

## Törésszimuláció alkalmazása a tervezésben

A műanyagok deformációját, tönkremenetelét az anyagjellemzők figyelembevételével több lépésben lehet szimulálni. Sok terület – például a terhelésnek kitett elemek biztonságos alkalmazhatósága, az autóiparban az utasbiztonság növelése – megköveteli, hogy már a tervezés fázisában számításokat végezzenek a termék várható viselkedéséről.

*Tárgyszavak: szimuláció; tervezés; modellezés; autóipar; deformáció; végelem-módszer; vizsgálat; mechanikai tulajdonságok.*

### Beltéri autóalkatrészek és a biztonság

Az autók belső terében elhelyezkedő alkatrészek, pl. a műszerfal, oszlopok, panelek, ajtóalkatrészek igen fontosak az utasbiztonság szempontjából, ezért nagy gondot kell fordítani tervezésükre. Csak a legmodernebb, számítógéppel támogatott tervezési módszerek teszik lehetővé, hogy kellőképpen lerövidíthessék a fejlesztés idejét és csökkenthessék a drága prototípus-kísérletek számát. Ezeknél az alkatrészeknél célszerű hőre lágyuló műanyagokat használni szerkezeti anyagként, mert azok a plasztikus deformáció révén sok energiát képesek elnyelni. Ahhoz, hogy egy terméket jól meg tudjanak tervezni, szimulálni kell, hogy az anyag hogyan fog viselkedni különböző valós körülmények között, pl. egy ütközés során. Ehhez különböző sebességeken felvett szakítási görbékre van szükség, amelyek általában nem állnak rendelkezésre az adatbankokban, ezért kísérletileg kell meghatározni őket.

A virtuális autón elvégzett törésszimuláció sokkal kevesebbe kerül, mint valóságos autókat összetörni, de mindkettőre szükség van, hiszen az utasbiztonság egyre fontosabb kritérium az új gépkocsik vásárlásakor. *A számításokkal (és kísérletekkel) alátámasztható biztonság kitűnő reklám, tehát nagy figyelmet fordítanak rá.* Az egyre pontosabb számításokat az teszi lehetővé, hogy az anyagmodellek, a mérésekhez szükséges kísérleti eljárások és a számítások elvégzéséhez használt számítógépek lélegzetelállító sebességgel fejlődnek. Természetesen a legjobb számítástechnika sem adhat jobb eredményt, mint amit az inputként használt modell lehetővé tesz. Különösen nehéz leírni a kompozitok (pl. a szálerősített anyagok) viselkedését, amelyekben több fázis is jelen van.

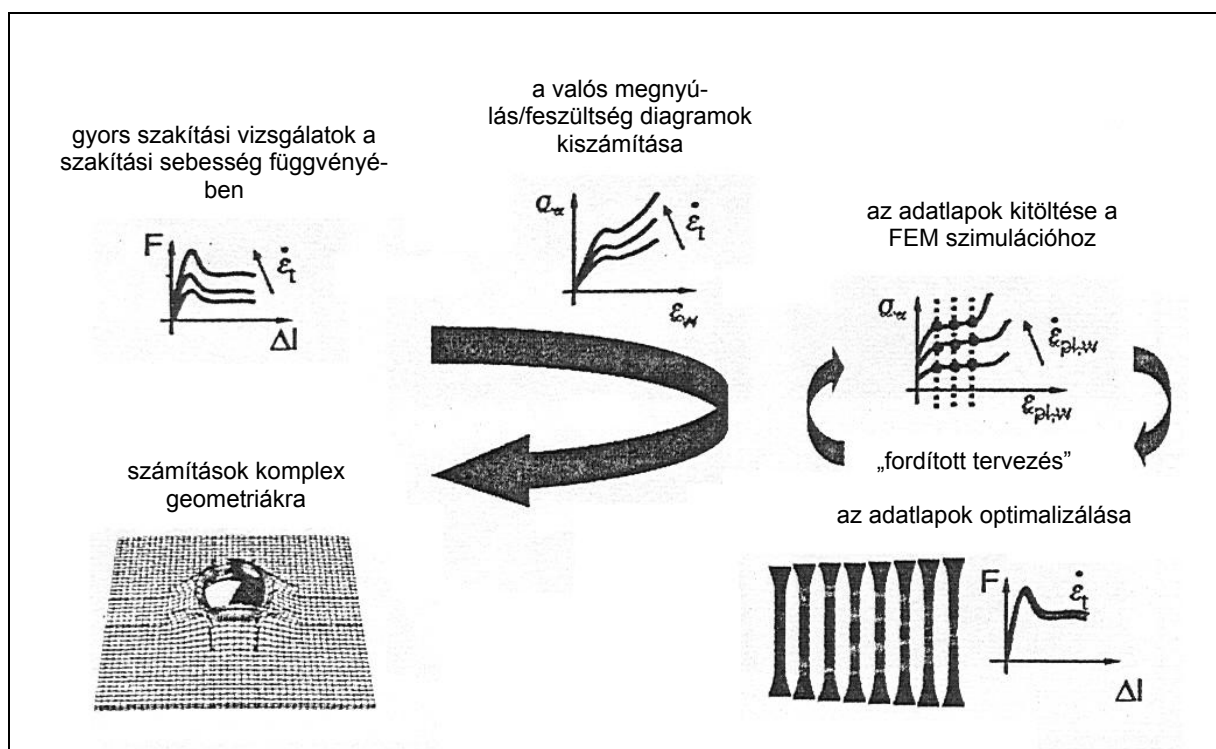
### A műanyagok deformációjának leírása

A bonyolult alakú testek mechanikai viselkedését végelem-módszerrel (finite element method, FEM) szokták jellemezni, de ehhez ún. anyagmodellekre van szük-

ség, amelyek paramétereit jól kell ismerni. Az anyagmodellek műanyagok esetében bonyolultabbak a fémekénél, mert a deformációs viselkedés függ a terhelés nagyságától, sebességétől, a korábbi terhelésektől és a hőmérséklettől. Figyelembe kell venni a befagyott feszültségeket, a molekulák orientációját, a környezet hatásait stb. Természetesen ennyi mindent nem lehet belevenni a modellbe, bizonyos egyszerűsítéseket tenni kell. Több FEM program is tartalmazza az ún. *elasztikus/plasztikus modellt*, amely tönkremeneteli kritériumot is tartalmaz. Ezt a modellt használják mind fémek, mind műanyagok dinamikus igénybevitelének szimulációjához, de műanyagoknál a paraméterek függenek a deformáció sebességétől. A tönkremeneteli kritériumra azért van szükség, hogy a már tönkrement elemeket ne vegyék figyelembe a későbbi teherviselésben.

## Modellek, illesztés, alkalmazás

Az anyagjellemzők figyelembevétele a törési tulajdonságok tervezésében több lépésben történik (1. ábra). Először különböző sebességű gyors szakításokat kell végezni, amelyek közvetlen eredménye a műszaki deformáció/erő összefüggés; ebből kell kiszámolni a valós megnyúlás/feszültség összefüggéseket. Ez a lépés már bizonyos hibákkal terhelt, ezért lépcsőzetes optimalizálásra van szükség. Az optimalizáció során a számított és megfigyelt törési viselkedést hasonlítják össze, és ehhez igazítják a modellparamétereket. Az optimalizált paraméterkészlet felhasználásával ezután már bonyolultabb geometriájú tárgyak viselkedése is megjósolható.



1. ábra Anyagjellemzők feldolgozása a törésszimulációhoz

A modellparaméterek illesztése úgy történik, hogy a valós megnyúlás/feszültség görbeseregeket függvényekkel írják le, és a függvények paramétereinek megváltoztatásával lehet befolyásolni a szimulált görbék alakját. Az **Aacheni Műanyagkutató Intézet** kifejlesztett egy olyan matematikai programrendszert, amely megkönnyíti ezt az illesztési folyamatot. Először az illesztést kvázisztatikus (viszonylag kis deformációs sebességű) vizsgálatokban végzik el, majd ezt követően egy második, nagyobb sebességű vizsgálatban további paramétereket állítanak be és illesztenek. Ha ezt is sikerrel elvégzik, egy harmadik lépésben állítják be a tönkremeneteli kritériumokhoz tartozó paramétereket. Az így előállított teljes modell már alkalmas a komplex geometriájú próbatestek jellemzésére is. A modell helyességét úgy ellenőrzik, hogy egy bordás lemez dárdás ütészállóság-vizsgálatát szimulálják, és összehasonlítják a számításokkal.

Általánosságban megfigyelhető, hogy *a deformációs sebesség növelésével csökken a szakadási nyúlás*, és egyre ridegebbé válik az anyag. A nagy sebességű szakítóvizsgálatokhoz speciális berendezések és technikák szükségesek (nagy merevség, kis elmozdulás, rezgésmentesség, gyors válaszidő stb.). Tekintettel arra, hogy a műanyagokban a deformáció gyakran lokalizálódik, a deformáció mérésére is lokális módszereket kell használni.

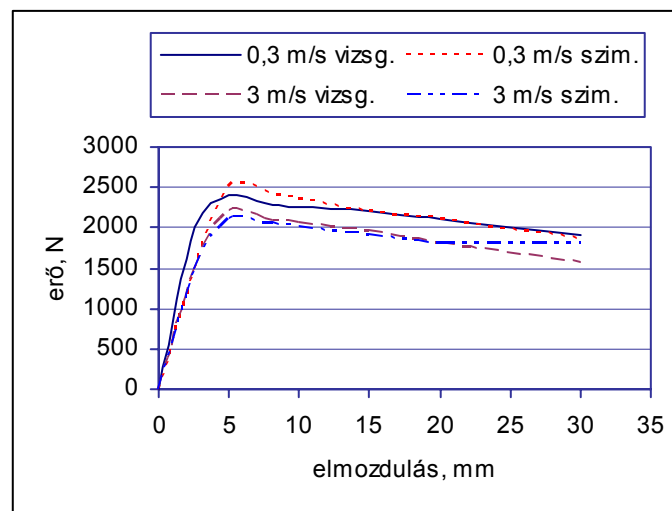
Azt is figyelembe kell venni, hogy az egytengelyű deformáció nem mindig elég a komplex jellemzéshez, ugyanis az anyag viselkedése függhet a bonyolultabb terhelési módoktól. *Az egytengelyű mellett a kéttengelyű (biaxiális, sík jellegű) vagy nyíróterhelést is célszerű vizsgálni*, vagy valamilyen modellt kell felállítani, amelynek alapján ezek a terhelési módok az egytengelyű húzóterhelések alapján szimulálhatók.

## **Méréstechnika és deformációs sebesség**

Az *1. táblázat* mutatja a különböző vizsgálatokhoz tartozó tipikus deformációs sebességeket, illetve a megvalósításhoz használt technológiát. Az ISO-527 szabvány szerinti „normál” húzógépes vizsgálatok jellemző deformációsebesség-tartománya  $10^{-2}$ – $10^{-3}$  s<sup>-1</sup>, a mért szakasz hossza 50 mm, a hosszváltozást többnyire felcsíptetett érzékelőkkel vagy optikai úton mérik. A névleges deformáció az elmozdulás és a kiindulási hossz hányadosa, a névleges feszültség pedig az erő és az eredeti keresztmetszet hányadosa. A valós feszültség meghatározásához figyelembe kell venni a keresztirányú elmozdulást, amely a keresztmetszet csökkenését eredményezi (*2. ábra*). Ahhoz, hogy egy hagyományos húzóvizsgálatban megközelítsék az ütési vizsgálatok  $10^2$  s<sup>-1</sup> nagyságrendű deformációs sebességét, 10 m/s nagyságrendű húzási sebességet kellene megvalósítani. Ilyen sebességek mellett azonban a dinamikus deformáció az anyagban már hullámszerűen terjed, és nem tételezhető fel homogén megnyúlási mező a minta egészében. A dinamikus hatások felerősíthetik a mintában vagy a mérési elrendezésben előforduló apróbb hibákat. A gyors szakításokhoz a **BASF** cégnél kifejlesztett mérési módszerben pl. a szabványosnál rövidebb (75,4 mm hosszú) próbatesteket alkalmaznak. A rövid próbatesteket fröccsöntött lapokból munkálják ki, szálerősítéses anyagok esetében hossz- és keresztirányban is.

## A különböző terhelési módokhoz tartozó deformációs sebességek

Deformációs sebesség, $s^{-1}$	Kategória	Alkalmazás	Vizsgálat
$10^{-6}$ – $10^{-2}$	Kvázisztatikus	Kúszás, tartamszilárdság	Szervohidraulikus berendezések
$10^0$ – $10^2$	Dinamikus	Kerék-sín kapcsolat, alakítás, ütközés	Szervohidraulikus gyors szakítógépek, ejtőgépek
$10^4$ – $10^6$	Erősen dinamikus	Golyóbecsapódás, meteorit becsapódás az űrben	Hopkinson-rúd vizsgálat, planáris/lemez vizsgálat

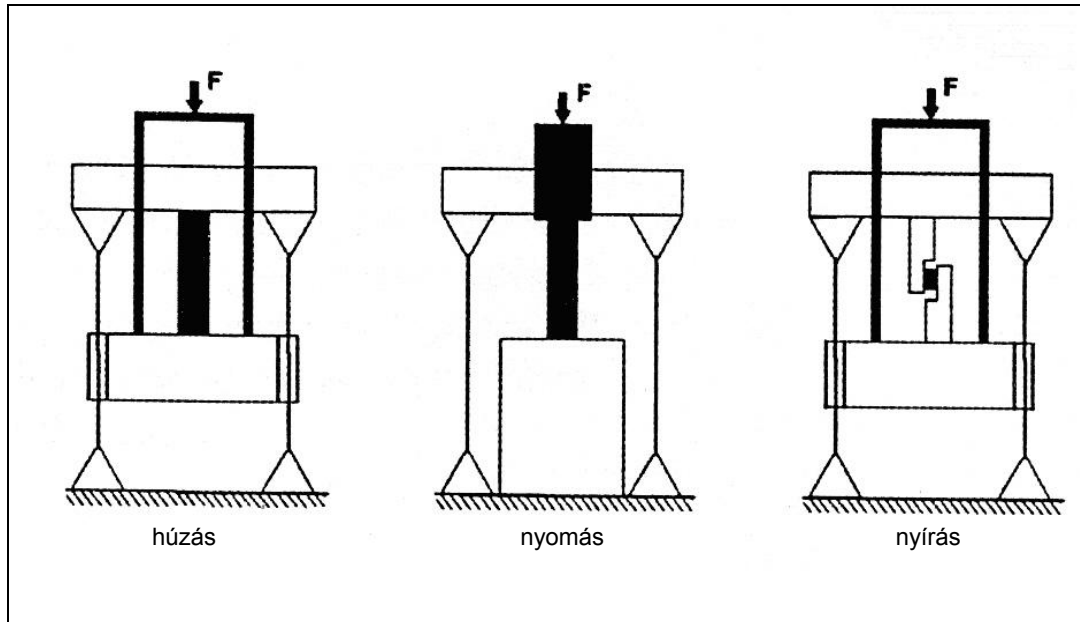


2. ábra Egy PA/ABS próbatest gyors szakítási vizsgálatának mért (vizsg.) és számított (szim.) görbéi

A nagy sebességű vizsgálatok közül viszonylag legegyszerűbbek az ejtővizsgálatok, de itt a végsebesség a potenciális energia függvénye, azaz minél nagyobb ütközési sebességet akarnak elérni, annál magasabbról kell ejteni az ütköző testet. A végsebesség és az ejtési magasság között gyökös összefüggés van. Ahhoz, hogy komplex képet kapjanak az anyag viselkedéséről, a méréseket a kvázisztatikustól az erősen dinamikus tartományig el kell végezni. A kis deformációs sebességnél nagy tömegeket és energiát kell alkalmazni, amihez szervohidraulikus berendezések szükségesek, hogy a deformáció során ne csökkenjen le a deformáció sebessége.

A tönkremenetelhez szükséges feszültség nagysága függ az igénybevétel módjától: egytengelyű nyomásnál általában nagyobb, mint az egytengelyű húzásnál, nyírásnál pedig általában kisebb, mint húzásnál. A különböző kvázisztatikus terheléseket általában egy berendezésen végzik el, de különböző befogókat alkalmaznak (3. ábra). A különböző igénybevételekhez más és más próbatest-geometria tartozik, bár a nyo-

máshoz és a húzáshoz azonos próbatestet szoktak használni. A húzáshoz és nyomáshoz azért használnak azonos geometriát, hogy a kapott értékek összehasonlíthatóak legyenek. Annak érdekében azonban, hogy a kihajlás ne következzen be olyan könnyen a nyomási vizsgálatnál, a nem terhelt oldalakat megtámasztják.



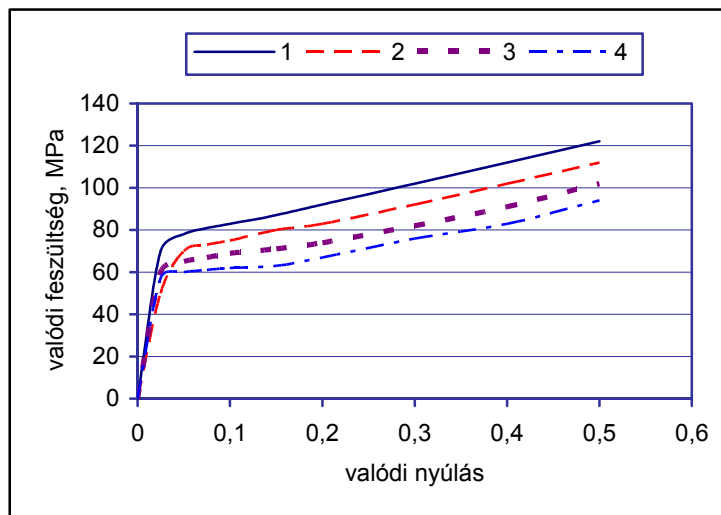
3. ábra A különböző terhelési módokhoz tartozó befogások

A nagy sebességű húzóvizsgálatokban a megnyúlást nem lehet érintkező módszerekkel mérni, mert ezek a próbatest viselkedését is befolyásolják, és nem teszik lehetővé a hossz- és keresztirányú elmozdulások egyidejű mérését. Ahhoz pedig, hogy pontos anyagmodellt alakítsanak ki, ismerni kell a keresztirányú kontrakció mértékét is. Vannak korszerű optikai eljárások, amelyek megkönnyítik az ilyen jellegű méréseket, ilyen az ún. „szürkületi korreláció”. Ennél a módszernél mérés előtt a próbatestet sztochasztikus mintázattal látják el, majd a deformáció során felvételesorozatot készítenek (egy vagy két kamerával – attól függően, hogy két- vagy háromdimenziós kiértékelést végeznek), majd az egymást követő képek szürkületi értékeinek korrelációs analízisével megállapítják az elmozdulások eloszlását. Ez a módszer nagy felület vizsgálatát teszi lehetővé, ugyanakkor a vizsgálatot arra a területre lehet koncentrálni, ahol a plasztikus deformáció valóban bekövetkezik. A módszer lehetővé teszi a *Poisson hányados* (a hossz- és keresztirányú elmozdulások aránya) meghatározását egyetlen mérőeszköz segítségével.

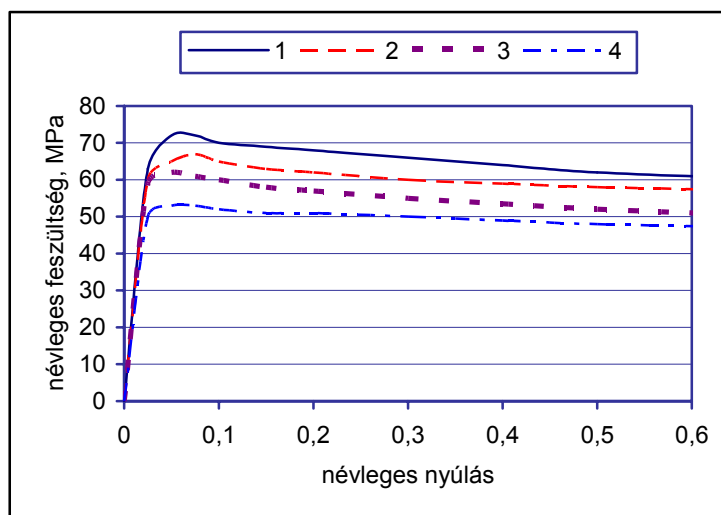
### Az adatok kiértékelése

A szürkületi korrelációk mérése és kiértékelése nagy követelményeket támaszt az alkalmazott számítástechnikával szemben, hiszen valós idejű mérésről van szó, és

hatalmas mennyiségű videóadatot kell nagyon rövid idő alatt letölteni és kiértékelni. Ha figyelembe vesszük az olyan változtatható paramétereket is, mint a hőmérséklet, a nedvességtartalom, a szükséges párhuzamosok stb., a tárolandó adatok száma Gb (gigabyte) nagyságrendű egyetlen mérésnél. A 4/a és a 4/b ábrákon láthatók egy nem erősített PA6 minta névleges és valós feszültség/nyúlás diagramjai a  $10^{-1}$  és  $10^2 \text{ s}^{-1}$  közötti deformációsebesség-tartományban. A névleges értékeket mutató 4/b ábrán látható feszültségcsökkenés tehát nem valóságos, csak a minta keresztmetszétének fokozatos csökkenéséből adódik.



4/a ábra PA6 mintákon mért valódi feszültség-nyúlás görbék különböző nyújtási sebességeken: 1.  $10^2$  /s, 2.  $10^1$ /s, 3.  $10^0$ /s, 4.  $10^{-1}$  /s



4/b ábra PA6 minták névleges feszültség-nyúlás görbék különböző nyújtási sebességek mellett: 1.  $10^2$  /s, 2.  $10^1$ /s, 3.  $10^0$ /s, 4.  $10^{-1}$  /s

Üvegszállal erősített próbatesteknél fellép az anizotrópia: a folyásirányra merőlegesen mért mintákon kisebb feszültségek alakulnak ki, mint a folyásirányban. Az anizotrópia a keresztirányú deformációban is megmutatkozik: a kontrakció a folyásirányra merőlegesen kivágott mintáknál jóval kisebb, mint a folyásiránnyal párhuzamos mintáknál. Ez érthető, mert a folyásirányra merőlegesen kivágott mintákban a folyásirányban orientált szálak gátolják a keresztirányú összehúzódást. A legnagyobb összehúzódás a minta vastagságának irányában történik, hiszen arra egyik szál sem orientált, nincs ami csökkentse a kontrakciós hajlamot. A keresztirányú kontrakció egyébként a minta nyúlásával nem nő, hanem csökken, ami a műanyag nemlineáris deformációjával magyarázható. A térfogatváltozás miatt a műanyagok eltérően viselkednek a fémektől, amelyekben a deformáció (a rácscsíkok egymáson történő elcsúszása) lényegében térfogatváltozás nélkül következik be. Ezért ott a Poisson-hányados a rugalmas deformáció tartományában 0,3 körül van, a plasztikus deformáció tartományában viszont 0,5 körül. A műanyagok deformációs viselkedése a fémekével nem modellezhető. Azt is meg kell még említeni, hogy a szálerősített műanyagoknál a makroszkóposan megfigyelt deformációs viselkedés tulajdonképpen a minta vastagságára vett átlagot mutat. Mivel (különösen a fröccsöntött mintáknál) a száleloszlás a külső rétegben más, mint a héjrétegben, ezt az anyagmodellek kidolgozásakor is figyelembe kell venni.

Összeállította: Dr. Bánhegyi György  
www.polygon-consulting.ini.hu

Brinkmann, M.: Der virtuelle Crash. = Plastverarbeiter, 58. k. 9. sz. 2007. p. 162–163.  
Kraatz, A.; Becker, F.; Moneke, M.: Versuchstechnik zur Materialmodellierung für die Crash-Simulation. = KunstStoff Trends, 7. k. 4. sz. 2007. p. 24–26.  
Glaser, S.; Wüst, A.: Crashbelastete Bauteile virtuell entwickeln. = Kunststoffe, 96. k. 9. sz. 2006. p. 168–172.

## Röviden...

### Égégátolt MOPP fólia

A **Nowofol Kunststoffprodukte GmbH** (Siegsdorf, Németország) elsőként kínál csökkentett éghetőségű polipropilénből készített egyirányban nyújtott PP-fóliát (MOPP). Égégátolt tartalmazó PP-ből eddig 200–300 µm-nél vékonyabb fóliát nem készítettek, és ezeket nem nyújtották. A Nowofol cég MOPP fóliája 50 µm vastag, és kielégíti a DIN 4102 jelzésű német építőipari szabvány B2 éghetőségi osztályba sorolásához szükséges követelményeket. A nyújtás következtében a fólia húzószilárdsága jelentősen megnő. Az égégátoló a fólia fizikai tulajdonságait nem változtatja meg.

P. K.-né

Flammhemmende MOPP Folie. = K-Zeitung online, K-News, 2008. febr. 15. [www.k-zeitung.de](http://www.k-zeitung.de)

[www.quattroplast.hu](http://www.quattroplast.hu)