

Luku 4: Mekaaniseen energiaan pohjautuvat voimalaitokset

Tehtävien ratkaisut

Tehtävät 1–4 ovat automaattisesti tarkistettavia tehtäviä ja ne ovat digikirjassa.

4-1.

Täydennä puuttuvat sanat.

Vesivoimalaitoksessa putoavan veden ***potentiaalienergiaa*** muuntuu veden ***liike-energiaksi*** ja edelleen turbiiniin ja sen akselille rakennetun generaattorin pyörimisliikkeen energiaksi. Tuulivoimalaitoksessa tuulen ***liike-energiaa*** muuntuu roottorin ja siihen kytketyn ***generaattorin*** pyörimisliikkeen energiaksi. Molemmissa tapauksissa generaattorista saadaan ***sähköä***. Liike-energian ja potentiaalienergian summaa kutsutaan ***mekaaniseksi energiaksi***. Siksi vesi- ja tuulivoimalaitoksia voidaan kutsua mekaaniseen energiaan perustuviksi ***voimalaitoksiksi***.

4-2.

Oikein/väärin väittämät

1. Vesivoimalaitoksen tuottoteho puolittuu, kun veden virtaama puolittuu. ***Kyllä//Ei***
2. Vesivoimalaitoksen tuottoteho on verrannollinen pudotuskorkeuden neliöön. ***Kyllä//Ei***
Palaute: Vesivoimalaitoksen tuottoteho on suoraan verrannollinen pudotuskorkeuteen, ei sen neliöön.
3. Vesivoimalaitoksen tuottama energia on peräisin Auringosta. ***Kyllä//Ei***
4. Vesivoimalaitoksessa kaikki putoavan veden potentiaalienergia muuntuu sähköön siirrettäväksi. ***Kyllä//Ei***
Palaute: Osa energiasta muuntuu lämmöksi ja myös laitoksesta poistuvalla vedellä on liike-energiaa. Vesivoimalaitoksen hyötysuhde on 80-90 %.
5. Tuulivoimalaitoksen tuottoteho kaksinkertaistuu, kun tuulen nopeus kaksinkertaistuu. ***Kyllä//Ei***
Palaute: Tuulivoimalaitoksen tuottoteho on verrannollinen tuulen nopeuden kuutioon. Ideaalinen tuottoteho kahdeksankertaistuu tuulen nopeuden kaksinkertaistuessa.
6. Tuulivoimalaitoksen tuottoteho puolittuu, jos sen lavan pituus puolitetaan. ***Kyllä//Ei***
Palaute: Tuulivoimalaitoksen tuottoteho puolittuu, jos pyyhkäisypinta-ala puolittuu. Lavan pituuden puolittaminen kuitenkin pudottaa pyyhkäisypinta-alan ja siten myös tuottotehon neljäsosaansa!
7. Usean tuulivoimalaitoksen kokonaisuutta kutsutaan tuulipuistoksi. ***Kyllä//Ei***
8. Tuulivoimalaitoksen tuottama energia on peräisin Auringosta. ***Kyllä//Ei***

4-3.

Rastita oikeat vaihtoehdot. Jokaisessa kohdassa vain yksi vaihtoehto on oikea.

- a) Potentiaalienergian yksikkö on
 - 1 m/s.
 - 1 m²/s².
 - **1 J.**
- b) Liike-energian yksikkö on
 - 1 m/s.
 - 1 m²/s².
 - **1 J.**
- c) Suomessa vesivoimalaitoksen nimellinen tuottoteho on todennäköisimmin
 - 500 W.
 - **130 MW.**
 - 22,5 GW.

Luku 4: Mekaaniseen energiaan pohjautuvat voimalaitokset

- d) Nykyaikaisen tuulivoimalaitoksen nimellinen tuottoteho on todennäköisimmin
- 100 W.
 - **5 MW.**
 - 20 GW.

4-4.

- a)
- Kappaleen potentiaalienergia on kappaleen asemaan (sijaintiin) liittyvää gravitaatiovuorovaikutuksesta johtuvaa energiaa.
 - Kappaleen liike-energia on kappaleen liikkeeseen liittyvää energiaa.
 - Kappaleen mekaaninen energia on kappaleen ja Maan vuorovaikutukseen liittyvän potentiaalienergian ja kappaleen liike-energian summa.
- b)
- Vesivoimalaitoksessa veden potentiaalienergiaa muuntuu putouksessa veden liike-energiaksi ja edelleen turbiinissa ja sen akselille rakennetussa generaattorissa pyörimisliikkeen energiaksi. Generaattori tuottaa sähköä.
 - Tuulivoimalaitoksessa roottorin pyyhkäisypinta-alan läpäisevän ilman liike-energiaa muuntuu roottorissa ja sen akselille rakennetussa generaattorissa pyörimisliikkeen energiaksi. Generaattori tuottaa sähköä.

4-5.

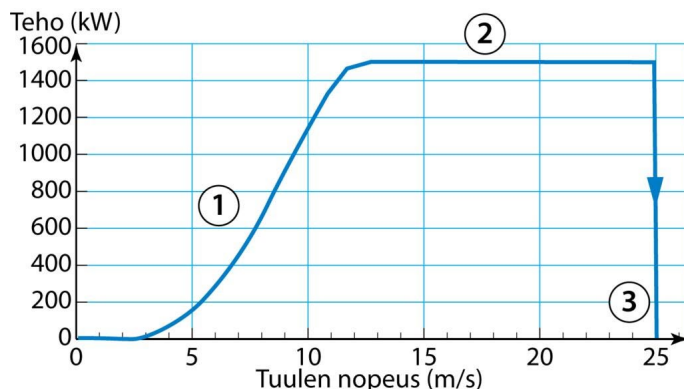
- a) Tuulipuiston pinta-ala saadaan jakamalla ydinreaktorin tuottoteho tuulipuiston pinta-alaan suhteutetulla tuottoteholla:

$$A_{\text{puisto}} = \frac{1600 \text{ MW}}{10 \text{ MW/km}^2} = 160 \text{ km}^2.$$

Pinta-alaan suhteutettu tuottoteho $10 \text{ MW} / \text{km}^2$ perustuu voimalaitosten keskinäiseen etäisyyteen. Karkeasti voidaan arvioida, että etäisyyden tulee olla noin 5 kertaa roottorin halkaisijan verran, jotta laitokset eivät häiritsisi toisiaan. Laitoksen koosta riippuen etäisyys on useimmiten noin 600 – 700 metriä.

- b) Jos pinta-alaltaan 160 km^2 tuulipuisto olisi neliön muotoinen, sen sivun pituus olisi $\sqrt{160 \text{ km}^2} \approx 13 \text{ km}$.
- c) Ydinvoimalaitos tuottaa sähköä lähes jatkuvasti nimellistehollaan (maksimitehollaan) pois lukien huoltoseisokit. Tuulipuiston tuotto riippuu tuulesta ja jää usein alle nimellistehon (maksimitehon).

4-6.



- a) Voimalaitos tuottaa sähköä nimellistehollaan kuvaajaan merkityssä kohdassa 2.
- b) Voimalaitos pysähtyy vaurioiden välttämiseksi kuvaajaan merkityssä kohdassa 3.
- c) Voimalaitoksen tuottoteho kasvaa tuulen nopeuden kasvaessa kuvaajaan merkityssä kohdassa 1.

Luku 4: Mekaaniseen energiaan pohjautuvat voimalaitokset

4-7.

- Pientuulivoimalaitoksella tarkoitetaan tuulivoimalaitosta, jonka roottorin pyyhkäisypinta-ala on alle 200 m^2 , jolloin sen siiven pituus on alle 8 m. Suurimmillaan tällaisen laitoksen tuottoteho voi olla 50–100 kW. Kotitalouskäyttöön suunnatut pientuulivoimalaitokset ovat kuitenkin tavallisesti selvästi tätäkin pienempiä.
- Jos tavoitteena on kattaa kesämökin valaistus ja elektroniikka, riittää alle 2 kW:n laitos, jossa on noin 2 metrin pituiset siivet.
- Mikäli halutaan kattaa valaistus, sähkölaitteet ja pääosa lämmityksestä, tarvitaan 4–10 kW pientuulivoimalaitos. Tällaisen laitoksen siivet ovat yli 4 metrisiä.

4-8.

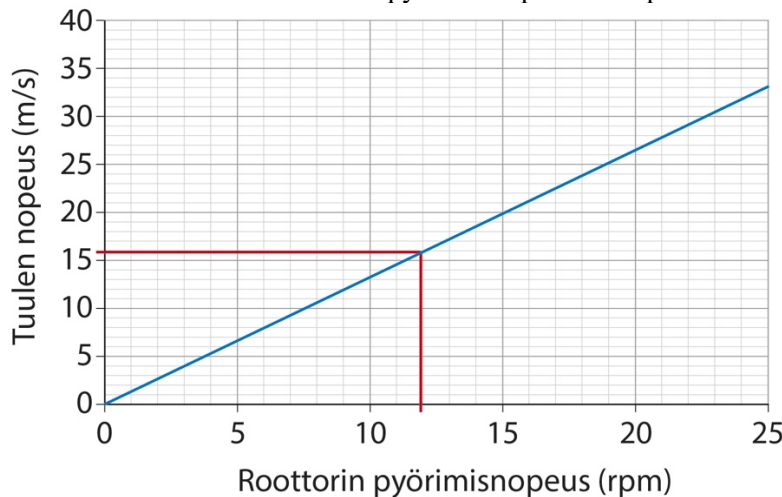
- Suomen tuulivoimaloiden sijoittuminen on nähtävissä täältä: <http://map.seadv.eu/>
Laitosten sijainti painottuu rannikolle alueiden tuulisuuden vuoksi.
- Suomen vesivoimalaitosten sijoittuminen löytyy täältä:
<http://www.vesirakentaja.fi/voimalaitokset/Vesivoimalaitokset.html>

Laitoksia on ympäri Suomea, mutta etenkin suuret laitokset sijoittuvat nauhamaisesti pitkin suuria jokia. Esimerkiksi laitosten sijoittuminen Kemijoen, Lieksanjoen ja Kymijoen vesistöalueille on nähtävissä täältä:

<https://www.kemijoki.fi/toimintamme/voimalaitokset-ja-tuotanto.html>

4-9.

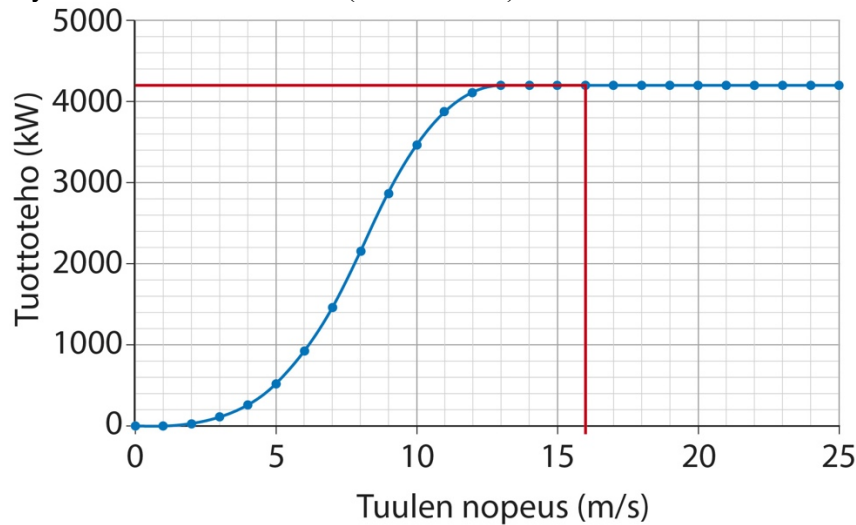
- Videolta nähdään, että aikavälillä 12 s ... 22 s roottori pyörähtää kaksi kokonaista kierrosta. Niinpä yhteen kierrokseen kuluu $\frac{22 \text{ s} - 12 \text{ s}}{2} = 5,0 \text{ s}$. Tällöin kierrosten lukumäärä minuutin aikana on $\frac{60 \text{ s}}{5,0 \text{ s}} = 12 \text{ (rpm)}$.
- Aineiston lineaarisessa mallissa pyörimisnopeutta 12 rpm vastaava tuulen nopeus on 16 m/s.



Kuva: Pertti Heikkilä

Luku 4: Mekaaniseen energiaan pohjautuvat voimalaitokset

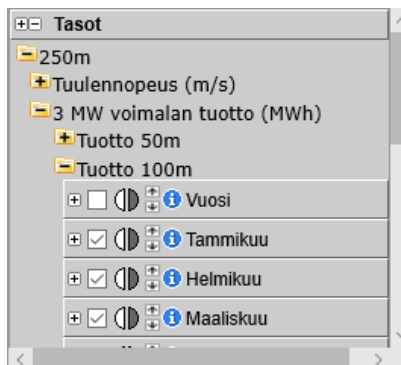
- c) Voimalaitoksen tuottotehon kuvaajassa tuulen nopeutta 16 m/s vastaa tuottoteho 4200 kW, joka on myös laitoksen nimellisteho (maksimiteho).



Kuva: Pertti Heikkilä

4-10.

Tehtävässä kannattaa käyttää Suomen Tuuliatlaksen dynaamista karttaliittymää (<http://tuuliatlas.fmi.fi/fi/#>). Valitaan karttaliittymästä jokin Pohjanlahden rannikon maa-alueen piste (malliratkaisussa P 63,51681 I 22,58918), minkä jälkeen valitaan Tasot-näkymästä 3 MW voimalan tuotto 100 metrin korkeudessa jokaiselle kuukaudelle:



Lähde: Suomen Tuuliatlas

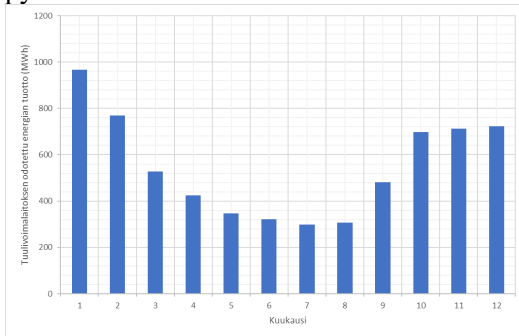
Jokaista kuukautta kohden avautuu näkymä, josta kuukauden tuottoarvio voidaan lukea megawattitunteina (MWh):

Tason nimi:			
Joulukuun tuotto 100m			
Solun koko:			
250m			
tuloksia: 1			
id	MWh	lat	lon
3963749	723	63.51681	22.58918
   			

Lähde: Suomen Tuuliatlas

Luku 4: Mekaaniseen energiaan pohjautuvat voimalaitokset

Näistä voidaan kerätä kuukausittaiset energian tuotot taulukkolaskentaohjelmaan ja piirtää pylväskaavio:

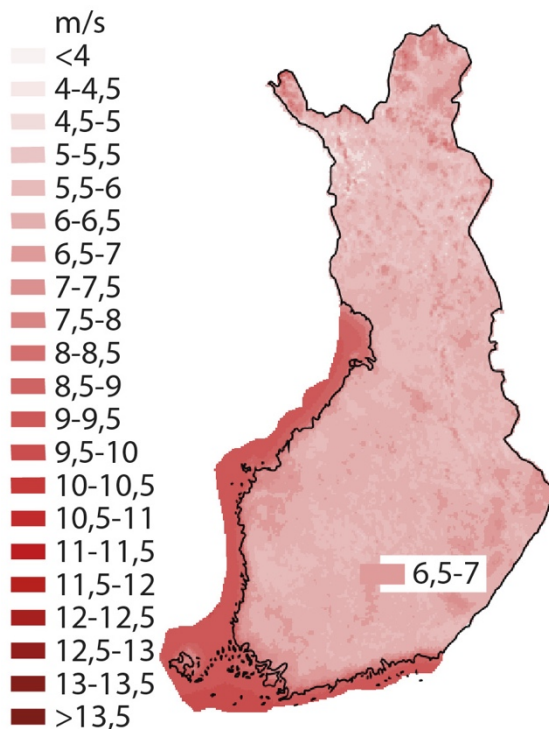


Kaaviosta nähdään, että tuulivoimalaitos tuottaa eniten energiaa talvella ja vähiten kesällä.

4-11.

Tehtävän ratkaisussa voi hyödyntää Suomen Tuuliatlaksen staattista tuulennopeuskarttaa (<http://www.tuuliatlas.fi/nopeus/index.html>) tai dynaamista karttapalvelua (<http://tuuliatlas.fmi.fi/fi/#>). Tämä ratkaisu on laadittu staattisen kartan avulla. Kartan värien vertaaminen annettuun asteikkoon voi olla helpompaa, jos sen siirtää ensin kuvankäsittelyohjelmaan. Tehtävässä 4-10 on käytetty dynaamista karttapalvelua, joka osaa antaa lukuarvot kartasta klikatusta sijainnista. Näin voisi tehdä myös tässä tehtävässä.

Alla on Suomen Tuuliatlaksen staattinen kartta tuulen nopeuden keskiarvosta 200 metrin korkeudessa:



Lähde: Suomen tuuliatlas

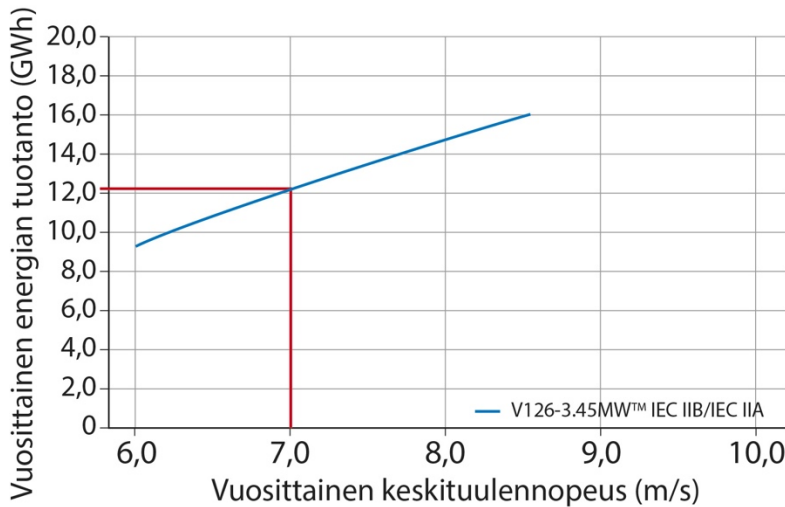
Kuva: Pertti Heikkilä

Esimerkiksi valitussa sijainnissa tuulen vuoden aikainen keskinopeus on noin 7 m/s.

Luku 4: Mekaaniseen energiaan pohjautuvat voimalaitokset

V126-3.45MW-tuulivoimalan esitteessä

(<http://nozebra.ipapercms.dk/Vestas/Communication/Productbrochure/4MWbrochure/4MWProductBrochure/?page=14>) on kuvaaja, josta nähdään kyseisen laitoksen odotettu vuotuinen energiantuotto tuulen keskinopeuden funktiona:



Kuva: Pertti Heikkilä

- Kuvaajasta nähdään, että tuulen keskinopeuden ollessa 7 m/s vuotuinen energiantuotto on noin 12 GWh.
- Viidenkymmenen tällaisen voimalan tuulipuisto tuottaisi $50 \cdot 12 \text{ GWh} = 600 \text{ GWh}$ energiaa vuodessa.
- Sähkölämmitteisessä omakotitalossa asuvan neljän hengen perheen vuotuinen energian kulutus on n. $18\,000 \text{ kWh} = 0,018 \text{ GWh}$. Tällöin viidenkymmenen voimalan tuulipuisto tuottaisi energiaa $600 \text{ GWh} : 0,018 \text{ GWh} \approx 33\,000$ omakotitalolle.

4-12.

- Energiavarantojen kasvu on tyypillisesti suurimmillaan toukokuussa.
- Sateiden lisäksi lumien sulamisvedet kasvattavat patoaltaiden ja virtojen vesimääriä huhti-toukokuussa.
- Keskimääräisen tuloenergian maksimi on n. $800 \text{ GWh} / \text{viikko}$. Jos tuloenergia pysyy viikon verran muuttumattomana, energiavarannot kasvaisivat 800 GWh . Jaetaan energiamäärä kolmihenkisen kerrostalotalouden vuotuisella energiankulutuksella:

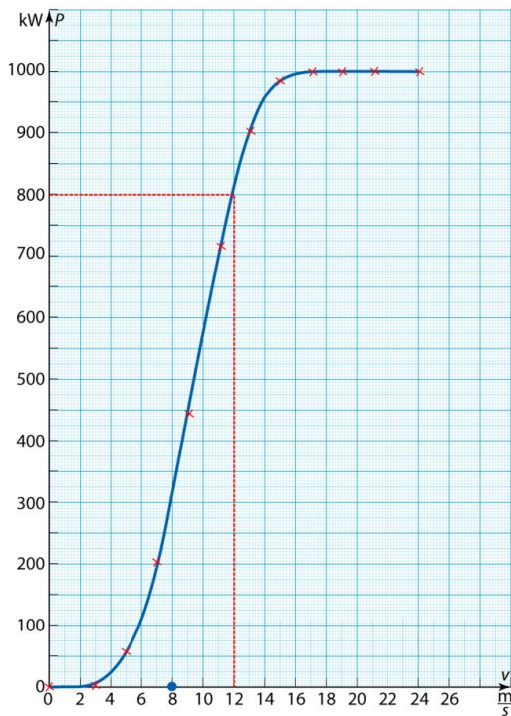
$$\frac{800 \text{ GWh}}{2400 \text{ kWh}} = \frac{800 \cdot 10^9 \text{ Wh}}{2400 \cdot 10^3 \text{ Wh}} \approx 300\,000.$$

Sateet kattaisivat viikossa noin $300\,000$ näin asuvan perheen vuotuisen energian tarpeen.

4-13.

Luku 4: Mekaaniseen energiaan pohjautuvat voimalaitokset

- a) Voimalaitoksen teho P riippuu tuulen nopeudesta v kuvaajan mukaisesti.



- b) Kuvaajan mukaan tehoa $P = 800$ kW vastaavaksi tuulen nopeudeksi saadaan $v \approx 12$ m/s.
c) Voimalaitoksen keskimääräinen teho vuonna 2006 oli

$$P_k = \frac{E}{t} = \frac{2517 \text{ MWh}}{365 \cdot 24 \text{ h}} = 0,287329 \text{ MW} \approx 290 \text{ kW}.$$

4-14.

$$v = 6,2 \text{ m/s}, r = 64 \text{ m}, m = 103\,000 \text{ kg}, t = 1,0 \text{ s}, \eta = 0,32, \rho = 1,293 \text{ kg/m}^3.$$

TAPA I: Käytetään tuulivoimalaitoksen tuottotehon kaavaa

$$P_{\text{tuotto}} = \eta \cdot \frac{1}{2} \rho \pi r^2 v^3 = 0,32 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,293 \text{ kg/m}^3 \cdot \pi \cdot (64 \text{ m})^2 \cdot (6,2 \text{ m/s})^3 \approx 630 \text{ kW}.$$

TAPA II: Tarkastellaan sen ilmamassan liike-energiaa, joka läpäisee roottorin pyyhkäisy-pinta-alan sekunnissa

Ilmamassan liike-energia on

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} \cdot 103\,000 \text{ kg} \cdot (6,2 \text{ m/s})^2 = 1,97966 \cdot 10^6 \text{ J} \approx 2,0 \text{ MJ}.$$

Ilmamassan liike-energiasta 32 % saadaan hyödynnettyä sähkön tuotantoon:

$$E_{\text{tuotto}} = \eta E_{\text{otto}} = \eta E_k = 0,32 \cdot 1,97966 \cdot 10^6 \text{ J} = 0,633491 \cdot 10^6 \text{ J} \approx 630 \text{ kJ}.$$

Tällöin tuulivoimalaitoksen tuottoteho on

$$P_{\text{tuotto}} = \frac{E_{\text{tuotto}}}{t} = \frac{0,633491 \cdot 10^6 \text{ J}}{1,0 \text{ s}} = 633,491 \text{ kW} \approx 630 \text{ kW}.$$

Luku 4: Mekaaniseen energiaan pohjautuvat voimalaitokset

4-15.

- a) $\eta = 0,85$, $h = 7,8$ m, $V = 629$ m³, $t = 1,0$ s, $g = 9,81$ m/s², $\rho = 1000$ kg/m³.

TAPA I: Käytetään vesivoimalaitoksen tuottotehon kaavaa

$$P_{\text{tuotto}} = \eta \rho \frac{V}{t} gh = 0,85 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot \frac{629 \text{ m}^3}{1,0 \text{ s}} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 7,8 \text{ m} \approx 41 \text{ MW}.$$

TAPA II: Tarkastellaan sekunnin aikana vapautuvaa potentiaalienergiaa

Tarkastellaan sekunnin aikana vapautuvaa veden potentiaalienergiaa. Veden virtaama on 629 m³/s eli sekunnissa virtaavan veden tilavuus on 629 m³ = 629 000 litraa. Tällöin sekunnissa putoukseen saapuvan veden massa on $m = 629$ 000 kg. Sekunnissa vapautuva potentiaalienergia on

$$E_{\text{otto}} = E_p = mgh = 629\,000 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 7,8 \text{ m} = 48,1298 \cdot 10^6 \text{ J} \approx 48 \text{ MJ}.$$

Tästä 85 % saadaan hyödynnettyä sähkön tuotannossa:

$$E_{\text{tuotto}} = \eta E_{\text{otto}} = 0,85 \cdot 48,1298 \cdot 10^6 \text{ J} = 40,9103 \cdot 10^6 \text{ J} \approx 41 \text{ MJ}.$$

Tällöin laitoksen tuottoteho on

$$P_{\text{tuotto}} = \frac{E_{\text{tuotto}}}{t} = \frac{40,9103 \cdot 10^6 \text{ J}}{1,0 \text{ s}} = 40,9103 \cdot 10^6 \text{ W} \approx 41 \text{ MW}.$$

- b) Kuvaajasta nähdään, että vuoden 2019 maksimivirtaama saavutetaan heinäkuussa ja se on noin 790 m³/s. Tällöin sekunnissa putoukseen saapuu $m = 790$ 000 kg vettä.

TAPA I: Käytetään vesivoimalaitoksen tuottotehon kaavaa

$$P_{\text{tuotto}} = \eta \rho \frac{V}{t} gh = 0,85 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot \frac{790 \text{ m}^3}{1,0 \text{ s}} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 7,8 \text{ m} \approx 51 \text{ MW}.$$

TAPA II: Tarkastellaan sekunnin aikana vapautuvaa potentiaalienergiaa

Sekunnissa vapautuva potentiaalienergia on

$$E_{\text{otto}} = E_p = mgh = 790\,000 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 7,8 \text{ m} = 60,4492 \cdot 10^6 \text{ J} \approx 60 \text{ MJ}.$$

Tästä 85 % saadaan hyödynnettyä sähkön tuotannossa:

$$E_{\text{tuotto}} = \eta E_{\text{otto}} = 0,85 \cdot 60,4492 \cdot 10^6 \text{ J} = 51,3818 \cdot 10^6 \text{ J} \approx 51 \text{ MJ}.$$

Tällöin laitoksen tuottoteho on

$$P_{\text{tuotto}} = \frac{E_{\text{tuotto}}}{t} = \frac{51,3818 \cdot 10^6 \text{ J}}{1,0 \text{ s}} = 51,3818 \cdot 10^6 \text{ W} \approx 51 \text{ MW}.$$

- c) Laitoksen nimellisteho on 66 MW, mikä on selvästi enemmän kuin vuosien 1981 – 2010 keskivirtaamaa vastaava teho 41 MW. Myös vuoden 2019 huipputeho 51 MW jää alle nimellistehon. Laitoksen tuottoteho on siis tyypillisesti nimellistehoa pienempi.