

Ansys konference 2022

29th SVSFEM Ansys Users' Group Meeting and Conference 2022

Sborník přednášek



Lipno and Vltavou, 5. až 7. října 2022

SVSFEM s.r.o.

Trnkova 3104/117c, 628 00 Brno

www.svsfem.cz

info@svsfem.cz

OBSAH

NUMERICKÉ SIMULACE NÁRAZOVÝCH ZKOUŠEK SILNIČNÍCH ZÁCHYTNÝCH SYSTÉMŮ

VLASTISLAV SALAJKA, PETR HRADIL
VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, FAKULTA STAVEBNÍ

EXPERIMENTÁLNÍ A NUMERICKÉ STUDIE VISKOELASTICKÉHO CHOVÁNÍ POLYMERNÍCH KOMPOZITŮ

DOC. ING. ANTONÍN POTĚŠIL, CSC., ING. PETR HORNÍK, PH.D., ING. MILAN ŠTÍPEK, ING.
ANNA LUCIOVÁ
LENAM, S.R.O.

SIMULATION OF GASKETS IN HYDRAULIC UNITS

MATĚJ PETROVIČ
DANFOSS POWER SOLUTIONS

LARGE OBJECTS MEASUREMENT AND FEM PRESTRESSED FOOTBRIDGE

LADISLAV KLUSAČEK, ADAM SVOBODA, JAN KOLÁČEK, JIŘÍ BUREŠ, PETR GAJDOS,
MICHAL VAJDAK
X-SIGHT, VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, FAKULTA STAVEBNÍ

NEW ADVANCED CAPABILITY BY ACT IN ANSYS - DIGITAL TWIN TO CYLINDER BLOCK STRUCTURAL SIMULATIONS

RICHARD PETRECH
DANFOSS POWER SOLUTIONS

STRESS-STRAIN ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF VARIOUS TOTAL KNEE ENDOPROSTHESES ON TIBIAL BONE TISSUES

X-SIGHT, VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

HYDRAULICKÉ POVRCHY S "GLOFOVOU" STRUKTUROU

TOMÁŠ KRÁTKÝ, JAKUB STAREČEK, ANTONÍN PANZO, DAVID ŠVEC
CENTRUM HYDRAULICKÉHO VÝzkumu

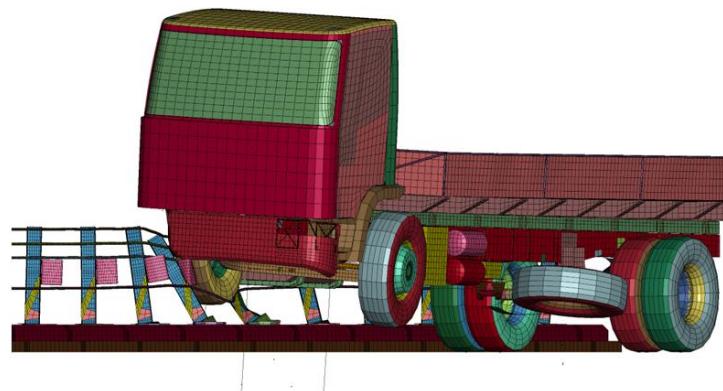
NUMERICKÉ SIMULACE NÁRAZOVÝCH ZKOUŠEK SILNIČNÍCH ZÁCHYTNÝCH SYSTÉMŮ

VLASTISLAV SALAJKA, PETR HRADIL

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, FAKULTA STAVEBNÍ

NUMERICKÉ SIMULACE NÁRAZOVÝCH ZKOUŠEK SILNIČNÍCH ZÁCHYTNÝCH SYSTÉMŮ

Vlastislav Salajka
Petr Hradil
Fakulta stavební
Ústav stavební mechaniky
Veveří 95
602 00 Brno



NUMERICKÉ SIMULACE NÁRAZOVÝCH ZKOUŠEK SILNIČNÍCH ZÁCHYTNÝCH SYSTÉMŮ

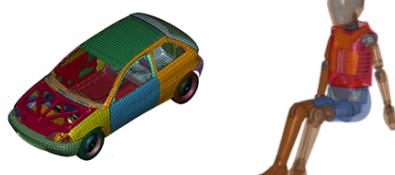
Rozdělení svodidel podle úrovně zadržení

Numerické simulace byly využity v oblasti bezpečnosti dopravy pro analýzu certifikačních zkoušek konstrukcí zádržných systémů resp. svodidel.

V ČR je podle intenzity provozu a významu silnice stanovena minimální úroveň zadržení z hlediska ochrany účastníků silničního provozu a ochrany okolního prostředí.

Podle technických podmínek vydaných ministerstvem dopravy je možno osadit na komunikace svodidla, která prošla certifikačním procesem a označují se jako „schválená“.

Certifikační proces definuje provést obvykle dvě úspěšné zkoušky svodidla.



| Rozdělení úrovní zadržení | Úroveň zadržení | Požadované testy | Úroveň zadržení | Požadované testy |
|---------------------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------------|
| Nízké úhlové zadržení | T1 | TB 21 | - | - |
| | T2 | TB 22 | - | - |
| | T3 | TB 41 a TB 21 | - | - |
| Běžné zadržení | N1 | TB 31 | - | - |
| | N2 | TB 32 a TB 11 | - | - |
| Vyšší zadržení | H1 | TB 42 a TB 11 | L1 | TB 42 a TB 32 a TB 11 |
| | H2 | TB 51 a TB 11 | L2 | TB 51 a TB 32 a TB 11 |
| | H3 | TB 61 a TB 11 | L3 | TB 61 a TB 32 a TB 11 |
| Velmi vysoké zadržení | H4a | TB 71 a TB 11 | L4a | TB 71 a TB 32 a TB 11 |
| | H4b | TB 81 a TB 11 | L4b | TB 81 a TB 32 a TB 11 |

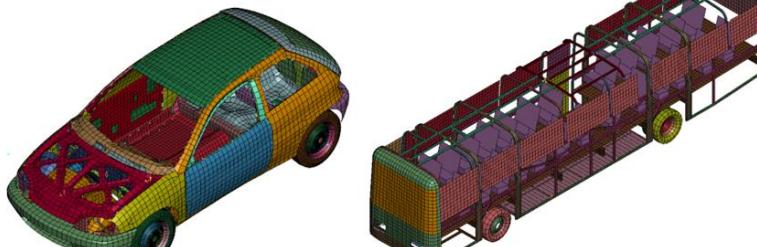
Nárazové testy svodidel

| Označení nárazu (test č.) | Nárazová rychlosť [km/h] | Úhel nárazu [stupně] | Celková hmotnosť vozidla [kg] | Kinetická energie Ek [J] |
|---------------------------|--------------------------|----------------------|-------------------------------|--------------------------|
| TB 11 | 100 | 20 | 900 | 40,6 |
| TB 21 | 80 | 8 | 1300 | 6,2 |
| TB 22 | 80 | 15 | 1300 | 21,5 |
| TB 31 | 80 | 20 | 1500 | 43,3 |
| TB 32 | 110 | 20 | 1500 | 81,9 |
| TB 41 | 70 | 8 | 10000 | 36,6 |
| TB 42 | 70 | 15 | 10000 | 126,6 |
| TB 51 | 70 | 20 | 13000 | 287,5 |
| TB 61 | 80 | 20 | 16000 | 462,1 |
| TB 71 | 65 | 20 | 30000 | 572,0 |
| TB 81 | 65 | 20 | 38000 | 724,6 |

NUMERICKÉ SIMULACE NÁRAZOVÝCH ZKOUŠEK SILNIČNÍCH ZÁCHYTNÝCH SYSTÉMŮ

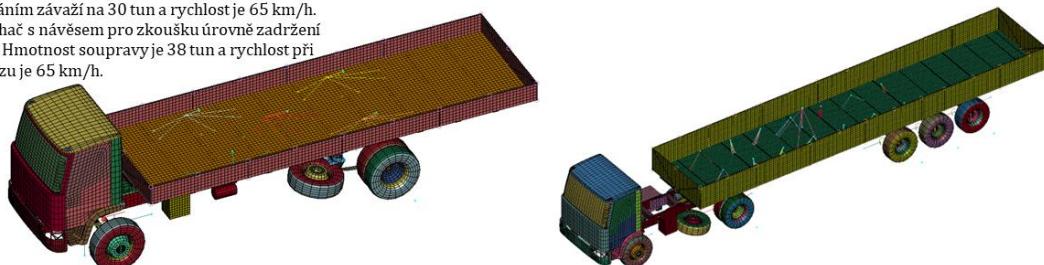
Využíváme čtyři jedoucí modely vozidel pro simulace nárazu do silničních záhytných systémů pro vyšší úrovně zadržení H2, H3 a H4a, H4b.

1. Osobní automobil o hmotnosti 900 kg. Rychlosť pri nárazu je 105 km/h. Používá se pro úrovňu zadržení H2, H3, H4.
2. Autobus s hmotnosťí 13 t. Pro úroveň zadržení H2 je rychlosť jedoucího vozidla 70 km/h.
3. Nákladní automobil s hmotnosťí 80 km/h. Pro úroveň zadržení 13 t. Pro úroveň zadržení H3 je rychlosť nákladního automobilu 80 km/h. Pro zadržení úrovne H4a je hmotnosť nákladního automobilu změněna přidáním závazí na 30 tun a rychlosť je 65 km/h.
4. Tahač s návěsem pro zkoušku úrovni zadržení H4b. Hmotnosť soupravy je 38 tun a rychlosť pri nárazu je 65 km/h.



Osobní automobil. Hmotnosť 900 kg.
Určen pro úroveň zadržení H2, H3, H4a a H4b.

Autobus. Hmotnosť 13t.
Určen pro úroveň zadržení H2.



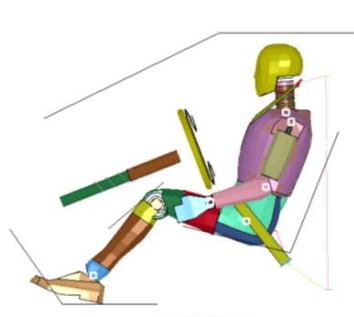
Nákladní automobil. Hmotnosť 16t nebo 30t.
Určen pro úroveň zadržení H3 nebo H4a.

Tahač s návěsem. Hmotnosť 38t.
Určen pro úroveň zadržení H4b.

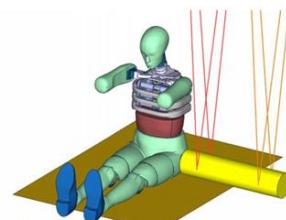
NUMERICKÉ SIMULACE NÁRAZOVÝCH ZKOUŠEK SILNIČNÍCH ZÁCHYTNÝCH SYSTÉMŮ

V našich výpočtech simulací nárazů vozidel do svodidel nebyly použity modely osob. Použití těchto modelů by znamenalo snížení velikosti časového kroku, problém s připojení modelu osoby do vozidla a vnesení dalších nejistot do výpočtu.

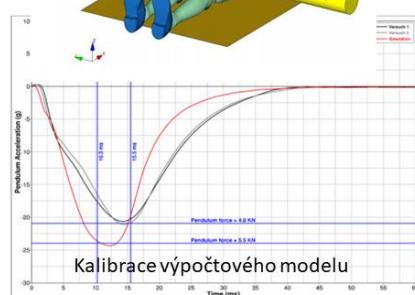
h_Drop_Yaw_Pulse



Model 70 kg dospělé osoby.



Model 6 letého dítěte.



NUMERICKÉ SIMULACE NÁRAZOVÝCH ZKOUŠEK SILNIČNÍCH ZÁCHYTNÝCH SYSTÉMŮ

Využívá se explicitní varianta metody konečných prvků, která se vztahuje především ke způsobu časové integrace pohybových rovnic.

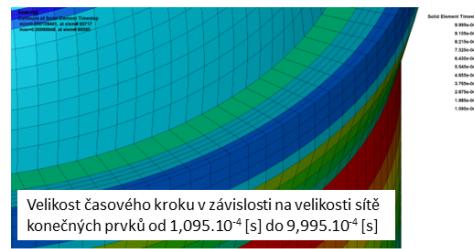
$$\begin{aligned} M \cdot \ddot{u}(t) + K \cdot u(t) &= F(t) \\ M &\text{ matice hmotnosti} \\ K &\text{ matice tuhosti} \\ F &\text{ vektor zatížení} \\ \ddot{u}_t &= \frac{1}{M} \cdot (F_t - K \cdot u_t) \end{aligned}$$

Metodou centrálních diferencí se provádí integrace pohybových rovnic,

$$\begin{aligned} \dot{u}_{t+\frac{\Delta t}{2}} &= \dot{u}_{t-\frac{\Delta t}{2}} + \ddot{u}_t \cdot \Delta t \\ u_{t+\Delta t} &= u_t + \dot{u}_{t+\frac{\Delta t}{2}} \cdot \Delta t \end{aligned}$$

Základní charakteristikou algoritmu je:

1. Posuvy v čase t získáváme z pohybové rovnice pro předechozí časový krok (explicitní algoritmus)
2. Algoritmus nelze využít při zanedbání matice hmotnosti. Není možno řešit statické úlohy.
3. Výhoda explicitního řešení se projeví při použití diagonální matice hmotnosti M . Soustava pohybových rovnic se řeší jako samostatné nezávislé rovnice a proto je rychlosť řešení časového kroku explicitního algoritmu o několik řádů rychlejší, než odpovídající krok implicitního řešení s inverzí matice tuhosti.
4. Omezením explicitní formulace je podmíněná stabilita řešení. Stabilní výsledky dostaneme pouze při dodržení dostatečně malé velikosti časového kroku $\Delta t < \Delta t_{cr}$. Δt_{cr} je kritická délka časového kroku závisí na hustotě sítě a rychlosti šíření zvuku nebo napěťových vln zkoumaným prostředím $\Delta t_{cr} = \frac{L}{\sqrt{E/\rho}}$. Při typických rozmezích prvků v běžných analýzách a rychlosti šíření napěťových vln v oceli $c \approx 5000$ m/s vychází často délka časového kroku velmi malá, $\Delta t \approx 10^{-4} \div 10^{-7}$ s.



NUMERICKÉ SIMULACE NÁRAZOVÝCH ZKOUŠEK SILNIČNÍCH ZÁCHYTNÝCH SYSTÉMŮ

Všechny výpočty jsou nelineární, **nelze využít součiniteli spolehlivosti ani pro použitý materiál ani pro stanovení zatížení**. Proto je nutno pro každý konstrukční prvek použity ve výpočtovém modelu odhadnout nelineární chování materiálu.

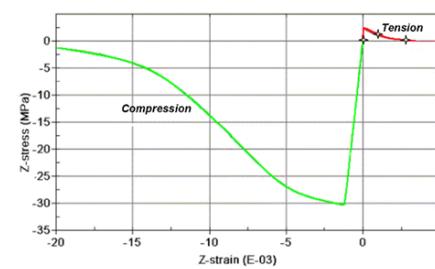
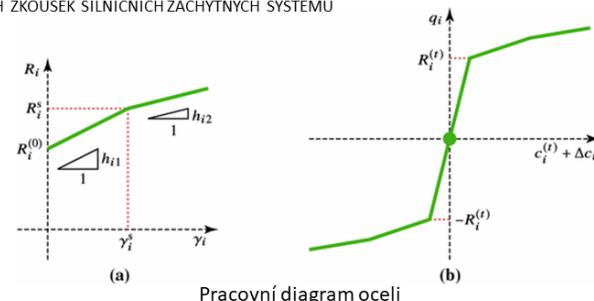
1. Pro ocel je použit bilineární pracovní diagram s definovanou a proměnnou mezí kluzu a mezní hodnotou poměrného přetvoření.

$$\sigma_y = \left(\sigma_0 + \beta \frac{E_t E}{E - E_t} \varepsilon_{eff}^p \right) \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{p}} \right]$$

2. Pro beton je dispozici několika typů nelineárních materiálu. Obvykle je použit materiálový model se spojitou plochou plasticity. Materiálový model je vhodný všechny betony, které jsou charakterizovány pevností v tlaku od 30 do 60 MPa.

Plasticita betonu při výpočtech je popsána funkcí

$$f(I_1, J_2, J_3, \kappa) = J_2 - \Re^2 F_f^2 F_c$$



NUMERICKÉ SIMULACE NÁRAZOVÝCH ZKOUŠEK SILNIČNÍCH ZÁCHYTNÝCH SYSTÉMŮ

Zkouška TB11. Náraz malého osobního automobilu.

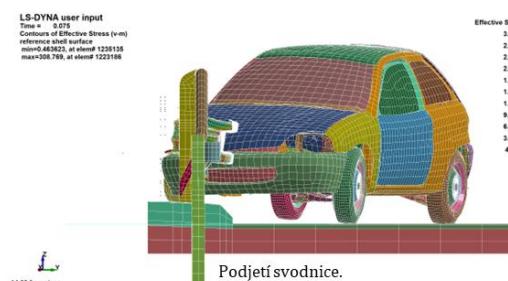
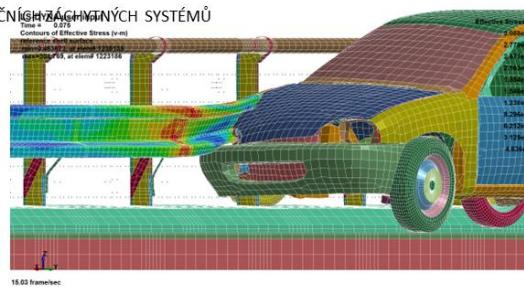
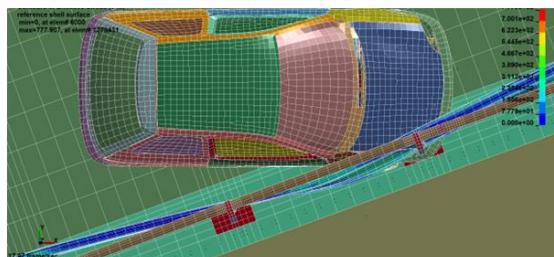
Při zkoušce se sleduje následující:

1. Vozidlo nesmí překonat překážku (nadjetím, podjetím, přetržením podélných prvků).
2. Vozidlo musí zůstat v jízdním pruhu.
3. Nesmí být překročena přípustná zrychlení (přetížení) osob jedoucích ve vozidle.

Náraz malého osobního automobilu je součástí certifikace každého svodidla. U zobrazeného ocelového svodidla se zkoumala **maximální výška svodnice nad vozovkou**.

Konstrukce svodidla se svodnice s konstrukční výškou spodní hrany 900 mm nad vozovkou byla u malého vozidla překonána podjetím.

V ČR se používá pro tyto testy např. Ford Ka, Citroen Saxo. V technickém průkazu musí maximální hmotnost vozidla 900 kg.



NUMERICKÉ SIMULACE NÁRAZOVÝCH ZKOUŠEK SILNIČNÍCH ZÁCHYTNÝCH SYSTÉMŮ

Zkouška TB 51. Náraz autobusu, úroveň zadržení H2.

Předmětem numerických analýz bylo **zvýšení osové vzdálenosti kotevních nosných sloupků**. Původní rozteč sloupků byla 2 m. Nově navrhovaná vzdálenost byla 3 m.

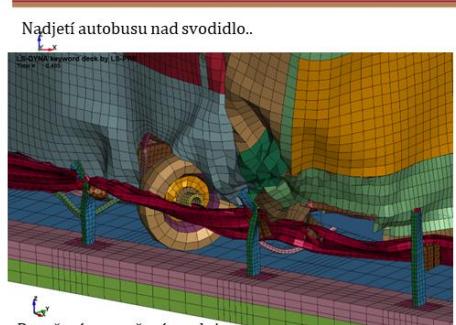
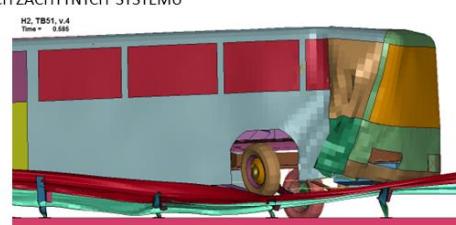
Cílem bylo zvýšení únosnosti stávajícího konstrukčního uspořádání pomocí další svodnice nebo doplněním ocelové tyče z vysokopevnostního materiálu.

Při zkoušce je sledováno především:

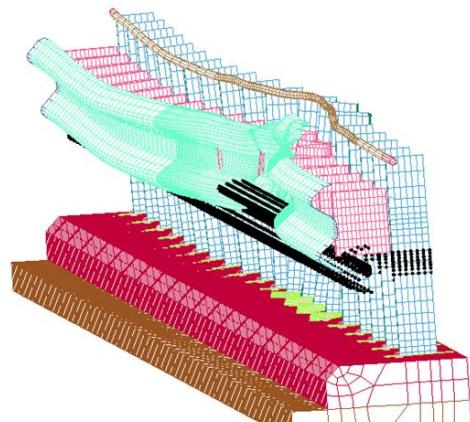
1. Překonání svodidla.
2. Přetržení podélných nosných prvků (některé vlivy nelze spočítat).
3. Pracovní šířka svodidla. Jedná se o maximální hodnotu vodorovného průhybu konstrukce během nárazu.
4. Není sledováno porušení svislých prvků (sloupků) a porušení jedoucího vozidla.

Z hlediska výpočtu nárazu je nutno vhodně odhadnout a definovat pracovní diagramy ocelových materiálů s ohledem na rychlosť přetváření. Určit hodnoty maximálních mezních přetvoření jednotlivých prvků. Vhodně definovat interakce a vazby mezi jedoucím vozidlem a svodidlem.

Výpočtem jsou sledovány především kotevní síly ve sloupích a hodnoty podélných sil ve svodnicích nebo tyčích.



NUMERICKÉ SIMULACE NÁRAZOVÝCH ZKOUŠEK SILNIČNÍCH ZÁCHYTNÝCH SYSTÉMŮ



NUMERICKÉ SIMULACE NÁRAZOVÝCH ZKOUŠEK SILNIČNÍCH ZÁCHYTNÝCH SYSTÉMŮ

Zkouška TB 61, TB81. Betonové svodidlo pro úroveň zadržení H3 resp. H4b.

Předmětem je použití stávajícího svodidla s úrovní zadržení H3 na úroveň zadržení H4b. Zkoušený systém je navržen ze 30 čtyřmetrových betonových bloků spojených ocelovými zámky v horní části, které jsou volně uloženy na vozovce.

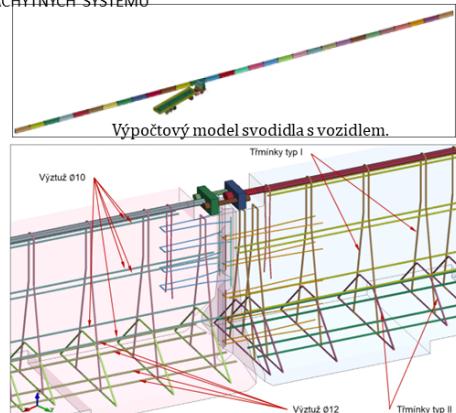
Systém byl testován na náraz nákladním autem o hmotnosti 16 tun jedoucí rychlosť 80 km/h a tahačem s návěsem o hmotnosti 38 tun jedoucí rychlosť 65 km/h.

Hlavním neznámým parametrem bylo stanovení vodorovného průhybu (pracovní šířky) a únosnost ocelového zámku (spojky).

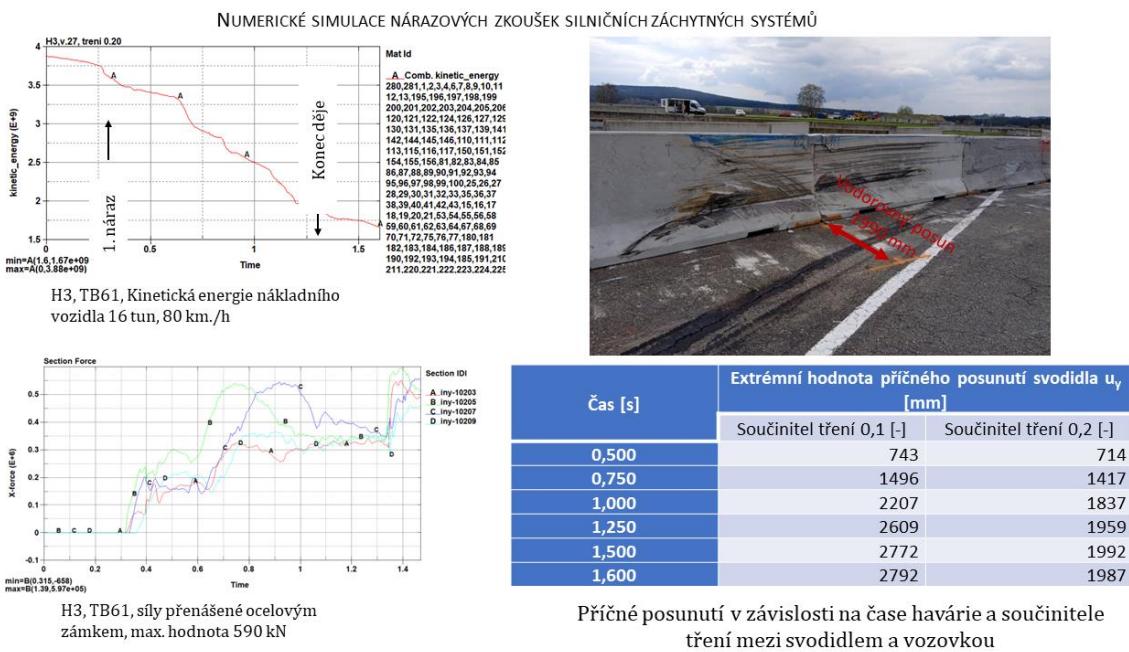
Při zkoušce jsou sledovány stejné parametry jako u ocelového svodidla. Navíc je kontrolováno oddělení maximální libovolné konstrukční části o maximální hmotnosti 2 kg (stanovit výpočtem lze velmi omezeně).

Celkem byly provedeny čtyři výpočty dva pro úroveň zadržení H3 a dva pro úroveň zadržení H4b. Výpočty se liší modelováním interakce mezi svodidlem a vozovkou pomocí součinitele trení 0,1 a 0,2.

Pro oba případy nárazu byla stanovena výpočty maximální únosnost zámku na 550 kN (odpovídá provedeným statickým zkouškám). Byly sledovány maximální vodorovné průhyby konstrukce během nárazu.



Konečněprvkový model zámku svodidla s betonářskou výztuží



EXPERIMENTÁLNÍ A NUMERICKÉ STUDIE VISKOELASTICKÉHO CHOVÁNÍ POLYMERNÍCH KOMPOZITŮ

DOC. ING. ANTONÍN POTĚŠIL, CSC., ING. PETR HORNÍK, PH.D., ING. MILAN
ŠTÍPEK, ING. ANNA LUCIOVÁ

LENAM, S.R.O.



Experimentální a numerické studie viskoelastického chování polymerních kompozitů (Creep – relaxace – konstrukce a využití Prony řad)

LENAM, s.r.o.

Husova 725/40
460 01 LIBEREC 1
ČESKÁ REPUBLIKA

P. O. BOX 45
460 31 LIBEREC
(korespondence)

Tel:
+420 485 246 900

E-mail:
lenam@lenam.cz
Web: www.lenam.cz

Report LENAM 22-246 from 6.10.2022
Project No.: 22011-02 (TAČRTM03000010 / CAFICO)

Author: doc. Ing. Antonín Potěšil, CSc.

Co-autors: Ing. Petr Horník, Ph.D.

Ing. Milan Štípek

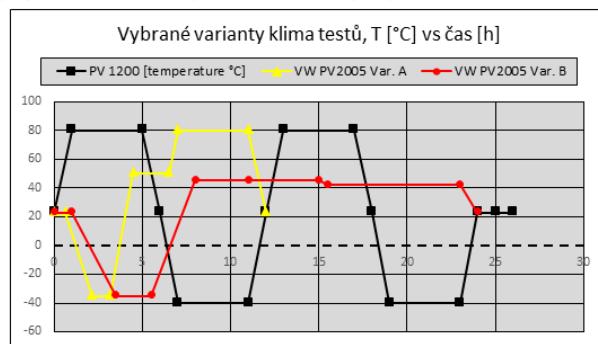
Ing. Anna Luciová

CAE analýzy kompozitních materiálových struktur s rozptýleným plnivem

LENAM
s.r.o.

Souvislosti, současná a budoucí návaznosti a možnosti

- Ve stávající praxi prediktivních CAE simulací je zpravidla hodnoceno a posuzováno namáhání konstrukčních kompozitních materiálových struktur a jejich sestav podle úrovní deformace a napjatosti v pružném anizotropním / ortotropním kontinuu, případně elasto – plastickém izotropním kontinuu.
- Je patrné, že prostřednictvím zmíněných materiálových modelů nelze odhadovat, jak se stavy napjatosti a deformací se v těchto materiálech vyvíjejí za předpokladu jejich viskoelastické odezvy vyvolané především provozní teplotou, resp. při testovacích teplotně klimatických podmínekc (PV1200, PV2005 aj.).



6.10.2022

22-246

CAE analýzy kompozitních materiálových struktur s rozptýleným plnivem

LENAM
s.r.o.

Souvislosti, současná a budoucí návaznosti a možnosti

- Požadavkem a potřebou ke kvalifikovaným CAE predikcím je znalost viskoelastických materiálových modelů, včetně např. kritérií selhání konstrukčních kompozitů z dlouhodobějších hledisek s vlivem teplot.
- Požadavky průmyslového vývoje vyžadují aplikovat CAE přístupy, které by umožnili predikovat a ocenit časovou odezvu konstrukcí obsahujících hybridní struktury složené z konstrukčních polymerních kompozitů, včetně lepících systémů, z části nahrazujících tradiční konstrukce z ocelí a nezelezných kovů, tj. creep, relaxaci, únavu, selhání s uvážením teploty, či jiných klimatických podmínekc.
- Potřebou je diskutovat a upozornit na přístupy a možnosti CAE analýz hybridních sestav s adhezivy, které respektují časové nebo frekvenční viskoelastické chování materiálů za provozně standardních teplotních podmínekc, zpravidla v intervalu teplot 23 až 90°C.

6.10.2022

22-246

Reologické projevy látek a materiálů při zatěžování

LENAM
s.r.o.

Reologické projevy látek jsou mimo jiné spojeny s jevy označovanými jako **viskoelasticita / creep** (tečení, ploužení) a **relaxace** (ochabování). Tyto jevy jsou samovolné/spontální materiálové procesy aktivované dodáním energie z vnějšku a posléze transportem energie (tepla, fyzikálně chemické jevy).

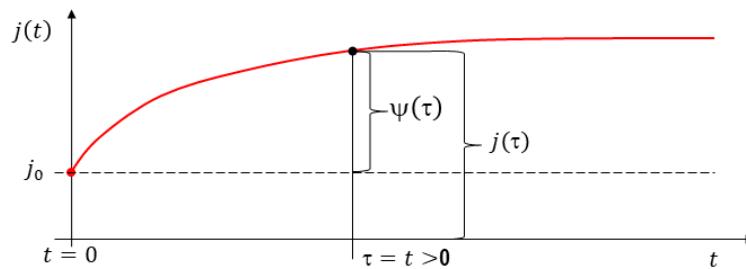
Creepová odezva materiálu na procesy zatěžování, kdy je aplikována většinou konstantní síla $F = \text{konst.}$ (nebo napětí $\sigma = \text{konst.}$), se projevuje jako postupné zvětšování, případně zmenšování rozměrů tělesa (deformace, přetvoření) v čase „ t “.

Takové chování lze charakterizovat prostřednictvím funkce **creepové poddajnosti $j(t)$**

$$j(t) = j_0 + \psi(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma} \quad [\text{MPa}^{-1}]$$

kde j_0 je poddajnost odpovídající okamžité elasticke deformaci

$\psi(t)$ je funkce tečení (creepová funkce), viz obr.



6.10.2022

22-246

Reologické projevy látek a materiálů při zatěžování

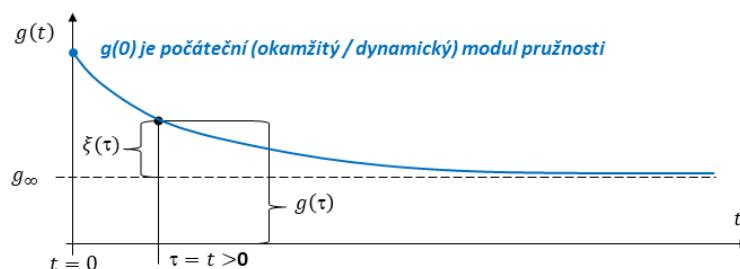
LENAM
s.r.o.

Relaxace je chápána jako pokles napětí (intenzit vnitřních silových účinků) v čase „ t “ při aplikované konstantní deformaci (přetvoření $\varepsilon = \text{konst.}$). Toto chování materiálu je popisováno **funkcí relaxačního (napěťového) modulu $g(t)$**

$$g(t) = g_\infty + \xi(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon} \quad [\text{MPa}]$$

kde g_∞ je „dlouhodobý“ rovnovážný modul pružnosti.

$\xi(t)$ je relaxační funkce, viz obr.



Uvedené jevy **crepu** a **relaxace** probíhají v reálných materiálech s různými intenzitami závislými na provozních podmínkách dané konstrukce (úroveň a rychlos zatížení – přetvoření, teplota, další obecně agresivní a klimatické podmínky vedoucí k degradaci materiálů apod.).

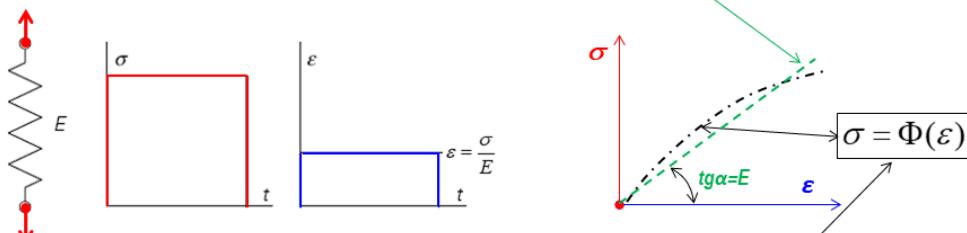
6.10.2022

22-246

Základní reologické modely látek

LENAM
s.r.o.

Lineárně elastickej model materiálu (spring element) – modeluje chování tělesa, které se po odstranění zatížení bezebytku vrací do původního stavu. V případě, že vztah mezi napětím a poměrnou deformací je lineární, platí Hookeův zákon: $\sigma = E \varepsilon$



Nelineárně elastickej model materiálu (nonlinear spring element) – jedná se o případ, kdy vztah mezi napětím a poměrnou deformací je nelineární, nicméně po odstranění zatížení se materiál rovněž vrátí do původního stavu.

V technické praxi se nelineární závislost mezi σ a ε nahrazuje závislostí po částech lineární, tedy tabulkou, přičemž se na sousedící body jakoby náhradní křivky aplikuje některý z interpolacních algoritmů, aby se získaly – dopočítaly hodnoty uvnitř příslušného intervalu.

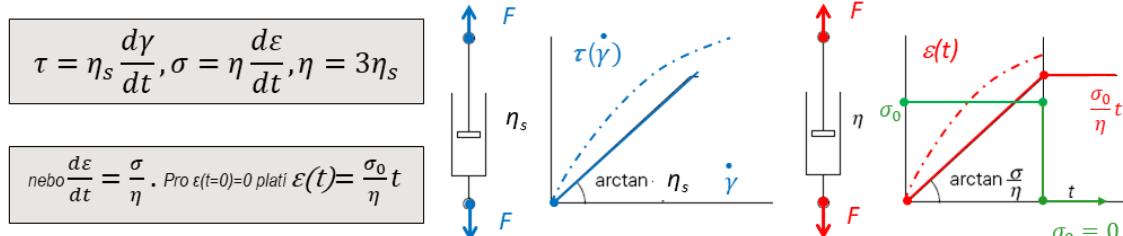
6.10.2022

22-246

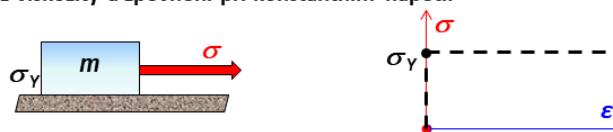
Základní reologické modely látek

LENAM
s.r.o.

Ideálně viskózní model materiálu (tlumič, angl. dashpot) – modeluje lineárně viskózní kapalinu řídící se Newtonovým zákonem viskozity, podle něhož je napětí přímo úměrné rychlosti deformace. Koeficientem úměrnosti je veličina nazývaná jako viskozita „ η_s “, způsobující disipaci energie. Je obvyklé rozlišovat mezi viskozitou ve smyku „ η_s “ (shear viscosity) a viskozitou v tahu resp. v tlaku (elongational viscosity) „ η “, případně v objemu a rovněž nelineární viskozitu. Pro takový ideálně viskózní model platí:



Ideálně plastický model materiálu, tzv. ideální tuho-plastická látka (suché tření, angl. sliding frictional element) – modeluje látku, která se chová jako tuhá (angl. glassy state), pokud napětí σ nedosáhne jisté mezní hodnoty. Tato mezní hodnota se označuje jako mez tečení σ_y (yield point). Po jejím překročení nastává plastická deformace bez viskozity a zpevnění při konstantním napětí.



6.10.2022

22-246

Elementární viskoelastické modely materiálů

LENAM
s.r.o.

Základní reologické modely látek pro svoji jednoduchost nemohou popsat reálnou odezvu v technické praxi využívaných materiálů. Proto se tyto modely vzájemně kombinují ve snaze se realitě přiblížit. Toto široké téma se stalo součástí edukačního obooru označovaného jako „materiálové inženýrství“.

Základem takových aktivit je fyzikální experiment, na který navazují analytické a numerické metody, které teprve společně mohou uspokojivě identifikovat chování příslušného materiálu za provozních podmínek (obecně klimatických podmínek, pracovního rozsahu teplot, rychlosti deformace, dlouhodobosti provozu, agresivity prostředí, radiace apod.).

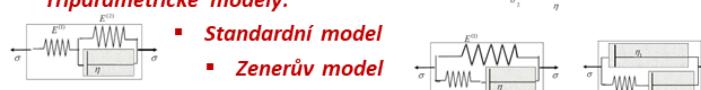
V rámci souvislostí je vhodné si připomenout několik vybraných reologických modelů, které jsou dalším krokem k představě o chování materiálů v závislosti na čase. Jejich detailnější popis byl součástí kurzu

„Kurz_5-cast_A_MKM_MaterialoveModelyKonstrukcniMaterialu_@LENAM_AnP_190722.pdf“:

Dvouparametrické modely:

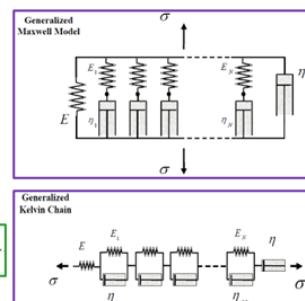


Tříparametrické modely:



Další víceparametrické modely:

- **Burgersův čtyř parametrický model často přisuzovaný adhezivům**
- **Zobecnělé modely složené např. z Maxwellových nebo z Kelvinových skupin**
- **a matematická reprezentace zobecnělých modelů pomocí Prony řady, viz dále.**



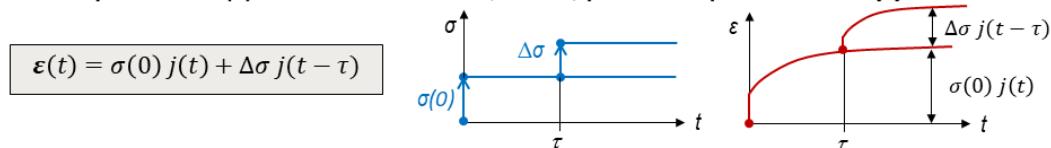
6.10.2022

22-246

Boltzmannův princip superpozice jako základ teorie lineární viskoelasticity

LENAM
s.r.o.

1. Boltzmannův princip považuje zatěžovací účinky na viskoelastické prostředí nezávislé a aditivní, přičemž odezva prostředí na tyto účinky je lineární. Lze jej aplikovat na oba procesy creepu (tečení) a relaxace.
2. Pokud aplikujeme na prostředí charakterizované funkcí creepové poddajnosti $j(t)$ zatížení ve dvou následujících krocích $\sigma(0)$ v čase $t=0$ a $\Delta\sigma$ v čase τ , viz obr., pak celkové přetvoření bude jejich součtem:



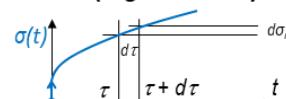
3. Uvážíme-li během zatěžování nekonečný počet infinitesimálních přírůstků zatížení $d\sigma_i$ můžeme psát

$$\epsilon(t) = \sigma(0) j(t) + \sum_{i=1}^{\infty} d\sigma_i j(t - \tau_i)$$

Protože v limitě suma ve výrazu přejde v integrál $\int j(t - \tau)d\sigma$

Ize výraz zapsat ve formě tzv. integrálu deformační dědičnosti (angl. Hereditary Integral for Strain):

$$\epsilon(t) = \int_0^t j(t - \tau) \frac{\partial \sigma(\tau)}{\partial \tau} d\tau \quad \text{B.1}$$



4. Jestliže analogickou úvahu aplikujeme na proces relaxace dostaneme integrál dědičnosti pro napětí

$$\sigma(t) = \int_0^t g(t - \tau) \frac{\partial \epsilon(\tau)}{\partial \tau} d\tau \quad \text{B.2}$$

(angl. Hereditary Integral for Stress)

6.10.2022

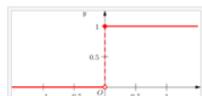
22-246

Boltzmannův princip superpozice - matematické souvislosti

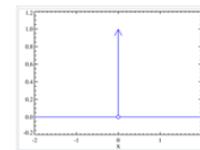
Vztahy **B.1** a **B.2** jsou matematickým vyjádřením Boltzmannova principu superpozice a v literatuře jsou označovány jako Boltzmann – Volterra integrální rovnice, neboť teorii těchto rovnic rozpracoval Volterra.

Vzhledem k tomu, že v přechozích integrálních vztazích jsou obsaženy funkce poddajnosti a relaxace, lze je chápát jako zobecnění jednoduchých dříve uvedených creepových a relaxačních experimentů.

Uvážíme-li „skokové“ procesy deformování viskoelastického materiálu zatížením σ_0 nebo ε_0 , dostaneme výrazy



$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \int_0^t j(t-\tau) \frac{\partial H(\tau)}{\partial \tau} d\tau = \sigma_0 \int_0^t j(t-\tau) \delta(\tau) d\tau = \sigma_0 j(t)$$



$$\sigma(t) = \varepsilon_0 \int_0^t g(t-\tau) \frac{\partial H(\tau)}{\partial \tau} d\tau = \varepsilon_0 \int_0^t g(t-\tau) \delta(\tau) d\tau = \varepsilon_0 g(t)$$

kde $H(t)$ a $\delta(t)$ jsou Heavisideova a Diracova funkce, viz https://cs.wikipedia.org/wiki/Diracovo_delta

Definice Heavisideovy a Diracovy funkce

$$H_p(x) = \begin{cases} 0 & \text{pro } x < 0 \\ p & \text{pro } x = 0 \\ 1 & \text{pro } x > 0 \end{cases}, \quad \delta(x) = \begin{cases} +\infty & \text{pro } x = 0 \\ 0 & \text{pro } x \neq 0 \end{cases}$$

Mezi funkcemi platí vztah

$$H(x) = \int_{-\infty}^x \delta(t) dt \quad \text{resp.} \quad \delta(t) = \frac{dH(t)}{dt}$$

Boltzmannův princip superpozice – matematické souvislosti

Mnohdy se vztahy **B.1** a **B.2** uvádějí ve tvaru, které lze získat jejich integrací per partes. Platí

$$\int u v' = u v - \int u' v$$

$$\varepsilon(t) = j(0) \sigma(t) + \int_0^t \sigma(t-\tau) \frac{\partial j(\tau)}{\partial \tau} d\tau \quad \text{B.3}$$

$$\sigma(t) = g(0) \varepsilon(t) + \int_0^t \varepsilon(t-\tau) \frac{\partial g(\tau)}{\partial \tau} d\tau \quad \text{B.4}$$

kde $j(0)$ a $g(0)$ jsou počáteční hodnoty funkce poddajnosti (creep compliance) a relaxačního modulu.

Z předchozího je patrné, že creepové a relaxační chování materiálů spolu souvisí a tedy, že mezi materiálovými funkcemi creepové poddajnosti a relaxačního napěťového modulu existuje vzájemný vztah. Tento je zapisovaný v integrální formě, který je výsledkem využití Laplaceovy transformace.

$$\int_0^t g(\tau) j(t-\tau) d\tau = t \quad \text{resp.} \quad \int_0^t j(\tau) g(t-\tau) d\tau = t \quad \text{B.5}$$

Viskoelasticke materiálové modely implementované do CAE sw produktů

LENAM
s.r.o.

Uvedeme postupně jejich základní vztahy. Parametry, které obsahují tyto vztahy se zpravidla přisuzují materiálům ve stavu pevném, tzv. „solidum“ (angl. Solid State).

Prony řada – vychází ze zobecnělých modelů složených z mnoha Maxwellových skupin

$$G(t) = G_{\infty} + \sum_{i=1}^N G_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right), \quad (P1)$$

kde G_{∞} je dlouhodobý „rovnovážný“ modul, který odpovídá „úplné“ relaxaci (za nekonečně dlouhou dobu), τ_i a G_i jsou parametry Prony řady a t je čas.

Pokud zavedeme okamžitý tzv. „dynamický“ modul G_0 , který představuje tuhost materiálu bezprostředně po zatížení (v čase $t=0$)

$$G_0 = G(t=0) = G_{\infty} + \sum_{i=1}^N G_i \quad (P2)$$

dostaneme Prony řadu v ekvivalentním tvaru

$$G(t) = G_0 - \sum_{i=1}^N G_i \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \right] \quad (P3)$$

Poznámka: Parametry Prony řady „ G “ a „ τ “ se stanovují na základě vhodných experimentů (tah, tlak, smyk, objemové, či biaxální testy) a zpracováním takto naměřených dat prostřednictvím numerických regresních postupů (fitting curves, např. metodou nejmenších čtverců) do uvedené formy, viz dále.

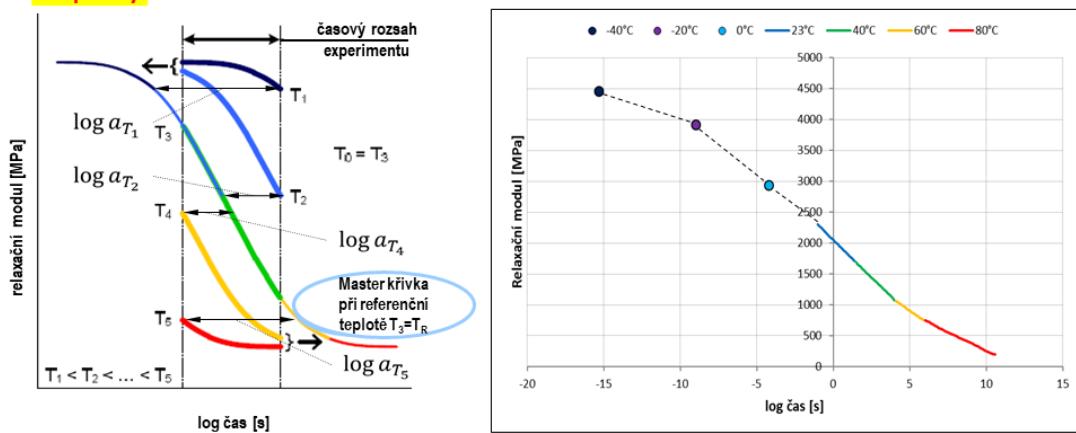
6.10.2022

22-246

Časově teplotní zkoušky a materiálové modely viskoelasticity

LENAM
s.r.o.

1. Predikce viskoelasticke odezvy produktů z polymerních materiálů vyžaduje v technické praxi realizovat experimentální relaxační nebo creepové experimenty v závislosti na teplotě.
2. V určitých případech lze využít tzv. časově-teplotní superpoziční princip (TTSP), který umožnuje zkrátit dobu experimentálních měření, viz schéma vlevo a určit relaxační modul jako funkci času ve formě tzv. Master křivky, reprezentovanou matematicky Prony řadou a to společně s Williams–Landel–Ferry empirickým vztahem (shift faktorem), viz obr. a dále objasněnými pojmy „Thermorheological simplicity / complexity“.



6.10.2022

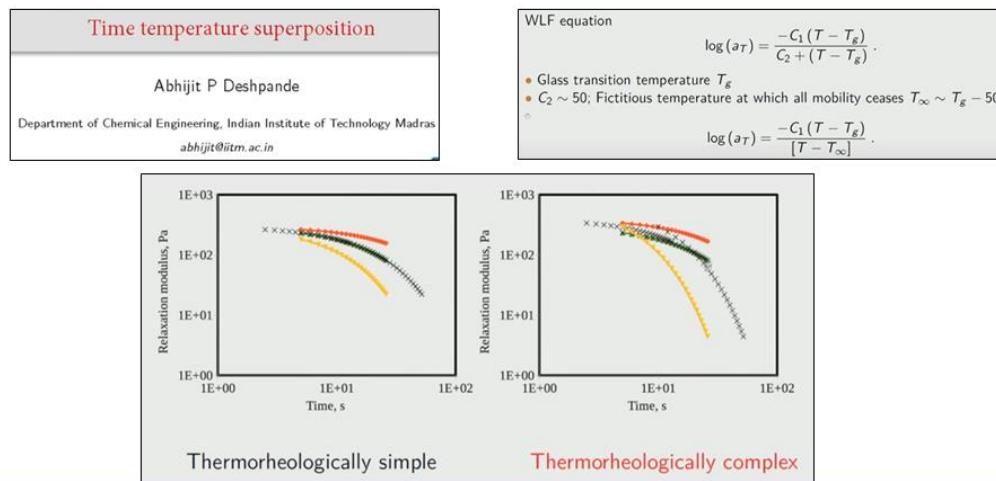
22-246

Co je „Thermorheological simplicity / complexity“

LENAM
s.r.o.

U polymerních materiálů je nutné rozlišovat zda se jedná o materiály vykazující tzv. thermo-rheologickou simplicitu (jednoduchost) nebo complexitu (složitost) při jejich provozním zatežování.

V prvním případě lze využít časově – teplotní superpoziční princip (master křivku), ale v druhém nikoliv. Příčinou jsou odlišnosti v jejich molekulární struktuře, která spočívá v pohyblivosti materiálových „elementů“ v závislosti na teplotě, viz např. <https://www.youtube.com/watch?v=YG53m6roxR8>

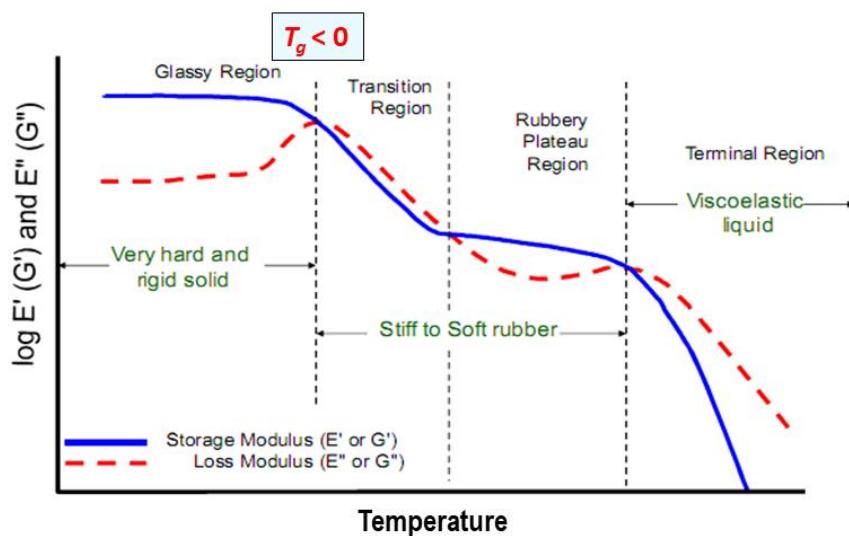


6.10.2022

22-246

Typické oblasti a rozsahy měřených složek komplexních modulů DMTA

LENAM
s.r.o.



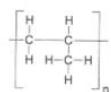
6.10.2022

22-246

Příklad výsledků měření viskoelastických vlastností polymeru

LENAM
s.r.o.

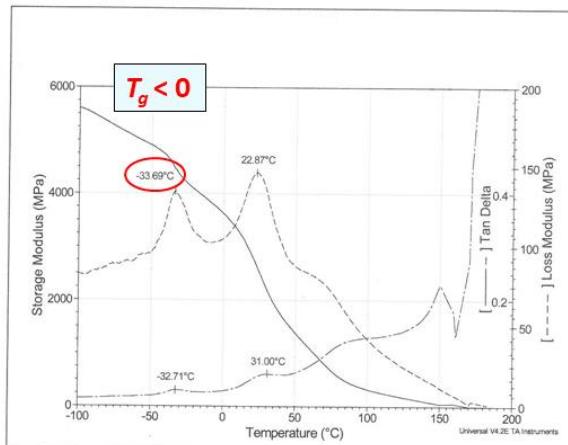
PP-copo Polypropylen, heterophasiges Copolymer



Probe
PP-Spritzgussprüfkörper (Hostalen PPR 1042)

Versuchsbedingungen

Messzelle: Dynamisch-mechanischer Analysator DMA 2980
Single Cantilever
Probengeometrie: DMA-Prüfkörper (17,5 x 10 x 2) mm³
Messprogramm: Heizrate 3 K/min von -100 °C bis 200 °C
Frequenz 1 Hz, Amplitude 20 µm
Atmosphäre: Stickstoff



6.10.2022

22-246

Co naznačuje „Deborah“ číslo, resp. poměr

LENAM
s.r.o.

Linear viscoelastic materials
Relaxation process

Deborah number

$$De = \frac{\lambda}{t_{exp}} .$$

$\lambda \rightarrow$ relaxation time of the material

$t_{exp} \rightarrow$ time-scale of interest or experimental time or time-scale of observation

$De \ll 1$

$\lambda \sim 0$ or $t_{exp} \sim \infty \rightarrow$ relaxation process would lead to dissipation of energy

$De \gg 1$

$\lambda \sim \infty$ or $t_{exp} \sim 0 \rightarrow$ relaxation process would lead to storage of energy

6.10.2022

22-246

Poznámka 1: Stanovení konstant C1 a C2 ve Williams–Landel–Ferry (WLF) vztahu



Pro CAE simulace creepové či relaxační odezvy termo-reologicky jednoduchých polymerních materiálových systémů na zatížení, tzn. jejich materiálových modelů, je kromě konstrukce master křivky (list 12) aproximované např. Pronyho řadou, viz dále, nutné stanovit koeficienty C1 a C2 ve WLF vztahu, který je nutnou podmínkou využití zmíněného časově – teplotního superpozičního principu v CAE analýzách:

$$\text{Log}(a_T) = \frac{-C_1(T - T_R)}{C_2 + (T - T_R)} \quad (1)$$

Výraz „ $\text{Log}(a_T)$ “ je označován jako „shift“ faktor „posunu“, který se odhaduje při zpracování realizovaných experimentálních měření (viz list 12) a může jich být tak odhadnuto několik, tj. minimálně dva, lépe více, a to související teploty „ T_i “.

Vzhledem k tomu, že potřebujeme určit dvě konstanty ve vztahu (1), postačí k jejich stanovení výběr dvou „shift“ faktorů pro příslušné teploty, např. T_1 a T_2 a volba vhodné referenční teploty „ T_R “ z rozsahu realizovaných experimentů pro $T [20;90]^\circ\text{C}$.

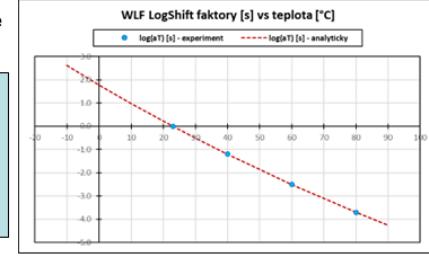
Platí:

$$\text{Log}(a_{T_1}) = \frac{-C_1(T_1 - T_R)}{C_2 + (T_1 - T_R)} = \frac{-C_1 * A}{C_2 + A}, \text{ kde } A = (T_1 - T_R)$$

$$\text{Log}(a_{T_2}) = \frac{-C_1(T_2 - T_R)}{C_2 + (T_2 - T_R)} = \frac{-C_1 * B}{C_2 + B}, \text{ kde } B = (T_2 - T_R)$$

Řešením soustavy těchto dvou rovnic vzhledem k C1 a C2 můžeme zkonstruovat graf WLF vztahu (1) jako funkci teploty, viz obr. → → → →

Pozn.: Za referenční teplotu ve WLF vztahu lze taky považovat tzv. přechodovou teplotu „zeskelnění“ $T_R = T_g$, viz listy 13-15, která je konstrukční polymerů nízká, zpravidla $T_g < 0$, nad kterou se předpokládá, že polymer bude výkazovat reologické vlastnosti. Tato teplota, stejně jako další technologicky významné teploty (zkapalnění) se stanovuje experimentálními metodami DMTA a DSC.



6.10.2022

22-246

Poznámka 2: Stanovení konstant C1 a C2 ve WLF vztahu regresní metodou



Podle schématu na listu 12, je master křivka sestavena s využitím zmíněného časově – teplotního superpozičního principu z více experimentálních měření $i = 1, 2, \dots$, což dává možnost odhadu více „shift“ logaritmických faktorů pro související teploty T_i , tedy

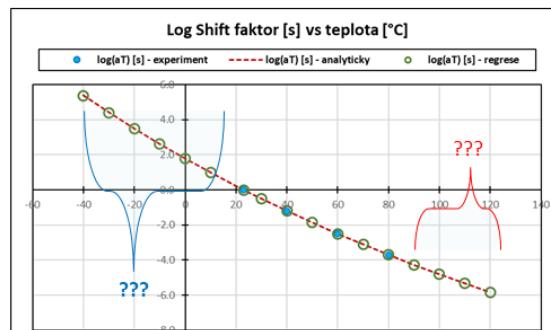
$$\text{Exp}[\text{Log}(a_{Ti})], i = 1, 2, \dots N$$

V takovém případě lze využít regresních metod k určení konstant C1 a C2, např. „metodu minima nejmenších čtverců“

$$\sum_{i=1}^N \left(\frac{-C_1(T_i - T_R)}{C_2 + (T_i - T_R)} - \text{Exp}[\text{Log}(a_{Ti})] \right)^2 = \{\min\}_{i=1,2,\dots,N}$$

Příklad porovnání výsledků rekonstrukce WLF vztahu (1) jako funkce teploty s experimentálním odhadem čtyř logaritmických „shift“ faktorů je na obr. → → → → → →

Pozn.: Je nutno brát na zřetel, že vždy bude záležet na tom, v jakém teplotním rozsahu, např. [-10; +80]°C a časovém rozsahu (doménách), se realizují a následně zpracovávají experimentální pozorování určené pro související prediktivní CAE simulace.



6.10.2022

22-246

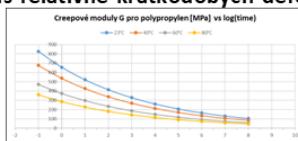
Další reologické modely metriálů užívané v CAE numerických simulacích

LENAM
s.r.o.

Model s lineárním mocninovým vztahem – tento model se užívá pro popis relativně krátkodobých deformací polymerů. Časový průběh relaxačního modulu je approximován vztahem

$$E_{rel}(t) = A t^{-n} ,$$

kde A a n jsou materiálové konstanty a t je čas.



Výše představené modely zařazujeme do kategorie lineárních viskoelastických materiálových modelů. Parametry obsažené ve vztazích pro časovou závislost modulu $E(t)$ nejsou funkci napětí a předpokládá se, že deformace v čase „ t “ je lineárně závislá na napětí. Pokud takový předpoklad neplatí a jakýkoliv parametr je funkci napětí, je materiál ne-lineárně viskoelastický.

Takovými materiálovými modely jsou například modely s mocninovými vztahy, tzv. Power Law modely

$$\dot{\varepsilon}_{cr}(t) = A q(t)^n t^m$$

$$\dot{\varepsilon}_{cr}(t) = K q(t)^n \text{ (pro tzv. sekundární creep)}$$

kde $\dot{\varepsilon}_{cr}(t)$ je creepová rychlosť deformacie, A , n a m jsou materiálové konstanty, $q(t)$ je ekvivalentní napětí a t je čas.

G'Sell - Jonas model (1981)

Tento materiálový model je vhodný pro termoplasty. Parametry ve vztahu lze stanovit prostřednictvím tahových křivek.

$$\sigma = K \cdot \exp\left(\frac{\beta}{T}\right) \cdot [1 - \exp(-w \cdot \varepsilon)] \cdot \exp(h \cdot \varepsilon^2) \cdot \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_o}\right)^m$$

Vliv teploty je zohledňován vztahem Arrhéniova typu, tedy

$$K_P = K \cdot \exp\left(\frac{\beta}{T}\right)$$

6.10.2022

22-246

Matematická reprezentace viskoelastického modelu Prony časovou řadou

LENAM
s.r.o.

V přechozím textu uvedené approximativní vztahy experimentálních měření crepu a relaxace

$$G(t) = G_\infty + \sum_{i=1}^N G_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (P1)$$

$$G(t) = G_0 - \sum_{i=1}^N G_i \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right)\right] \quad (P3)$$

jsou do sw nástrojů (ANSYS, Abaqus, MSC.MARC aj.) implementované zpravidla jednou následujících *normalizovaných (bezrozměrných)* forem:

$$\alpha_{\infty}^G = \frac{G_\infty}{G_0} \quad a \quad \alpha_i^G = \frac{G_i}{G_0}$$

$$G(t) = G_0 \left[\alpha_{\infty}^G + \sum_{i=1}^N \alpha_i^G \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \right] \quad a \quad G(t) = G_0 \left[1 - \sum_{i=1}^N \alpha_i^G \exp\left(1 - \frac{t}{\tau_i}\right) \right] \quad (P4)$$

kde τ_i je uživatelem volené tzv. *relaxační časové spektrum* v grafických interpretacích obvykle zobrazované v logaritmických časových dekadách, např. *log(s)* [0;7 - 10], viz dále.

Jak bylo výše naznačeno, relativní hodnoty (moduly) Prony řady α_i^G se stanovují zpracováním experimentálně naměřených dat prostřednictvím numerických regresních postupů (angl. fitting curves), např. metodou nejmenších čtverců, viz dále.

6.10.2022

22-246

Matematická reprezentace viskoelastického modelu frekvenční formou

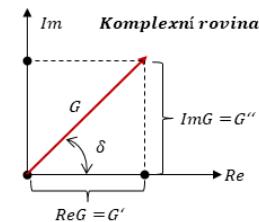


Viskoelastické chování materiálu může být určováno dynamickými vibračními experimenty, tzv. metodou DMTA (Dynamická Mechanická Teplotní Analýza). V těchto experimentech je materiál vystaven malým deformačním vibracím při různých módech excitace. Výsledkem měření jsou reálná G' a imaginární složka G'' komplexního modulu $G(\omega)$, které jsou funkcemi frekvence ω .

Lze ukázat (bez odvození), že mezi parametry Prony řady představené výše v časové doméně a frekvenční reprezentaci lineární viskoelastické odezvy materiálů platí následující vztahy:

$$G'(\omega) = G_0 \left[1 - \sum_{i=1}^N \left(\alpha_i^G - \frac{\alpha_i^G (\tau_i^G \omega)^2}{1 + (\tau_i^G \omega)^2} \right) \right]$$

$$G''(\omega) = G_0 \sum_{i=1}^N \left(\frac{\alpha_i^G \tau_i^G \omega}{1 + (\tau_i^G \omega)^2} \right)$$



Pro komplexní modul $G(\omega)$ a ztrátový (loss) faktor „ $\operatorname{tg}\delta(\omega)$ “ platí, viz obr.:

$$G(\omega) = \sqrt{G'^2(\omega) + G''^2(\omega)}$$

$$\operatorname{tg}\delta(\omega) = \frac{G''(\omega)}{G'(\omega)}$$

Z předchozího vyplývá, že pokud stanovíme hodnotu G_0 a normalizované parametry α_i z experimentálních dat regresními metodami (fittováním) prostřednictvím výše uvedených matematických vztahů (v čase, resp. frekvenci), můžeme materiálové závislosti vzájemně konvertovat. To je ale podmíněno platností superpozičních principů (Boltzmann + TTSP), viz thermo-rheologicky jednoduchý materiál a souvislostmi mezi oběma doménami času a frekvence.

6.10.2022

22-246

Poznámka: Ekvivalence a alternativy vztahů pro složky komplexních modulů



$$G'(\omega) = G_0 \left[1 - \sum_{i=1}^N \left(\alpha_i^G - \frac{\alpha_i^G (\tau_i^G \omega)^2}{1 + (\tau_i^G \omega)^2} \right) \right]$$

$$G'(\omega) = G_0 \left[1 - \sum_{i=1}^N \alpha_i^G \left(1 - \frac{(\tau_i^G \omega)^2}{1 + (\tau_i^G \omega)^2} \right) \right]$$

$$G'(\omega) = G_0 \left[1 - \sum_{i=1}^N \alpha_i^G \right] + G_0 \sum_{i=1}^N \frac{\alpha_i^G (\tau_i^G \omega)^2}{1 + (\tau_i^G \omega)^2}$$

pro bezrozměrný parametr modulů: $\alpha_i^G = \frac{G_i}{G_0} \rightarrow G_i = G_0 \alpha_i^G$

$$G'(\omega) = G_0 - \sum_{i=1}^N G_i \left(1 - \frac{(\tau_i^G \omega)^2}{1 + (\tau_i^G \omega)^2} \right)$$

$$G'(\omega) = \left[G_0 - \sum_{i=1}^N G_i^G \right] + \sum_{i=1}^N \frac{G_i^G (\tau_i^G \omega)^2}{1 + (\tau_i^G \omega)^2}$$

$$G''(\omega) = G_0 \sum_{i=1}^N \left(\frac{\alpha_i^G \tau_i^G \omega}{1 + (\tau_i^G \omega)^2} \right)$$



$$G''(\omega) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{G_i^G \tau_i^G \omega}{1 + (\tau_i^G \omega)^2} \right)$$

6.10.2022

22-246

Poznámka: Regresní analýzy experimentálních dat pro $[f_1; f_K]$ a $[T_1; T_L]$ **LENAM**
s.r.o.

$G'(\omega_{j,k}), G''(\omega_{j,k})$ – experimentálně stanovené složky komplexních modulů pomocí metody DMTA pro frekvence ($j = 1, 2, \dots K$) a pro teploty ($k = 1, 2, \dots L$),

kde $\omega_j = 2\pi f_j$, resp. $f_j = 0.5 \omega_j / \pi$

τ_i^G – vhodné zvolené časové spektrum [s] Prony řady v relaci k „ f_j “ [Hz]

G_i^G – hledané moduly Prony řady ve zvoleném časovém spektru

$$\sum_{i=1}^N \left(\sqrt{G'^2(\omega_j) + G''^2(\omega_j)} - \sqrt{\left[G_0 - \sum_{i=1}^N G_i^G \right]^2 + \sum_{i=1}^N \frac{G_i^G (\tau_i^G \omega_j)^2}{1 + (\tau_i^G \omega_j)^2}} + \left\{ \sum_{i=1}^N \left(\frac{G_i^G \tau_i^G \omega_j}{1 + (\tau_i^G \omega_j)^2} \right) \right\}^2 \right)^2 = \{min\}_{T=konst}$$

nebo

$$\sum_{i=1}^N \left(\sqrt{G'^2(\omega_{j,k}) + G''^2(\omega_{j,k})} - \sqrt{\left[G_0(j,k) - \sum_{i=1}^N G_i^G \right]^2 + \sum_{i=1}^N \frac{G_i^G (\tau_i^G \omega_{j,k})^2}{1 + (\tau_i^G \omega_{j,k})^2}} + \left\{ \sum_{i=1}^N \left(\frac{G_i^G \tau_i^G \omega_{j,k}}{1 + (\tau_i^G \omega_{j,k})^2} \right) \right\}^2 \right)^2 = \{min\}_{j,k}$$

6.10.2022

22-246

Fyzikální experiment – podmínka a základ poznání viskoelastické odezvy materiálu**LENAM**
s.r.o.

Pro identifikaci časové odezvy pevných materiálů (tedy ne kapalin a plynů) na vnější zatěžovací účinky je nutné si uvědomit řadu souvislostí vyplývající z teorie mechaniky pevného kontinua. Základem je, že u homogenního izotropního materiálu lze deformaci a napjatost viskoelastického tělesa, stejně jako elastického tělesa, rozdělit na dvě složky (bez odvození, viz literatura), které charakterizují

1. změnu tvaru elementárního objemu materiálu (viz pojmy a vztahy pro deviátory napětí a deformace),
 2. poměrnou změnu objemu elementárního objemu materiálu (viz kulové tenzory napětí a deformace),
- a kdy mezi veličinami K , G , E a μ platí vztahy: $K(t) = \frac{2G(t)(1+\mu(t))}{3(1-\mu(t))} = \frac{G(t)E(t)}{3(3G(t)-E(t))} = \frac{E(t)}{3(1-2\mu(t))}$

Pro identifikaci viskoelastických vlastností materiálů jsou na základě těchto poznatků jsou využívány experimentální techniky, zpravidla založené na následujících experimentálně ověřovaných předpokladech:

- a) materiál se při smykové a objemové deformaci chová identicky, tzn. že platí:

$$\mu(t) = \mu = konst. < 0.5$$

$$\frac{E(t)}{G(t)} = \frac{E}{G}$$

- a) materiál je pružně stlačitelný (vlastnosti jsou určovány jednou konstantou a jednou funkcí času):

$$K(t) = K = konst.$$

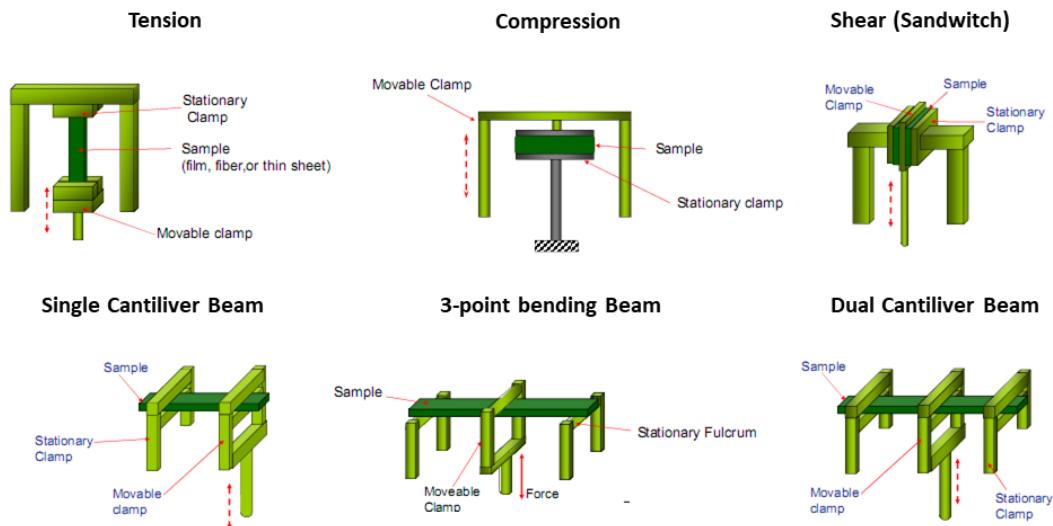
$$\frac{E(t)}{E} = \frac{(1-2\mu(t))}{(1-2\mu)}$$

- a) materiál je nestlačitelný: $K(t) \rightarrow \infty$, $E(t) = 3G(t)$, $\mu(t) = konst. = 0.5$

6.10.2022

22-246

Používané experimentální metody – testovací módy metody DMTA



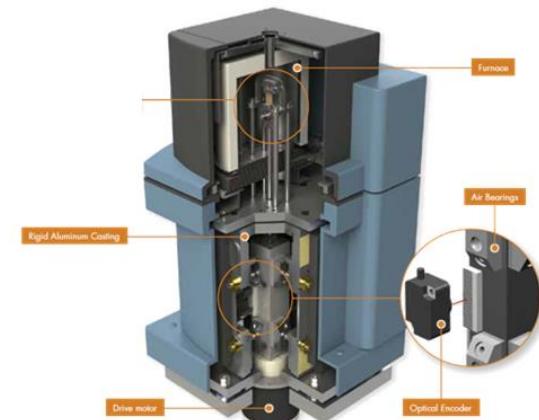
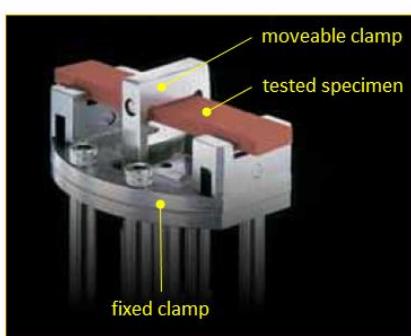
6.10.2022

22-246

DMTA test v režimu 3-bodového ohybu nosníku



- Creep test in DMA Q800 – 3-Point Bend deformation mode:
 1. In this mode, the sample is supported at both ends and constant force is applied in the middle.
 2. 3-point bend is considered a “pure” mode of deformation since clamping effects are eliminated.
 3. Sample size: 50 mm (supports length), up to 15 mm (width), cca. 3 mm (thickness).

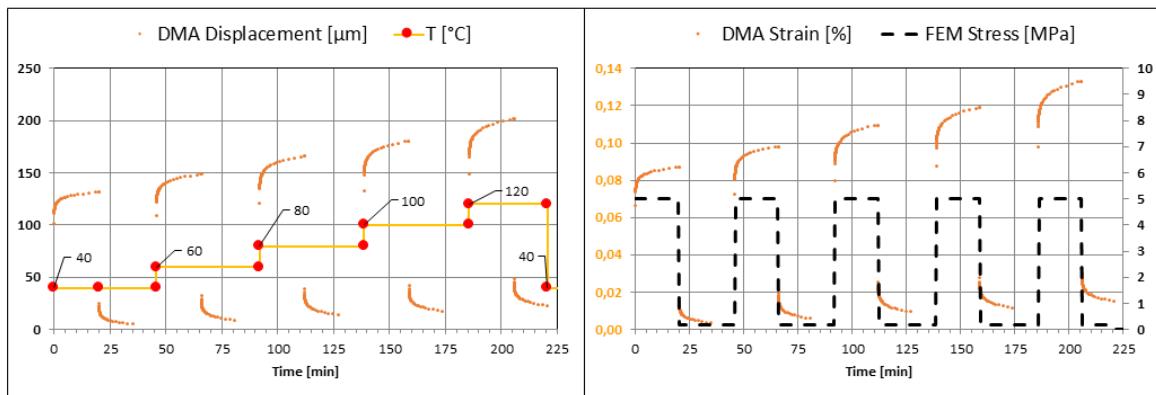


6.10.2022

22-246

Podmínky a výstupy DMTA creep testu pro teploty 40, 60, 80, 100 a 120°C

LENAM
s.r.o.

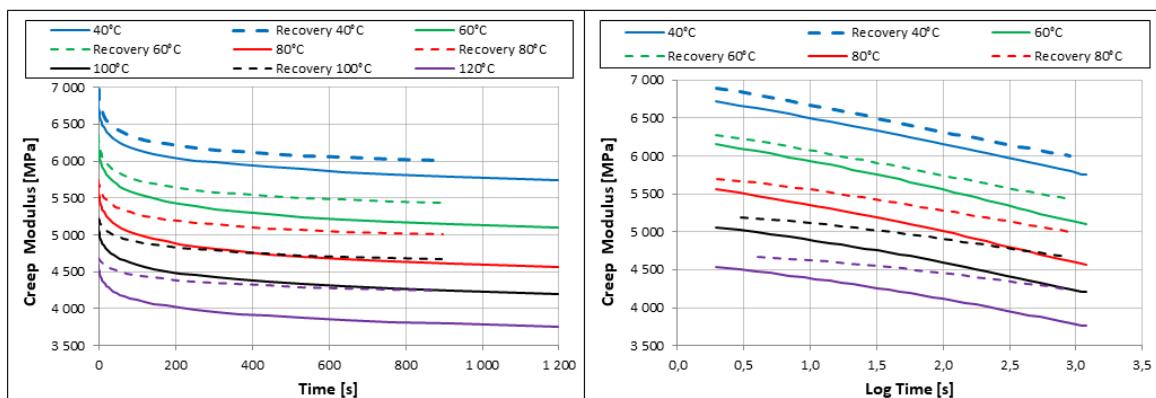


6.10.2022

22-246

Creepové moduly pro teploty 40, 60, 80, 100 a 120°C

LENAM
s.r.o.

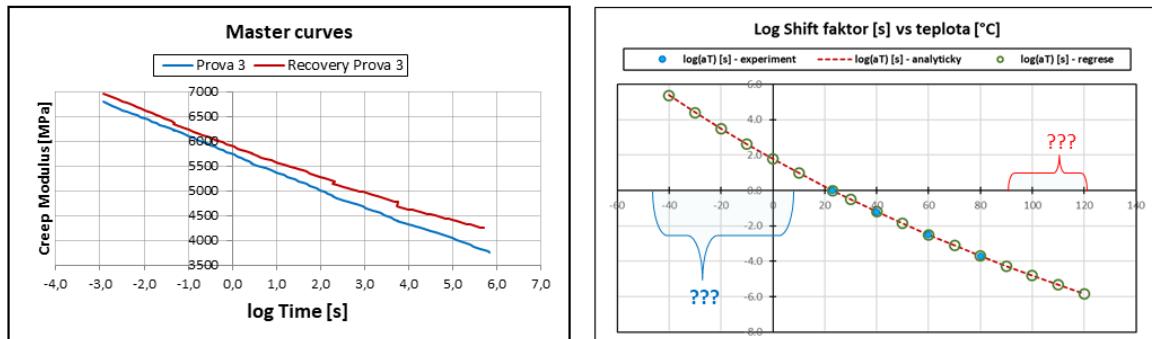


6.10.2022

22-246

Konstrukce Master křivky a Shift faktor

LENAM
s.r.o.



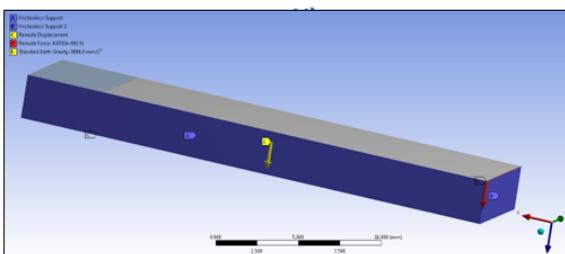
6.10.2022

22-246

Numerická simulace DMTA testu v režimu 3-bodového ohybu nosníku

LENAM
s.r.o.

FEM model 3 bodového ohybu nosníku (symetrie)



Materiálové modely viskoelasticity

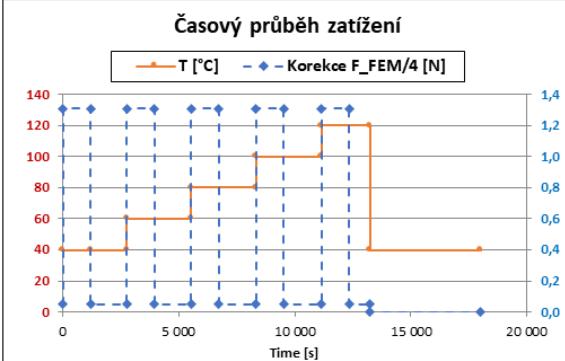
Prostředí sw ANSYS umožnuje využít dvě definice materiálových modelů viskoelasticity s využitím Prony řad:

1. Více sad Prony koeficientů, přičemž každá sada představuje viskoelastickou odezvu pro jinou teplotu (např. $T = 20, 30 \dots 95^{\circ}\text{C}$).

V tomto případě se využívají experimentálně naměřené údaje o viskoelastickém chování materiálů pro každou teplotu zvlášť.

2. Pokud materiál vykazuje výše zmíněnou thermoelastickou simplicitu/jednoduchost (TRS) při viskoelastické odezvě, lze využít předem zkonstruovanou „Master křivku“ pro jednu z teplot spolu se sestavenou funkcí posunu, tzv. „shift faktorem“ pro simulaci viskoelastické odezvy při ostatních teplotách.

<https://forum.ansys.com/discussion/2206/alternative-to-curve-fit-prony>

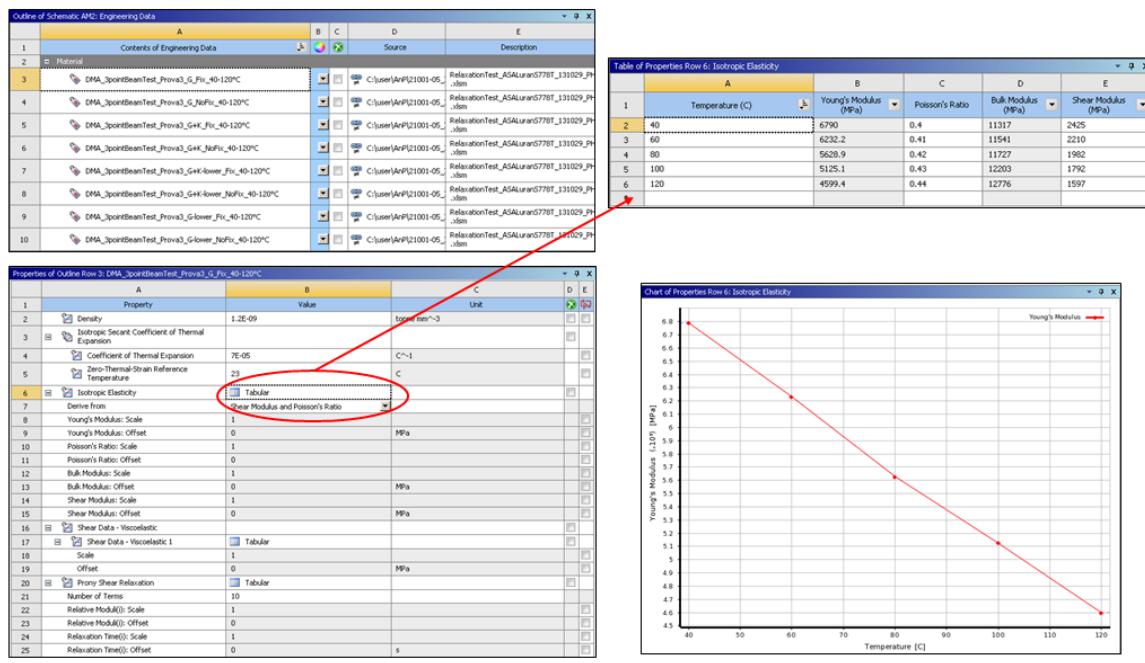


6.10.2022

22-246

Engineering Data – Isotropic Elasticity pro teploty 40, 60, 80, 100 a 120°C

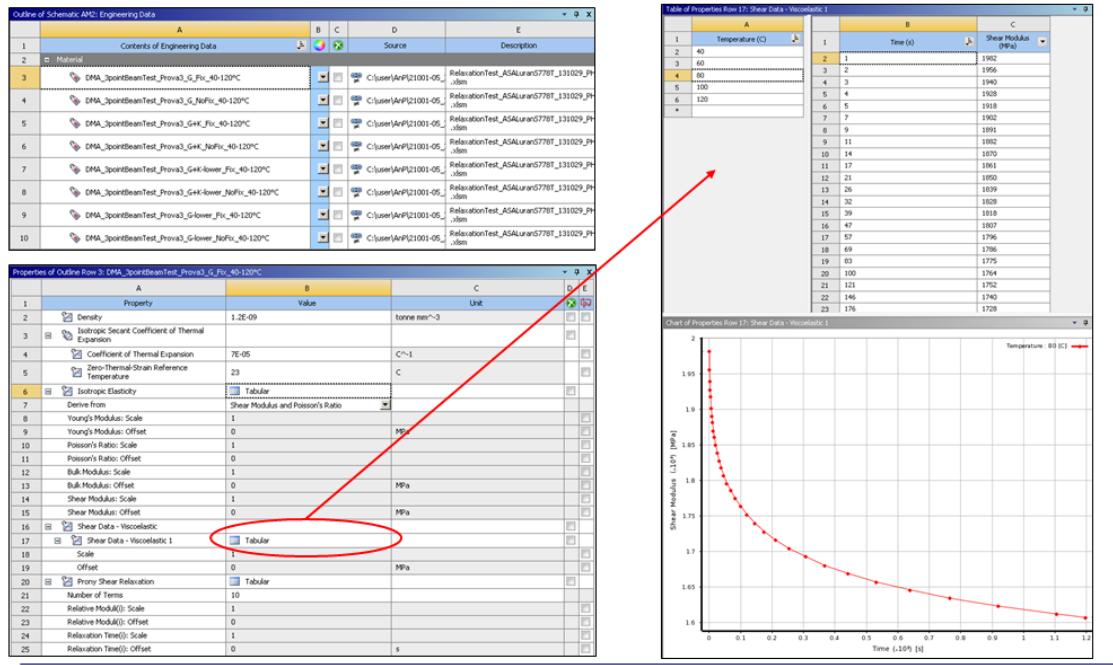
LENAM
s.r.o.



6.10.2022 22-246

Engineering Data – Shear Modulus pro teploty 40, 60, 80, 100 a 120°C

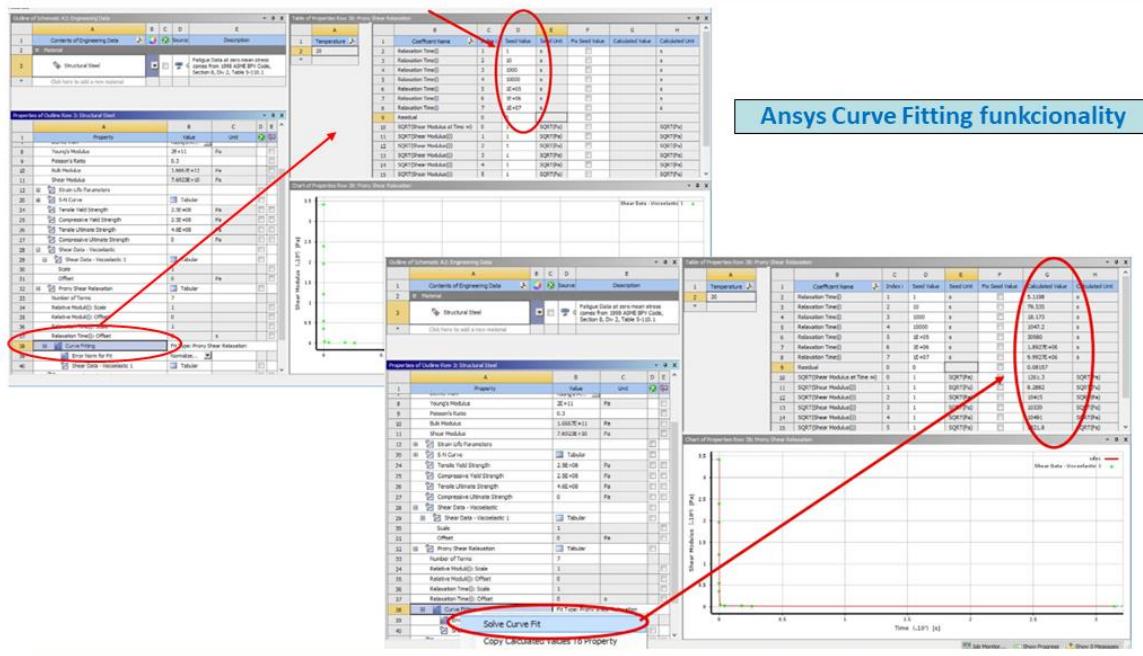
LENAM
s.r.o.



6.10.2022 22-246

Engineering Data – Shear Modulus pro teploty 40, 60, 80, 100 a 120°C

LENAM
s.r.o.



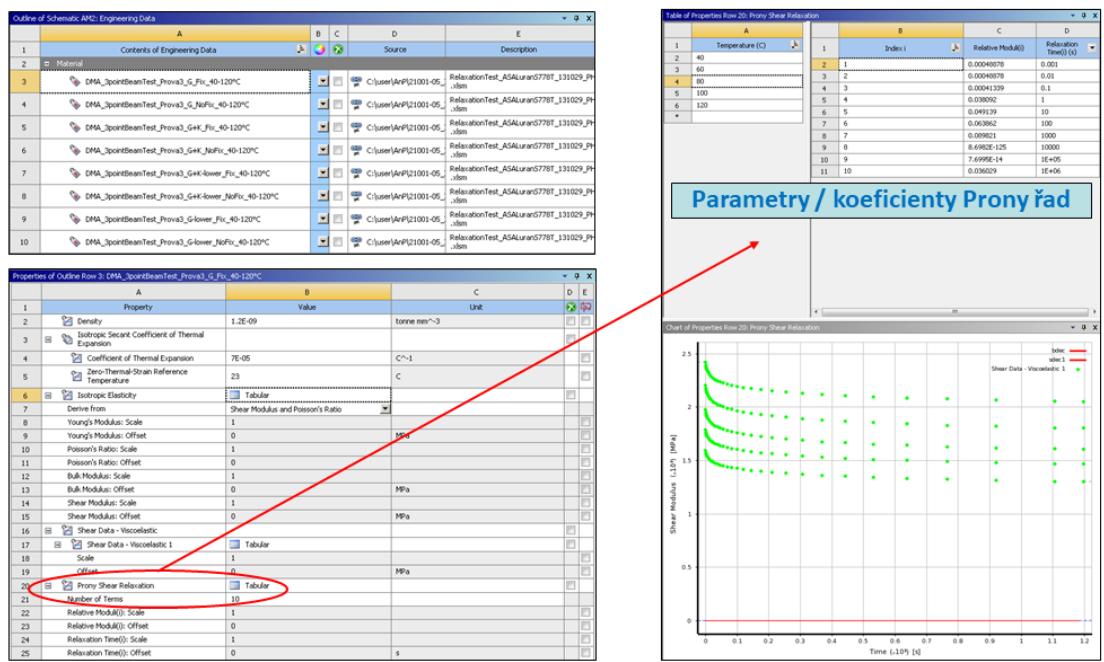
6.10.2022

22-246

Ansys Curve Fitting functionality

Engineering Data – Prony řady pro teploty 40, 60, 80, 100 a 120°C

LENAM
s.r.o.



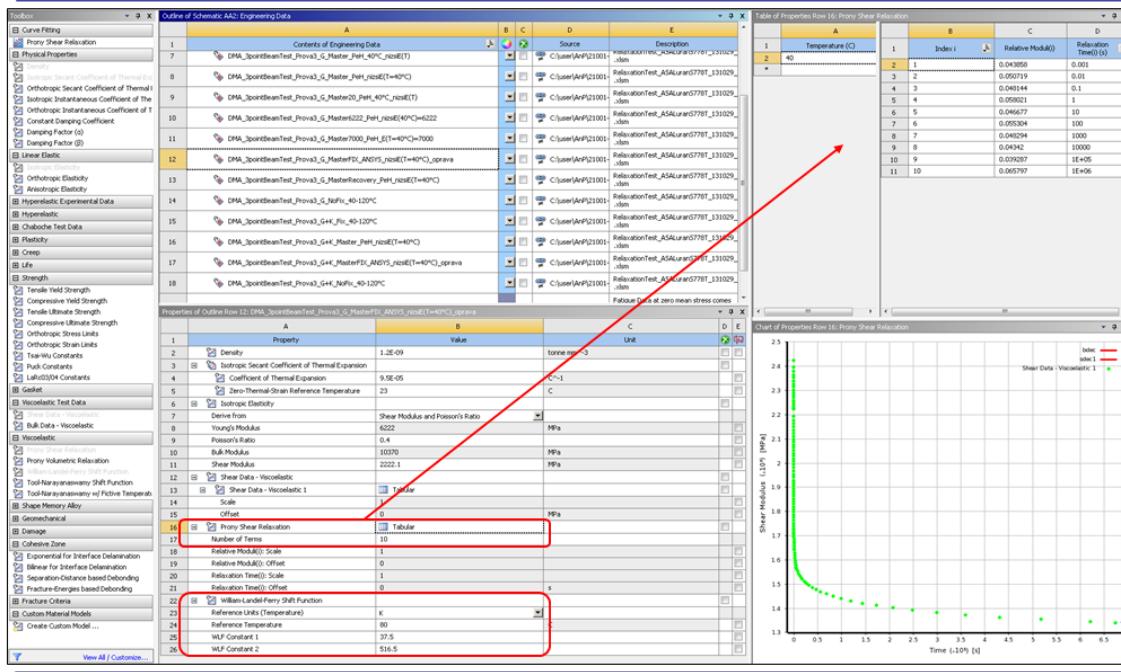
6.10.2022

22-246

Parametry / koeficienty Prony řad

Engineering Data – Master Prony řada + W-L-F Shift Function

LENAM
s.r.o.

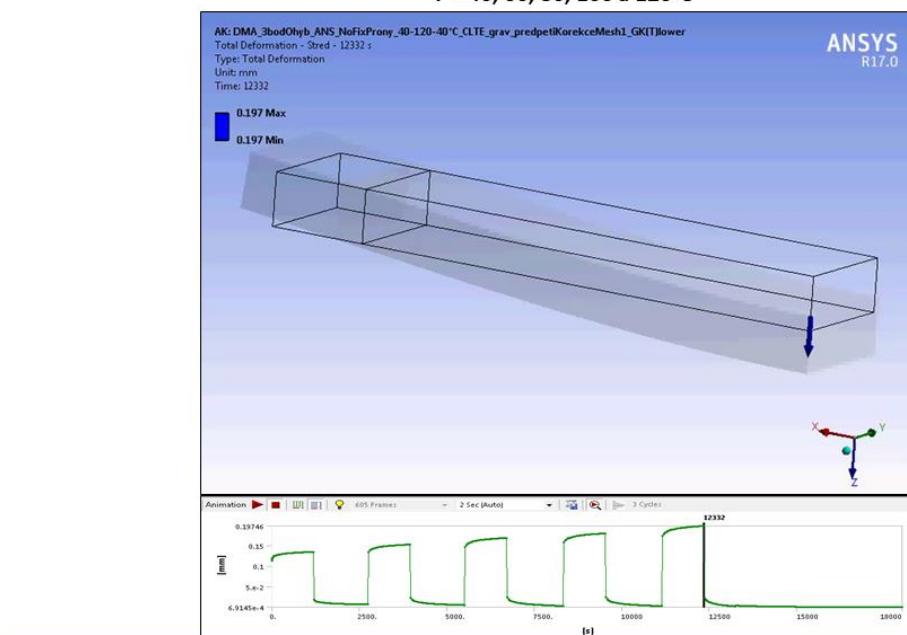


6.10.2022

22-246

Numerická simulace DMTA testu v režimu 3-bodového ohybu nosníku

LENAM
s.r.o.



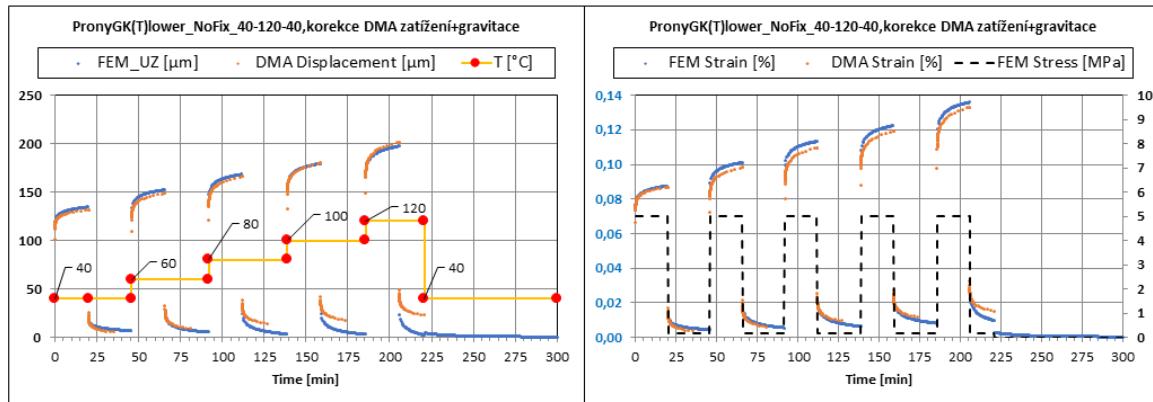
6.10.2022

22-246

Porovnání výsledků FEM vs DMTA experiment

LENAM
s.r.o.

T = 40, 60, 80, 100 a 120°C



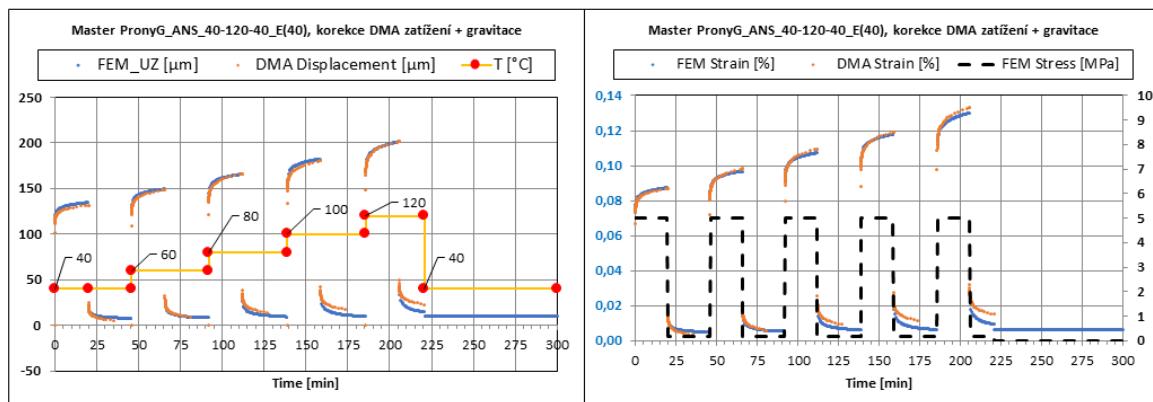
6.10.2022

22-246

Porovnání výsledků FEM vs DMTA experiment

LENAM
s.r.o.

Master Prony řada + W-L-F Shift Function

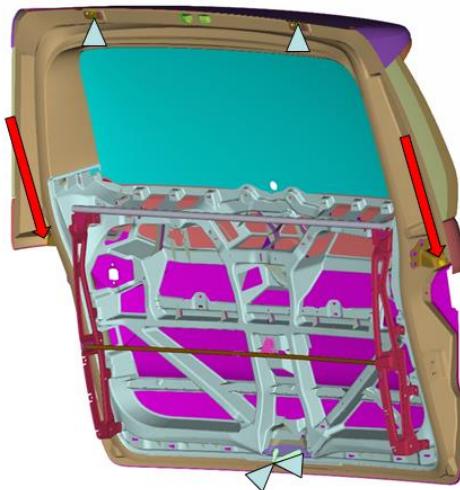
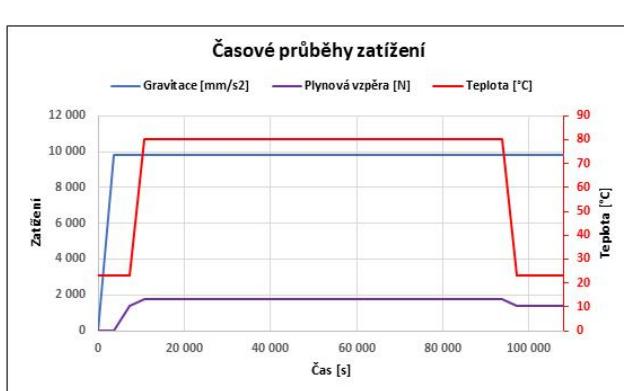


6.10.2022

22-246

Demonstrace CAE simulací viskoelastické odezvy zadních dveří vozidla

LENAM
s.r.o.

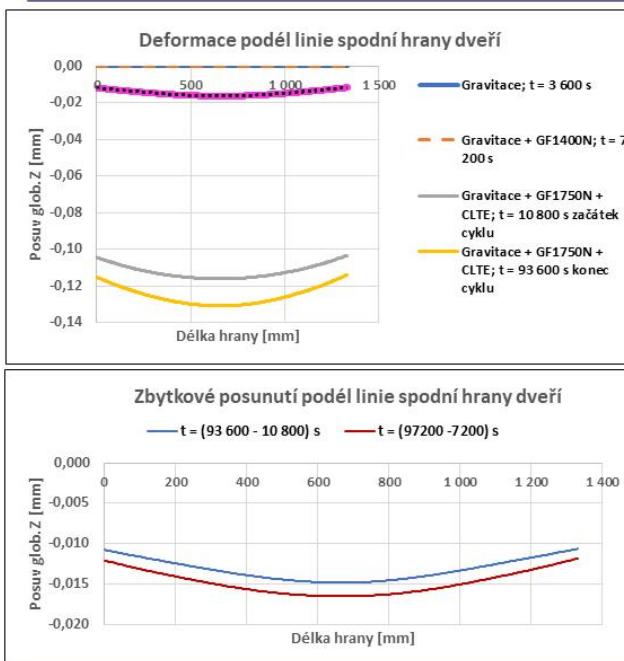


6.10.2022

22-246

Demonstrace CAE simulací viskoelastické odezvy zadních dveří vozidla

LENAM
s.r.o.

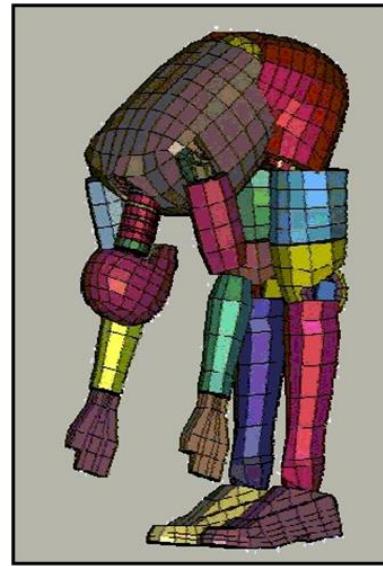


6.10.2022

22-246

Děkuji za pozornost

Thank you for your attention



6.10.2022

22-246

Zdroje pro ppt

210830_DMArecoveryANS_Prova3_PH_to_FEM_AnP.docx

210901_DMA_vs_ANSporovnani_Prova3_PH_to_FEM_210810_PeH_AnP.xlsx

22029-01_MBo_CAE_5dv_VW_T7_California\FEM\Modeley\220708_Vyhodnoceni.xlsx

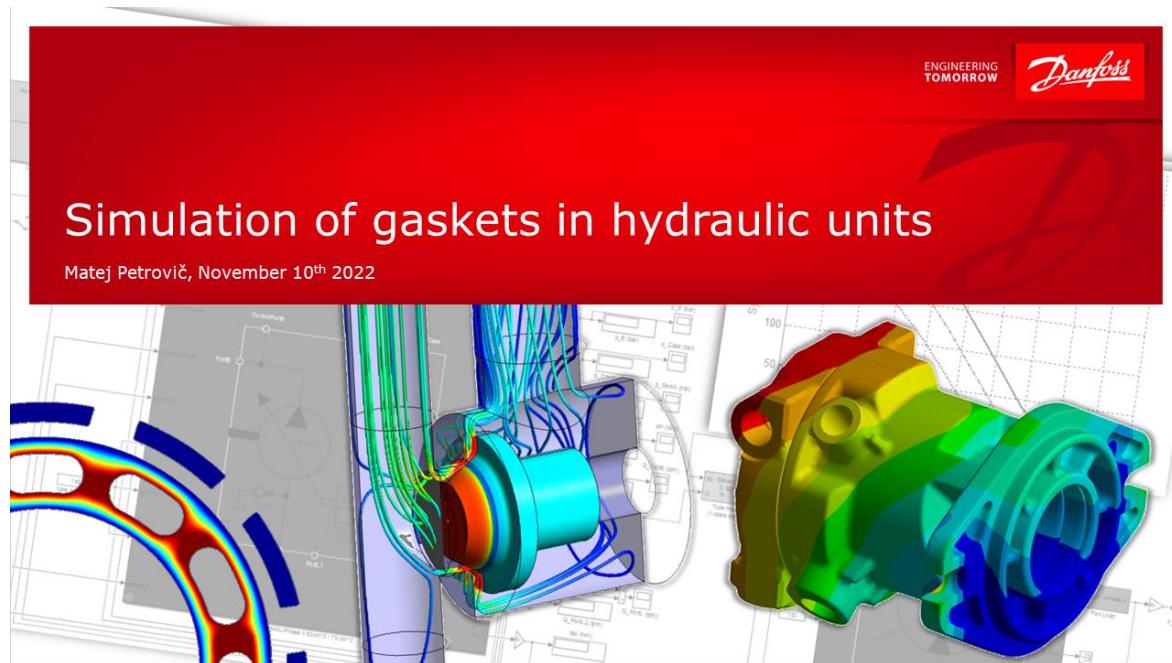
6.10.2022

22-246

SIMULATION OF GASKETS IN HYDRAULIC UNITS

MATĚJ PETROVIČ

DANFOSS POWER SOLUTIONS



Our Segments



**Danfoss
Power Solutions**

#2 Market position

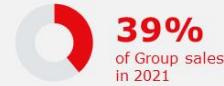
- 19,061 employees
- 53 factories in 19 countries
- 3.2bn EUR annual sales*



**Danfoss
Climate Solutions**

#2 Market position

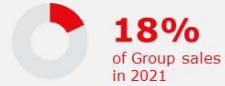
- 11,235 employees
- 34 factories in 15 countries
- 2.9bn EUR annual sales



**Danfoss
Drives**

#2 Market position

- 4,582 employees
- 9 factories in 7 countries
- 1.4bn EUR annual sales



* In 2021 – including five months of legacy Eaton Hydraulics sales

Our customer promise is as relevant as ever and drives our competitive advantage



3 | Danfoss

Classified as Business

ENGINEERING TOMORROW

Danfoss Power Solutions a.s. in Povazska Bystrica

Start of operation in Slovakia

- 1995 Sauer-Mechanika a.s. Považská Bystrica
- 1996 Sauer-ZTS a.s. Dubnica nad Váhom
- 2004 Sauer-Danfoss a.s.
- 2013 **Danfoss Power Solutions a.s.**
- 2015 Consolidation into one plant in Povazska Bystrica

2022

| | |
|----------------------------|-----|
| Number of employees | 829 |
| Engineers | 80 |
| EUSC | 123 |



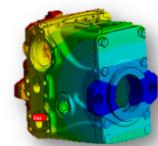
4 | Danfoss

Classified as Business

ENGINEERING TOMORROW

Simulation Engineering in Považská Bystrica (PX)

Leader: Ing. Michal Masny, PhD.



10 ...structural simulation engineers in Slovakia – Považská Bystrica

Centralized global simulation support of whole segment of **Power Solutions** in:

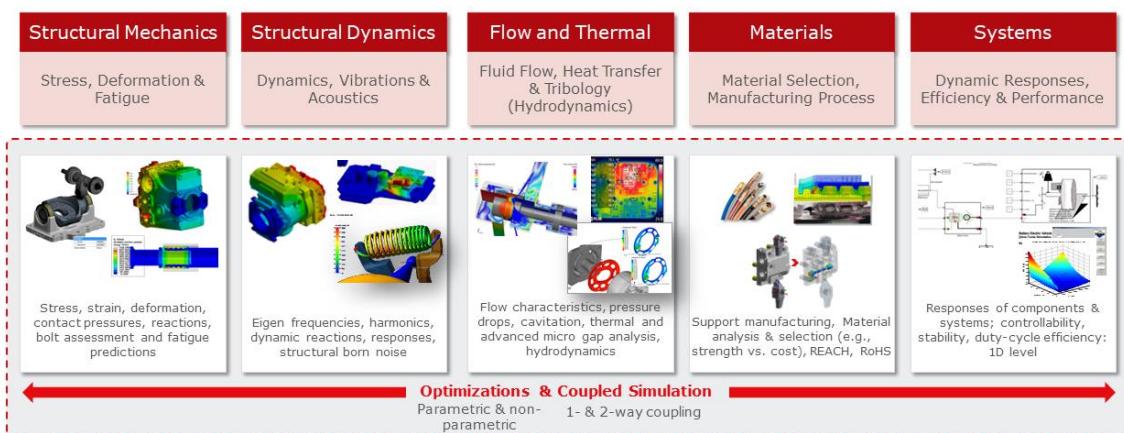


- R&D (New product development and Technology projects),
- current product portfolio

under global organization – „**Center of Excellence**“ / Center for Simulations and NVH (CfSN).

5 | Danfoss Classified as Business ENGINEERING TOMORROW

CfSN – Simulation Capabilities



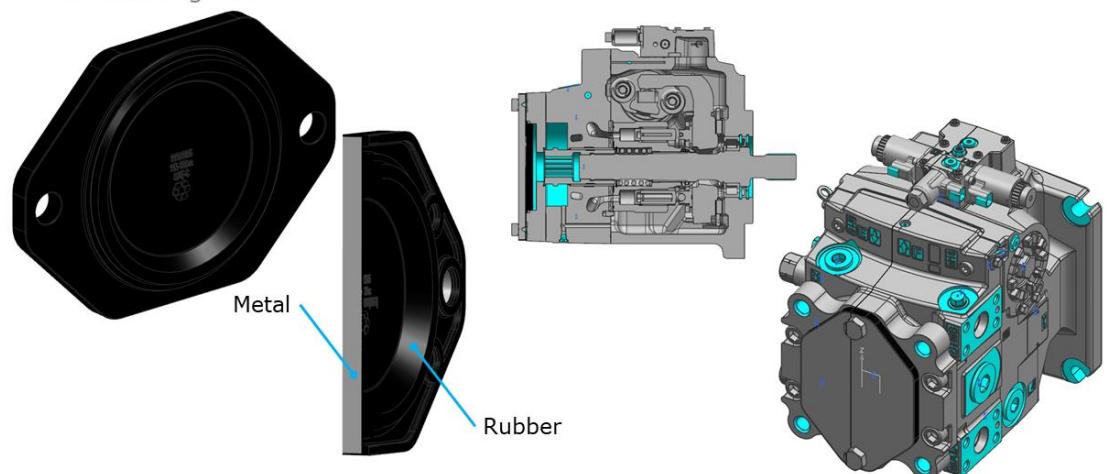
Toolsets

6 | Danfoss Classified as Business ENGINEERING TOMORROW



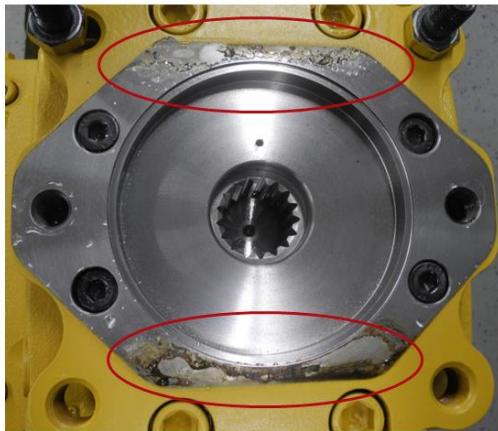
Product introduction

H1P Running Cover



Challenge

Flat rubber Design does not seal properly



Challenges

- Adapter surfaces sealing insufficient
- Running Covers for whole product family planned
- Required design iterations
- Tooling Costs



9 | Danfoss

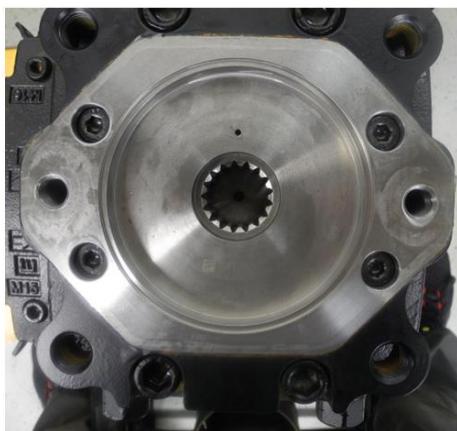
Classified as Business

ENGINEERING TOMORROW



Impact

Improved Design



Benefits from simulation

- Less design iterations
- Cost reduction (3600\$ to 4300\$ per tool)
- Reduced development time (for new covers)



10 | Danfoss

Classified as Business

ENGINEERING TOMORROW

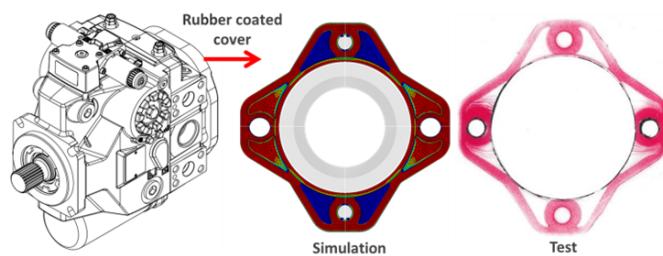




Motivation and aim

Gasket is a complex challenge – nonlinear behavior

Designing of an assembly regarding to sealing capability, bolted joints, stress and deflection of coupled parts with a gasket is a complex challenge due to nonlinear behavior of the gasket component. Gasket and rubber coated parts are linked with hyperelastic material behavior.



Aim of the presentation is to **share our takeaways/knowledge**

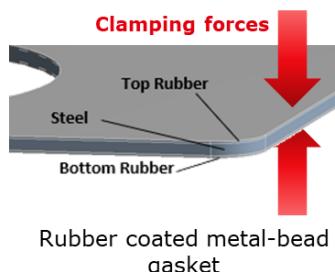
- how to select material models
- gasket simulations' cases and verifications (Fuji film test)

Scope: Rubber coated covers

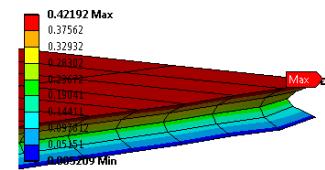
Problem statement

Why are the material properties so important?

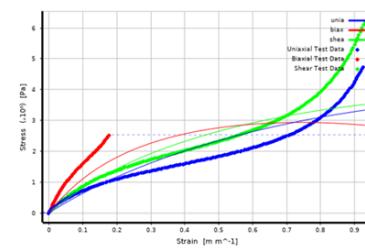
- Non-linear material properties
- Many mathematical material models of hyperelastic materials are available.
- Testing of material with tensional loading only
- Unknown compression behavior for material model



Rubber coated metal-bead gasket



Wrong simulation behavior
Compression of NBR layer of metal-bead
gasket with Mooney-Rivlin 2 par. model



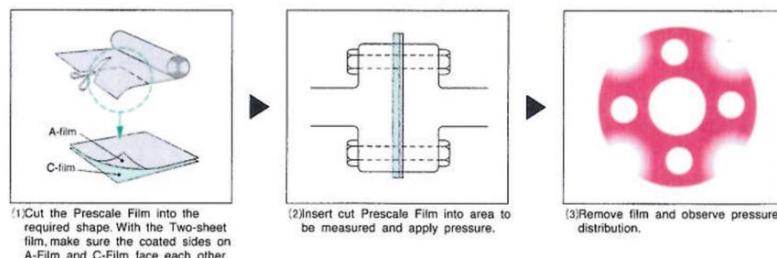
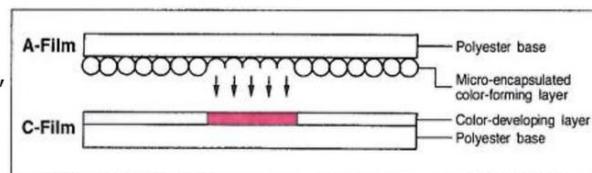
Hyperelastic material model



Fuji film paper test (reminder)

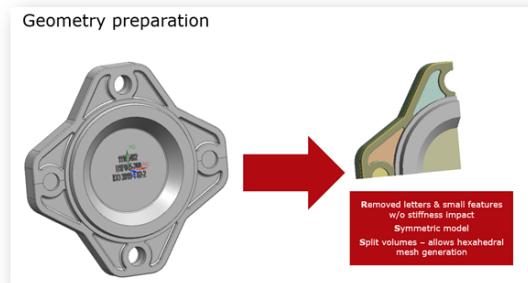
How it works?

- Pressure measurement film
- When the pressure threshold is reached, the microcapsules break
- Limitations of test

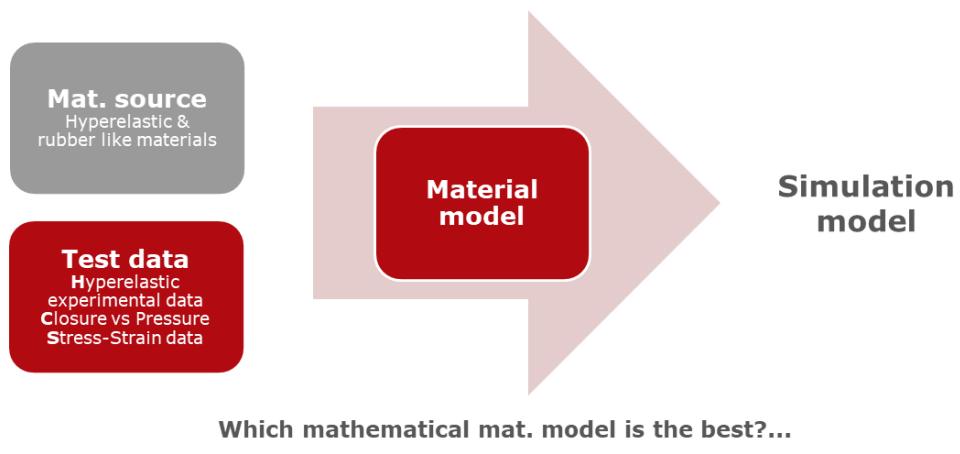


Simulation procedure

1. Model preparation and simplification
- 2. Material models**
(which mat. model to be used for FEA)
3. Debugging and solving
4. Post-processing and test results

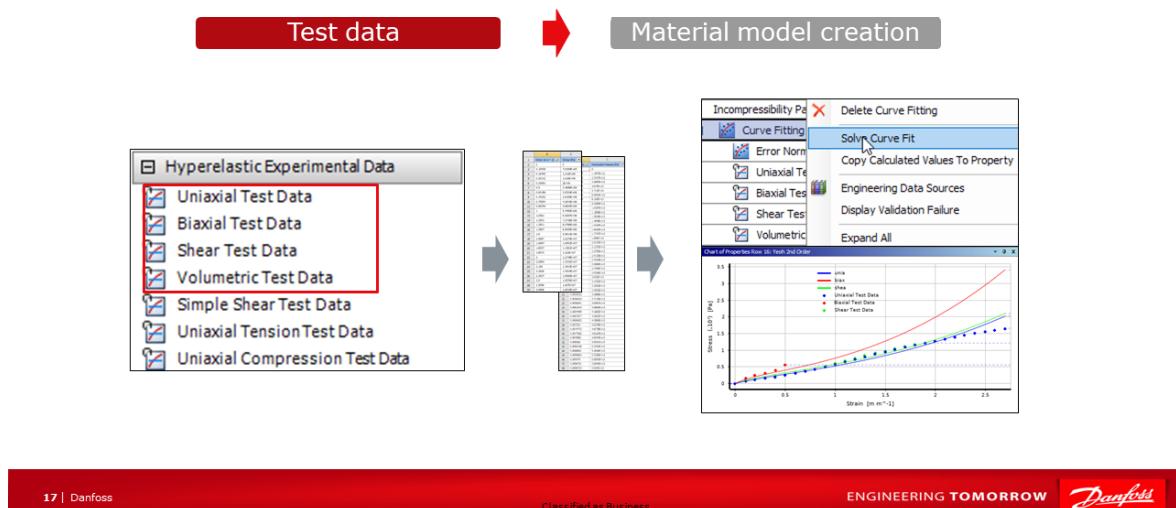


Material model



NBR (Nitrile Butadien Rubber) materials - Hyperelastic material

How to find out the best mathemat. model for simulation



17 | Danfoss Classified as Business ENGINEERING TOMORROW

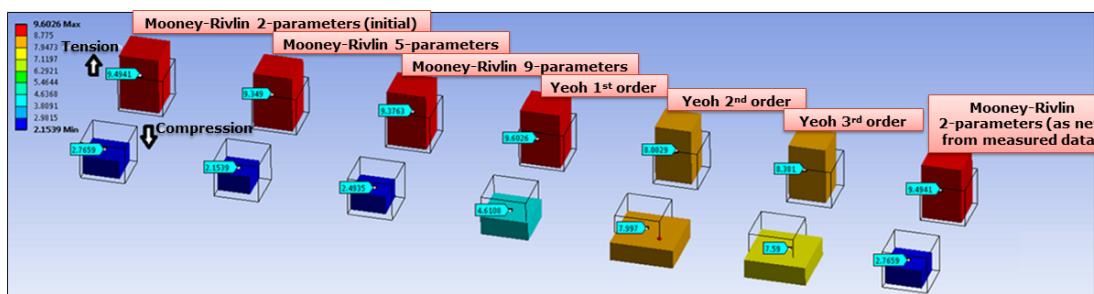
NBR materials - Hyperelastic material

How to find out the best mathemat. model for simulation

Our add-on...

Verification via simple simulation - study case

1. Simple FEA comparison through the several mat. models (Mooney-Rivlin, Yeoh, etc.)
2. Same loading/displacement: tension & compression
- 3. Check rule – Hyperelasticity = volumetric change to be „zero“!**



18 | Danfoss Classified as Business ENGINEERING TOMORROW

NBR materials - Hyperelastic material

How to find out the best mathemat. model for simulation

Results

| Used material model | Difference of volume [%] | |
|-------------------------------|--------------------------|-----------------|
| | 50% Tension | 50% Compression |
| Mooney-Rivlin 2-parameters | 18.68% | -65.43% |
| Mooney-Rivlin 5-parameters | 16.68% | -73.08% |
| Mooney-Rivlin 9-parameters | 17.20% | -68.83% |
| Yeoh 1st Order | 20.03% | -42.37% |
| Yeoh 2nd Order | 0.04% | -0.04% |
| Yeoh 3rd Order | 4.76% | -5.13% |

Minimal volumetric change

Yeoh 2nd Order

19 | Danfoss Classified as Business ENGINEERING TOMORROW 

Additional follow-up simulation model set-up - **Tips**

Rubber coated covers



Mixed U-P formulation

```
Onng
Solid
Commands (APOL)
ETCONTROL, off
RETOPT, matid, 6, 1
```

Linear hexahedral mesh

Set volumetric tolerance

```
/SOLU
solc...1e-3 !set volumetric tolerance
```

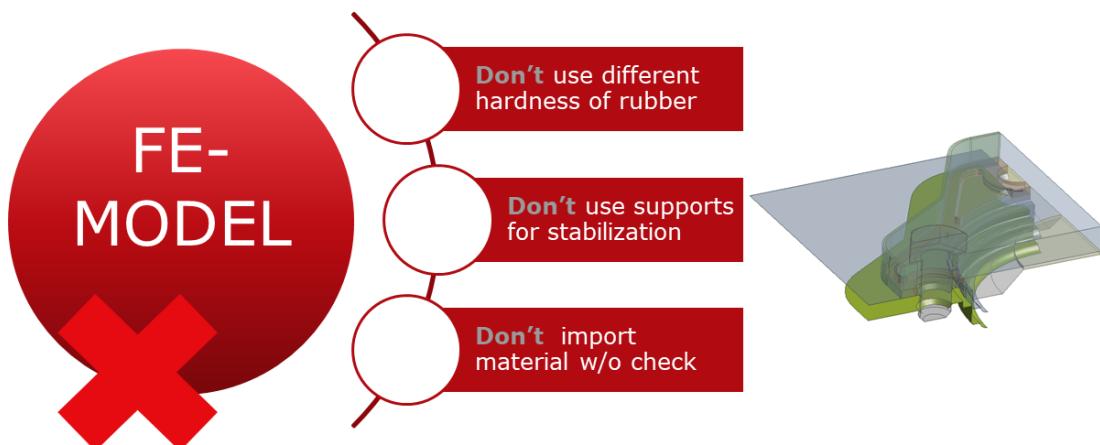
Analysis settings

Normal stiffness factor
Newton-Raphson Residual Force
Time stepping

20 | Danfoss Classified as Business ENGINEERING TOMORROW 

Additional follow-up simulation model set-up – **Tips - Don'ts**

Rubber coated covers



21 | Danfoss

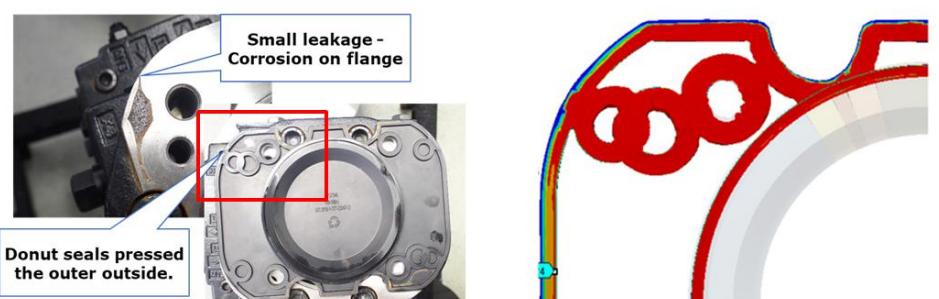
Classified as Business

ENGINEERING TOMORROW



Show case: Rubber coated cover task review (Yeoh 2nd Order)

Key is the to be focused on **contact pressure** level



22 | Danfoss

Classified as Business

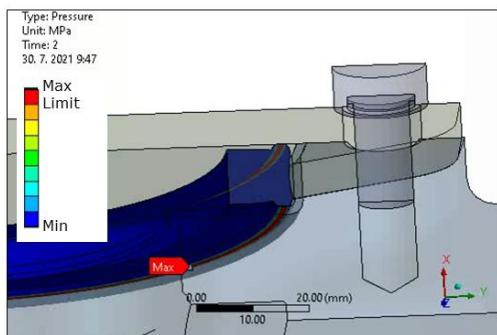
ENGINEERING TOMORROW



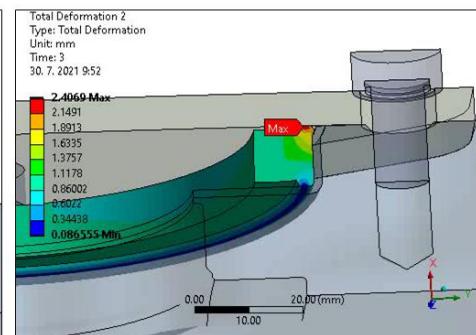
Seal ring analysis

(Yeo 2nd Order)

Contact pressure [MPa]



Total deformation [mm]



23 | Danfoss

Classified as Business

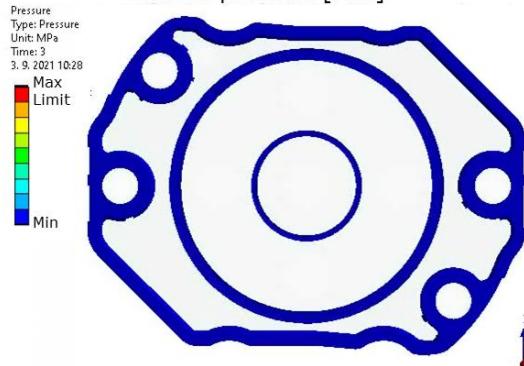
ENGINEERING TOMORROW



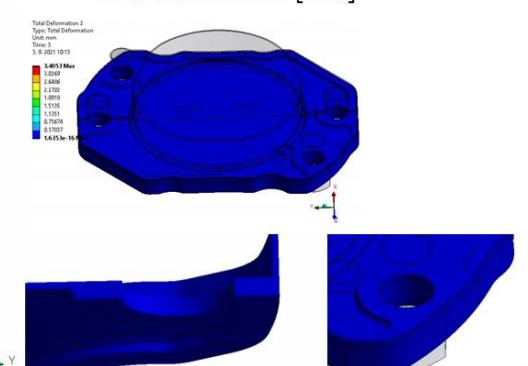
Aux pad cover with plastic ring

(Yeo 2nd Order)

Contact pressure [MPa]



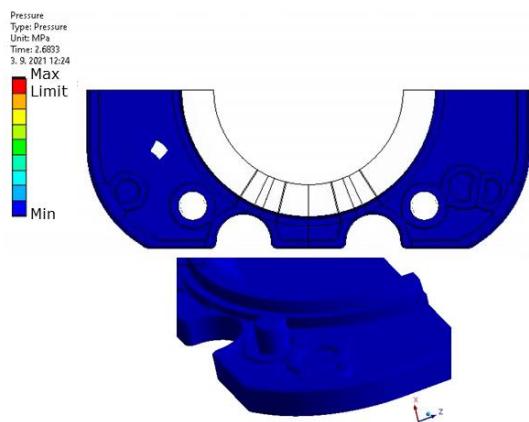
Total deformation [mm]



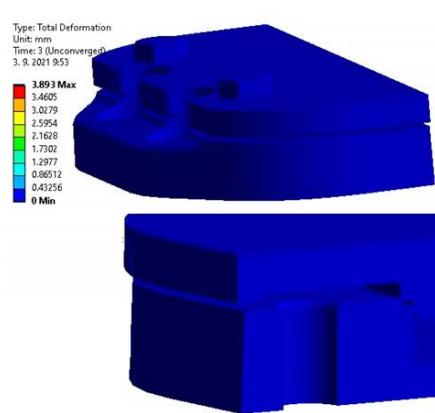
SAE-C running and shipping cover

(Yeo 2nd Order)

Contact pressure [MPa]



Total deformation [mm]



25 | Danfoss

Classified as Business

ENGINEERING TOMORROW



Verified tasks

(Yeo 2nd Order)

26 | Danfoss

Classified as Business

ENGINEERING TOMORROW



Conclusion

Tips for materials

- Correct test data from supplier or database
- Simple FEA comparison of available mathematical models.
- Check the material behavior

Tips for models

- Mixed U-P formulation
- Linear hexahedral mesh
- Set volumetric ratio
- Distributed solution can cause discontinuity of results

27 | Danfoss

Classified as Business

ENGINEERING TOMORROW



ENGINEERING
TOMORROW

LARGE OBJECTS MEASUREMENT AND FEM PRESTRESSED FOOTBRIDGE

LADISLAV KLUSÁČEK, ADAM SVOBODA, JAN KOLÁČEK, JIŘÍ BUREŠ, PETR GAJDOS, MICHAL VAJDAK

X-SIGHT, VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, FAKULTA STAVEBNÍ

WWW.DICSYSTEMS.COM

X-SIGHT T FACULTY OF CIVIL ENGINEERING institute of concrete and masonry structures PRAGUE - TROJA

In operation since 1984

2.12.2017

✓ ✗

WWW.DICSYSTEMS.COM

X-SIGHT T FACULTY OF CIVIL ENGINEERING institute of concrete and masonry structures

Large object measurement and FEM PRESTRESSED FOOTBRIDGE

21.09.2022 Ladislav KLUSACEK, Adam SVOBODA, Jan KOLACEK, Jiri BURES, Petr GAJDOS, Michal VAJDAK

[WWW.DICSYSTEMS.COM](http://www.dicsystems.com)

X-SIGHT T FACULTY OF CIVIL ENGINEERING institute of concrete and masonry structures

INSPECTION

- Visual inspection
- Geodetic leveling
- Dynamic measurement
- Semi destructive vertical probing 6x
- Chemical analysis
- Non-linear Analysis ANSYS

[WWW.DICSYSTEMS.COM](http://www.dicsystems.com)

X-SIGHT T FACULTY OF CIVIL ENGINEERING institute of concrete and masonry structures

STRENGTHENING DESIGN

Strand cable DIA 15.7 mm (150 mm^2)
Preload equal to 29 mm bridge lift-up

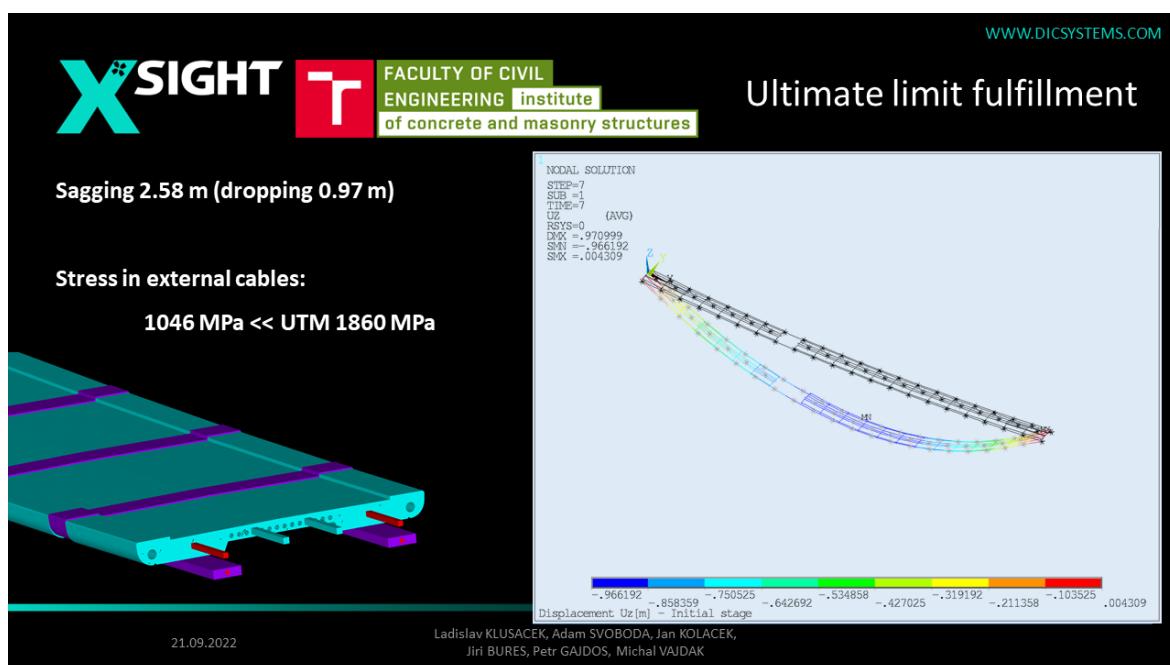
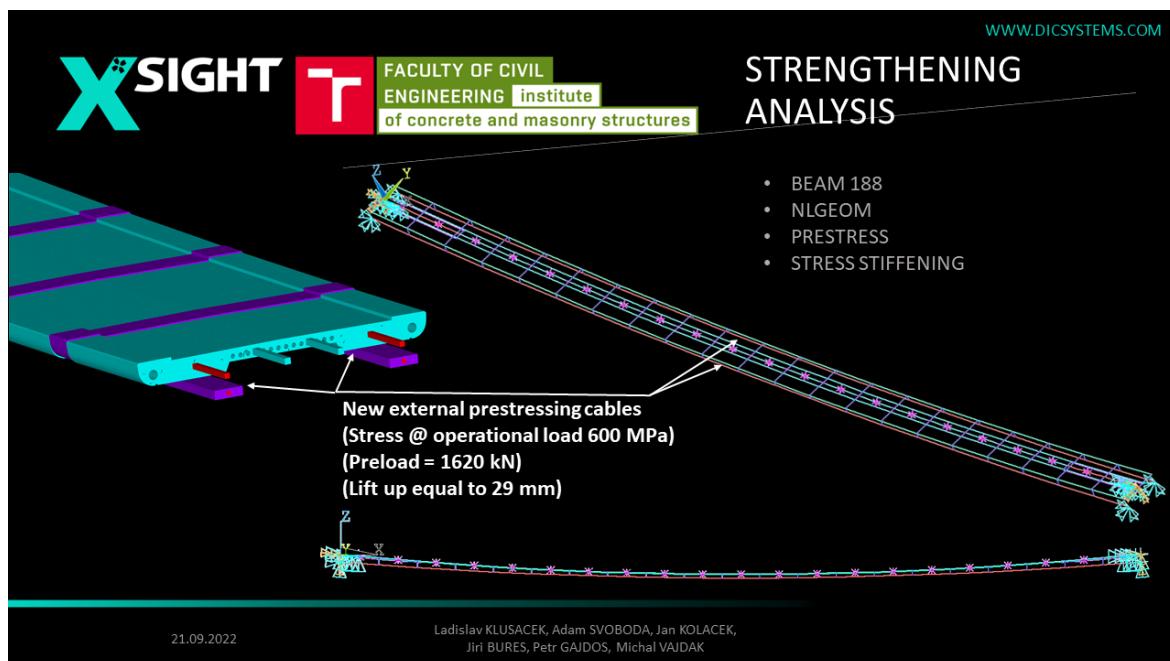
Stress @ operational load 600 MPa (UTM 1860 MPa)
Preload = 1620 kN
Capacity 3,32 kN/m²

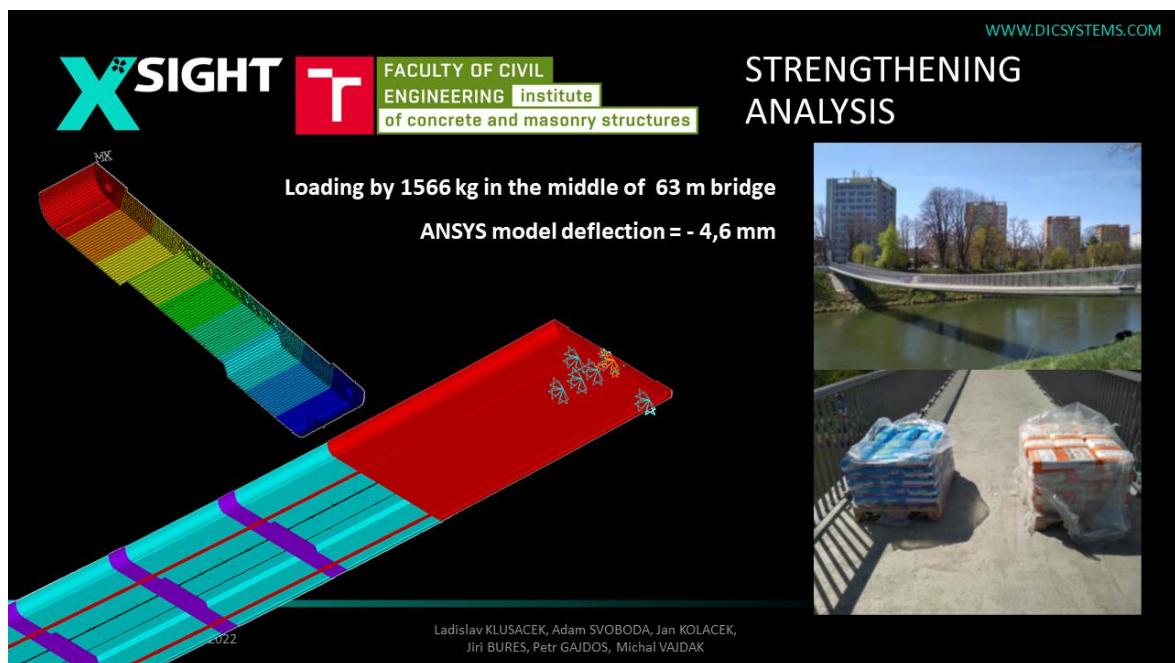
Design @1985 = 4 kN/m²
Design @1985 = 700 Mpa (UTM 1800 Mpa)

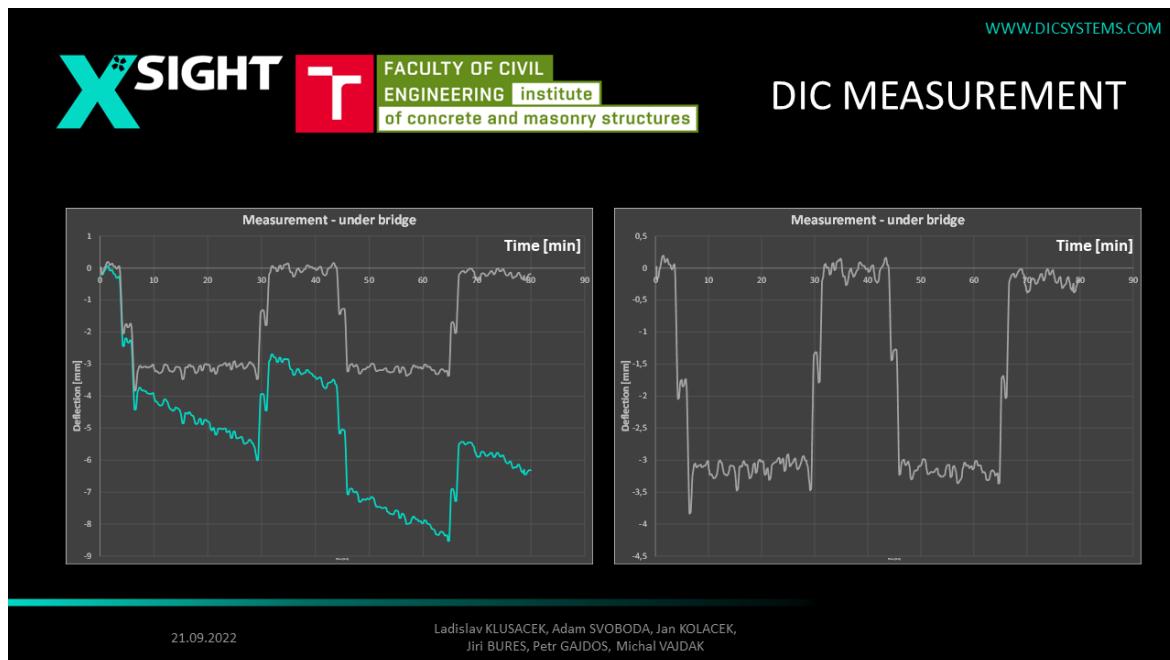
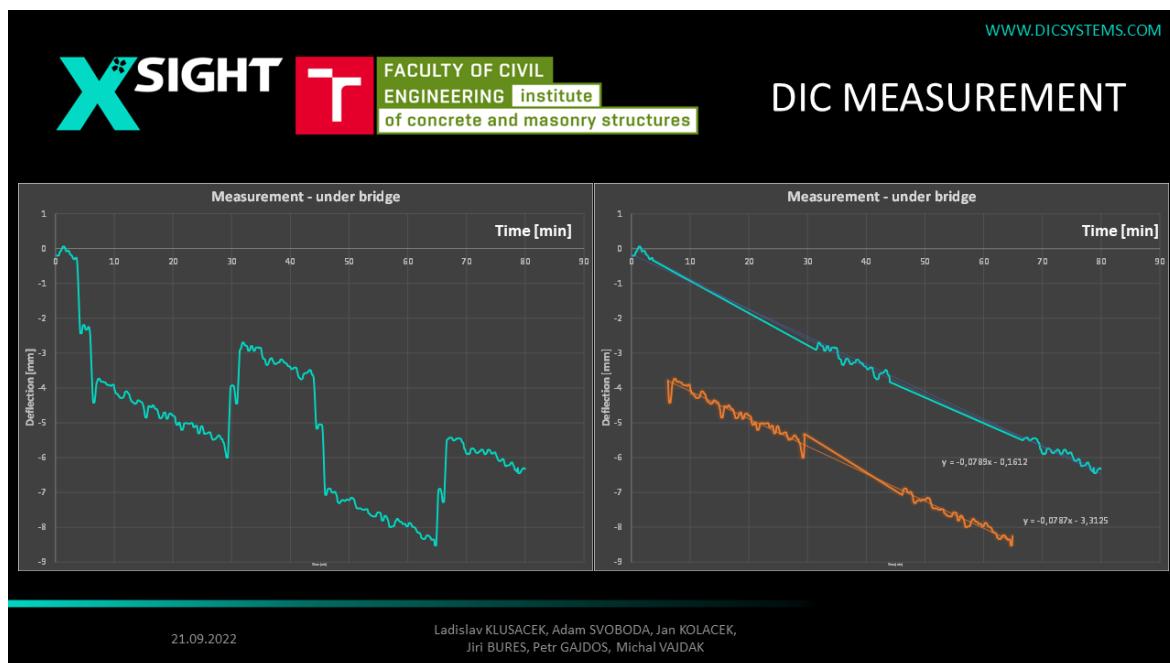
External prestressing 18 pcs

21.09.2022

Ladislav KLUSACEK, Adam SVOBODA, Jan KOLACEK,
Jiri BURES, Petr GAJDOS, Michal VAJDAK







X SIGHT T FACULTY OF CIVIL ENGINEERING institute of concrete and masonry structures

DIC MEASUREMENT GEODETIC MEASUREMENT

WWW.DICSYSTEMS.COM

1 LC = 3,087 mm [-3,15 mm]
2 LC = 3,113 mm [-3,35 mm]

1 UC = -0,016 mm [+0,1 mm]
2 UC = -0,135 mm [-0,1 mm]

One measurement per 5 minutes
A manual correction based on the previous day
Unique glass markers need to be installed

Long-term measurements (specific by removing the system and putting them back) are limited by unique targets required to be installed.

Measurement - under bridge

Deflection [mm]

Time [min]

21.09.2022

Ladislav KLUSACEK, Adam SVOBODA, Jan KOLACEK, Jiri BURES, Petr GAJDOS, Michal VAJDAK

X SIGHT T FACULTY OF CIVIL ENGINEERING institute of concrete and masonry structures

FINAL REHABILITATION CONTROL BY USING DIC

WWW.DICSYSTEMS.COM

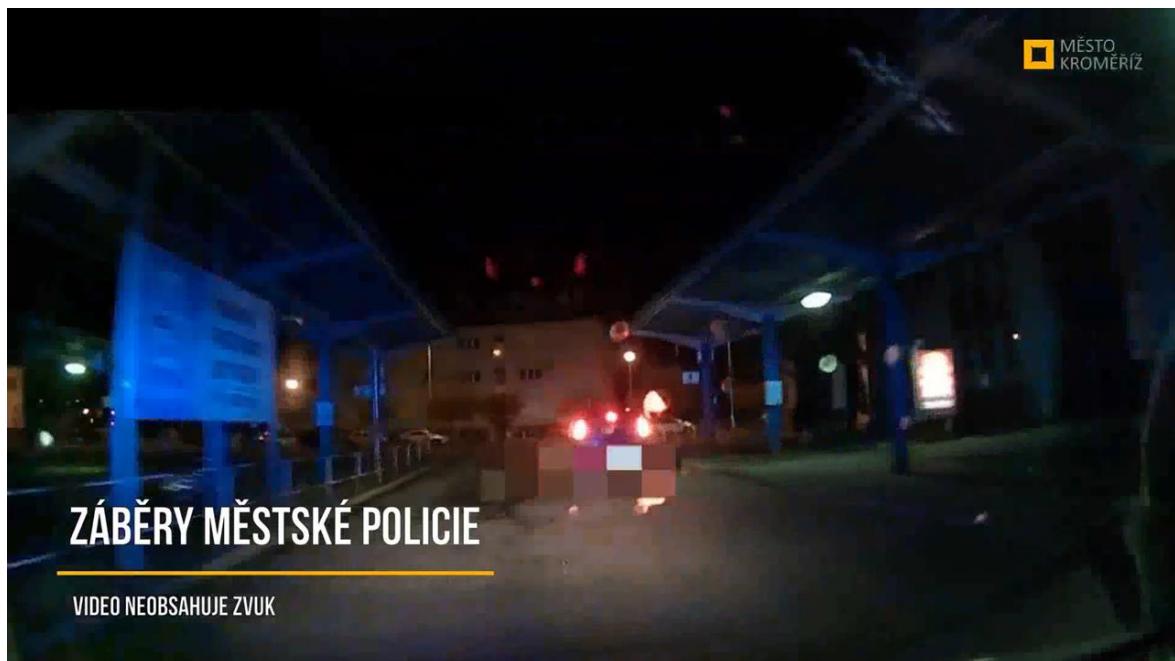
Rehabilitation price 640 kEUR @ service life 50 years

vs

New bridge price 2 600 kEUR service life 50-100 years

21.09.2022

Ladislav KLUSACEK, Adam SVOBODA, Jan KOLACEK, Jiri BURES, Petr GAJDOS, Michal VAJDAK



VIDEO NEOBSAHUJE ZVUK

X-SIGHT
SVSFEM

α ALPHA SW Release 2022 NEWS

SUMMER UPDATE
ALPHA 2022 integrates:
37 new features
88 minor improvements

1. Large Object deformation measurements
2. Enhanced performance of recording
3. Probe functionality enhancements
4. Poisson's Ratio by ASTM, ISO, DIN

UPDATE POLICY:
The process of ALPHA development follows the company's R&D plan. Every customer can participate by suggestions to our technical support at tecs@xsight.eu or direct discussion with X-Sight company representatives.

21.09.2022

WWW.DICSYSTEMS.COM

WWW.DICSYSTEMS.COM

X SIGHT
SVSFEM

SUMMER UPDATE

α ALPHA SW Release 2022 NEWS

1. Large Object deformation measurements

3D Composite Calibration allows the measuring of large objects such as bridges, towers, and high scale experiments.

21.09.2022

WWW.DICSYSTEMS.COM

X SIGHT
SVSFEM

SUMMER UPDATE

α ALPHA SW Release 2022 NEWS

1. Large Object deformation measurements

3D Composite Calibration allows set-up separately:

- Camera model
- Lenses distortion
- L/R camera pose

| Camera model (Focal Length & Principal point location) | Lenses distortions (Barrel and Pincushion coefficients) | L/R pose (Rotation matrix & Translation vector) |
|---|--|--|
| | Pincushion Distortion | Barrel Distortion |
| | | |

WWW.DICSYSTEMS.COM

X SIGHT

SVSFEM

α ALPHA SW Release 2022 NEWS SUMMER UPDATE

1. Large Object deformation measurements

Any recorded camera image pair can be used for 3D system recalibration and adjustment of the coordinate system.

Detect Pose: match the left and right camera

Scale factor and coordinate system needs to be defined

WWW.DICSYSTEMS.COM

X SIGHT

SVSFEM

α ALPHA SW Release 2022 NEWS SUMMER UPDATE

1. Large Object deformation measurements

21.09.2022

X SIGHT
SVS FEM

SUMMER UPDATE α ALPHA SW Release 2022 NEWS

2. Enhanced performance of recording
 3. Probe functionality enhancements
 4. Poisson's Ratio by ASTM, ISO, DIN

The recording FPS can be set independently from the camera/computation FPS. This is useful to reduce the amount of recorded data for slow processes.

Pre-Trigger functionality allows the recording of camera images before the trigger event occurs.

21.09.2022

X SIGHT
SVS FEM

SUMMER UPDATE α ALPHA SW Release 2022 NEWS

2. Enhanced performance of recording
 3. Probe functionality enhancements
 4. Poisson's Ratio by ASTM, ISO, DIN

"Triggered Recording Mode" for conditional recording over time allows switching between two modes of recordings based on the numerical condition of the chosen measured value.

The function allows to "record faster if something happens" or "record only if something happens" (in case the primary recording FPS is set to zero).

RECORD
Next

Recording Mode: Post-Process
PP
599GB @ 0.4MB/s = 99h 48m
Recording FPS: 0.2
Saving Buffer:

21.09.2022

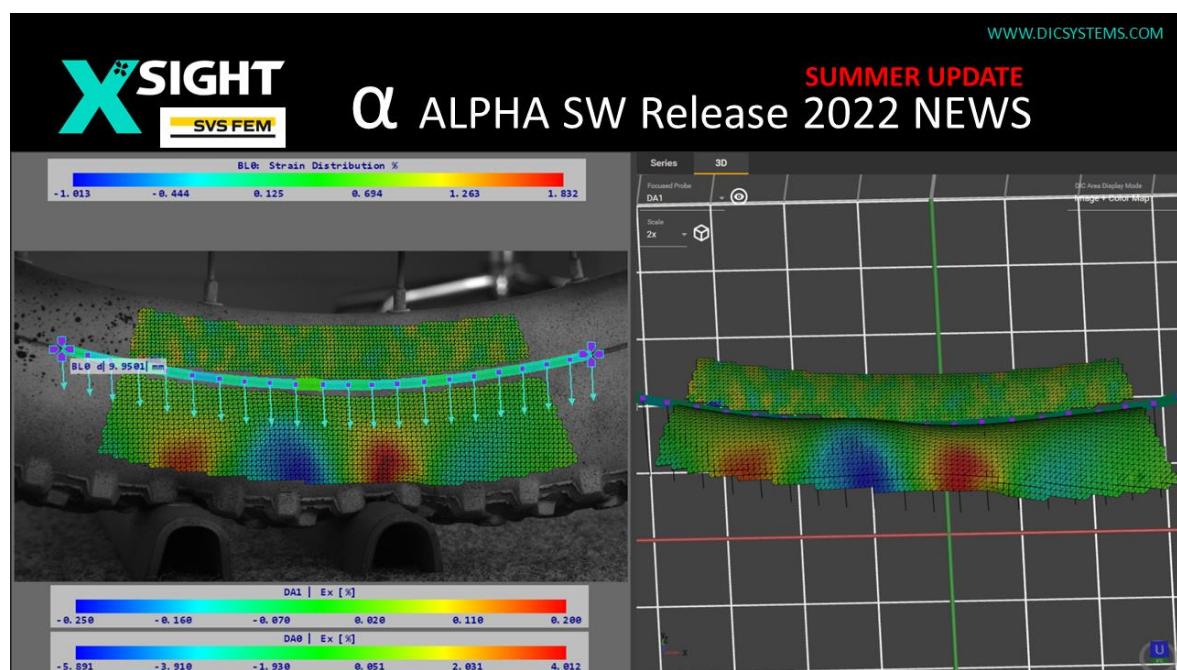
WWW.DICSYSTEMS.COM

X SIGHT
SVS FEM

α ALPHA SW Release 2022 NEWS SUMMER UPDATE

3. Probe functionality enhancements
4. Poisson's Ratio by ASTM, ISO, DIN

Improvement of the DIC Area by setting a physical mesh step size instead of the pixel size.
DIC Area now reflects the real size of the measured surface with respect to the required mesh element size.



X SIGHT SVS FEM

α ALPHA SW Release 2022 NEWS
SUMMER UPDATE

4. Poisson's Ratio by ASTM, ISO, DIN

The Alpha Software has implemented real-time Poisson's ratio measurement method.

- Using the curve fitting method ALPHA reaches a highly accurate Poisson's measurement
- Even with a 2D system
- Evaluation is according to most of the standards (ISO 527, ASTM D638, ISO 10113, ASTM E517...)

21.09.2022



X SIGHT SVS FEM

α ALPHA SW Release 2022 NEWS
SUMMER UPDATE

4. Poisson's Ratio by ASTM, ISO, DIN

- With using the Trans Line probe

Trans Line

Offers a multi-positional transversal measurement with averaged and max/min width functions.



Advanced

| | |
|---|----------------------------|
| <input checked="" type="checkbox"/> Poisson's Ratio | [button] |
| <input type="checkbox"/> R-Value | [button] |
| Abs Lower Strain Threshold 0.05 | % [button] + [button] - |
| Abs Upper Strain Threshold 0.2 | % [button] + [button] - |
| Smoothing Window Size [fr/ 100 frames] | [button] + [button] - |

- High framerate at elastic part of deformation recommended

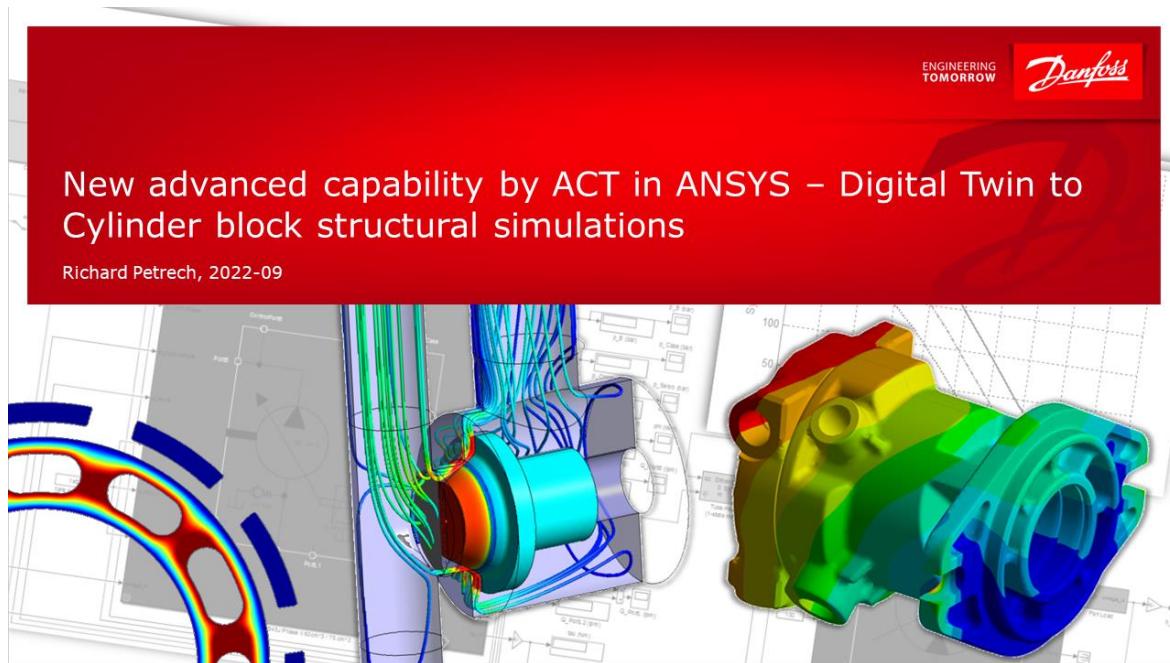
21.09.2022



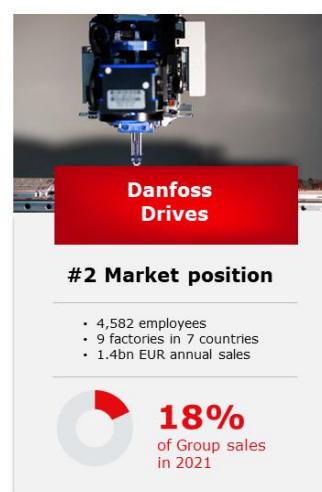
NEW ADVANCED CAPABILITY BY ACT IN ANSYS - DIGITAL TWIN TO CYLINDER BLOCK STRUCTURAL SIMULATIONS

RICHARD PETRECH

DANFOSS POWER SOLUTIONS



Our Segments



* In 2021 – including five months of legacy Eaton Hydraulics sales

Our customer promise is as relevant as ever and drives our competitive advantage



3 | Danfoss Power Solutions – Global RD&E – Centers of Excellence - CFSN

Classified as Public

ENGINEERING TOMORROW



Danfoss Power Solutions a.s. in Povazska Bystrica

Start of operation in Slovakia

- 1995 Sauer-Mechanika a.s. Považská Bystrica
- 1996 Sauer-ZTS a.s. Dubnica nad Váhom
- 2004 Sauer-Danfoss a.s.
- 2013 **Danfoss Power Solutions a.s.**
- 2015 Consolidation into one plant in Povazska Bystrica

2022

| | |
|----------------------------|-----|
| Number of employees | 829 |
| Engineers | 80 |
| EUSC | 123 |



4 | Danfoss Power Solutions – Global RD&E – Centers of Excellence - CFSN

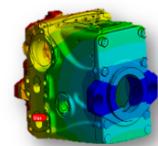
Classified as Public

ENGINEERING TOMORROW



Simulation Engineering in Považská Bystrica (PX)

Leader: Ing. Michal Masny, PhD.



10 ...structural simulation engineers in Slovakia – Považská Bystrica

Centralized global simulation support of whole segment of **Power Solutions** in:



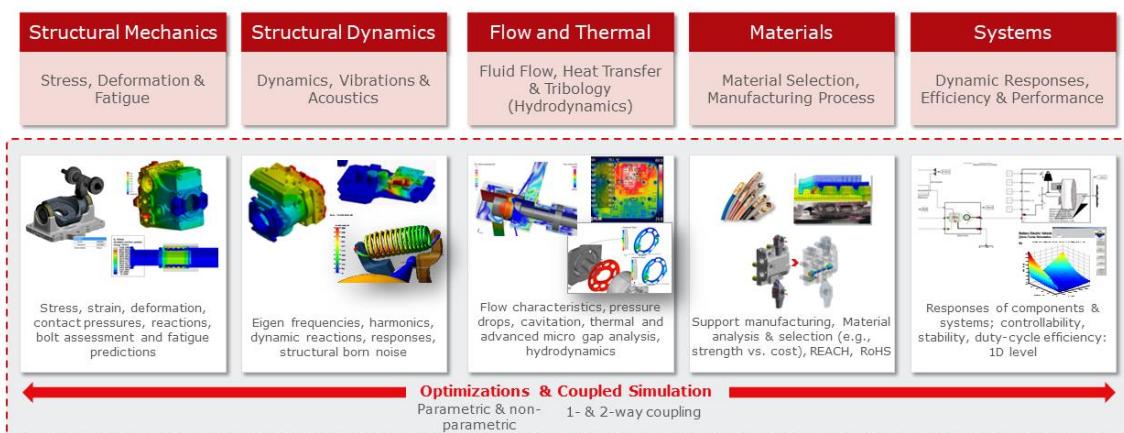
- R&D (New product development and Technology projects),
- current product portfolio

under global organization – „**Center of Excellence**“ / Center for Simulations and NVH (CfSN).

5 | Danfoss Power Solutions – Global RD&E – Centers of Excellence – CfSN
Classified as Public

ENGINEERING TOMORROW

CfSN – Simulation Capabilities



Toolsets

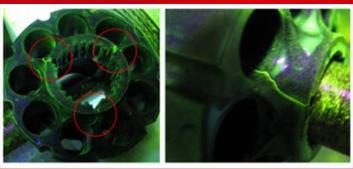
6 | Danfoss Power Solutions – Global RD&E – Centers of Excellence – CfSN
Classified as Public

ENGINEERING TOMORROW

ENGINEERING
TOMORROW 

New advanced capability – Digital Twin to Cylinder block simulations

Flexibility for Speed
Digital twin of test for CB+HUB+Shaft assembly

Case of an hydrostatics swashplate design **pump** Case of an hydrostatics swashplate design **motor**

Snapshot



The Need!!!

Designing a kit assembly to sustain the required cyclic loading in application based on requirement



Methodology

A systematic methodology to predict fatigue damage based on given duty cycle



Case-study

Ongoing validation of methodology on first real examples

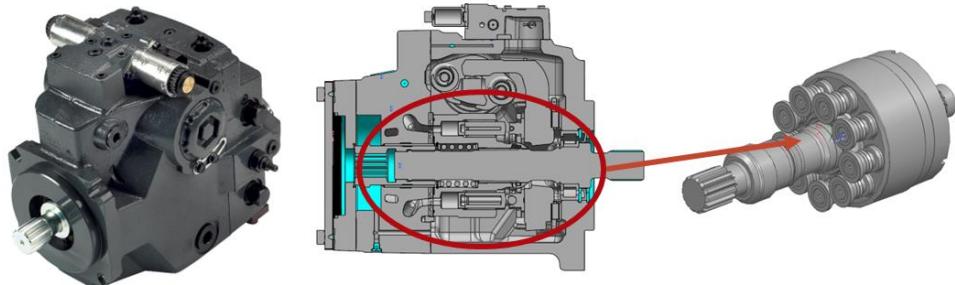


Impact

- 'Analysis first' approach to drive decisions right from concept phase leading to cost & time saving
- Scalability to include all sizes and various applications of hydrostatic pumps & motors

Problem description

- The heart of axial piston pump is the rotating KIT: Pistons, Slippers, Cylinder block connected with shaft by splining.
- Splining connection of the cylinder block and shaft is undergoing cyclic loading



9 | Danfoss Power Solutions - Global RD&E - Centers of Excellence - CFSN

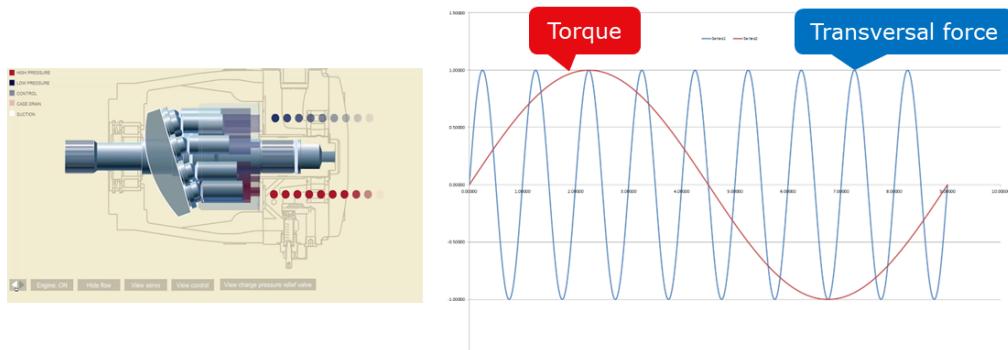
Classified as Public

ENGINEERING TOMORROW



Problem description

- The standard approach to cycling fatigue with maximum and minimum load is not suitable for the combined loadings:



10 | Danfoss Power Solutions - Global RD&E - Centers of Excellence - CFSN

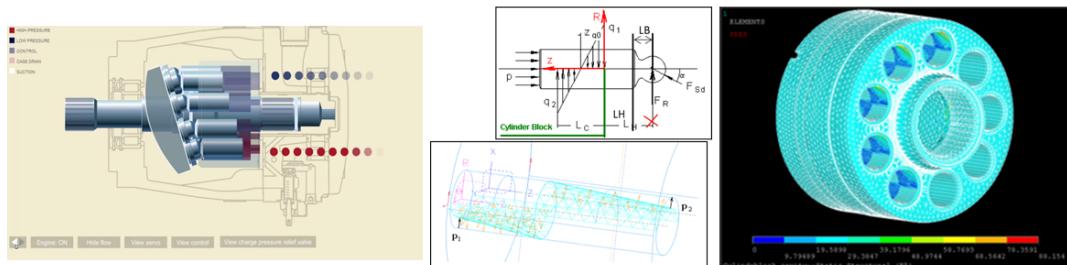
Classified as Public

ENGINEERING TOMORROW



Problem description

- Load from pressure is recalculated to axial and radial forces acting on pistons
- Interaction between pistons and cylinder block is substituted by contact pressures between the two



Problem description

36 steps to simulate one reversal

- 18 steps of solution are needed for one revolution, so together **36 steps to simulate one reversal**

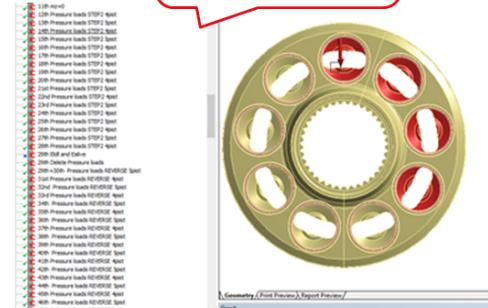
Tons of manual work

- Each step needs its own commands to generate load
- **162 coordinate systems** have to be defined for the pressure distributed load definition

Waste of simulation resources

- **48 hour pre-processing**
- 33 hours comp. time on 12 cores

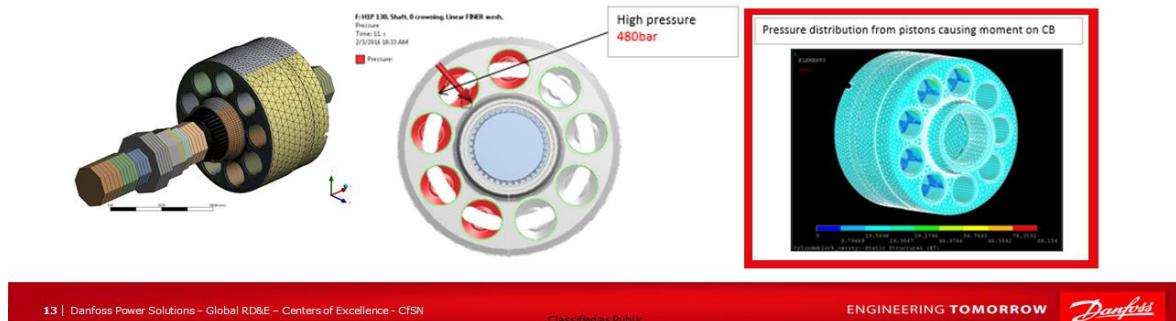
Too much portion
of model build up
>50%



Problem statements summary & aspiration

- One **static position** of kit **was simulated** in past (no revolution based loads/simulation)
- Simulation of kit was **time consuming for preprocessing** of loading
- Transition to **fatigue** calculation require to keep the exact same mesh
- **Radial forces** loads and **torque** loads have **different frequencies**
- The **Fatigue calculation** was **not feasible before**

→ How we can proceed?



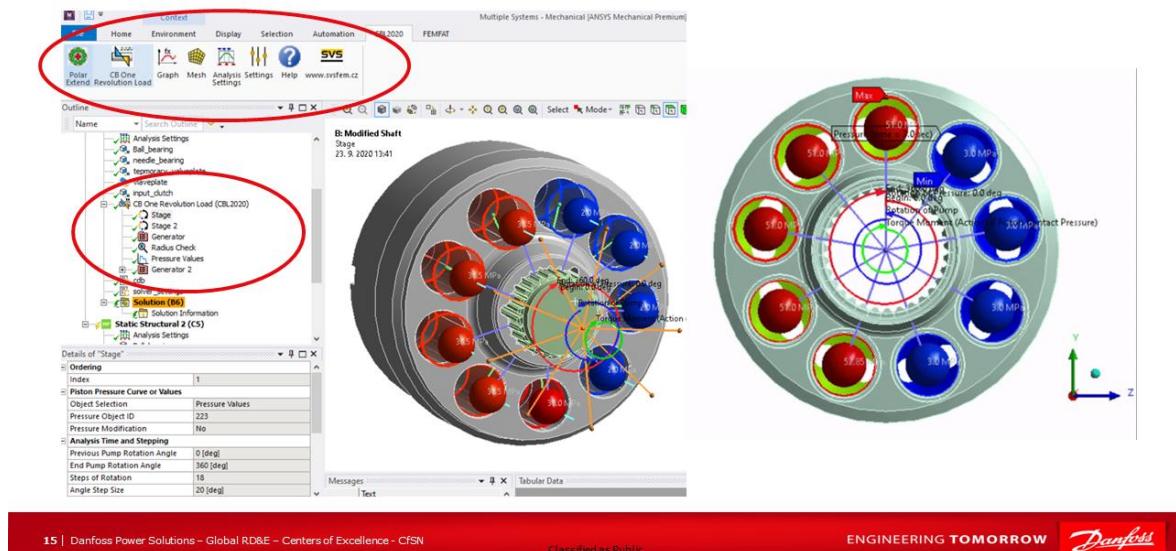
How to make it efficient and add value

- Feasibility check
- In-house approval
- Three months development – both way cooperation → **Extension inside ANSYS "CBL"**



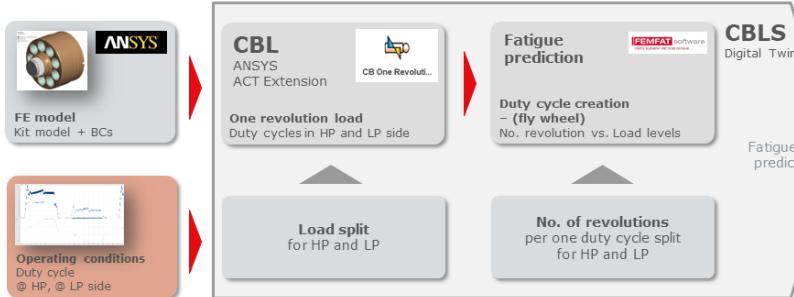
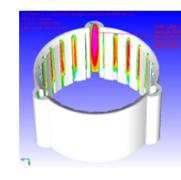
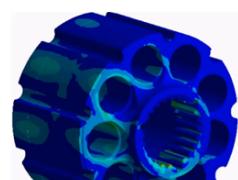
How the CBL works?

New modeling features and Workflow guide in help



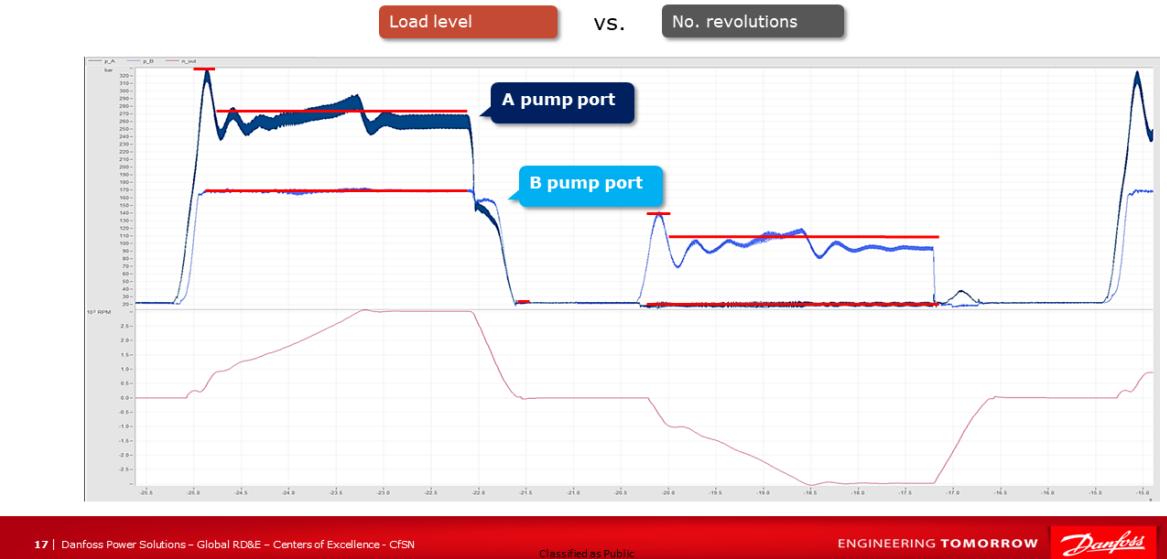
„Twin“ to real test Flywheel Swashplate design's kits

Stress level over the revolution



Note: CBL = Cylinder Block Loading ACT extension

Loads and revolutions split



17 | Danfoss Power Solutions - Global RD&E - Centers of Excellence - CFSN

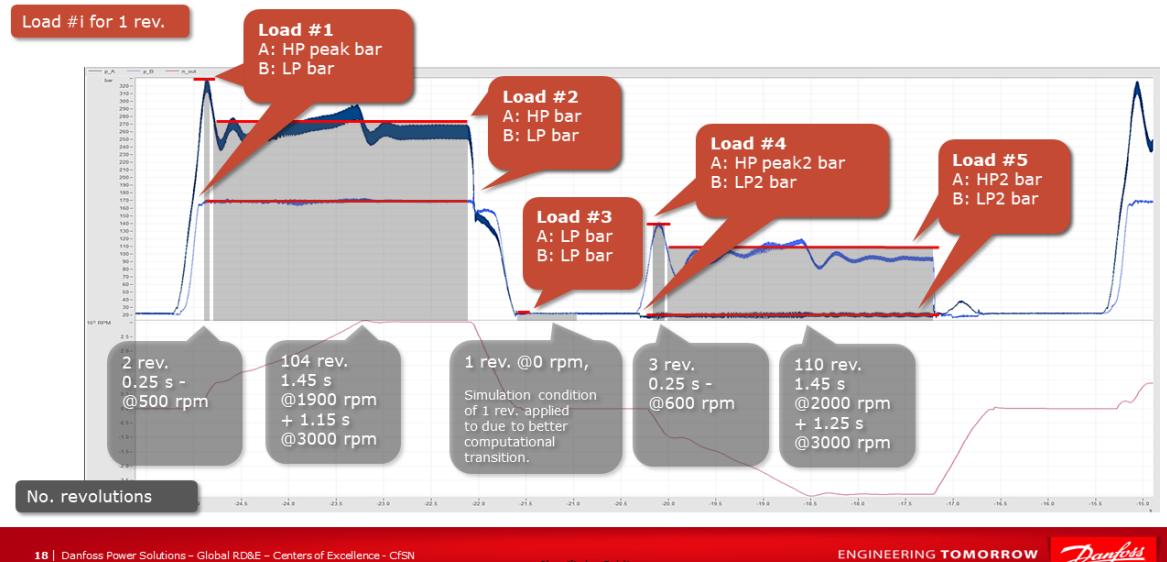
Classified as Public

ENGINEERING TOMORROW



Loads and revolutions split

220 revolutions
in total



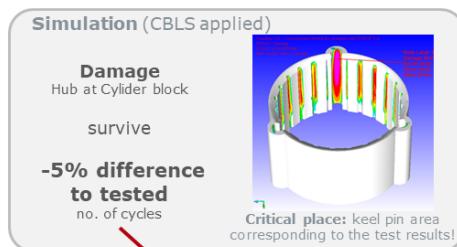
18 | Danfoss Power Solutions - Global RD&E - Centers of Excellence - CFSN

Classified as Public

ENGINEERING TOMORROW



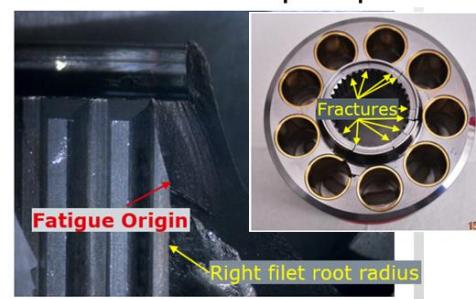
A fixed motor



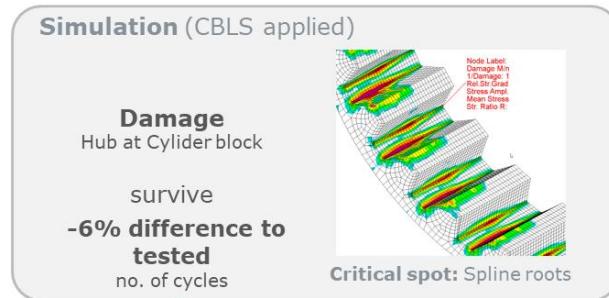
| Test No. | Displacement [cc/rev] | Pressure cycle [bar] | Summing pressure [bar] | Speed [rpm] | Failed cycle | Target cycle | Application |
|-----------------|-----------------------|--|------------------------|-------------|--------------|--------------|-------------|
| 1 st | 24 | 380 / 170 \Leftrightarrow 170 / 380 (over load!) | 550 | 3000 | | | |
| 2 nd | 24 | 380 / 170 \Leftrightarrow 20 / 170 | 550 | 3000 | | | |
| 3 rd | 24 | 330 / 170 \Leftrightarrow 20 / 170 | 500 | 3000 | reference | | General |
| 4 th | 20 | 390 / 150 330 / 110 | 540 440 | 800 | | | |

19 | Danfoss Power Solutions – Global RD&E – Centers of Excellence - CFSN Classified as Public ENGINEERING TOMORROW

A closed circuit pump



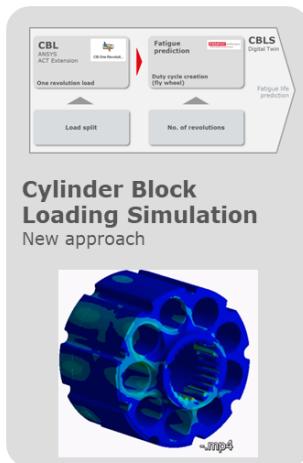
- Each fatigue crack originated at the spline's right fillet root radius near the top of the hub.



| Case | Design | Load HP [bar] | Load LP [bar] | No. cycles to damage [rev.] | Comment |
|------|-----------------------|---------------|---------------|-----------------------------|---|
| 1 | Test flat root 0.2 mm | 580 | 30 | reference | Steady state test Result = average no. cycles from 6 tests |

20 | Danfoss Power Solutions – Global RD&E – Centers of Excellence - CFSN Classified as Public ENGINEERING TOMORROW

Conclusion



Fatigue life prediction – differentiator

Added value - Features, Model adaptability, Ease of use and model check, visual error proofing

As a common (highly demanded tool) to applied for designing HUB/kits, splines

- Used in e.g. H1P pumps, MP1 pumps and motors, BMVT series, T90 series

Speed up in concept development phase

- Virtual tests - steady state and flywheel

Time saving → 30-50% faster than old manual approach



**ENGINEERING
TOMORROW**

Time saving vs test (in values)

Model build up and Sim: 6 days

FE model build up: **3 days** (initial model)

FEA computation of loads: depends on no. load sets (one set = 18 hours)

Fatigue computation: **6 hours**

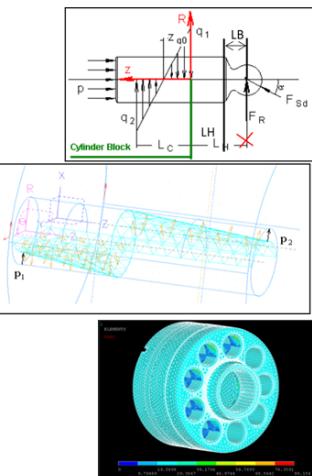
vs.

Real flywheel test of one product: 3x units in sequentially, 5 man*days, total time of measures ~ weeks



Problem description

- Model build up for loading cycle
- Radial and axial force on piston is calculated based on geometry, swashplate angle and system pressure
- Pressure distribution between piston and cylinder block is derived from the radial load
- Pressure distribution is calculated for each piston based on cylinder block position and piston position with respect to cylinder block
- The pressure distribution is defined by a macro in FEA model
- To check the correctness of loading, every time the moment reaction around axis of rotation and sum of all transversal forces have to be evaluated



DPS / Global RD&E / Center of Excellence / **Center for Simulation and Noise (CfSN)**



Richard Petrech
Simulation engineer
rpetrech@danfoss.com

Education
Department of application mechanics
Slovak University of Technology – 2007

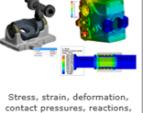
Experience
Total Years of Experience : 15 Years
Danfoss Experience : 15 Years

Interests – Technical
Multi Body Dynamics and vibration
Fatigue analyses

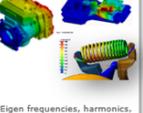
Interests – Personal
Nightscape photography, hiking & travel,
Sports

Simulation Capabilities of CfSN

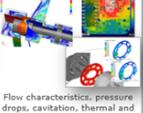
| Structural Mechanics | Structural Dynamics | Flow and Thermal | Materials | Systems |
|-------------------------------|----------------------------------|---|---|---|
| Stress, Deformation & Fatigue | Dynamics, Vibrations & Acoustics | Fluid Flow, Heat Transfer & Tribology (Hydrodynamics) | Material Selection, Manufacturing Process | Dynamic Responses, Efficiency & Performance |



Stress, strain, deformation, contact pressures, reactions, bolt assessment and fatigue predictions



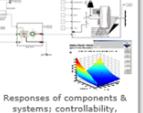
Eigen frequencies, harmonics, dynamic reactions, responses, structural born noise



Flow characteristics, pressure drops, cavitation, thermal and advanced micro gap analysis, hydrodynamics



Support manufacturing, Material analysis & selection (e.g., strength vs. cost), REACH, RoHS



Responses of components & systems: controllability, stability, duty-cycle efficiency: 1D level

Optimizations & Coupled Simulation
Parametric & non-parametric 1- & 2-way coupling

Toolsets

25 | Danfoss Power Solutions - Global RD&E – Centers of Excellence - CfSN
Classified as Public

ENGINEERING TOMORROW 

Agenda
2022 ANSYS users meeting
New advanced capability – Digital Twin to rotating kit – Axial piston SWP design pumps

- Problem description of OLD approach
- New approach – how it works intro
- Simulation prove cases
- Conclusion

STRESS-STRAIN ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF VARIOUS TOTAL KNEE ENDOPROSTHESES ON TIBIAL BONE TISSUES

X-SIGHT, VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

X-SIGHT
www.xsight.eu

Stress-strain analysis of the influence of various total knee endoprostheses on tibial bone tissues

FAKULTA
STROJNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

SVS FEM

X-SIGHT
www.xsight.eu

Total knee endoprostheses

- Zimmer Biomet NexGen CR
- Different designs of the tibial component
- Common femoral component

Femoral component

Polyethylene insert

Tibial component

All-polyethylene TKA

Metal-backed TKA

FAKULTA
STROJNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

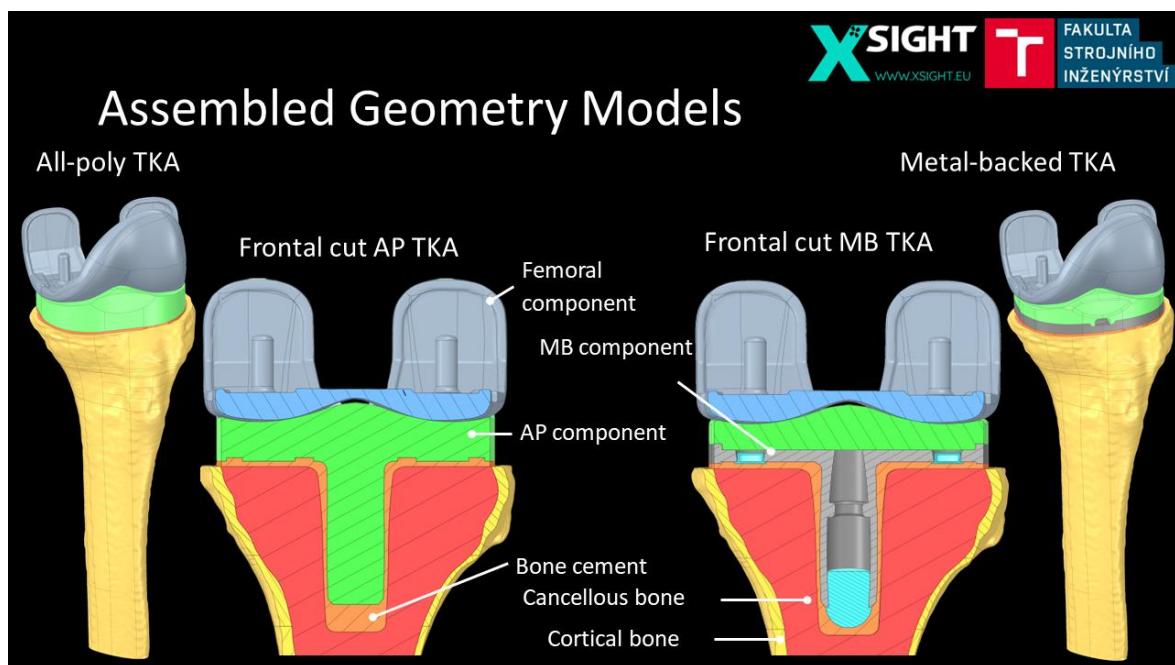
Solution – Models of Geometry

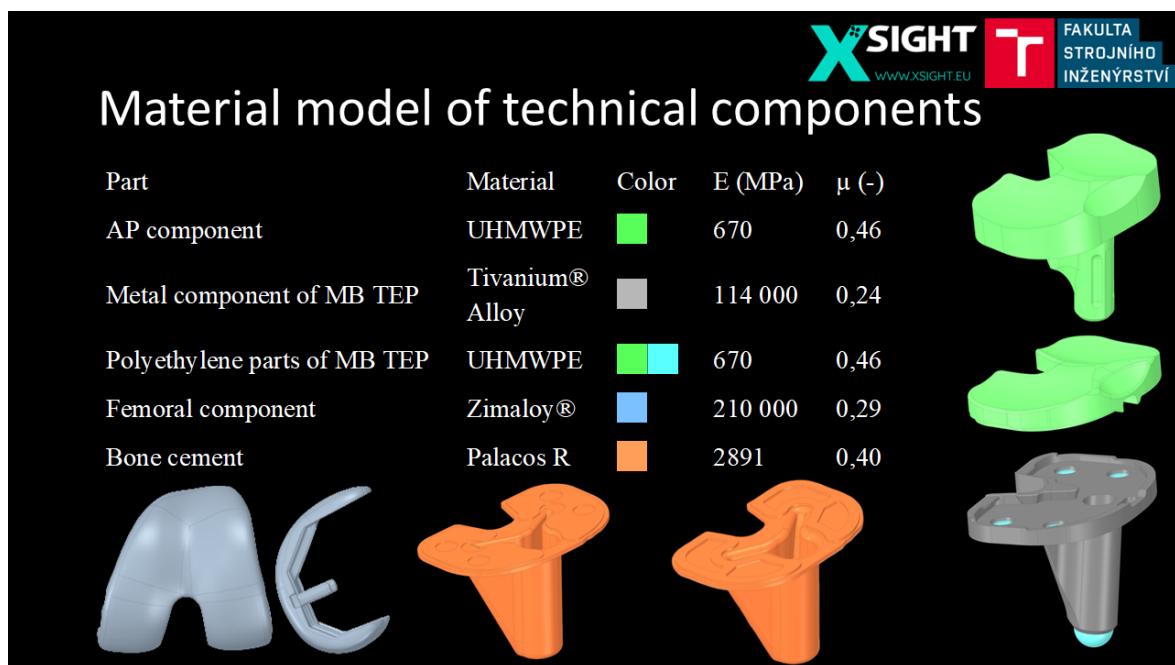
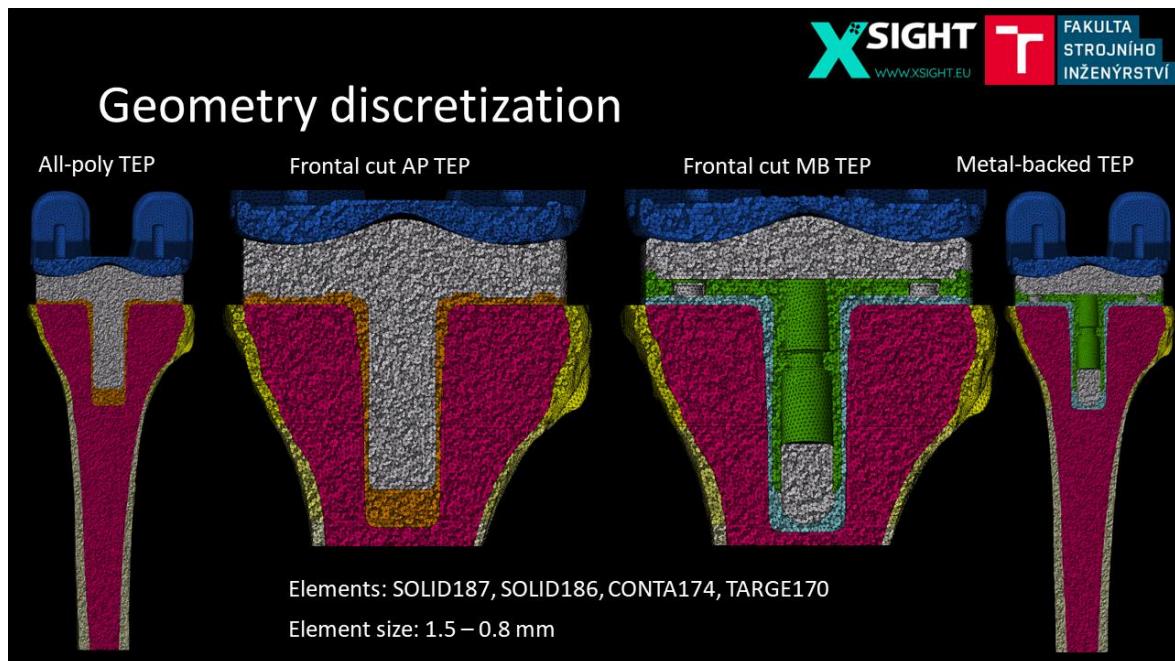
• Creation of geometry models of technical components using a 3D scanner (Hardware: Shining3D EinScan SE – 3D scanner with structured light, Software: ANSYS SpaceClaim)

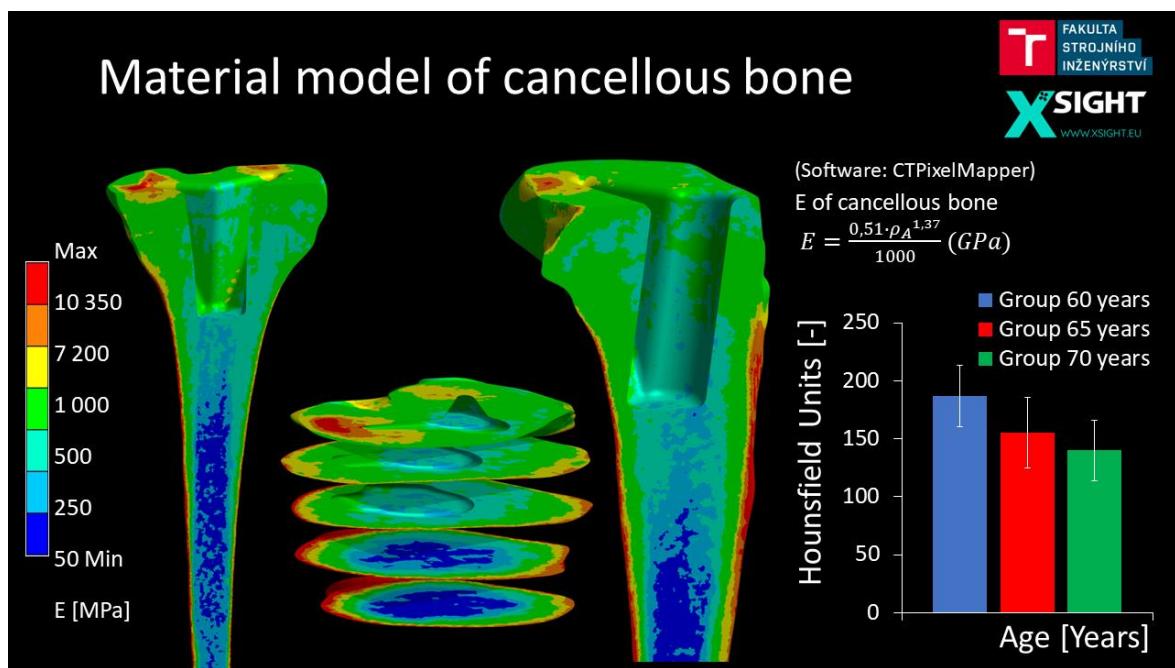
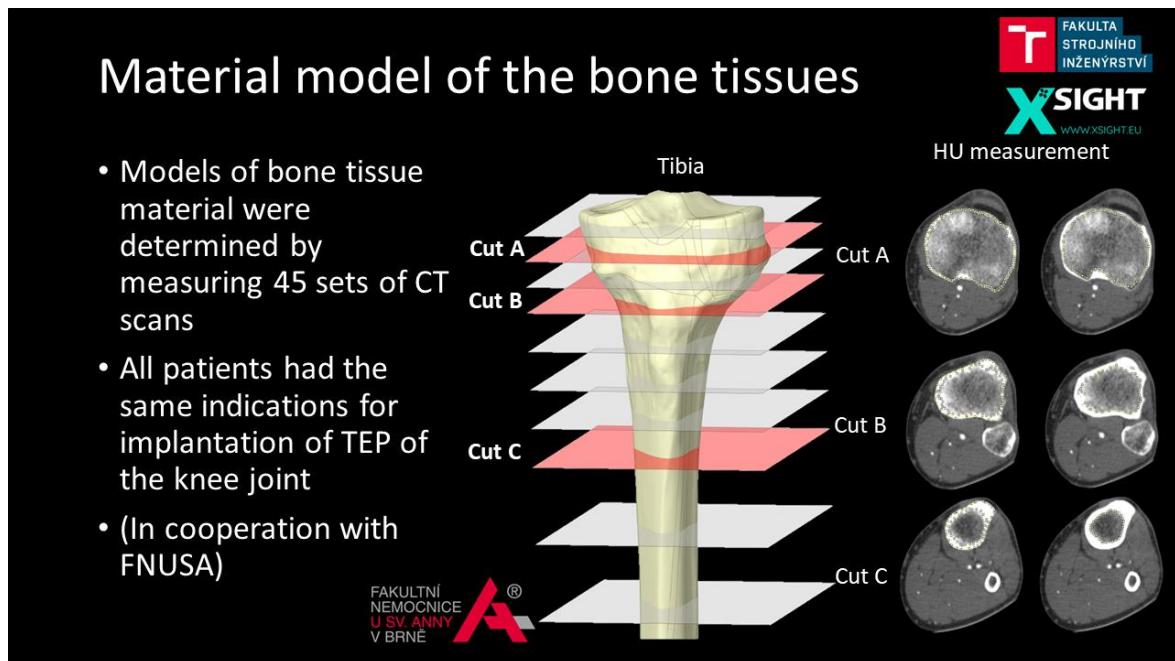
• Creation of models of the geometry of cortical and cancellous bone tissue of the tibia from CT images (Software: STL Model Creator, MATLAB, ANSYS SpaceClaim)

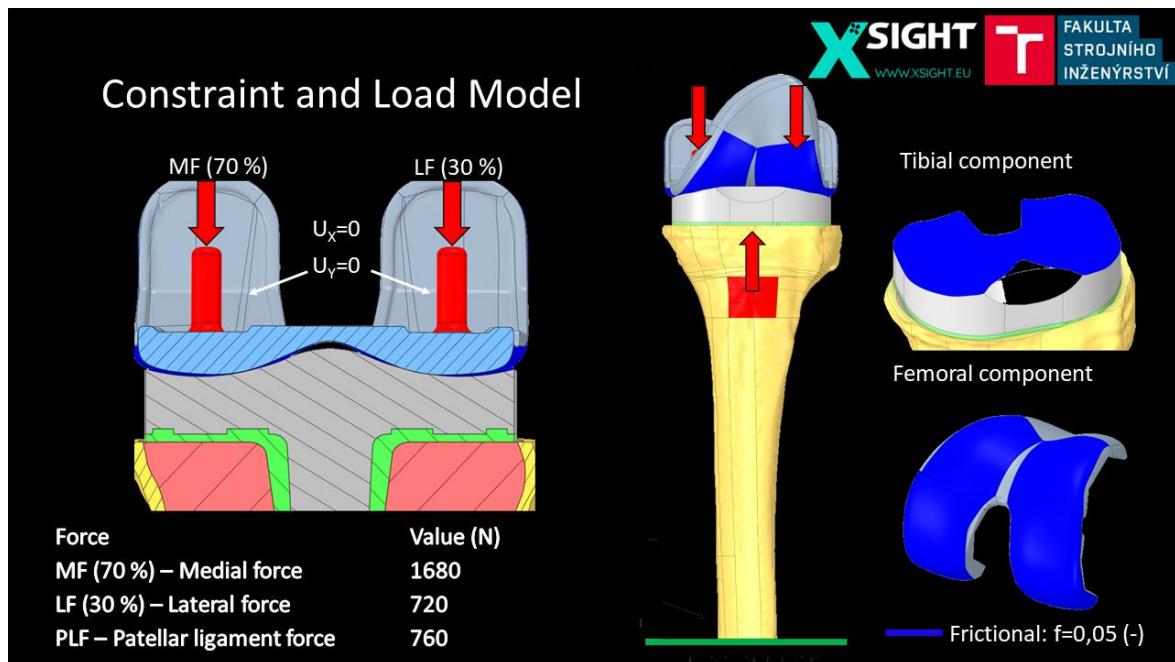
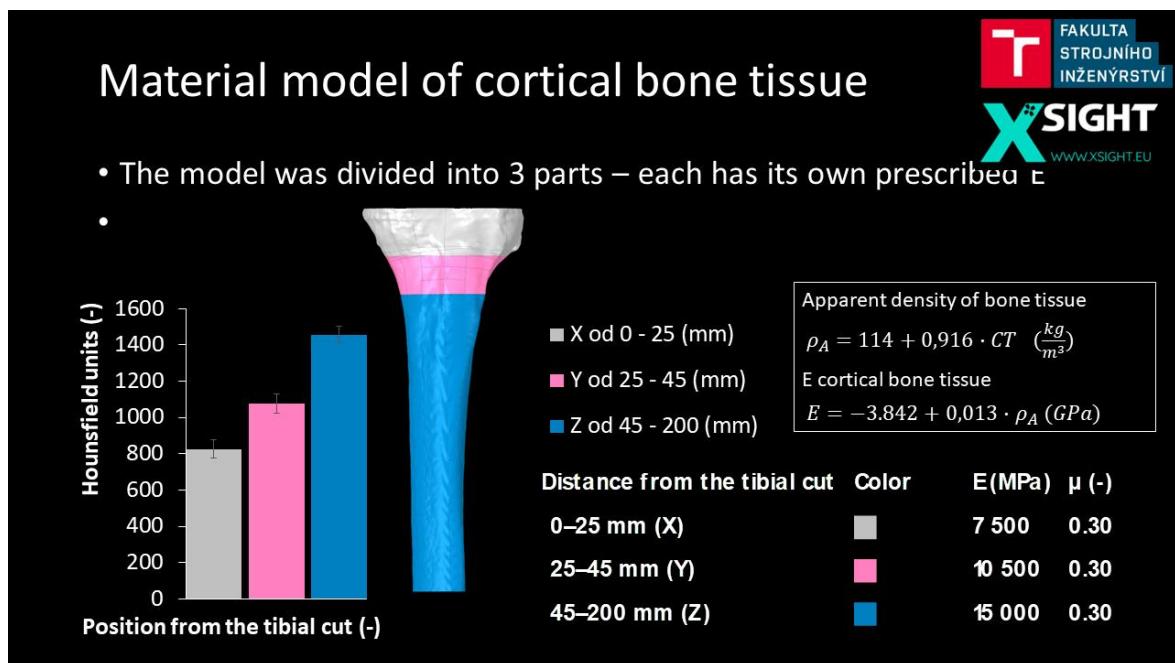
X-SIGHT www.xsight.eu

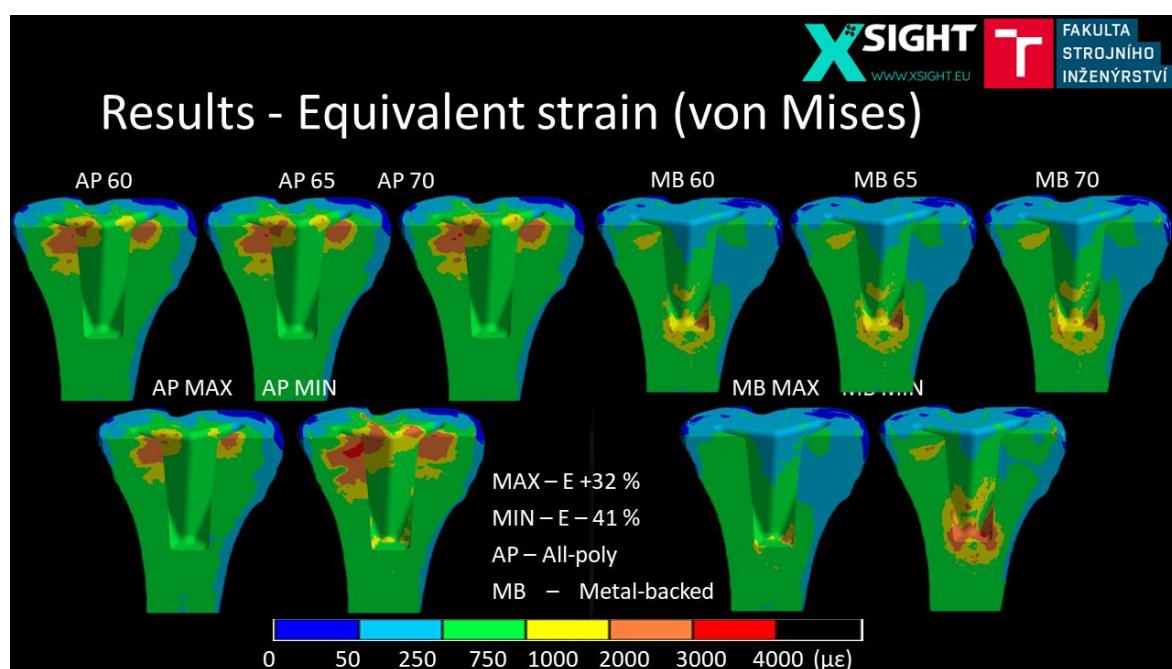
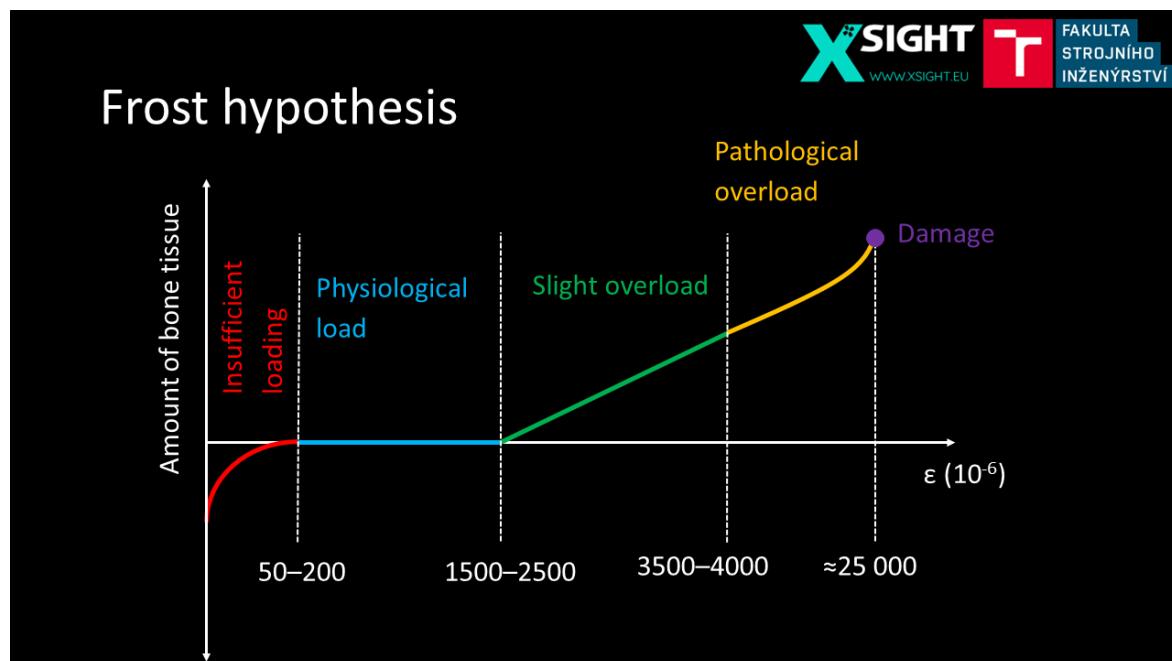
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

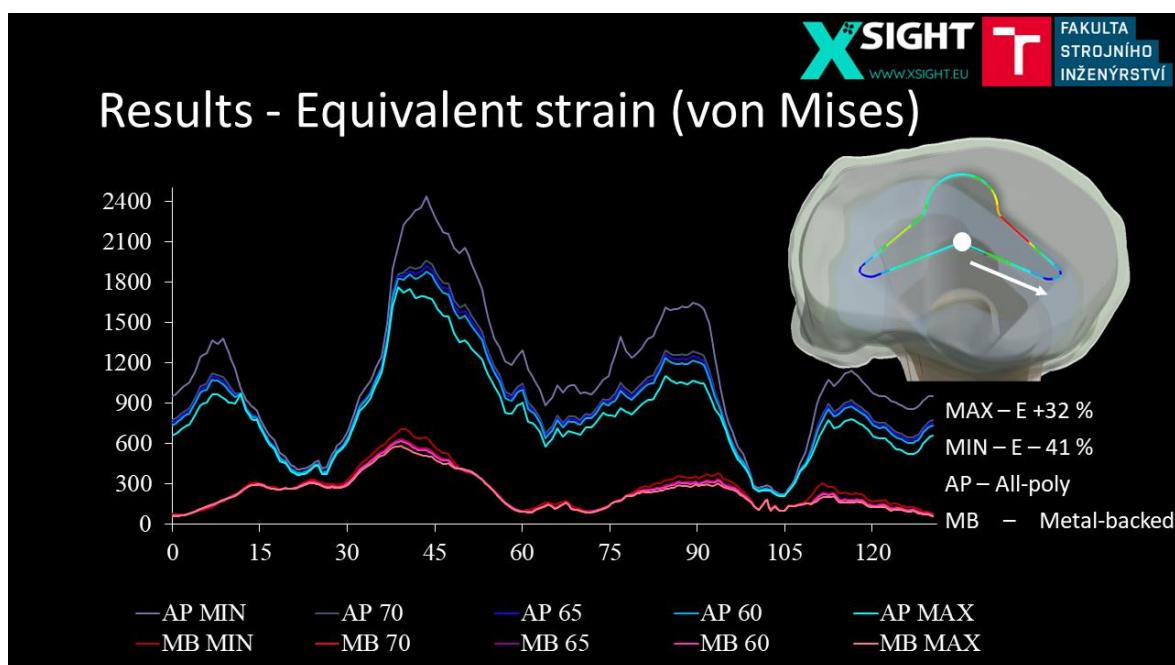
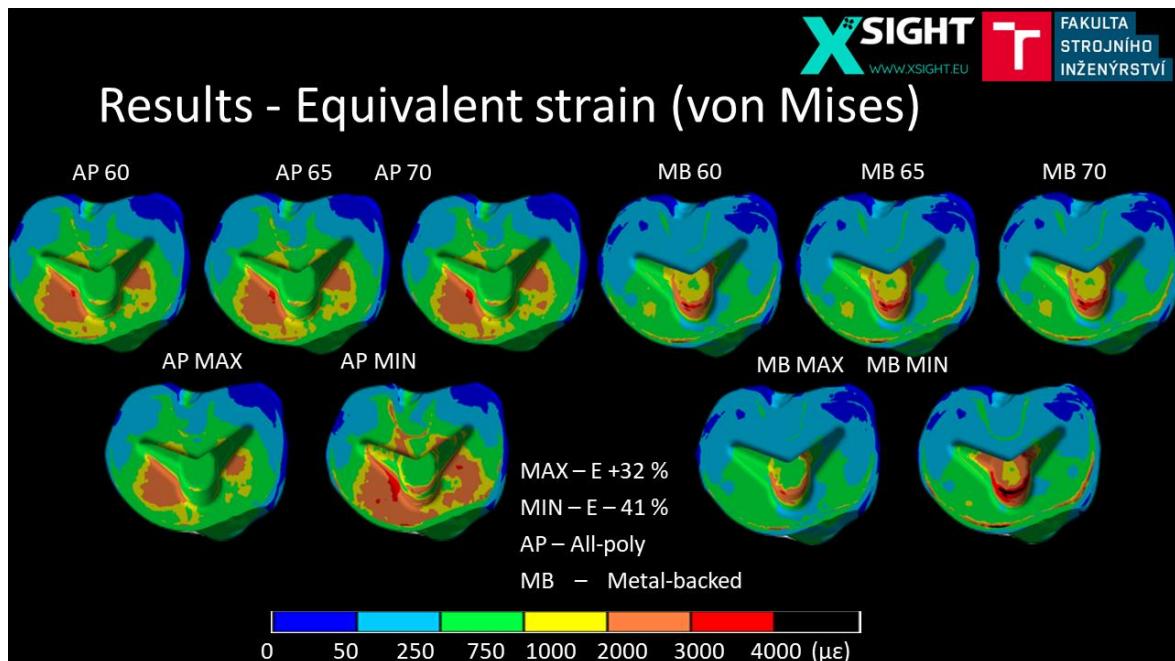


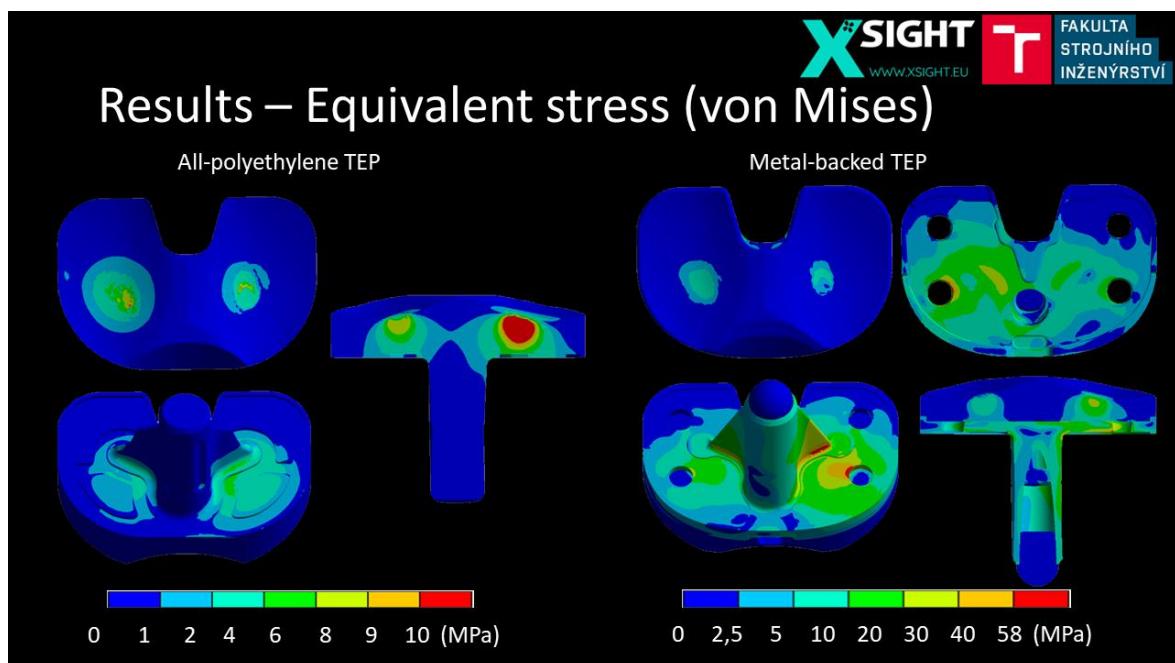
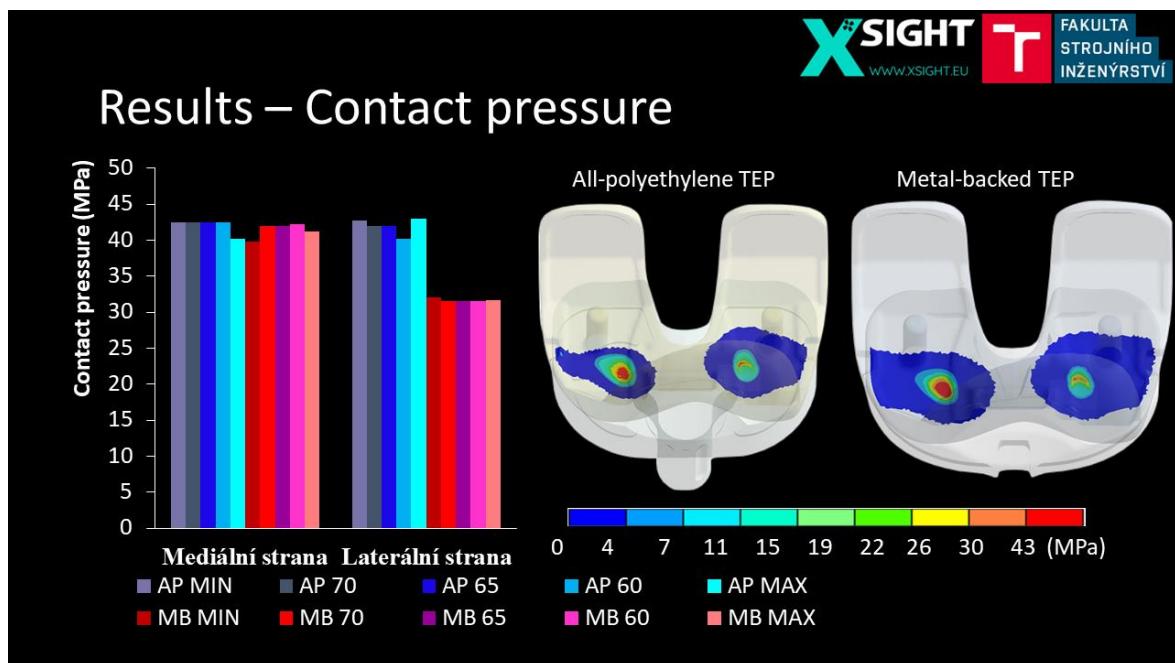








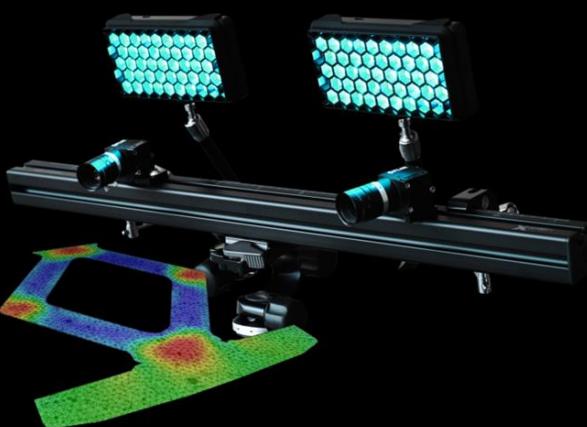




X SIGHT  **FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

Experimental analysis - DIC

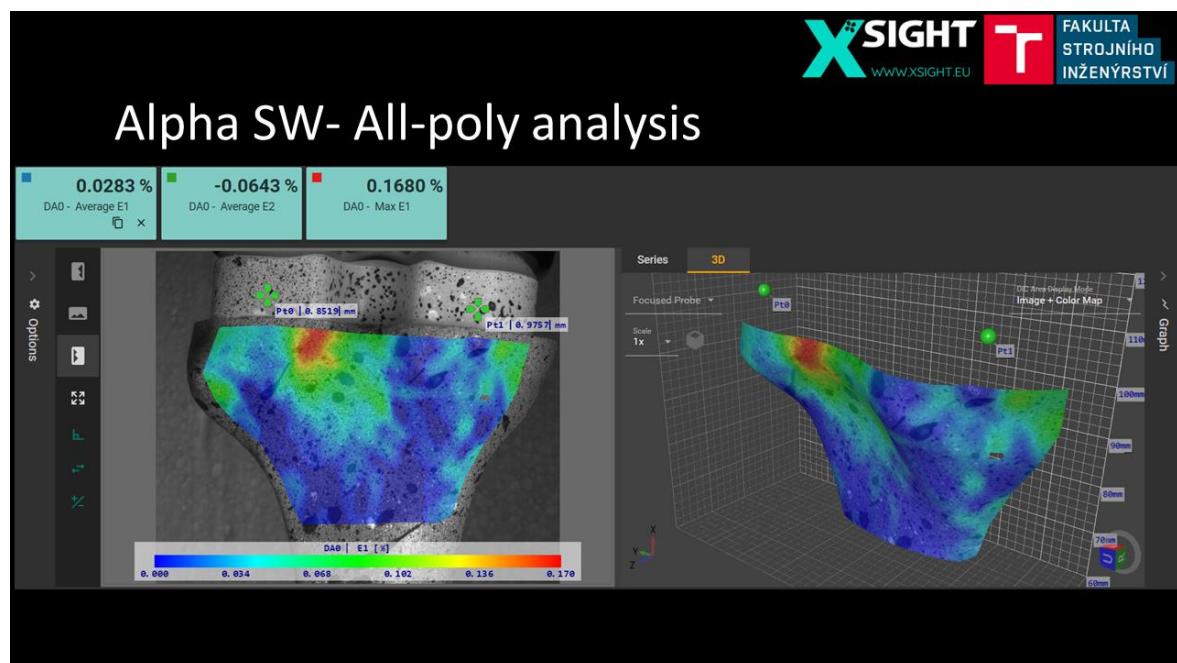
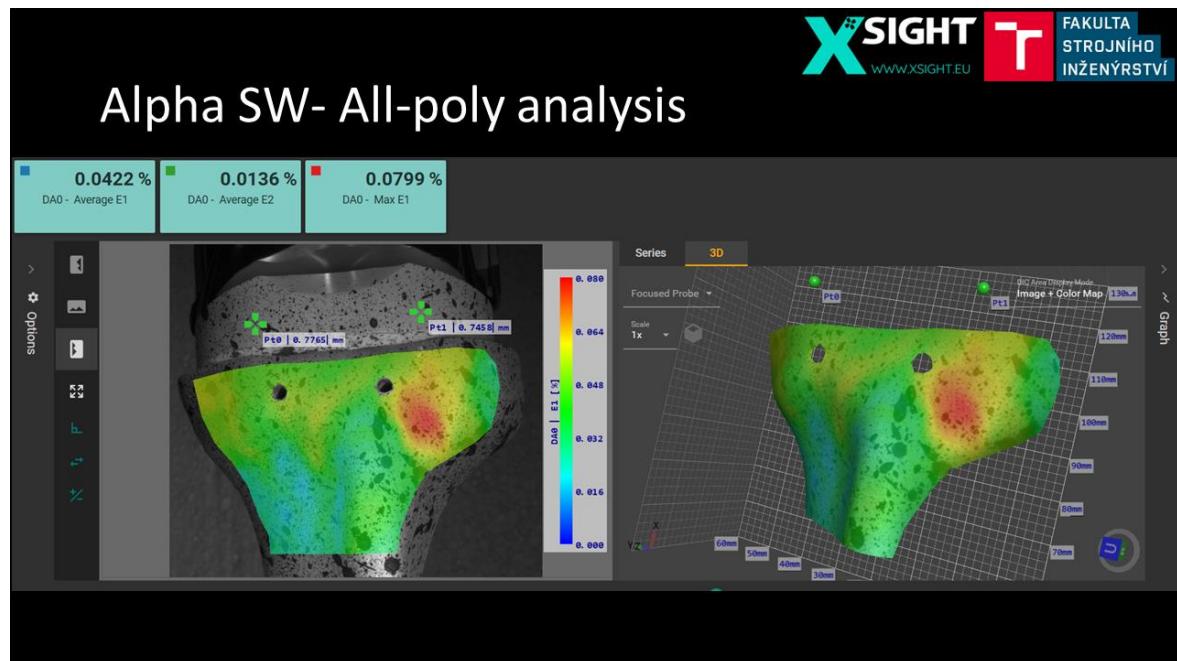
- FreeD M12
 - Resolution: 12.3 MPx (4096×3000 px)
 - Frame rate 23 FPS at full resolution
 - > 40 FPS at 6 Mpx
 - > 300 FPS at 1 Mpx
 - max 1k FPS at 4096×128 px
 - In-Plane subpixel resolution: < 0.008% (> 122 GPx resolution equivalent)

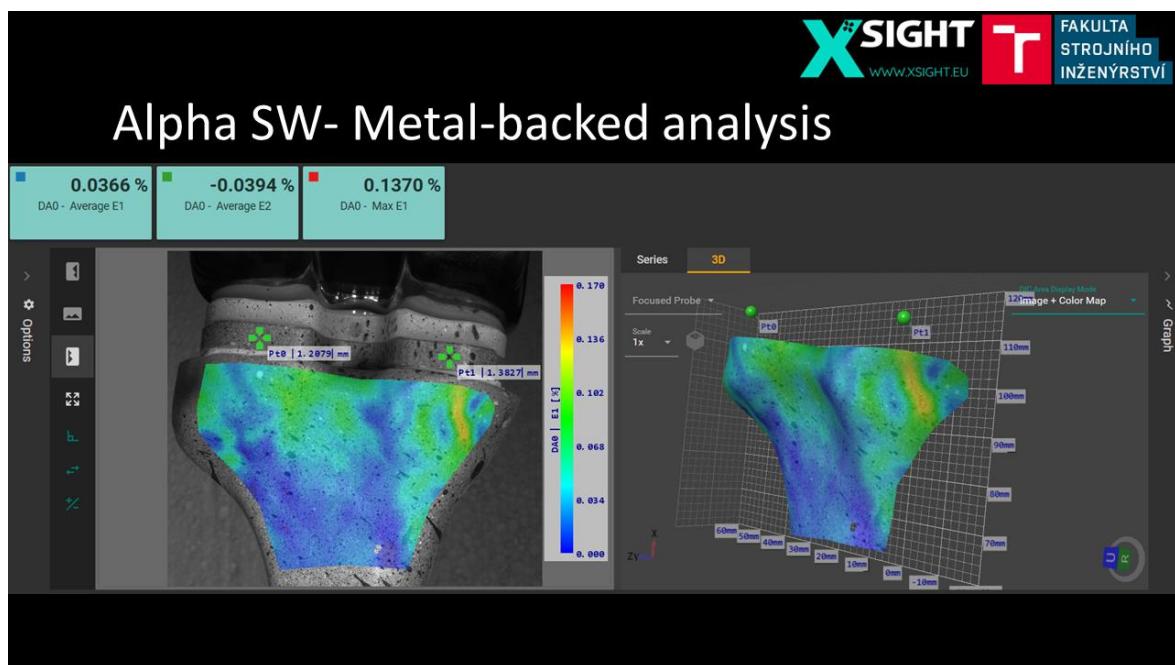
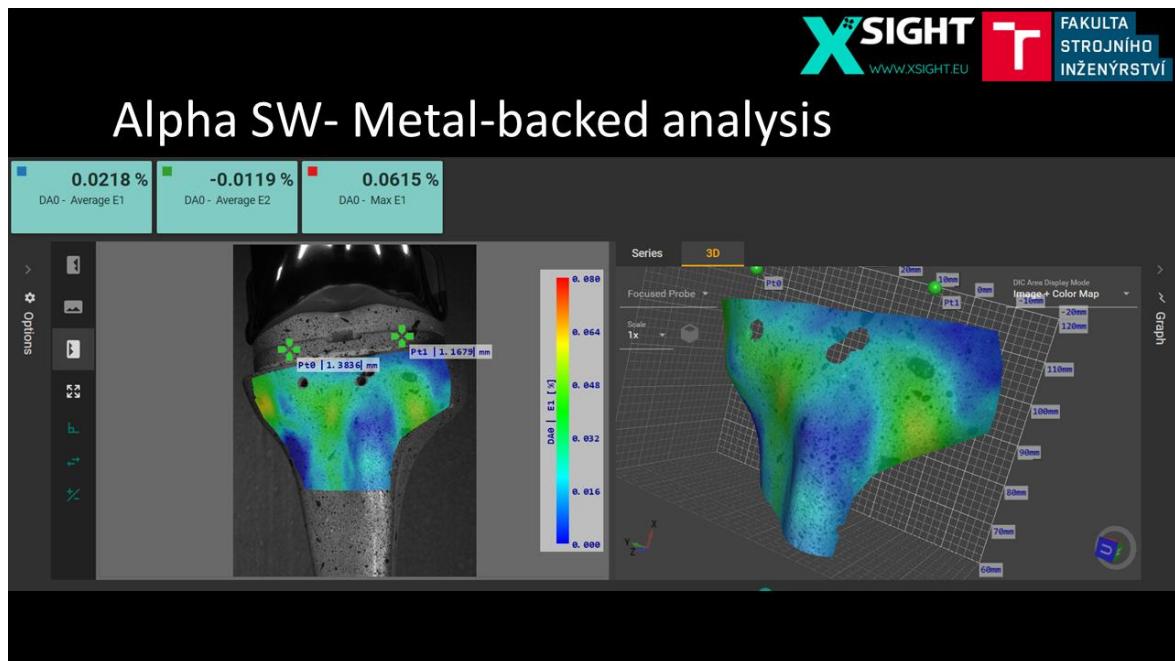


X SIGHT  **FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

Experimental analysis - Specimens









Conclusion

- Similar resulting values of equivalent tibia strain to applied load for both assessed TKA
- All polyethylene component creates generally more favorable conditions for modeling and remodeling periprosthetic bone tissue
- As a result, this analysis could change the indication criteria for the implantation of All-polyethylene TEP
- Partial results of the work published in the scientific journal **Computer Methods and Programs in Biomedicine**

Thank you for
your attention.



FAKULTNÍ
NEMOCNICE
U SV. ANNY
V BRNĚ



MUNI
MED





References

- [55] ZARIBAF, Fedra Parnian. Medical-grade ultra-high molecular weight polyethylene: past, current and future. *Materials Science and Technology* [online]. 2018, **34**(16), 1940–1953. ISSN 0267-0836, 1743-2847. Dostupné z: doi:10.1080/02670836.2018.1469455
- [56] OSMAN, Reham a Michael SWAIN. A Critical Review of Dental Implant Materials with an Emphasis on Titanium versus Zirconia. *Materials* [online]. 2015, **8**(3), 932–958. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma8030932
- [57] KLARSTROM, D., P. CROOK a A. SHARIF. Cobalt Alloys: Alloying and Thermomechanical Processing. In: *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering* [online]. B.m.: Elsevier, 2017 [vid. 2022-04-06], s. B9780128035818093000. ISBN 978-0-12-803581-8. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-803581-8.09213-4
- [58] DUNNE, N. Mechanical properties of bone cements. In: *Orthopaedic Bone Cements* [online]. B.m.: Elsevier, 2008 [vid. 2022-04-06], s. 233–264. ISBN 978-1-84569-376-3. Dostupné z: doi:10.1533/9781845695170.3.233
- [36] Zimmer Biomet, *NexGen® CR-Flex and LPS-Flex Knees*, 2016.
- [59] GRAY, Hans A., Fulvia TADDEI, Amy B. ZAVATSKY, Luca CRISTOFOLINI a Harinderjit S GILL. Experimental Validation of a Finite Element Model of a Human Cadaveric Tibia. *Journal of Biomechanical Engineering* [online]. 2008, **130**(3), 031016. ISSN 0148-0731, 1528-8951. Dostupné z: doi:10.1115/1.2913335



References

- [62] MARCIÁN, Petr, Libor BORÁK, Tomáš ZIKMUND, Ladislava HORÁČKOVÁ, Jozef KAISER, Marek JOUKAL a Jan WOLFF. On the limits of finite element models created from (micro)CT datasets and used in studies of bone-implant-related biomechanical problems. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* [online]. 2021, **117**, 104393. ISSN 17516161. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmbbm.2021.104393
- [63] TAYLOR, S.J.G., P.S. WALKER, J.S. PERRY, S.R. CANNON a R. WOLEDGE. The forces in the distal femur and the knee during walking and other activities measured by telemetry. *The Journal of Arthroplasty* [online]. 1998, **13**(4), 428–437. ISSN 08835403. Dostupné z: doi:10.1016/S0883-5403(98)90009-2
- [64] ZHANG, Jing, Zhenxian CHEN, Qida ZHANG a Zhongmin JIN. Computational modelling of biomechanics and biotribology for artificial knee joint. In: *Computational Modelling of Biomechanics and Biotribology in the Musculoskeletal System* [online]. B.m.: Elsevier, 2021 [vid. 2022-04-21], s. 547–575. ISBN 978-0-12-819531-4. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-819531-4.00021-3
- [65] RICHARDS, R.E., M.S. ANDERSEN, J. HARLAAR a J.C. VAN DEN NOORT. Relationship between knee joint contact forces and external knee joint moments in patients with medial knee osteoarthritis: effects of gait modifications. *Osteoarthritis and Cartilage* [online]. 2018, **26**(9), 1203–1214. ISSN 10634584. Dostupné z: doi:10.1016/j.joca.2018.04.011
- [66] COMPLETO, A., J.A. SIMÕES, F. FONSECA a M. OLIVEIRA. The influence of different tibial stem designs in load sharing and stability at the cement–bone interface in revision TKA. *The Knee* [online]. 2008, **15**(3), 227–232. ISSN 09680160. Dostupné z: doi:10.1016/j.knee.2008.01.008
- [67] KUTZNER, I., A. BENDER, J. DYMKE, G. DUDA, P. VON ROTH a G. BERGMANN. Mediolateral force distribution at the knee joint shifts across activities and is driven by tibiofemoral alignment. *The Bone & Joint Journal* [online]. 2017, **99-B**(6), 779–787. ISSN 2049-4394, 2049-4408. Dostupné z: doi:10.1302/0301-620X.99B6.BJJ-2016-0713.R1

HYDRAULICKÉ POVRCHY S „GLOFOVOU“ STRUKTUROU

TOMÁŠ KRÁTKÝ, JAKUB STAREČEK, ANTONÍN PANZO, DAVID ŠVEC
CENTRUM HYDRAULICKÉHO VÝZKUMU

Hydraulické povrhy s „glofovou“ strukturou

Tomáš Krátký, Jakub Stareček, Antonín Panzo, David Švec



CENTRUM HYDRAULICKÉHO VÝZKUMU spol. s r.o.
Jana Sigmunda 313, 783 49 Lutín
t.kratky@sigma.cz

Univerzita Palackého v Olomouci
17. listopadu 1192/12, 779 00 Olomouc



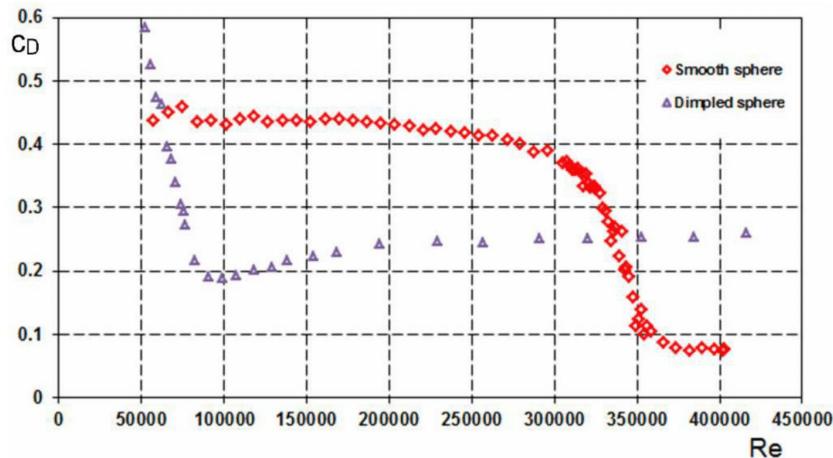
Obsah

- **Úvod – motivace pro strukturované hydraulické povrhy**
- **Cíle**
- **Výzvy**

- **Tvorba geometrických struktur v ANSYSu**
- **Výsledky a diskuze**

- **Závěr**

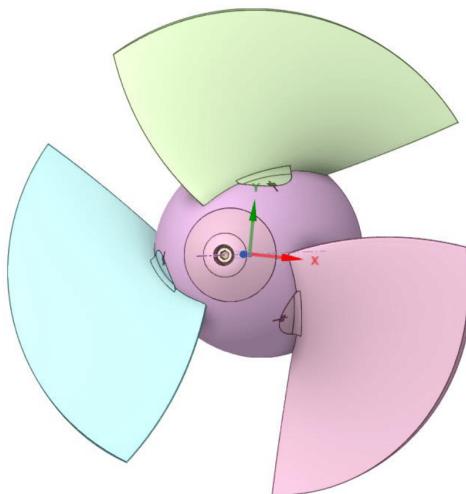
Motivace – golfový míček



zdroj: Vojtěch Spálenšký, Dalibor Rozehnal, „CFD simulation of dimpled sphere and its wind tunnel verification.“ MATEC Web of Conferences 107, 00077 (2017)

Cíle

- „Prošlapat cestu“ (pro návrh čerpadel se strukturovanými hydraulickými povrchy)
- Vyzkoušet čerpadlo s lopatkami se strukturovaným hydraulickým povrchem.(Pro začátek) inspirace povrchem golfového míčku.
- Zvoleno axiální čerpadlo $n_s=890$, stavitelné lopatky, ověřená výrobitelnost technologií kovového 3D tisku (spolupráce s TUL a FZÚ)



Výzvy

- **Tvorba geometrie**
- Tvorba výpočetní sítě (standardní nástroje, jako TurboGrid, nefungují)
- Výpočetní náročnost
- Není jasné, jaké struktury jsou vhodné (tvary, rozmístění na lopatce, ...)

Řešení s využitím ANSYSu

- Geometrie: SpaceClaim + Python
- Opakující se velké množství povrchových struktur (stovky až tisíce) nelze tvořit manuálně. Lze ale využít Python skriptů ve SpaceClaim
- Výpočetní síť: ICEM (bloky)
- Výpočty: CFX + HPC cluster

Tvorba souřadnic důlků (Python)

- Python script (mimo SpaceClaim):
 - - načtení dat z .crv souboru (BladeGen – profily řezu lopatky)
 - - interpolace tvaru lopatky pomocí splajnů
 - - výsledný skript umí pro libovolnou dvojici relativních souřadnic (poloha bodu mezi vstupní a výstupní hranou, a mezi nosným a krycím diskem) spočítat souřadnice bodu ležícího na povrchu lopatky (ve 3D).
 - (sací a tlačná strana jsou řešeny zvlášť)
- - následně jsou dle zadaných parametrů (počty bodů v jednom a ve druhém směru) vypočítány všechny souřadnice, a uloženy do souboru

SpaceClaim

- Python script:
 - - načtení souřadnic ze souboru
 - - vytvoření koule o zadaném průměru pro každou souřadnici
 - - odečtení všech koulí z tělesa lopatky (= „vykousnutí“ důlků)
 - - zaoblení hran

BladeGen

```
## ExportPoints1
# Profile 1 at 0.5000%
2.061091801e-002 6.199462323e-002 8.203650667e-002
2.043521088e-002 6.206117945e-002 8.232169681e-002
2.018414536e-002 6.214897224e-002 8.253355281e-002
1.984025943e-002 6.226318097e-002 8.267481311e-002
1.944071727e-002 6.238954142e-002 8.269324187e-002
1.907244831e-002 6.249986165e-002 8.256368150e-002
1.885775192e-002 6.256013332e-002 8.237927588e-002
1.871624360e-002 6.259548043e-002 8.212809878e-002
1.867260899e-002 6.260035258e-002 8.186934053e-002
1.867634666e-002 6.258989443e-002 8.160288662e-002
1.872340265e-002 6.255663535e-002 8.111005467e-002
1.882120649e-002 6.258718173e-002 8.062825972e-002
1.9044944251e-002 6.239802364e-002 7.967174875e-002
1.929148118e-002 6.227178312e-002 7.858544963e-002
1.955533790e-002 6.212318121e-002 7.750551032e-002
1.983076144e-002 6.196615815e-002 7.641731775e-002
2.027180910e-002 6.178252063e-002 7.475547119e-002
2.072730211e-002 6.140791922e-002 7.310648227e-002
2.165824049e-002 6.075420385e-002 6.983237427e-002
2.353413403e-002 5.918299340e-002 6.336231768e-002
2.566882542e-002 5.694170269e-002 5.607997112e-002
2.774492761e-002 5.423646876e-002 4.891114278e-002
2.958003877e-002 5.130955631e-002 4.240045514e-002
3.130945439e-002 4.798670512e-002 3.605291353e-002
3.274914336e-002 4.469106427e-002 3.057814673e-002
3.344112533e-002 4.291995112e-002 2.791431091e-002
3.410562486e-002 4.106136451e-002 2.530065940e-002
3.442726185e-002 4.009387817e-002 2.400277694e-002
3.500928382e-002 3.828718978e-002 2.158461906e-002
3.555444721e-002 3.624908337e-002 1.922061007e-002
3.605540826e-002 3.422066582e-002 1.690820403e-002
```

SpaceClaim

```
target_body = GetRootPart().Bodies[0]
r = 1.04
r_edge = 0.33

f = open('...', 'r')
data_file = f.readlines()

for line in data_file:
    data.append([1000 * float(i) for i in line.split(";")])

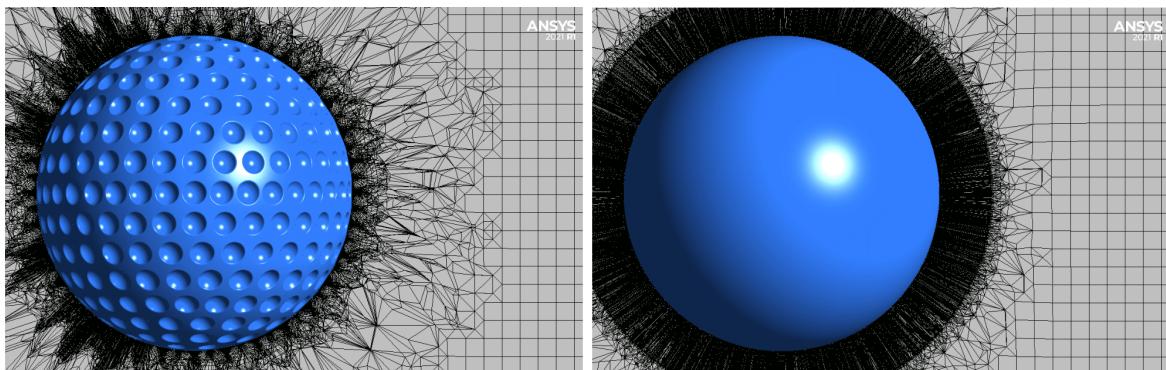
for coor in data:
    # Create Sphere
    SphereBody.Create(Point.Create(MM(coor[0]), MM(coor[1]), MM(coor[2])), 
    # EndBlock

no_edges_original = len(target_body.Edges)
no_grooves = len(data)

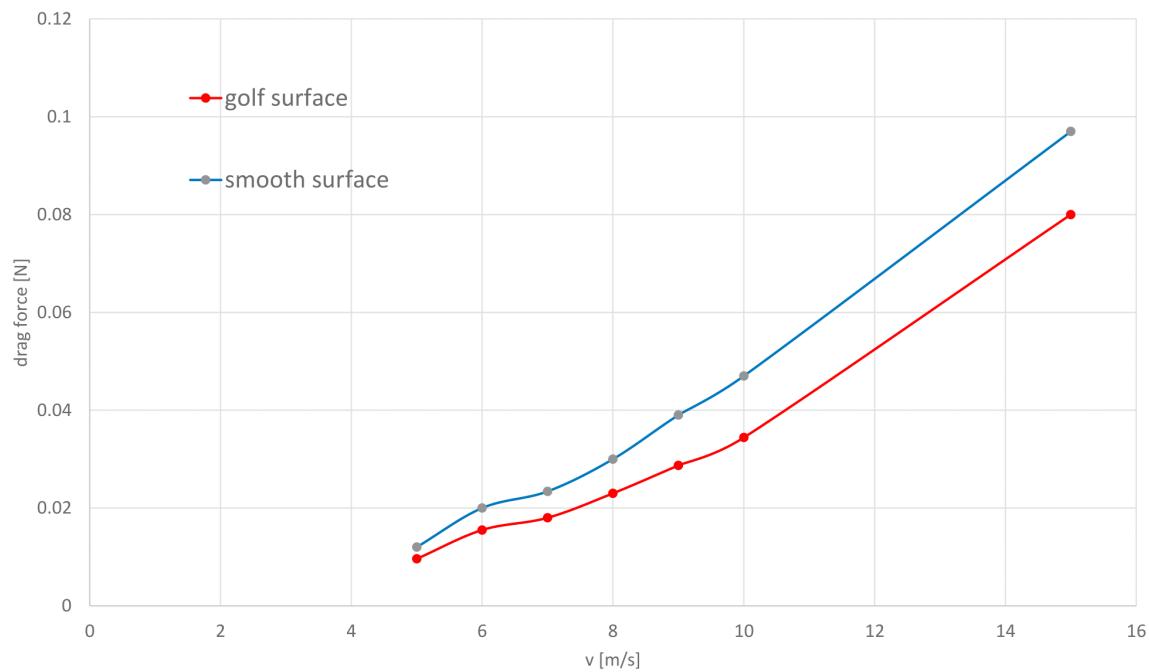
# Intersect Bodies
targets = BodySelection.Create(target_body)
selection = BodySelection.Create(GetRootPart().Bodies[-no_grooves:])
tools = selection
#tools = Body5
options = MakeSolidsOptions()
```

Testovací výpočet

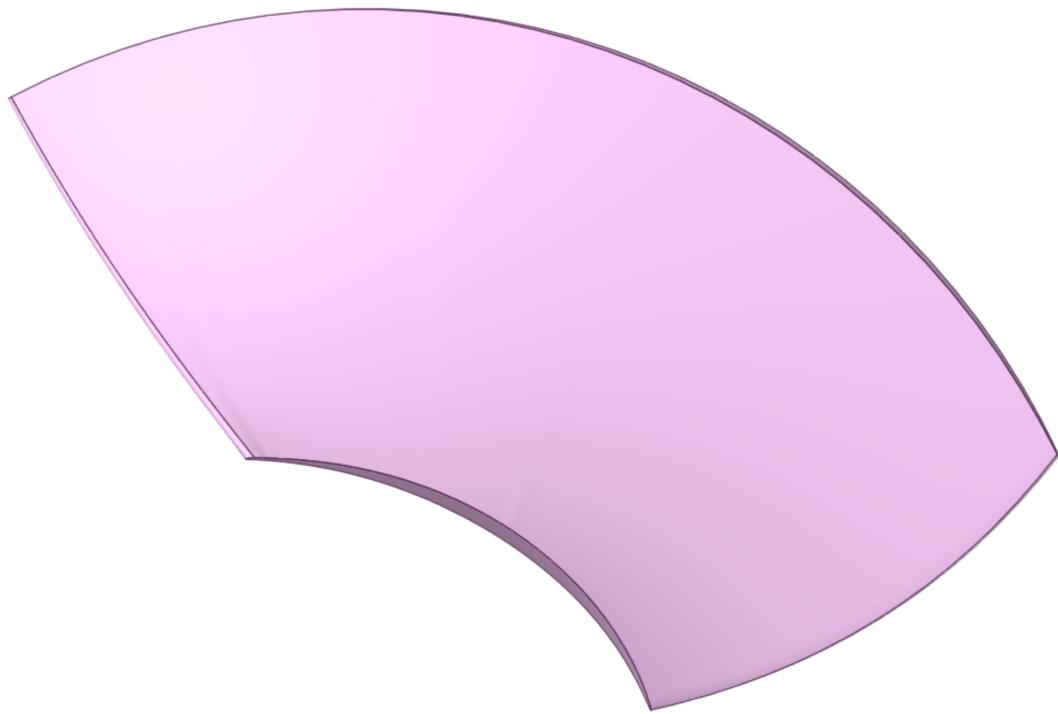
- Golfový míček vs hladký míček
- Cca 22 mil. uzlů, stacionární, SST model turbulence



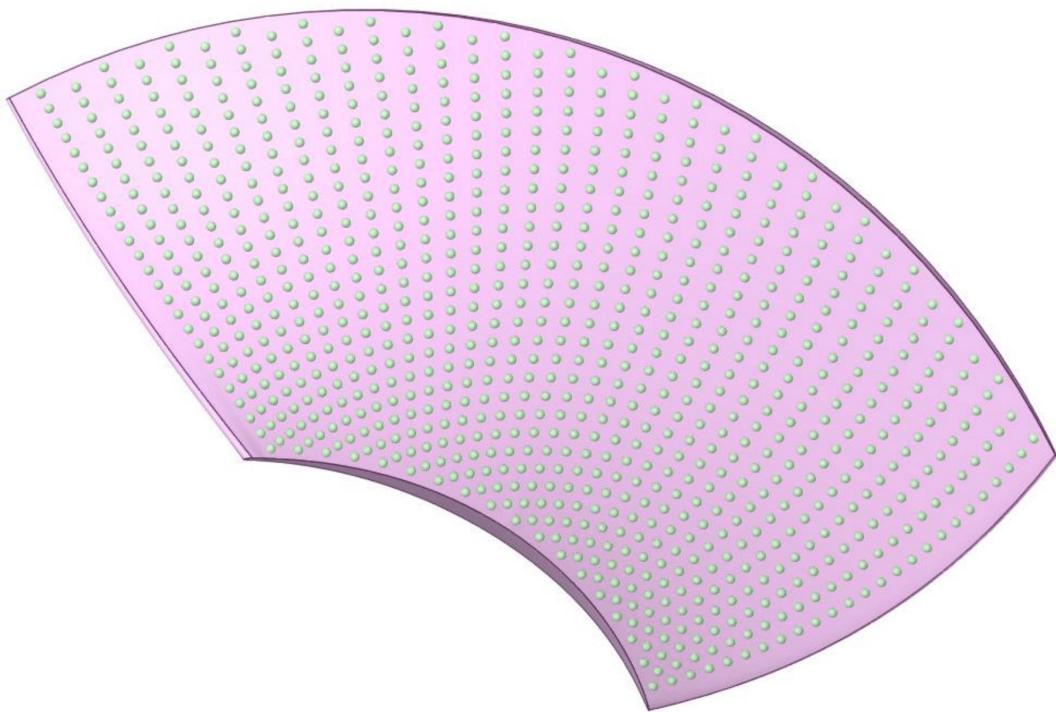
Testovací výpočet



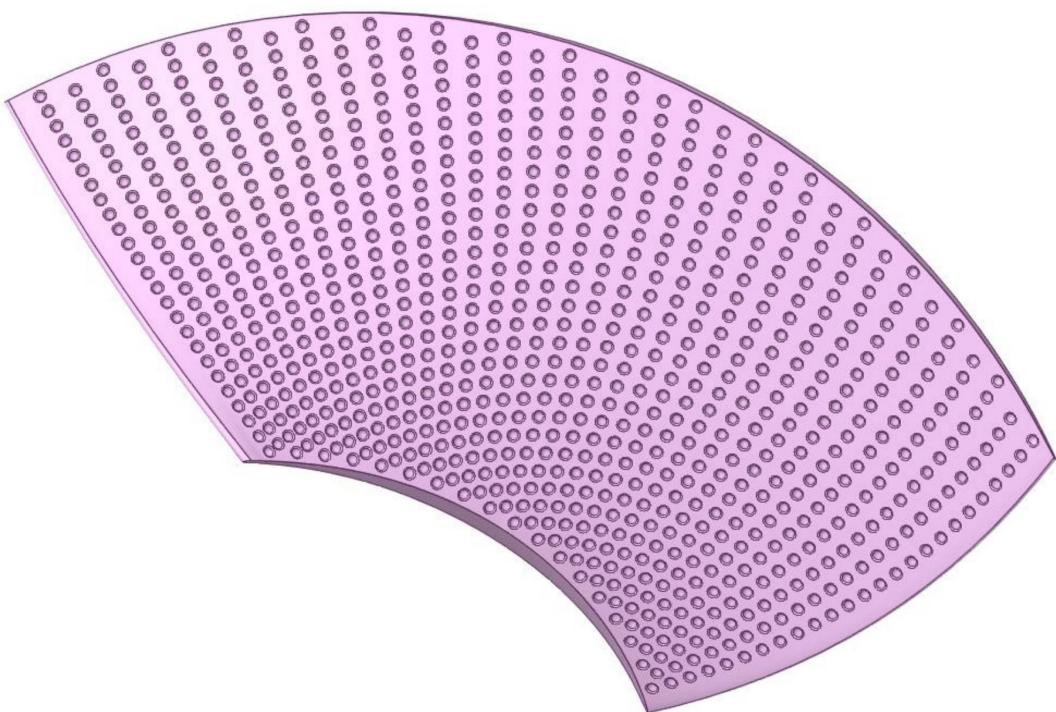
Golfový povrch na lopatce



Golfový povrch na lopatce



Golfový povrch na lopatce



Závěr a budoucí plány

- Umožněno díky spojení SpaceClaimu s Pythonem
- Další plány:
- CFD simulace, dále pravděpodobně optimalizace povrchových struktur
- Porovnání s experimentem

Poděkování

Realizováno jako dílčí projekt v rámci Národního centra kompetence

TN01000038 MATCA

(„Národní centrum kompetence pro materiály, pokročilé technologie, povlakování a jejich aplikace“)

A s podporou projektu

CZ.02.1.01/0.0/0.0/17_049/0008408

„Hydrodynamický design čerpadel“