dlaczego?



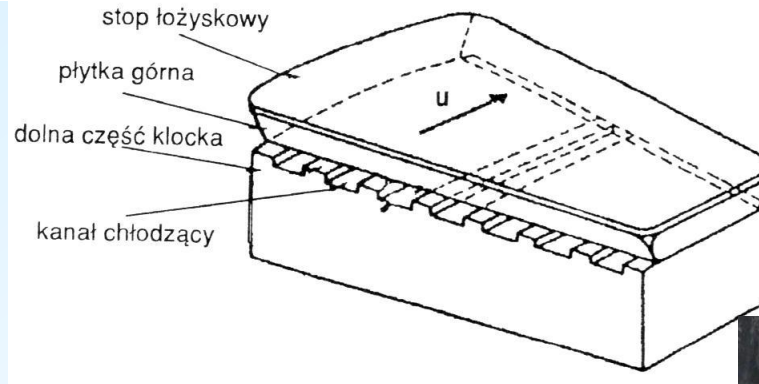
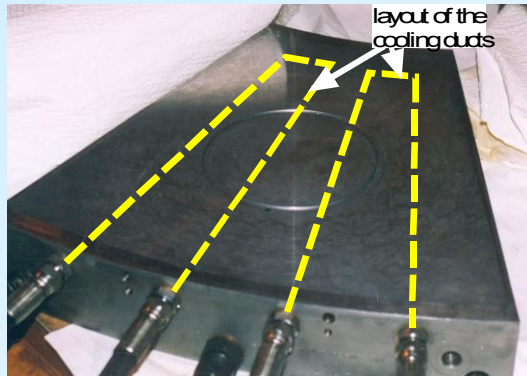
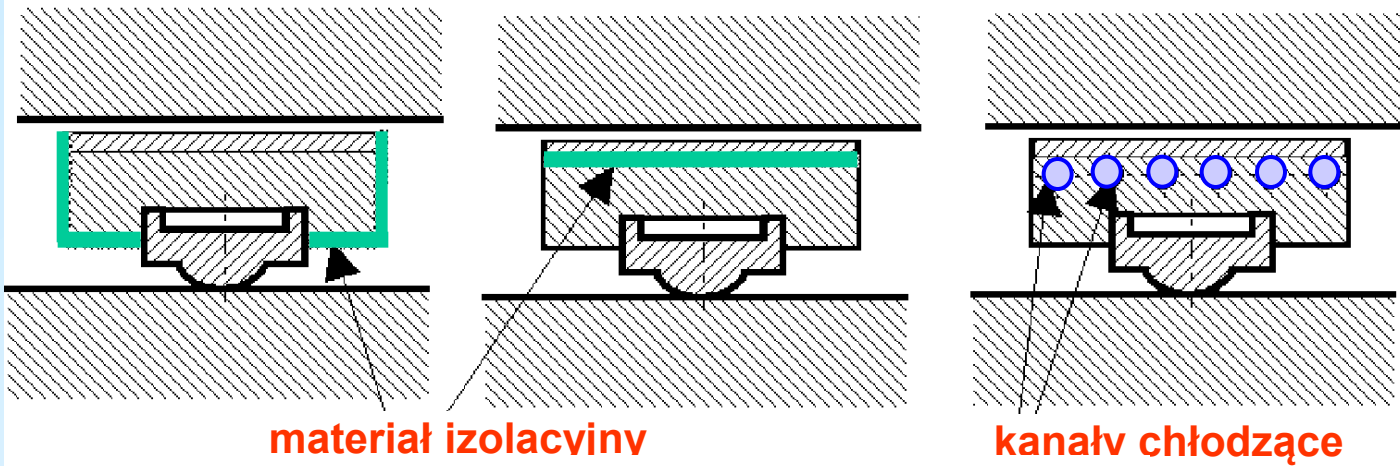
# Konstrukcyjne ograniczanie wypukłości termicznej



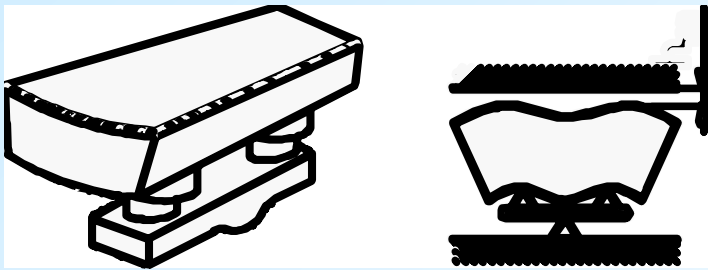
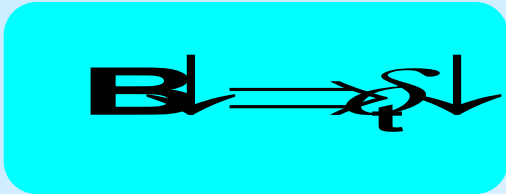
ot. 2. Widok warstwy ślizgowej łożyska z polimerową warstwą ślizgową: a) z warstwą pośrednią z drutu brązowego lub miedzianego, z warstwą pośrednią ze spiekane go brązu.

# Konstrukcyjne ograniczanie wypukłości termicznej

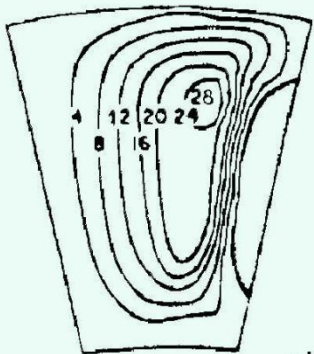
## ograniczanie przepływu ciepła przez klocek



# Ograniczanie odkształceń termicznych

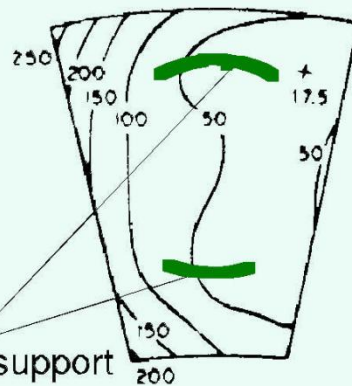


pressure distribution

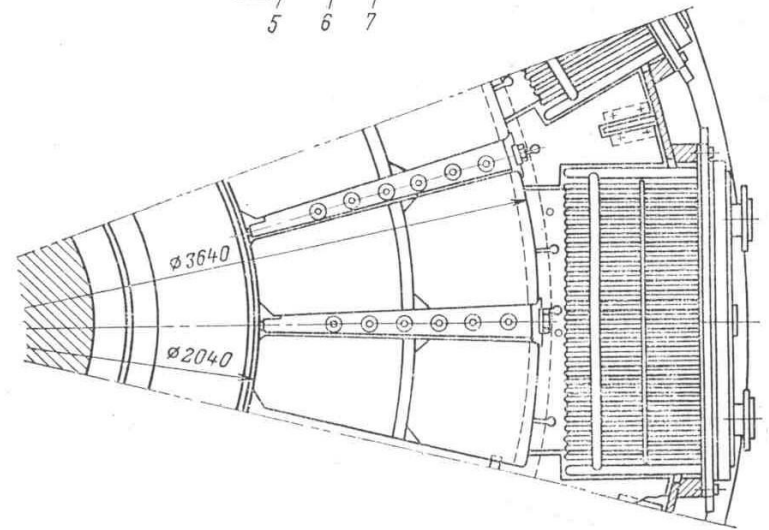
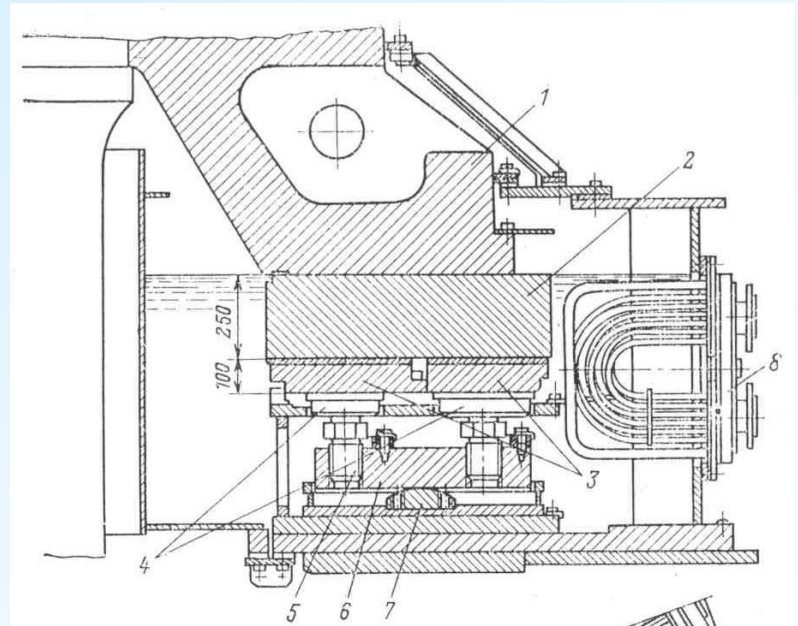


$P = 8.29 \text{ MPa}$

film shape

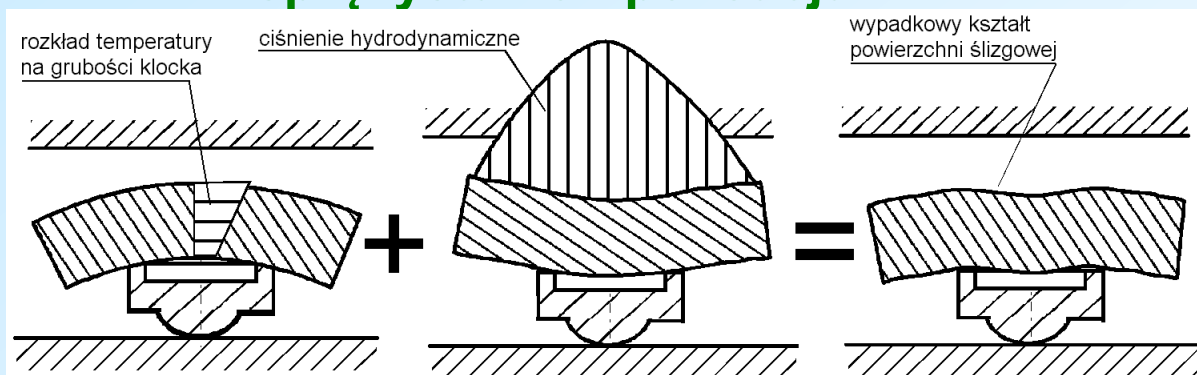


shape of the support

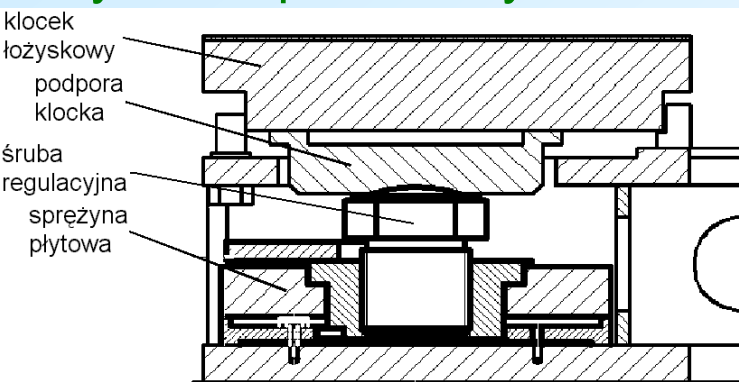


# Konstrukcyjne ograniczanie wypukłości termicznej

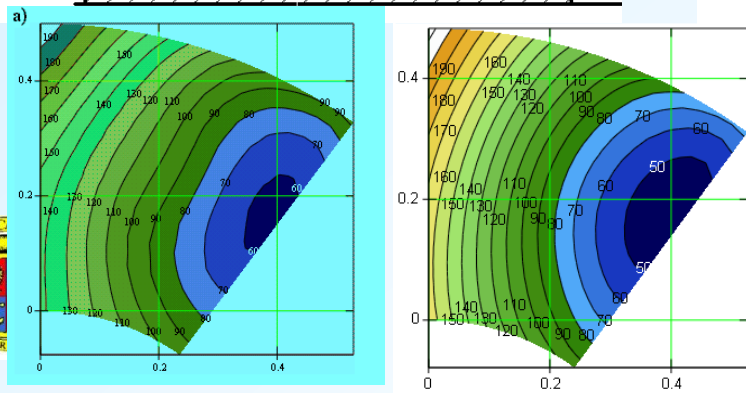
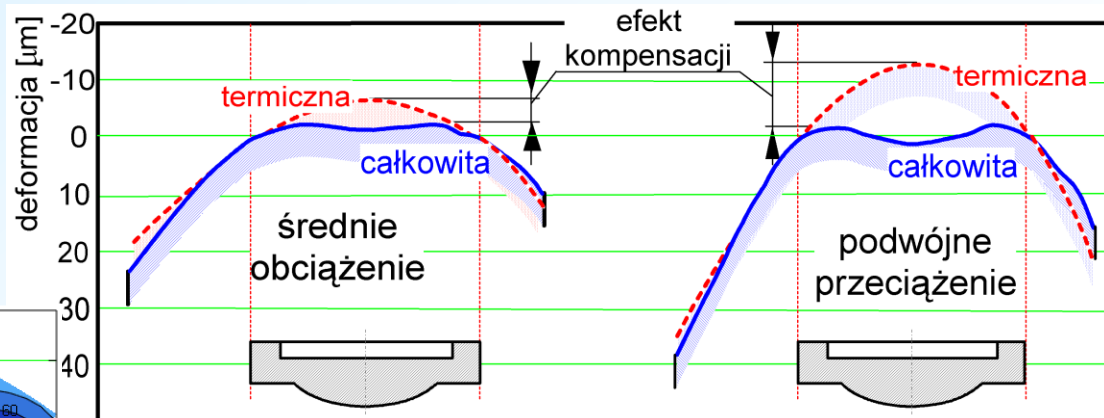
## sprężysta kompensacja



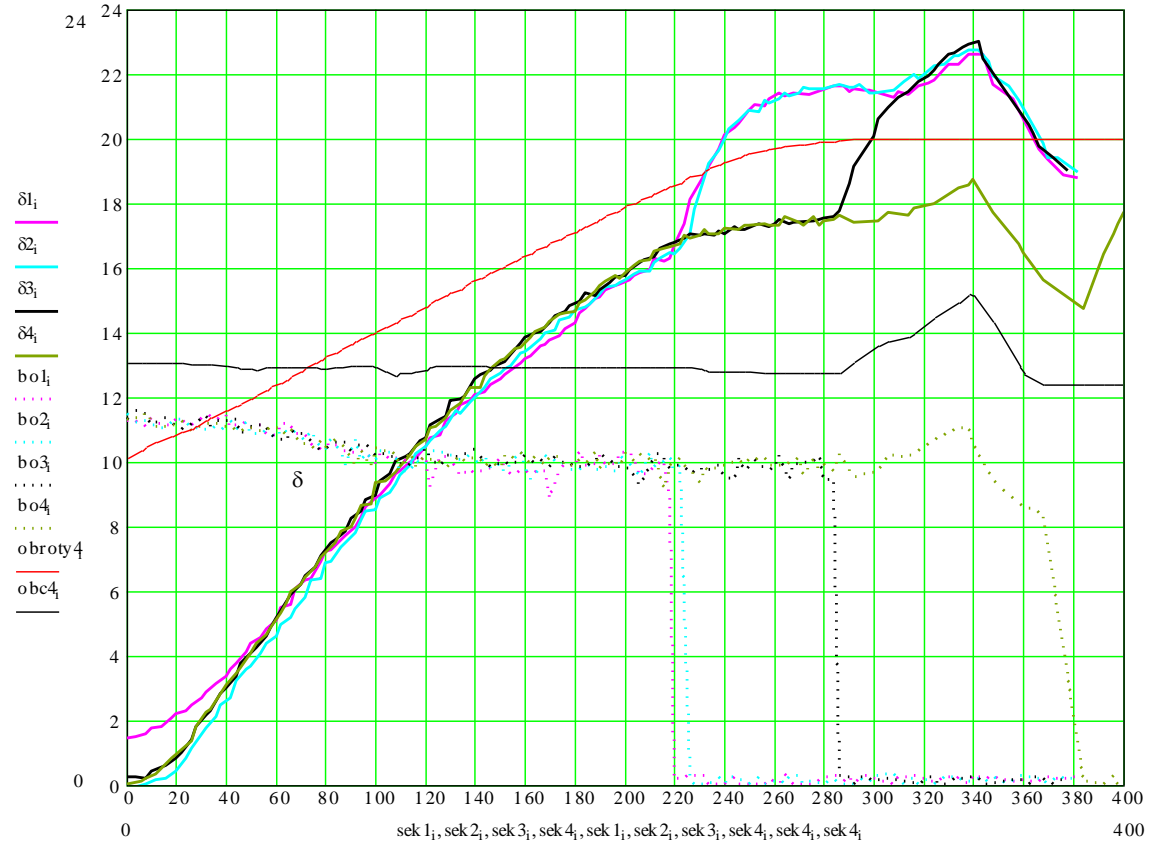
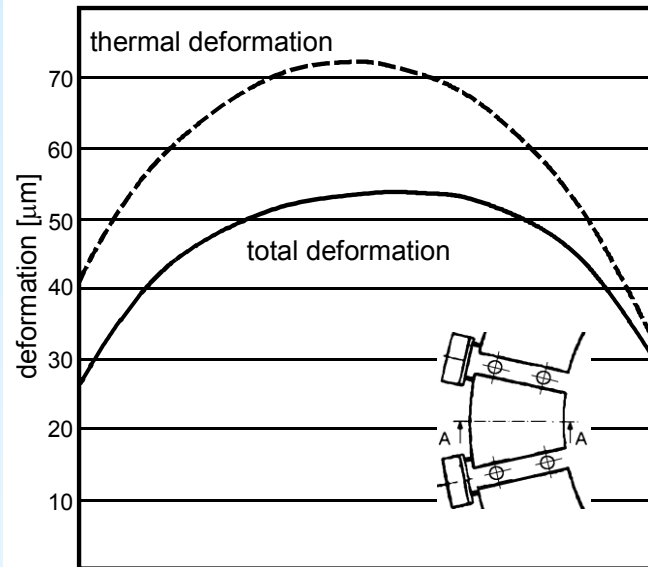
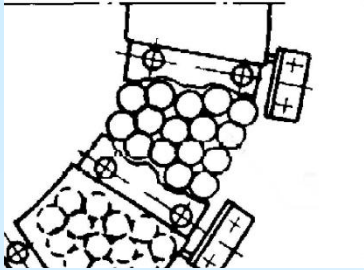
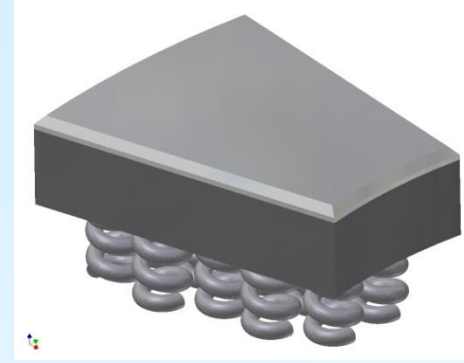
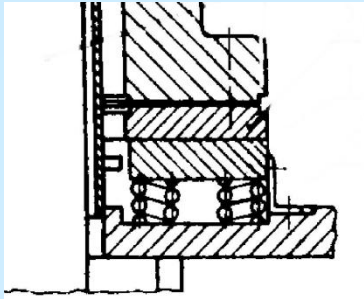
## hydrozespół EW Dychów



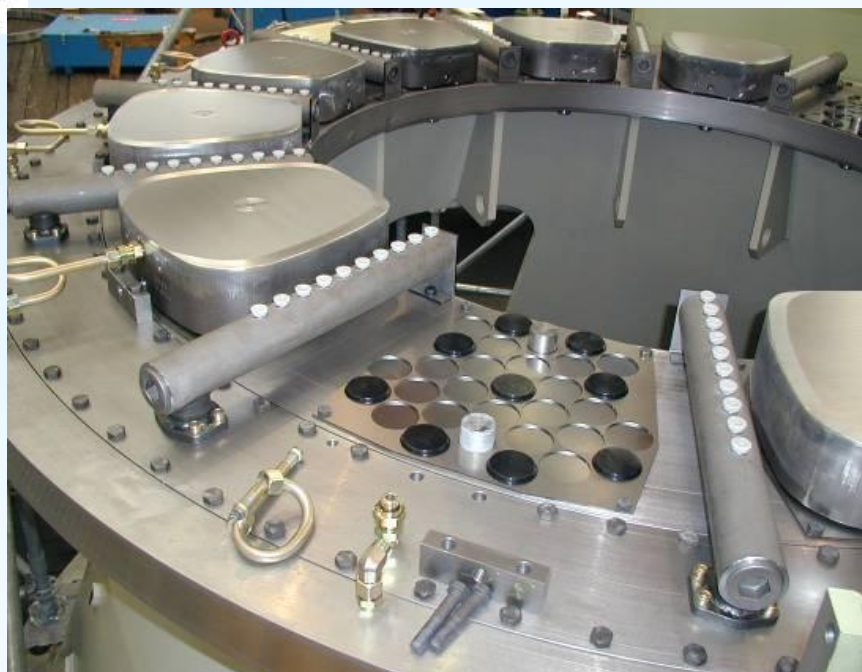
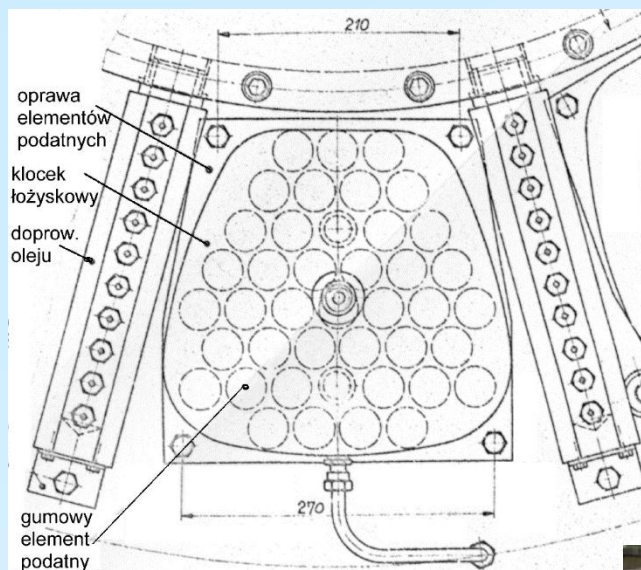
## zależność kompensacji od obciążenia



# Konstrukcyjne ograniczanie wypukłości termicznej

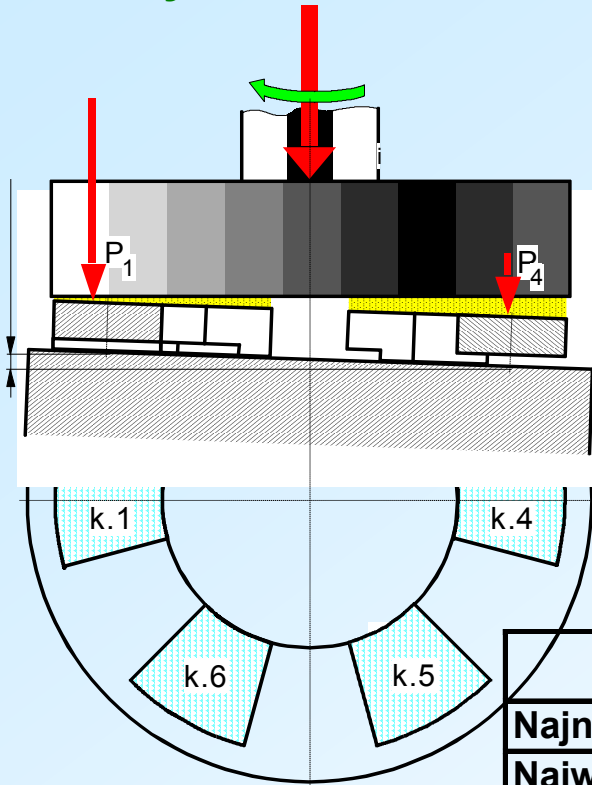


# Konstrukcyjne ograniczanie wypukłości termicznej



# Przyczyny nierównomiernego rozdziału obciążenia

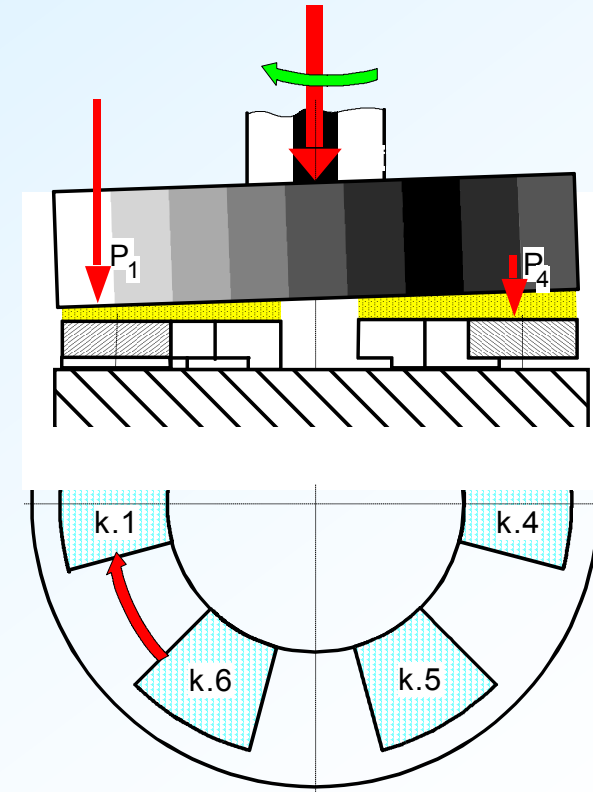
## Nieprostotałość powierzchni łożyska do osi wału



	TG-1	TG-3
Najniższa temp. klocka	59°C	62°C
Najwyższa temp. klocka	46°C	44°C
Różnica temperatur	13°C	18°C

Niedokładność wykonania  
Niedokładność montażu  
Odształcenia korpusu/fundamentu

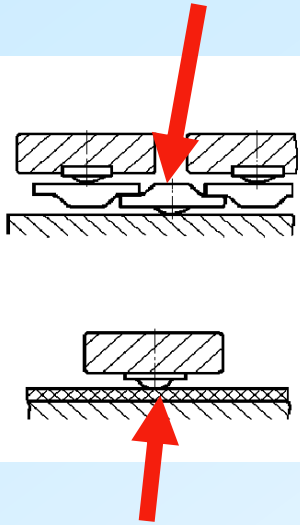
## Bicie osiowe tarczy oporowej



Niedokładność wykonania  
Niedokładność montażu

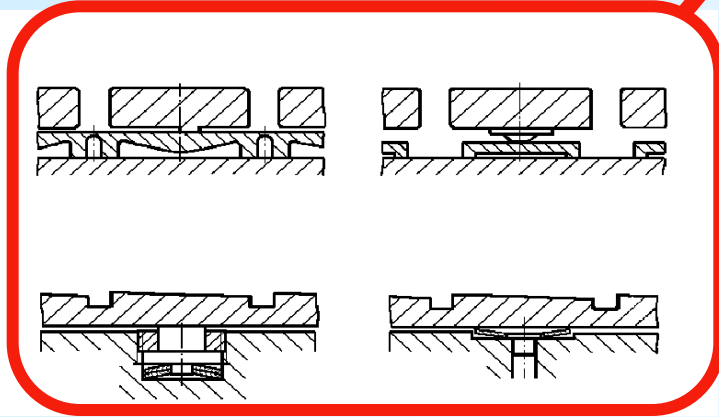
# Znane z techniki sposoby zmniejszania nierównomierności obciążeń

Dźwignie wyrównujące „kołyski”



Sprężyste podparcia:

- wieloprzęsłowe sprężyny pierścieniowe
- sprężyny płytowe
- sprężyny talerzowe,
- pakiety napiętych wstępnie sprężyn talerzowych

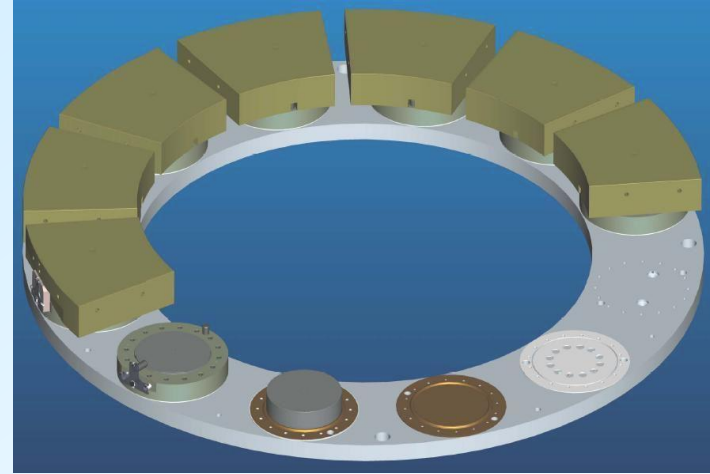
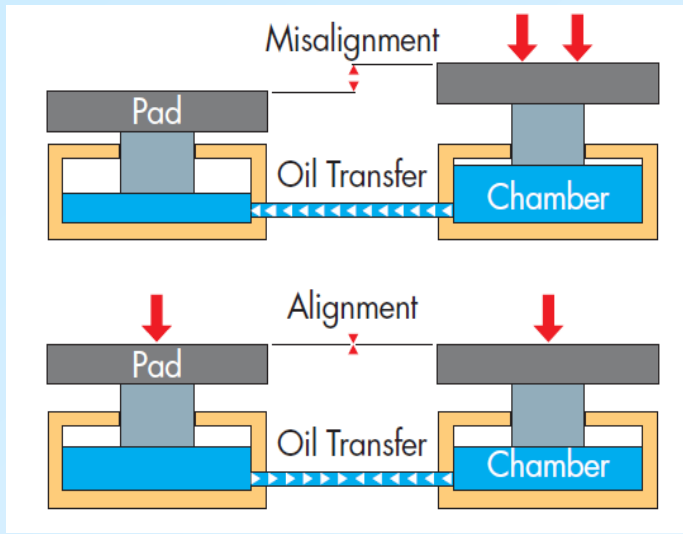


Podkładki z odkształcalnych plastycznie materiałów

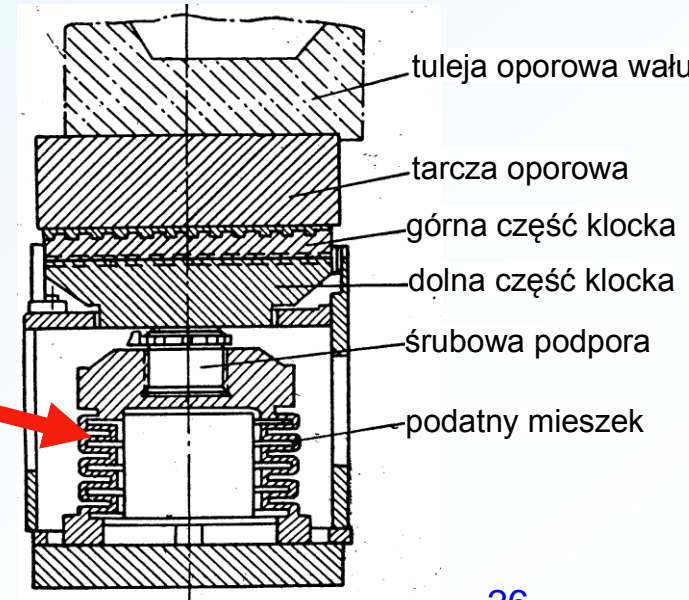




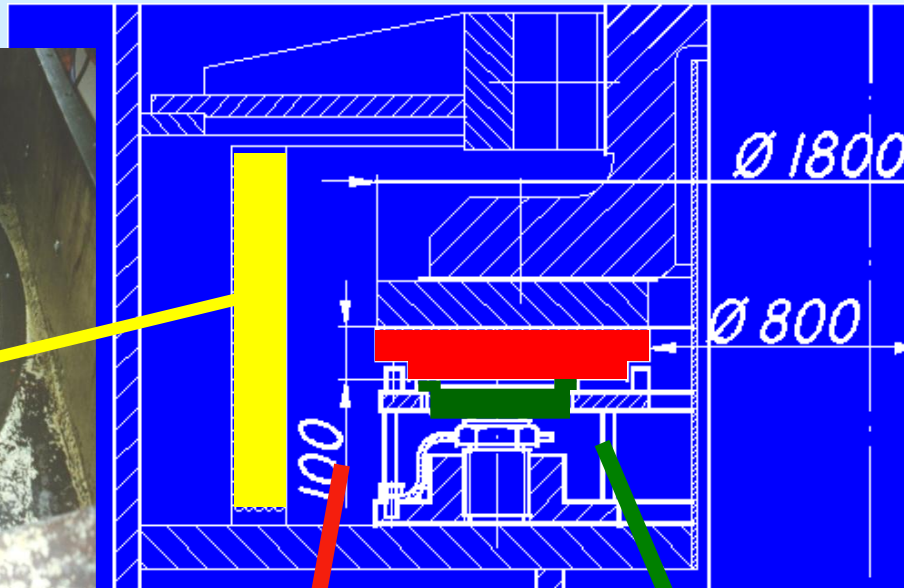
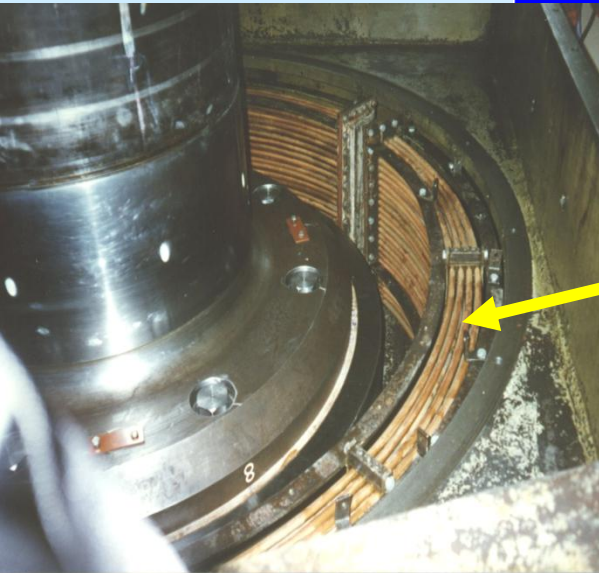
# Znane z techniki sposoby zmniejszania nierównomierności obciążeń



**Podpory hydrauliczne skuteczne ale bardzo złożone**



# Konstrukcja łożyska wzdłużnego EW Dychów



8 wahlowych klocków

$n = 187.5 \text{ obr/min}$

$F_a = 5.5 \times 10^6 \text{ N (556 T)}$

$F_{a1} = 6.8 \times 10^5 \text{ N (69 T)}$

$v = 12.8 \text{ m/s}$

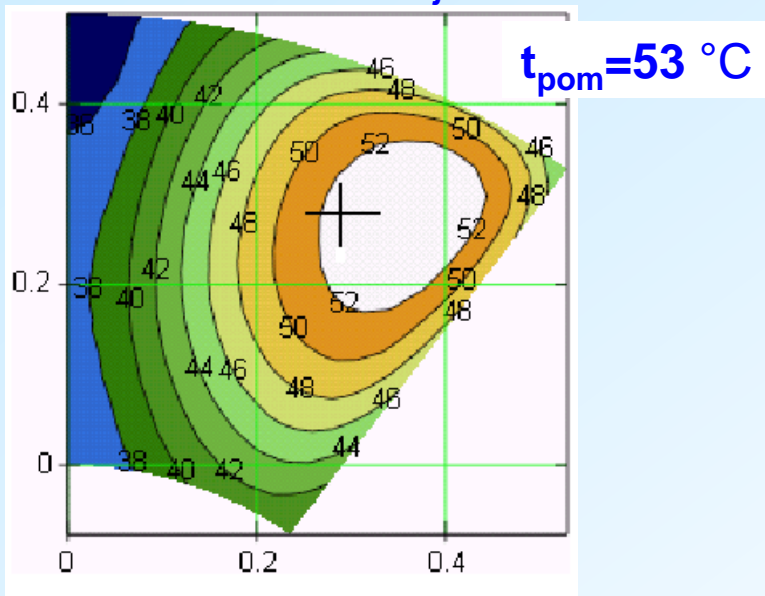
$p_{\text{śr}} = 2.75 \text{ MPa}$



# Ocena zróżnicowania obciążenia klocków

## Wyniki obliczeń termo-elasto-hydrodynamicznych

temperatura klocka  
w warstwie czujnika



W czasie zwykłej eksploatacji temperatury klocków na obwodzie łożyska są zróżnicowane w zakresie:

$$t_{\text{min}}^* = 44^{\circ}\text{C} \quad \div \quad t_{\text{max}}^* = 62^{\circ}\text{C}$$

\*w miejscu pomiaru

$t_{\text{max}}^*$  osiągnięto w obliczeniach przy obciążeniu segmentu:

$$F_{\text{max}} = 2 \times F_{\text{śr}}$$

$t_{\text{min}}^*$  osiągnięto w obliczeniach przy obciążeniu segmentu:

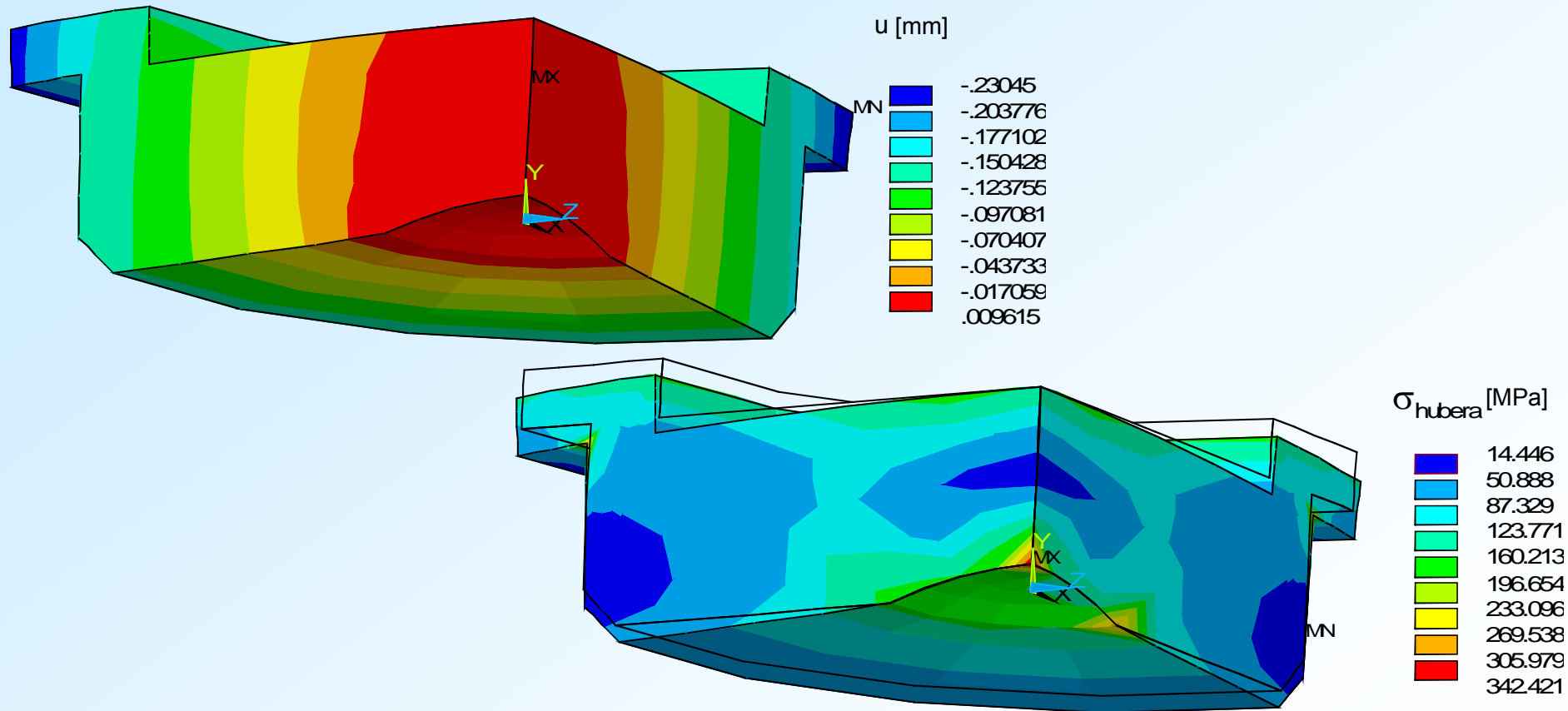
$$F_{\text{min}} = 0.5 \times F_{\text{śr}}$$

Proporcje obciążenia poszczególnych klocków:  $F_{\text{max}} / F_{\text{min}} = 4:1$

W najbardziej obciążonych segmentach grubość filmu na granicy wartości dopuszczalnych: ok.  $30 \text{ } \mu\text{m}$

# Analiza podatności podparcia klocków

## Naturalna podatność podpory klocka



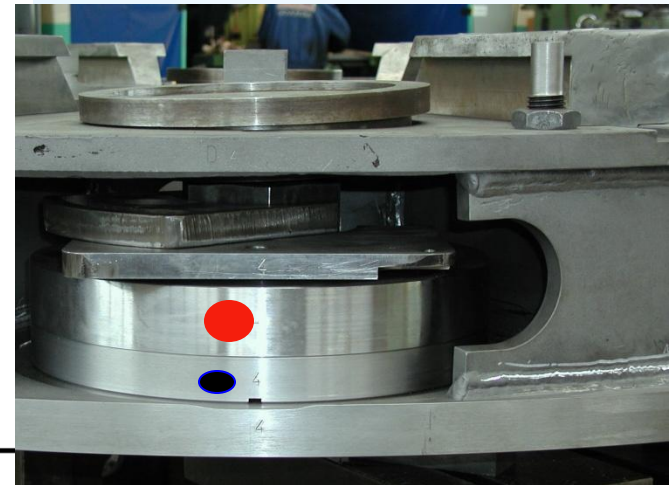
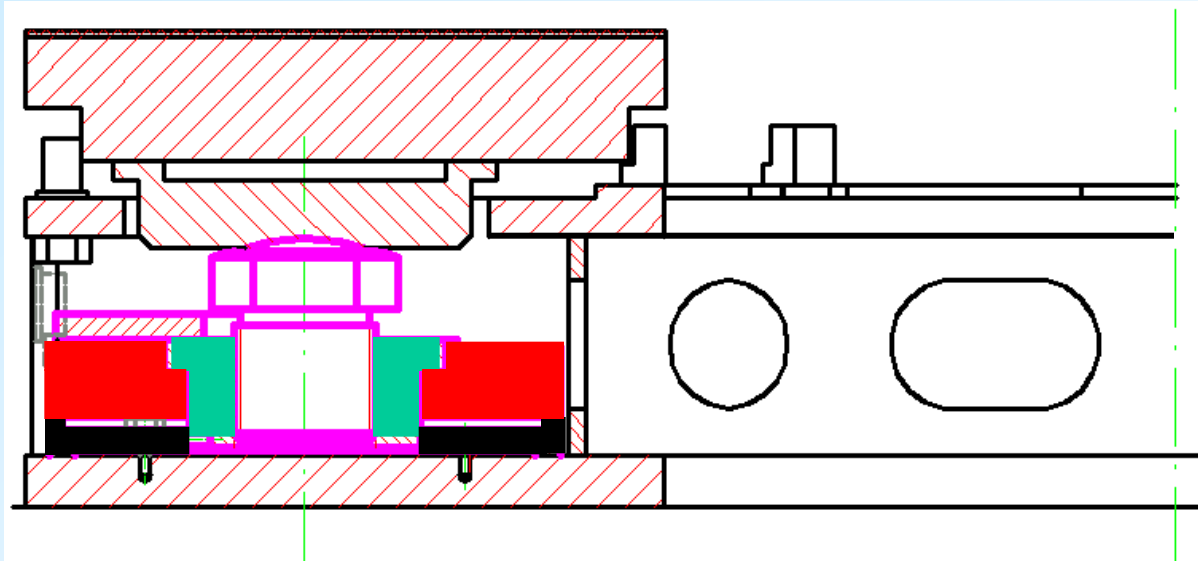
odkształcenie ok. 0.2 mm,  
naprężenia do ok. 200 MPa,  
trudno wyraźnie zwiększyć podatność podpory obecnej  
konstrukcji ponieważ naprężenia są zbyt duże



# Modernizacja konstrukcji łożyska

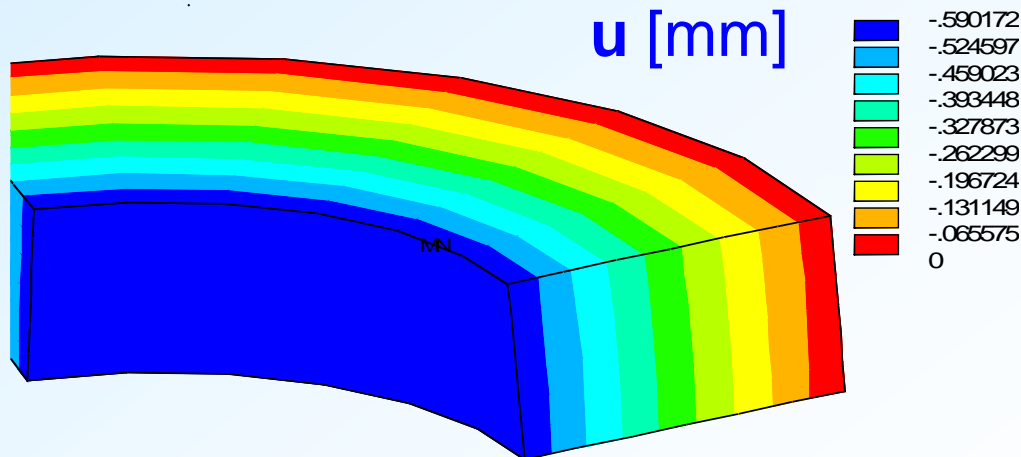
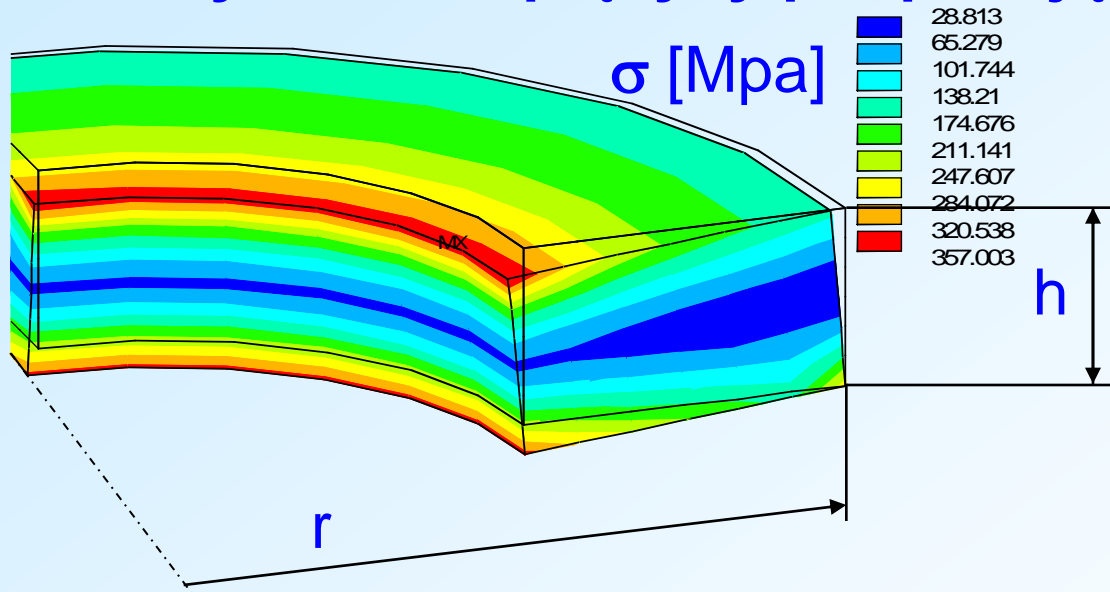
Wymagane radykalne uelastycznienie podparcia klocków

Nowa konstrukcja łożyska - wprowadzono dodatkową sprężystą płytę



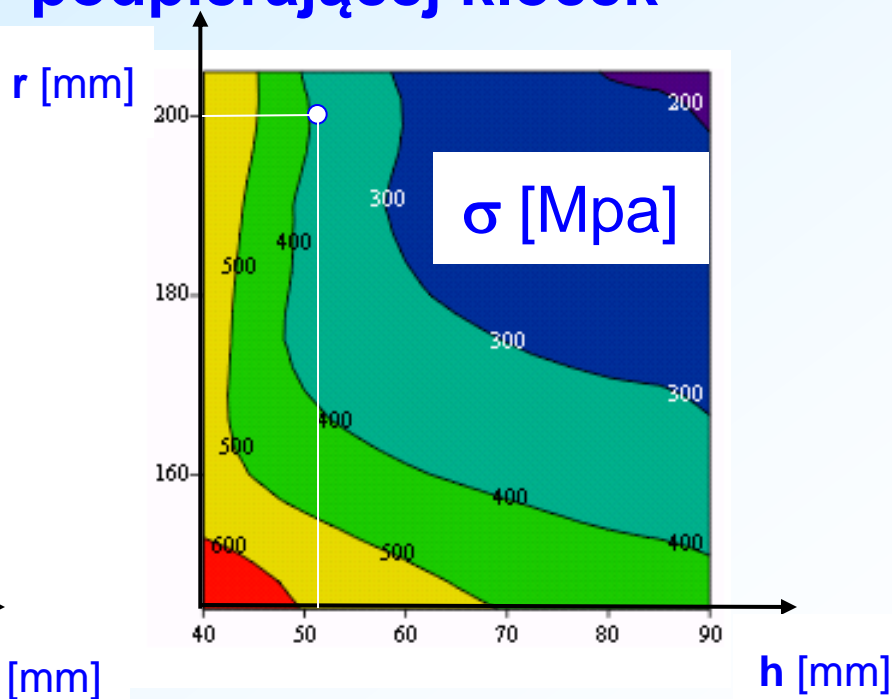
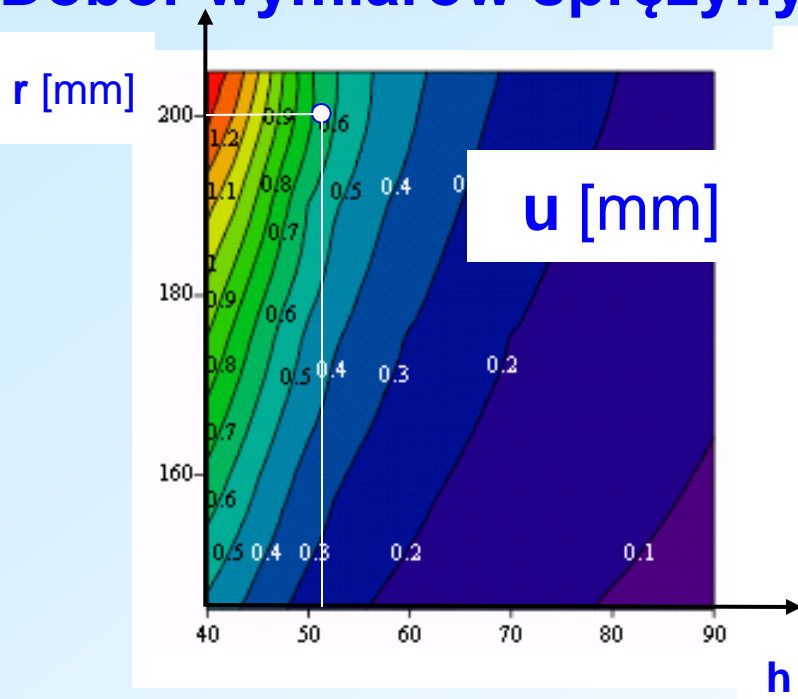
# Modernizacja konstrukcji łożyska

## Dobór wymiarów sprężyny podpierającej klocek



# Modernizacja konstrukcji łożyska

## Dobór wymiarów sprężyny podpierającej klocek



**Dobrano:**

$r=200$  mm,  $h=52$  mm

( $\sigma=380$  MPa,  $f=0.6$  mm)

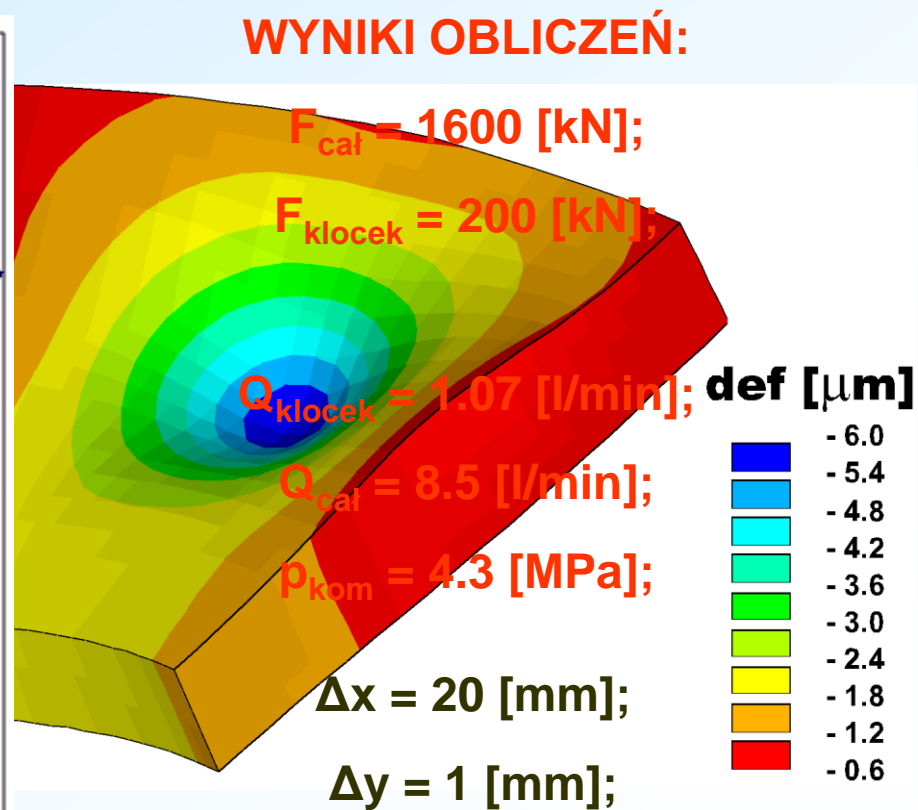
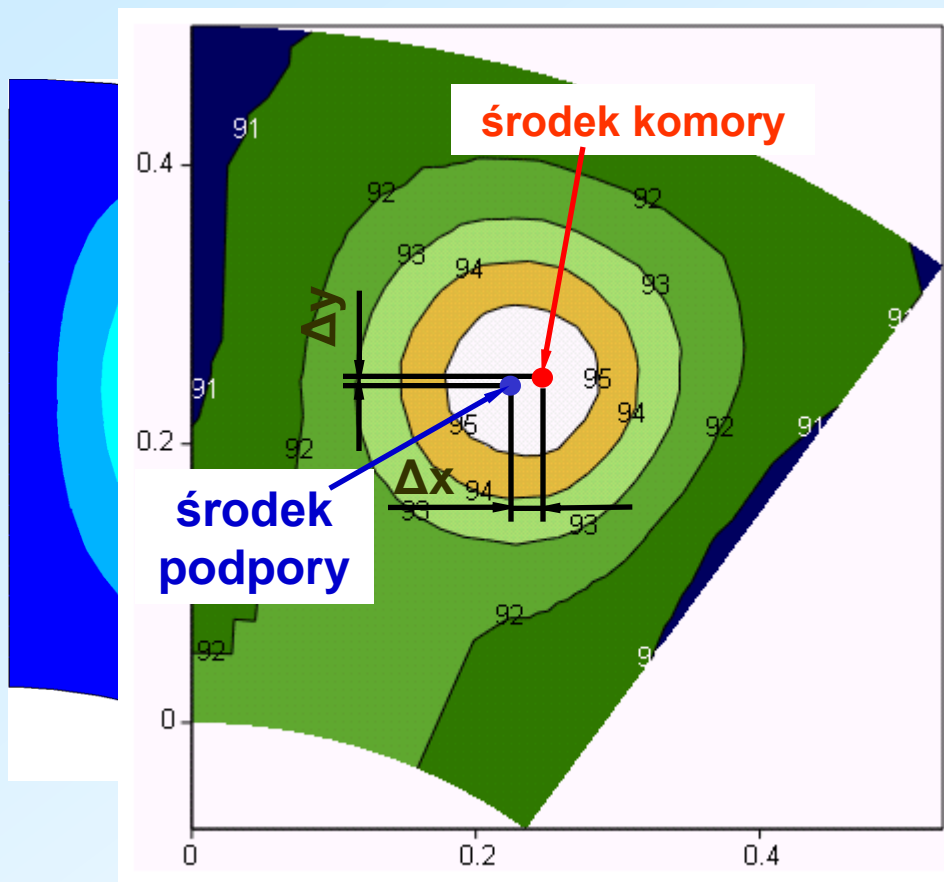
Pierwsze doświadczenia eksploatacyjne:

Zróznicowanie temperatury poszczególnych klocków zmniejszyło się do  $2\div 3$  °C



# Modernizacja łożyska nośnego EW Dychów

## układ hydrostatycznego smarowania - weryfikacja parametrów

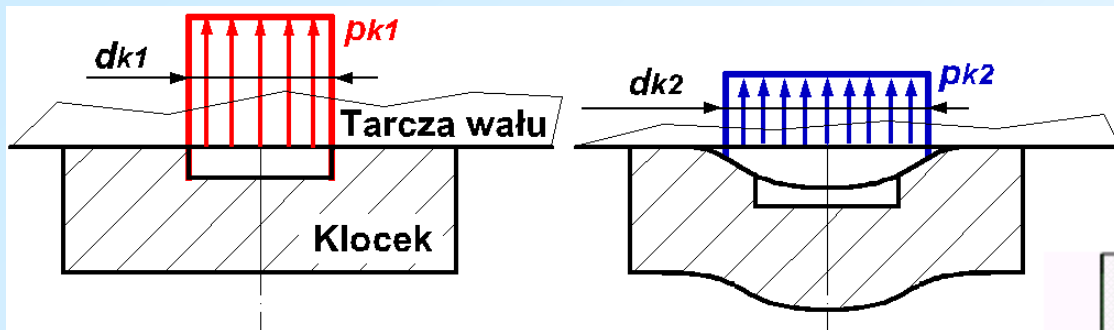




# Modernizacja łożyska nośnego EW Dychów

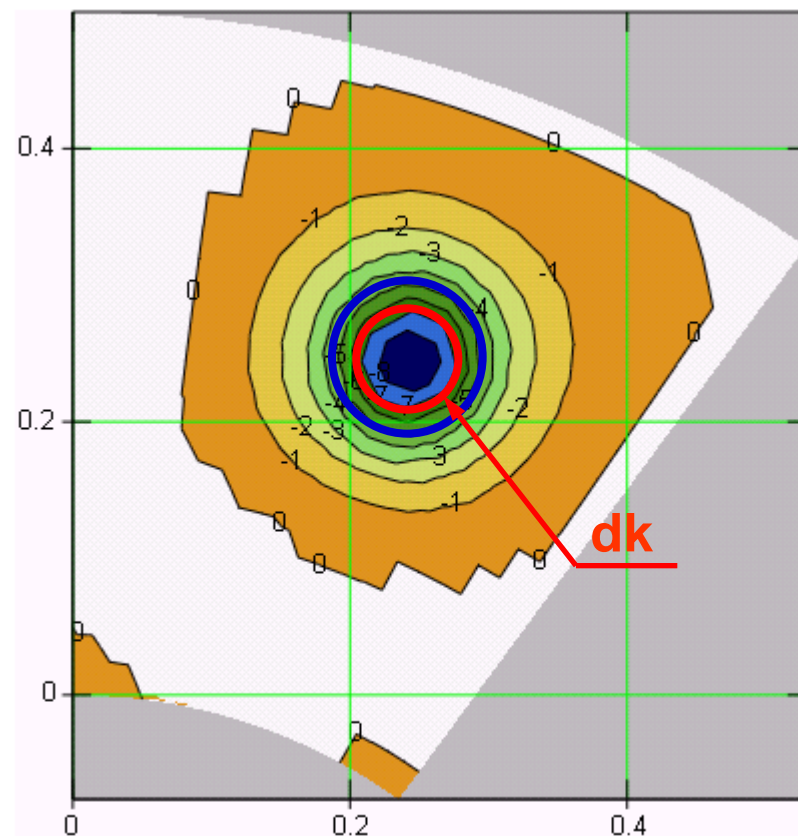
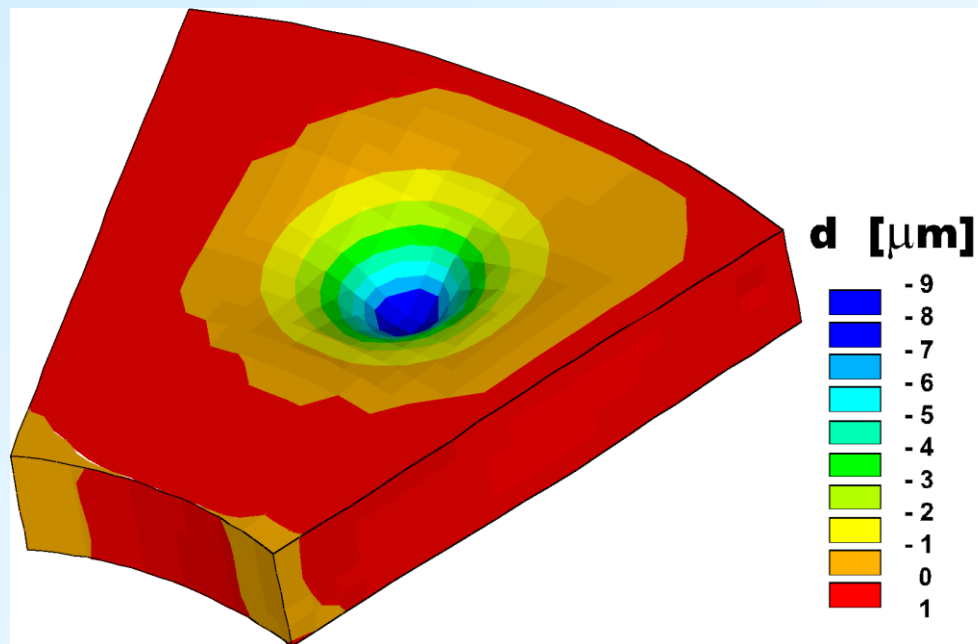
## układ hydrostatycznego smarowania - „otwarcie” komory

Wpływ deformacji sprężystych na zwiększenie czynnej powierzchni komory



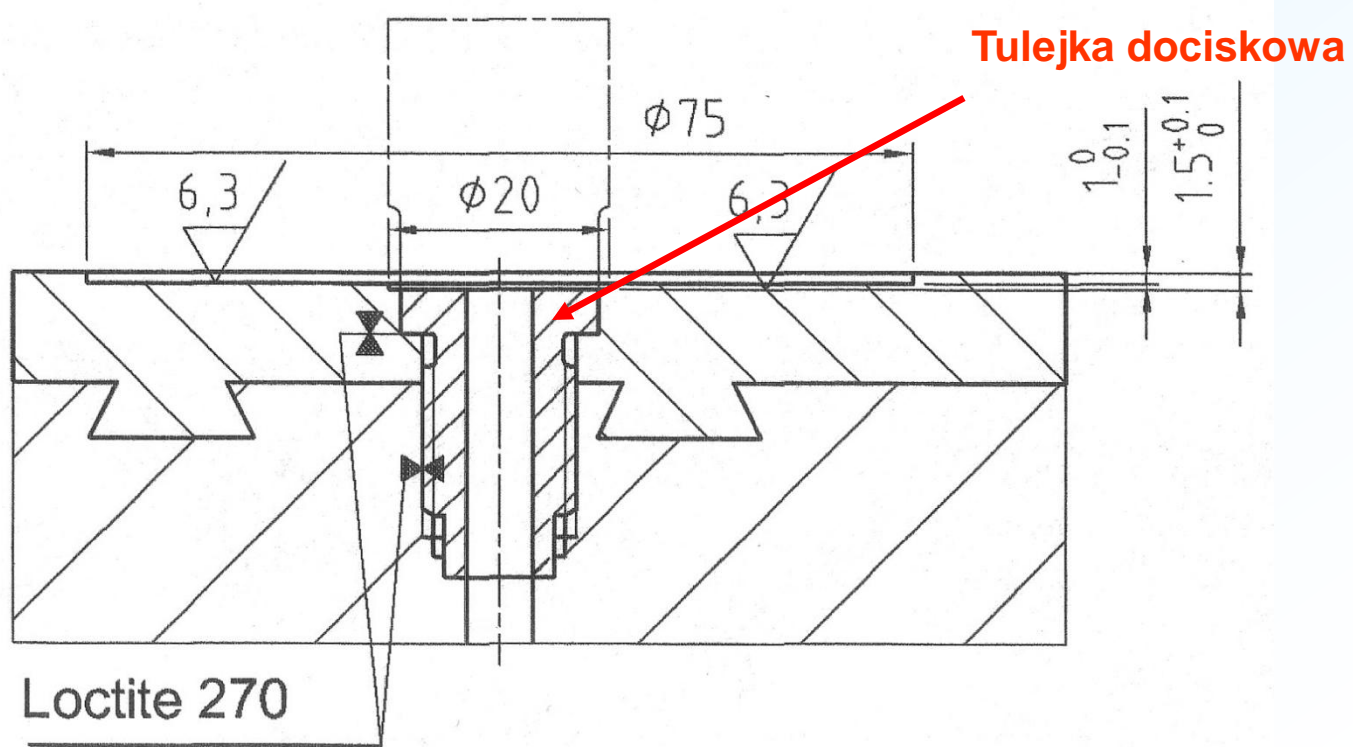
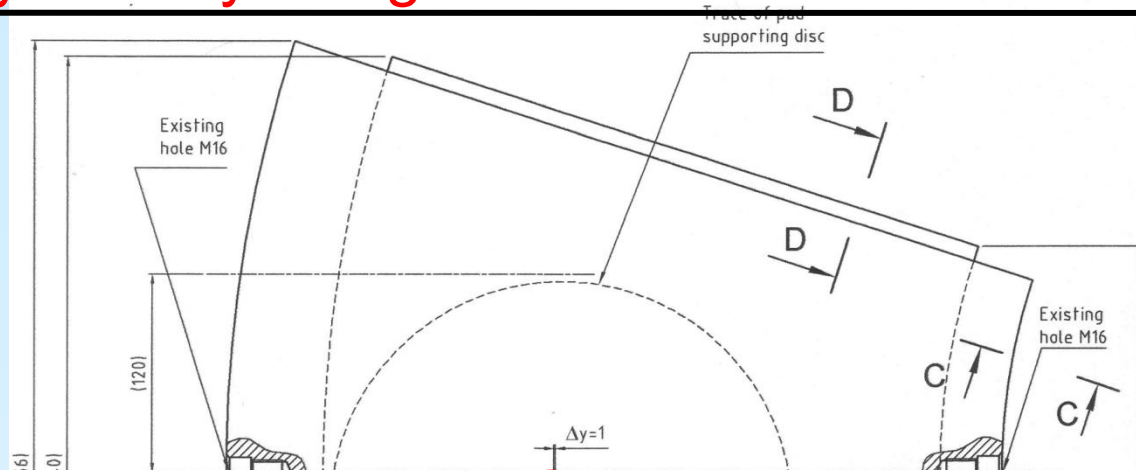
$$dk = 75 \text{ [mm]}$$

$$p_{otw} = 20 \text{ [MPa]}$$

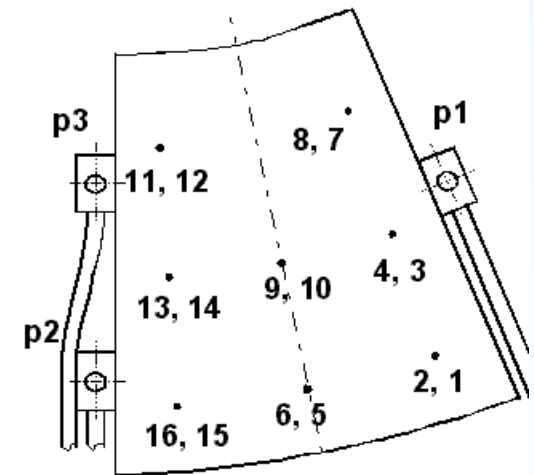
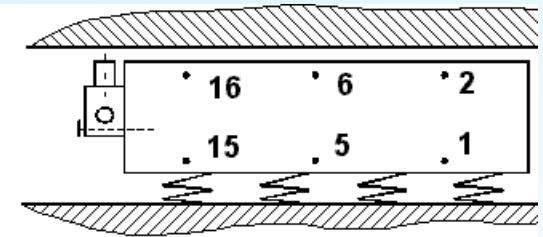
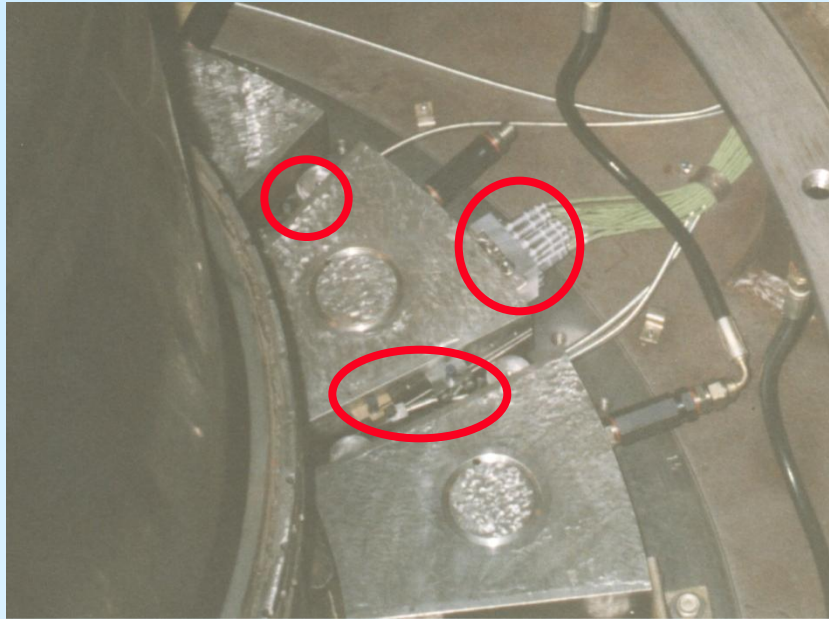


# Modernizacja łożyska nośnego EW Dychów

## układ hydrostatycznego smarowania - konstrukcja klocka



# Program badań eksploatacyjnych - specjalne segmenty pomiarowe



p1- p3 - czujniki przemieszczeń

1-16 - termopary

Pomiary temperatur i grubości filmu we  
wszystkich stanach pracy przed i po  
modernizacji układu chłodzenia w różnych  
warunkach zewnętrznych w dwóch różnych  
maszynach –

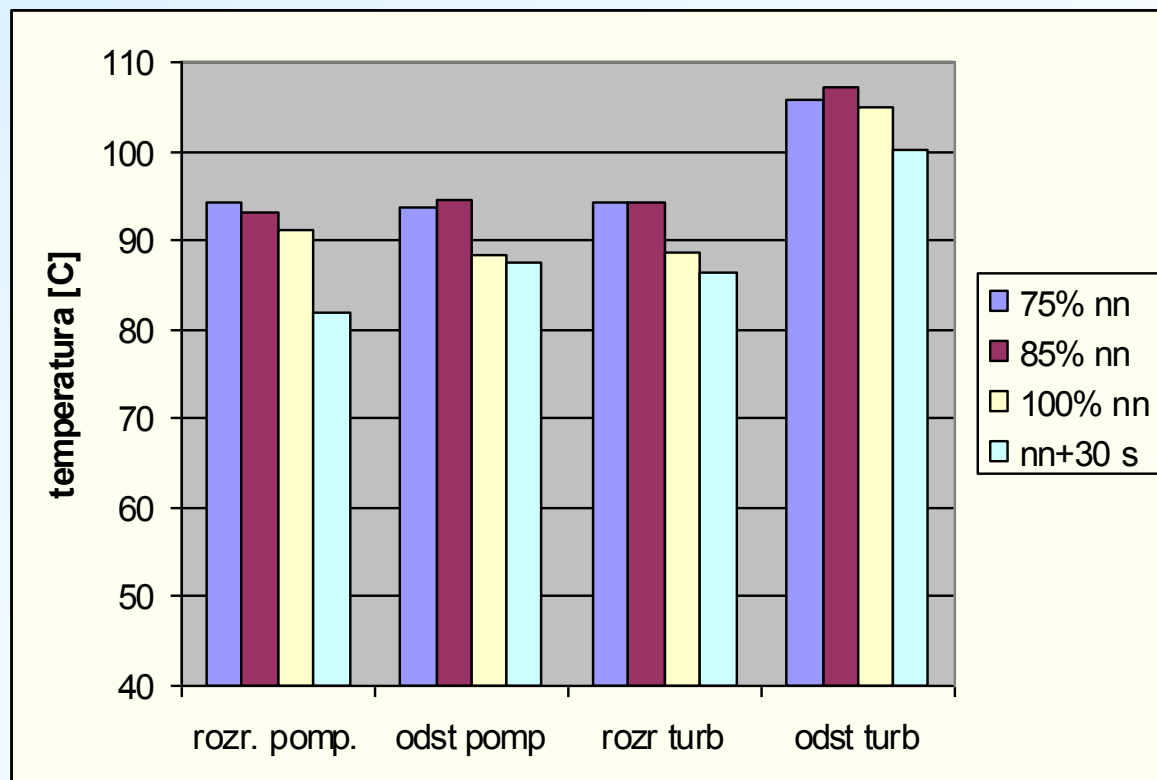
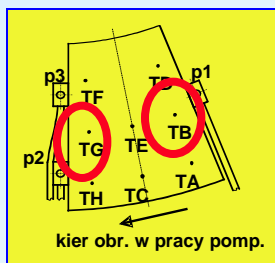
3 osobne kilkudniowe sesje pomiarowe

# Wpływ czasu pracy pompy hydrostatycznego smarowania na warunki pracy łożyska

- porównywano temperatury i grubości filmu w momencie największego obciążenia łożyska w różnych stanach nieustalonych (rozruch do pracy pompowej i turbinowej, oraz odstawienie po pracy pompowej i turbinowej)
- przy różnym czasie pracy pompy (do 75% nn, do 85% nn, do 100% nn i 30 s po nn)

**Temperatura powierzchni ślizgowej w środku krawędzi wylotowej**

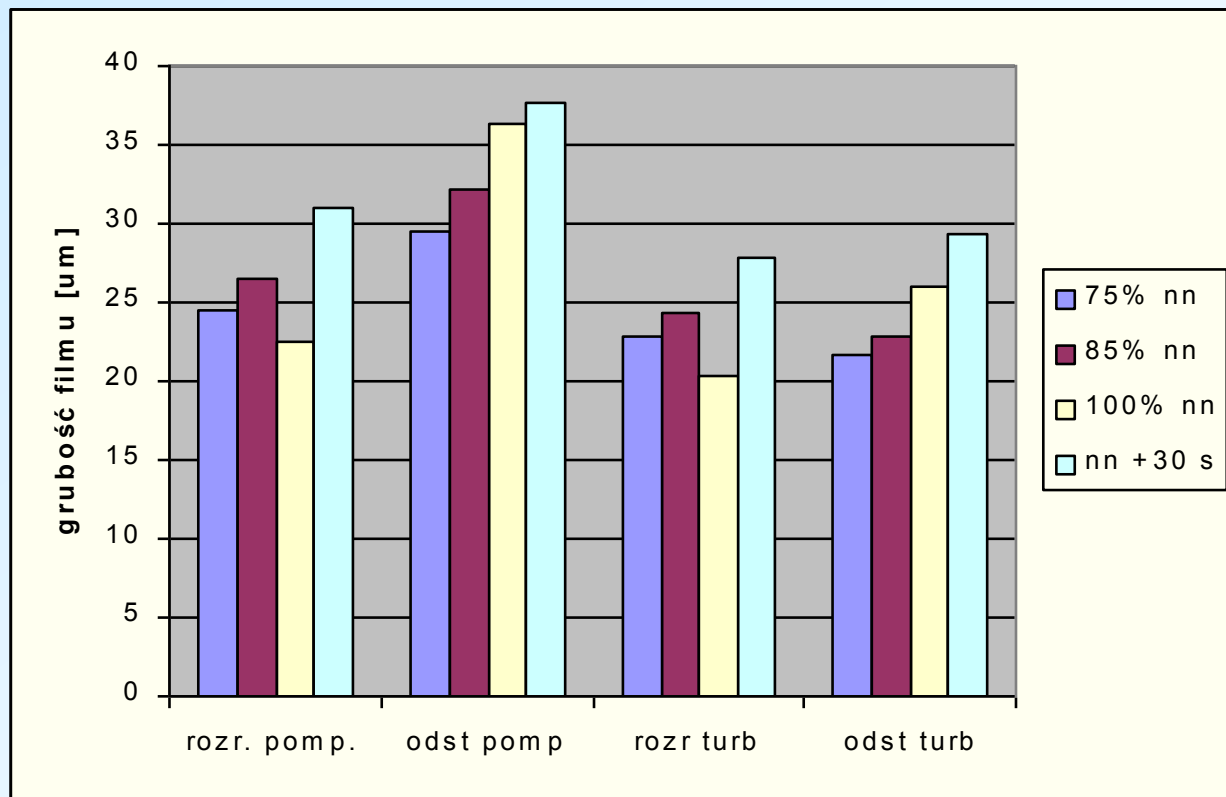
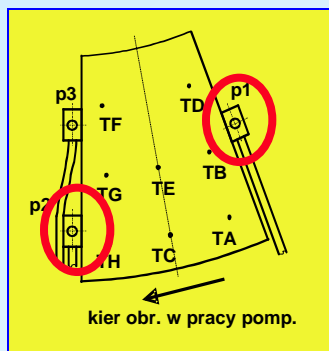
w okolicach dużego ciśnienia hydrodynamicznego



# Wpływ czasu pracy pompy hydrostatycznego smarowania na warunki pracy łożyska

Najmniejsza zmierzona grubość filmu (bliska  $h_{\min}$ )

p1 lub p2 w zależności od kierunku obrotów



Bardzo zachęcające wyniki, brak jakichkolwiek negatywnych aspektów przedłużania pracy układu hydrostatycznego (poza trwałością mało kosztownego układu) ⇒ decyzja o zmianach w procedurze rozruchu i wybiegu

W związku z literaturowymi doniesieniami o stosowaniu hydrostatycznego wspomaganie w pracy ciągłej decyzja o przeprowadzeniu badań w EW Porąbka Żar

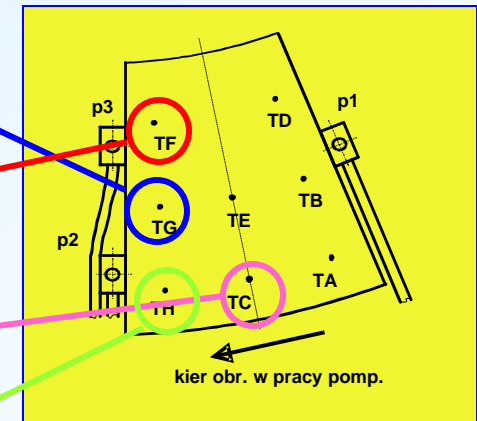
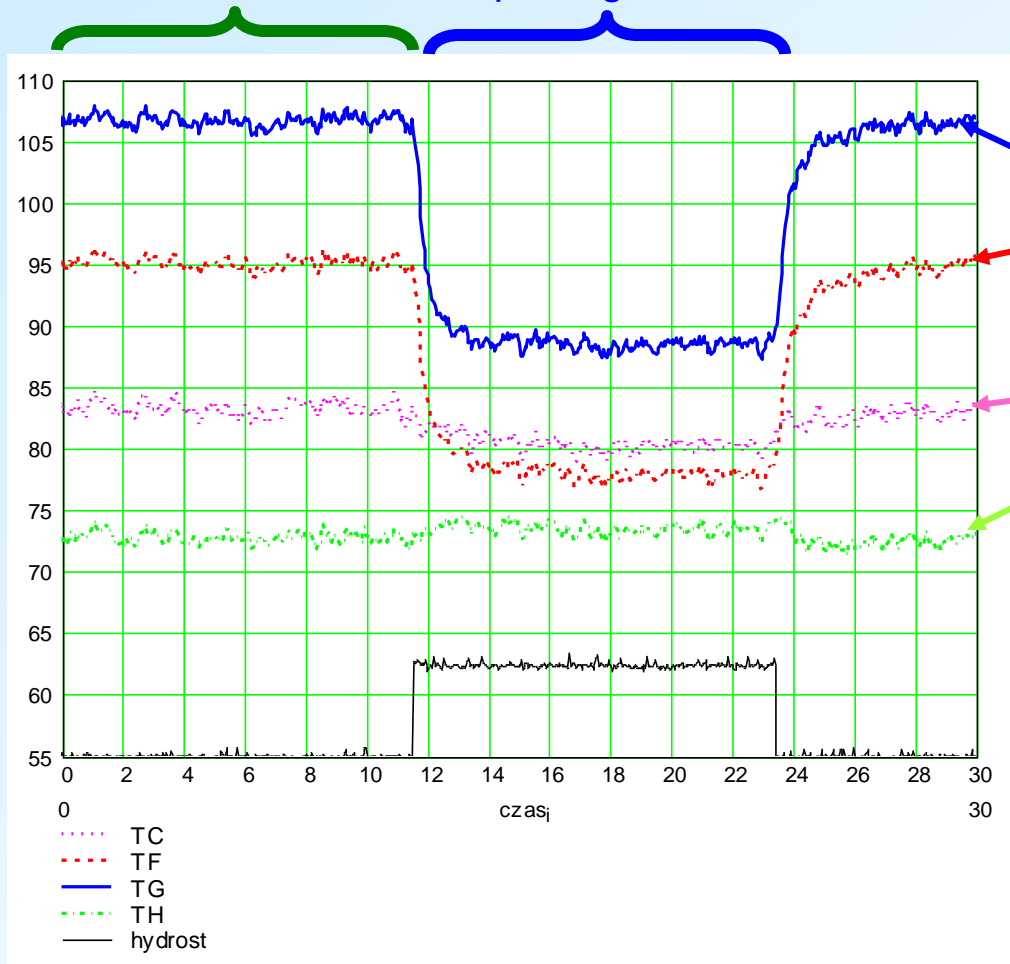
# Ustalona praca pompowa

## z wykorzystaniem hydrostatycznego wspomagania

Temperatura powierzchni ślizgowej [°C]

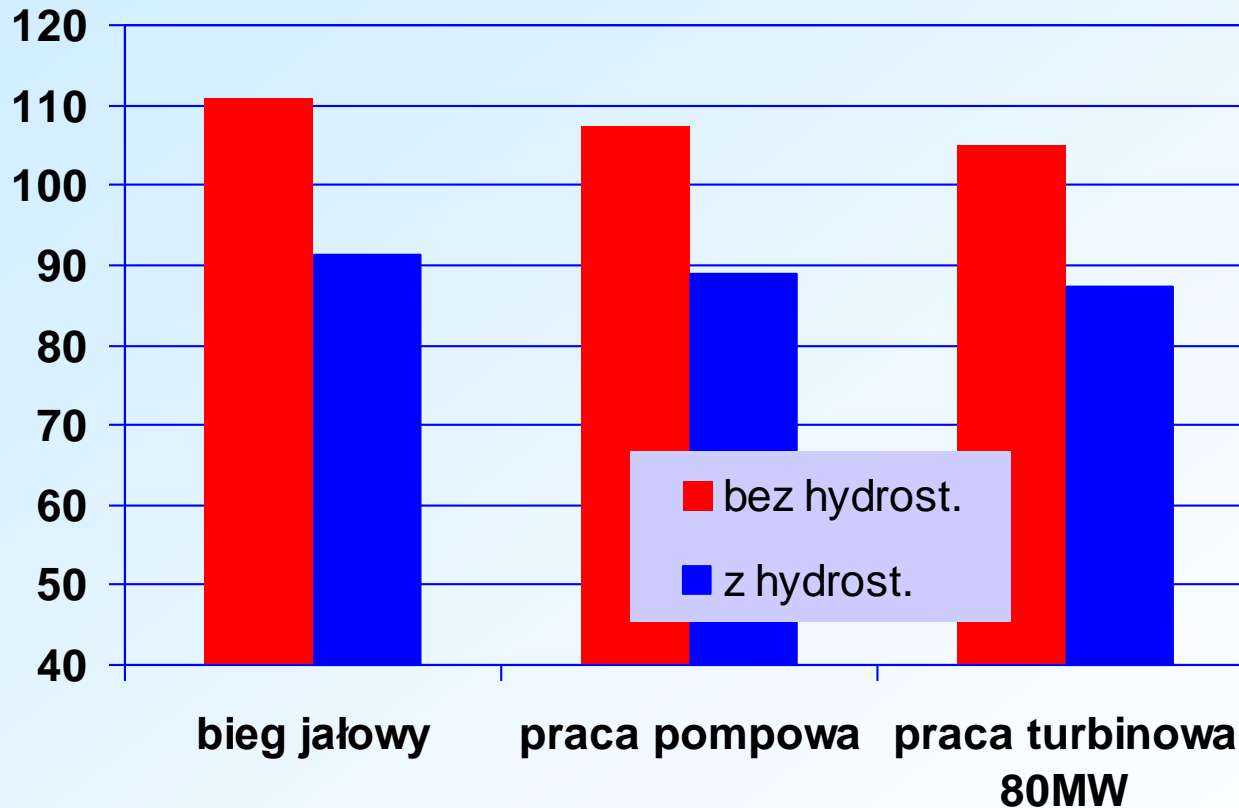
bez hydrostatycznego  
wspomagania

z hydrostatycznym  
wspomaganiam



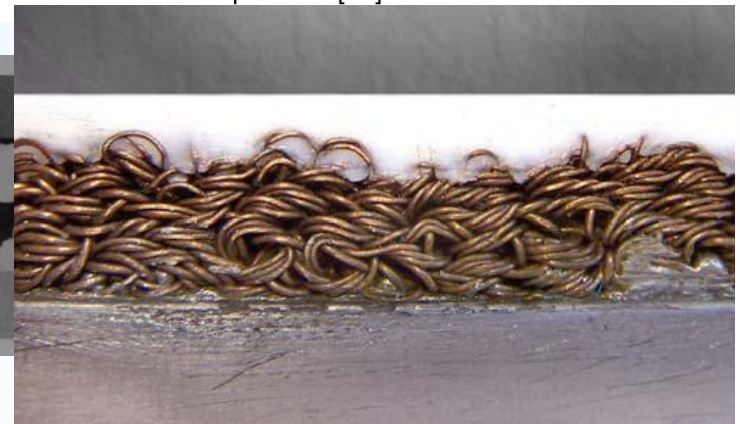
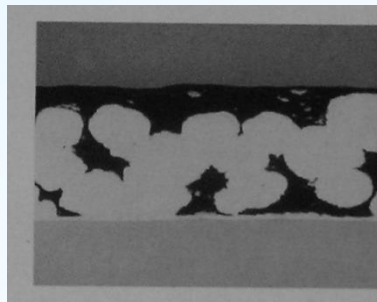
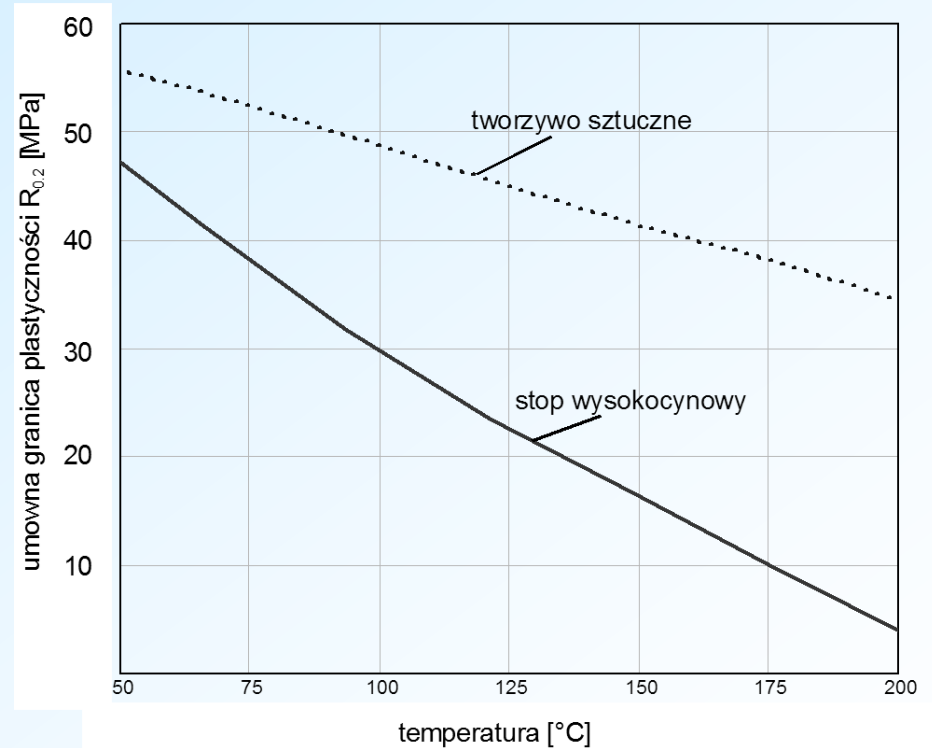
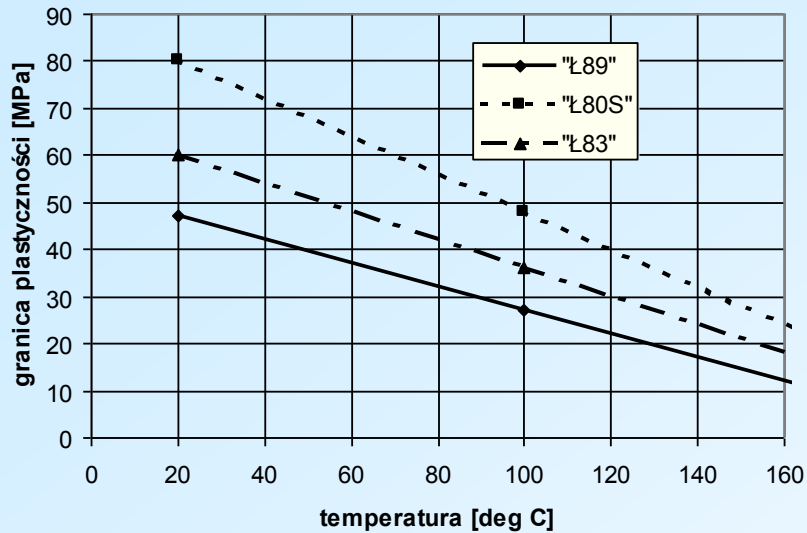
# Efekty stosowania smarowania hydrostatycznego w pracy ciągłej - zbiorcze wyniki

„Najwyższa” temperatura powierzchni ślizgowej w różnych stanach pracy



Najwyższa temperatura powierzchni ślizgowej obniżona o prawie 20°C

# Ograniczenia materiałowe – stop łożyskowy („kompozycja”) a tworzywo sztuczne





# Stosowanie polimerów w łożyskach wzdłużnych



ot. 2. Widok warstwy ślizgowej łożyska z polimerową warstwą ślizgową: a) z warstwą pośrednią z drutu brązowego lub miedzianego, z warstwą pośrednią ze spiekane go brązu.

