

## **Magyar–német (TKA–DAAD) kutatócsere projekt**

### **Záró beszámoló**

#### **A projekt adatai:**

**Nyilvántartási szám: 65064.**

**Projektcím: Forgácsolt felületi struktúrák modellezése tribológiai szimulációhoz**

**Magyar projektvezető neve: Dr. Horák Péter**

**Magyar intézmény neve: BME Gépészmérnöki Kar Gép- és Terméktervezés Tanszék**

**Német projektvezető neve: Prof. Dr.–Ing. Bernd Sauer**

**Német intézmény neve: TU Kaiserslautern Lehrstuhl für Maschinenelemente und**

**Getriebetechnik**

**Támogatási időszak: 2015–2016**

---

## A. A projektidőszakban elvégzett munka összefoglalása (max. 2 oldal)

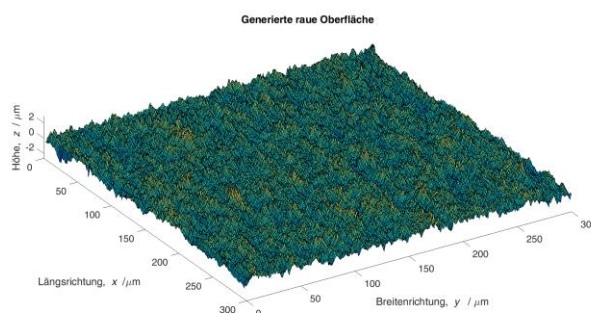
### 1. Felületek érdességmérése

Az FVA T1150 nyilvántartási számú „Csigahajtópárok határfokának vizsgálata” c. kutatási projekt keretében 10 különböző tengelytávú és áttételű hajtópár vizsgálatára került sor. A kísérleti vizsgálatok előtt a csiga köszörült és a csigakerék marással megmunkált fogfelületét tapintós, illetve optikai elven működő felületi érdesség mérésel kellett feltérképezni. A hajtópárok geometriai viszonyai miatt a felületi érdesség optikai úton való méréséhez a csiga és csigakerék fogfelületéről puha polimer anyagba (MMA) lenyomatot kellett készíteni és a felületről így készített negatív lenyomat érdességi viszonyait lehetett mérni. Az előállított 3D felületprofilok további feldolgozásra kerültek, mely során egy 1 mm x 1 mm-es, levegőzárványtól mentes felület került kimetszésre, majd elkészítettük ennek inverz profilját, amely a vizsgált fogfelületet reprezentálta. A fogfelület görbült alakjának megfelelő szűrésével az érdességi profilt síkra vetítettük. A mérési hibák kiszűrése után a kapott mérési eredmények alkalmasak lettek a további vizsgálatokra.

### 2. Felületmodellezés

Ezen munkatervi pont keretében elsőként feltárásra került a témához kapcsolódó nemzetközi szakirodalom, melynek célja annak tisztázása mely matematikai módszerek alkalmasak a vizsgálandó felületi struktúrák valóságot jól közelítő leírására. A szakirodalomban felkutatott módszerek mellett, a két partnerintézetben már korábban alkalmazott felületleírást, a gyártási folyamat kinematikai szimulációját és a fraktál modellezést, alkalmaztuk a valós felületek modellezésére.

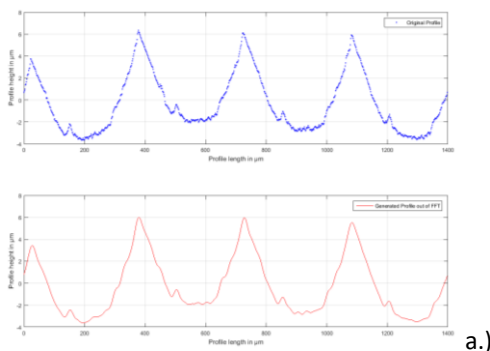
Egy új eljárás is kidolgozásra került, amely előre megadott statisztikai paramétereknek megfelelően véletlen számok generálásával állít elő 3d-s felületeket. Az eljárás az eddigi hasonló módszerek kritikai értékelése után került kifejlesztésre, s szemben az eddigi módszerekkel egy függvény lokális optimalásán alapul.



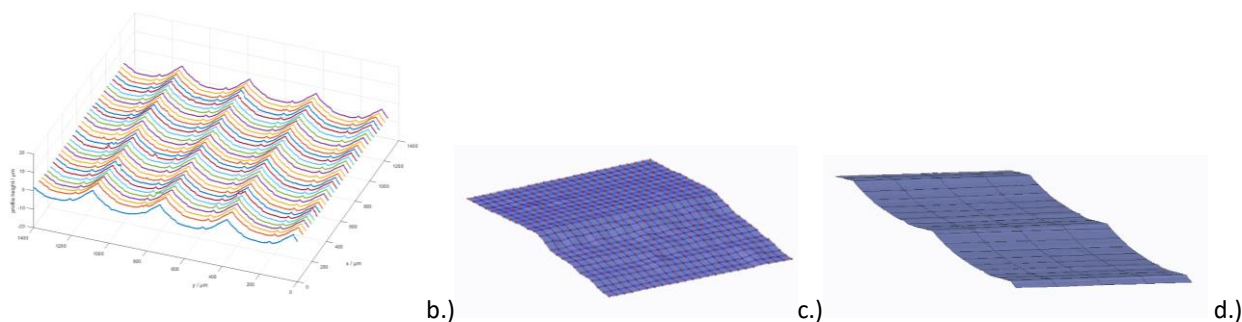
1. **ábra.** Véletlenszámok generálásával előállított érdes felület

### 2. A generált felületi struktúra előkészítése további tribológiai szimulációkhoz

A PTC Creo CAD programban kidolgozott eljárás alkalmas nagyszámú mért felületi pontból a felületmodell előállítására. Ezzel párhuzamosan kifejlesztésre került egy Matlab program, amely alkalmas a Fast Fourier Transformation (FFT) és a saját fejlesztésű fuzzy rendszer felhasználásával a felületi profil rekonstrukciójára. A generált profil jóságát a Creo-ban automatikusan futó mérés segítségével lehet megállapítani.



a.)

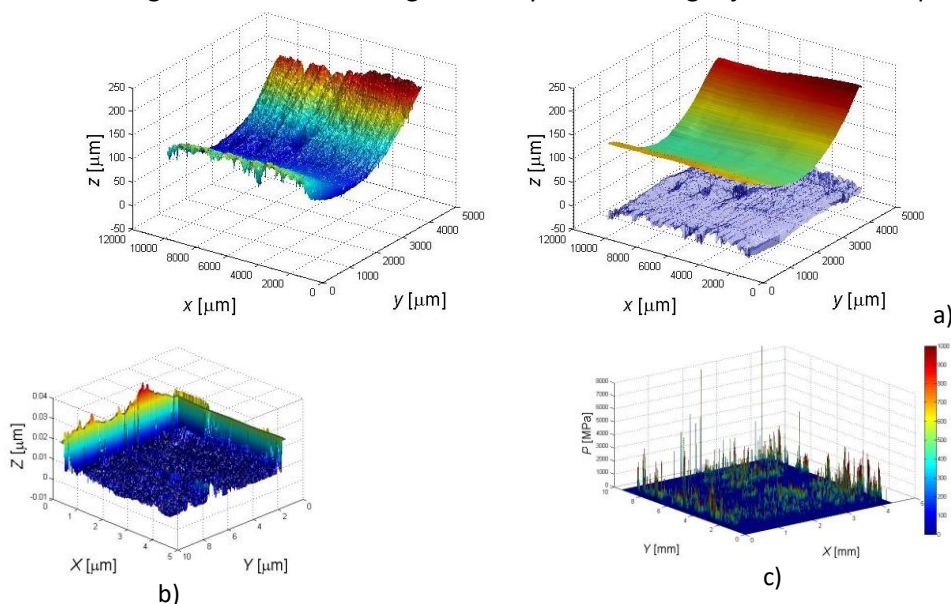


**2. ábra.** A felületrekonstrukciós eljárás lépései

a.) a mért és FFT-vel generált felületi profil összehasonlítása, b.) a 3D profilok Matlab programban való előállítás, c.) a generált pontok beolvasása a Creo CAD rendszerbe, d.) a CAD rendszerben előállított felületmodell

### 3. Funkcionális kiértékelés

A modellezett felület jóságának megítélését a német projektpartner szimulációs programjának továbbfejlesztésével valósítottuk meg. A program felhasználásával egy diplomatervező hallgató végezte az első funkcionális kiértékeléseket. A szimuláció célja annak meghatározása, milyen részletességű modellezés szükséges a felületek tribológiai viszonyainak valóságot jól közelítő leképezéséhez.



**3. ábra.** A felületek funkcionális kiértékelésének eredményei.

a) mért és szűrt felület, b) deformált felület a kontaktszámítás után, c) nyomáseloszlás

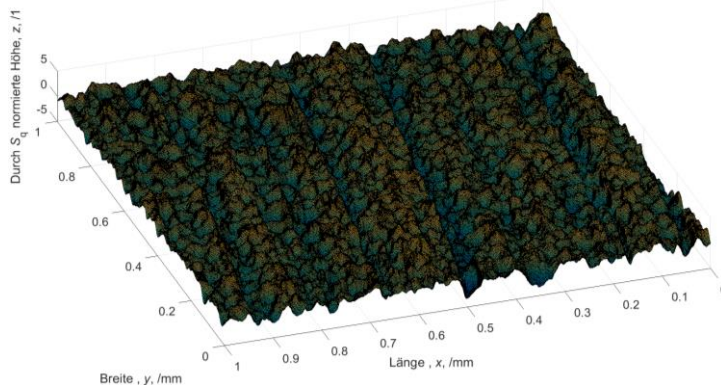
Az érintkezési viszonyok illetve a kenőfilm vastagság számításához azt a feltevést használtuk, hogy a túlnyomórészt vegyes súrlódási állapotban üzemelő csigahajtópárok esetében a terhelés átadás két részből tevődik össze, részben az EHD kenőfilmben kialakuló nyomásból, részben pedig az érdességcsúcsok szilárd testszerű érintkezéséből.

A szakirodalomban erre megtalálható kétdimenziós számítási modellt háromdimenzióssá fejlesztettük tovább így alkalmas a mért és rekonstruált 3D-s felületek tribológiai vizsgálatára.

## B. A közös projekt eredményei (max. 2 oldal)

A közös projekt eredményei részben az előző, „A projektidőszakban végzett munka összefoglalása” c. alpontban, már bemutatásra kerültek. További kísérleti vizsgálatok és szimulációs eredmények a következők.

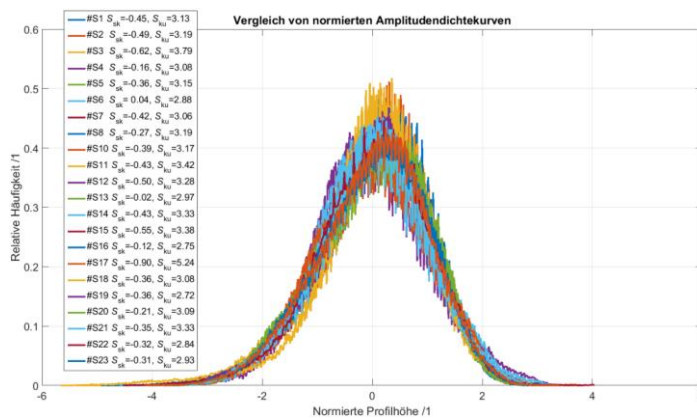
A 4. ábra egy fog 1mm<sup>2</sup>-es felületelemének mérőmikroszkóppal való érdességi mérésének eredményeit mutatja be. Az érdességi csúcsok magassága Sq-ra (3D-s négyzetes középértékre) lett normalva.



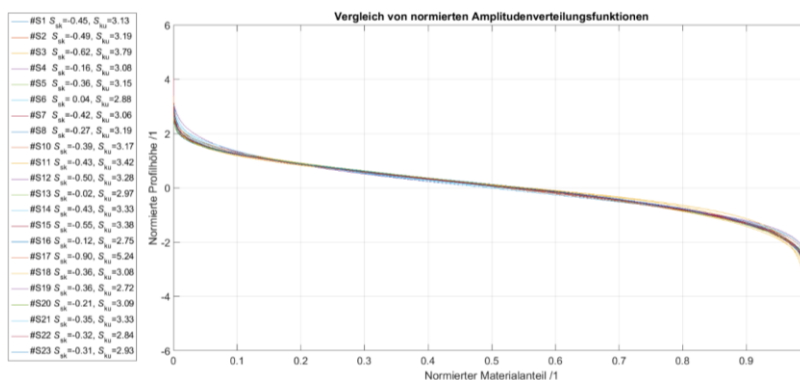
**4. ábra.** Fogfelület 3D érdességi mérésének eredménye (érdesség magasság Sq-ra normalva)

Három különböző gyártó többféle tengelytávval rendelkező csigáit vizsgálva megállapítható, hogy az Sq értékre normalt amplitúdó sűrűség görbék, valamint azok integrálásából származó Abbott-Firestone –féle anyaghányados görbék gyakorlatilag függetlenek a hajtópár tengelytávjától, illetve a gyártójától. Ebből a megállapításból adódik a lehetőség, hogy ugyanazzal a dimenzió nélküli felületi érdesség leíró módszerrel dolgozzunk, ha a csiga marással és utána köszörüléssel került legyártásra.

Az 5. ábra a különböző csigák az amplitúdó sűrűsége görbéinek, a 6. ábra az Abbott-Firestone –féle anyaghányados görbéinek egyezését mutatja be.

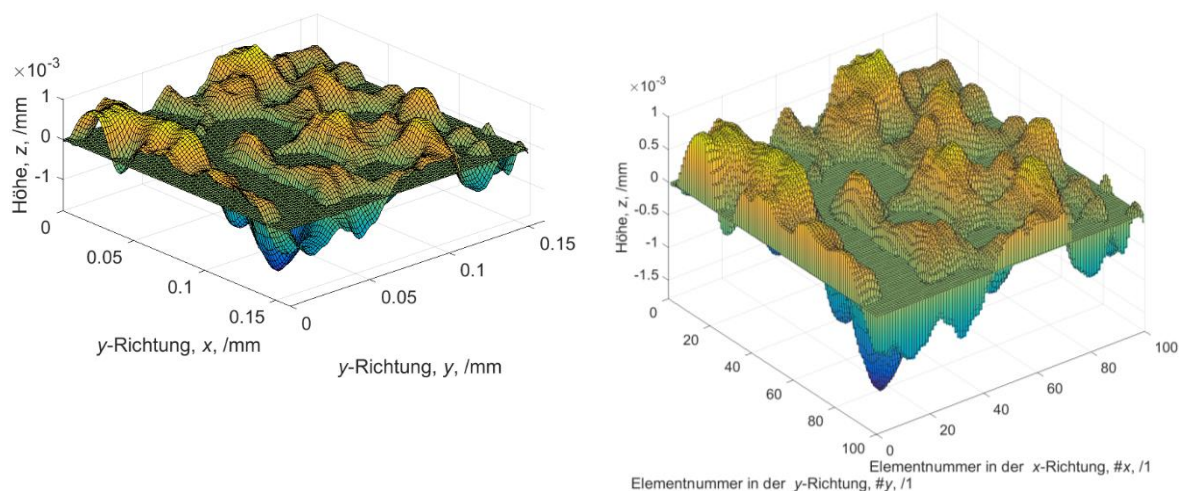


**5. ábra.** Amplitúdó sűrűség görbéi a különböző csigafogfelületeknek



**6. ábra.** Különböző csigafogfelületek ABBOTT-FIRESTONE - féle anyaghányad görbéi

A vegyessúrlódási állapot numerikus modellezéséhez az érdes felületek diszkrétizálása szükséges. A cellákra való felosztás során a felületi érdesség magasság, a cellán belül állandó magasságú oszloppal került helyettesítésre, amit a 7. ábra mutat be.



**7. ábra.** Érdes felület diszkrétizálása az oszlopmodellel

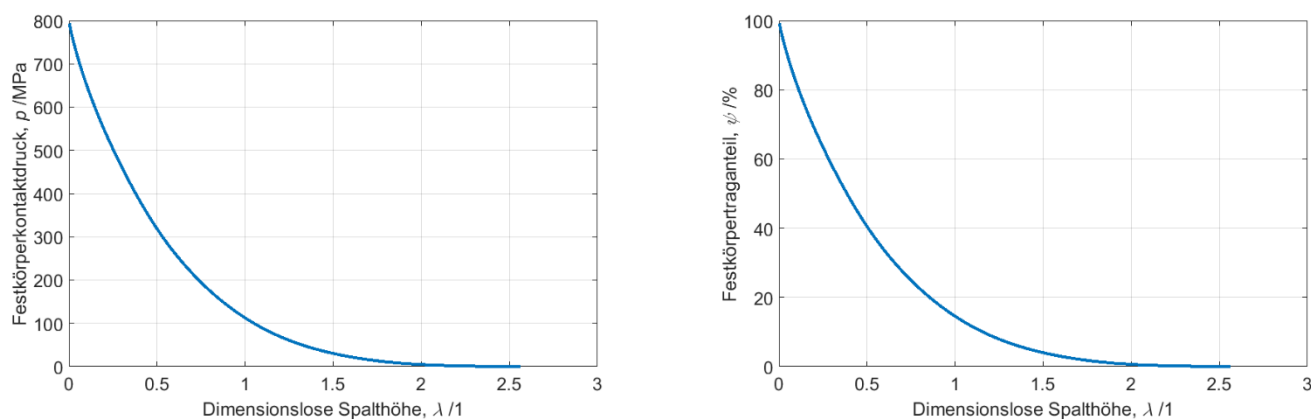
a.) Mért érdes felület, b) Ugyanazon felület diszkrétizálása 100x100 oszlop alkalmazásával

A diszkrétizált felület segítségével elvégezhető a vegyessúrlódás tribológiai szimulációja.

A tribológiai szimuláció során a fogfelületek görbületes viszonyait helyettesítő hengerpárokkal modelleztük. A hengerpárok között kialakuló közepes érintkezési feszültség, illetve a szilárdtest érintkezés hányada a folyadéksúrlódáshoz képest, fontos jellemzői a kialakuló kenési viszonyoknak. A kialakuló közepes kenőrésméretet az  $S_q$ -val normálva dimenzió nélküli a kenőrésjellemző számot kapjuk.

A szilárdtest érintkezéséből származó feszültség, illetve az érintkezési hányad ennek függvényében került ábrázolásra a 8. ábrán.

$$\lambda = \frac{\bar{h}}{S_q} \quad (8)$$



**8. ábra.** Érintkezési feszültség (balra) és szilárdtest érintkezési hányad (jobbra)

Összefoglalva az eredményeket: a mért érdes felületek, illetve a 3D felületi érdességi mérőszámok felhasználásával kifejlesztett modellek és az azokon végzett szimulációk alkalmasak a vegyessúrlódási állapotban üzemelő csigahajtópárok tribológiai viszonyainak hatékony meghatározására.

### C. Az együttműködés további szempontjai: (max. 3 oldal)

#### 1. Mennyiben alapulnak a projekt elért eredményei a német–magyar együttműködésen?

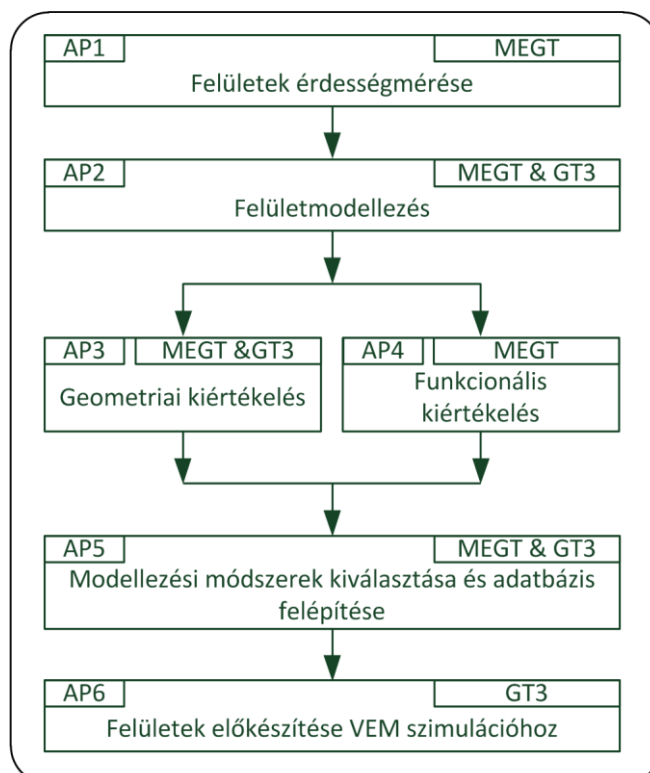
Jelen kutatási együttműködés során a felületi érdesség mérés a német partnernél történt, ahol ehhez a megfelelő laboratóriumi infrastruktúra rendelkezésre állt. A felületmodellezésben mindkét partner tevékenyen részt vett, a geometriai kiértékelést szintén együttműködve, míg a funkcionális kiértékelés a német félnél került végrehajtásra.. Hasonló együttműködés volt szükséges a megfelelő modellezési módszerek kiválasztásához és az adatbázis felépítéséhez. A felületek előkészítése a végeleemes szimulációhoz a magyar projektpartner feladata volt, mivel ezen a területen korábbi kutatások során jelentős tapasztalatra tett szert.

#### 2. Hogyan befolyásolta a támogatás a projekt előmenetelét?

A munkatervnek megfelelő kutatócserék a projekt támogatásával, ezek közül elsősorban a hosszabb időtartamú tartózkodásaik a diplomázó hallgatóknak, illetve doktoranduszoknak biztosították azt, hogy a kutatómunka az ütemezésnek megfelelően haladjon. A fiatal kutatók munkáját a tapasztalt, tudományos fokozattal rendelkező kutatók rövidebb időtartamú külföldi tartózkodásai jól kiegészítették, így tudtak megfelelő konzultációs lehetőséget biztosítani.

#### 3. Hogyan csatlakozott a második évi munka az első év eredményeihez?

Az alábbi munkatervnek megfelelően, az első projektév eredményeit (felületi érdességmérések, illetve különböző felületmodellezési eljárások kipróbálása teremtette meg az alapot a második évben az eredmények funkcionális kiértékeléséhez, illetve a felületek VEM modellezéshez való előkészítéséhez.





### A munkatervi pontok (AP1-AP6) időbeli ütemezése

Munkalépés	2015												2016											
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
AP1 Felületi érdesség mérés	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X												
AP2/1 Irodalomkutatás és értékelés	X	X	X	X	X	X																		
AP2/2 A kiválasztott módszerek programozása		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X										
AP2/3 Felületgenerálás				X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X							
AP3 Geometriai kiértékelés					X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X					
AP4 Funkcionális kiértékelés					X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X					
AP5/1 Alkalmos modellezési módszerek kidolgozása								X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
AP5/2 Adatbázis felépítése a modellezéshez																X	X	X	X	X	X	X	X	X
AP6 A felület előkészítése VEM szimulációhoz													X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

#### 4. Milyen szempontból volt jelentős a projekt a fiatal kutatók tapasztalatszerzése, szakmai fejlődése szempontjából?

A doktoranduszok és hallgatók cseréje során a törekvés az, hogy a disszertációhoz, illetve diplomamunkához szükséges kutatásokat mindkét partnerintézmény támogassa és szakmailag konzultálja. A hallgatók részére felkínált féléves- és diplomamunkák lehetőséget biztosítanak a német, illetve angol nyelvtudásuk elmélyítésére, valamint a másik ország kultúrájának megismerésére is. A hallgatói csere folytatása és a német-magyar kapcsolatok kiterjesztése más szakterületeken is szerepel résztvevők terveiben. A hallgatói csere lehetőségét szintén bővíti a TU Kaiserslautern és a BME kétszintű (BSc, MSc) képzései.

#### 5. Sorolja fel azokat a hazai vagy külföldi tudományos közleményeket és publikációkat, amelyek az együttműködés eredményeként jelentek meg!

- Thielen, S.; Magyar, B.; Piros, A.: Reconstruction of three-dimensional Turned Shaft Surfaces with Fractal Functions. Tribology International, Volume 95, March 2016, pp. 349–357, ISSN 0301-679X, <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2015.11.028>

#### 6. Milyen akadályokat vagy problémákat érzékelt a projekt végrehajtása során?

Nem volt említésre méltó akadály.

#### 7. Mi a legjelentősebb szakmai eredmény, amit kiemelne a projektegységműködés kapcsán?

A valós felületek mérési eredményein alapuló való felületrekonstrukciós és numerikus modellezési eljárás kifejlesztése, amely alkalmas a tribológia viszonyok gyors szimulációjára.

#### 8. Van-e olyan javaslat, amivel módosítaná a pályázati felhívás és végrehajtás szempontjait a jövőre nézve?

Nincsen ezzel kapcsolatos javaslatom

Kelt: Budapest, 2016. 12. 01.



Dr. Horák Péter

projektvezető