

Kísérleti eljárások alkalmazása a tervezés folyamatában

Borbás Lajos Ph.D.

c. egyetemi tanár

borbas@kge.bme.hu,
borbas.lajos@edutus.hu

BME

Jármű és Szerkezet analízis Tanszék,

EDUTUS Főiskola

Műszaki Intézet Tatabánya (MIT)

2014. február 28.

Historical thought I

Historical thought II

*It is a fact that Galilean science
(observation and deduction), not
Aristotelian logic and metaphysics, made
our material civilization what it is.*

*E.T. Bell, in
"The Development of Mathematics", 1943*



“...Gépalkatrészek *megbízhatóságának* *növelése*, *meghibásodási valószínűségének csökkentése* a géptervezők egyik legfontosabb feladata.

A meghibásodás kockázatának csökkentésében szerepet játszó okok és tényezők figyelembevételére a tervezés lehető legkorábbi fázisában (fázisaiban) indokolt, hiszen a tervezés késői szakaszában, vagy már a gyártásnál feltárt problémák korrekciója sokkal bonyolultabb...” *1.)

*1.) **A. FREDDI** (DIEM Bologna University)

IX. Danubia-Adria Symposium, Trieste, 1992. Proceedings p.:1...20.

A Tervező / Fejlesztő

minden olyan lehetséges eljárást, elméleti számítást, modell vizsgálatot, laboratóriumi ellenőrzést figyelembe kell veyen a tervezés fázisában, melyek eredményeként a tervezett szerkezet élettartama növelhető (tervezési szinten tartható), a meghibásodás valószínűsége csökkenthető.

Részletes tartalom

Bevezetés

A tervezési folyamat célja

Tervezés metodológiája

Mérési eljárások osztályozása

Megjegyzések a mérési eljárások kiválasztásához

Mérések helye, szerepe a tervezési folyamatban

Optikai feszültségvizsgálat alapjai

Feszültségoptika berendezési, műszerei

Modell vizsgálatok (fringe pattern and isoclinic analysis)

3D vizsgálat síkfeszültségi modell vizsgálaton alapulva

Törésmechanikai vizsgálatok modelleken történő mérések alapján

Valós szerkezetek vizsgálata rétegbevonatos optikai feszültségvizsgálattal

Rétegbevonatos vizsgálati technika erősített műanyagok esetén

Betekintés a biomechanikai vizsgálatok lehetőségébe

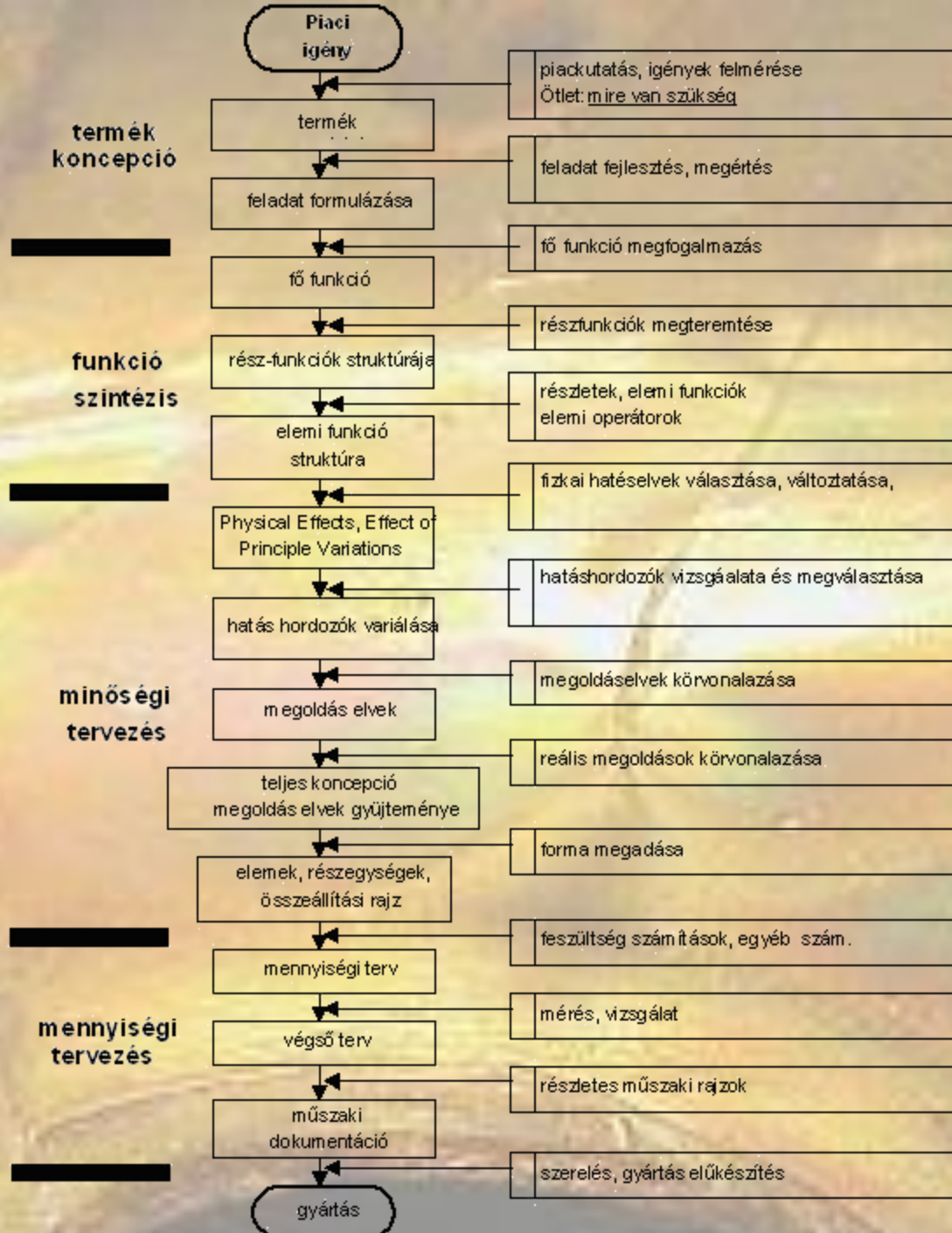
(Mérések pontszerű környezetben

Nyúlásmérő eljárások alkalmazásának alapjai

Nyúlásmérő ellenállással mérő technika műszerei

Maradó feszültségek mérései

Mérések-számítások helye, szerepe a konstrukciós munkában)



A tervezési folyamat rendkívül összetett, különböző absztrakciós szinteken megvalósuló tevékenység. A folyamat végső fázisa a mennyiségi tervezés, eredménye a gyártás során realizálódó termék. **Ahhoz, hogy a berendezés tervezési élettartamának megfelelően, azon belül megbízhatóan, meghibásodás-mentesen működjön, tervezett módon számos vizsgálatot, mérést, ellenőrzést kell végrehajtani a tervezési folyamat mennyiségi szakaszában.** Mérésekből határozhatjuk meg egy adott szerkezetre ható terhelések valóságos jellemzőit, valamint a szerkezet tényleges viselkedését.

Vizsgálatainkat, méréseinket végrehajthatjuk **valóságos szerkezeteken**, alkalmas feltételekkel elkészített (méretarányos, többnyire egyszerűsített) **modelleken** (melyeken mért eredmények a valóságra a **modelltörvények** alkalmazásával számíthatók át), vagy éppenséggel a szerkezetből megfelelően kiválasztott és elkészített próbatesteken (pl. anyagjellemzők meghatározása). Általános elvként elmondható, hogy egy szerkezet tönkremeneteli valószínűségének csökkentése érdekében a szükséges **méréseket, vizsgálatokat a gyártási költségek minimalizálására tekintettel a tervezés, gyártás lehető legkorábbi szakaszában célszerű elvégezni.**

A megfelelő gondossággal elvégzett **számítási (numerikus modellezési) eljárások**, valamint az alkalmasan megválasztott **mérési technikák** egymást **kiegészítő alkalmazásával (hibrid módszer)** határozhatók meg az alkatrészek, szerkezetek pontos igénybevételei, terhelések hatására kialakuló nyúlás,- és feszültség eloszlásai, adott terhelési körülmények között kialakuló **deformációi, rezgései, lengései.**

A kísérleti mechanika néhány ismertebb eljárásának osztályozása

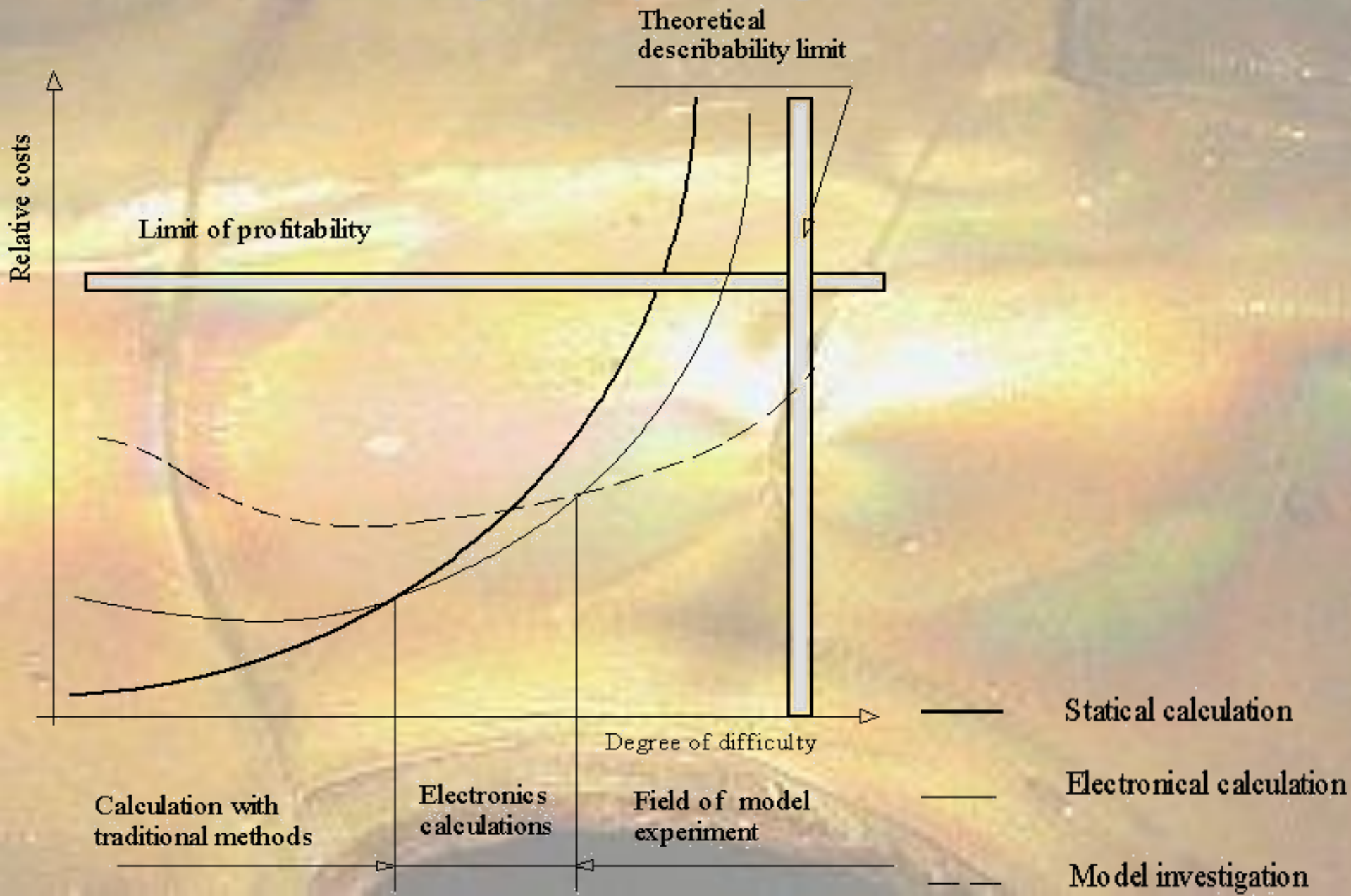
Makroszkópikus feszültségállapot mérése

Feszültségeloszlás vizsgálata	Határfeltételek meghatározása	Stabilitási kérdések vizsgálata
Mechanikus nyúlásmérő eljárások	Mérés nyúlásmérő ellenállással	Árnyék Moire eljárás
Mérés nyúlásmérő ellenállással	Nyomáseloszlások vizsgálata	Specle-interferometria
Feszültségoptikai vizsgálatok, modellkísérletek, vagy rétegbevonatos mérési elveken	Rezgőhúros mérési eljárás	
Moire-eljárások		
Thermo-emissziós vizsg., Digital Image Correlation elj.		

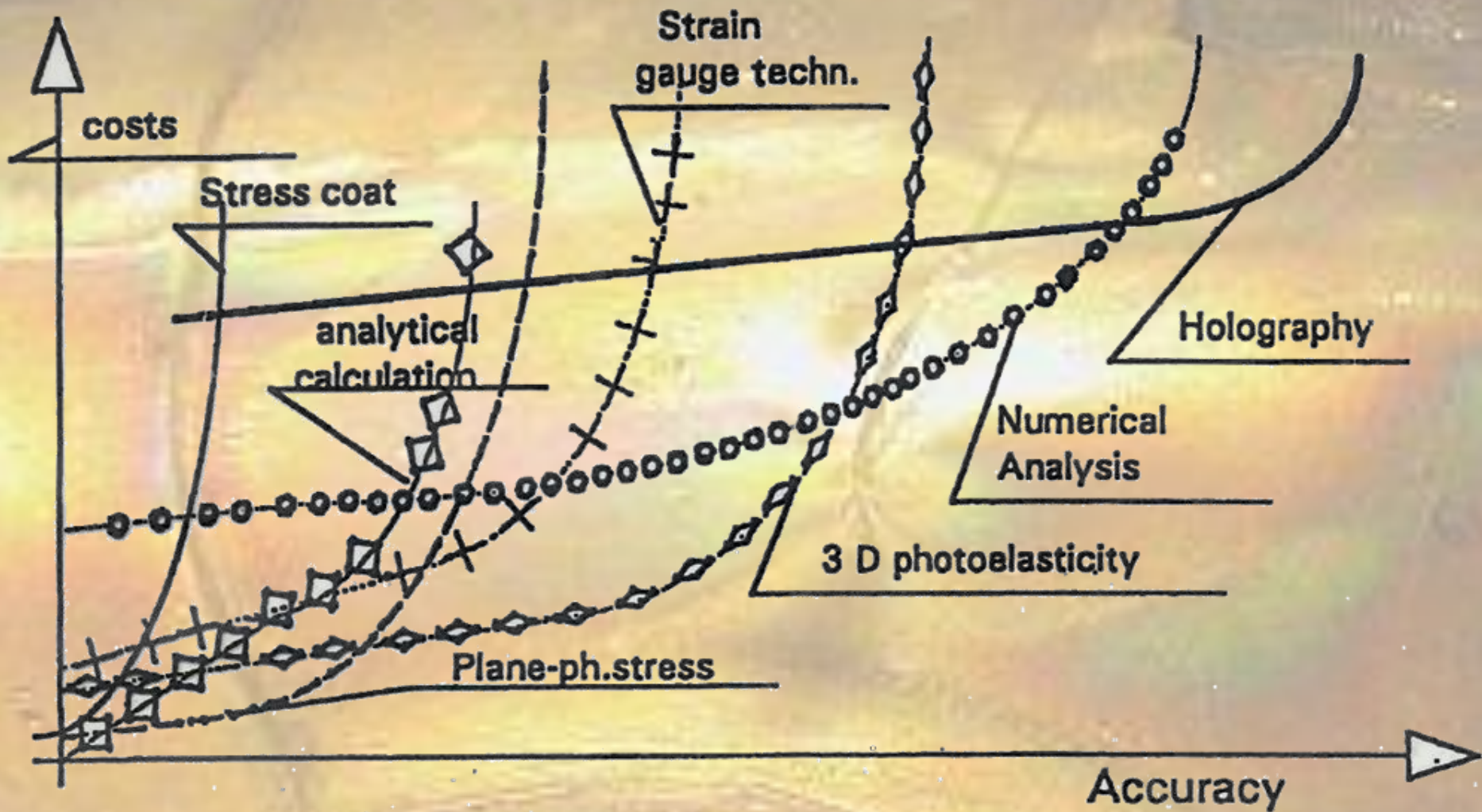
Meghibásodások okainak feltárása

Maradó feszültségek mérése	Törésmechanikai ellenőrzések
Speckle-interferometria	Feszültségoptika
Szeletelési eljárás	Modellkísérlettel, vagy
Felvágási technika	Rétegbevonatos mérési eljárással
Lyukfúrásos eljárás	Holographkus interferometria
Röntgen diffrakció	Thermovizió
Ultrahang terjedési sebesség mérése	Árnyék Moire eljárás
Barkhausen zaj vizsgálat	Digital Image Correlation (DIC)

Összehasonlítás az egyes eljárások „relatív költség - bonyolultság” vonatkozásában

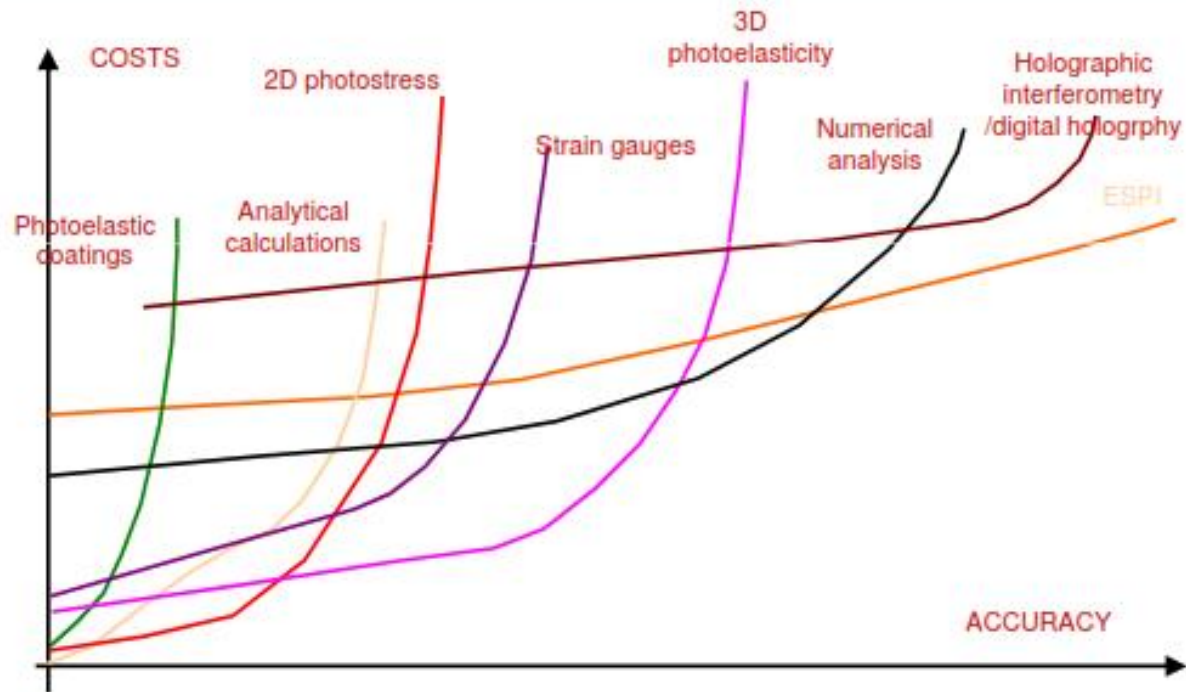


Költség - pontosság kérdése



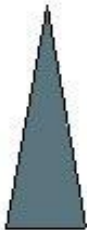


COSTS & ACCURACY OF EXPERIMENTAL METHODS

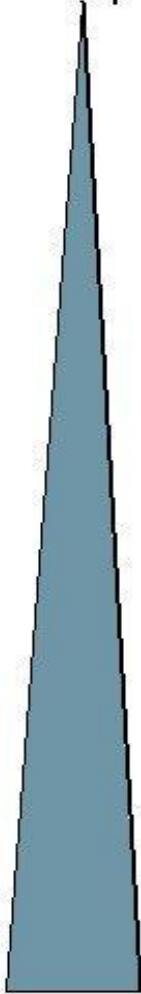


Borbas L. modification

Milyen gyorsan kapunk eredményt

Reaction time	Measuring method	Computational method
Short	Laser-Doppler Method Thermoelastic stress analysis Contact stress measurement Photoelastic coating technique Stress coat Plane photo elasticity Strain gage technique Moire – methods Displacement, - velocity, - acceleration transducers Spectle interferometry Static holography Optical contour methods Dynamic holography 3D Photoelasticity (freesen technique) Fatigue tests: Cyclic load Service (real) load simulation	Linear, small element number  FEM BEM Non-linear, great element number
Long		

Költségek összehasonlítása tekintetében *2.)

Resulting cost	Method of Measurement
 Cheap Expensive	Photoelastic coating Method
	Laser-Doppler Method
	Contact Stress Measurement
	Plane Photoelasticity
	Stresscoat
	Moire-Methods
	Strain gages technique
	Speckle-Interferometry
	Optical Contour Methods
	SD Photoelasticity
	Displacement, velocity, acceleration transducers
	Thermoelastic stress analysis
	Static Holography
	Fatigue tests for endurance limit determination (Cyclic loading conditions)
	Service load simulation for lifetime prediction
	Dynamic Holography

*2) H. Marwitz, Daimler Benz, Messen, Prüfen, Automatisieren, 1989, April (MB 200 széria)

A kísérleti és számítási eljárások szerepe a szerkezetek feszültséganalízisében

- A számítógépek processzorainak sebessége töretlenül növekszik. A szimuláció területén eddig sosem képzelt területekre jutottunk, úgymint virtuális prototípus gyártás, virtuális gyártás, virtuális szerszámozás.
- A 90-es évek elején úgy tűnt, a számítási és számítógépes modellezési módszerek fejlődése a szerkezetek feszültséganalízise területén szükségtelenné teszi a különböző mérési eljárások alkalmazását.
- A számítógépes szoftverek fejlődésében hatalmas fejlődés figyelhető meg. A lineárisan elasztikus feladatok területeiről kilépve eljutottunk a plasztikus megnyúlások, nemlineáris geometriai kérdések kezeléséig, köszönhetően a különböző véges elemes módszerek fejlődésének.

Mindezen várakozások ellenére a különböző mérési eljárások nem vesztek annyit jelentőségükből, mint azt egyes szakértők előre jelezték:

A feszültségeloszlások számítási úton történő meghatározásához a vizsgált alkatrészek *végeselemesítésére* volt szükség. Ez a feladat sokszor eltereli az operátor figyelmét a szerkezet mechanikai kérdéseiről,

A számítógépes programokat többnyire olyan szakértők írják, akik a kérdéses feladat *mechanikai és matematikai kérdéseivel nincsenek teljes egészében tisztában*. Ennek következtében az alkalmazott elemtípus és megoldás nem mindig illeszthető a vizsgált problémára, különösen igaz mindez érintkezési kérdések vizsgálatánál,

A bonyolult, alakos felszínű szerkezetek magas elemszámú FEM hálózatot igényelnek. Ilyen esetekben a *szükséges számítási idő az elemszám növekedésével jelentősen emelkedik,*

A feltételezett feszültségcsúcsok – nagy *feszültség-gradiensű* helyek - területén a hálózat sűrítése szükséges, ami szintén az elemszám növekedését eredményezi. Mindez a számítások idejét, költségét jelentősen megemeli,

A futási idő, költségek, pontosság területén kompromisszum meghozatala látszik szükségesnek. A számítási eljárások ez-ideig gyenge pontjai a komplikált felszínű szerkezetek, helyi feszültségcsúcsokkal tarkított területei.

Néhány szempont a kísérleti módszer kiválasztásához

Ciklikus igénybevételnek alávetett, helyi (lokális) feszültségkoncentrációs helyekkel rendelkező szerkezeti elemek nyúlás, és feszültségeloszlásainak meghatározása,

Anyaghibák, inhomogenitási kérdések (azok helyének, méretének felderítése) valós szerkezetek esetén nem hagyhatók figyelmen kívül.

Ezek az esetek számítógépek számára (bemenő adatok, peremfeltételek) nem minden esetben (ha egyáltalán...) írhatók le. Tényleges szerkezeteknél előforduló esetek a kísérleti eljárások alkalmazásának szükségességét hangsúlyozzák.

Szerkezetekre ható külső terhek, a szerkezetek merevségi kérdéseinek tisztázása a mérési eljárások egyik leggyakrabban alkalmazott területe,

A megfelelő eljárás kiválasztásánál a költségek, a mérési eljárás reakció ideje meghatározó tényezők,

A kiválasztott módszert a tervezési folyamat lehetőség szerinti legkorábbi szakaszában célszerű alkalmazni, tekintettel a megvalósítás későbbi fázisaiban jelentkező tetemes többletköltségekre („olyan korán, amennyire csak lehetséges” elv alkalmazása).

Utalva tehát a számítási és mérési eljárások alkalmazástechnikai területei között mutatkozó versenyre, a válasz az alábbiakban fogalmazható:

Mind a számítási (modellezési), mind a mérési eljárások saját területükön megfelelően alkalmazva a tervezési folyamat nélkülözhetetlen elemei.

Kiegészítik egymást, hibrid eljárásként történő párhuzamos használatuk biztosítja a **felhasználói igényeknek megfelelő termék** megvalósítását.

**Optikai feszültségvizsgálat
(field measurement)
lehetőségei az
alakadás, konstrukciós kialakítás fázisában**

Mérés egybefüggő felületeken (field measurement)

Fizikai alapok:

Homogén, izotrop, átlátszó, optikailag aktív anyagok mechanikai terhelés hatására kettőstörésüket megváltoztatják, amely kettőstörés változás polarizációs szűrők között megfigyelhető:

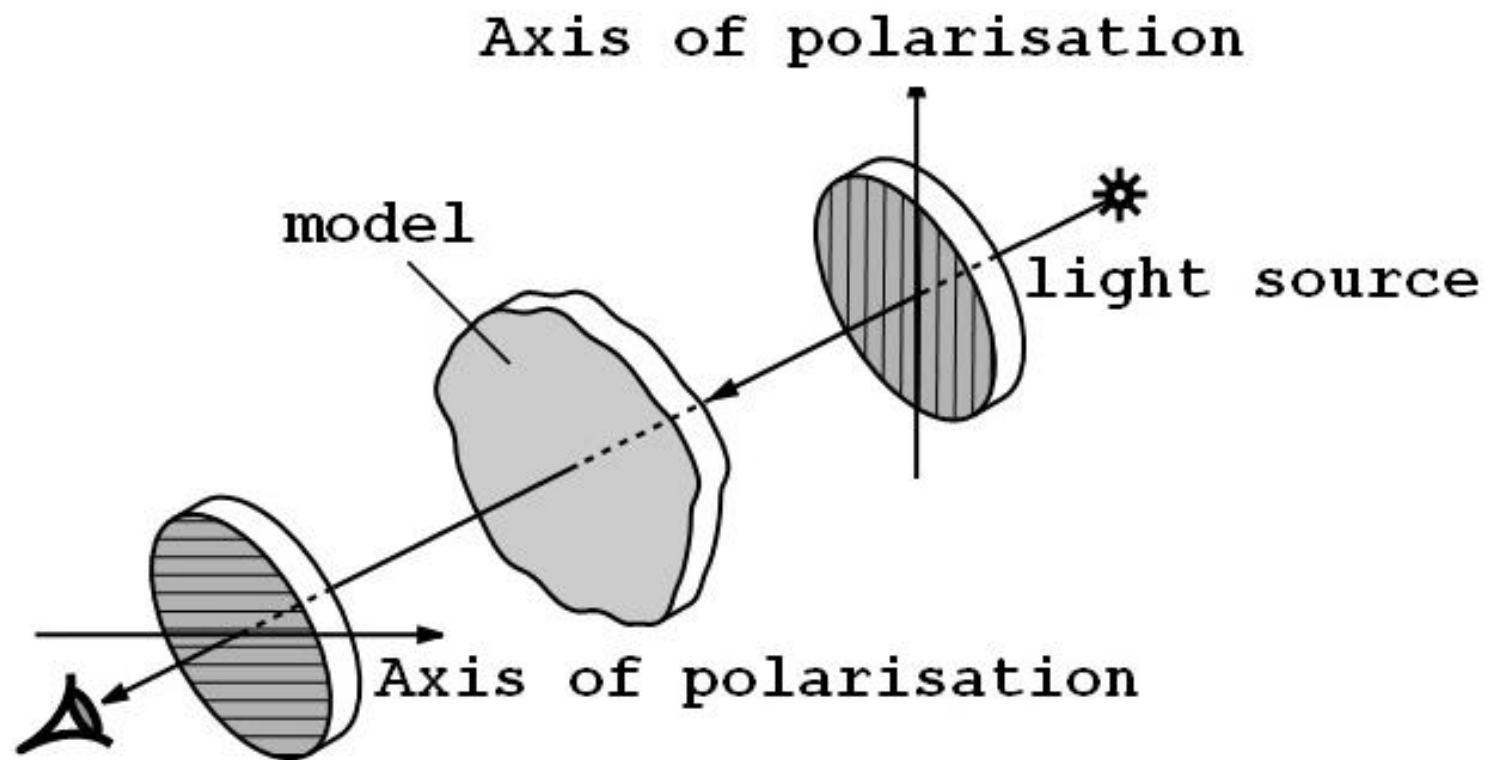
$$n_1 - n_0 = C_1 \sigma_1 + C_2 \sigma_2$$

$$n_2 - n_0 = C_1 \sigma_2 + C_2 \sigma_1$$

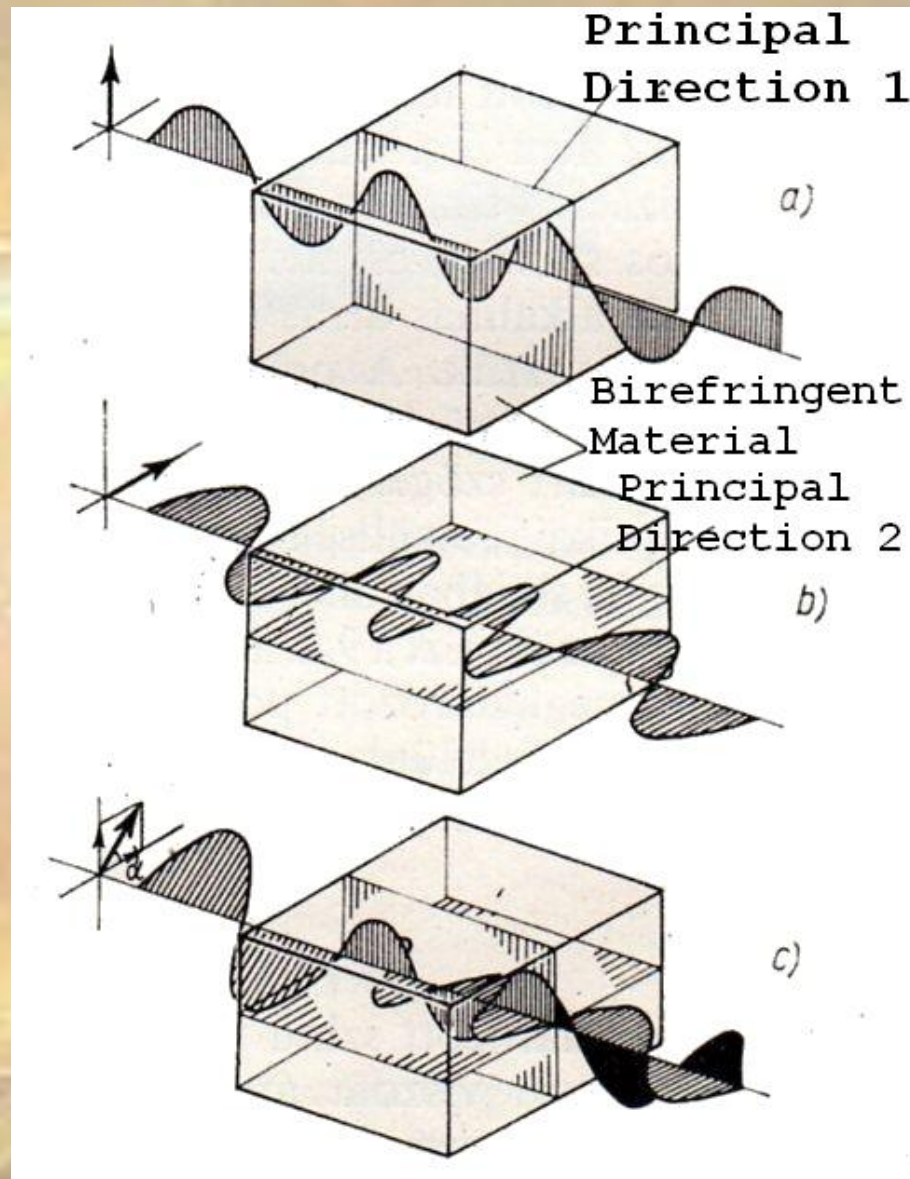
Where: n_0 the index of refraction of the photoelastic material in unstressed state,

n_1 , n_2 the index of refraction along the two principal axes with σ_1 σ_2 respectively.

A polarizációs optikai vizsgálat elvi elrendezése

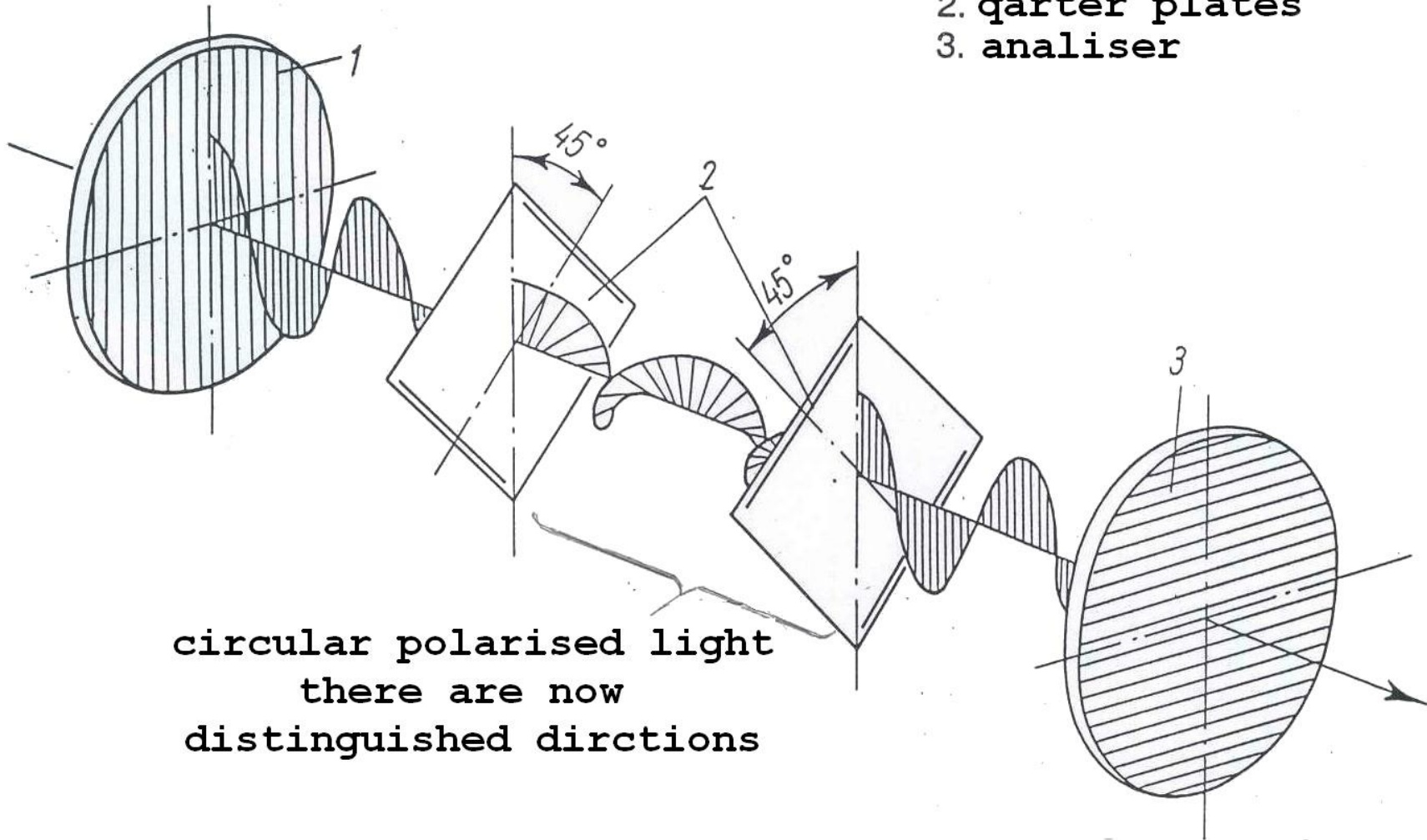


A polarizált fény útja kettőstörő anyag esetén

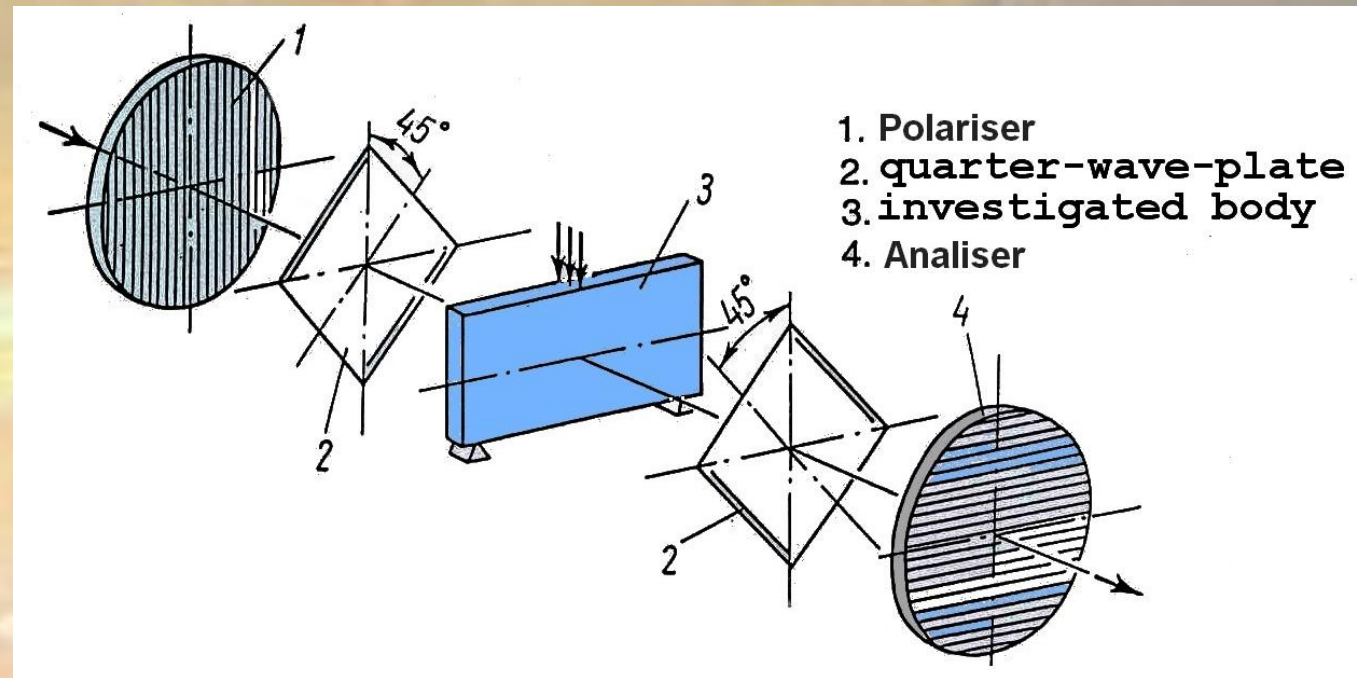


Kör-poláros fény alkalmazása(with $\lambda/4$ filters)

1. Polarizer
2. quarter plates
3. analyser



A fényintenzitás alakulása a polarizációs szűrők helyzetének függvényében (merőleges vagy párhuzamos)*



Light intensity

in case of crossed polariser
(dark-field) position,
dark fringes, where $m = 1, 2, 3, \dots$

$$I^2 = I^2 \sin^2 \pi m$$

in case of parallel polariser
(light-field) position
dark fringes, where $m = 0.5, 1.5, 2.5, \dots$

$$I^2 = I^2 (1 - \sin^2 \pi m)$$

A feszültségoptika alap-összefüggése (levezetés mellőzésével*)

$$\sigma_1 - \sigma_2 = N f_\sigma / h$$

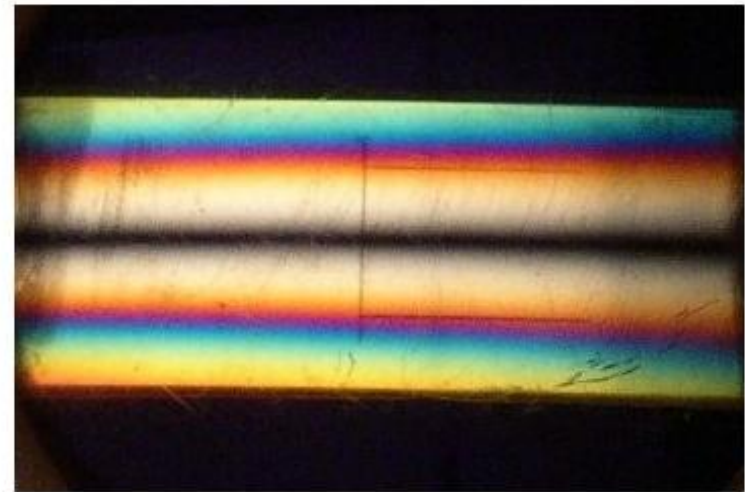
Where: $N = \Delta / 2\pi = \Delta / \lambda$

The relative retardation in terms of a complete cycle, also called „fringe order” (marked by „m” sometimes)

$$f_\sigma = \lambda / C$$

The material fringe value (sensitivity), determined by calibration

h= thickness of the optically active material, the model (marked by „v” sometimes)



Az alapösszefüggés rétegbevonatos optikai eljárás esetén

$$\sigma_1^c - \sigma_2^c = N f_\sigma / 2h_c = N F_\sigma$$

Where: $F_\sigma = f_\sigma / 2h_c$ The coating fringe value

The connection between the principal stresses and strains (Hook's Law)

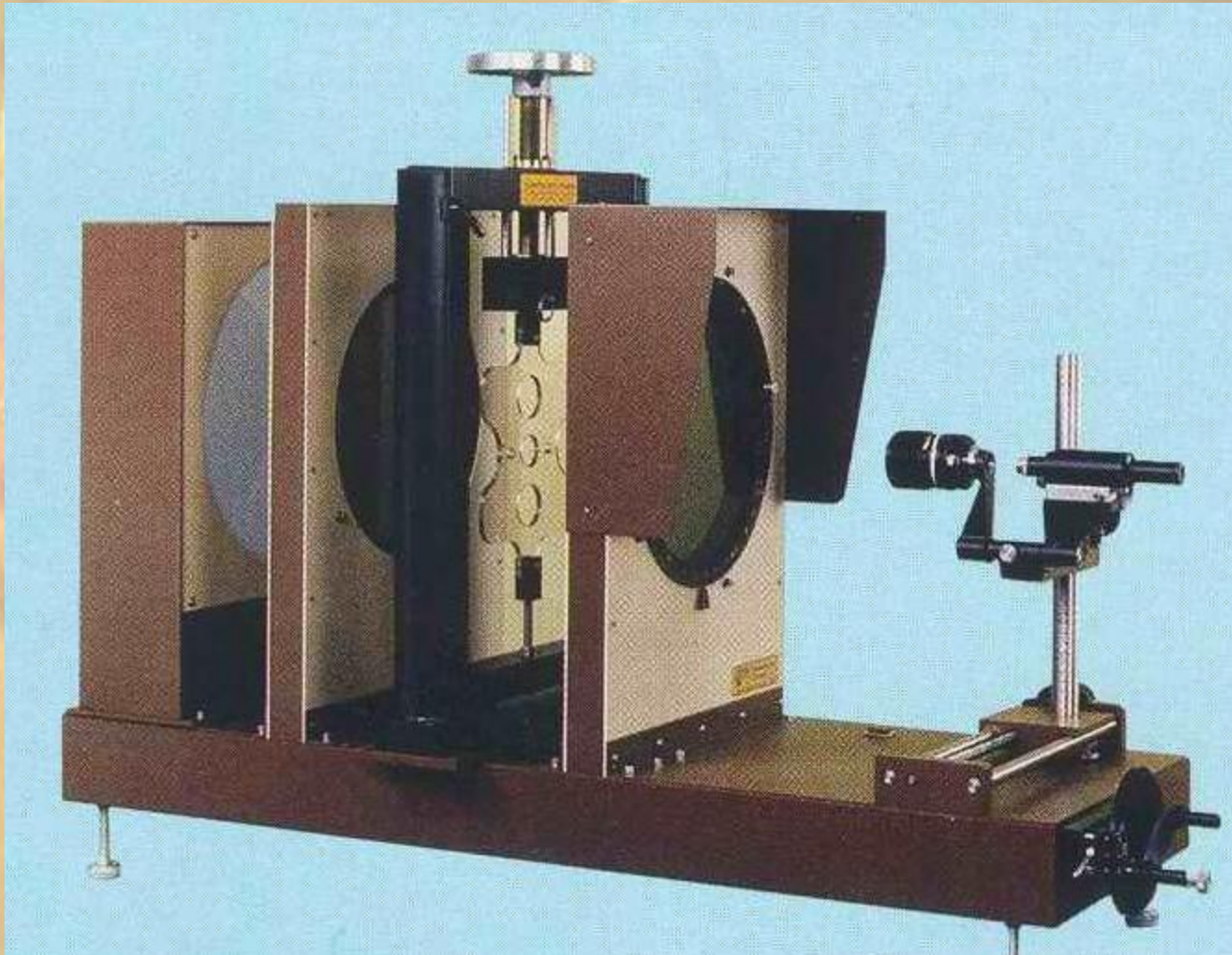
$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = [(1 - \nu) / E](\sigma_1 - \sigma_2)$$

Where: ν Poisson's ratio
 E the modulus of elasticity
of the investigated material

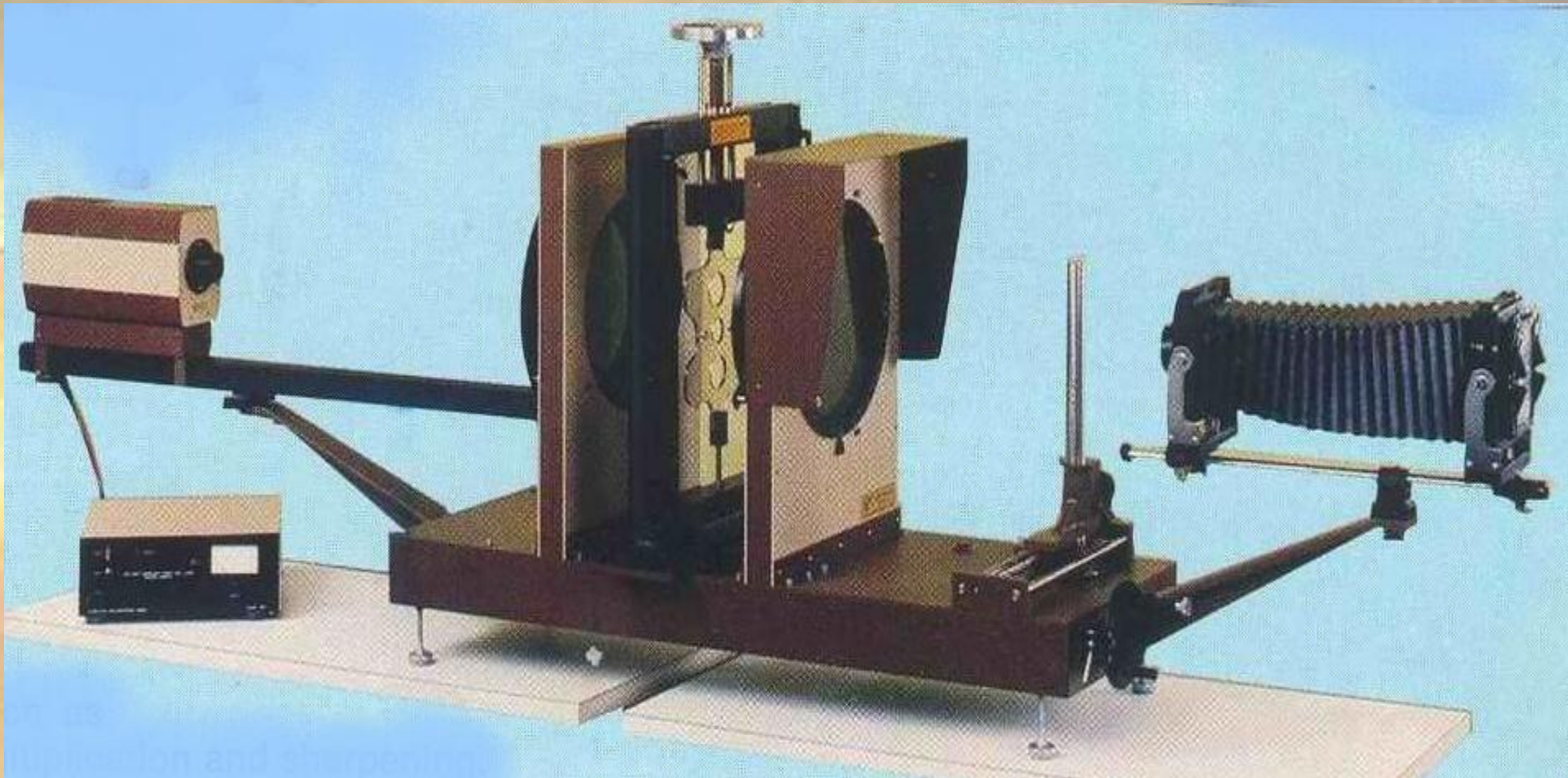
Polariskópok:

1. Sík, átbocsátó, 2. reflexiós, 3. különleges elrendezés

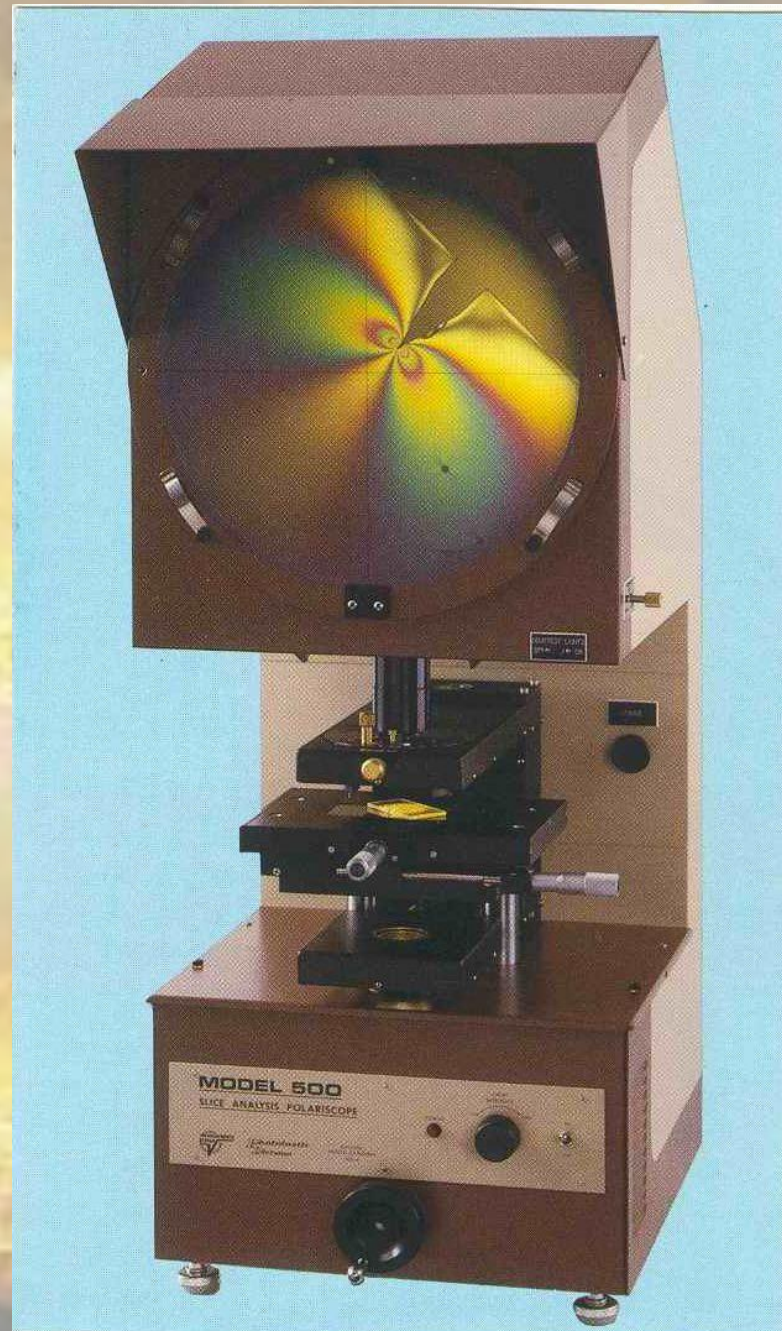
1. Sík, modell vizsgálatra alkalmas polariszkók*



*Vishay, 060 Series, modular transmission polariscope



Mikroszkóp elrendezés,
10x nagyítással*



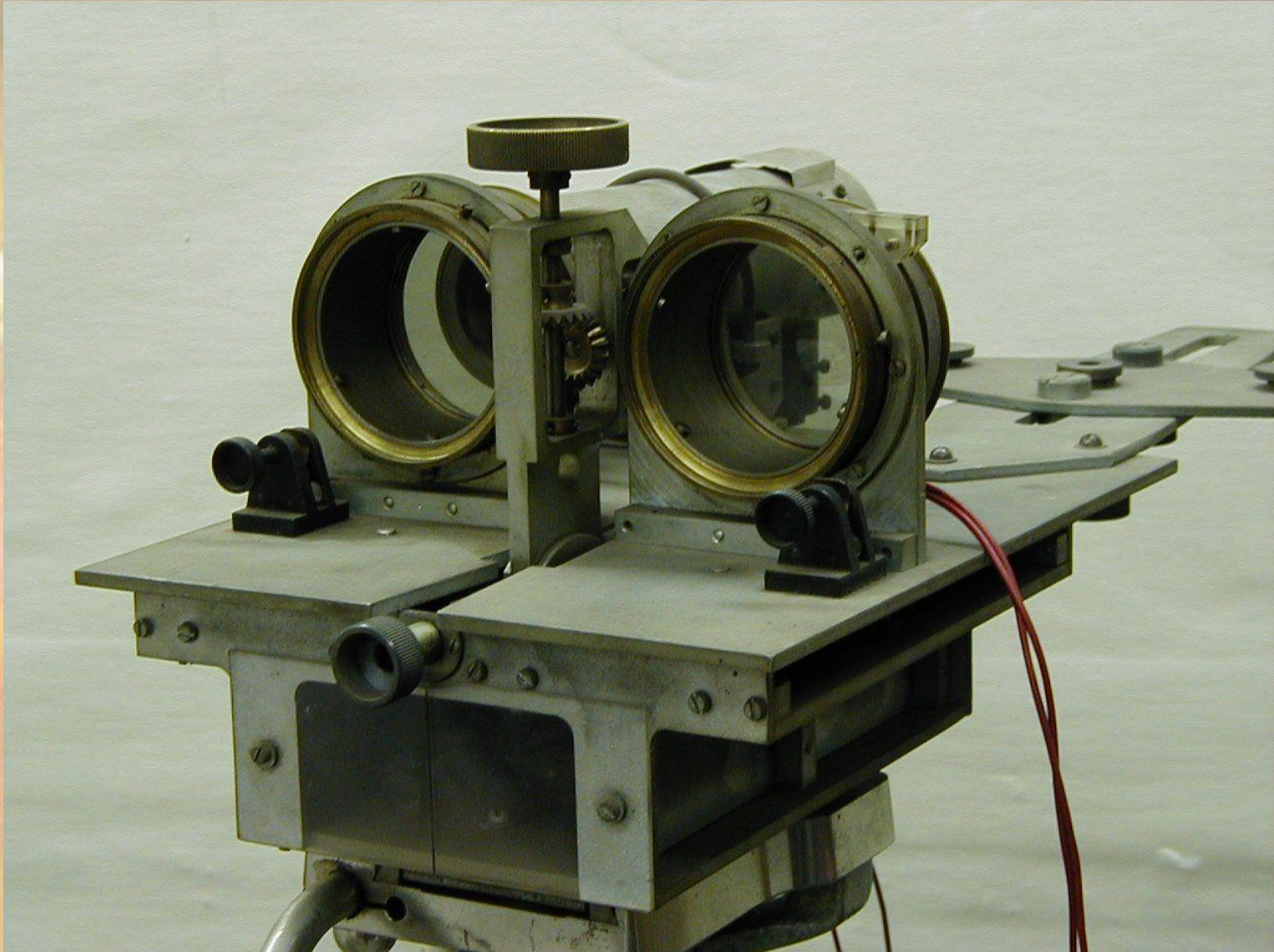
*Vishay, Series 500 transmission polariscope

2. Reflexiós polariszkóp fénykepező feltétellel



*Vishay, Series B 031, reflection polariscope

Reflection polariscope, with adjustable optical angle*



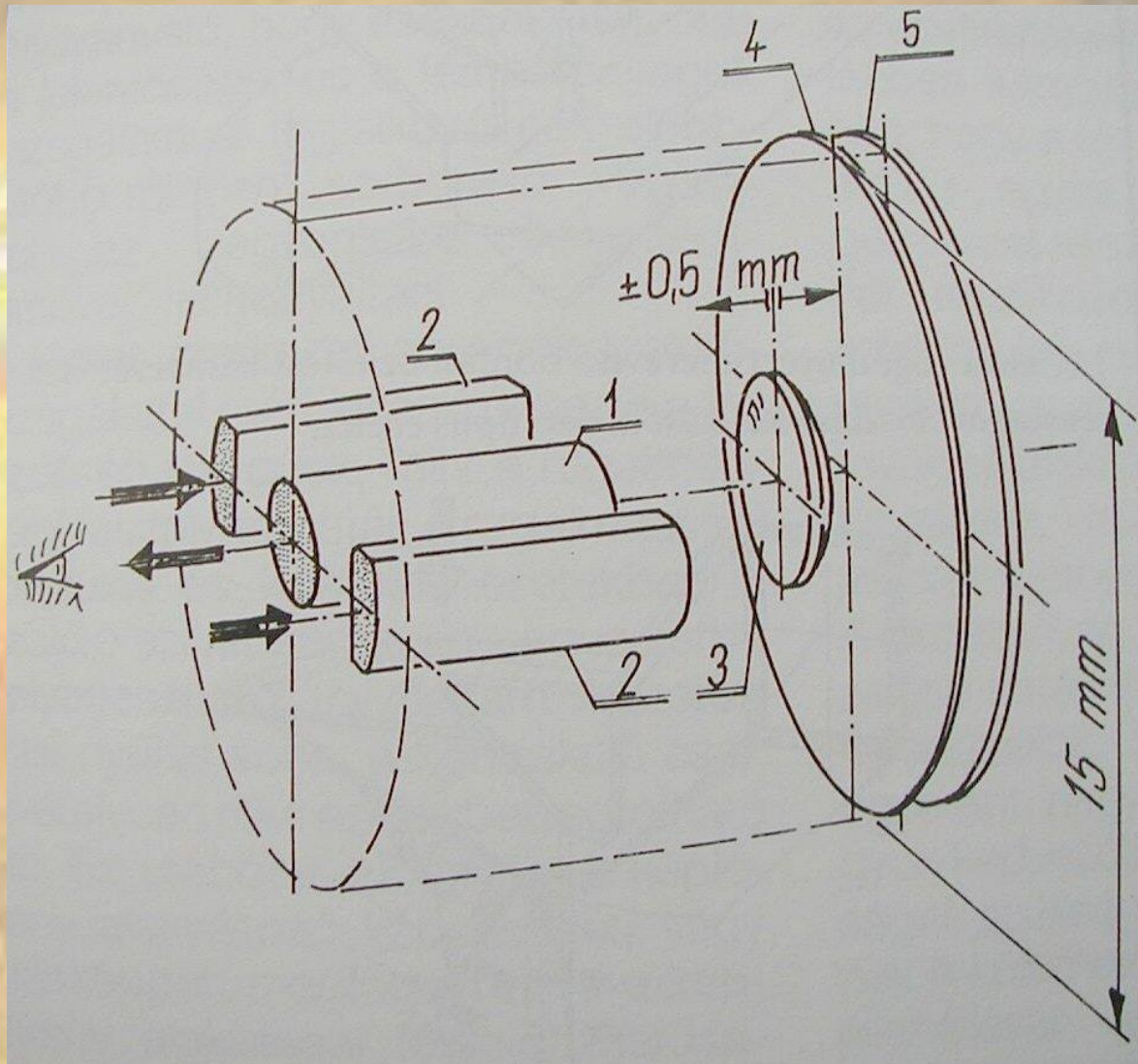
*Made by Kutesz Ltd, Hungarian production, based on idea of Prof. Szittner, 1985, BME, Hungary

Special Polariscopes (light-sources, arrangements)*



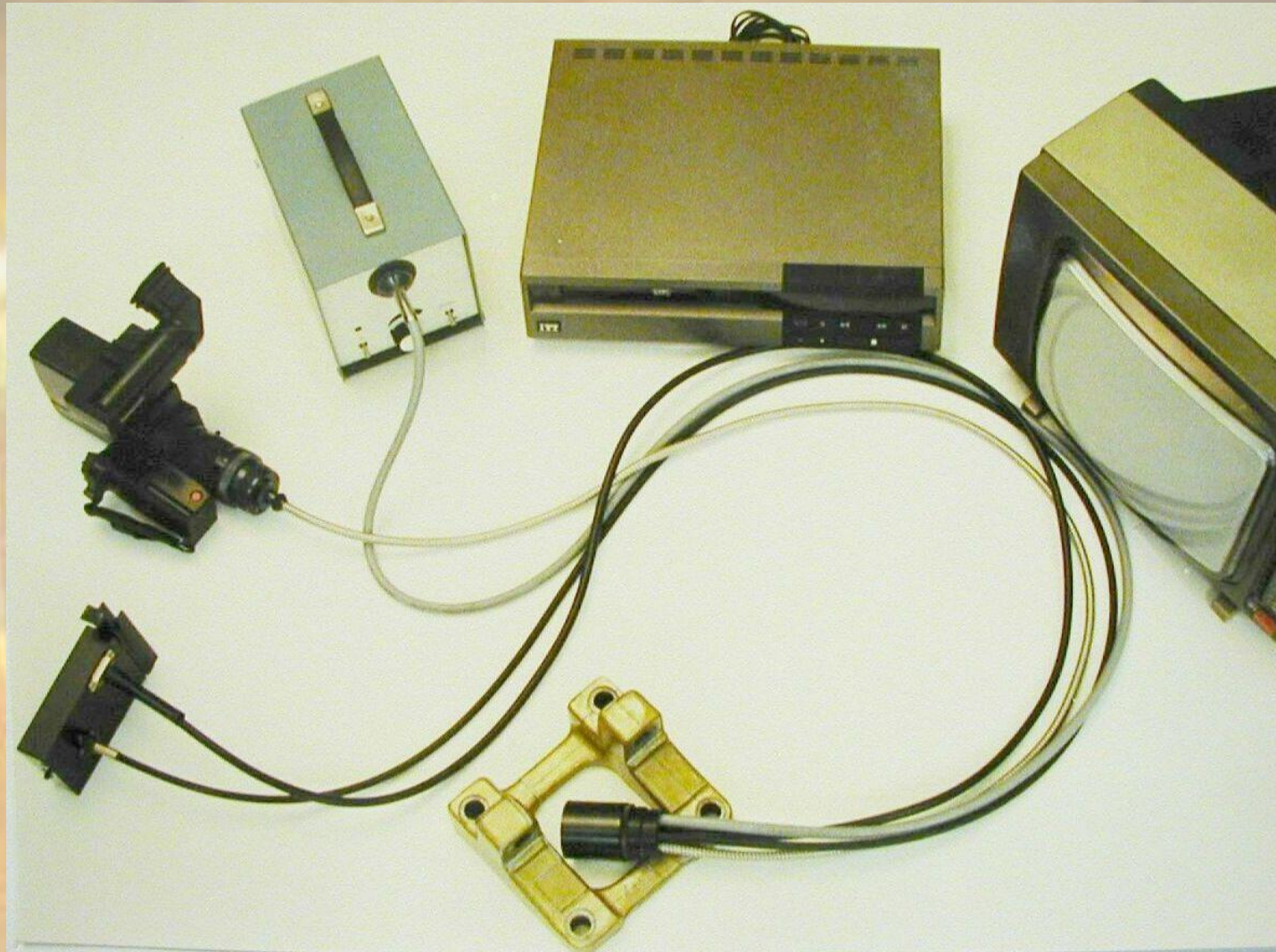
*Vishay polariscope Series B 030, equipped with stroboscope

3. Speciális polarizskóp fényköteg megvilágítással*



*Principle of Professor Stupnicki, 1987. Warsaw Univ., Poland

Reflexiós polarizskóp száloptikával, videó berendezéshez illetve mechanikus távirányítóval*



*Developed by Borbás, Budapest, 1986. Univ. of Techn. and Economics, Hungary, the principle in details:
L. Borbás: Some problems of data evaluation of photoelastic coating technique in case of small-size, fibre-optics fitted equipment. ICEM 12, Bari, Italy, 2004 August 28-September 2. Proceedings: Advances in Experimental Mechanics, McGraw-Hill, p.:595-596. (R. L.) ISBN 88 386 6273-8

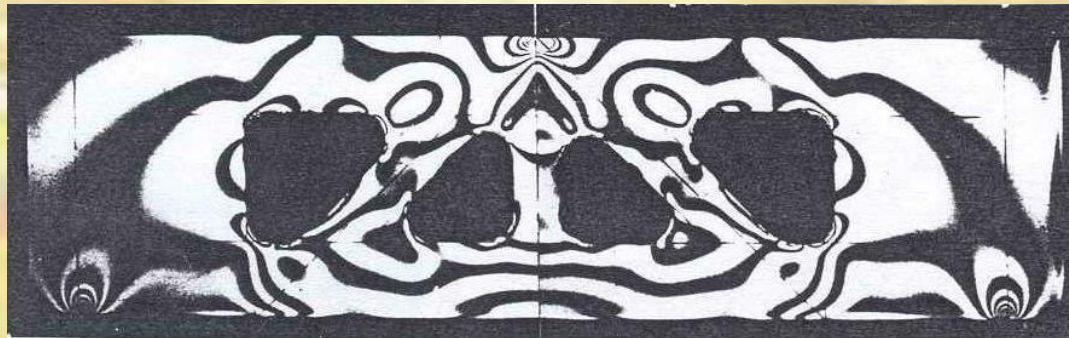
Rendszámeloszlások gyors értékelése

3 pontos hajlított tartó esetén*

Egész rendszámok (keresztezett polarizátor állás)

Polarisation

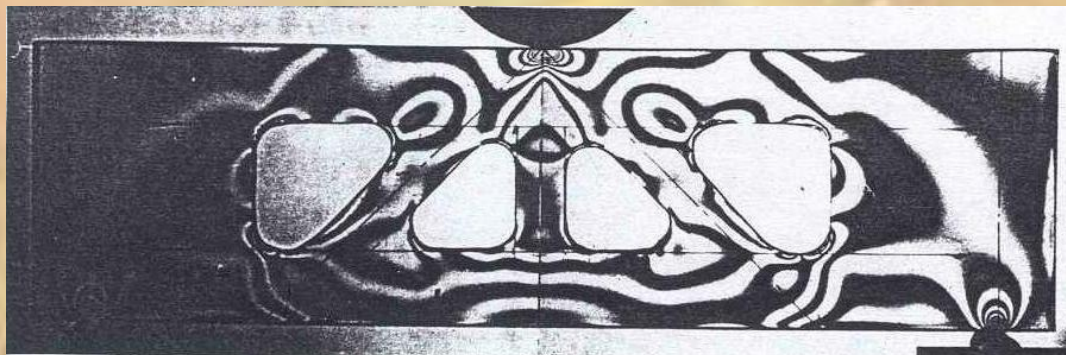
⊥



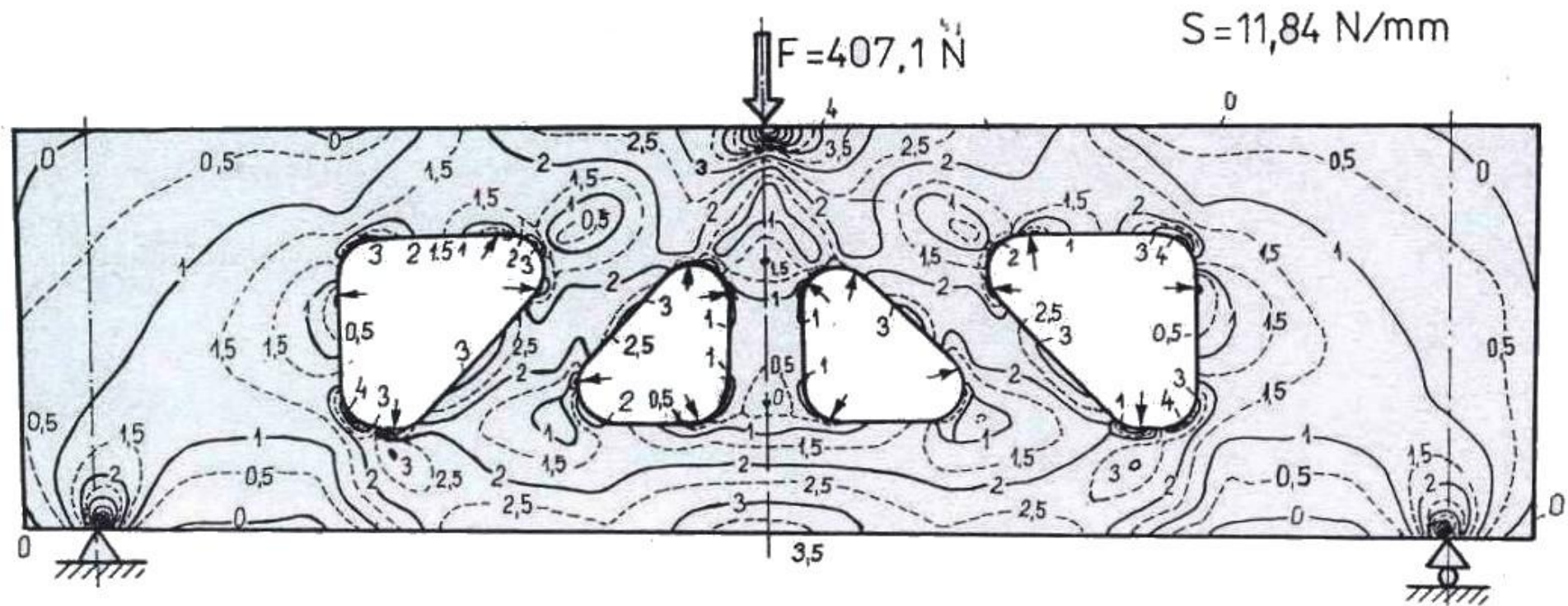
Fél rendszámok (párhuzamos polarizátor állás)

Polarisation

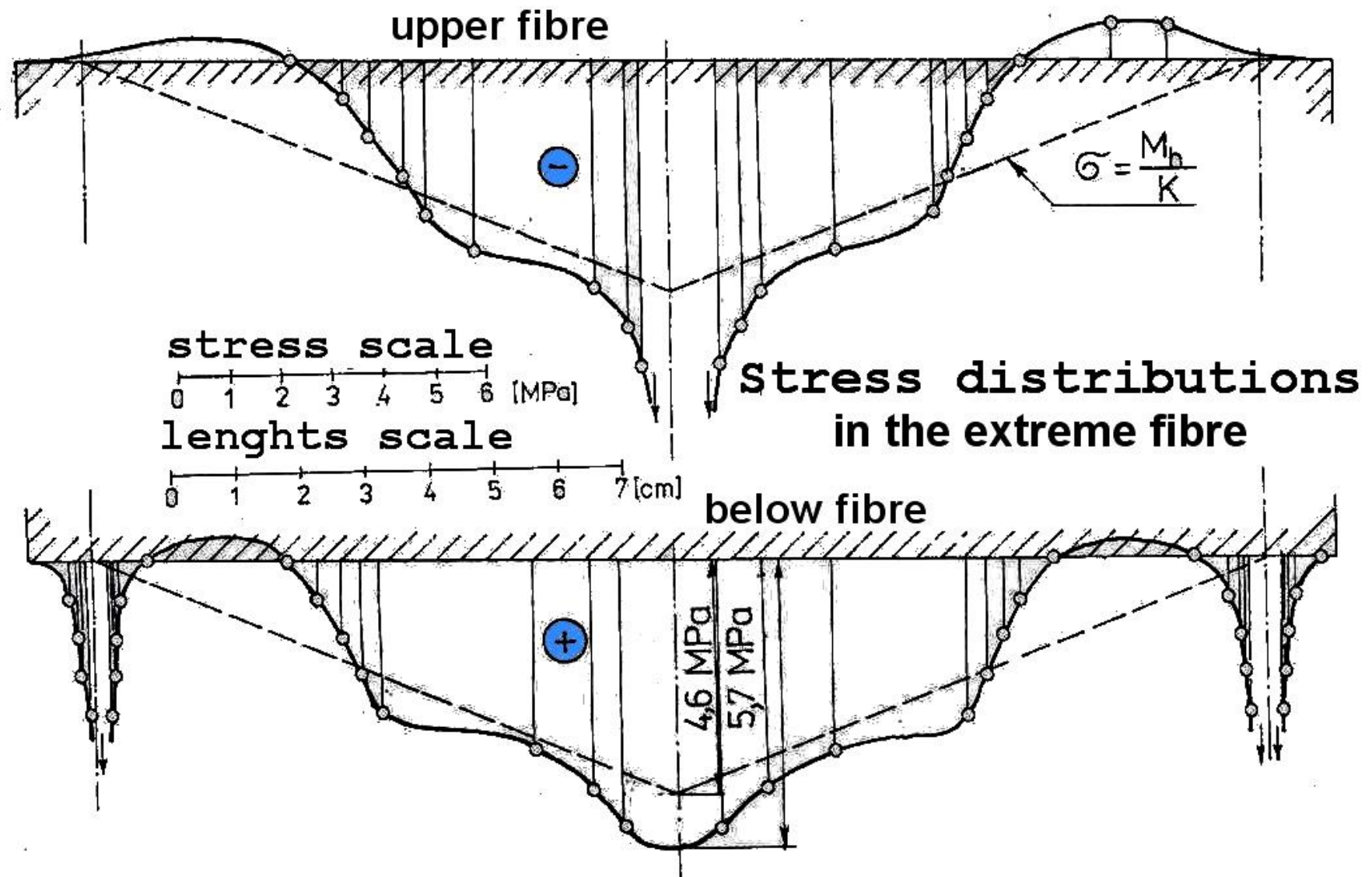
||



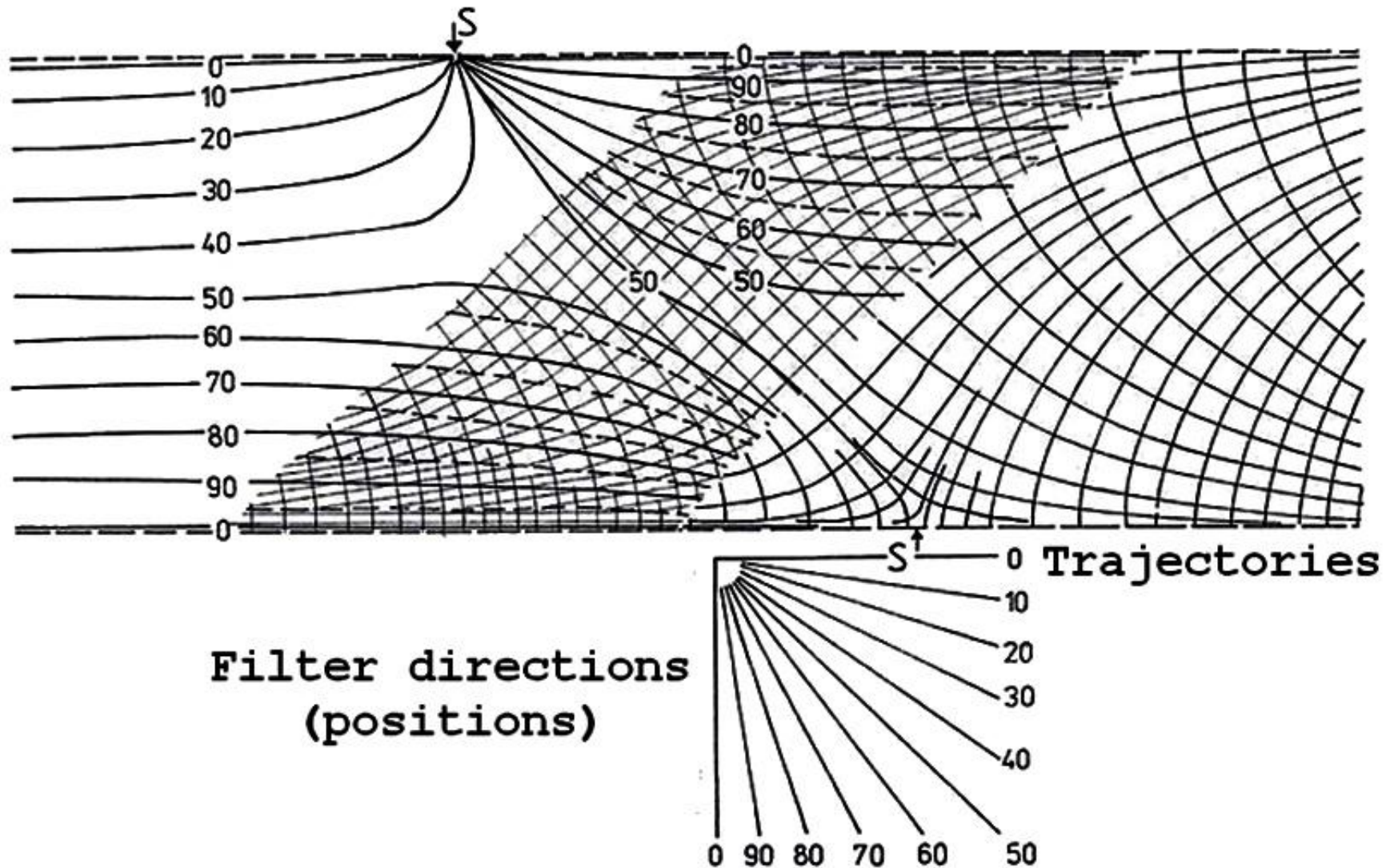
Összerajzolt rendszám eloszlások



Kiértékelt rendszám eloszlások a szélső szálakban



Feszültségi irányítási hálózat meghatározása a trajektóriák megrajzolásához



A trajektóriákból a konstrukcióra levonható következtetések

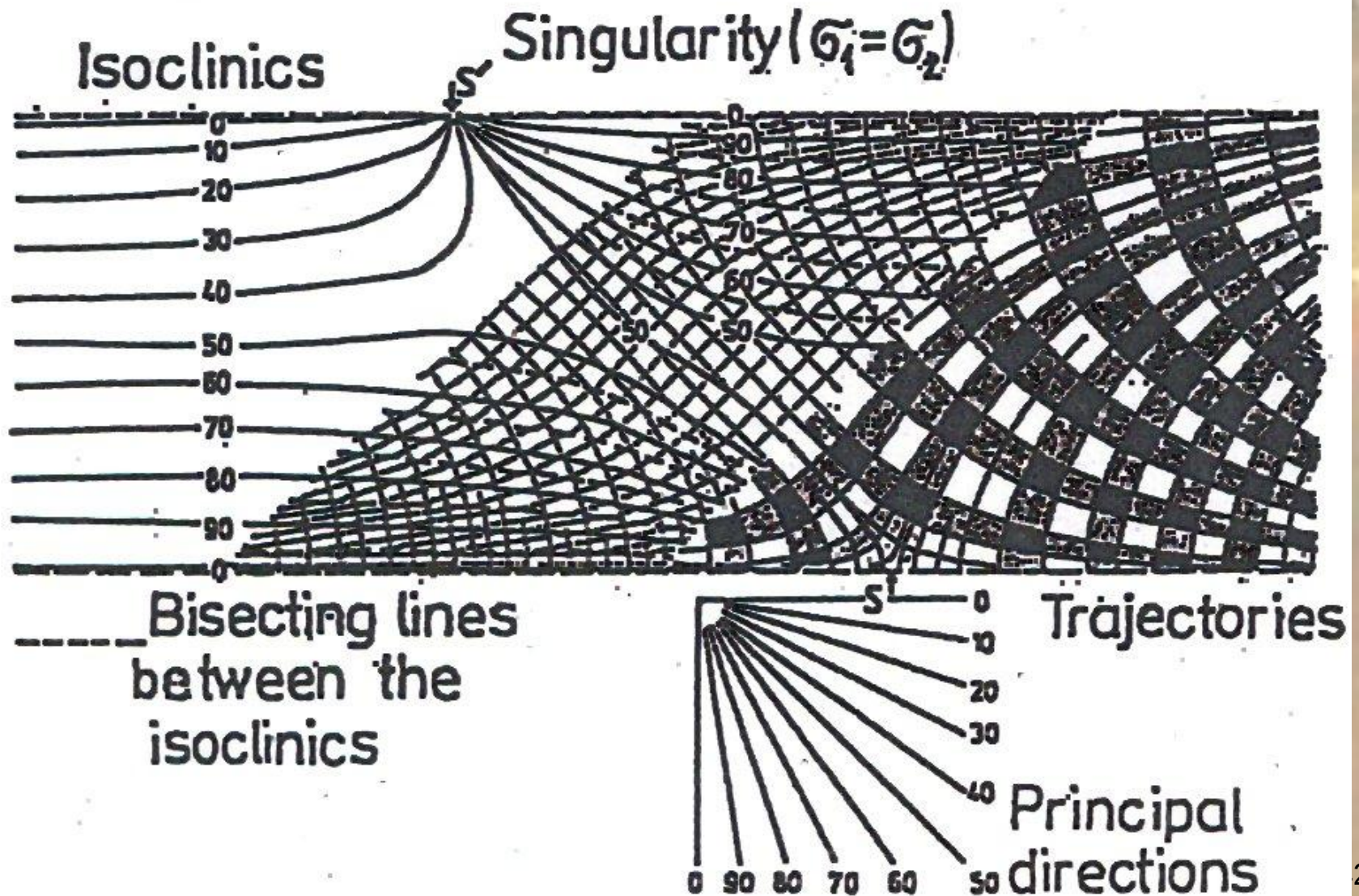
Segédeszköz az alak feszültségre gyakorolt hatásának meghatározásához*

Az alakadás fázisában a mérnöki szabadságfok igen magas.

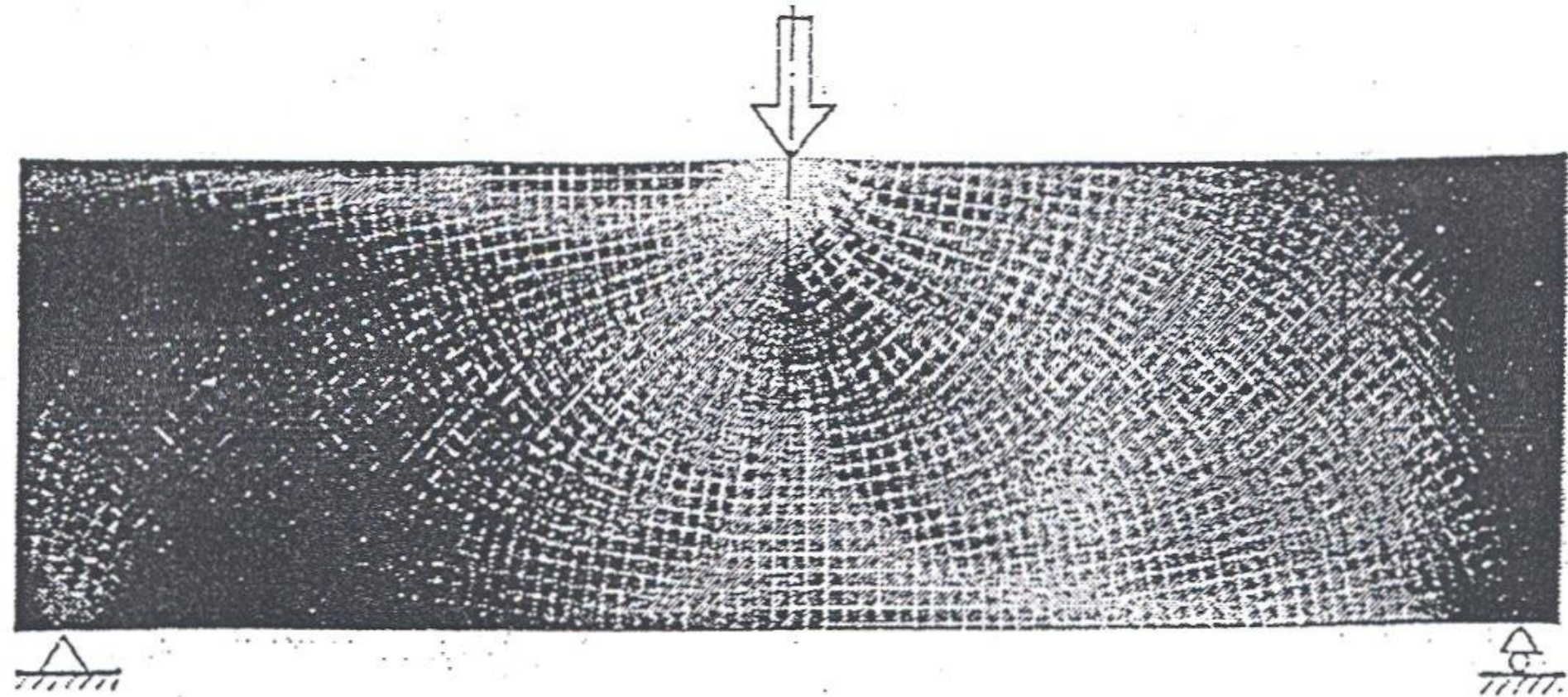
A megfelelő alak meghatározását nagymértékben segítheti a terhelés alatt kialakuló trajektória hálózat ismerete.

Néhány jellegzetes példán mutatom be a trajektóriák alakadásban történő alkalmazhatóságát.

A trajektóriák meghatározásának menete,
az izoklín hálózat felrajzolása alapján



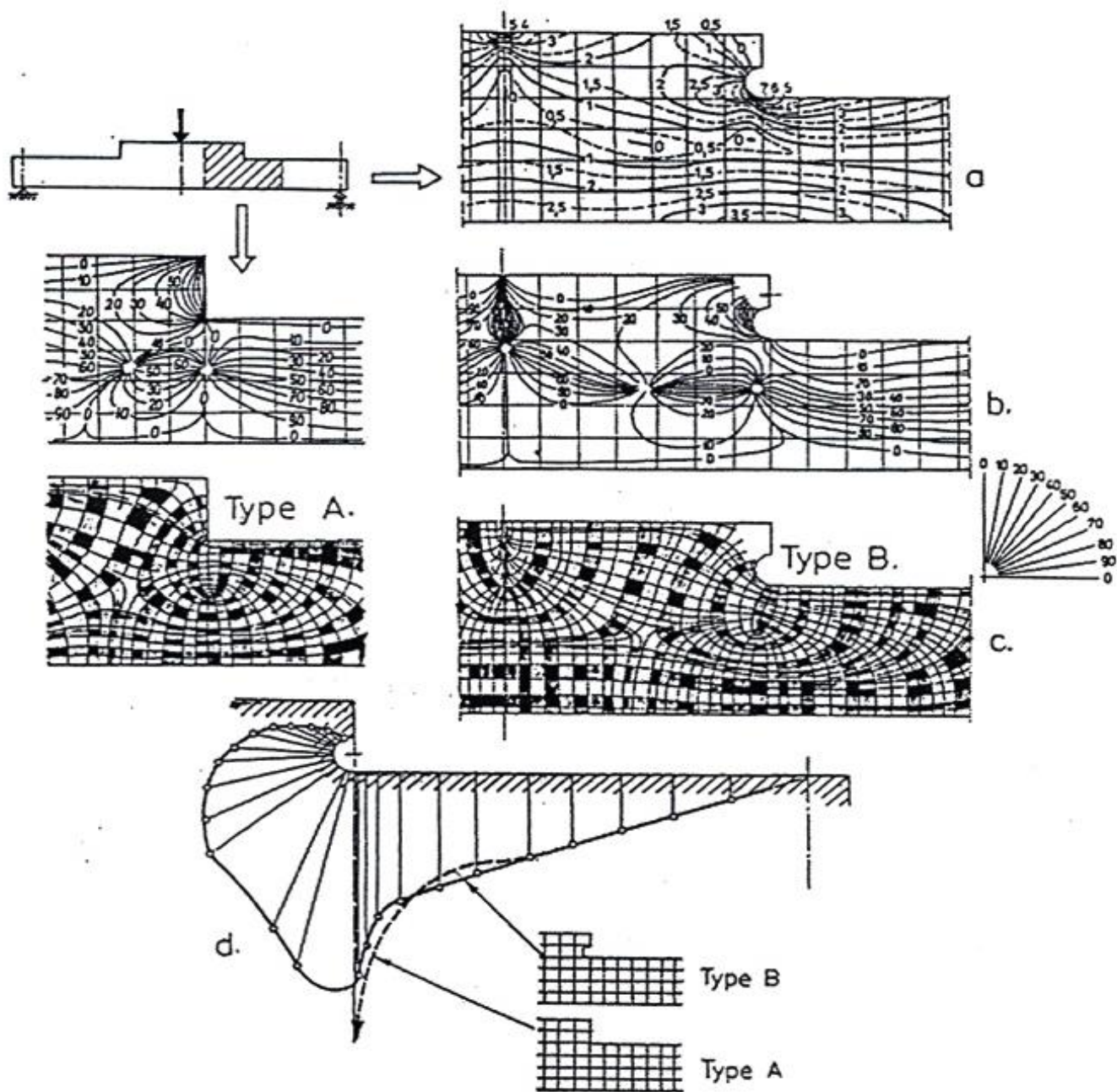
Egy elkészült *tajektória hálózat* hárompontos hajlított tartó esetén
(a hálózat bármely pontjában a feszültségi főirányok vektorok iránya az
adott pont érintője, és az arra merőleges irány)



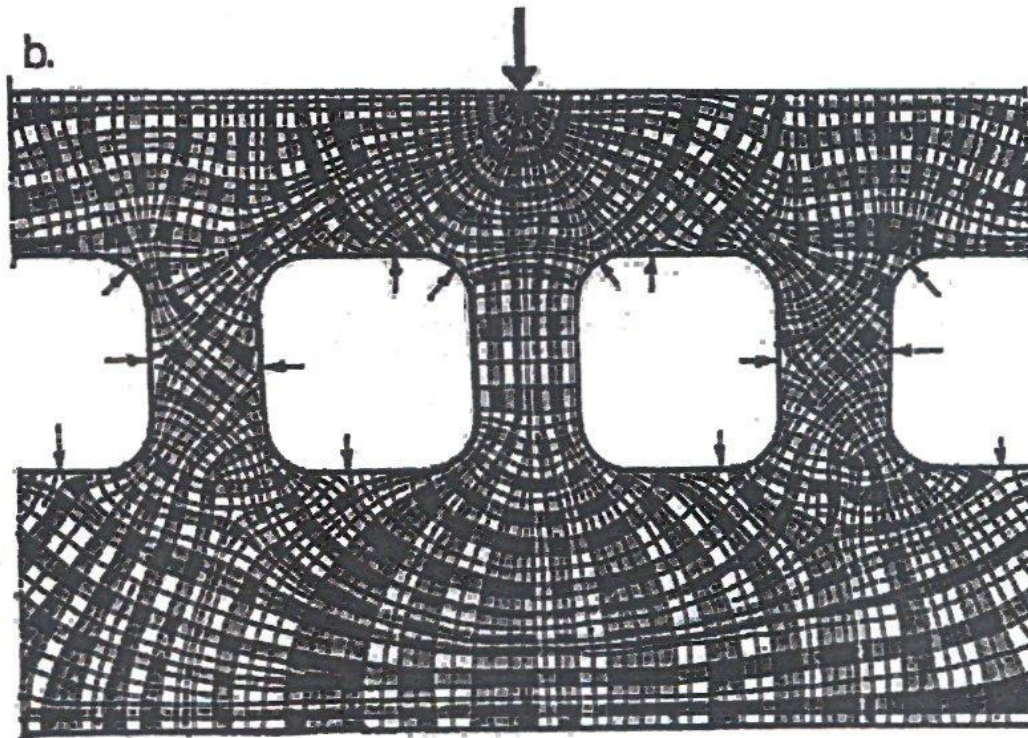
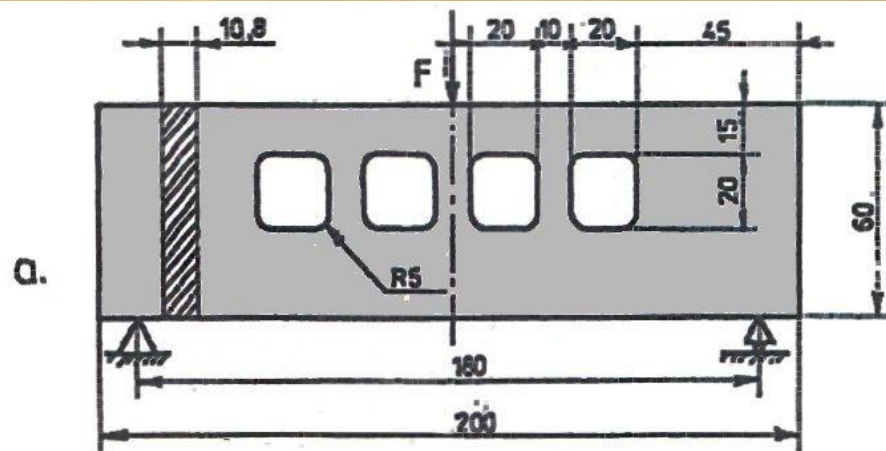
Feszültséggyűjtő hatás van jelen a *trajektória hálózat* lefutása alapján, ha:

- a trajektóriák irányukat hirtelen változtatják (általában keresztmetszeti változások során)
- a trajektória hálózat sűrűsége megváltozik (keresztmetszet változás, bármi egyéb zavarás)
- A trajektóriák relatíve kis területre koncentrálódnak (például erőátadások környezetében)

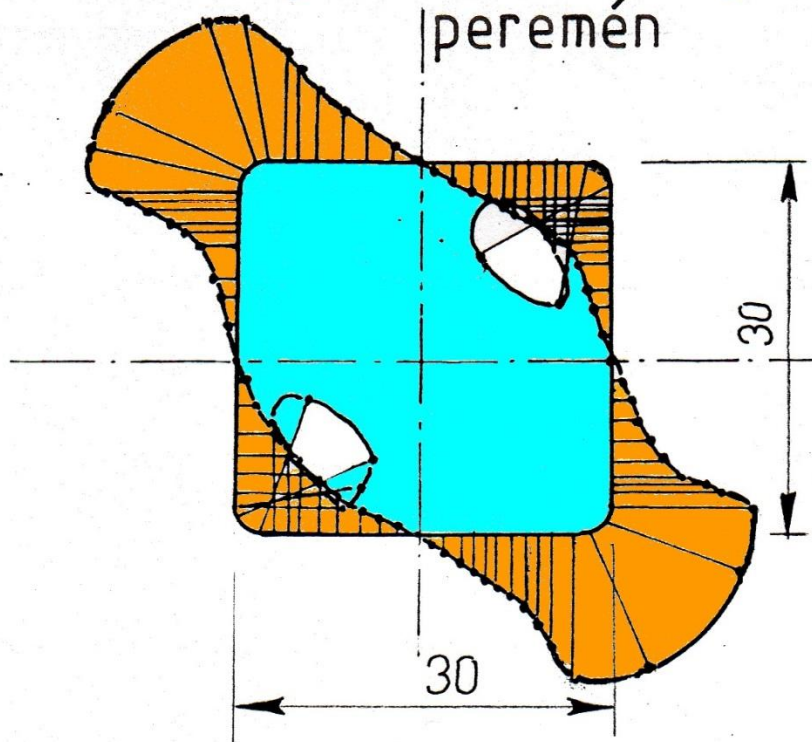
Néhány példa hajlított tartó izoklín, valamint trajektória hálózatára



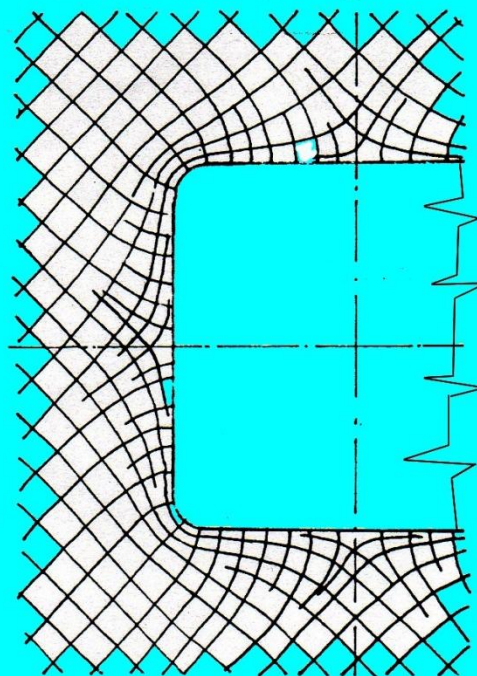
Ablakokkal gyengített magas tartó nyíró igénybevétele a *trajektóriák* alapján



Feszültségeloszlás a kivágás peremén



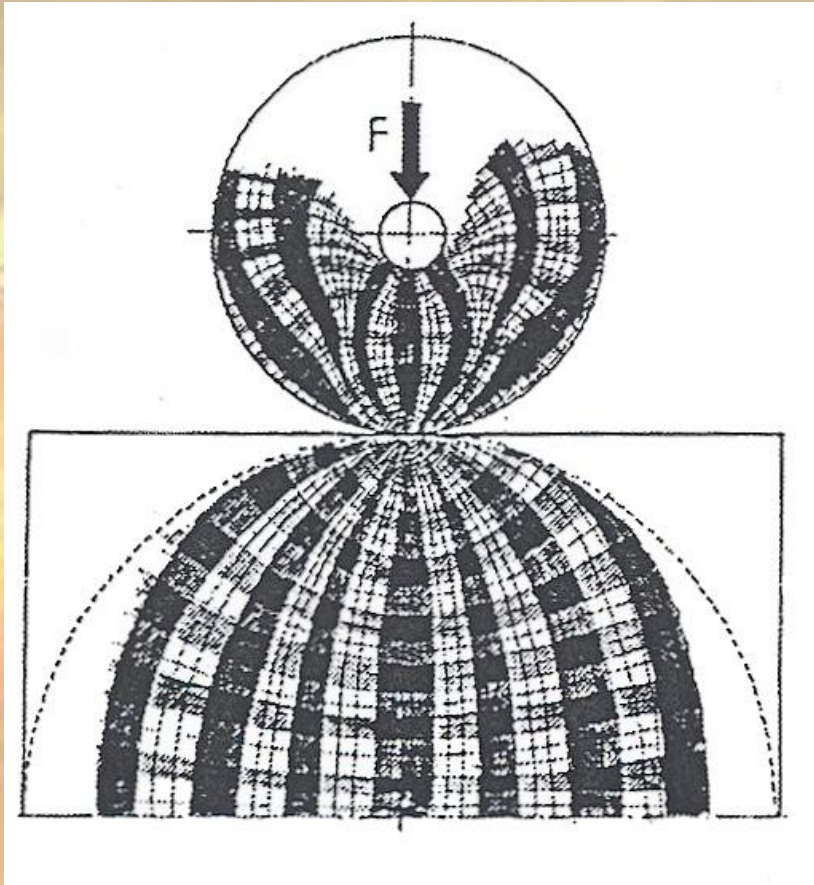
Főfeszültségi trajektóriák



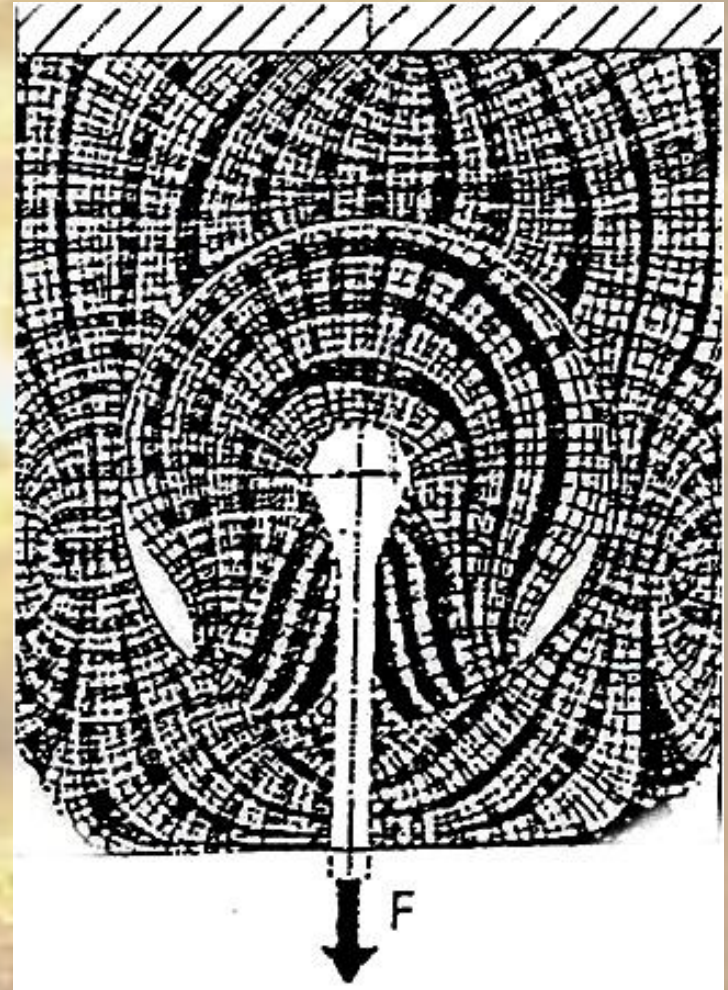
Erőátadás hatása

koncentrált, valamint megoszló terhelések esetén

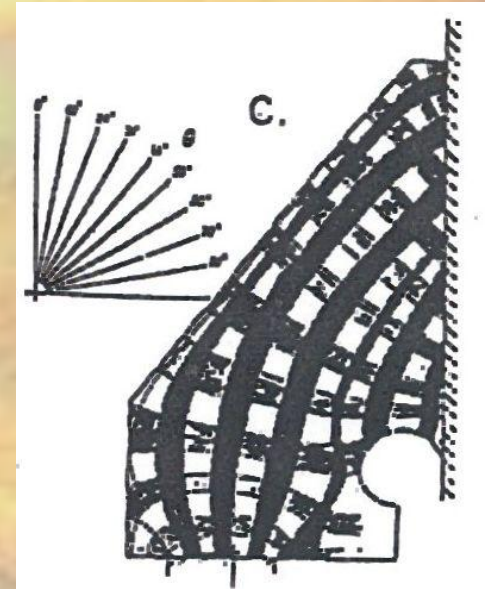
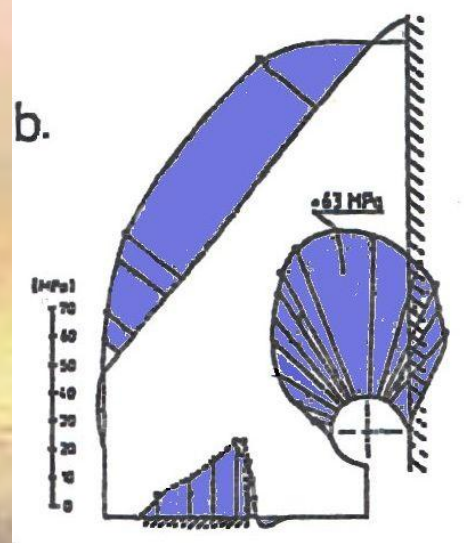
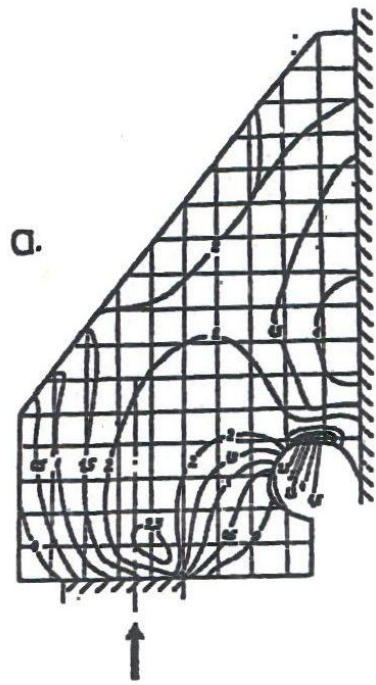
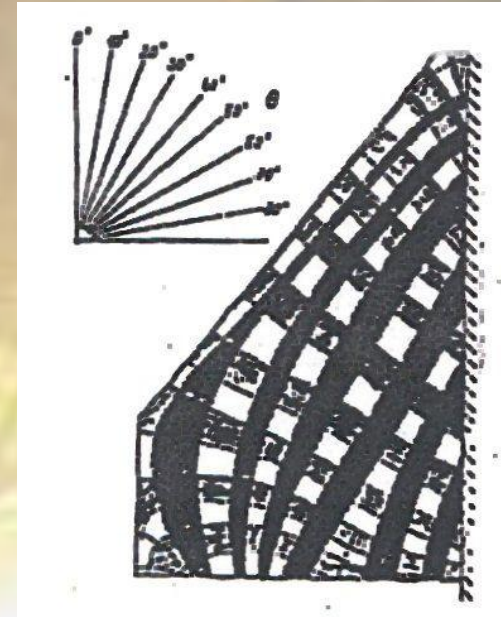
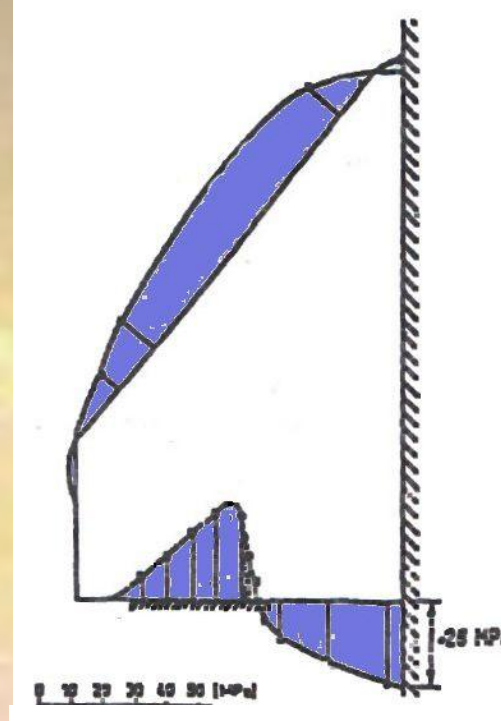
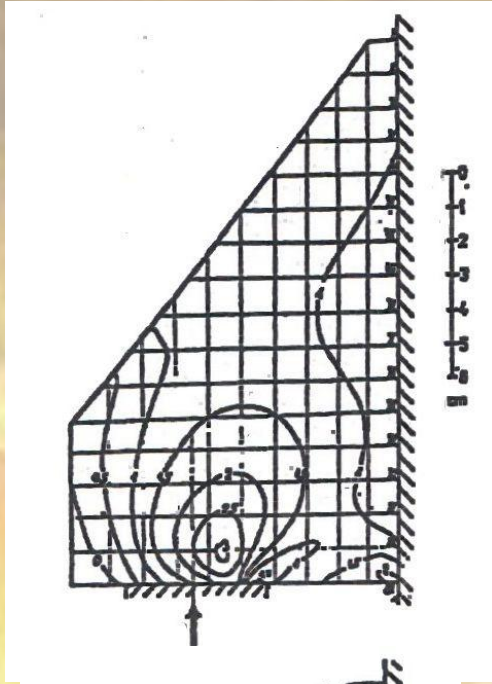
Megoszló teher átadás



Koncentrált teher átadás

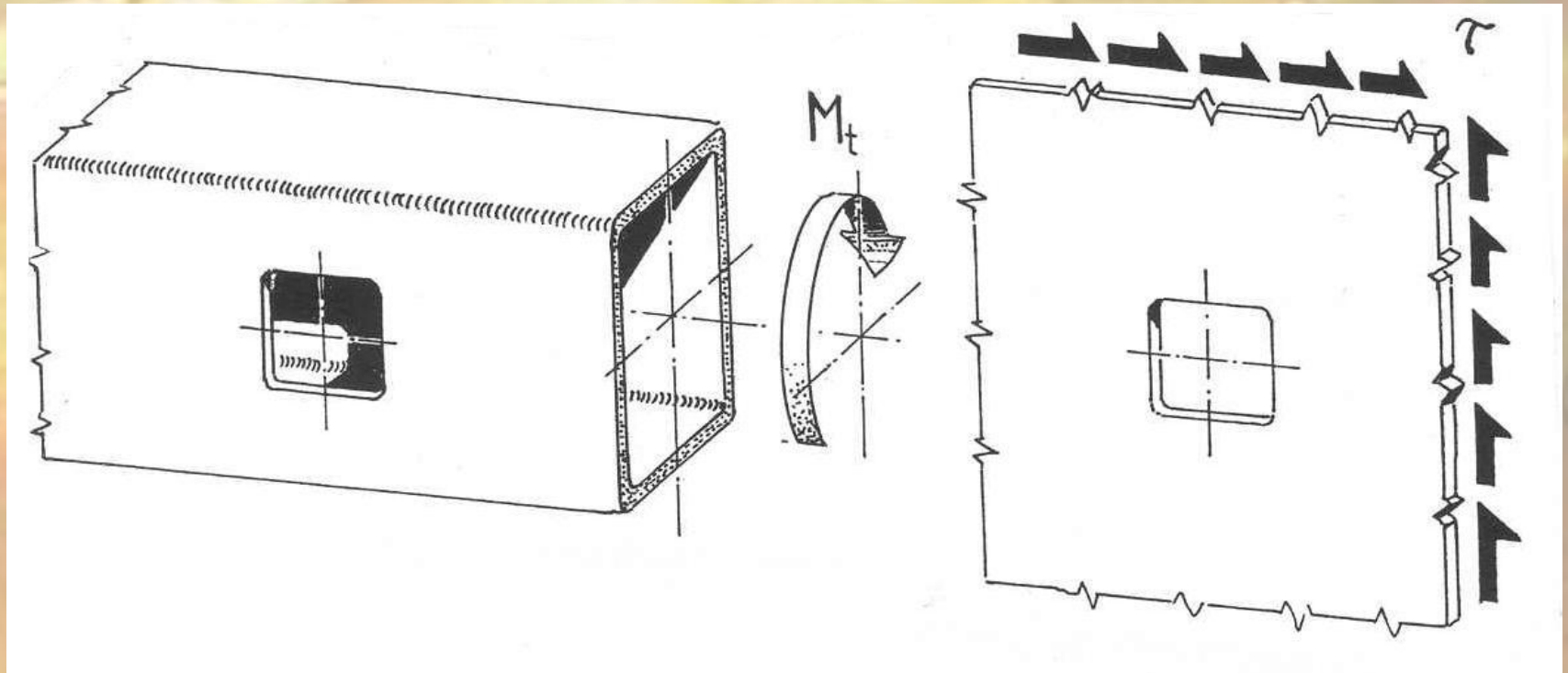


Befogott tartó teherátadási környezete és a tartó alakjának kapcsolata

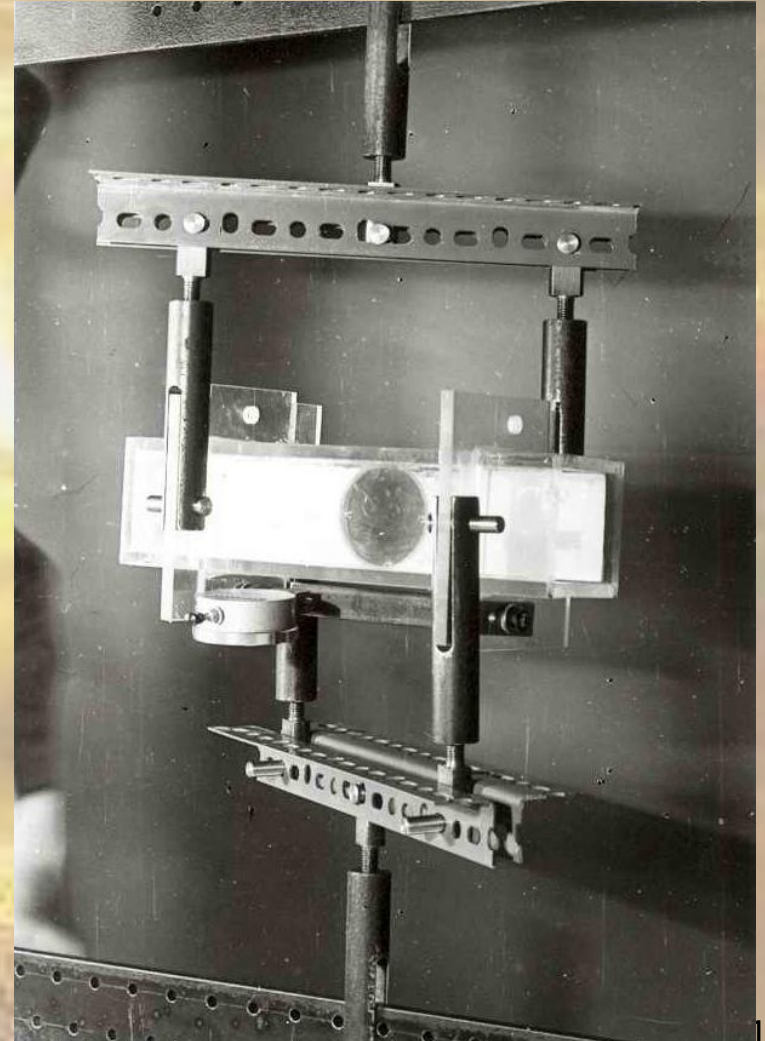
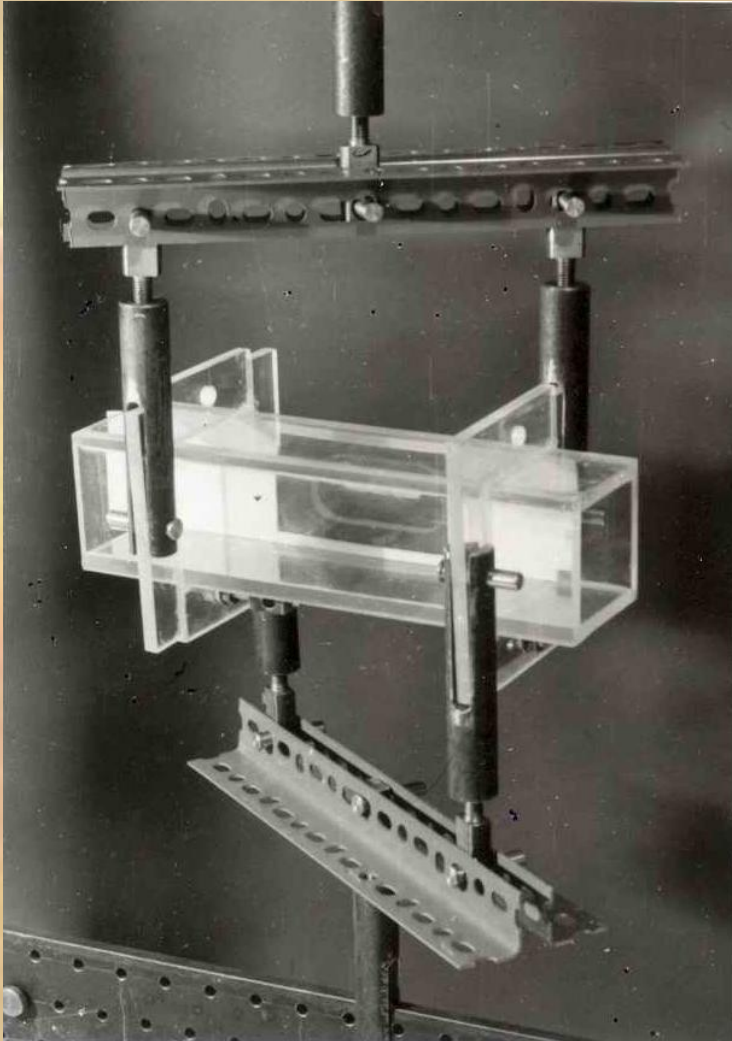


Csavart tartón alkalmazott különféle gyengítések (kivágások) hatása

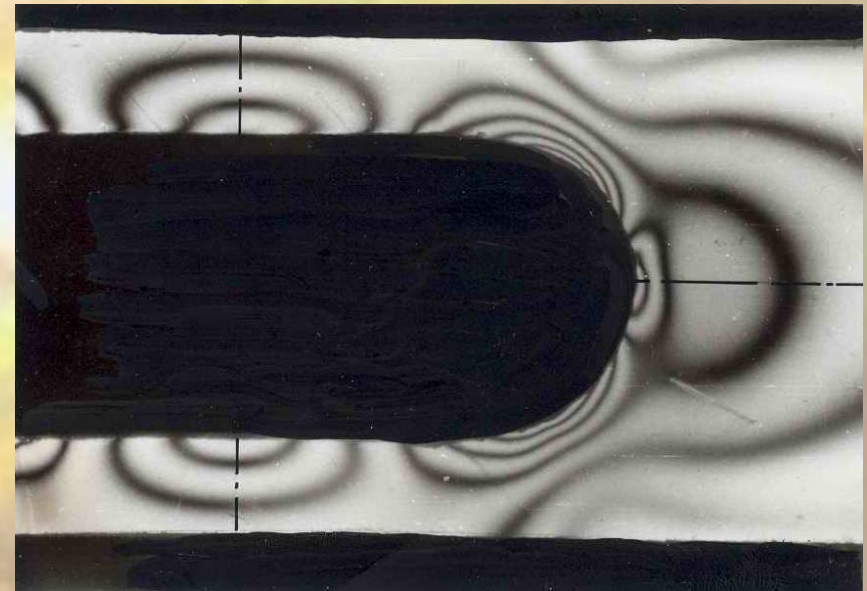
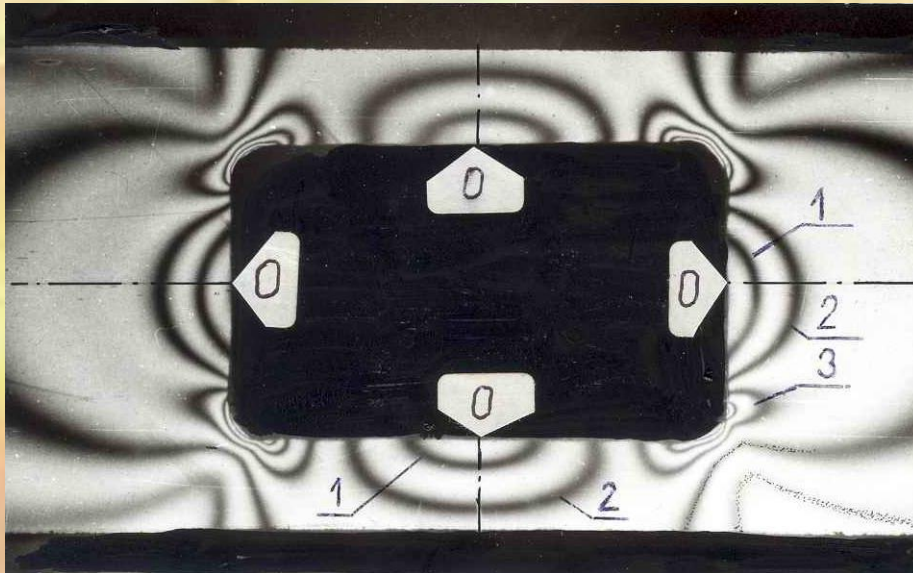
The investigated structure and the numerical model



A síkfeszültségi modell terhelési körülményei
(the polarizer (polarisation filter) inserted into the investigated beam)

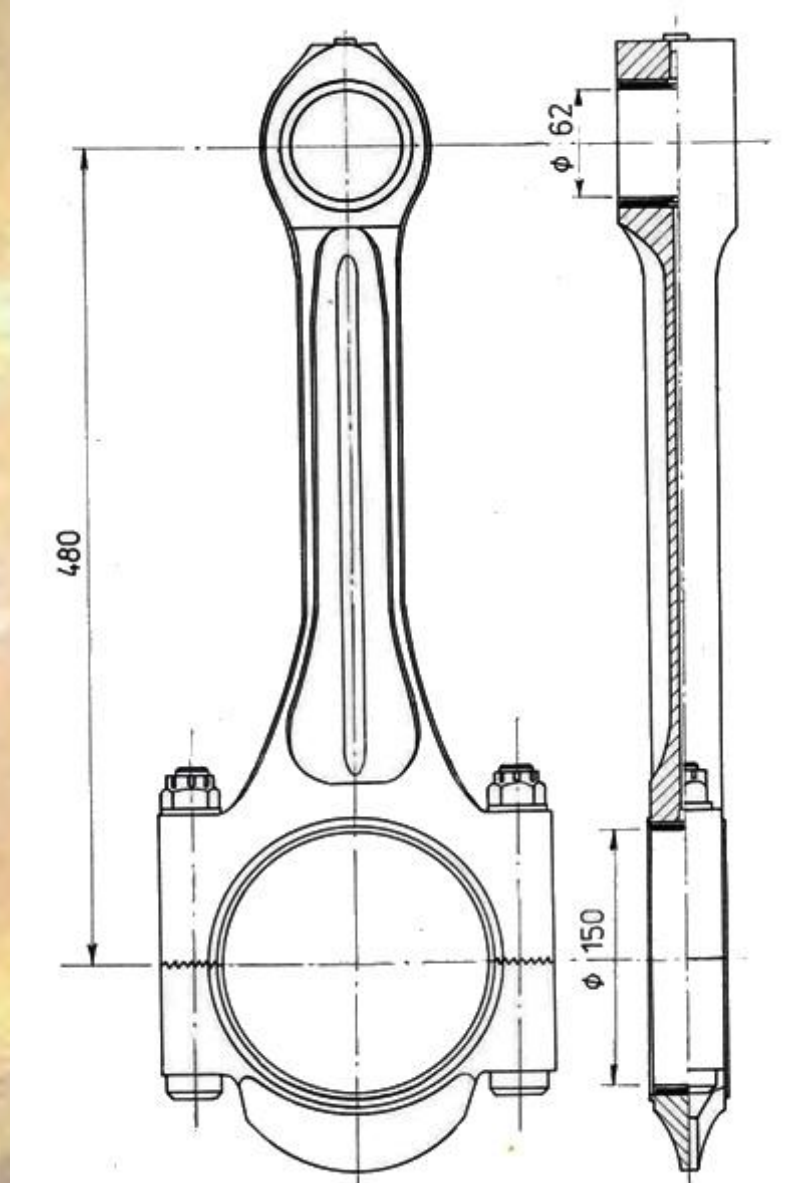


A rendszámeloszlások különböző kivágások esetén,
amely alapján a kivágás optimalizálható



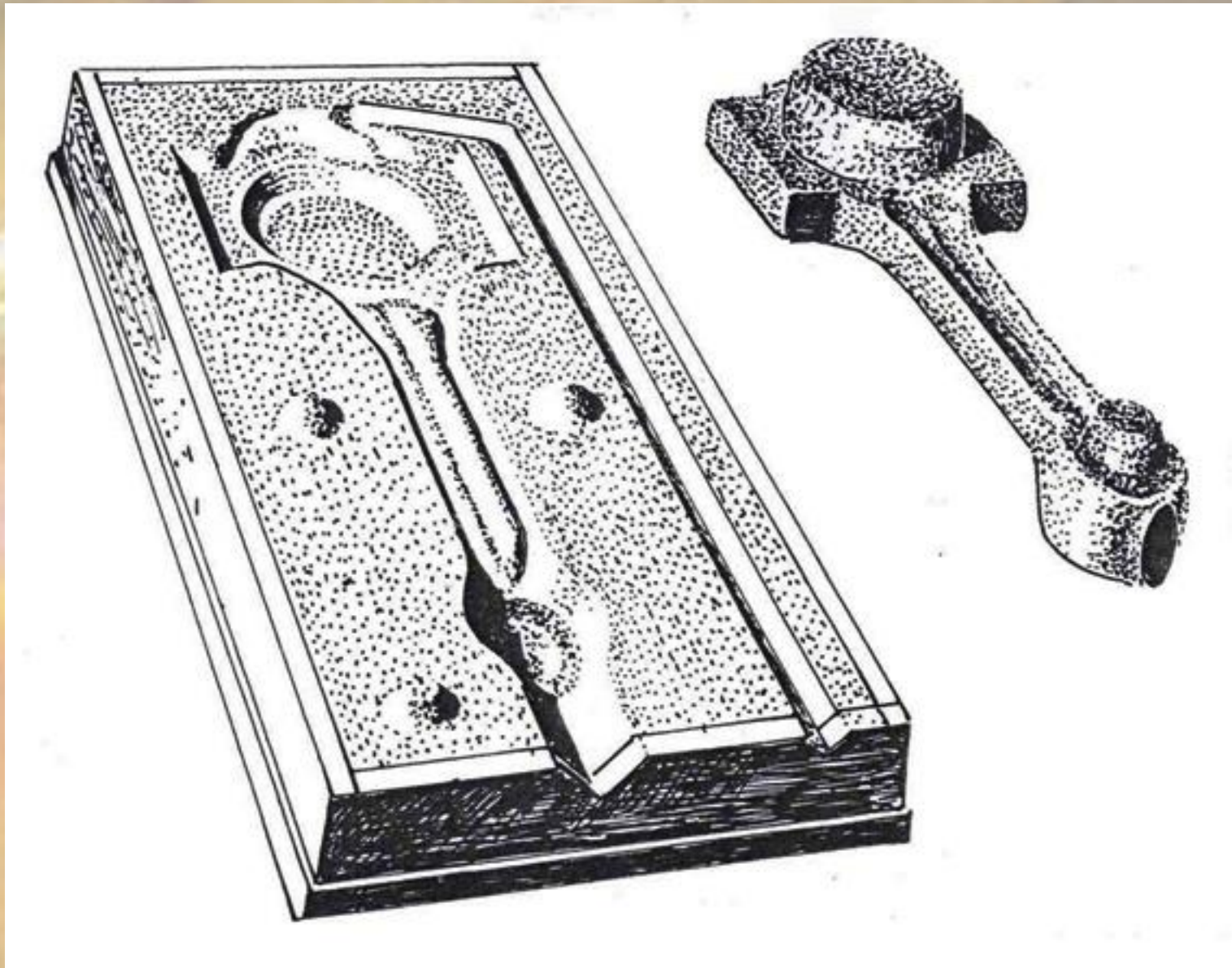
3D feszültségvizsgálat (modellen elvégezve)

Belsőégésű motor hajtórúdfej alakjának optimalizálása*

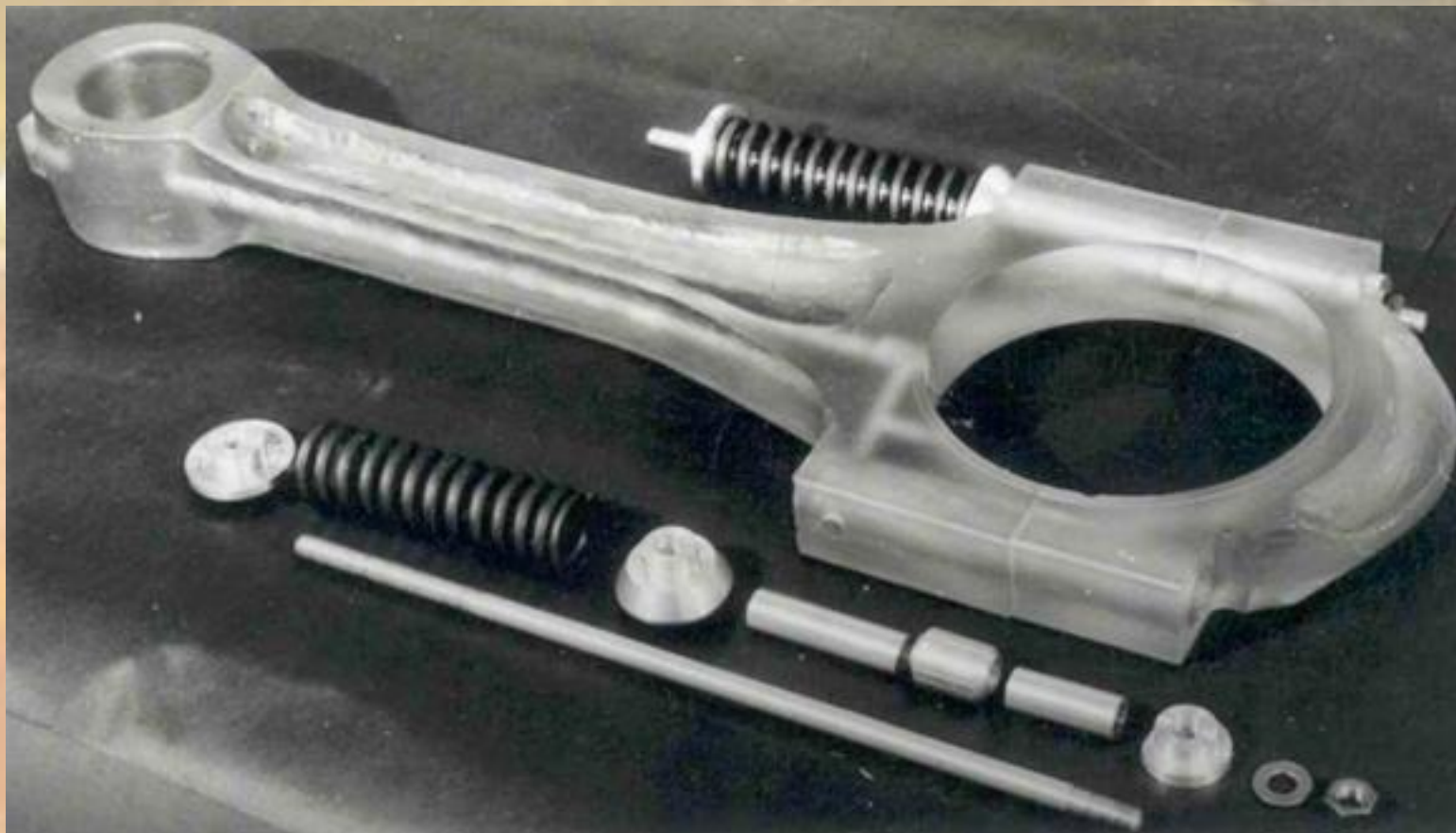


*Investigation of Prof. Thamm, BME, Hungary, 1978

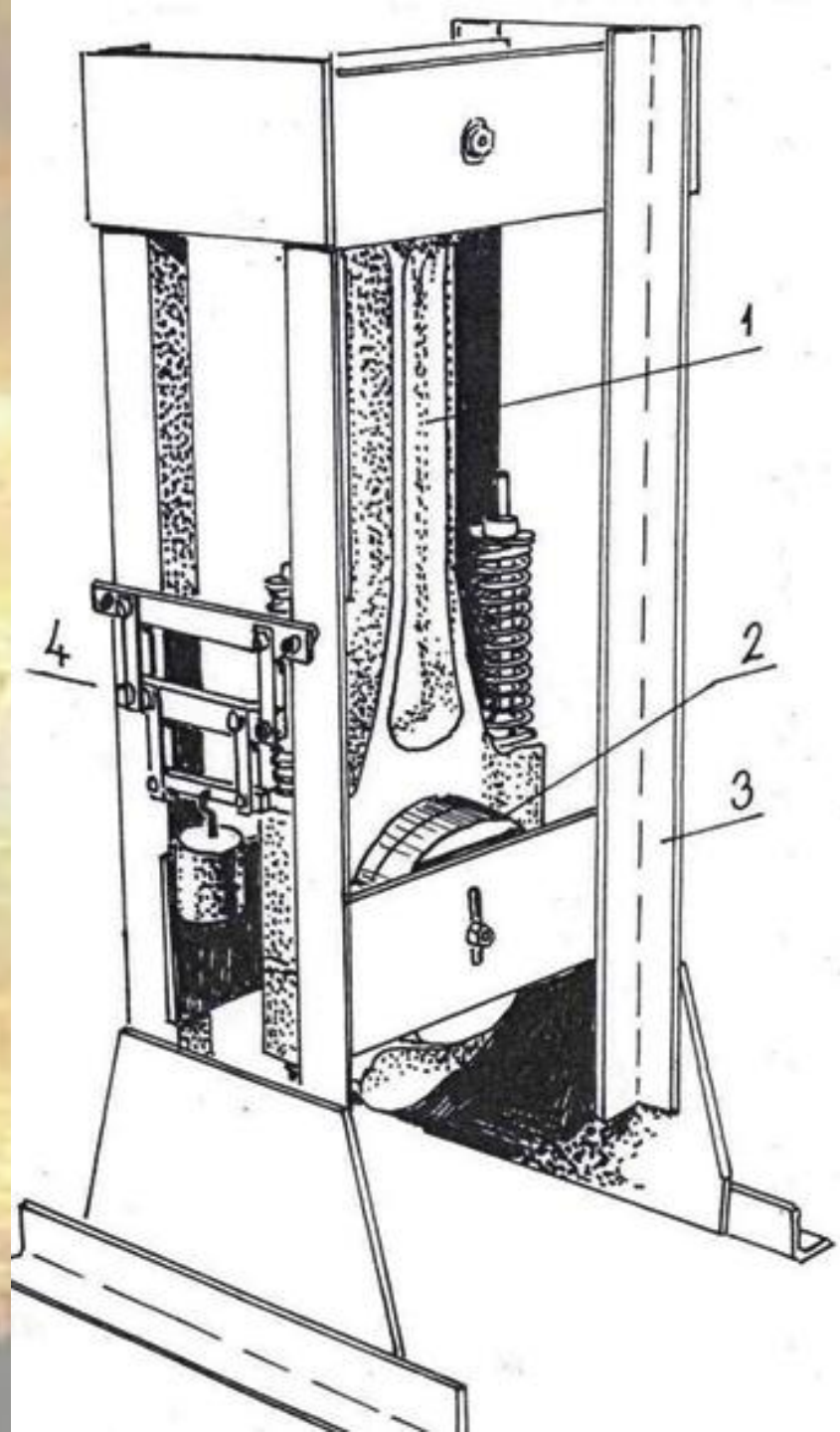
Az öntőforma, és az öntésre használt eredeti hajtórúd



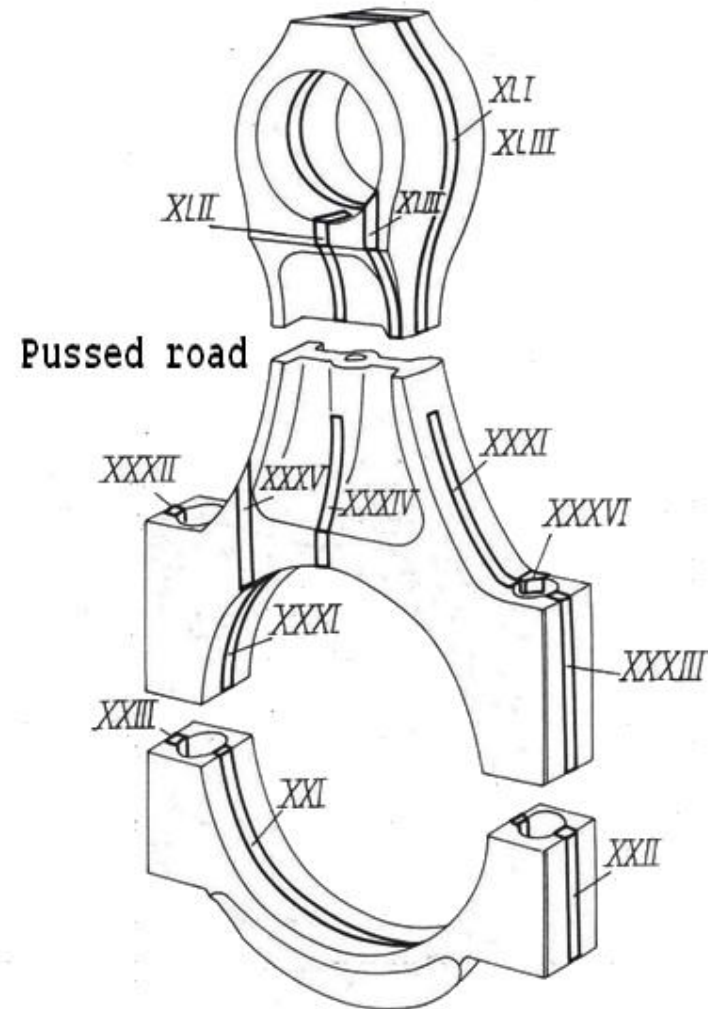
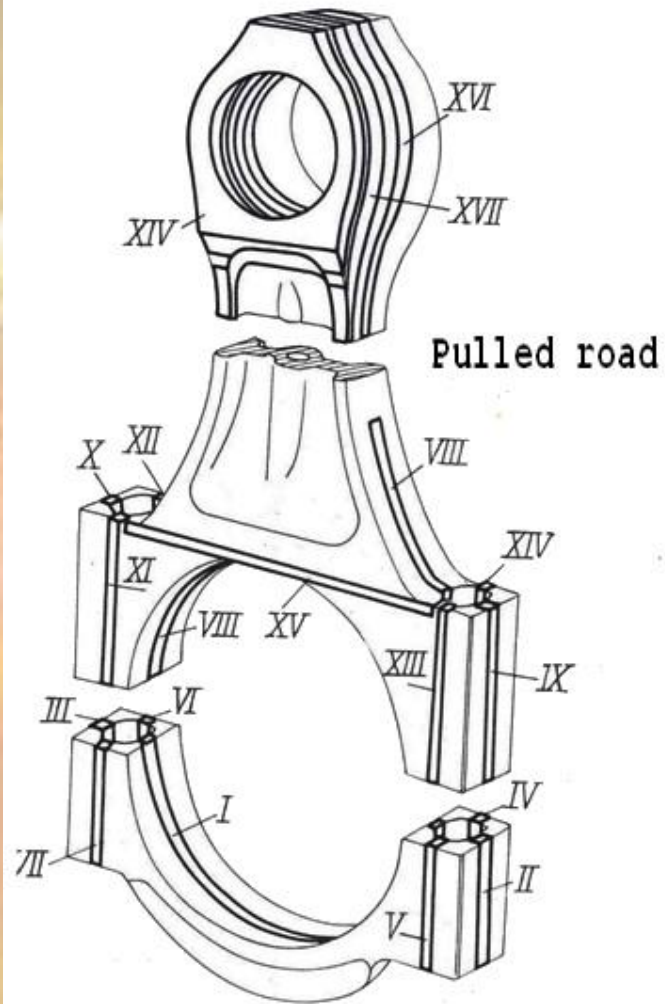
Az epoxy modell, a hajtórúd fejet összefogó csavarokkal



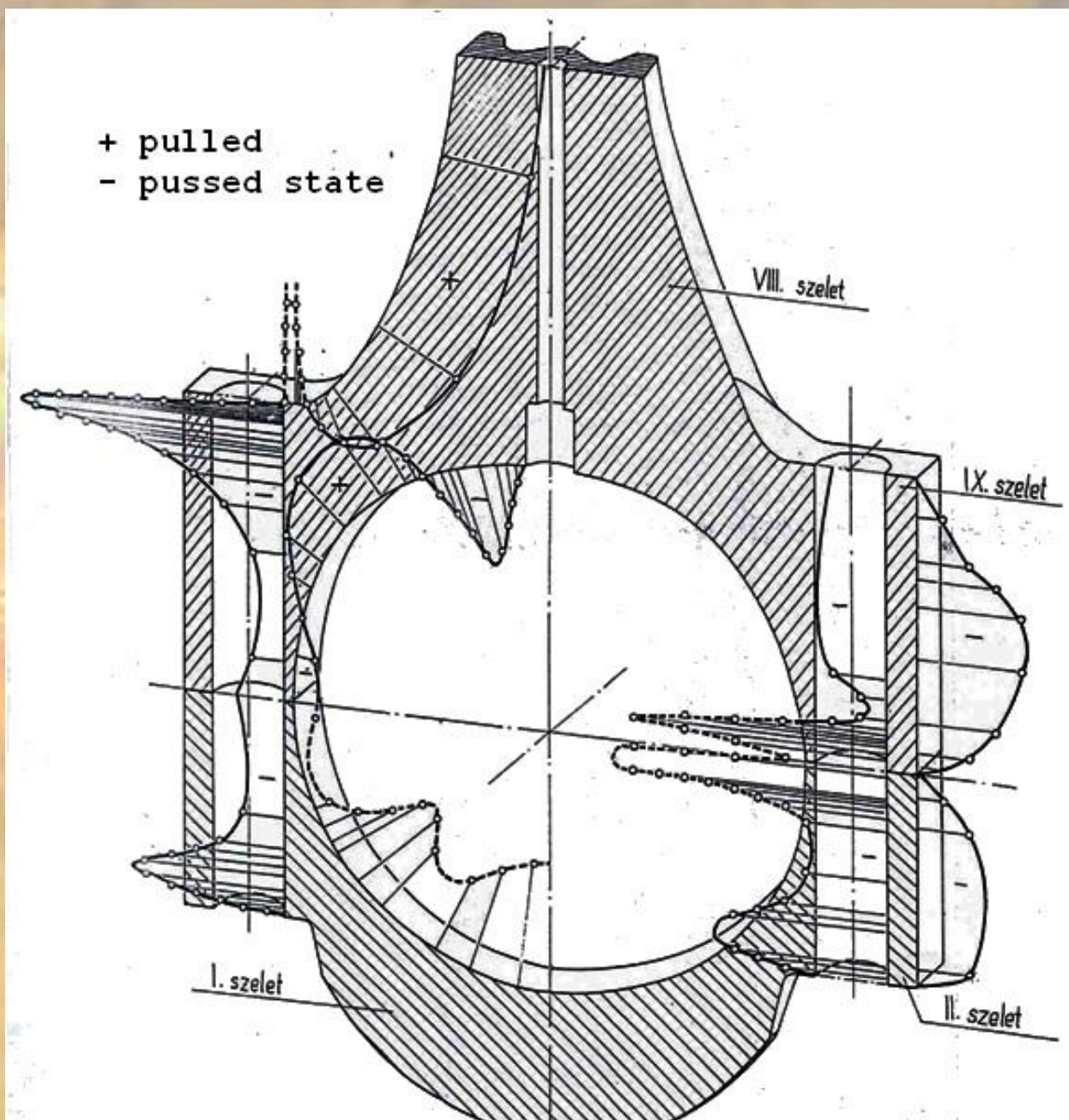
A terhelő berendezés (devise)
A terhelt hajtórúdfejbe a
feszültségek „befagyasztásához”



A szeletek, amelyek alapján a feszültséganalízis sík modellként elvégezhető



A feszültségre kiértékelt rendszám eloszlás



A rendszám eloszlás (keresztezett és párhuzamos polarizátor állásban)

