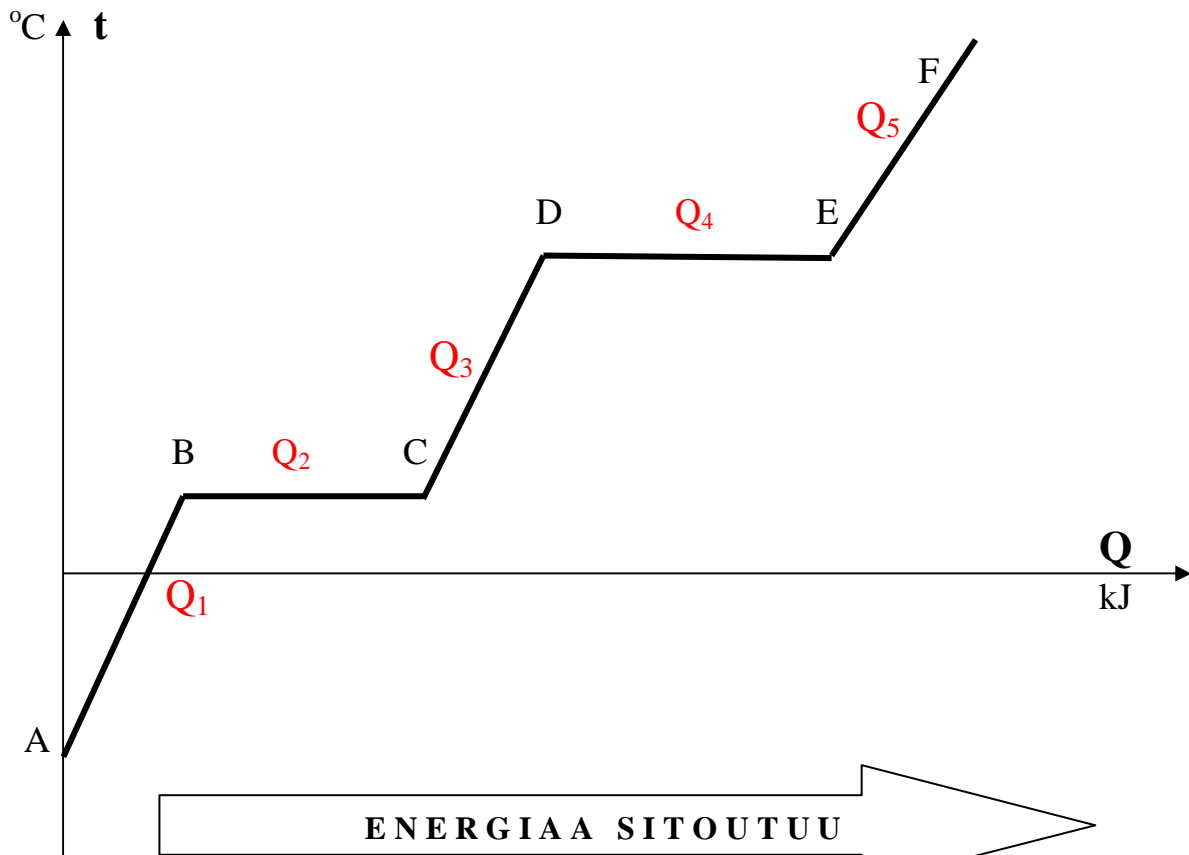


# LÄMPÖOPPIA

Aineen lämpötila  $t$  aineen saaman lämpömäärän  $Q$  funktiona;  $t = t(Q)$



AB: Kiinteä aine lämpenee (BA: jäähtyy)  
 $Q_1 = cm\Delta t$

BC: Kiinteä aine sulaa (CB: jähmettyy)  
 $Q_2 = sm$

CD: Neste lämpenee (DC: jäähtyy)  
 $Q_3 = cm\Delta t$

DE: Neste kiehuu (ED: tiivistyy)  
 $Q_4 = rm$

EF: Höyry lämpenee (FE: jäähtyy)  
 $Q_5 = cm\Delta t$

**Esim.** Kuinka paljon lämpöenergiaa tarvitaan muuttamaan 3,0 kg -15 °C jäätä 120-asteiseksi vesihöyryksi?  
Vesihöyryn ominaislämpökapasiteetti vakioaineessa

$$c_p = 2,0 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}.$$

**Ratk.**

1) **Jään lämmitys: -15 °C → 0 °C:**

- jään ominaislämpökapasiteetti (- 4 °C)  $c = 2,09 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$

(MAOL s. 77 (77))

$$Q_1 = cm\Delta t = 2,09 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 3,0 \text{ kg} \cdot 15^\circ\text{C} = 94,05 \text{ kJ}$$

2) **Jään sulatus: 0 °C:**

- jään (vesi) ominaissulamislämpö  $s = 333 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$  (MAOL s. 78 (78))

$$Q_2 = s \cdot m = 333 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 3,0 \text{ kg} = 999 \text{ kJ}$$

3) **Veden lämmitys: 0 °C → 100 °C:**

- veden ominaislämpökapasiteetti  $c = 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$  (MAOL s. 78 (78))

$$Q_3 = cm\Delta t = 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 3,0 \text{ kg} \cdot 100^\circ\text{C} = 1257 \text{ kJ}$$

4) **Veden höyrystys: 100 °C:**

- veden ominaishöyrystymislämpö  $r = 2260 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$  (MAOL s. 79 (79))

$$Q_4 = r \cdot m = 2260 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 3,0 \text{ kg} = 6780 \text{ kJ}$$

5) **Höyryn lämmitys: 100 °C → 120 °C:**

- veden ominaishöyrystymislämpö vakioaineessa  $c_p = 2,00 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$

- (Huom! MAOL s. 78 (78) on annettu kaasuille  $c_p$  ja  $\frac{c_p}{c_v}$ , mutta ei vesihöyrylle)

$$Q_5 = c_p m \Delta t = 2,00 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 3,0 \text{ kg} \cdot 20^\circ\text{C} = 120 \text{ kJ}.$$

**Tarvittava lämpöenergia yhteensä:**

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5$$

$$Q = 94,05 \text{ kJ} + 999 \text{ kJ} + 1257 \text{ kJ} + 6780 \text{ kJ} + 120 \text{ kJ} \\ = 9250,05 \text{ kJ}$$

$$Q \approx \underline{\underline{9,3 \text{ MJ}}}.$$

# ENERGIAN TUOTTAMISEN FYSIKAALINEN PERUSTA

## 1) VESIVOIMALA

- toiminnan fysikaalinen perusta on veden potentiaali- ja liike-energian muuttaminen turbiinin pyörimisenergiaksi ja edelleen generaattorin avulla sähköenergiaksi ( $mgh \Rightarrow \frac{1}{2}mv^2 \Rightarrow$  sähköenergia  $\Rightarrow \dots$ )
- hyötysuhde: 80% - 90%

Jos potentiaalienergian nollassoksi valitaan veden pinta alhaalla turbiinin tasolla, niin vesivoimalan antoteho saadaan yhtälöstä:

$$P = \frac{W}{t} = \frac{\eta E_p}{t} = \frac{\eta mgh}{t} = \frac{\eta \rho Vgh}{t} \quad (E_p = mgh, \quad \rho = mV)$$

$$P = \frac{\eta \rho Vgh}{t}$$

missä  $P$  = teho (W)

$\eta$  = hyötysuhde,  $\eta = \frac{P_{\text{anto}}}{P_{\text{otto}}}$

$\rho$  = veden tiheys = 1000 kg/m<sup>3</sup>

$g$  = putoamiskiihtyvyyys,  $g = 9,81$  m/s<sup>2</sup>

$h$  = pudotuskorkeus (m)

$\frac{V}{t}$  = virtaama eli tilavuusvirta (m<sup>3</sup>/s)

- Suomessa on yli 200 vesivoimalaitosta, joiden yhteenlaskettu teho on lähes 3000 MW
- Suomen suurin vesivoimalaitos on vuonna 1929 sähkön tuotantoon valjastettu *Imatrankosken vesivoimalaitos* Imatralla: teho 170 MW, virtaama suurimmillaan 940 m<sup>3</sup>/s, pudotuskorkeus 24 m, sähköenergian vuotuinen tuotto on noin 1000 GWh

## 2) TUULIVOIMALA

- toiminnan fysikaalinen perusta on ilmaan liike-energian muuntaminen tuulivoimalan siipien pyörimisenergiaksi ja edelleen generaattorin avulla sähköenergiaksi ( $\frac{1}{2}mv^2 \Rightarrow$  sähköenergia  $\Rightarrow \dots$ )
- hyötysuhde noin 30 – 50 %.

Johdetaan seuraavaksi tuulivoimalan tehon lauseke. Tarkastellaan suoran ympyrälieriön muotoista ilmamassaa, joka kohtaa tuulivoimalan siivet (ks. kuvio). Olkoon pohjajympyrän säde  $r$ , joka on yhtä suuri kuin tuulivoimalaan siiven pituus.

Ilmamäärä kulkee nopeudella  $v$  ajassa  $\Delta t$  matkan  $h$ , joten lieriön pituus on  $h = v \cdot \Delta t$ . Ilmalieriön liike-energia on

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2.$$

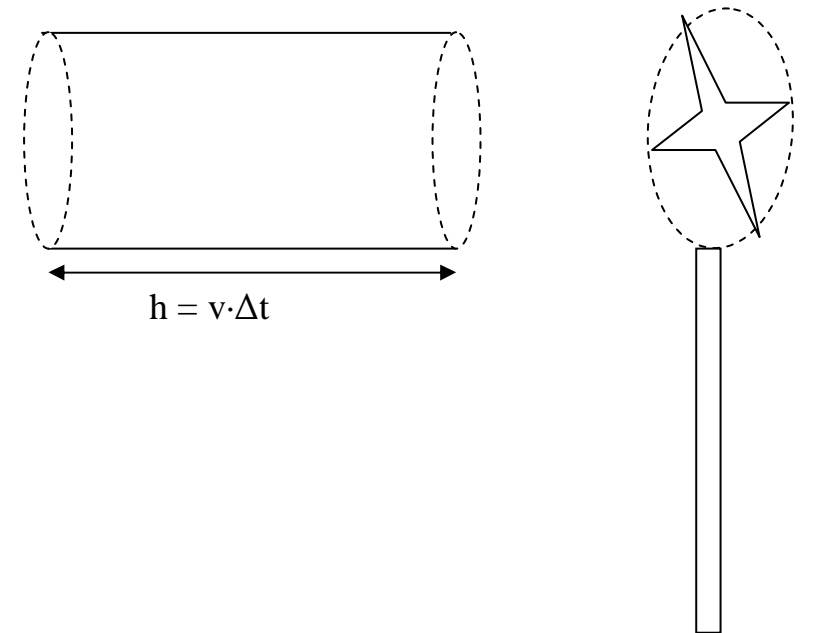
Kun otetaan lisäksi huomioon, että massa  $m = \rho V$ , tilavuus  $V = Ah$ , niin  $m = \rho V = \rho Ah = \rho Av \cdot \Delta t$ , ja

liike-energian lauseke saa muodon

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot \rho Av \Delta t \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho Av^3 \Delta t.$$

Koska  $A = \pi r^2$ , niin liike-energia on

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot \rho \pi r^2 v^3 \Delta t.$$



Teho on energiantuotto aikayksikössä eli  $P = \frac{E}{t}$ ,  
joten tuulivoimalan hyötyteho on

$$P = \frac{\eta E}{\Delta t} = \frac{\eta \cdot \frac{1}{2} \rho \pi r^2 v^3 \Delta t}{\Delta t}$$

missä  $\eta$  on hyötysuhde.

Tuulivoimalan hyötyteho on siis

$$P = \eta \cdot \frac{1}{2} \rho \pi r^2 v^3$$

missä  $\eta =$  hyötysuhde,  $\eta = \frac{P_{\text{anto}}}{P_{\text{otto}}}$

$\rho =$  ilman tiheys  $\approx 1,29 \text{ kg/m}^3$

$r =$  tuulivoimalan siipien pituus (m)

$v =$  tuulen nopeus (m/s)

On huomattava, että tuulivoimalan teho  $P$  on siis suoraan verrannollinen siiven pituuden neliöön ja tuulen nopeuden kuutioon eli  $P \sim r^2 v^3$ .

Rakennettavien uusien tuulivoimaloiden keskikoko on Suomessa on 1–1,5 MW. Oulussa on Suomen suurin yksittäinen tuulivoimala. Sen teho on 3 MW. Raahen tuulipuisto on puolestaan Suomen suurin tuulivoimapuisto, teholtaan 11,5 megawattia. Se koostuu viidestä 2,3 megawatin yksiköstä. Suomen ensimmäinen tuulivoimala valmistui Inkon Kopparnäsiin 1986. Ensimmäinen varsinainen kaupallinen tuulisähkön tuotantolaitos, Korsnäsin neljän tuulivoimalan tuulivoimapuisto, kytkettiin sähköverkkoon vuonna 1991. Vuoden 2006 lopussa Suomessa oli 96 tuulivoimalaa, joiden yhteenlaskettu kapasiteetti oli 86 MW.

### 3) POLTTOPROSESSIT

- *palamisreaktiossa* vapautuva kemiallinen energia on sitoutunut poltettavaan aineeseen kasvin käyttäessä Auringon säteilyenergiaa yhteyttämisreaktiossa
- polttoprosesseissa hyötysuhde on noin 35 - 85 %
- erilaiset polttoprosessit ovat tärkeimpiä lämpöenergian lähteitä maapallolla Auringon lämpösäteilyn ohella
- polttoaineiden **lämpöarvo** eli **palamislämpö  $H$**  ilmoittaa, kuinka paljon palamisreaktiossa vapautuu *energiaa* polttoaineen *massayksikköä kohti*;

$$H = \frac{Q}{m}$$

Tästä saadaan palamisreaktiossa vapautuvan energian määrälle lauseke

$$Q = Hm$$

missä  $Q$  = palamisreaktiossa vapautuva energia (MJ)

$m$  = poltettavan aineen massa (kg)

$H$  = polttoaineen lämpöarvo (MJ/kg), (ks. MAOL s. 80).

Esim. poltettaessa 2,0 kg koksia saadaan energiaa  $Q = 2,0 \text{ kg} \cdot 28 \text{ MJ/kg} = 56 \text{ MJ}$ .

Polttovoimalan lämmitysteho on polttoprosessissa vapautuva energia aikayksikköä kohti;  $P = \frac{E}{t}$ . Kun huomioidaan hyötysuhde  $\eta$  ja energia

$E = Q = Hm$ , niin polttovoimalan antoteholle saadaan lauseke

$$P = \frac{\eta Hm}{t}$$

missä  $P$  = lämmitysteho eli hyötyteho, antoteho (W)

$\eta$  = hyötysuhde

$H$  = polttoaineen lämpöarvo (MJ/kg), (MAOL s. 85 (82))

$m$  = polttoaineen massa (kg)

$t$  = aika (s).

## ESIM.

- Meri-Porin kivihiiltä käyttävän lauhdevoimalan sähköteho on 565 MW ja hyötysuhde 44 %
- Pietarsaarella (Alholmens Kraft 2) on biovoimalaitos, jonka sähköteho on 240 W ja mustalipeää käyttävä soodakattilavoimalaitos teholtaan 140 MW
- Kotkassa (Mussalo 2) on maakaasukombivoimalaitos, jonka sähköteho on 238 MW
- Kristiinankaupungissa on öljyvoimalaitos, jonka sähköteho on 210 MW
- Seinäjoella on turve- ja hakevoimalaitos, jonka sähköteho on 125 MW.

Taulukossa (MAOL s. 85 (82)) on polttoaineiden lämpöarvoja (MJ/kg) :

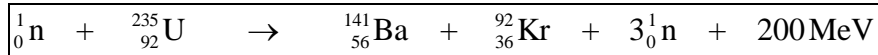
○ ammoniakki	17,2
○ asetyleeni	48,6
○ bensiini	43,5
○ etanoli	26,9
○ kaupunkikaasu	34
○ kivihiili,	26...32
○ antrasiitti	32...34
○ koksi	28
○ ruskohiili	20
○ maakaasu	46
○ metaani	49,8
○ metanoli	19,5
○ nestekaasu	42...43
○ petroli	43
○ kuiva halko	18...19
○ polttoöljy,	
▪ kevyt	43
▪ raskas	41
○ turve	11
○ vety	119

#### 4) YDINVOIMA

- ydinvoimalan energia on pääasiassa uraaniytimien halkeamistuotteiden liike-energiaa, ydinvoimalan hyötysuhde on noin 30 %
- vapautuvaa energiaa käytetään, kuten lämpövoimaloissa, veden kuumentamiseen ja höyrystämiseen ja höyryturbiinien sekä sähkögeneraattorin välityksellä sähköenergian tuottamiseen
- Ydinvoimalan rakenne ja toimintaperiaate (ks. YO-SYKSY-1997-3)

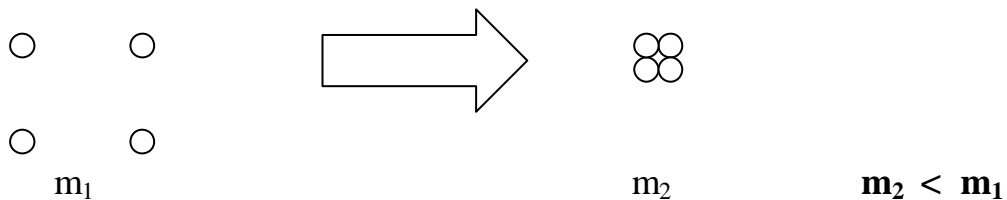
- ydinreaktorissa hidastetut neutronit törmäävät uraani-ytimeen  $^{235}_{92}\text{U}$ , jolloin tapahtuu **fissio** eli raskas uraani-235 –ydin *halkeaa kahdeksi keskiraskaaksi ytimeksi* ja samalla vapautuu 2 – 3 neutronia ja energiaa.

Eräs mahdollinen uraani-235 halkeamisreaktio on seuraava:



Reaktiossa vapautuneet 2 – 3 neutronia absorboidaan säätösauvoihin, niin että vapautuvien neutronien määrä on vakio ja näin syntyneet neutronit halkaisevat yhä uusia uraaniytimiä ja näin **ketjureaktio** jatkuu hallittuna.

- kun nukleonit (protonit ja neutronit) liittyvät yhteen osa nukleonien massasta muuttuu sidosenergiaksi  $E_B$ . Tätä massan muutosta sanotaan **massavajeeksi** eli **massakadoksi**  $\Delta m$ .
- massa on suhteellisuusteorian mukaan yksi energian esiintymismuoto ja massavajatta vastaava energia saadaan yhtälöstä  $E_B = \Delta m \cdot c^2$ .



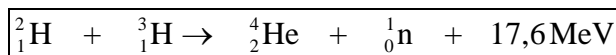
$$\Delta m = m_1 - m_2 > 0 \quad \text{eli} \quad m_2 < m_1$$

- **massa pienenee nukleonien liittyessä yhteen**  $\rightarrow$  **massavaje**  $\Delta m$
- ydinreaktiossa massakato ja vapautuva energia on miljoonakertainen verrattuna kemiallisiin reaktioihin!
- sidososuus on ytimen pysyvyyden (stabiliteetin) mitta; mitä suurempi on sidososuus sitä pysyvämpi on atomiydin. Sidososuus  $b$  määritellään seuraavasti: sidososuus on sidosenergia nukleonia kohti:

$$\boxed{b = \frac{E_B}{A}}$$

missä  $b$  = sidososuus (MeV/nukleoni)  
 $E_B$  = sidosenergia (MeV)  
 $A$  = massaluku =  $N + Z$  (neutronien lkm + protonien lkm)

**Fissiossa kevyet ytimet yhtyvät raskaammiksi** ja energiaa vapautuu. eräs mahdollinen fissioreaktio on seuraava:



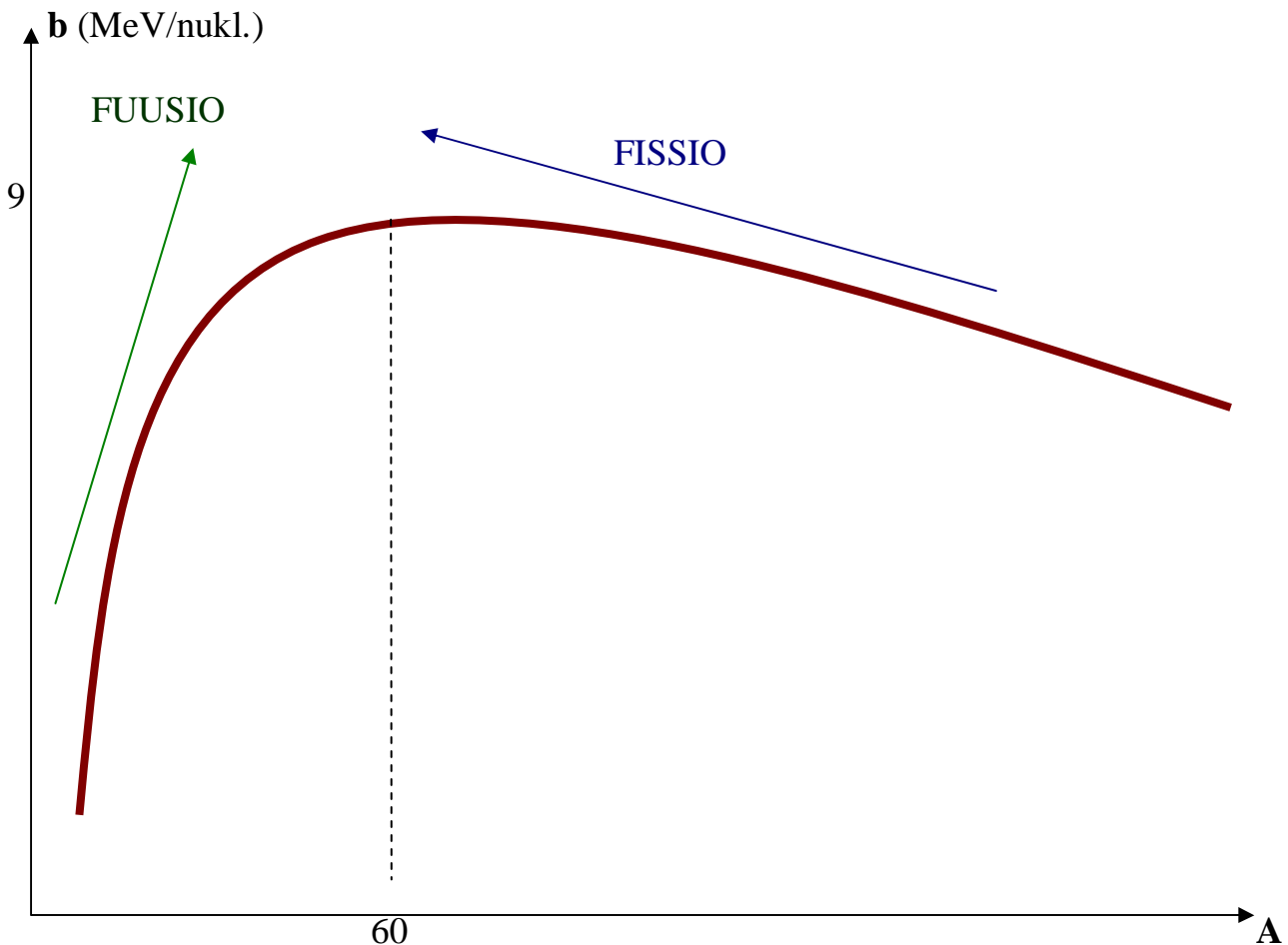
Massavaje sekä fissiossa että fuusiossa lasketaan lausekkeesta:

$$\Delta m = m_{\text{tuotteet}} - m_{\text{lähtöaineet}} \quad \text{ja}$$

sidosenergia Einsteinin relaatiolla  $E_B = \Delta m \cdot c^2$ .

Alla olevassa kuvassa on esitetty **sidososuus massaluvun A funktiona**;  $b = b(A)$ . Sidososuus on suurin keskiraskailla ytimillä ( $A \sim 60$ ) noin 8 – 9 MeV/nukleoni.

$$b = \frac{E_B}{A}$$



**SIDOSOSUUSKÄYRÄN AVULLA VOIDAAN SELITTÄÄ YDINENERGIAN VAPAUTTAMISEN FYSIKAALINEN PERUSTA:**

- raskaan ytimen hajotessa (fissio) kahdeksi keskiraskaaksi ytimeksi sidososuus kasvaa → nukleonit ovat siis lujemmin sitoutuneet kuin ennen fissiota → sidosten vahvistuessa vapautuu energiaa
- kahden kevyen ytimen liittyessä yhteen (fuusio) sidososuus kasvaa  
→ yksittäinen nukleoni on myös lujemmin sitoutunut kuin ennen fuusiota → sidokset vahvistuvat → energiaa vapautuu

Ydinvoimalan teho on  $P = \frac{W}{t} = \frac{\eta E}{t} = \frac{\eta \cdot \Delta m \cdot c^2}{t}$

$$P = \frac{\eta \cdot \Delta m \cdot c^2}{t}$$

missä  $\Delta m =$  massakato eli massavaje,  $\Delta m = m_{\text{tuotteet}} - m_{\text{lähtöaineet}}$

$\eta =$  hyötysuhde,  $\eta = \frac{P_{\text{anto}}}{P_{\text{otto}}}$

$c =$  valon nopeus,  $c = 3,0 \cdot 10^8$  m/s,  $t =$  aika (s)

- ydinreaktioissa vapautuva energia ( $\geq$  MeV) on suuruusluokaltaan miljoonakertainen ( $10^6$ ) kemiallisissa reaktioissa vapautuvaan energiaan ( $\geq$  eV) verrattuna.

Kaikesta Suomessa käytetystä sähköstä noin neljäsnes (26 %) tuotetaan ydinvoimalla.

- Eurajoen Olkiluodossa on kaksi 860 MW kiehutusvesireaktoria (BWR, **2 x 860 MW**), joiden yhteenlaskettu nettosähköteho on **1720 MW**.
- Loviisassa on kaksi painevesireaktoria (PWR, **2 x 488 MW**), joiden nettosähköteho yhteensä on **976 MW**.
- Lisäksi Suomeen on rakenteilla viides ydinvoimalaitos (Olkiluoto 3), jonka tehoon **1600 MW**. Uusi voimalaitos on tekniikaltaan ns. kolmannen sukupolven kevytvesireaktori ja malliltaan eurooppalainen painevesireaktori eli EPR. Voimala on teholtaan maailman suurin voimalayksikkö. Sen on tarkoitus olla kaupallisessa käytössä vuona 2012. (vrt. YO-K95-7).

