

Határ a világűr – és a döntések ára. Mérnöki munkám a Kennedy Űrközpontban és a Challenger tanulságai

MÁJUS 23, 2025

Fekete Balázs Ph.D.

gépészmernök

sr. rakétahajtómű-fejlesztő mérnök

Magyar Tudományos Akadémia
Anyagtudományi és Technológiai Tudományos Bizottság

Diszlokáció a Műszaki Gyakorlatban Munkacsoport



TARTALOM

- 1) A NASA "CRAWLER TRANSPORTER" VAZSZERKEZET
TORESMECHANIKAI ANALIZISE
- 2) AZ ARTEMIS SLS RAKETA TARTOSZERKEZETENEK TERVEZESE
- 3) A CHALLENGER URSIKLO UTOLSO REPULESE

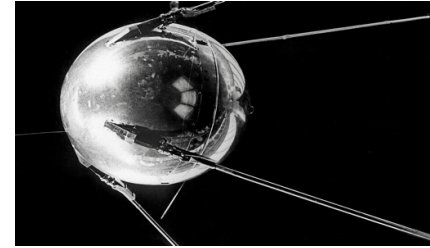
ELETRAJZ

- Sr. Raketahajtomu-Fejlesztő Mernok
 - Blue Origin ✦ Washington ✦ 2022 -
- Sr. Alkalmazott Mechanikai Mernok
 - NASA Kennedy Űrközpont ✦ Florida ✦ 2019 – 2022
- Kutatómernok
 - Kaliforniai Egyetem, Berkeley ✦ Kalifornia ✦ 2016 – 2019
- Kutatómernok
 - Dunaujvárosi Egyetem / Ecotech Ltd. ✦ Magyarország ✦ 2010 – 2016
- Fejlesztőmernok
 - Knorr-Bremse Fekrendszerek. ✦ Magyarország ✦ 2008 – 2010



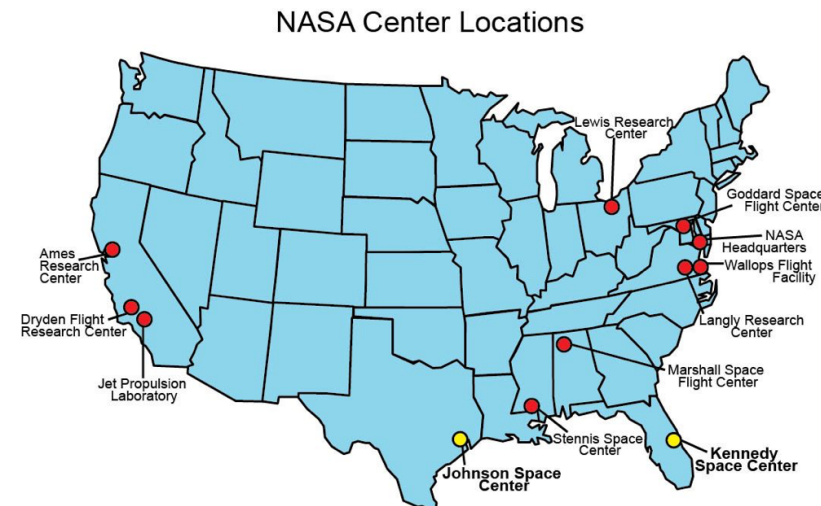
A NASA TORTENETE

- Alapítas: 1958
- Apollo Program: 1968-1972
- Ursiklo Program: 1981-2011
- Artemis Program: 2020-



A KENNEDY URKOZPONT

- Az Egyenlítő közelsege
 - A raketa kezdeti impulzusa nagyobb, ezáltal uzemanyagot lehet megtakarítani (~940 mi/h)
- Idojaras
 - Nincsenek foldrengesek, a hurrikanok elojelezhetok
- Az Atlanti Ocean közelsege
 - Az inditas nem lakott terület felett tortenik, a raketak vissza tudnak terni
- Nagy, addig nem hasznalt terület es jo szallitasi infrastruktura
 - Kikotok, vasuthalozat
- Biztonsag a Legiero jelenlete miatt (Cape Canaveral Air Force Base)



NASA KSC

1. NASA “CRAWLER TRANSPORTER” VAZSZERKEZET TORESMECHANIKAI ANALIZISE

BEVEZETES

TORTENET

- Crawler-eket 1965-ben gyártottak a Saturn V raketak mozgatására
- Az Apollo Program után az Ursiklok mozgatasat vegeztek
- A Crawler-Transporter 2 fontos resze az Artemis Programnak

KAROSODAS

- 2020-ban több, 5-20 inch meretu repedest talaltak a vazszerkezetben
- **Az Artemis Program kiszolgalasa erdekeben gyors javitasra volt szukseg**



<https://en.wikipedia.org/wiki/Crawler-transporter>



<https://www.flickr.com/photos/nasakennedy>

A CRAWLER TRANSPORTER FOBB JELLEMZOI

- 1972-ig az Apollo program alatt a Saturn V rakétát szállította az Összeszerelő Épület és a Kilóvállomás között, ezután az Űrsiklokat 1981-2011 között
- A legnagyobb saját hajtású jármű
- Fő szerkezeti anyag: ASTM A7 (1950-es acél hid szabvány)
- Negy lanctalpas tank
- Hibrid Hajtás: 2x 16 hengeres dízel motor, elektromos vegyhajtás
- Saját tömeg: 6 MIP (2700 tonna)
- Sebesség: ~ 1mph (~ 5 óra menetideje a Kilóvállomásig)
- Kapacitás:
 - 2016-ig: 12 MIP (5400 tonna)
 - 2016-os felújítását követően: 18 MIP (8200 tonna)



LEPESEK

Analizis es Tervezes Lepesei

- 1) A javitas korulmenyeinek meghatarozasa
- 2) A repedések keletkezese okainak feltarasa
- 3) A repedések helyenek megerositese



<https://phys.org/news/2014-02-image-crawler-transporter-milestone-nasa-kennedy.html>

VEGESELEM MODELL

- A “Tank” Vazszerkezetének Vegeselem Modellje
 - Repedes környezetben nagy felbontasu halo (“rozetta”)
 - Repedes kozepvonalaban fuggetlen csomopontok
 - Nemlinearis anyagmodell

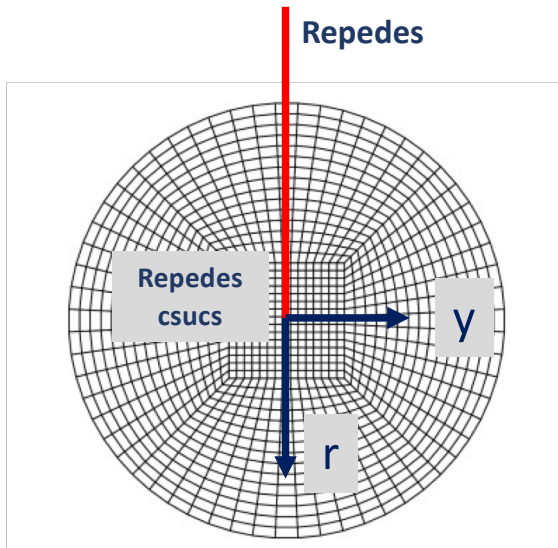


<https://www.flickr.com/photos/nasakennedy>

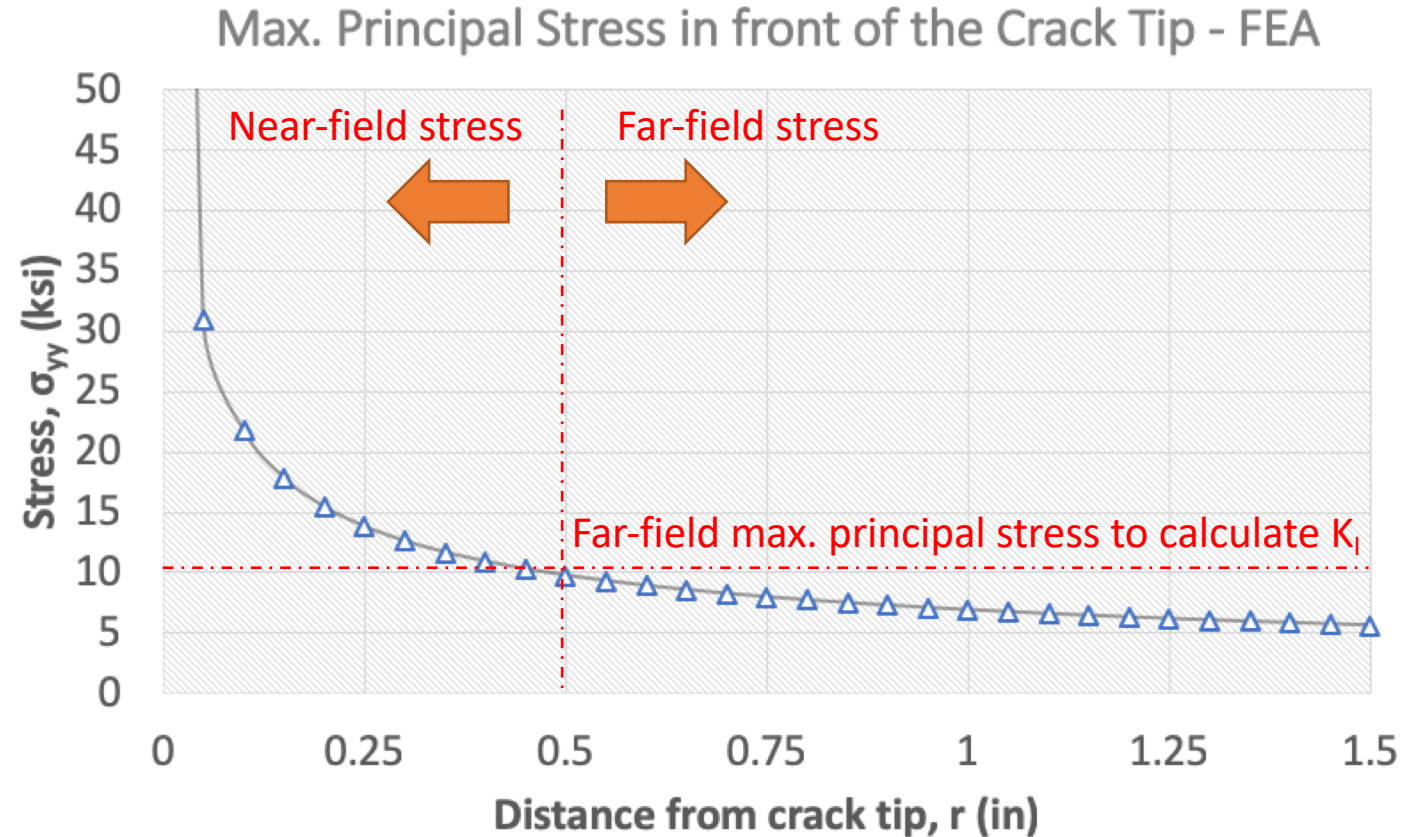
A REPEDES KORNYEZETENEK FESZULTSEG ANALIZISE

REPEDES STABILITASANAK VIZSGALATA

Halo “rozetta” a repedes körül:



Marshall Bern, Paul Plassmann: Handbook of Computational Geometry, 2000



For illustration purposes only. Data is arbitrary and does not reflect actual values generated during the project.

A REPEDES KÖRNYEZETENÉK FESZULTSEG ANALIZISE

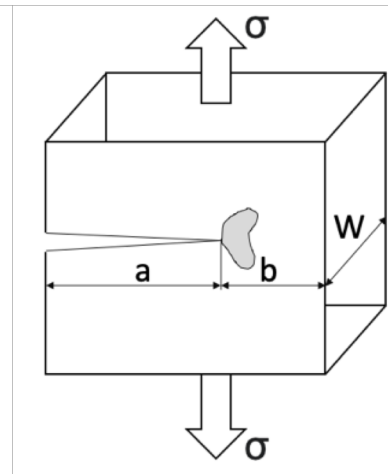
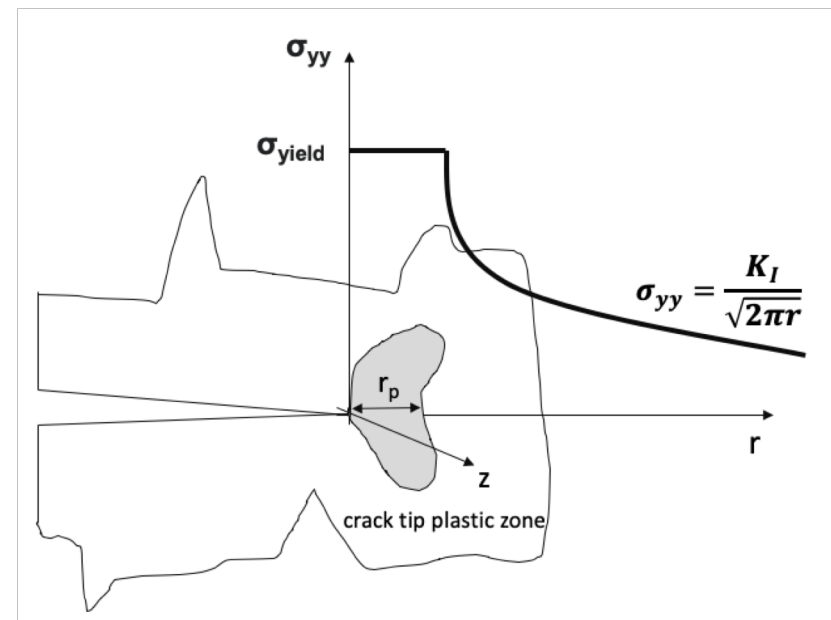
REPEDES STABILITASANAK VIZSGALATA

$$K_I = Q \sigma_{yy} \sqrt{\pi a} < K_{IC} \quad r_p^{max} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_{yield}} \right)^2$$

$$if: r_p^{max} < \frac{1}{10} a, b \rightarrow \text{LEFM}$$

$$\frac{r_p}{W} \geq 1 \quad \sigma_{ZZ} \approx 0 \quad \rightarrow \text{sikfeszultseg}$$

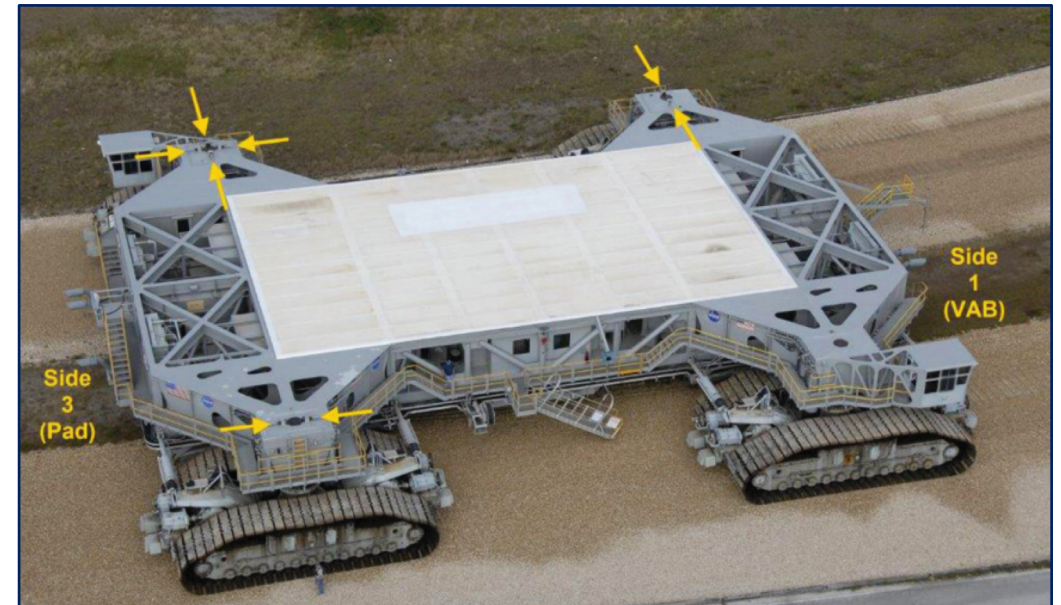
$$\frac{r_p}{W} < \frac{1}{10} \quad \sigma_{ZZ} \approx \nu(\sigma_{YY} + \sigma_{XX}) \quad \rightarrow \text{sikalakvaltozas}$$



ANALIZIS

REPEDESEK HATASA A GLOBALIS FESZULTSEG ELOSZLASRA

- Feszultseg mezok osszehasonlitasa repedessel es repedes nelkul
- Javitas korulmenyeinek meghatarozasa



https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/crawler-transporter2_factsheet_508compliant.pdf

ANALIZIS

- A teljes utvonal helyszini bejarasa (hangar bejarata, utkeresztezodesek, kilovoallomas)
 - Ezek mind terheles novekedest okoznak a vaszszerkezetben
- Vegeselemes szamitasok a repedes keletkezes feltarasara



<http://www.americaspace.com/>



<https://en.wikipedia.org/wiki/Crawlerway>

ANALIZIS

- A vegeselem modell es a megfelelo acelszerkezeti kodok felhasznalasaval megterveztuk a karosodott vazszerkezet erositeset
- **A megerositest kovetoen a Crawler Transporter intenziv terheles proban esett at es ujabb repedések megjelenése nem volt tapasztalható**
- **A terheles proba során a teljes tömeg = 25.8 MIP**
 - (**~12,000 tonna**)



<https://www.flickr.com/photos/nasakennedy>

MUNKAVEGZES COVID ALATT (2021)



NASA KSC

2. AZ ARTEMIS SLS RAKETA TARTOSZERKEZETENEK TERVEZESE

AZ SLS RAKETA TARTOSZERKEZETENEK TERVEZESE

- Az Space Launch System Raketa fő egysége ("Core Stage") Mississippi-ből hajóval szállítják a Kennedy Space Center-be
- A Kennedy Space Center-be érkezéskor a raketa hónapokig tart az Összeszerelő Épület ("VAB") Alacsony Hangárjában, mielőtt függőleges pozícióba emelik
- Ehhez a "fekvő" tároláshoz egy tartószerkezet tervezésére volt szükség



<https://spacenews.com/sls-core-stage-arrives-at-ksc-but-faces-challenging-schedule/>



<https://scitechdaily.com/first-massive-sls-rocket-core-stage-for-nasas-artemis-completed-and-loaded-for-transport/>

AZ SLS RAKETA TARTOSZERKEZETENEK TERVEZÉSE

- A kihívást a Raketa fő egység tömege okozta, amely jelentősen nagyobb mint bármi ami eddig a Összeszerelő Épületben megfordult
- A betonszerkezet és annak acél erősítése kisebb terhelesre volt tervezve
 - Közös munka az Építőmérnöki Osztallyal
 - Optimális felületi nyomásra



<https://www.spaceupclose.com/2021/05/nasas-1st-sls-core-stage-for-artemis-1-moon-mission-rolls-off-barge-into-vab-at-kennedy-space-center-photos/>



NASA/Kim Shiflett KSC-20210604-PH-KLS01_0088

KOZOS FOTO



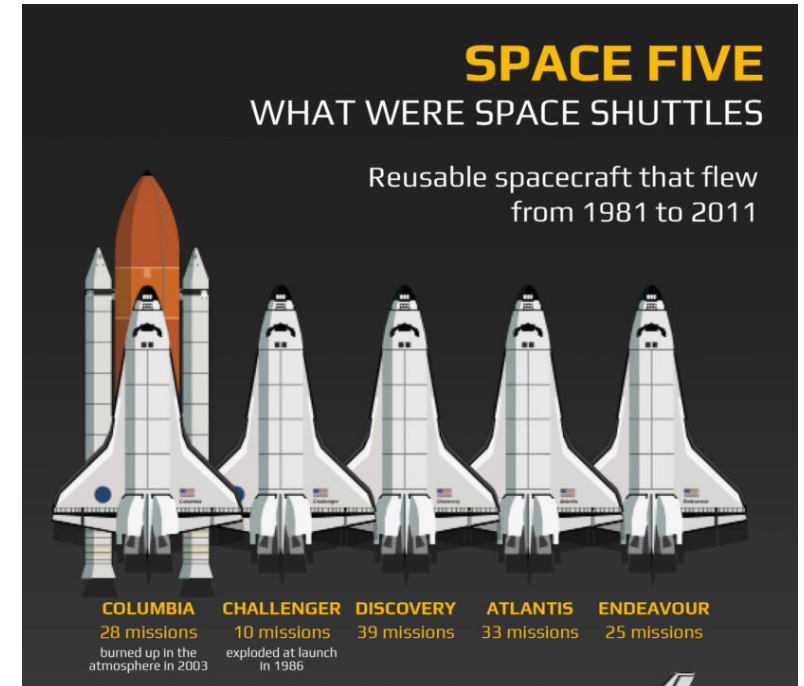
A NASA engedelyvel

NASA KSC

3. A CHALLENGER URSIKLO UTOLSO REPULESE

AZ URSIKLO PROGRAM

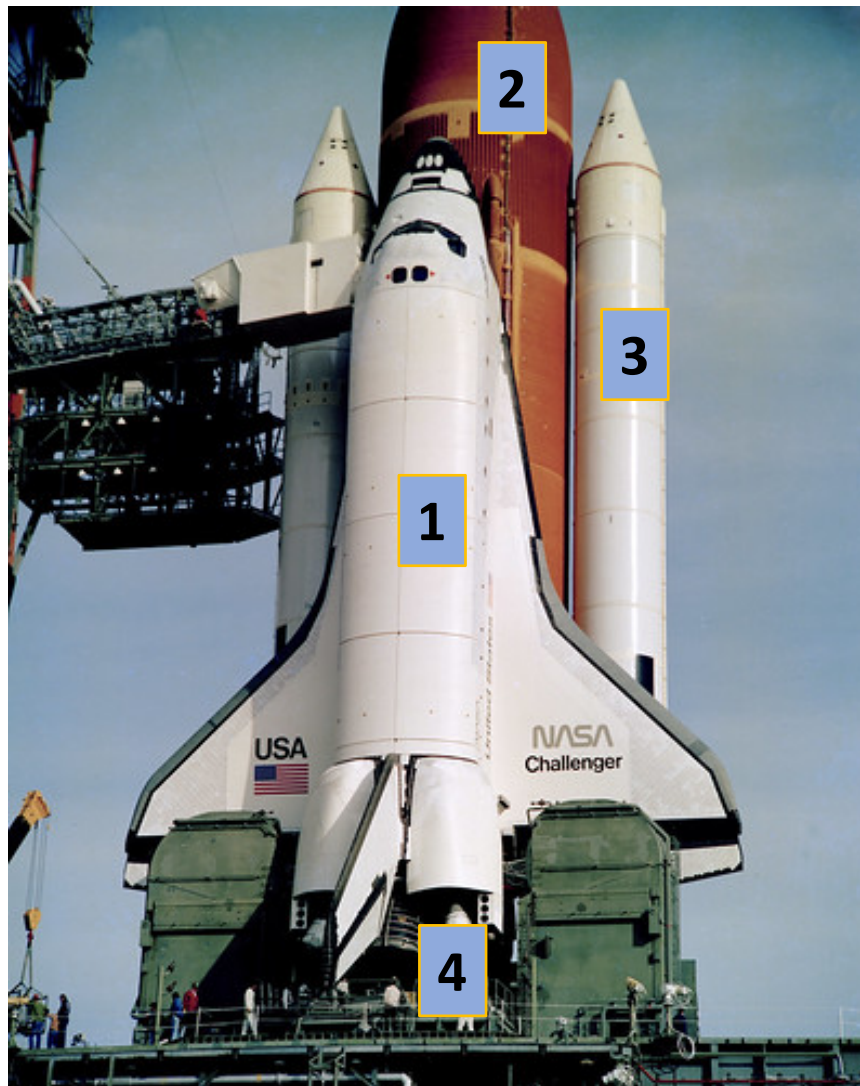
- 1981 – 2011
- Elso inditas: STS-1 Columbia, 1981
- Osszesen 135 inditas
- Legfobb eredmény a Nemzetkozi Urallomas megepitesi
- Balesetek:
 - 1986, Challenger
 - 2003, Columbia
- Utolso inditas: STS-135, Atlantis, 2011



<https://universemagazine.com/en/americas-winged-spacecraft-some-interesting-facts-about-the-shuttles/>

AZ URSIKLO FELEPITESE

1. Orbiter
 - Rockwell International, CA
2. Kulso uzemanyag tank
 - NASA/Lockheed, LA
3. Gyorsitoraketak
 - Morton Thiokol, UT
4. Fohajtomuvek
 - Rocketdyne, CA



AZ URSIKLO HAJTOMUVEK FOBB JELLEMZOI

1. Fohajtomuvek

- Toloero = 512,000 font (232 tonna)
- Egy hajtomu teljesitmenye ~12 millio loero
- Harom fo hajtomu = 13 Hoover Gat

2. Gyorsitoraketak

- Toloero = 2.7 millio font (1225 tonna)
- Egy gyorsitoraketa teljesitmenye ~22 millio loero
- Uzemanyag fogyasztas = 5500 font/masodperc (2.5 tonna /masodperc)
- Egy gyorsitoraketa 4 szegmensbol all, amelyek vonaton érkeznek a Kennedy Space Center-be es vertikalisan szerelik egymasba a Jarmu Osszeszerelo Hangarban (VAB)



ERDEKES ADATOK A URSIKLOROL

1. AZ URSIKLO TELJESITMENY ADATAI

- A ket gyorsitoraketa es harmo fohajtomu osszegzett teljesitmenye:
 - = 60,000 MW
- A kulso uzemenyagtankban es a gyorsitoraketakban levo hajtoanyag osszegzett energiatartalma:
 - = $\sim 60,000 \text{ MW} \times 125 \text{ mp} / 3600 \text{ mp} = 2083 \text{ MWh}$

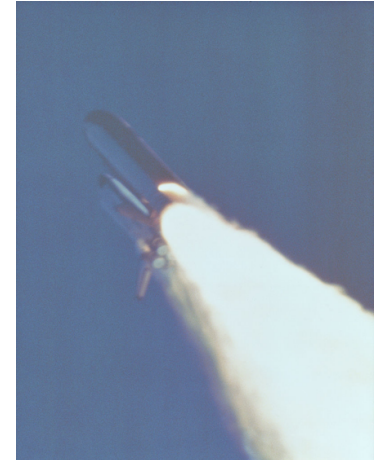
2. OSSZEHASONLITAS

- A ket gyorsitoraketa teljesitmenye:
 - = 14,600 vasuti mozdony teljesitmenyével, vagy
 - = 400,000 kozepes meretu személyauto teljesitmenyével
- Seattle varos atlagos teljesitmeny igenye, 2022-es adat:
 - = 1061 MW ($\sim 25500 \text{ MWh}$ napi fogyasztas)



A CHALLENGER BALESETE

- 1986 január 28-án a Challenger Ursiklo az indítást követő 73. másodpercben, 14 km magasságban az Atlanti Ocean felett felrobbant
- A fedélzeten lévő 7 asztronauta a robbanást túélte, a vízbe csapódás közben veszítettek életüket
- Az indítást nagy média érdeklődés követte a "Teacher in Space" Program miatt
 - A diákok nagy része előben nézte a közvetítést



NYOMAS A DONTESHOZOKON A 1/28.-I INDITASRA

HAROM OK AZ INDITASRA:

1. Folyamatos halasztás napok óta
 - Időjárás
 - Muszaki okok
2. “Teacher in Space Program”
 - Először civil asztronauta
 - “Ora az úrból”- meg egy nap késés miatt ez a program hetvégre került volna
3. Reagan elnök beszéde
 - A Január 28-i éves beszéde közben tervezett élő kapcsolás a Challenger-el



Christa McAuliffe, “Teacher in Space”

MI SZOLT AZ INDITAS ELHALASZTASA MELLETT?

HAROM OK AZ INDITAS ELHALASZTASARA:

1. Az O-gyuru tomitokepessege az elorejelzett kis homersekleten
2. A gyorsitoraketeak partra szallitast vegzo hajok 10 meteres hullamokat jelentettek, es az „eletukert kuzdottek”
3. A indito allomas kiszolgalo berendezesei nagyreszt le voltak jegesedve

Tul sok, addig ismeretlen korulmeny!



VIZSGALOBIZOTTSAG

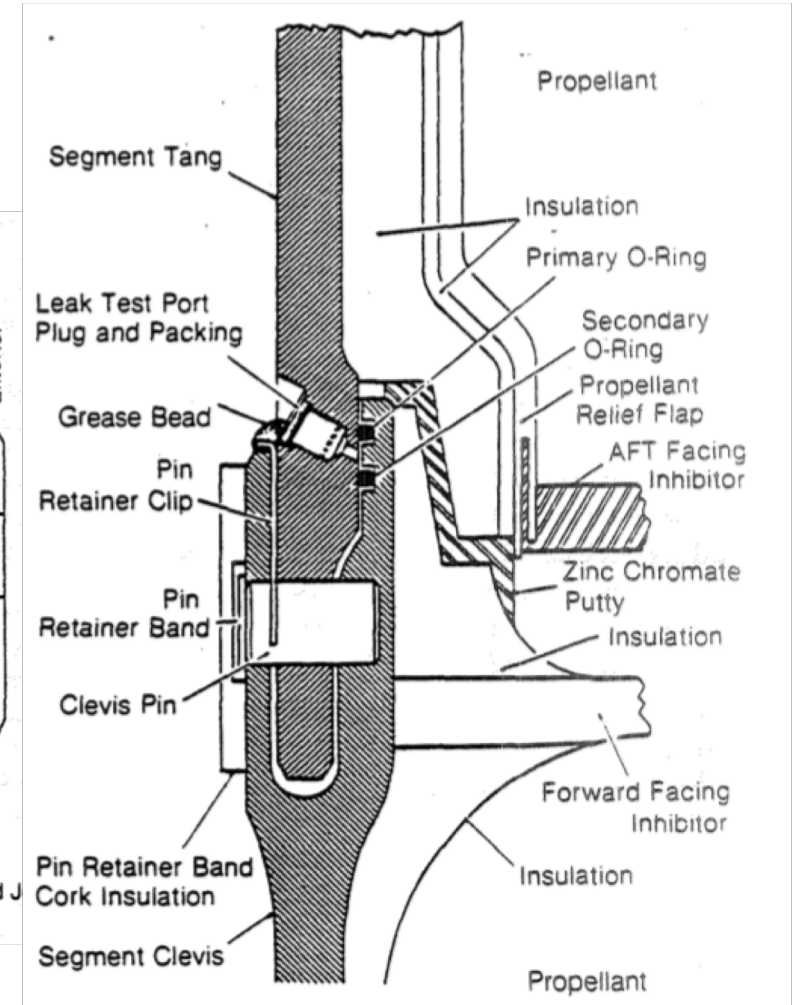
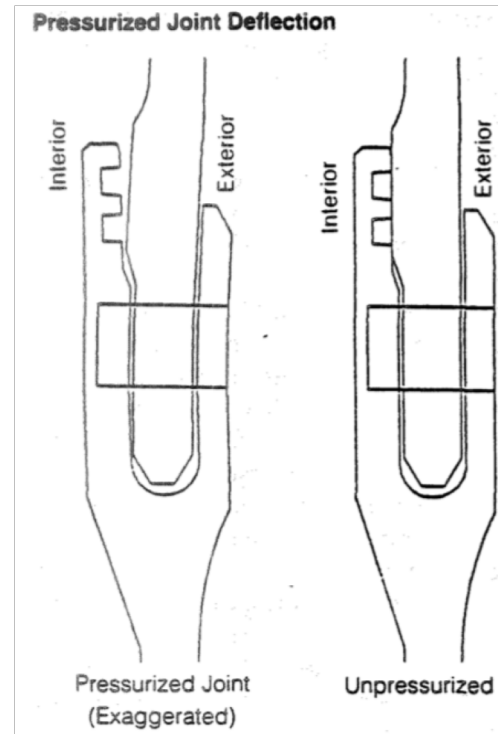
- Reagan elnök utasítására létrehoztak a baleset kivizsgálását végző bizottságot
 - Neves tagok:
 - Neal Armstrong
 - Richard Feynman



<https://animalia-life.club/qa/pictures/neil-armstrong-rogers-commission>

A GYORSITORAKETA TOMITESENEK TERVEZESI PROBLEMAI

- Radialis O-gyuruk a gyorsitoraketa szegmensek tomitesere
- Inditaskor a tomitofeluletek eltavolodnak
- Az O-gyuruk rugalmassagi es reologia tulajdonsagai meghatarozok a tomites szempontjabol
 - Ezek a tulajdonsagok jelentosen fuggnek a homerseklettol
 - **A Vizsgalobizottsag szerint ez a tervezesi hiba, a kis homersekletu uzemeltetessel parositva okozta a Challenger tragediat**



A DONTESHEZ VEZETO UT – ESEMENYEK AZ INDITAS ESTEJEN

FONTOS SZEREPEK:

ALLAN MCDONALD

A Gyorsitoraketa Program Szakmai Vezetoje, Morton Thiokol, UTAH

ROGER BOISJOLY

A Gyorsitoraketa Fomernoke, Morton Thiokol, UTAH

LARRY MULLOY

A Gyorsitoraketa Program Elnoke, NASA

JOE KILMINSTER

A Gyorsitoraketa Program Alelnoke, Morton Thiokol, UTAH



A DONTESHEZ VEZETO UT – ESEMENYEK AZ INDITAS ESTEJEN

A JANUAR 27-i MEGBESZELES A KILOVES ELHALASZTASAROL:

- Resztvevok: Morton Thiokol, NASA Marshall, NASA Kennedy
- Az előrejelzett hideg ido miatt a Morton Thiokol mernokok az inditas elhalasztasat javasoltak
 - A mernokseg javaslata szerint az O-gyurunek a homerseklete >53F kell legyen
 - Az előrejelzett homerseklet 30F volt
- A mernoki javaslatot a NASA vezetese nem fogadta el
 - Az adatok nem "konkluzivak"
 - A Morton Thiokol mernokokat arra kertek, hogy bizonyitsak a tomites meg fog hibasodni
 - Ez a forditottja annak a filozofianak, ami alapjan a mernoki munka zajlik; vagyis annak demonstralasa, hogy az uzemeltetes biztonsagos
- A Morton Thiokol vezetese ekkor arra kerte a fomernokot, hogy vegye le a "mernok kalapjat" es tegye fel a "menedzsment kalapjat"
 - EKKOR A KATASZTROFA ELKERULHETETLEN VOLT!



AZ ADATOK STATISZTIKAI ERTEKELESE

- A menedzsment a 6. abrat használta a döntéshez
 - Meghibasodott O-gyuruk szama a homerseklet fuggenyeben
 - Az abra a alapjan a donteshozok “nem-konkluzivnak” iteltek homerseklet fuggest
- A mernokok a 7. abrat hasznaltak a javaslatukhoz
 - Osszes vizsgalt O-gyuru szama a homerseklet fuggenyeben, belertve a meghibasodas nelkulieket is
 - A teljes adatsor egyertelmuen mutatja a tomites viselkedesenek homerseklet fuggeset
 - Nincs meghibasodas 75F felett
 - A legtöbb meghibasodas a legkisebb homersekleten (53F) volt

Statisztikai felkészületlenség vagy csusztatás?

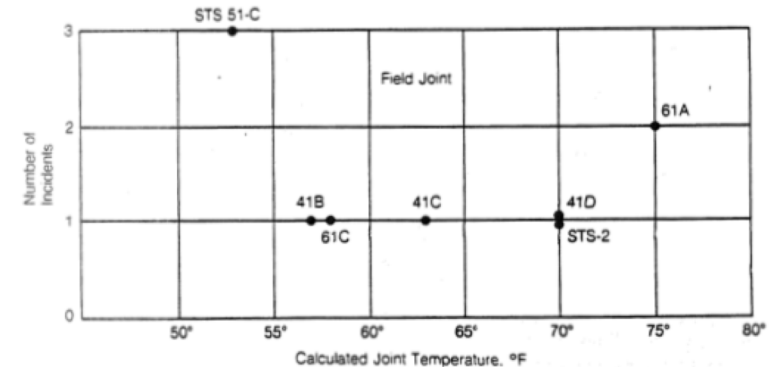


Figure 6
Plot of flights with incidents of O-ring thermal distress as function of temperature

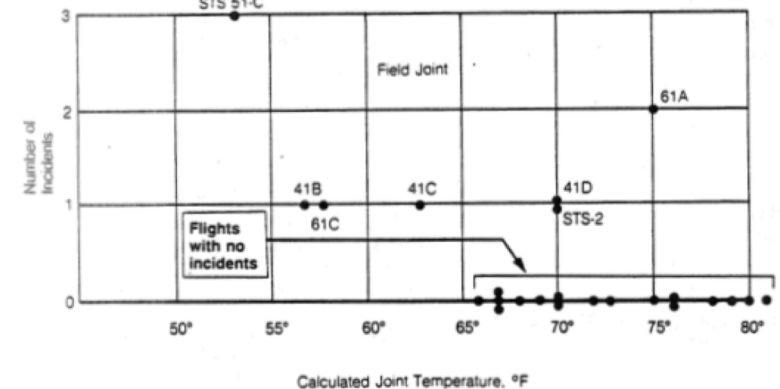


Figure 7
Plot of flights with and without incidents of O-ring thermal distress

NOTE: Thermal distress defined as O-ring erosion, blow-by, or excessive heating

AZ EREDETI MERNOKI JAVASLAT - ELHALASZTAS

- Az eredeti mernoki ajanlas szerint a homerseklet minimum 53F kell legyen
 - Ez volt legkisebb homerseklet korabbi inditaskor
 - O-gyuru erozio mar lathato volt

RECOMMENDATIONS :

° O-RING TEMP MUST BE $\geq 53^{\circ}\text{F}$ AT LAUNCH

DEVELOPMENT MOTORS AT 47° TO 52°F WITH
PUTTY PACKING HAD NO BLOW-BY
SRM 15 (THE BEST SIMULATION) WORKED AT 53°F

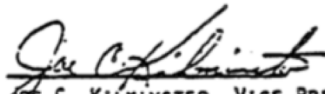
° PROJECT AMBIENT CONDITIONS (TEMP & WIND)
TO DETERMINE LAUNCH TIME

A MENEDZSMENT MODOSITOTT JAVASLATA - INDITAS

- NASA kerte a telefonkonferencian elhangzott javaslatot irasban, faxon, egy felelos vezeto alairasaval
 - Nem szokasos keres inditas elott, elso alkalom volt egy ilyen dokumentum igenyere
- Mcdonald nem volt hajlando alairni a javaslatot, ezert a fonokenek kellett ezt megtenni
 - “Mcdonald: Eletem legjobb dontese volt”
 - Mcdonald a bizottsagi ulesen elhangzott vallomasa utan el let mozditva a Thiokol munkakorebol
 - **Az egyetlen ember az USA torteneteben akit a Kongresszus allitott vissza a munkakorebe!**

MTI ASSESSMENT OF TEMPERATURE CONCERN ON SRM-25 (51L) LAUNCH

- 0 CALCULATIONS SHOW THAT SRM-25 O-RINGS WILL BE 20° COLDER THAN SRM-15 O-RINGS
- 0 TEMPERATURE DATA NOT CONCLUSIVE ON PREDICTING PRIMARY O-RING BLOW-BY
- 0 ENGINEERING ASSESSMENT IS THAT:
 - 0 COLDER O-RINGS WILL HAVE INCREASED EFFECTIVE DUROMETER ("HARDER")
 - 0 "HARDER" O-RINGS WILL TAKE LONGER TO "SEAT"
 - 0 MORE GAS MAY PASS PRIMARY O-RING BEFORE THE PRIMARY SEAL SEATS (RELATIVE TO SRM-15)
 - 0 DEMONSTRATED SEALING THRESHOLD IS 3 TIMES GREATER THAN 0.038" EROSION EXPERIENCED ON SRM-15
 - 0 IF THE PRIMARY SEAL DOES NOT SEAT, THE SECONDARY SEAL WILL SEAT
 - 0 PRESSURE WILL GET TO SECONDARY SEAL BEFORE THE METAL PARTS ROTATE
 - 0 O-RING PRESSURE LEAK CHECK PLACES SECONDARY SEAL IN OUTBOARD POSITION WHICH MINIMIZES SEALING TIME
- 0 MTI RECOMMENDS STS-51L LAUNCH PROCEED ON 28 JANUARY 1986
 - 0 SRM-25 WILL NOT BE SIGNIFICANTLY DIFFERENT FROM SRM-15


JOE C. KILMINSTER, VICE PRESIDENT
SPACE BOOSTER PROGRAMS

MORTON THIOKOL INC
Wasatch Division

Copy of telefax sent Kennedy and Marshall centers by Thiokol detailing the company's final position on the January 28 launch of mission 51-L.

ETIKAI PROBLEMAK

1. MERNOKI ETIKA. A mernokokat abba a helyzetbe kenyszerítették, hogy bizonyítsák a tomites meg fog hibasodni az adott homersekleten
 - Ez a megkozelites a pontos ellentete annak, ami a muszaki eletben megszokott
 - A mernok feladata, hogy demostralja az adott szerkezet uzemeltetese biztonsagos
 - *Pelda:*
$$Bizt, Tartalek = \frac{Megengedett\ ertek}{Uzemi\ szamitott\ ertek \times Bizt.Tenyezo} - 1 > 0.0$$
2. VALLALATI ETIKA. Az inditast megelőző megbeszelesen a Morton Thiokol vállalat vezetői engedtek a NASA nyomasanak, és arra kértek a mernokokat, hogy vegyék le a mernok “alapjukat”, és tegyék fel a menedzsment “alapjukat”, ezzel feladva eredeti javaslatukat az indítás elhalasztására
 - Ezt a mernokok nem tették meg, a javaslatot ennek ellenére a menedzsment megvaltoztatta, és engedelyezte az inditast a kis homerseklet ellenere

A “FEYNMAN KISERLET”

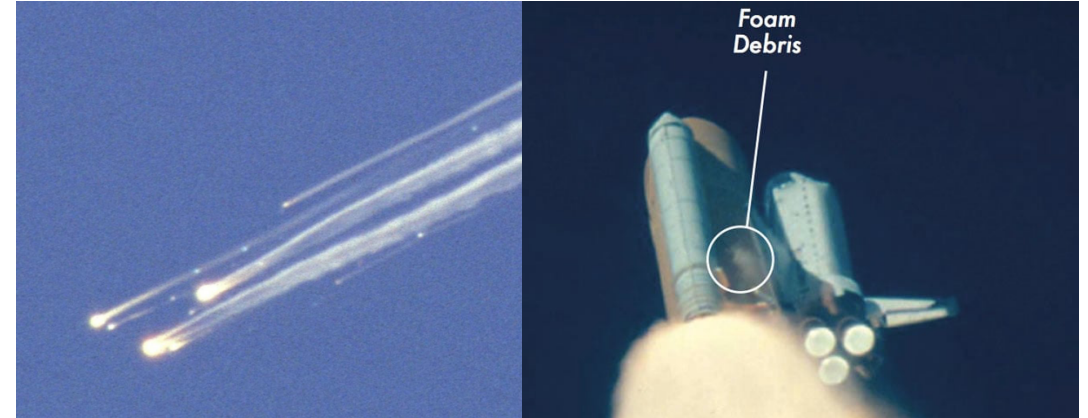
- A híres “Feynman kísérlet” a bizottsági ülésen
 - O-gyuruból kivett mintát jeges vízbe tett és menetes szorítóval eldeformálta
 - A jégből kiveve az O-gyuru minta alakja változatlan maradt
 - Ezzel az egyszerű kísérlettel demonstrálta, hogy az O-gyuru anyaga már 32F (0C) hőmérsékleten elvesztette a rugalmasságát, ezáltal a tömítő képességet
 - Az Challenger indításának reggelen <20F volt a hőmérséklet a Cape Canaveral-on!!



<https://x.com/PhysInHistory/status/1392005050625523716>

PAR SZO A COLUMBIA 2003-AS BALESETEROL

- 2003 február 1-en a Columbia Ursiklo az atmoszferaba valo visszatereskor elegett Texas felett
- A hibat egy inditaskor a szarnyhoz csapodo szigetelo hab darab okozta, amely a kulso tankrol levallva lyukat utott a szarny belepo elen
- Amikor a videofelveteleken ezt az inditast koveto nap felfedeztek, a mernokok muhold felveteleket kertek az Ursiklorol, ami el lett utasitva
- Szamitogepes szimulacio nem jelzett jelentos karosodast
- **- Megtortent a katasztrofa -**
- A kesobbi tesztek soran egy azonos meretu szigeteles darabot a szarny belepo elere lottek, ami jelentos lyukat utott a szerkezeten (jobbra)
 - Szamitogepes szimulacio bemeno adatai es feltetelezesei hibasak voltak!



PARHUZAM A CHALLENGER ES A CHERNOBYL BALESET KOZOTT

- A ket baleset emberisegre es a természetre gyakorolt hatasa nagyban kulonbozik
- A kivalto okokban azonban sok hasonlosag mutatkozik
 - Mindket technologia tervezesi hibaktol volt terhelt, amelyeket felelotlen dontesekkel azok biztonsagos hataran kivul uzemeltettek
- A ket technologiara a ket nagy szembenallo eszmerendszert kepviselo tomb egy-egy propagandat epitett fel, melyeknek 1986-ban a természet 3 honap kulonbseggel vetett vegett



FEYNMAN KRITIKAJA – ELNOKI BIZOTTSAGI JELENTES, “F” MELLEKLET

- BECSLESEK AZ URSIKLO KATASZTROFALIS BALESETE BEKOVETKEZESENEK ESELYERE:
 - $\sim 1/100$ – MERNOKOK
 - $\sim 1/10000$ – MENEDZSMENT

“For a successful technology, reality must take precedence over public relations, for nature cannot be fooled.”

*R. P. Feynman, Report of the PRESIDENTIAL COMMISSION on the Space Shuttle Challenger Accident
Volume 2: Appendix F - Personal Observations on Reliability of Shuttle*

“Egy technologia sikere erdekeben a realitas mindig elonyt kell elvezzen a kozvelemenyt kielegitesenek igenyével szemben, mivel az anyatermeszetet nem megteveszteni.”

Reszlet R. P. Feynman Bizottsagi Jelentesebol. A jelentes a 2. kotet F-mellekleteben szerepel. Sajat forditas.

SOSE VEDD LE A “MERNOKI KALAPOD”!

MINDIG ELLENORIZD A SZAMITASOK EREDMENYET!



 balazsfeketephd@gmail.com

 (510) 388 5749

 /in/balazs-fekete-phd

 https://scholar.google.com/citations?user=1n_DolQAAAAJ&hl=en

