



# FORGÓSZÁRNYAS 11 REPÜLŐGÉPEK

Gausz Tamás  
Budapest, 2014



## Figyelem:

A következő képeken  
közölt ismeretek az  
előadásokon  
elhangzottakkal együtt  
képeznek  
érthető és tanulható  
egységet!

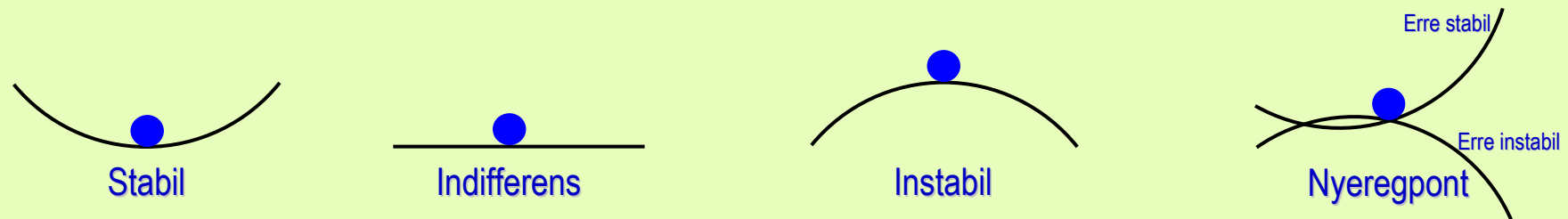




## Statikai és dinamikai stabilitás

A stabilitás egy egyensúlyi helyzet tulajdonsága (adott esetben általánosított egyensúlyi helyzetről beszélünk – ilyen pl. a rotorlapátok csapkodó mozgása, melynek szintén vizsgálendő a stabilitása).

A stabilitás lehet „statikai” és „dinamikai”. A statikai stabilitás esetében azt vizsgáljuk, hogy egy, elképzelt zavarásra mi a várható válasz: ha a válasz a zavarást csökkenteni igyekszik, akkor statikai stabilitásról, ha növelni igyekszik akkor statikai instabilitásról, illetve ha sem csökkenteni sem növelni nem igyekszik, akkor indifferenciáról beszélünk.



A stabilitást a repülőgép (helikopter) repülési állapotát meghatározó valamennyi un. állapot-változó szerint kell és lehet vizsgálni → gyakran előfordul, hogy valamely változók szerint stabilitást, más változók szerint instabilitást tapasztalunk (nyeregpont).

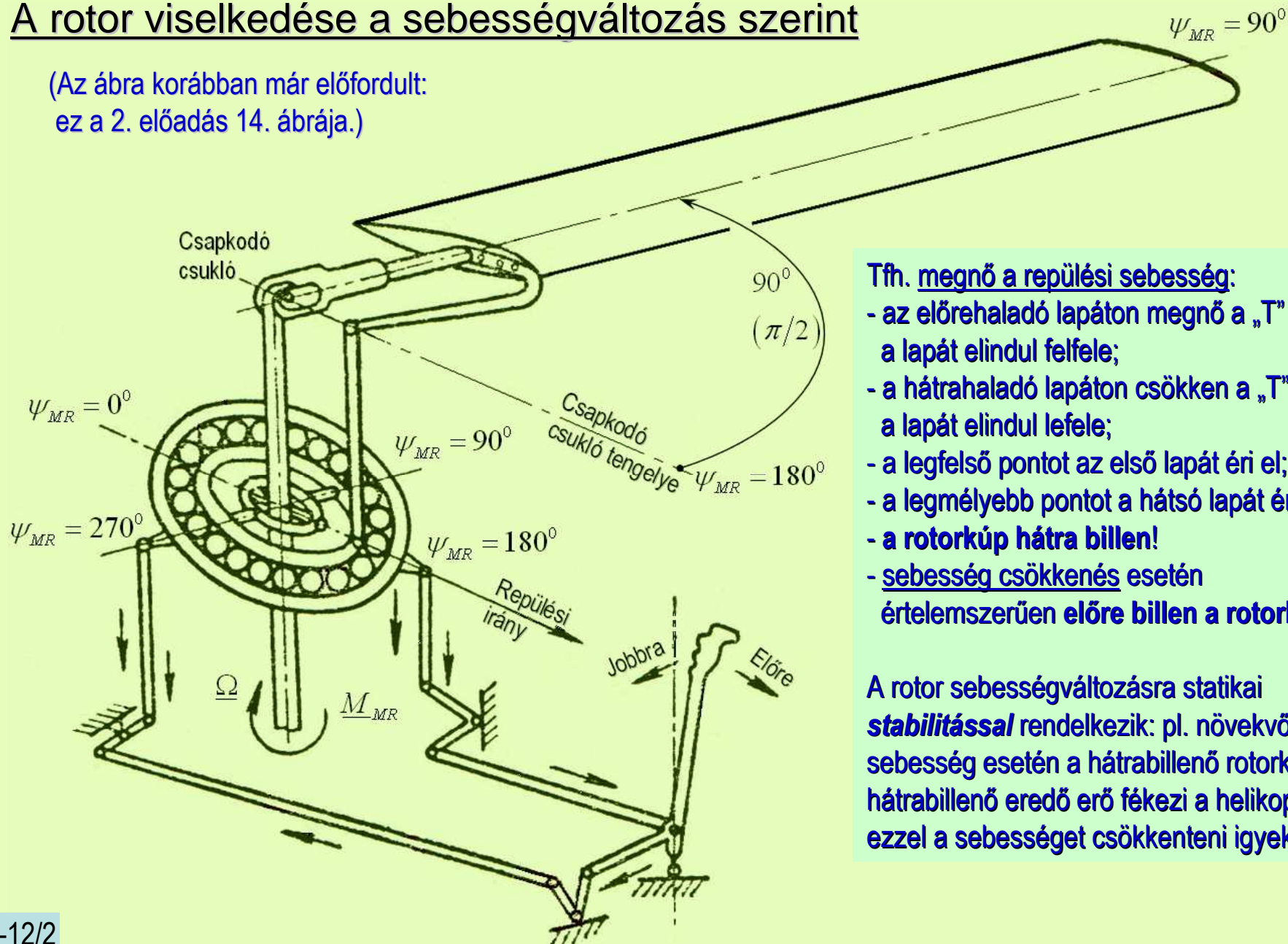
A dinamikai stabilitás – pl. Ljapunov féle értelemben tekintett aszimptotikus stabilitás – azt jelenti, hogy a tényleges megzavarás után a repülőgép, helikopter (általában rendszer) periodikusan vagy aperiodikusan közeledik az eredeti egyensúlyi állapothoz (és végtelen idő múlva éri el pontosan azt). Az általánosított egyensúlyi helyzetek esetében a Poincaré féle stabilitás vizsgálatot szokás elvégezni. A kezdeti zavarás – nyilvánvalóan – csak akkora lehet, hogy ne hagyjuk el a vizsgált egyensúlyi állapot vonzáskörzetét!

**A statikai stabilitás a dinamikai stabilitás szükséges, de nem elégséges feltétele!**



## A rotor viselkedése a sebességváltozás szerint

(Az ábra korábban már előfordult:  
ez a 2. előadás 14. ábrája.)



Tfh. mező a repülési sebesség:

- az előrehaladó lapáton mező a „T” erő, a lapát elindul felfele;
- a hátrahaladó lapáton csökken a „T” erő, a lapát elindul lefele;
- a legfelső pontot az első lapát éri el;
- a legmélyebb pontot a hátsó lapát éri el;
- **a rotorkúp hátra billen!**
- sebesség csökkenés esetén értelemszerűen **előre billen a rotorkúp!**

A rotor sebességváltozásra statikai **stabilitással** rendelkezik: pl. növekvő sebesség esetén a hátrabilenő rotorkúpon hátrabilenő eredő erő fékezi a helikoptert, ezzel a sebességet csökkenteni igyekeznek.

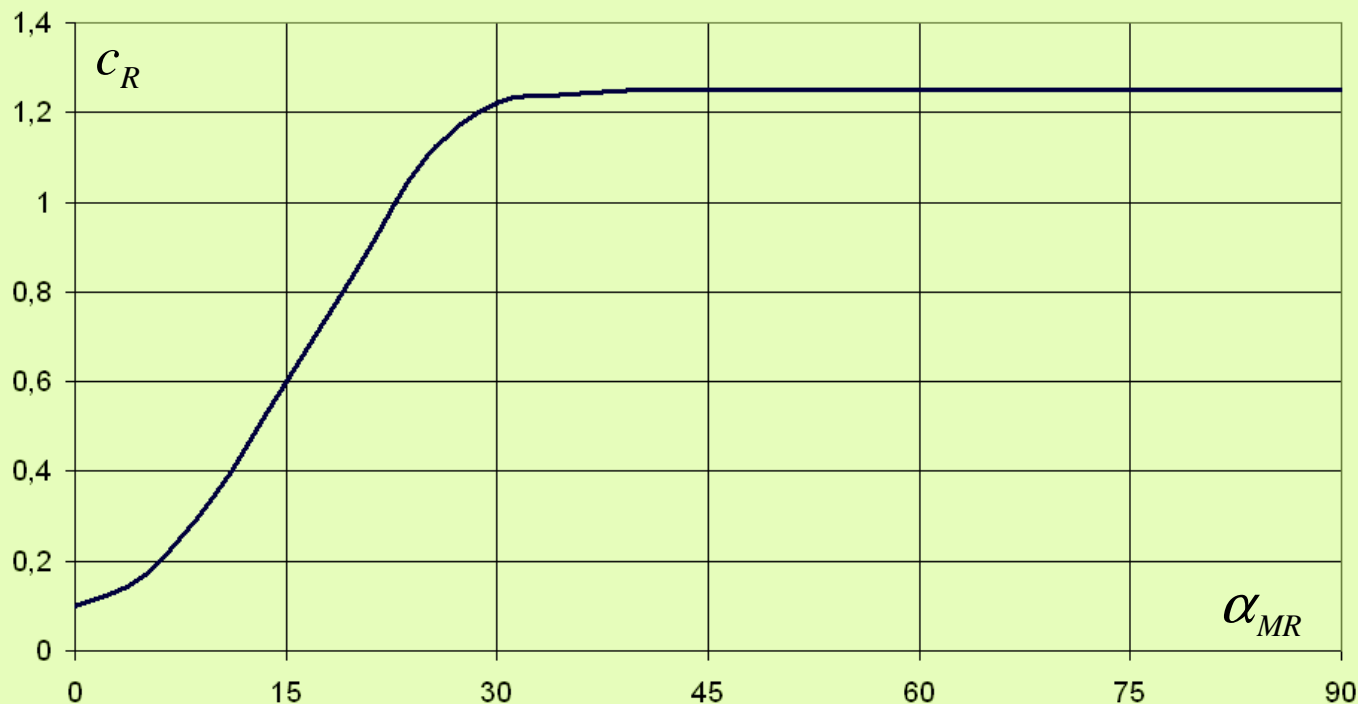






## A rotor viselkedése az állásszög változás szerint

A PCA-2 típusú autogíró rotorjának eredő-erő-tényező változása a rotor-állásszög függvényében (NACA mérés):



A rotor-állásszög itt  
– ahogyan  
az autogíróknál  
lennie kell  
– pozitív.

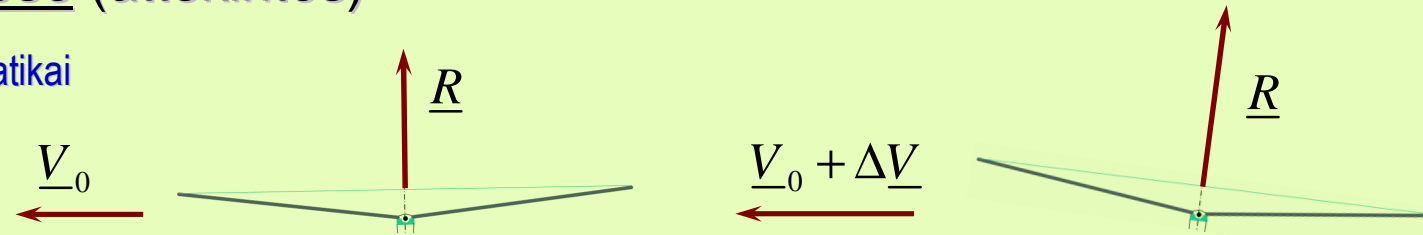
Az ábra mutatja, hogy a rotoron keletkező eredő erő, a rotor-állásszög függvényében, növekvő állásszög esetén (kb. 30 fokos állásszögig) növekszik, ezután nagyjából állandó. Ezek szerint forgószárnyaknál nem jön létre átesés.

Az eredő erő-tényező meredeksége 10 és 25 fok között 2.865 [1/rad], ez a meredekség például a szárnyprofilok felhajtóerő tényezőjének meredekségével (kb. 6.28) vethető össze.



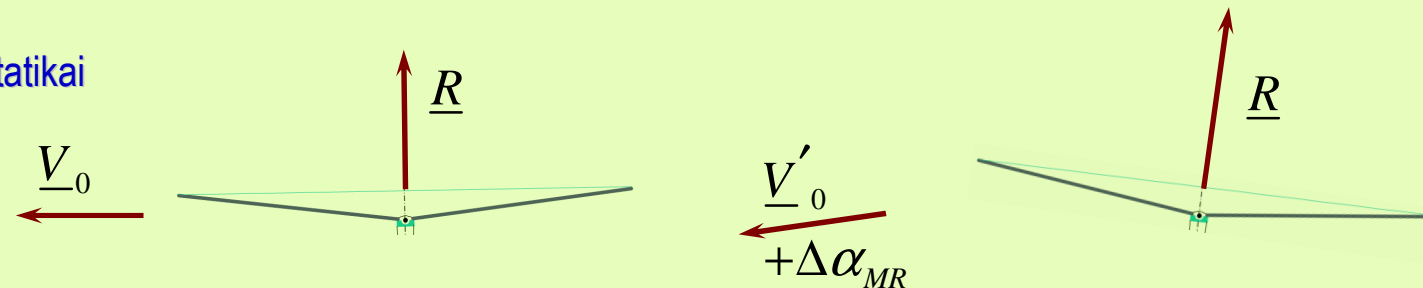
## A rotor viselkedése (áttekintés)

A sebesség szerinti statikai stabilitás:



Tfh. megnő a sebesség: a rotorkúp hátra (és oldalt) billen  $\rightarrow$  az eredő erő hátra billen, fékez. A sebesség csökkenés értelemszerűen az előrebillenő eredő erő miatt gyorsító hatást eredményez.

Az állásszög szerinti statikai instabilitás:



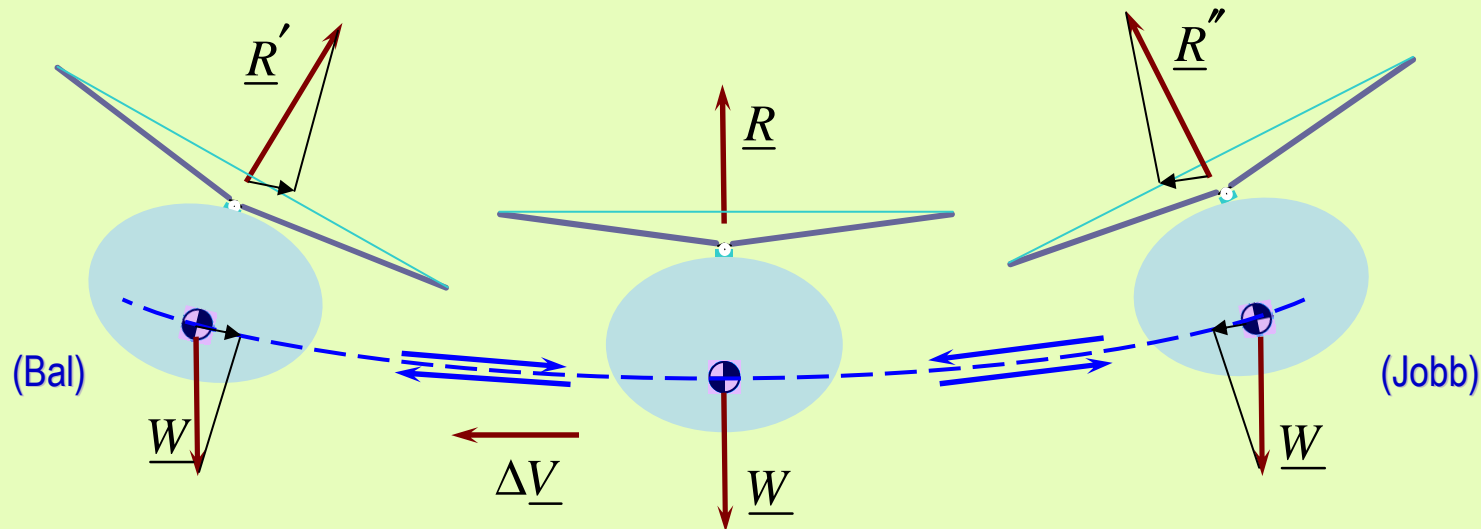
Tfh. megnő az állásszög: a rotorkúp hátra (és oldalt) billen  $\rightarrow$  ez további állásszög növekedést jelent. Az állásszög csökkenés értelemszerűen további állásszög csökkenést indít.

Az eredő erő ( $\underline{R}$ ) – ha megnő a sebesség vagy az állásszög – a szárnyak viselkedésével egyezően valamilyen mértékben megnő.

Összefoglalva: sebesség növekedés  $\rightarrow$  állásszög növekedés + eredő erő növekedés;  
állásszög növekedés  $\rightarrow$  további állásszög növekedés + eredő erő növekedés;  
sebesség csökkenés  $\rightarrow$  állásszög csökkenés + eredő erő csökkenés;  
állásszög csökkenés  $\rightarrow$  további állásszög csökkenés + eredő erő csökkenés.



## A helikopter stabilitása lebegésben

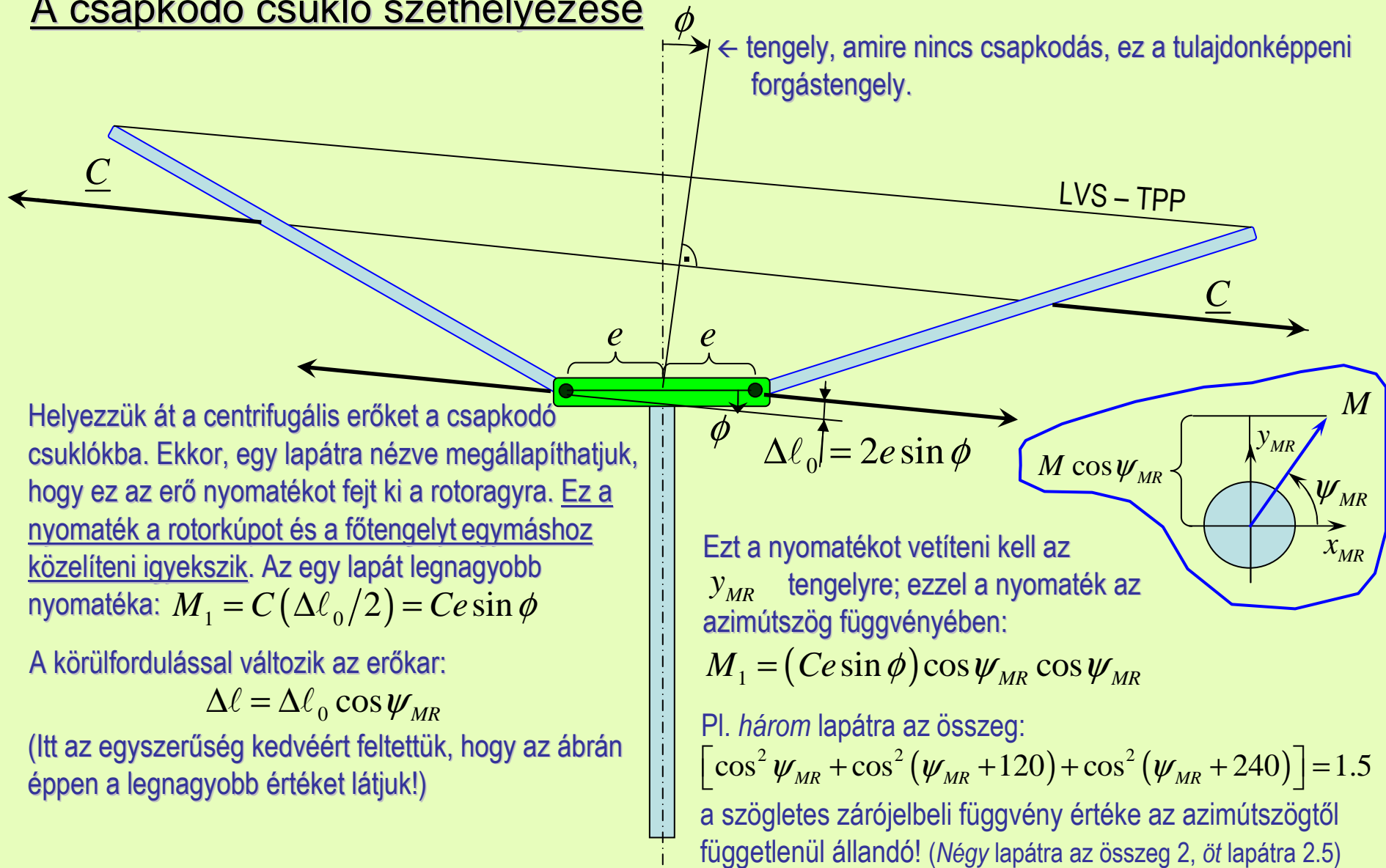


A helikopterek és az autogírók un. statikai ingastabilitással rendelkeznek: az eredő erő ( a „felfüggesztés” ) általában viszonylag magasan a súlypont felett hat. Amennyiben van repülési sebesség, akkor a csillapító felületeken keletkezik csillapító légerő, ez a stabilitási viszonyokat javítja. A helikoptereknél a lebegés a leginkább kritikus állapot.

Ha valamely zavarás következtében a lebegő helikopter kilendül pl. balra, akkor a megnövekvő sebesség miatt a rotorkúp jobb felé megdől. Emiatt megnő a rotor-állásszög és megnő, illetve jobb felé megdől az eredő erő ( $\underline{R}'$ ). A súlypont pályája tehát kissé emelkedik. A szélső helyzetből a megdőlt rotorerő és a súlyerő pályairányú összetevője egyaránt jobb felé gyorsítja a helikoptert, amely – ha nem kormányozzák – túllendül az egyensúlyi helyzeten és eléri a jobb szélső helyzetet. Innen – ismét az eredő erő és a súlyerő együttes hatására – visszalendül a helikopter. Ez a folyamat kormányzás nélkül dinamikailag instabil, a lengés amplitúdója egyre növekszik. Problémát okoz még az is, hogy a lengésidő az ember reakcióidejének közelébe esik – ezt a problémát megfelelő módon kezelni kell.



## A csapkodó csukló széthelyezése



Helyezzük át a centrifugális erőket a csapkodó csuklókba. Ekkor, egy lapátra nézve megállapíthatjuk, hogy ez az erő nyomatékot fejt ki a rotoragyra. Ez a nyomaték a rotorkúpot és a fő tengelyt egymáshoz közelíteni igyekszik. Az egy lapát legnagyobb nyomatéka:  $M_1 = C(\Delta l_0/2) = Ce \sin \phi$

A körfordulással változik az erőkar:

$$\Delta l = \Delta l_0 \cos \psi_{MR}$$

(Itt az egyszerűség kedvéért feltettük, hogy az ábrán éppen a legnagyobb értéket látjuk!)

Ezt a nyomatékot vetíteni kell az  $y_{MR}$  tengelyre; ezzel a nyomaték az azimútszög függvényében:

$$M_1 = (Ce \sin \phi) \cos \psi_{MR} \cos \psi_{MR}$$

Pl. három lapátra az összeg:

$$\left[ \cos^2 \psi_{MR} + \cos^2 (\psi_{MR} + 120) + \cos^2 (\psi_{MR} + 240) \right] = 1.5$$

a szögletes zárójelbeli függvény értéke az azimútszögtől függetlenül állandó! (Négy lapátra az összeg 2, öt lapátra 2.5)

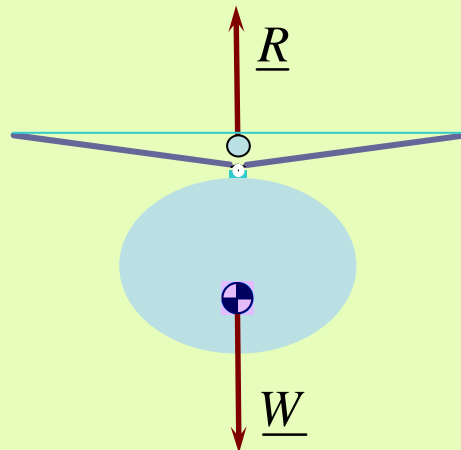


## A csapkodó csukló széthelyezésének hatása

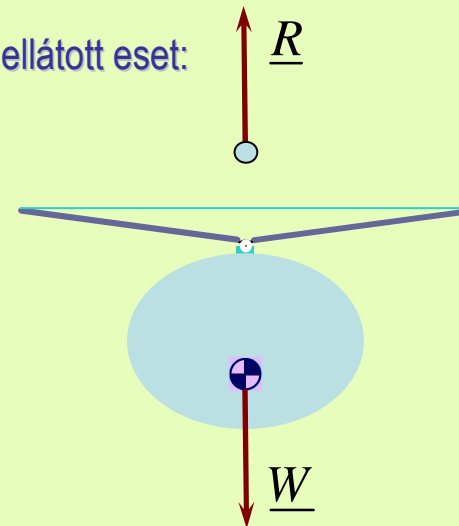
A csapkodó csukló széthelyezése következtében – ha a rotorkúp valamerre megdől – a lapátok centrifugális erejéből következő nyomaték a rotorkúpot és a főtengelyt egymáshoz közelíteni igyekszik, azaz csökkenteni igyekszik a kúp dőlését. Szerencsés módon a három vagy többlapátos rotorok esetében ez a csökkentő hatás nem függ a lapátok által elfoglalt azimút helyzettől, tehát nem gerjeszt lengést.

Tekintsük a korábban vizsgált lebegést. A valamely megzavarás hatására kilendülő helikopter főrotorjának lapátvég-síkja – széthelyezett csapkodó csukló esetén – csökkenti a rotorkúp dőlését, ezzel csökkenti a visszahúzó erőt (6. dia). A csökkenő visszahúzó erő miatt növekszik a lengésidő és ez pontosan az, amire szükség van: ezen a módon lehet a lengésidőt a repülőgévezető számára megfelelő, elfogadható értékre növelni.

Csapkodó csukló nélküli eset:



Csapkodó csuklóval ellátott eset:



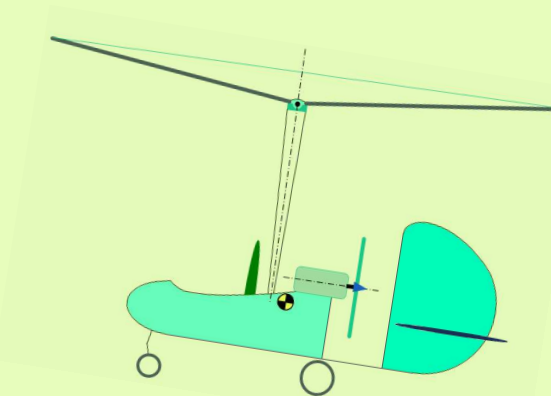
A csapkodó csukló hatását – szemléletesen – a felfüggesztési pont (  $\circ$  ) magasabbra helyezésével szokás közelíteni. Az inga hosszának növekedésével a lengésidő is növekszik.

Modern, elektronikus repülés-szabályozó rendszerek alkalmazása esetén a kérdés jelentősége csökken. Illetve a korai, pörgettyús rotorvezérlési rendszerek is a rotorkúp dőlését befolyásolták (kb. szüntették meg) és ezen a módon járultak hozzá a helikopterek elfogadható kormányozhatóságához.



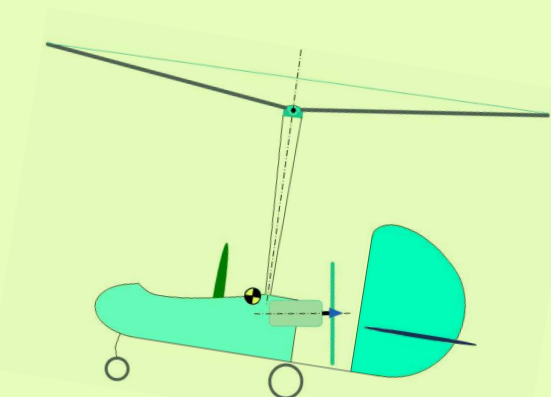
## Autogíró statikai hosszstabilitása (alapszintű magyarázat)

Napjaink gyakorlata szerint alapvetően kétféle elrendezés létezik:



Alacsony súlypontú (Low profile) elrendezés, ekkor a rotor-erő a súlypont előtt, a motor tolóereje pedig a súlypont felett hat. Ez az elrendezés szükséges a nyomatéki egyensúlyhoz.

A motor-légcsavar elhelyezése szempontjából ezt az elrendezést könnyebb kialakítani, ugyanakkor ez az elrendezés az állásszög szerint statikailag jelentős mértékben instabil.



Magas súlypontú (High profile) elrendezés, ekkor a rotor-erő a súlypont mögött, a motor tolóereje pedig a súlypont alatt hat. Ekkor ez az elrendezés szükséges a nyomatéki egyensúlyhoz.

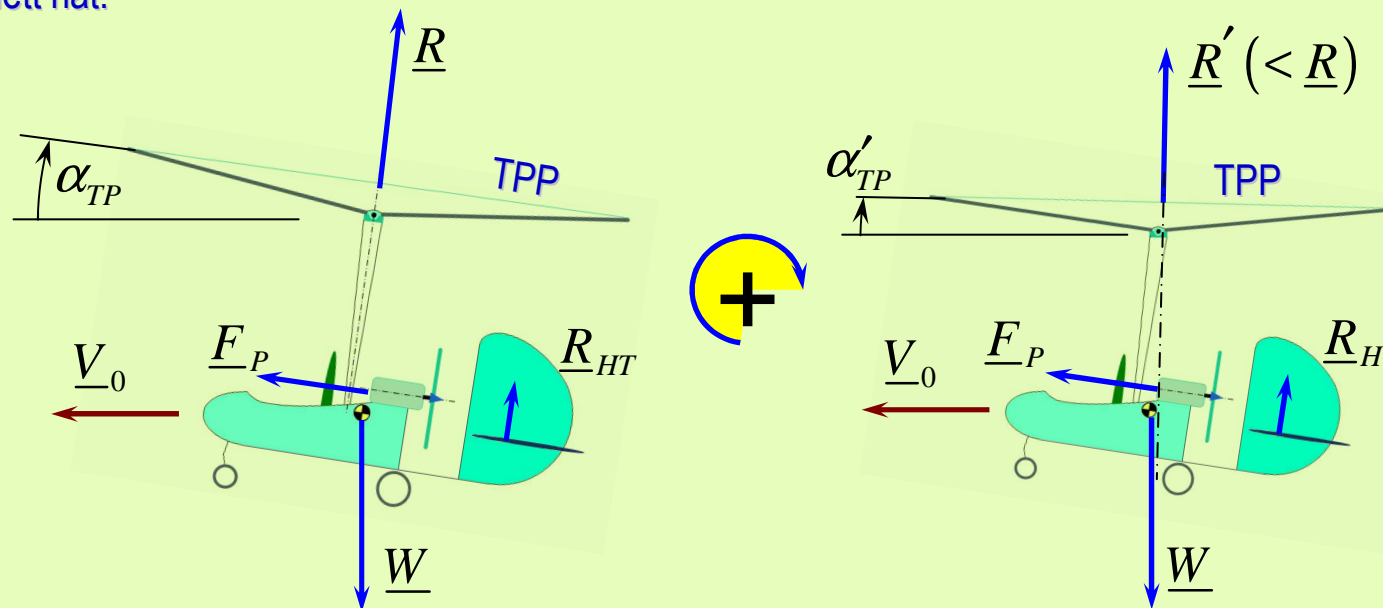
A motor-légcsavar elhelyezése szempontjából ezt az elrendezést nehezebb kialakítani, ugyanakkor ez az elrendezés az állásszög szerint statikailag kevésbé instabil, esetleg stabil is lehet.

A statikai stabilitás általában nem követelmény és nem feltétlenül előny – gondolhatunk pl. az álló vagy gyalogló emberre: ez általában nem igényel különösebb „odafigyelést”, mégis jól kontrollált mozgás. A túl nagy stabilitás pedig veszélyes is lehet! A repülésben (is) a kormányozhatóság a fontos, annak kell megfelelőnek, a pilóta számára legalább elfogadhatónak lennie!



## Autogíró statikai hosszstabilitása (alacsony súlypontú eset)

Alacsony súlypontú (Low profile) elrendezés, ekkor a rotor-erő a súlypont előtt, a motor tolóereje pedig a súlypont felett hat.



Rotorlapátvég-sík (Tip-Path-Plane) → TPP

Induljunk ki egy egyensúlyi állapotból (bal oldali ábra): a rotor eredő erejének ( $R$ ) pozitív nyomatékát a légcsavar tolóerejének ( $F_P$ ) és a vízszintes csillapító felületen keletkező erőnek ( $R_{HT}$ ) a negatív nyomatéka kiegyenlíti. (A törzs légellenállásának hatását elhanyagoljuk.) Vagyis erő- és nyomatéki egyensúly van.

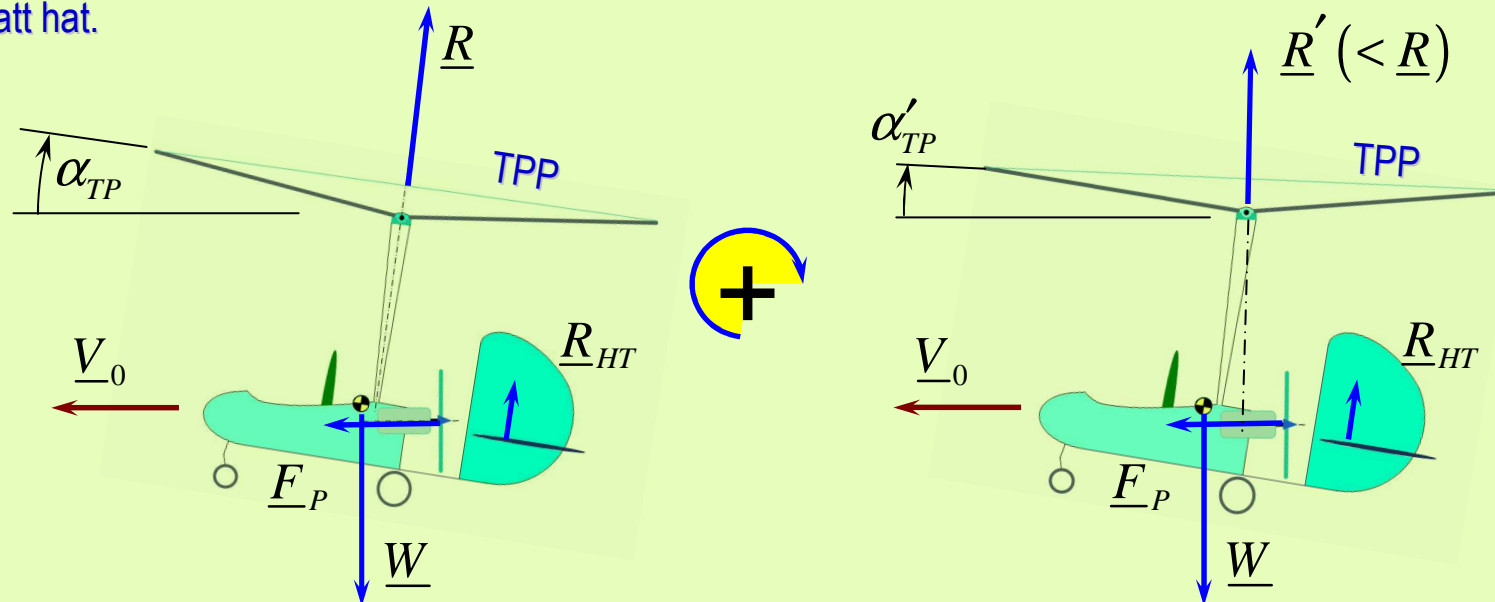
Tegyük fel, hogy a rotorlapátvég-sík valamilyen ok miatt (pl. légköri turbulencia) előre billen ( $\alpha'_{TP} < \alpha_{TP}$ ) – ekkor a rotoron keletkező eredő erő (ez az erő a rotorlapátvég-síkra kb. merőleges) is előre billen és csökken – jobb oldali ábra. Ekkor a nyomatéki egyensúly megszűnik: az ábra szerinti esetben csak negatív nyomaték ébred – a gép intenzív orra-billenésbe kezd. Ez további rotorlapátvég-sík állásszög csökkenéshez vezet, ez tehát statikailag instabil repülési állapot. Ebben az esetben (nagyon) határozott botkormány húzásra van szükség, amellyel a zuhanás elkerülhető. Gázadással a repülési helyzet csak rontható (PPO – Pilot Push Over).





## Autogíró statikai hosszstabilitása (magas súlypontú eset)

Magas súlypontú (High profile) elrendezés, ekkor a rotor-erő a súlypont mögött, a motor tolóereje pedig a súlypont alatt hat.



Induljunk ki egy egyensúlyi állapotból (bal oldali ábra): a rotor eredő erejének ( $\underline{R}$ ) pozitív nyomatékát a légsavár tolóerejének ( $\underline{F}_P$ ) és a vízszintes csillapító felületen keletkező erőnek ( $\underline{R}_{HT}$ ) a negatív nyomatéka kiegyenlíti. (A törzs légellenállásának hatását elhanyagoljuk.) Vagyis erő- és nyomatéki egyensúly van.

Tegyük fel, hogy a rotorlapátvég-sík valamilyen ok miatt (pl. légköri turbulencia) előre billen ( $\alpha'_{TP} < \alpha_{TP}$ ) – ekkor a rotoron keletkező eredő erő (ez az erő a rotorlapátvég-síkra kb. merőleges) is előre billen és csökken – jobb oldali ábra. Ekkor a nyomatéki egyensúly (elvileg) megszűnik, a rotorerő karja nő, de maga az erő csökken – e két változás viszonyától függően kisebb mértékű orrleadó, de akár orremelő nyomaték is keletkezhet. Ez utóbbi esetben statikai stabilitás lesz, de a legrosszabb esetben is jóval kisebb a negatív nyomaték, mint az alacsony súlypontú esetben. A gázadás pedig orremelő nyomatékot jelent, tehát segít kiemelni a gépet a zuhanásból.



## Autogíró statikai hosszstabilitása

Az előző megfontolások alapján megállapítható tehát, hogy a magas súlypontú autogíró általában barátságosabb repülési tulajdonságokat mutat. Illetve az alacsony súlypontú gépek vezetése – adott esetben – jóval nagyobb odafigyelést, gyakorlatot igényel.

Az előbbieken nem foglalkoztunk a vízszintes csillapító felülettel, mivel feltettük, hogy az első pillanatban csak a rotorkúp billen, a csillapító körüli áramlási viszonyok – első közelítésben – nem változnak. Azonban, különösen az alacsony súlypontú elrendezés esetén a vízszintes csillapító felület rendkívül fontos, mivel akadályozza az intenzív orra billenést és ezzel a gyakran katasztrófához vezető zuhanás kialakulását. Nyomatékosan kijelenthető tehát, hogy alacsony súlypontú autogírót vízszintes vezérsíkkal kell ellátni!



**Köszönöm**  
**a**  
**figyelmet!**