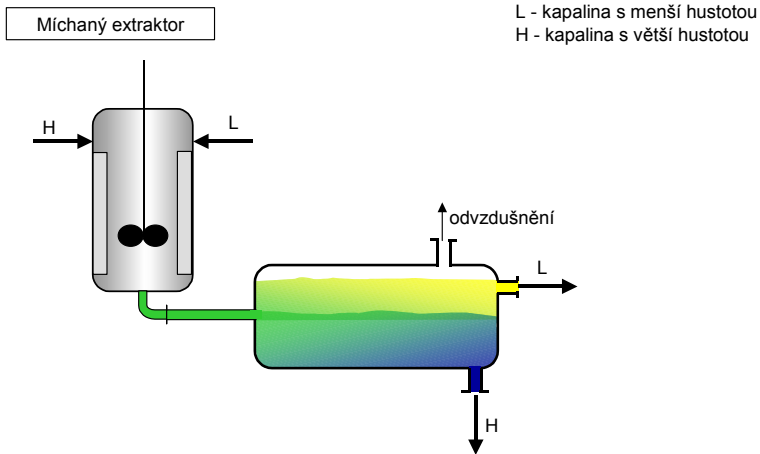
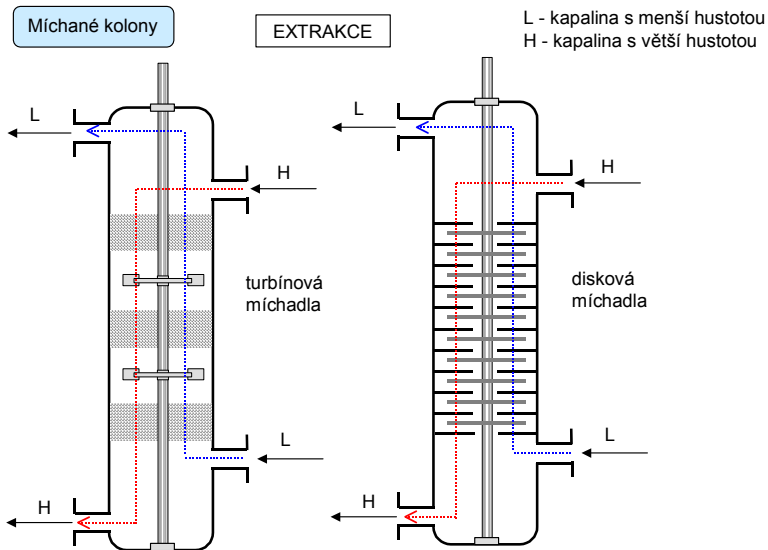


**Aparáty pro výměnu hmoty - míchaný aparát + usazovák**



**Aparáty pro výměnu hmoty - míchané kolony**



**Extrakce - rovnováha - omezeně mísitelná rozpouštědla**

Rovnováha OMEZENĚ MÍSITELNÁ ROZPOUŠTĚDLA

- teoretický popis rovnováhy je značně složitý => vycházíme z experimentálních dat

Příklad: rovnováha voda-kys.octová-diethylether

Tabulka rozpustnosti (hm. zlomky)

voda	ether	kys.octová	voda	ether	kys.octová
0,023	0,977	0	0,223	0,493	0,284
0,055	0,852	0,093	0,332	0,365	0,303
0,094	0,737	0,169	0,429	0,266	0,305
0,119	0,678	0,203	0,549	0,168	0,283
0,175	0,567	0,258	0,660	0,113	0,227
0,787	0,076	0,137	0,933	0,067	0
0,866	0,071	0,063			

Tabulka rovnovážného složení fází (hm. zlomky)

Etherová fáze			Vodná fáze		
voda	ether	kys.octová	voda	ether	kys.octová
0,236	0,477	0,287	0,557	0,164	0,279
0,151	0,613	0,236	0,650	0,119	0,231
0,104	0,715	0,181	0,721	0,095	0,184
0,072	0,803	0,125	0,782	0,080	0,138
0,050	0,877	0,073	0,840	0,072	0,088
0,036	0,926	0,038	0,880	0,069	0,051

**Extrakce - rovnováha; příklad: voda-kys.octová-diethylether**

Postup při tvorbě rovnováhy

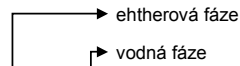
- 1) volba složek podle zadání (procesu)
- 2) vyjádření rovnováhy
  - a) empirické korelace z rovnovážných údajů
  - b) grafické vyjádření

**označení zlomků hmotnostní**  
 w surovina, rafinát  
 u ext.činitlo, extrakt

Příklad

**Složky**

- A - extrahovaná složka - kys.octová
- B - přidávané rozpouštědlo - diethylether
- C - původní rozpouštědlo - voda



Empirické korelace z rovnovážných údajů

$$u_{iE}^* = f(w_{iR}^*) \quad i = A, B, C$$

$$u_{AE}^* = 0,006 + 0,4433 \cdot w_{AR}^* + 4,1507 \cdot (w_{AR}^*)^2 - 7,629 \cdot (w_{AR}^*)^3$$

$$u_{BE}^* = 1,64 - 13,1 \cdot w_{BR}^* + 37,041 \cdot (w_{BR}^*)^2$$

$$u_{CE}^* = 1,654 - 4,45 \cdot w_{CR}^* + 4,198 \cdot (w_{CR}^*)^2 - 1,3968 \cdot (w_{CR}^*)^3$$

**Extrakce - rovnováha; příklad: voda-kys.octová-diethylether**

**Grafické vyjádření**

- pravouhlý diagram

Z rovnováhy

1. řádek etherová fáze

$$\left. \begin{matrix} u_A = 0,287 \\ u_B = 0,477 \\ u_C = 0,236 \end{matrix} \right\} \text{do grafu}$$

1. řádek vodná fáze

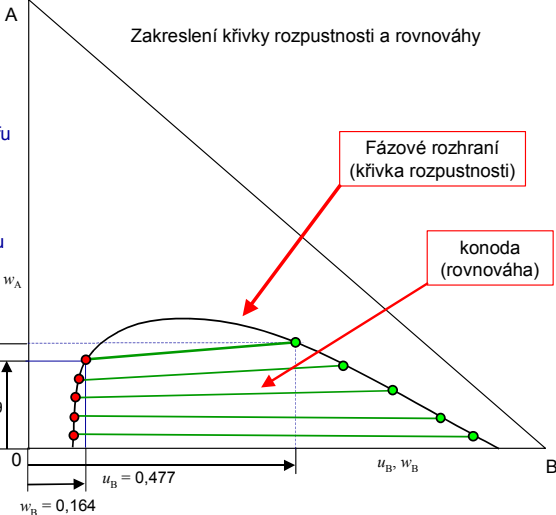
$$\left. \begin{matrix} w_A = 0,279 \\ w_B = 0,164 \\ w_C = 0,557 \end{matrix} \right\} \text{do grafu}$$

2. řádek etherová fáze

$$\left. \begin{matrix} u_A = 0,287 \\ w_A = 0,279 \end{matrix} \right\}$$

$$\left. \begin{matrix} u_B = 0,477 \\ w_B = 0,164 \end{matrix} \right\}$$

$$\left. \begin{matrix} u_C = 0,236 \\ w_C = 0,557 \end{matrix} \right\}$$



**Extrakce - rovnováha - nemísitelná rozpouštědla**

**Rovnováha**

**NEMÍŠITELNÁ ROZPOUŠTĚDLA**

-výhodné užití relativních zlomků

$$W_{iR} = \frac{w_{iR}}{1 - w_{iR}}$$

$$U_{iE} = \frac{u_{iE}}{1 - u_{iE}}$$

$$X_{iR} = \frac{x_{iR}}{1 - x_{iR}}$$

$$Y_{iE} = \frac{y_{iE}}{1 - y_{iE}}$$

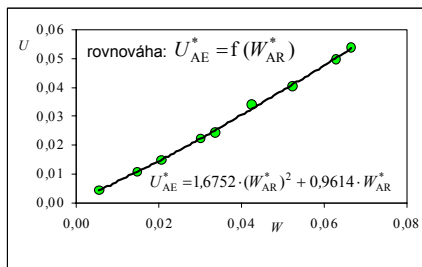
**Rovnováha: voda-aceton-toluen**

Příklad: vodný roztok acetonu je extrahovaný toluenem ...

- A - extrahovaná složka, aceton
- B - přidávané rozpouštědlo, toluen
- C - původní rozpouštědlo, voda

Hmotnostní zlomek acetonu

Vodná fáze		Toluenová fáze	
w	W	u	U
0,0055	0,0056	0,0043	0,0043
0,0146	0,0148	0,0107	0,0108
0,0203	0,0207	0,0147	0,0149
0,0292	0,0301	0,0217	0,0222
0,0325	0,0336	0,0237	0,0243
0,0407	0,0424	0,0327	0,0338
0,0498	0,0524	0,0386	0,0401
0,0592	0,0629	0,0474	0,0498
0,0624	0,0666	0,0511	0,0539



$$u_{AE}^* = 0,6902 \cdot w_{AR}^* + 0,0196 \cdot (w_{AR}^*)^2$$

**Extrakce - jednostupňová extrakce - dokonale nemísitelná rozpouštědla**

**označení složek**  
 A - extrahovaná složka  
 B - přidávané rozpouštědlo  
 C - původní rozpouštědlo

**označení proudů**  
 F - surovina C + A  
 S - extrakční činidlo B (A)  
 R - rafinát (ochuzená surovina) C (A)  
 E - extrakt (obohacené extr. činidlo) B + A

**označení zlomků**  
 hmotnostní  
 w surovina, rafinát  
 u ext.činidlo, extrakt  
 látkové  
 x surovina, rafinát  
 y ext.činidlo, extrakt

u, y - pro extrakční činidlo a extrakt  
 w, x - pro surovinu a rafinát

pro volbu dat, zda budeme bilancovat hmotnostně či látkově bývá rozhodující způsob vyjádření rovnováhy

**Extrakce - jednostupňová extrakce - dokonale nemísitelná rozpouštědla**

Rovnováha  $\implies$  mezi proudy, které opouštějí rovnovážný stupeň

zadána: tabulkou  $\approx$  vztahem  $u_{iE}^* = f(w_{iR}^*)$   $i = A, B, C$  - rovnovážné  
 $y_{iE}^* = f(x_{iR}^*)$

**Zadáno:**  $m_{R0}, m_{S1}, w_{A,R0}, w_{C,R1}, u_{A,S1}, u_{B,S1}$

**Hledáme:**  $m_{R1}, m_{E1}, w_{A,R1}, u_{A,E1}$

**BILANCE:**

Celková:  $m_{R0} + m_{S1} = m_{E1} + m_{R1}$

sl. A:  $m_{R0} w_{A,R0} + m_{S1} u_{A,S1} = m_{E1} u_{A,E1} + m_{R1} w_{A,R1}$

sl. B:  $m_{S1} u_{B,S1} = m_{E1} u_{B,E1}$

sl. C:  $m_{R0} w_{C,R0} = m_{R1} w_{C,R1}$  (rovnice lineárně závislá)

**Extrakce - jednostupňová extrakce - dokonale nemísitelná rozpouštědla**

Rovnováha:  $u_{AE}^* = f(w_{AR}^*)$

Doplňkové rovnice:  
 $u_{AE,1} + u_{BE,1} = 1$   
 $w_{AR,1} + w_{CR,1} = 1$

Účinnost stupně:

$E_1 = \frac{w_{A,R0} - w_{A,R1}}{w_{A,R0} - w_{A,R1}^*} \implies w_{A,R1} = w_{A,R0} - E_1 (w_{A,R0} - w_{A,R1}^*)$

$E_1 = \frac{u_{A,E1} - u_{A,S1}}{u_{A,E1}^* - u_{A,S1}} \implies u_{A,E1} = u_{A,S1} + E_1 (u_{A,E1}^* - u_{A,S1})$

{pokud E = 1 jedná se o rovnovážný stupeň}

**Řešení**  $\implies$  přímo tj. soustava nelineárních rovnic (numericky počítačem)  
 $\implies$  snížení počtu rovnic  
 • užití relativních zlomků, grafické nebo numerické řešení

**Extrakce** - užití relativních zlomků (pouze pro nemísitelná rozpouštědla)

Bilance složky A

$$m_{R0} w_{A,R0} + m_{S1} u_{A,S1} = m_{E1} u_{A,E1} + m_{R1} w_{A,R1}$$

Bilance extrakčního činidla (složka B)

$$m_B \equiv m_{S1} (1 - u_{A,S1}) = m_{E1} (1 - u_{A,E1})$$

relativní zlomky

$$Z_i = \frac{z_i}{1 - z_i} \quad z_i = \frac{Z_i}{1 + Z_i}$$

Bilance původního rozpouštědla (složka C)

$$m_C \equiv m_{R0} (1 - w_{A,R0}) = m_{R1} (1 - w_{A,R1})$$

$$m_{S1} = \frac{m_B}{1 - u_{A,S1}}$$

$$m_{E1} = \frac{m_B}{1 - u_{A,E1}}$$

$$m_{R0} = \frac{m_C}{1 - w_{A,R0}}$$

$$m_{R1} = \frac{m_C}{1 - w_{A,R1}}$$

Dosadíme do bilance složky A:

$$m_C \frac{w_{A,R0}}{1 - w_{A,R0}} + m_B \frac{u_{A,S1}}{1 - u_{A,S1}} = m_C \frac{w_{A,R1}}{1 - w_{A,R1}} + m_B \frac{u_{A,E1}}{1 - u_{A,E1}}$$

$$m_C w_{A,R0} + m_B u_{A,S1} = m_C w_{A,R1} + m_B u_{A,E1}$$

**Extrakce** - užití relativních zlomků (pouze pro nemísitelná rozpouštědla)

$$m_C w_{A,R0} + m_B u_{A,S1} = m_C w_{A,R1} + m_B u_{A,E1}$$

Jednostupňová extrakce - dokonale nemísitelná rozpouštědla - relativní zlomky

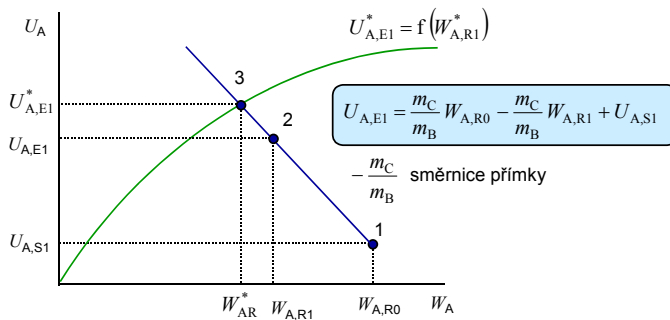
$$U_{A,E1} = \frac{m_C}{m_B} w_{A,R0} - \frac{m_C}{m_B} w_{A,R1} + U_{A,S1} \quad \text{rovnice přímky}$$

$$U_{A,E1}^* = f(w_{A,R1}^*) \quad \text{rovnice rovnováhy}$$

$$E_1 = \frac{w_{A,R0} - w_{A,R1}}{w_{A,R0} - w_{A,R1}^*} = \frac{U_{A,E1} - U_{A,S1}}{U_{A,E1}^* - U_{A,S1}} \quad \text{účinnost stupně}$$

**Extrakce** - užití relativních zlomků (pouze pro nemísitelná rozpouštědla)

Grafické řešení



$$E_1 = \frac{w_{A,R0} - w_{A,R1}}{w_{A,R0} - w_{A,R1}^*} = \frac{U_{A,E1} - U_{A,S1}}{U_{A,E1}^* - U_{A,S1}} = \frac{12}{13}$$

účinnost stupně

**Extrakce - opakovaná extrakce - omezeně mísitelná rozpouštědla**

**označení složek**  
 A - extrahovaná složka  
 B - přidávané rozpouštědlo  
 C - původní rozpouštědlo

**označení proudů**  
 F - surovina C + A  
 S - extrakční činidlo B (A)  
 R - rafinát (ochuzená surovina) C (A)  
 E - extrakt (obohacené extr. činidlo) B + A

**označení zlomků**  
 hmotnostní  
 w surovina, rafinát  
 u ext.činidlo, extrakt  
 látkové  
 x surovina, rafinát  
 y ext.činidlo, extrakt

$u, y$  - pro extrakční činidlo a extrakt  
 $w, x$  - pro surovinu a rafinát

pro volbu dat, zda budeme bilancovat hmotnostně či látkově bývá rozhodující způsob vyjádření rovnováhy

**Extrakce – jednostupňová opakovaná extrakce - omezeně mísitelná rozpouštědla**

Zadáno:  $m_{R0}, w_{A,R0}, w_{C,R0}, m_{S,1}, u_{AS,1}, u_{BS,1}, E_1$  Hledáme:  $m_{R,1}, m_{E,1}, w_{AR,1}, u_{AE,1}$

**Grafické řešení**

1. rovnováhy
2. body  $F(R_0)$  a S
3. bod M - z pákového pravidla

↓  
balance

**Extrakce - jednostupňová opakovaná extrakce - omezeně mísitelná rozpouštědla**

**Směsný bod M**

**Bilance mísiče**

$$m_F + m_S = m_M$$

$$m_F w_{AF} + m_S u_{AS} = m_M w_{AM}$$

$$(m_M - m_S) w_{AF} + m_S u_{AS} = m_M w_{AM}$$

$$m_S (u_{AS} - w_{AF}) = m_M (w_{AM} - w_{AF})$$

$$\frac{m_S}{m_M} = \frac{w_{AM} - w_{AF}}{u_{AS} - w_{AF}}$$

**Pákové pravidlo**

$$\frac{m_F}{m_M} = \frac{MS}{FS}$$

$$\frac{m_S}{m_M} = \frac{FM}{FS}$$

$$\frac{m_S}{m_M} = \frac{FM}{FS}$$

**z pákového pravidla**

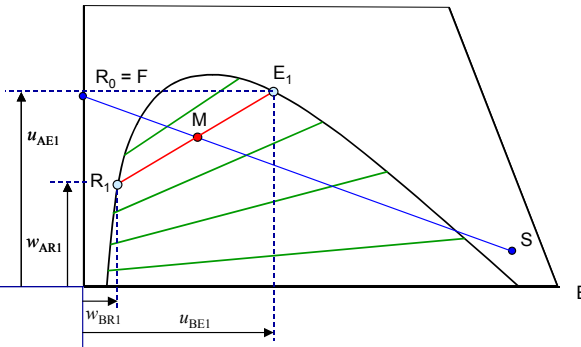
$$\frac{m_S}{m_M} = \frac{FM}{FS} = \frac{m_S}{m_F + m_S} \rightarrow \overline{FM} = \frac{m_S}{m_F + m_S} \overline{FS}$$

**Extrakce - jednostupňová opakovaná extrakce - omezeně mísitelná rozpouštědla**

Zadáno:  $m_{R0}, w_{A,R0}, w_{C,R0}, m_{S,1}, u_{AS,1}, u_{BS,1}, E_1$  Hledáme:  $m_{R,1}, m_{E,1}, w_{AR,1}, u_{AE,1}$

Grafické řešení

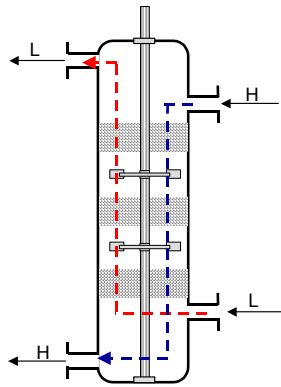
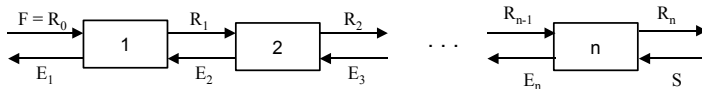
1. rovnováhy
2. body F( $R_0$ ) a S
3. bod M  
- z pákového pravidla
4. rovnováha
5.  $m_{R,1}, m_{E,1}$   
- z pákového pravidla



$$\frac{m_{R1}}{m_M} = \frac{ME_1}{R_1E_1} = \frac{m_{R1}}{m_S + m_F}$$

$$\frac{m_{E1}}{m_M} = \frac{MR_1}{R_1E_1} = \frac{m_{E1}}{m_S + m_F}$$

**Extrakce - protiproudá extrakce**



L - kapalina s menší hustotou  
H - kapalina s větší hustotou

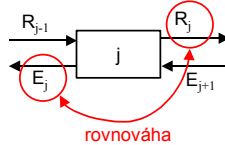
**označení složek**

- A - extrahovaná složka
- B - přidávané rozpouštědlo
- C - původní rozpouštědlo

**označení proudů**

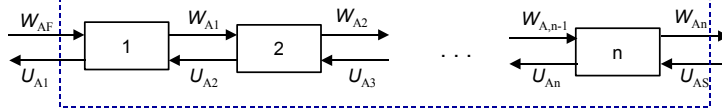
- F - surovina
- S - extrakční činidlo
- R - rafinát (ochuzená surovina)
- E - extrakt (obohacené extr. činidlo)

**j-tý stupeň**



**Extrakce - protiproudá extrakce - nemísitelná rozpouštědla**

Řešení s relativními zlomky



Bilance celková

$$W_{AF} \dot{m}_C + U_{AS} \dot{m}_B = W_{An} \dot{m}_C + U_{A1} \dot{m}_B$$

relativní zlomky

$$Z_i = \frac{z_i}{1 - z_i}$$

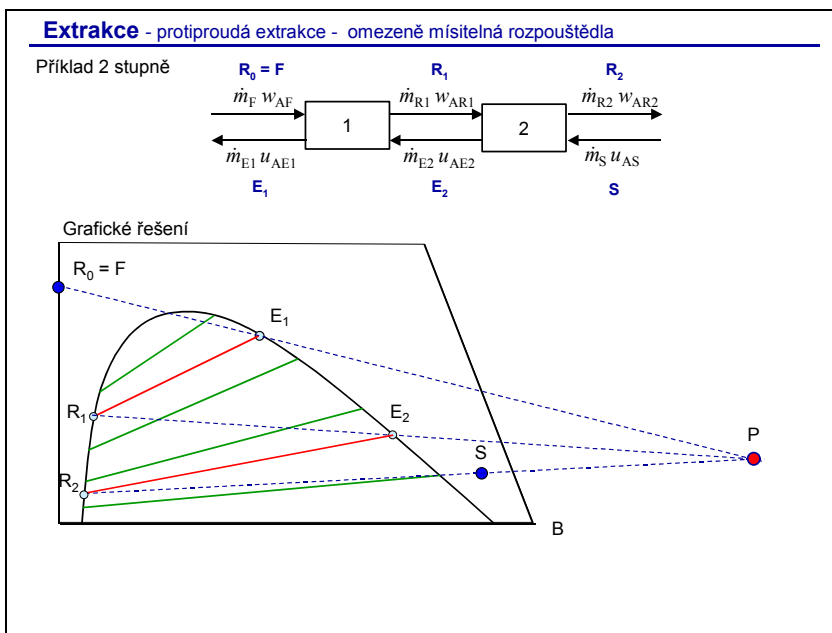
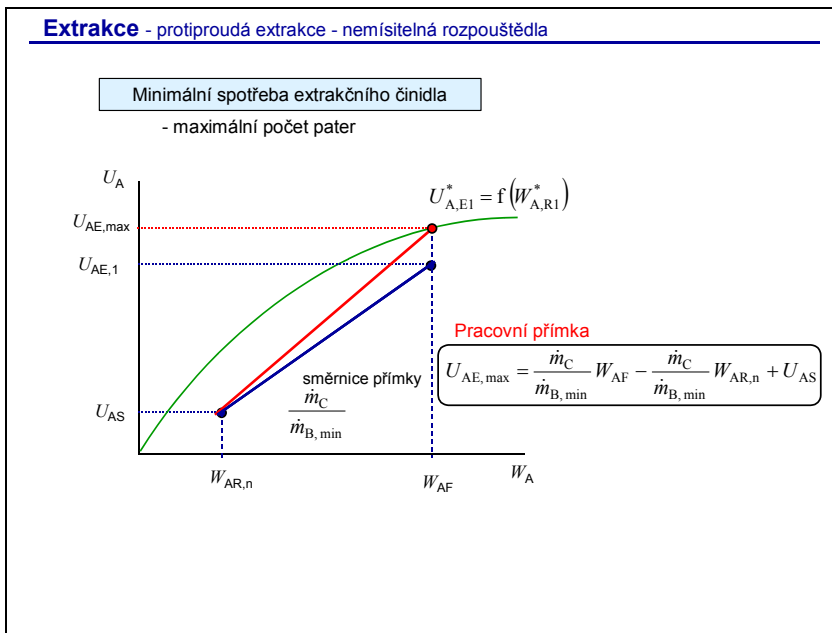
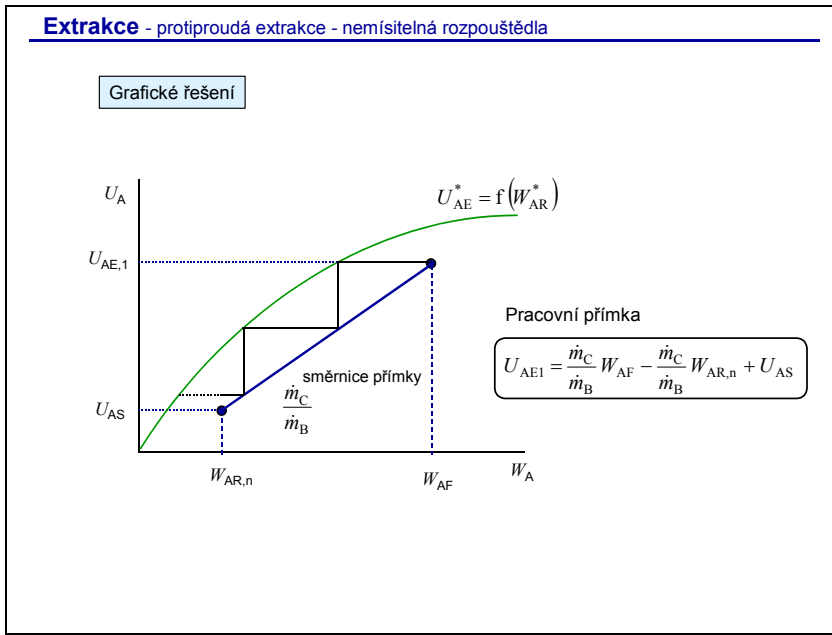
Bilance j-tého patra

$$U_{AE,j+1} = \frac{m_C}{m_B} W_{AR,j} - \frac{m_C}{m_B} W_{AR,j-1} + U_{AE,j}$$

rovnice přímky

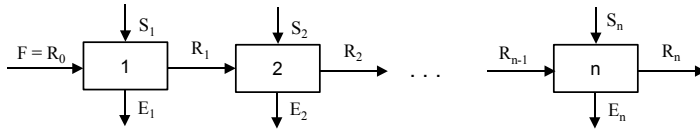
Rozdíl toků extrahované složky v rafinátu a extraktu je stejný v libovolném průřezu mezi stupni.

$$W_{AF} \dot{m}_C - U_{A1} \dot{m}_B = W_{An} \dot{m}_C - U_{AS} \dot{m}_B = \Delta \dot{m}_A$$





**Extrakce - vícestupňová opakovaná extrakce - dokonale nemísitelná rozpouštědla**



**Zadáno:**  $m_{R0}, w_{A,R0}, w_{C,R0}, m_{S,j}, u_{AS,j}, u_{BS,j}, E_j$  **Hledáme:**  $m_{R,n}, m_{E,j}, w_{AR,n}, u_{AE,j}$

**Počítačové řešení** - soustava rovnic pro každý stupeň (1 až n-tý)

$m_{R,j-1} + m_{S,j} = m_{E,j} + m_{R,j}$  celková

$m_{R,j-1} w_{AR,j-1} + m_{S,j} u_{AS,j} = m_{E,j} u_{AE,j} + m_{R,j} w_{AR,j}$  sl. A

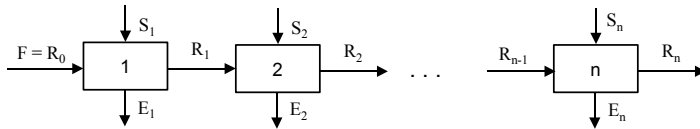
$m_{S,j} u_{BS,j} = m_{E,j} u_{BE,j}$  sl. B doplňkové rovnice

$u_{AE,j}^* = f(w_{AR,j}^*)$  rovnováha  $u_{AE,j} + u_{BE,j} = 1$

$w_{AR,j} = w_{AR,j-1} - E_j (w_{AR,j-1} - w_{AR,j}^*)$  účinnost stupně  $w_{AR,j} + w_{CR,j} = 1$

$u_{AE,j} = u_{AS,j} + E_j (u_{AE,j}^* - u_{AS,j})$  účinnost stupně

**Extrakce - vícestupňová opakovaná extrakce - dokonale nemísitelná rozpouštědla**



**Zadáno:**  $m_{R0}, w_{A,R0}, w_{C,R0}, m_{S,j}, u_{AS,j}, u_{BS,j}, E_j$  **Hledáme:**  $m_{R,n}, m_{E,j}, w_{AR,n}, u_{AE,j}$

**Řešení s relativními zlomky** - soustava rovnic pro každý stupeň (1 až n-tý)

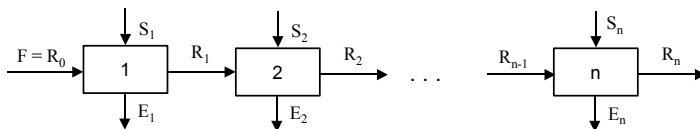
$U_{AE,j} = \frac{m_C}{m_{B,j}} w_{AR,j-1} - \frac{m_C}{m_{B,j}} w_{AR,j} + U_{AS,j}$  rovnice přímky, j-tý stupeň

$U_{AE,j}^* = f(w_{AR,j}^*)$  rovnice rovnováhy

$w_{AR,j} = w_{AR,j-1} - E_j (w_{AR,j-1} - w_{AR,j}^*)$  účinnost stupně

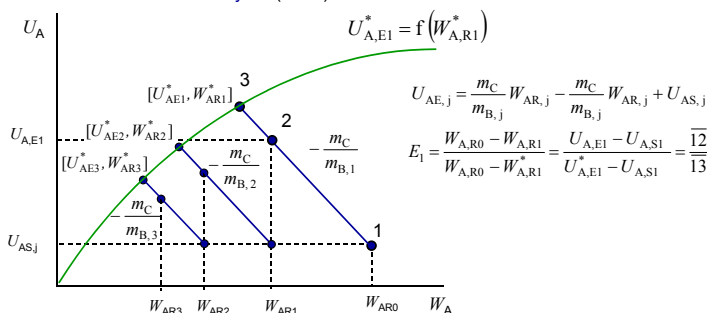
$U_{AE,j} = U_{AS,j} + E_j (U_{AE,j}^* - U_{AS,j})$  účinnost stupně

**Extrakce - vícestupňová opakovaná extrakce - dokonale nemísitelná rozpouštědla**



**Zadáno:**  $m_{R0}, w_{A,R0}, w_{C,R0}, m_{S,j}, u_{AS,j}, u_{BS,j}, E_j$  **Hledáme:**  $m_{R,n}, m_{E,j}, w_{AR,n}, u_{AE,j}$

**Grafické řešení s relativními zlomky** (n = 3)



**Extrakce - vícestupňová opakovaná extrakce - částečně mísitelná rozpouštědla**

**označení složek**  
 A - extrahovaná složka  
 B - přidávané rozpouštědlo  
 C - původní rozpouštědlo

**označení proudů**  
 F - surovina  
 S - extrakční činidlo  
 R - rafinát (ochuzená surovina)  
 E - extrakt (obohacené extr. činidlo)

Rovnováha  $\rightarrow$  tabulární údaje nebo grafické vyjádření  
 $\rightarrow$  empirické korelace z rovnovážných hodnot

$u_{iE}^* = f(w_{iR}^*) \quad i = A, B, C$

**Extrakce - vícestupňová opakovaná extrakce - omezeně mísitelná rozpouštědla**

Příklad pro 3 stupně (grafické řešení) 1. stupeň

- rovnováhy
- body  $F(R_0)$  a  $S$
- bod M1 - z pákového pravidla
- rovnováha  $R_1 - E_1$
- $m_{R1}, m_{E1}$

$\overline{FM_1} = \frac{m_{S1}}{m_F + m_{S1}} \overline{FS}$

$m_{R1} = \frac{\overline{M_1 E_1}}{\overline{R_1 E_1}} (m_{S1} + m_F)$  z pákového pravidla

$m_{E1} = m_F + m_{S1} - m_{R1}$  bilance

**Extrakce - vícestupňová opakovaná extrakce - omezeně mísitelná rozpouštědla**

Příklad pro 3 stupně (grafické řešení) 2. stupeň

- přímka  $R_1 - S$
- bod M2 - z pákového pravidla
- rovnováha  $R_2 - E_2$
- $m_{R2}, m_{E2}$

$\overline{R_1 M_2} = \frac{m_{S2}}{m_{R1} + m_{S2}} \overline{R_1 S}$

$m_{R2} = \frac{\overline{M_2 E_2}}{\overline{R_2 E_2}} (m_{S2} + m_{R1})$  z pákového pravidla

$m_{E2} = m_{R1} + m_{S2} - m_{R2}$  bilance

**Extrakce - vícestupňová opakovaná extrakce - omezeně mísitelná rozpouštědla**

Příklad pro 3 stupně (grafické řešení) 3. stupeň

10. přímka  $R_2 - S$

11. bod  $M_3$   
- z pákového pravidla

$$\overline{R_2 M_3} = \frac{m_{S3}}{m_{R2} + m_{S3}} \overline{R_2 S}$$

12. rovnováha  $R_3 - E_3$

13.  $m_{R3}, m_{E3}$

$$m_{R3} = \frac{\overline{M_3 E_3}}{\overline{R_3 E_3}} (m_{S3} + m_{R2}) \quad \text{z pákového pravidla}$$

$$m_{E3} = m_{R2} + m_{S3} - m_{R3} \quad \text{bilance}$$

**Extrakce - vícestupňová opakovaná extrakce - omezeně mísitelná rozpouštědla**

3. stupeň

Složení extraktu a rafinátu

**Extrakce - opakovaná extrakce - omezeně mísitelná rozpouštědla**

Počítačové řešení

Zadáno:  $m_{R,j-1}, w_{AR,j-1}, w_{BR,j-1}, w_{CR,j-1}, m_{S,j}, u_{AS,j}, u_{BS,j}, u_{BS,j}, E_j$

Hledáme:  $m_{R,j}, w_{AR,j}, w_{BR,j}, w_{CR,j}, m_{E,j}, u_{AE,j}, u_{BE,j}, u_{BE,j}$

$$m_{R,j-1} + m_{S,j} = m_{E,j} + m_{R,j}$$

Celková bilance

$$m_{R,j-1} w_{AR,j-1} + m_{S,j} u_{AS,j} = m_{E,j} u_{AE,j} + m_{R,j} w_{AR,j}$$

sl. A

$$m_{R,j-1} w_{BR,j-1} + m_{S,j} u_{BS,j} = m_{E,j} u_{BE,j} + m_{R,j} w_{BR,j}$$

sl. B

Rovnováha

$$u_{AE,j}^* = f(w_{AR,j}^*)$$

Binodála rafinátová část

$$w_{AR,j} = f(w_{BR,j})$$

Binodála extraktová část

$$u_{AE,j} = f(u_{BE,j})$$

Účinnost stupně

$$w_{AR,j} = w_{AR,j-1} - E_j (w_{AR,j-1} - w_{AR,j}^*)$$

$$u_{AE,j} = u_{AS,j} + E_j (u_{AE,j}^* - u_{AS,j})$$

Doplňkové rovnice

$$u_{AE,j} + u_{BE,j} + u_{CE,j} = 1$$

$$w_{AR,j} + w_{BR,j} + w_{CR,j} = 1$$