Szálerősítésű beton modellezése egytengelyű húzó igénybevétel esetén

Kovács Imre

LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées), Paris

Franz-Josef Ulm

BME Vasbetonszerkezetek Tanszéke

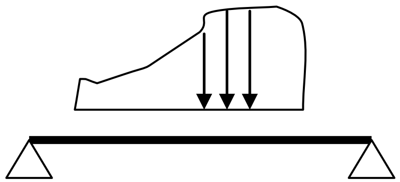
Balázs L. György

Az előadás felépítése

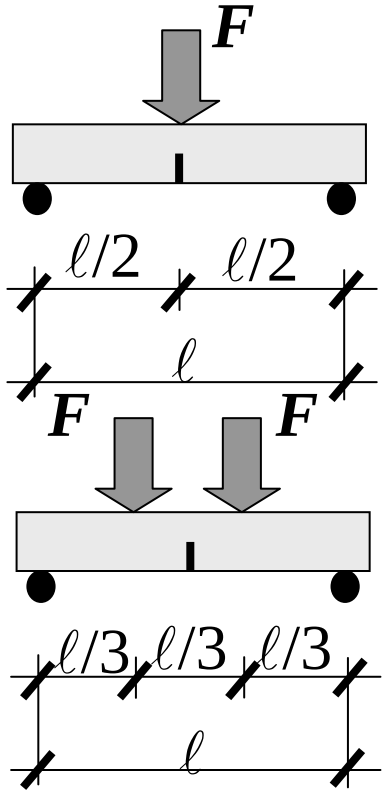
- 1-D viselkedés és modellezése
- Rheológiai modell és változatai
- 1-D ➔ 3-D
- 2-D alkalmazás
- Perspektívák
- Megállapítások

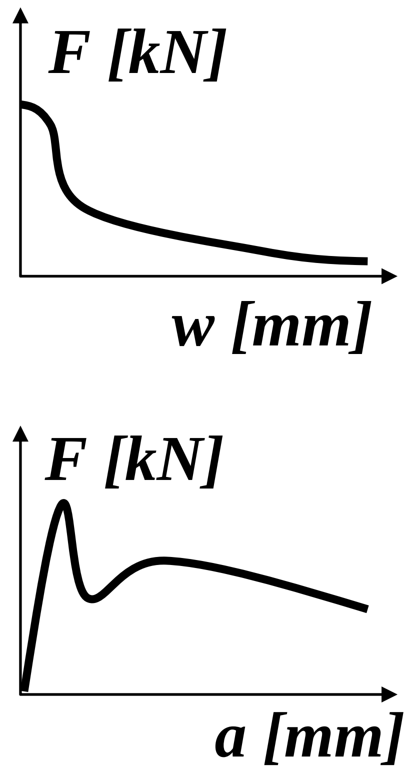
1-D modellek ➔ Gerendamodellek

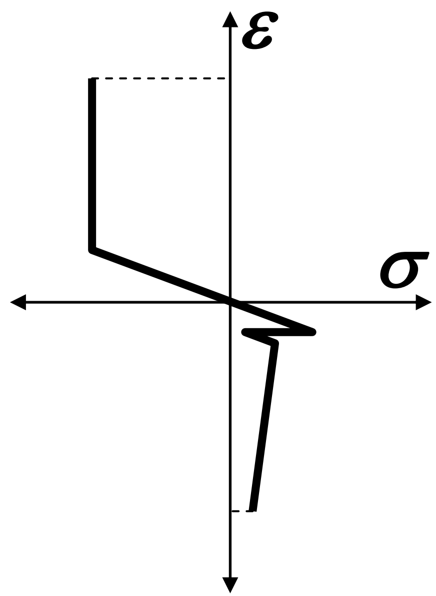
Alapmodell | ***Kísérlet*** | ***Mérés*** | ***Anyagmodell***



Hajlított gerenda

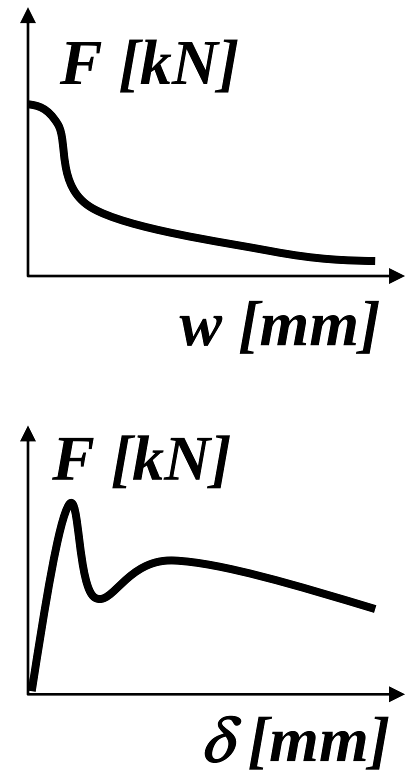


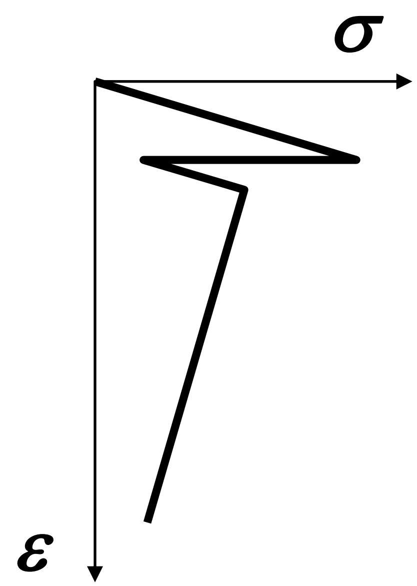




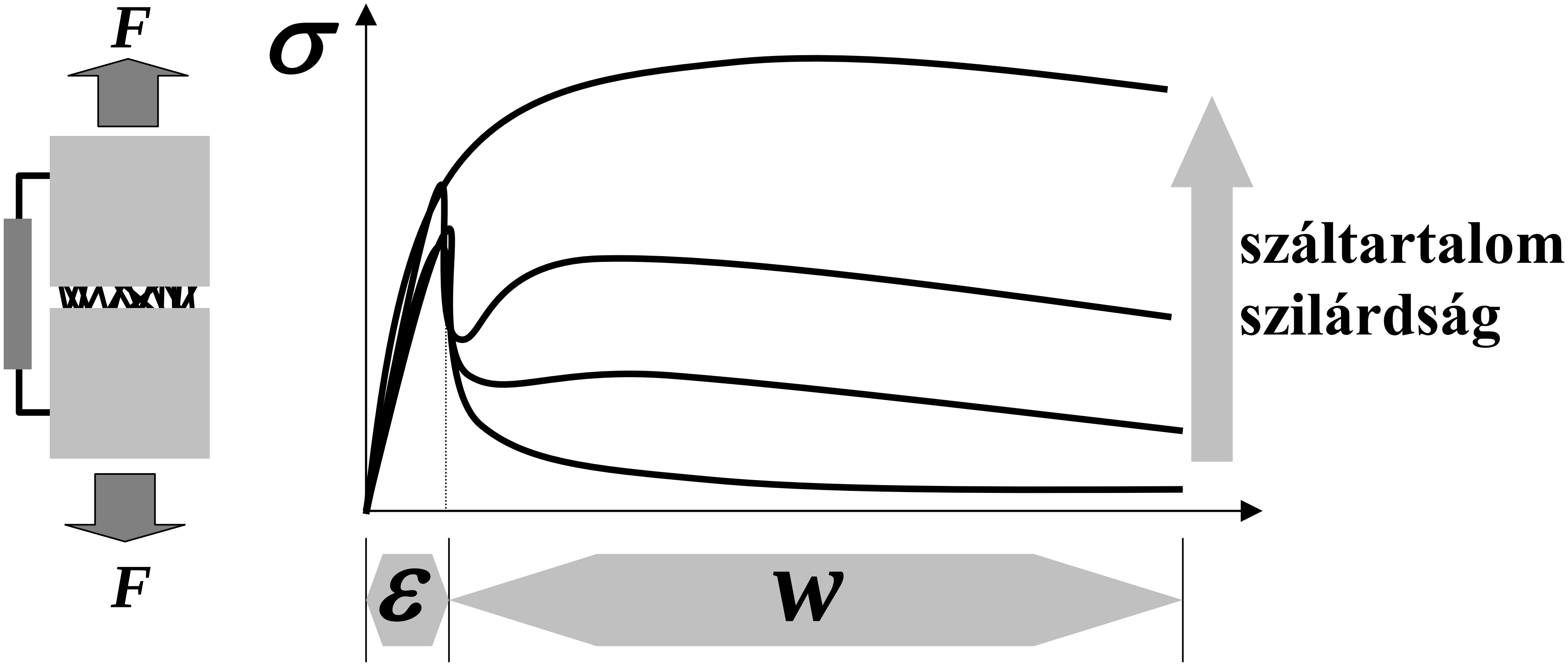
1-D modellek ➔ Húzóvizsgálat

Alapmodell	***Kísérlet***	***Mérés***	***Anyagmodell***

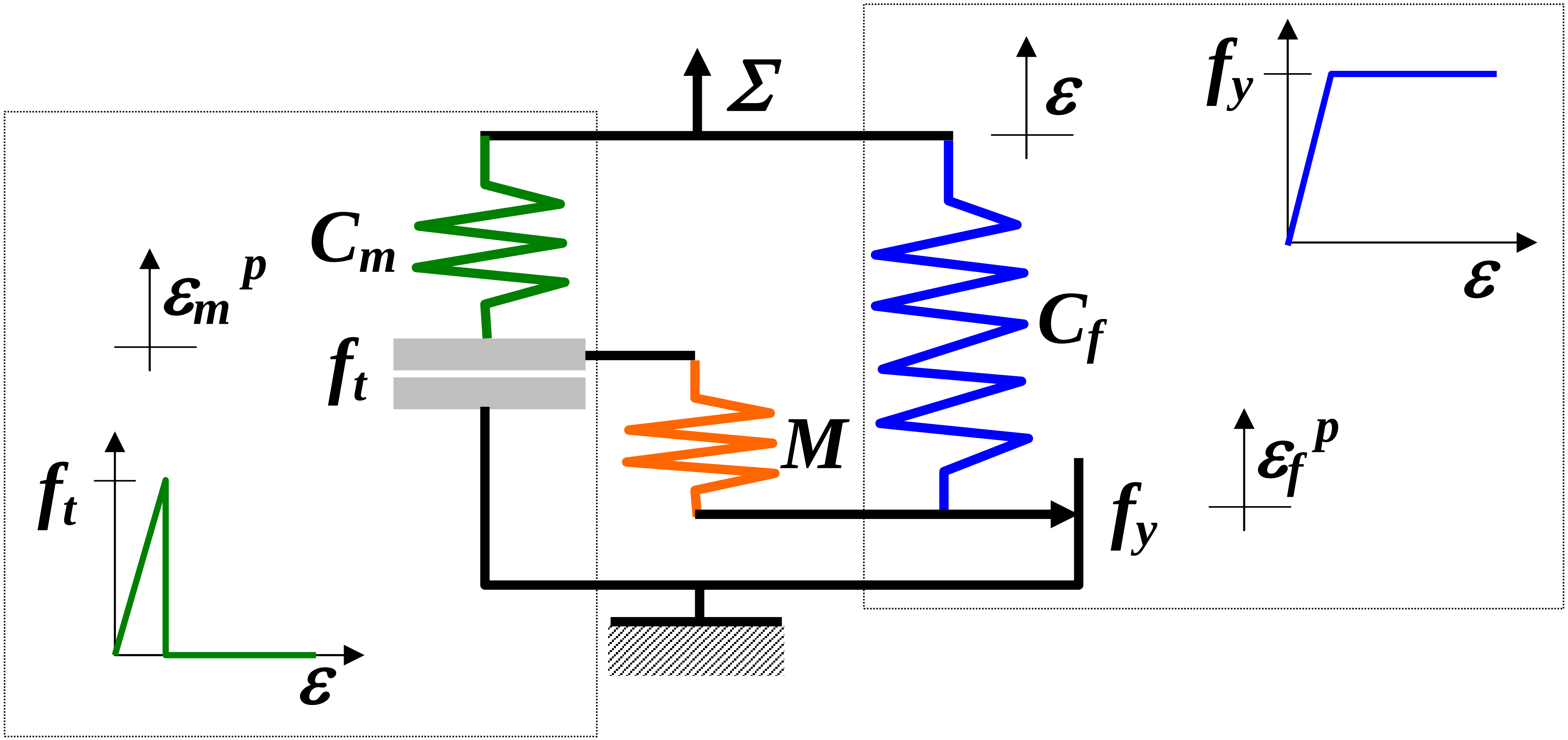




σ - ε σ - w



Rheológiai modell



vivi

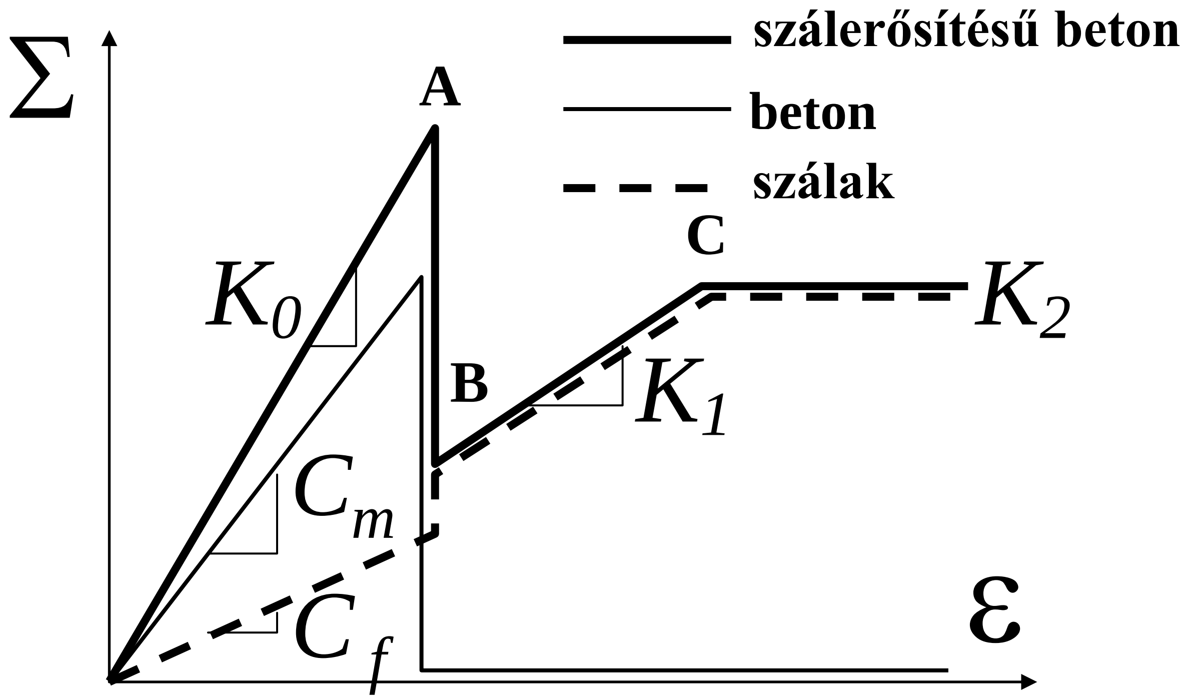
$\sigma - \varepsilon$ összefüggés

$$\Sigma = \left(C_m + C_f\right)\varepsilon - C_m\,\varepsilon_m^p - C_f\,\varepsilon_f^p$$

$$\sigma_m = C_m\,\varepsilon - \left(C_m + M\right)\varepsilon_m^p + M\,\varepsilon_f^p$$

$$\sigma_f = C_f\,\varepsilon + M\,\varepsilon_m^p - \left(C_f + M\right)\varepsilon_f^p$$

$\sigma - \varepsilon$ ábra



Modellparaméterek

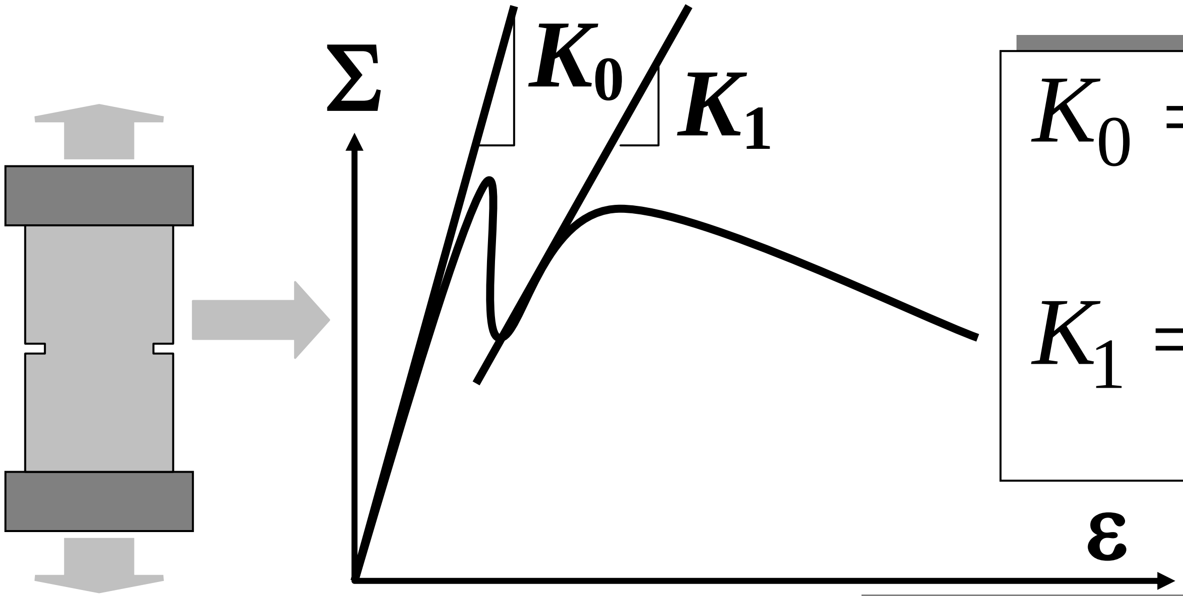
C_m , C_f , M ???

f_t := *beton húzószilárdsága*

f_y := ✸ *szál anyagának folyáshatára* ???
(nagyszilárdságú betonok)

✸ *szál tapadószilárdsága* ???
(normál betonok)

Modellparaméterek meghatározása
- a paraméterek kifejezése mérhető mennyiségekből -



$$K_0 = C_m(1+\kappa)$$

$$K_1 = C_m\left(\kappa + \frac{M}{C_m + M}\right)$$

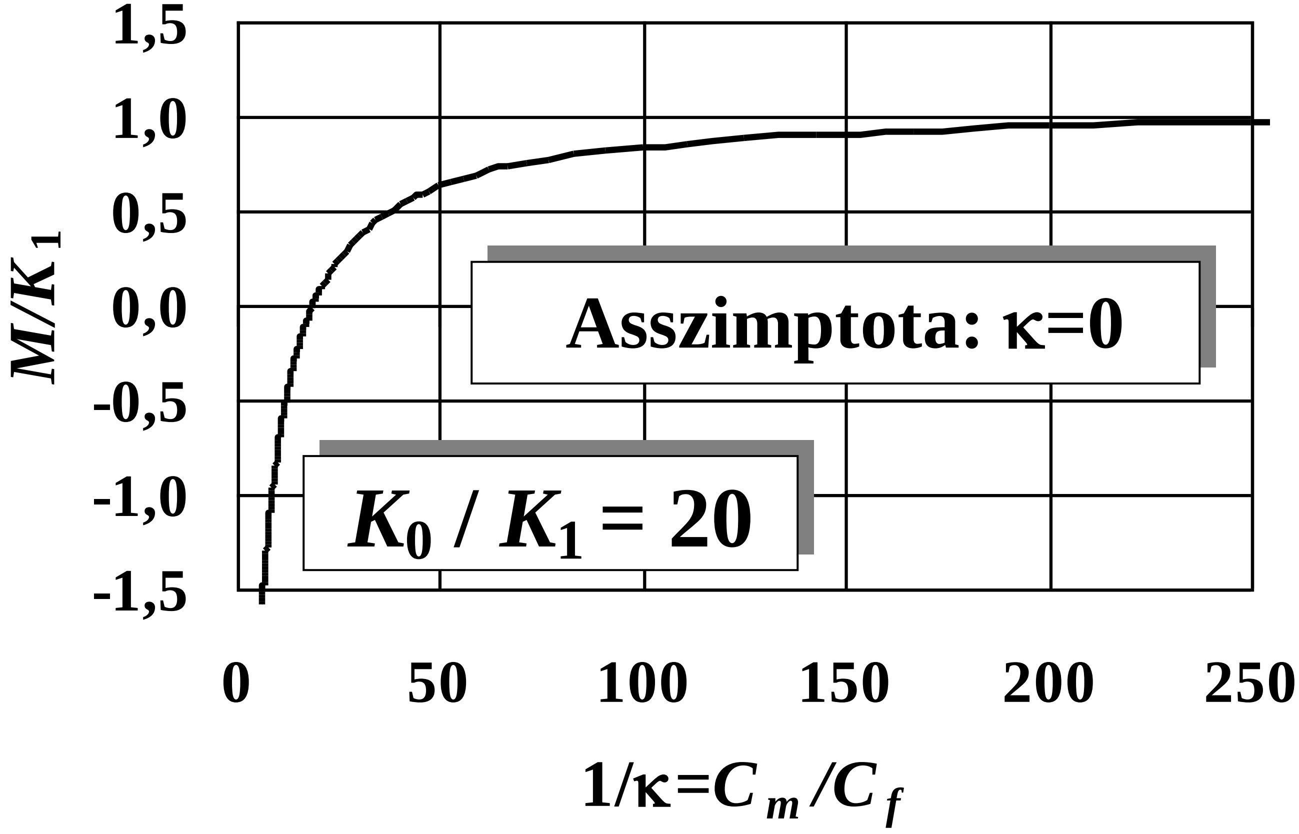
Mérhető: K_0, K_1

Felvett: $\kappa = C_f / C_m$

$$M = K_1 \frac{1+\kappa(1-K_0/K_1)}{(1+\kappa)^2(1-K_1/K_0)}$$

Modellparaméterek meghatározása

- *M* asszimptotikus viselkedése -



Modellparaméterek meghatározása

- *M* a mérhető mennyiségek függvénye -

$$\lim_{\kappa\to 0} K_0 = \lim_{\kappa\to 0} C_m(1+\kappa) = C_m$$

$$\lim_{\kappa\to 0} K_1 = \lim_{\kappa\to 0} C_m\left(\kappa + \frac{M}{C_m + M}\right) = \frac{C_m M}{C_m + M}$$

$$\lim_{\kappa\to 0} M = \frac{K_0 K_1}{K_0 - K_1}$$

Modellparaméterek

- mérhető mennyiségekből levezetve -

C_f **elhanyagolható kis szálmennyiségek esetén**

$$\lim C_f = 0 \quad \text{ha} \quad \kappa \rightarrow 0$$

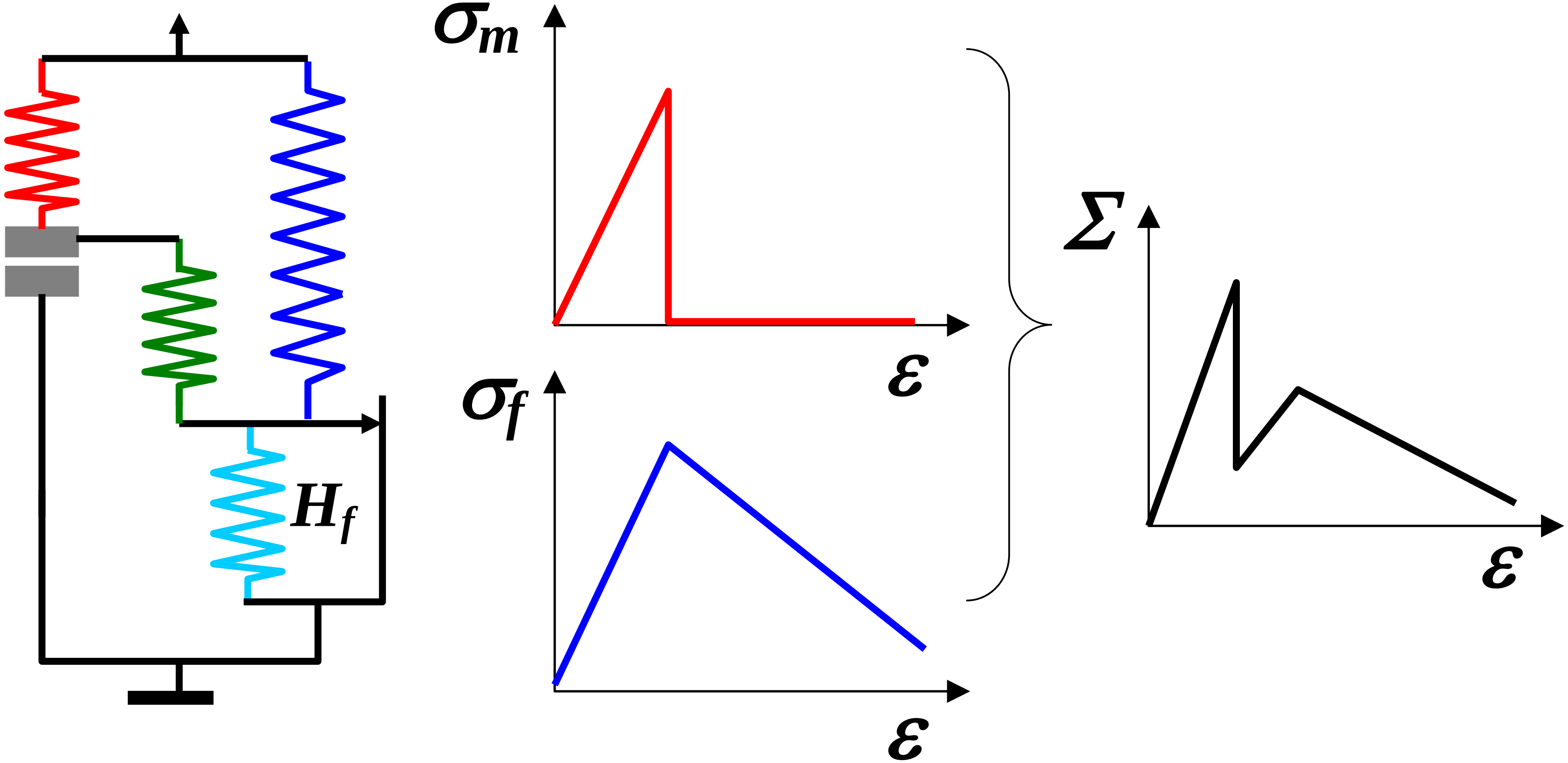
C_m **megegyezik a közvetlenül mérhető rugalmassági modulussal**

$$\lim C_m = K_0 \quad \text{ha} \quad \kappa \rightarrow 0$$

M **kifejezhető a mérhető rugalmassági és repedés utáni érintő modulus függvényében**

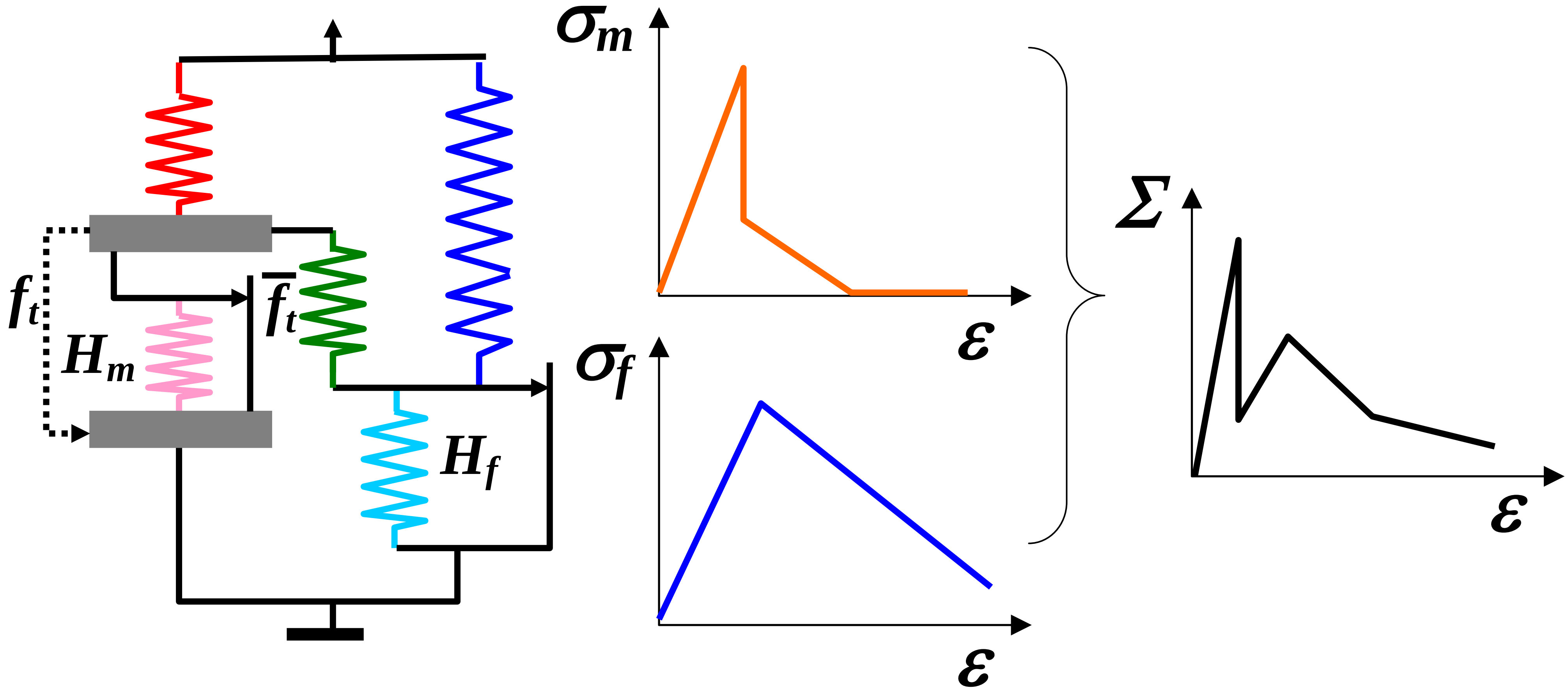
Modellváltozatok

- az alkotórészek eltérő anyagmodelljei alapján -



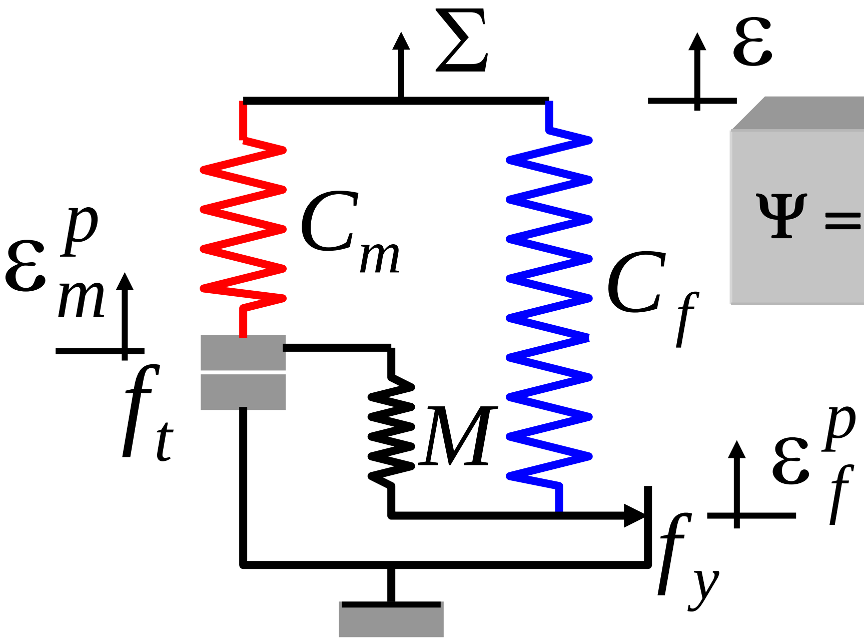
Modellváltozatok

- az alkotórészek eltérő anyagmodelljei alapján -



1-D Termodinamika

- a 3-D modellkiterjesztés elvi alapja -



Energiafüggvény:

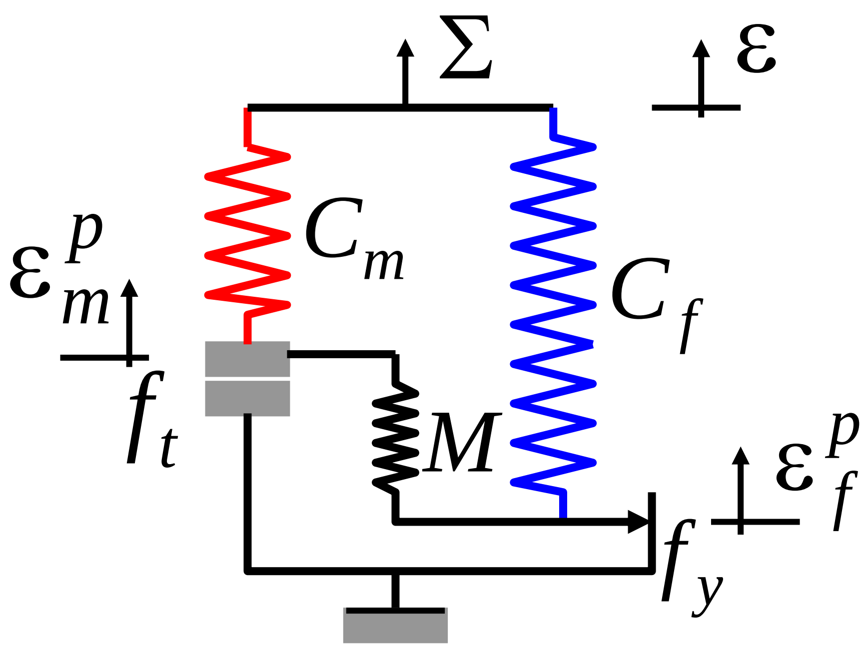
$$\Psi = \frac{1}{2}C_m\left(\varepsilon - \varepsilon_m^p\right)^2 + \frac{1}{2}M\left(\varepsilon_m^p - \varepsilon_f^p\right)^2 \frac{1}{2}C_f\left(\varepsilon - \varepsilon_f^p\right)^2$$

Disszipált energia:

$$\varphi\, dt = \Sigma d\varepsilon - d\Psi \geq 0$$
$$= \sigma_m d\varepsilon_m^p + \sigma_f d\varepsilon_f^p$$

1-D Termodinamika

- az *M* kapcsolati modulus Maxwell szimetriája-



$$C_m + C_f = \frac{\partial \Sigma}{\partial \varepsilon} = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \varepsilon^2}$$

$$C_m = -\frac{\partial \Sigma}{\partial \varepsilon_m^p} = \frac{\partial \sigma_m}{\partial \varepsilon} = -\frac{\partial^2 \Psi}{\partial \varepsilon \partial \varepsilon_m^p}$$

$$C_m = -\frac{\partial \Sigma}{\partial \varepsilon_f^p} = \frac{\partial \sigma_f}{\partial \varepsilon} = -\frac{\partial^2 \Psi}{\partial \varepsilon \partial \varepsilon_f^p}$$

$$M = \frac{\partial \sigma_m}{\partial \varepsilon_f^p} = \frac{\partial \sigma_f}{\partial \varepsilon_m^p} = -\frac{\partial^2 \Psi}{\partial \varepsilon_m^p \partial \varepsilon_f^p}$$

3-D Termodinamika

- 1-D ➔ 3-D -

$$\underline{\underline{\Sigma}} = \frac{\partial \Psi}{\partial \underline{\underline{\varepsilon}}} = \left(\underline{\underline{C}}_m + \underline{\underline{C}}_f\right)\underline{\underline{\varepsilon}} - \underline{\underline{C}}_m\,\underline{\underline{\varepsilon}}_m^p - \underline{\underline{C}}_f\,\underline{\underline{\varepsilon}}_f^p$$

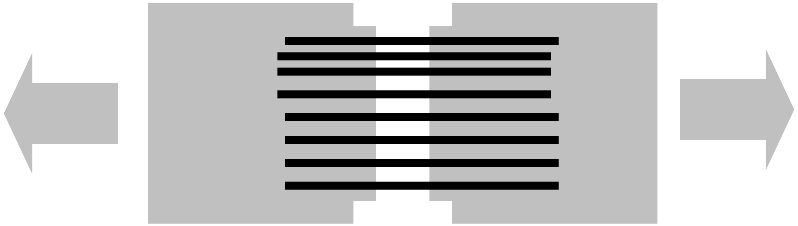
$$\underline{\underline{\sigma}}_m = -\frac{\partial \Psi}{\partial \underline{\underline{\varepsilon}}_m^p} = \underline{\underline{C}}_m\,\underline{\underline{\varepsilon}} - \left(\underline{\underline{C}}_m + \underline{\underline{\underline{\underline{M}}}}\right)\underline{\underline{\varepsilon}}_m^p + \underline{\underline{\underline{\underline{M}}}}\,\underline{\underline{\varepsilon}}_f^p$$

$$\underline{\underline{\sigma}}_f = -\frac{\partial \Psi}{\partial \underline{\underline{\varepsilon}}_f^p} = \underline{\underline{C}}_f\,\underline{\underline{\varepsilon}} + \underline{\underline{\underline{\underline{M}}}}\,\underline{\underline{\varepsilon}}_m^p - \left(\underline{\underline{C}}_f + \underline{\underline{\underline{\underline{M}}}}\right)\underline{\underline{\varepsilon}}_f^p$$

3-D Termodinamika

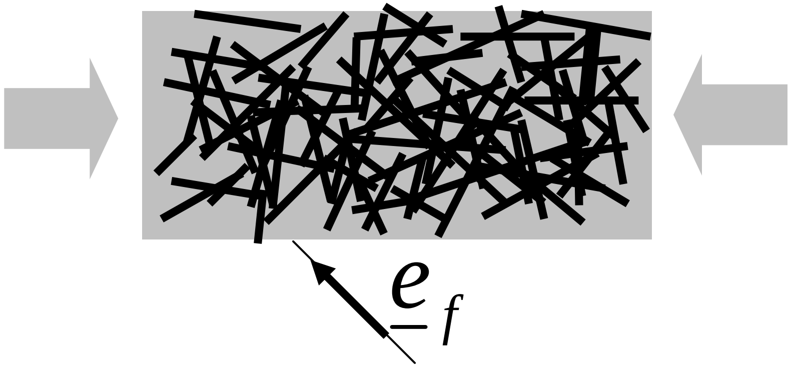
- az *M* kapcsolati modulus 3-D alakja -

1 - D



M = skalár

3 - D

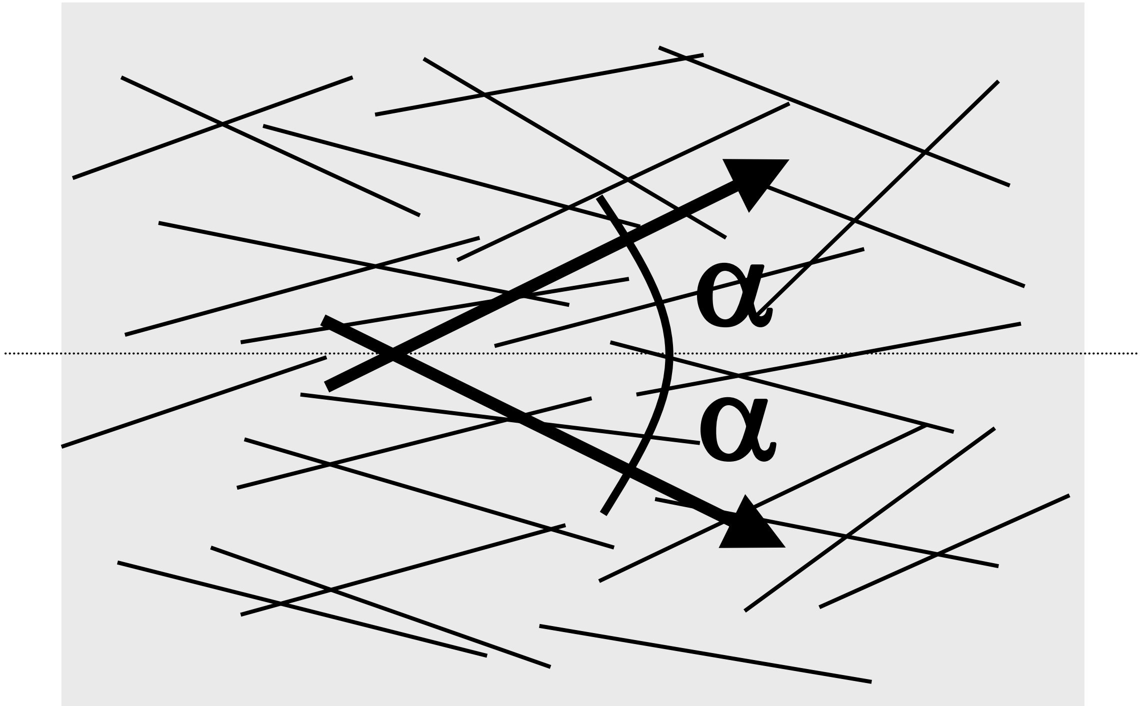


$$\underline{\underline{M}} = \frac{\partial \underline{\underline{\sigma}}_m}{\partial \underline{\underline{\varepsilon}}_f^p} = \frac{\partial \underline{\underline{\sigma}}_f}{\partial \underline{\underline{\varepsilon}}_m^p}$$

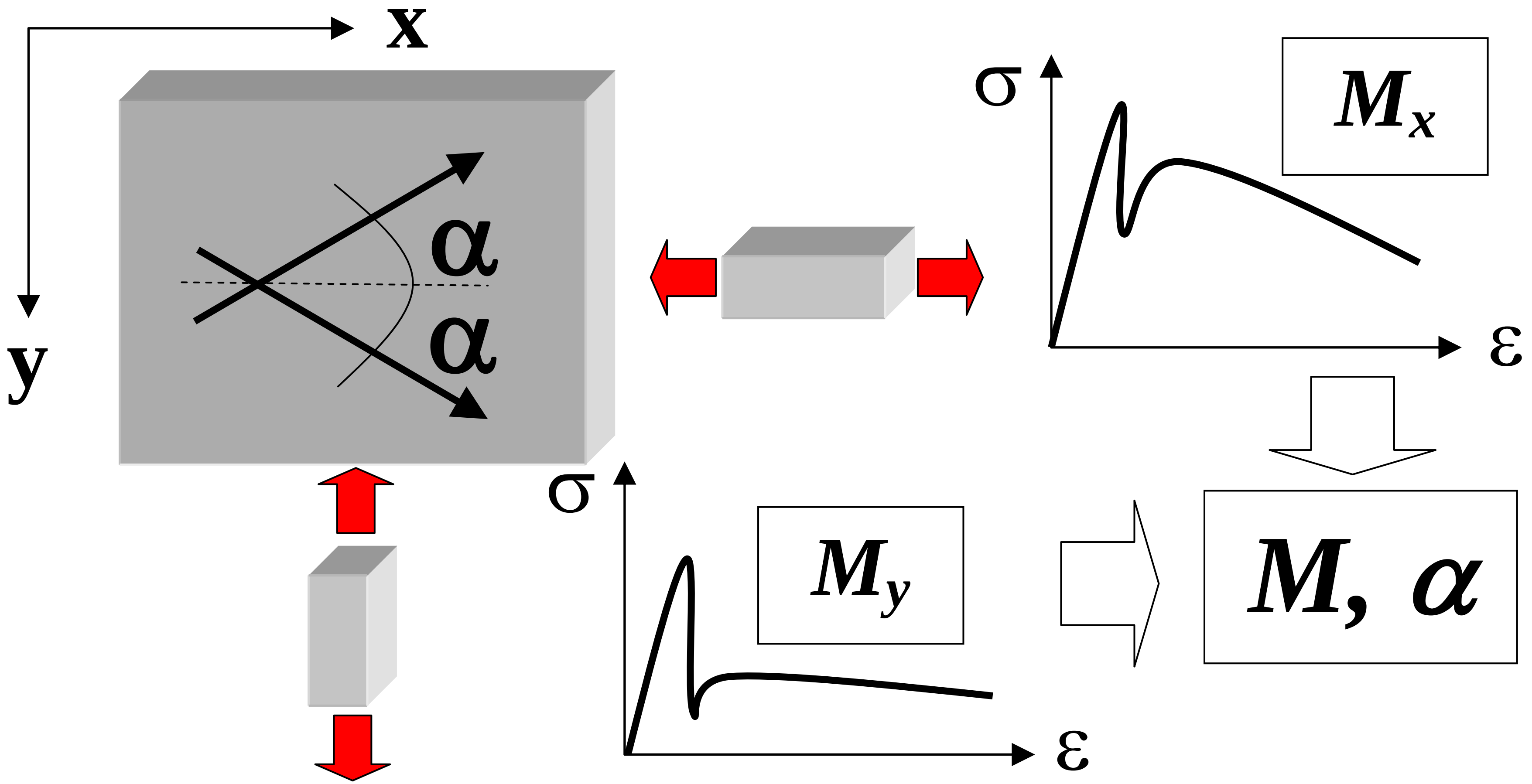
$$= \sum_{f=1}^{n} M \, \underline{e}_f \otimes \underline{e}_f \otimes \underline{e}_f \otimes \underline{e}_f$$

2-D Alkalmazás

- szálorientáció kérdése -



2-D Alkalmazás
- szálorientáció meghatározása felületszerkezetekben -



Perspektívák

- **Anyag-karakterizálás, ahol *M* a**
  - **száltípus,**
  - **száltartalom,**
  - **betonösszetétel,**
  - **betonszilárdság, stb.**

  függvénye

- **Méretezési eljárások kidolgozása**

Perspektívák

- **1 – D ➔ 3 – D teljes kidolgozása**
- **Numerikus implementálás ➔ VEM**
  - **rideg viselkedés**
  - ***M* kapcsolati modulus**
  - **σ - w diszkrét módszer**
  - **σ - ε kontinuum módszer**
- **Adaptálás szálerősítésű kompozitokra**

Megállapítások

- Rheológiai és termodinamikai modellt dolgoztunk ki szálerősítésű betonhoz
- A rheológiai és termodinamikai úton meghatározott σ -ε ábra kellő pontossággal képes követni az anyag viselkedését egytengelyű húzás esetén
- 3–D termodinamikai úton megoldható
- 2-D esetben alkalmas az anizotrópia jellemzésére (2 húzókísérlet!!!)

- **Megmutattuk, hogy a modellparaméterek a legegyszerűbb modell esetében mérhető mennyiségekből könnyen levezethetők**
- **A mérhető mennyiségek kisszámú kísérlettel meghatározhatók (1 húzókísérlet!!!)**
- **A rheológiai modell figyelembe tud venni különböző alkotóelem-anyagmodelleket (felkeményedés – felpuhulás)**
- **A matematikai összefüggések részletes kidolgozása után a modell alkalmas numerikus implementálásra**