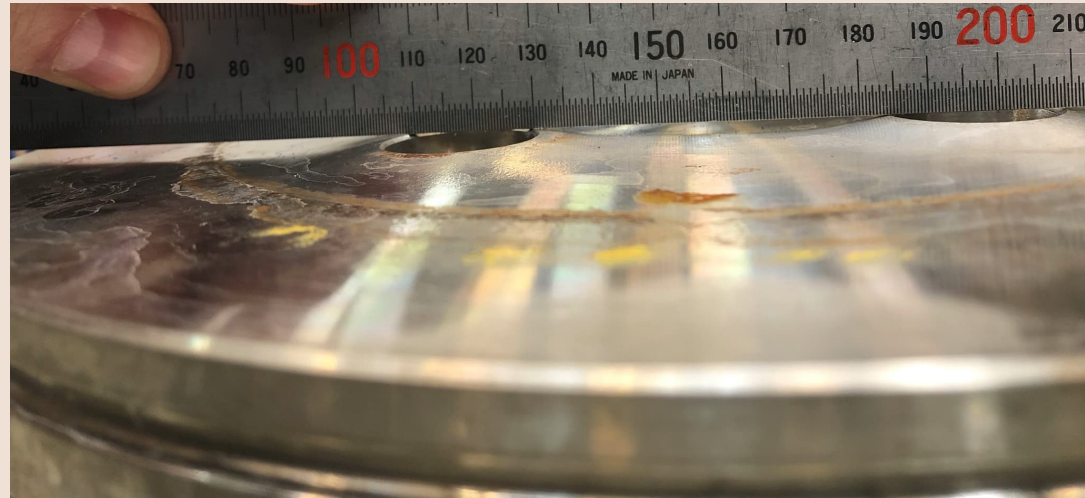




# Optimering af kilelejedesign, Odins Bro.

Søren Gustenhoff Hansen, COWI  
Nikolaj Smith Lorenzen, SH Group

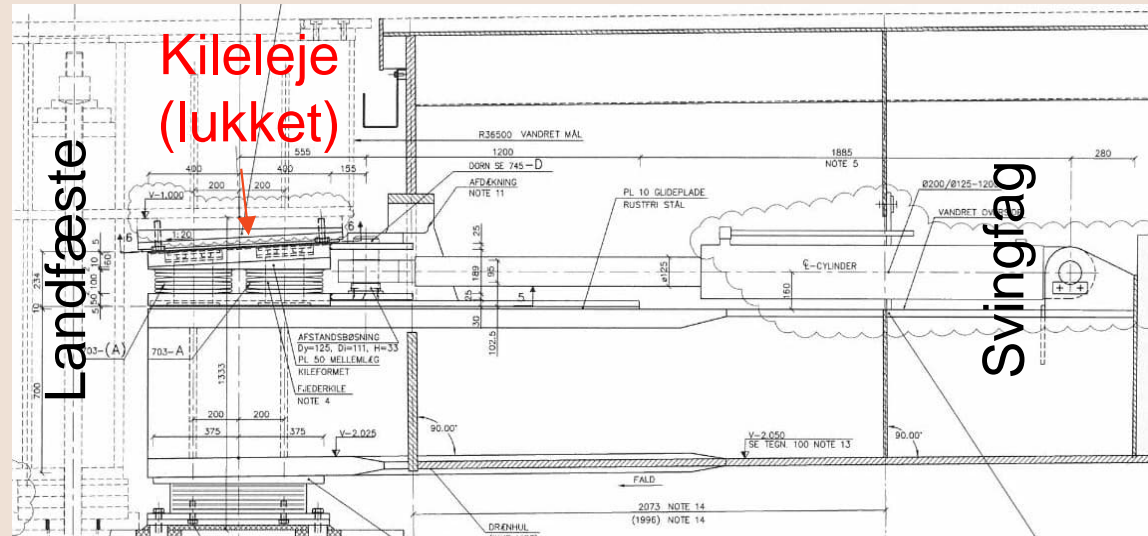
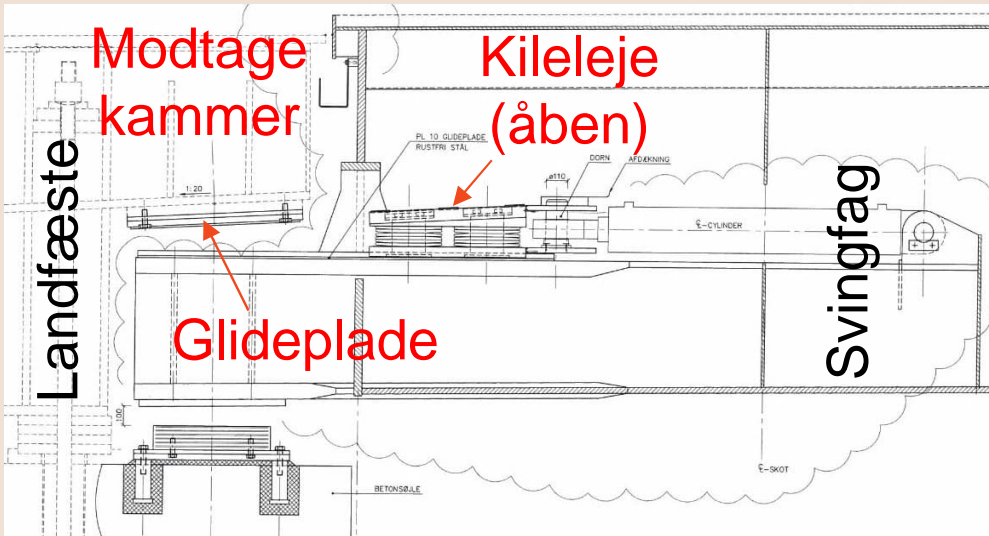
# Hvor startede det hele?

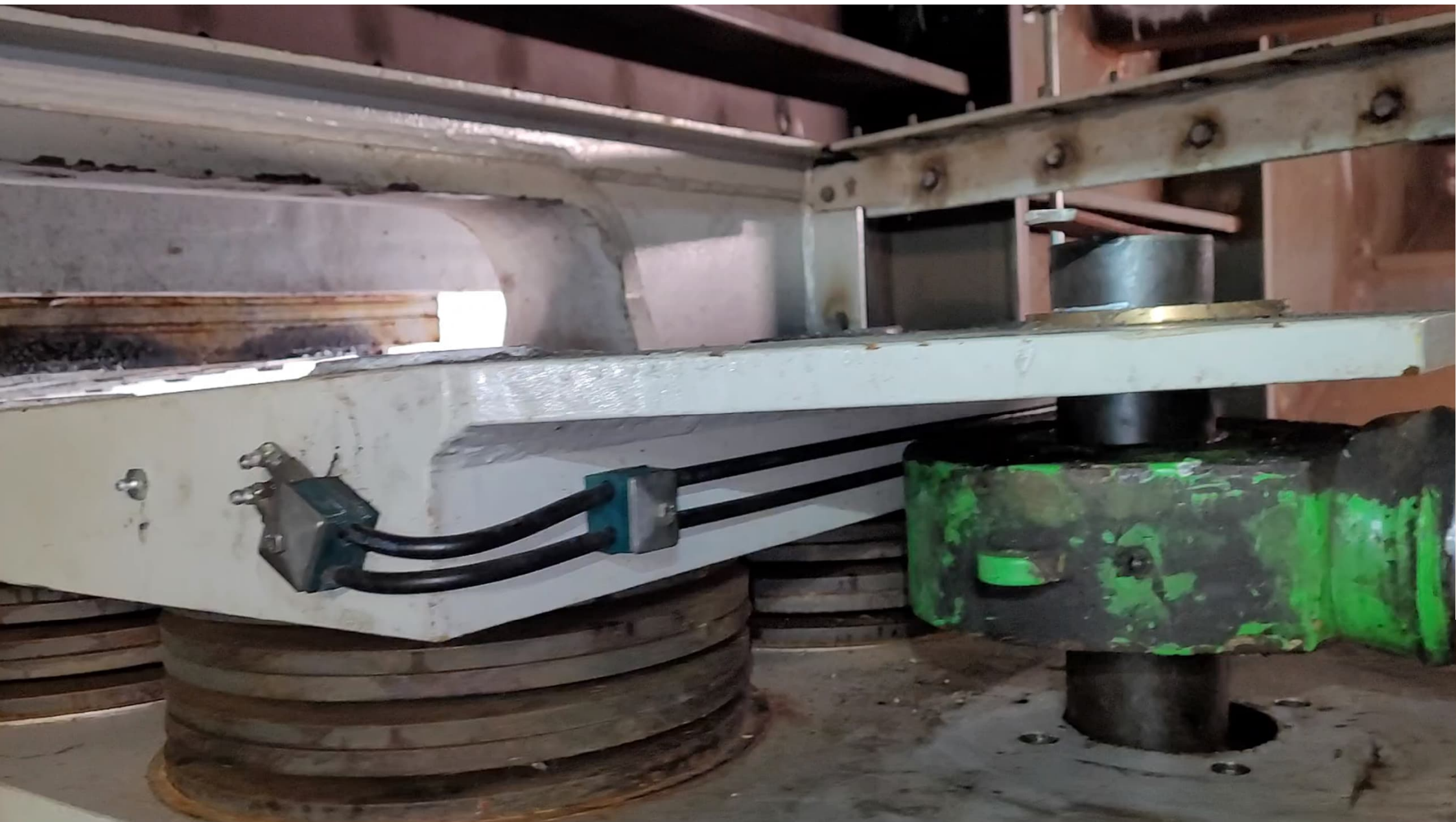


- Diagnosticeringen af de tilbagevendende skader (COWI)
- Nyt koncept for kilelejet (COWI)
- Funktionskrav (COWI)
- Dimensionering af nyt leje (SH Group)

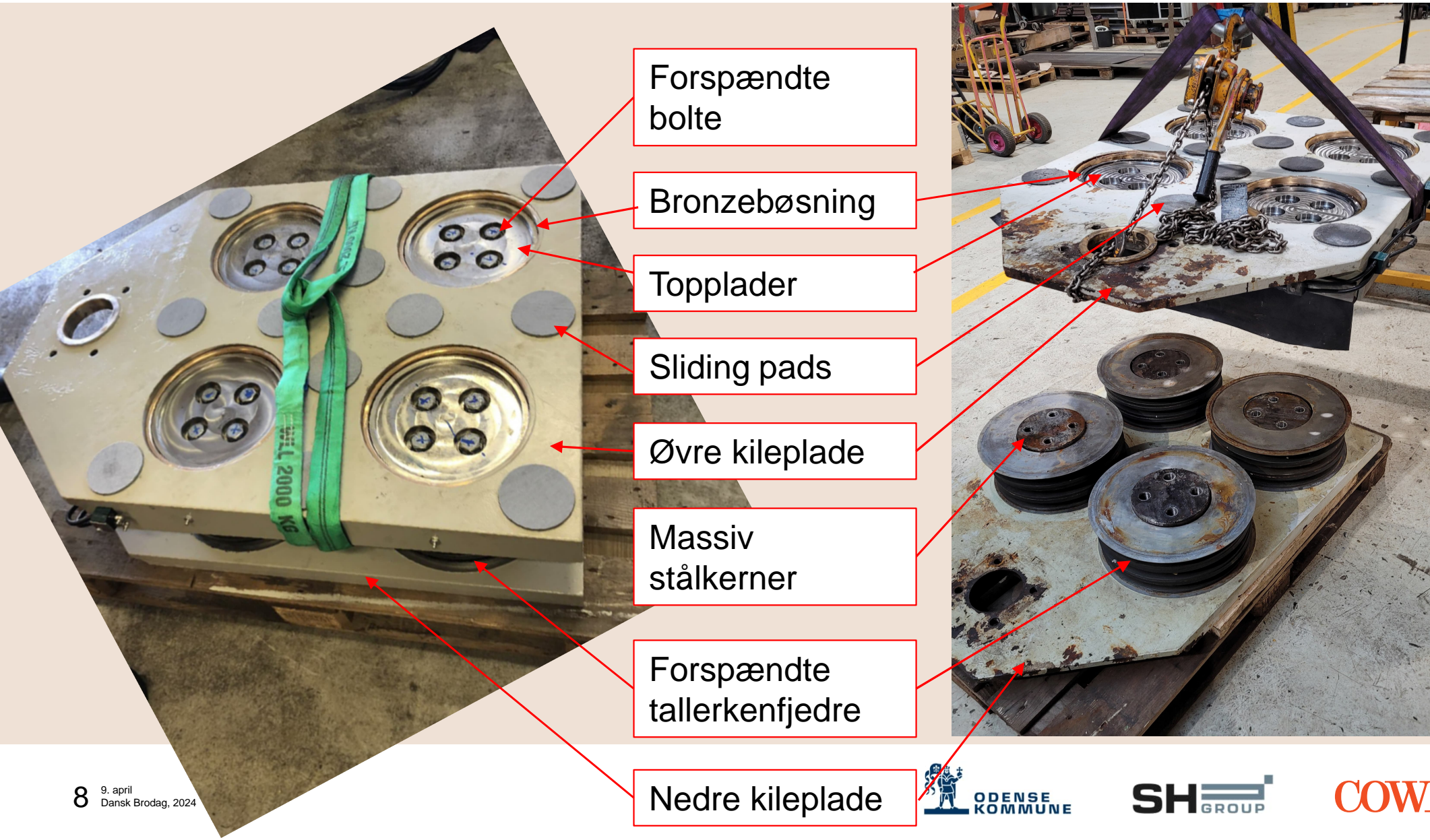












Forspændte bolte

Bronzebøsning

Topplader

Sliding pads

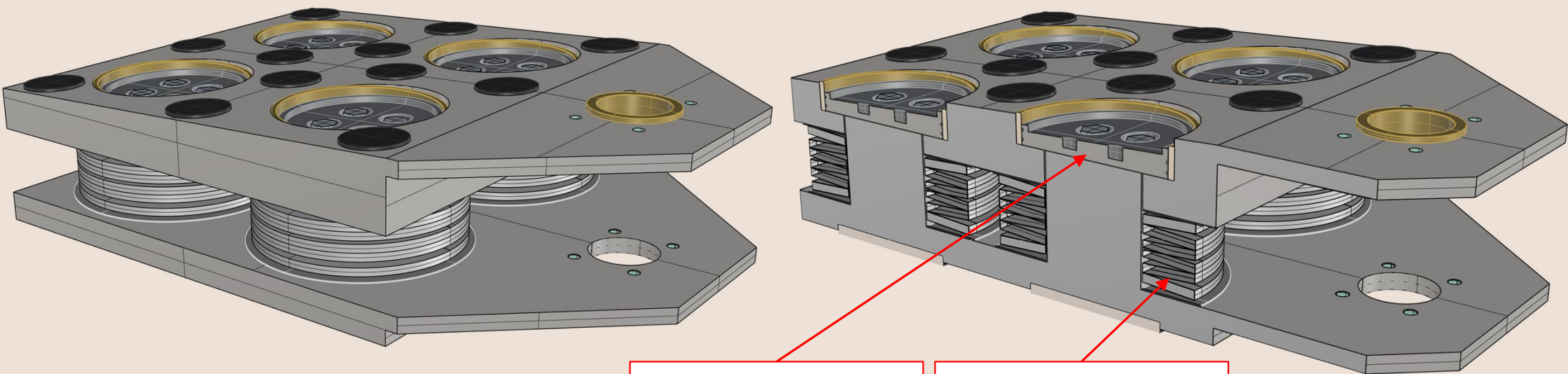
Øvre kileplade

Massiv stålkerner

Forspændte tallerkenfjedre

Nedre kileplade





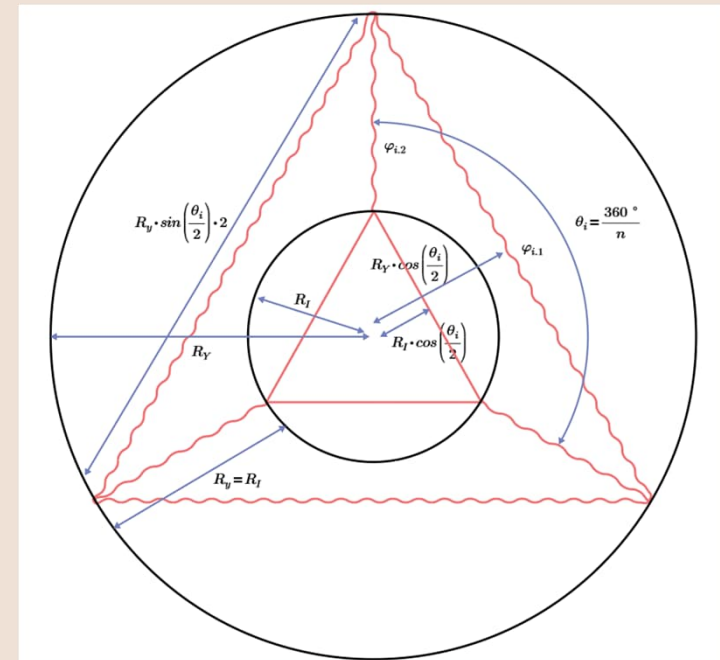
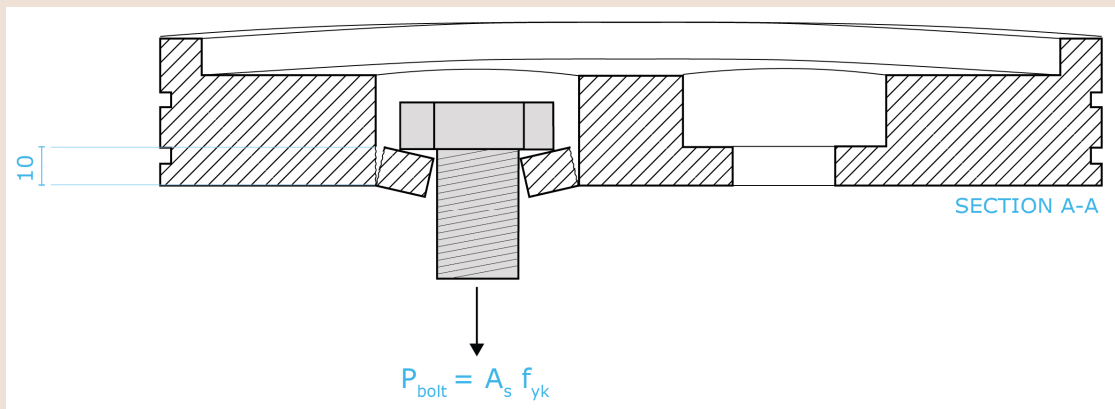
Topplader

Forspændte tallerkenfjedre

# Første analyse - Plasticitetsteori

Hypotese: Skader skyldes for stort træk i boltene

Ideal-plastisk øvreværdiløsning – hurtig vurdering af, om vores hypotese er plausible.



# Første analyse

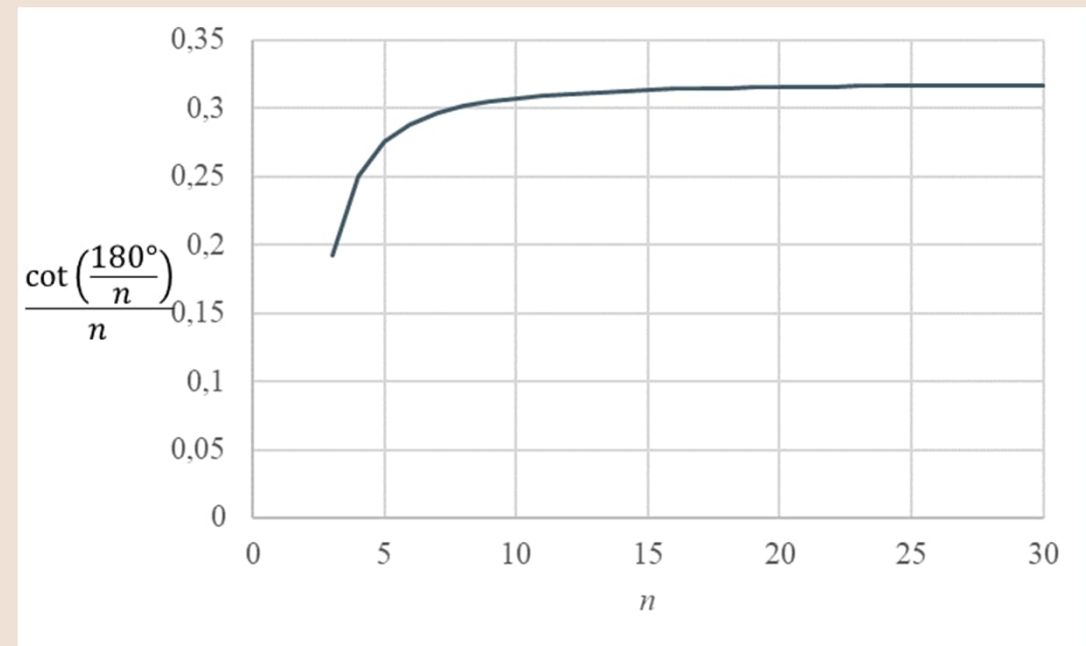
På baggrund af øvreværdiløsningen:

$$M(n) = \frac{P_{\text{bolt}}}{2 \cdot \left(1 + \frac{r}{r_Y - r_I}\right)} \cdot \frac{\cot\left(\frac{180^\circ}{n}\right)}{n}$$

$$M = 0.16 \frac{P_{\text{bolt}}}{\left(1 + \frac{r_Y}{r_Y - r_I}\right)}$$

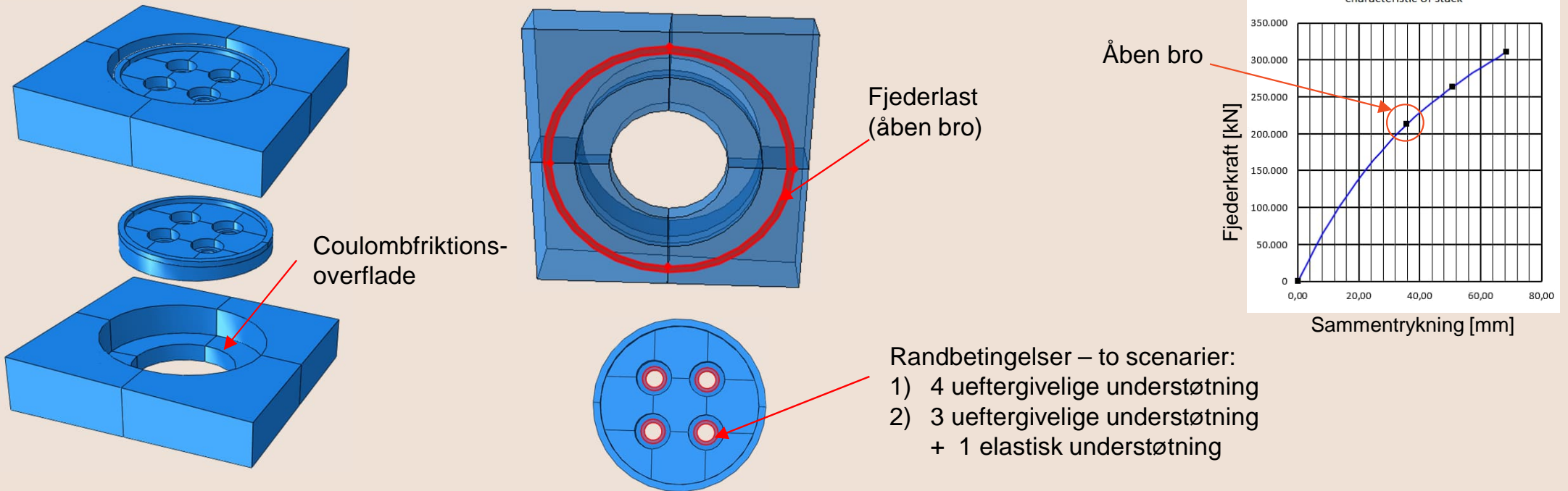
$$\left. \begin{array}{l} \sigma_M = 336 \text{ MPa} \\ \tau = 100 \text{ MPa} \end{array} \right\} \rightarrow \sigma_{VM} = 480 \text{ MPa}$$

>270 MPa -> hypotese sandsynlig



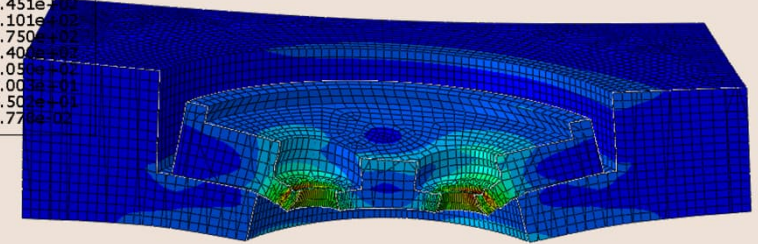
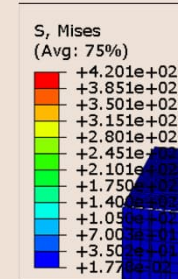
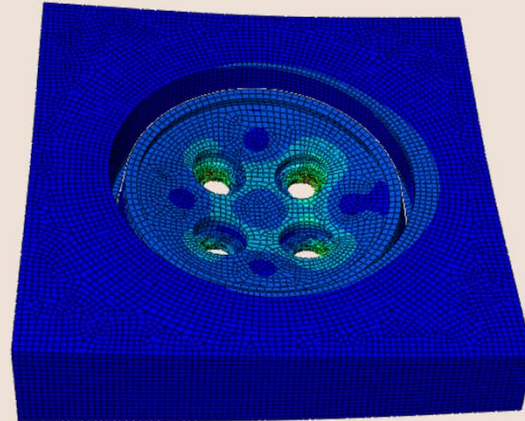
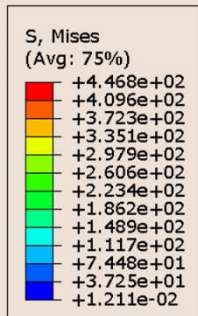
# Anden analyse – NL FEM

Hypotese: *De forspændte tallerkenfjedre er årsagen til skaderne*

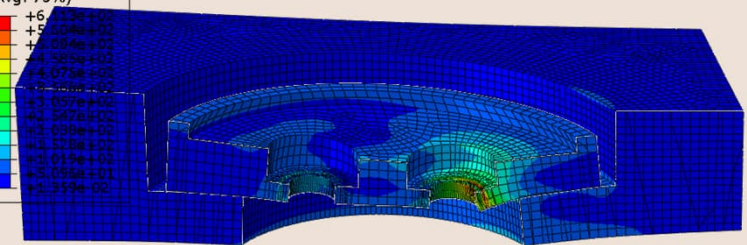
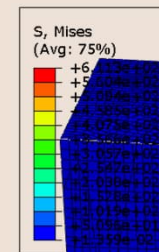
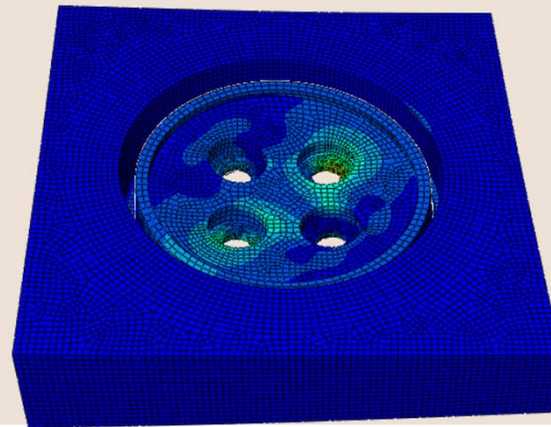
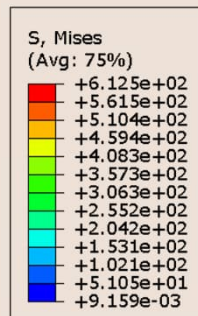


# Anden analyse – NL FEM

Scenarie 1

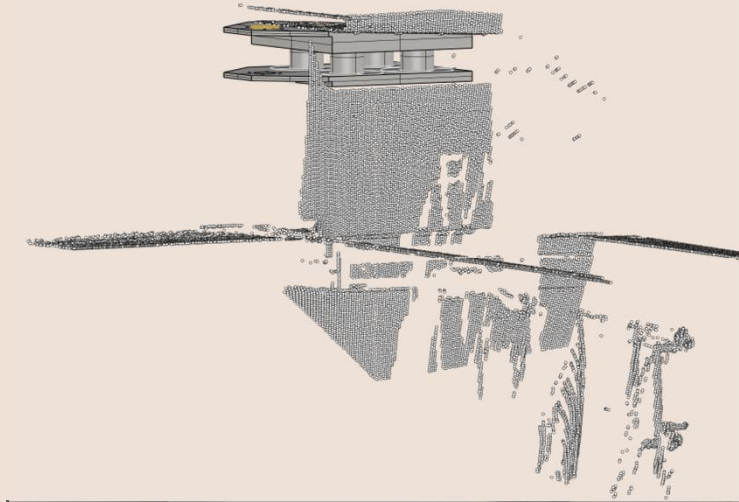


Scenarie 2



# Laseropmåling

- Fjedersamlingen er følsom over for geometrien i modtagekammeret!
- Alle modtagekamrene blev opmålt med laser.
- Forskellen mellem geometrien var for stor til, at ét kiledesign ville virke i alle kamre.
- Er tallerkenfjerderløsningen den rigtige?

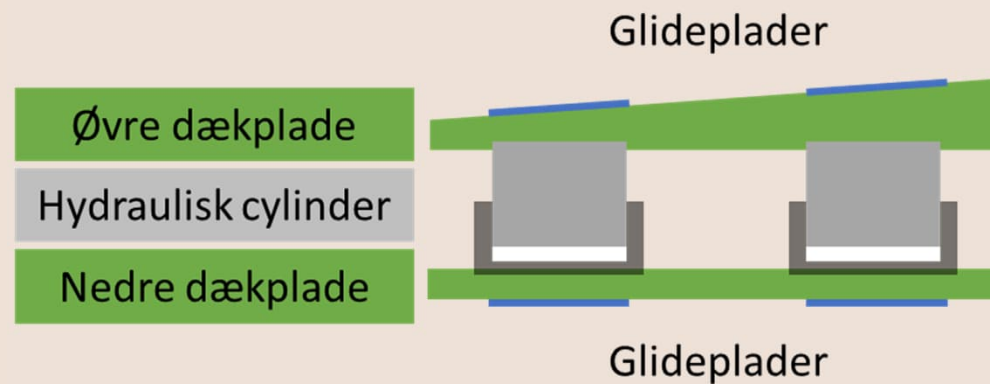


# Knækket fjeder



Er tallerkenfjerderløsningen den rigtige?

# Hydrauliske løsning



Akilleshæl: tværlaster på cylindrerne!



# Funktionskrav til hydraulikløsning

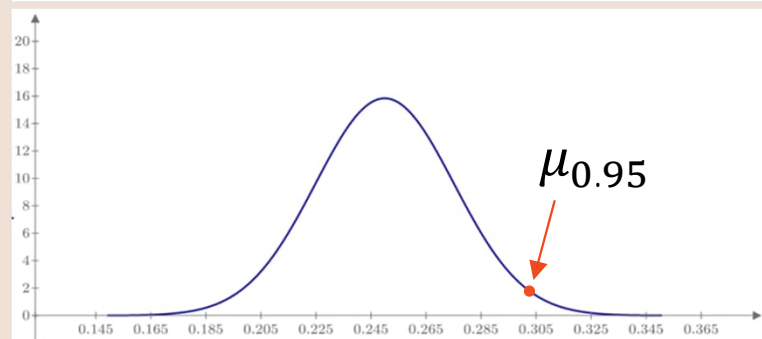
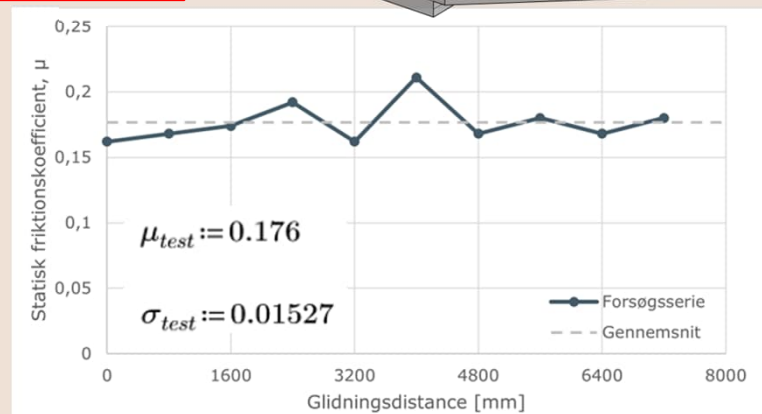
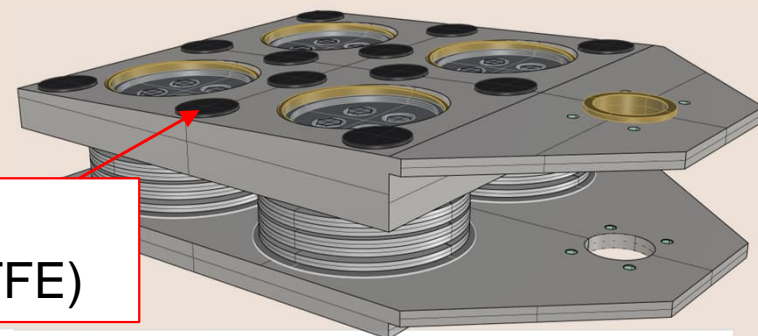
- Cylinderne skal lastes op til **300 kN/cylinder**, når broen er lukket.
- Hver cylinder har en stivhed på **12 kN/mm**.
- Cylinderne skal udstyres med et **mekanisk stop ved 20 mm sammenklemning**.
- For at beskytte cylindrene skal kilen designes, så den glider ved store aksialbevægelser i broen.
- Cylinderne skal dimensioneres for glidekraften (95%-fraktil og partialkoefficient).

Fra den oprindelige funktionsbeskrivelse for broen

# Friktionskoefficienter

- En pad testet 10 gange på "perfekt" underlag
- Litteraturen: variation mellem pads ( $\sigma_{\text{element}} = 0,001$ )
- Hensyntagen til faktiske forhold på broen
  - $\sigma_{\text{system}} = 0,02$
  - Middelværdien hæves ( $\mu_{\text{kor}} = 0,25$ )
- $\sigma_{\text{total}} = \sqrt{\sigma_{\text{test}}^2 + \sigma_{\text{element}}^2 + \sigma_{\text{system}}^2} = 0,25$
- 95%-fraktik:  $\mu_{0.95} = 0,291 \approx 0,3$

Sliding pads  
(T100MX/PTFE)



# SH Group

- SH har kendskab til Odins bro fra designfase og produktion samt servicekontrakt
- SHG har In-house projekt-, designteam, produktion og servicemontører on-site
- Leveret teknik til mere end 30 broer primært i Skandinavien, har idag servicekontrakt på ca. 20 broer

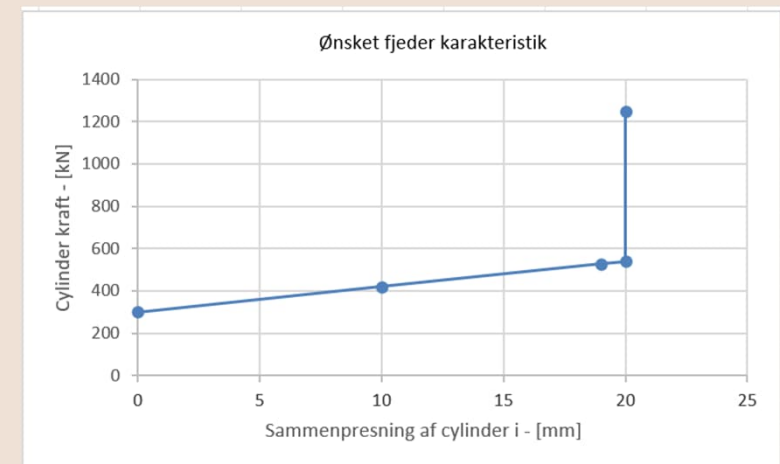
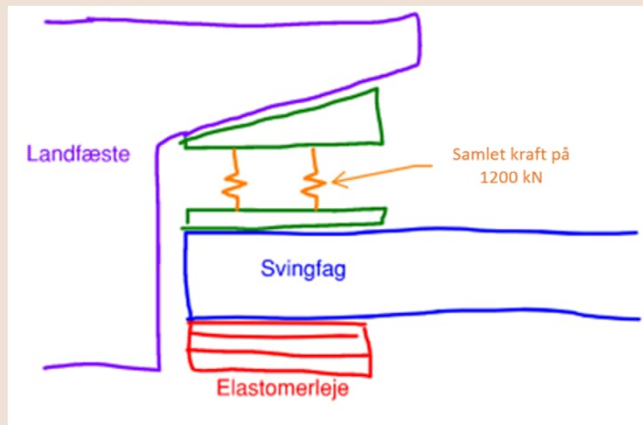


## Designkrav

- Fjeder karakteristisk – Hydraulisk aktiveret fjeder
- Geometri i modtagekammer og bevægelighed
- Samling af bund og topdel af leje
- Optagelse af sidekraft

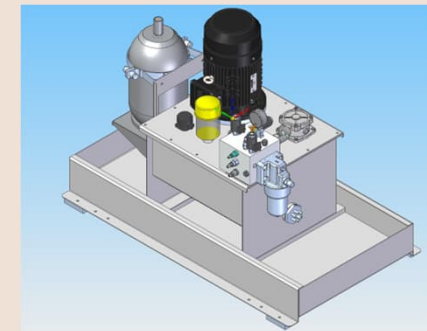
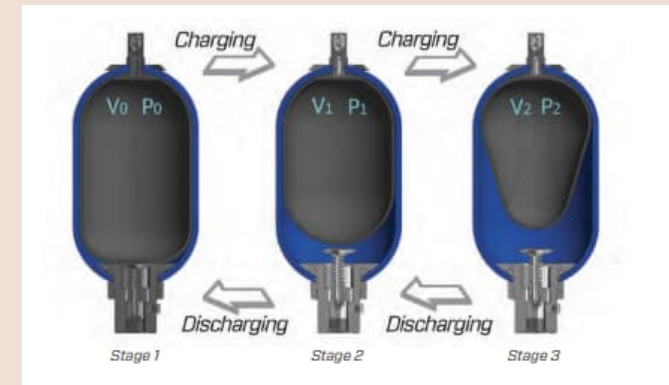
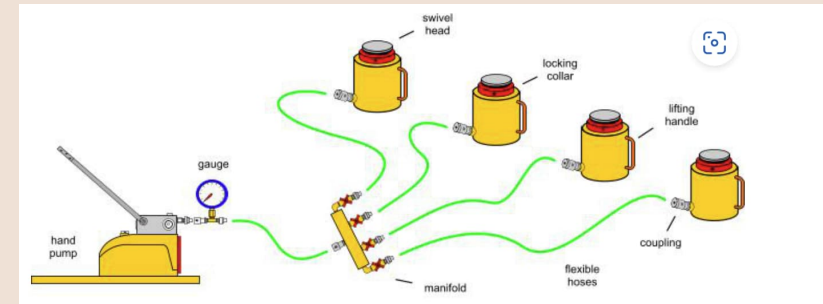
# Fjederkarakteristik

- En kile med en indbygget fjederpakke skal fastholde svingfag mod landfæste, ved at presse svingfaget ned mod et elastomerleje med en fjederkraft
- Forspænding 1200 kN - 300 kN/cyl, stivhed 12 kN/mm
- Bund stop ved 20 mm vandring



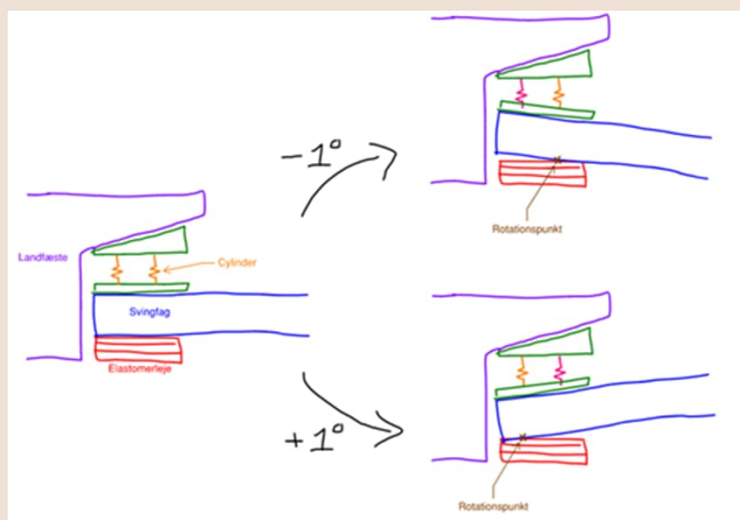
# Hydraulisk aktiveret fjeder

- Parallel koblede hydraulisk cylinder erstatter fjedrepakke – forbundne kar
- Fjedring opnås med fælles akkumulator
- Fortrængt olie fra de 4 cylindere giver mere ensartet samlet fjeder reaktion
- Cylinder aktiveres først når kile er på plads
- HPU for hver kile med tryk overvågning mm. for tilstands kontrol. Samt mulighed for tilpasning af fjederkarakteristik



# Geometri

- Grundet byggetolerancer, temperaturudvidelser af konstruktion mm, er der et relativt stort toleranceområde som kilen skal kunne fungere indenfor
- Byggehøjden i kilens nominelle center er af Cowi opmålt til 254-261 mm og vinklerne i modtagekammerets top varierer  $2,7^\circ - 3^\circ$  samt tolerance +/- 1,3 grad

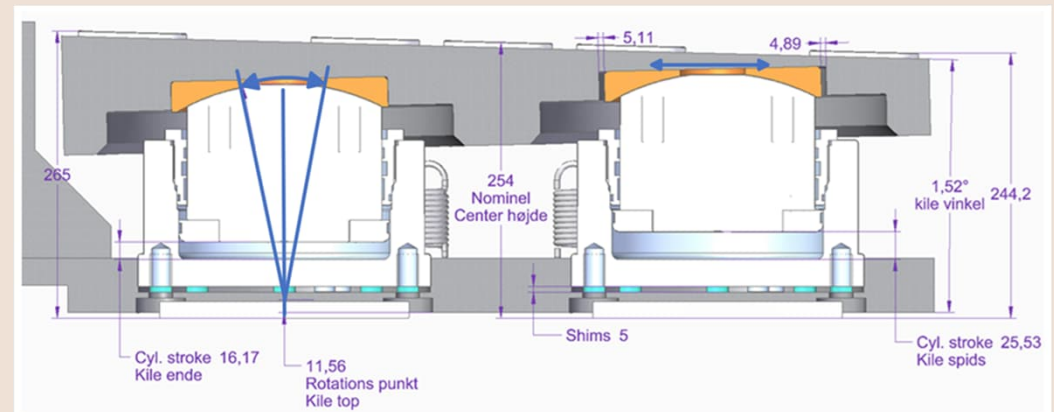
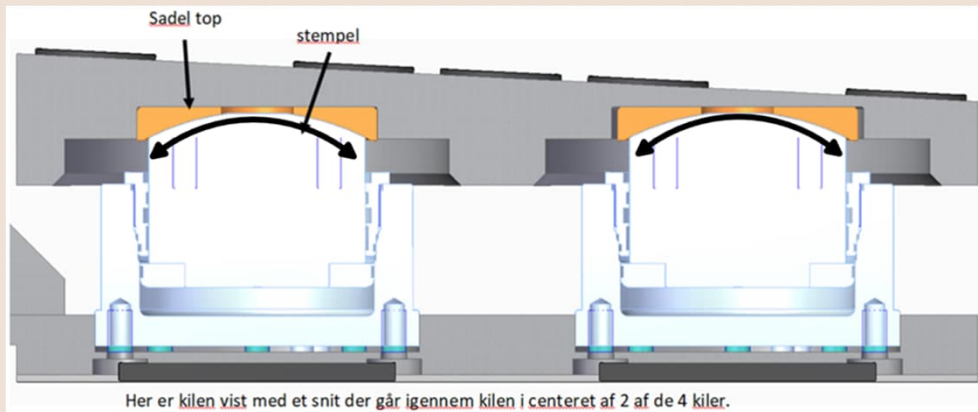


	Vinkel modtagekammer oplyst af COWI
Sydøstlig kile	3
Nordøstlig kile	2,7
Sydvestlig kile	2,8
Nordvestlig kile	2,7

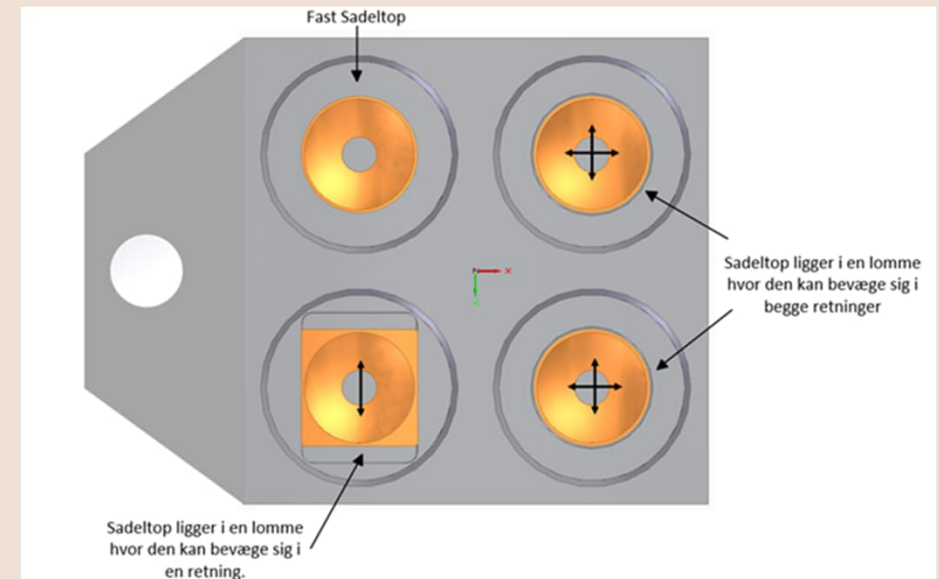
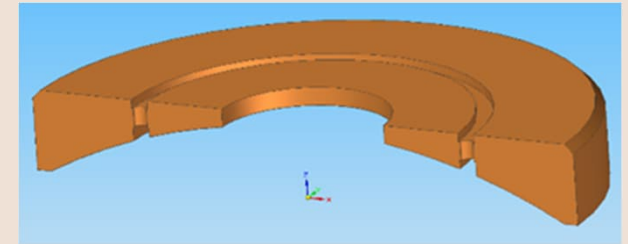
Her har jeg målt følgende frihøjder:

Sydøstlig kile	261 mm
Nordøstlig kile	257 mm
Sydvestlig kile	254 mm
Nordvestlig kile	257 mm

- Shims for højdetilpasning til de 4 individuelle låsekamre
- Når lejets top plade vinkels i forhold til bundplade, sker der en horisontal forskydning af cylindernes centerpunkter.
- Cylinderne er derfor udført med et sadeltop leje i bronze, der sikrer at cylinder stempel ikke kæntre om egen aksel
- Sadeltop leje placeres i lejelommer i topplade



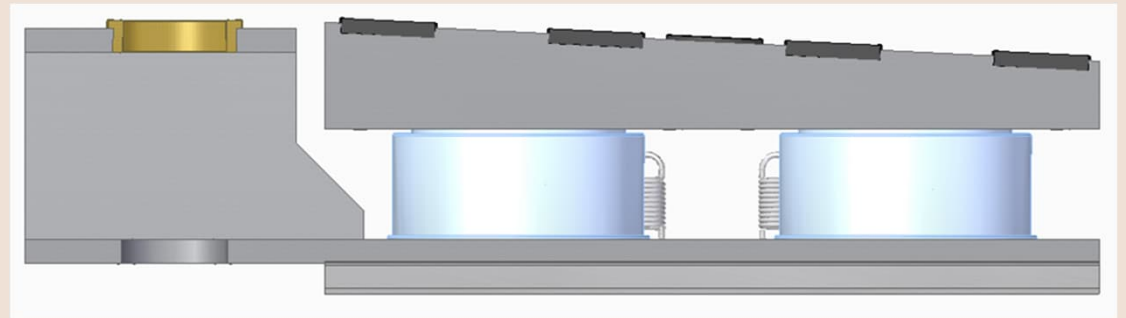
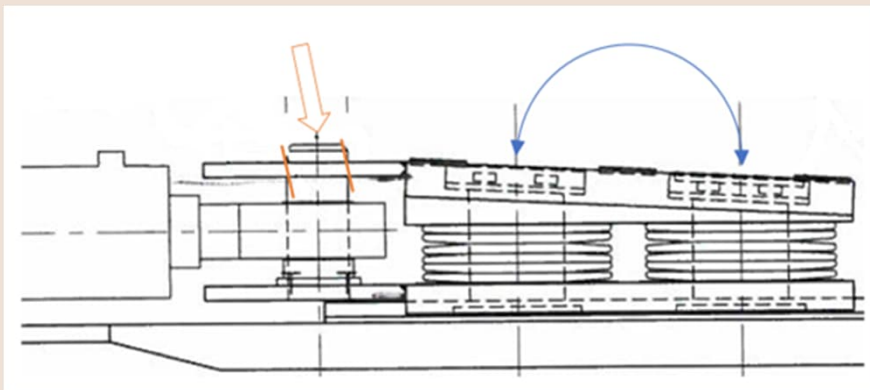
- Kun 1 cylinder er fast fixeret i sadel lomme
- 2 Forreste lommer optager altid langsgående kraft
- Sadel/cylinder top med halvgrov overflade Ra 1,6
- Dele designes og produceres in-house hos SH



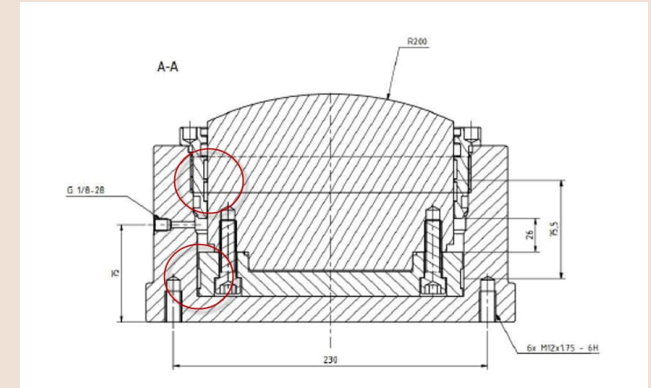
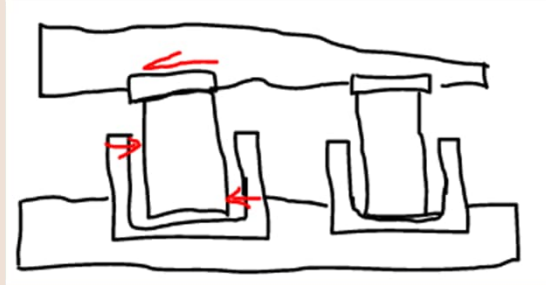


# Samling af bund og topdel af leje

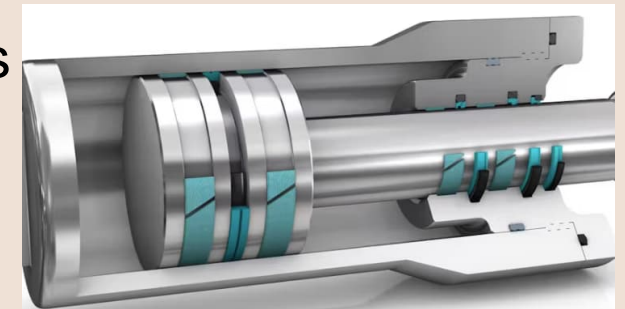
- For at sikre en mere fri bevægelse af topplade, rigtig optagelse af horisontale forskydningskræfter samt minimere slid i bøsninger, ændre fastgørelse til separat fremførings pinbolt
- Lejeenhed sammenholdes og komprimeres ved aflastning af trækfjedre
- Gummiskørter omkring kile samt smørenipler til sadellejer



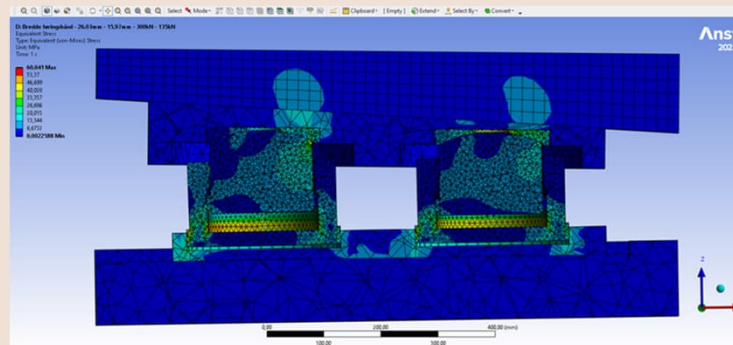
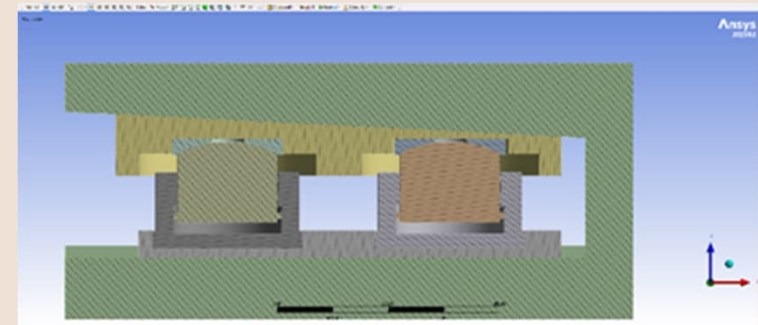
# Optagelse af sidekræfter



- Høj sikkerhed på friktion medfører store sidekræfter
- Bevægelighed og tolerancer mellem cylinder dele i fokus
- Lav byggehøjde udfordre plads til føringer og pakninger



- Håndberegning sidekraft
- Håndberegninger momentdannelse
- FEM for friktionsforhold og lastfordeling i cylinder føringer og kilens struktur



**Case 1**

Kile vist i normal stilling 3° Cylinderne er tryksat med 300kN/120 bar

Position (0 = sammenslået)	21,35 mm
C-C afstand fering v. position [ab]	54,15 mm
Afstand fering pakboks - Punkt C v. position [bc]	88,35 mm
<b>Sidelast</b>	
Cylinderkraft	300 kN
Friktionskoefficient	0,45 -
Sidekraft for 1 cylinder	135 kN
Sidekraft for 2 cylindre F_1	270 kN
$M(B) = F_1 \cdot bc - R_a \cdot ab = 0$	
R a =	440,53 kN
$\sum F = F_1 + R_a - R_b = 0$	
R b =	710,53 kN
<b>Spænding i fering stemtryk</b>	
Sikkerhedsfaktor fering	2,9 -
<b>Spænding i fering pakboks</b>	
Sikkerhedsfaktor fering	2,3 -

---

# Tak for opmærksomheden

---

Søren Gustenhoff Hansen, COWI

Nikolaj Smith Lorenzen, SH Group