



# TUULEENERGIA

Arvutusülesanne (umbes 60 min)

**KOOLIASTE** Gümnaasium

**AINELÕIMING** • Füüsika

**ÕPIVÄLJUNDID** Õpilane

- mõistab tuuleenergia tehnoloogiat;
- oskab füüsikaliste seoste (nt Betzi seaduse) analüüsimiseks kasutada ühikanalüüsi;
- teab, kuidas teisendada ühikuid ja arvutada tuulekiiruse muutumist kõrguse järgi.

**EESMÄRK** Eesmärk on süvendada õpilaste arusaamist tuuleenergiast ja selle praktilistest rakendustest füüsikas. Viimase küsimuse mõte on anda avatud ülesanne, kus õpilased saavad esitada oma arvutustele ja muudele asjakohastele faktidele tuginevaid argumente.

**ÜLESANDE KIRJELDUS** Kui võrdleme kaarte, kus on toodud elektri- ja diiselmootoriga autod, siis näivad elektriautod olevat kliimasõbralikumad. See sõltub aga sellest, kuidas elektriautode tarbeks kasutatavat elektrit toodetakse ja see on riigiti erinev. Elektrit võib toota näiteks hüdro-, tuuma- või tuuleenergiast või siis fossiilkütustest, näiteks kivisöest või maagaasist.

Tuuleenergia katab praegu umbes 17% Euroopa elektrienergia nõudlusest ja mõnes riigis isegi oluliselt rohkem ([Wind Europe](#)). Tuuleenergiat arendatakse üha enam ja selle osakaal tõuseb tõenäoliselt veelgi.

Selles ülesandes uurime, kuidas tuuleenergia toimib ja mida oleks vaja, et asendada tuumaenergiat tuuleenergiaga.

NB! Ülesande lihtsustamiseks võib õpilastele anda kõik arvutusteks vajalikud väärtused.



**Betzi seadus** on tuuleenergia tehnoloogia aluspõhimõte. Selle järgi on maksimaalne tuuleturbiinist saadav energia 16/27 (ehk umbes 59%) tuuleturbiini läbiva õhu energiast:

$$P = \frac{16}{27} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot r^2 \cdot v^3}{2}$$

P on maksimaalne võimsus [vattides], mida tuuleturbiin võib ammutada,  $\rho$  [roo; kg/m<sup>3</sup>] on õhu tihedus, r [m] on tuuleturbiini raadius (st rootori labade pikkus) ja v [m/s] tuulekiirus tiiviku kõrgusel.

Tuulekiirus v varieerub erinevatel kõrgustel maapinnast. Ilmaprognoosides antakse tuulekiirus tavaliselt 10 meetri kõrgusel, kuid tuuleturbiinid on sellest palju kõrgemad. Ligikaudne tuulekiirus h meetri kõrgusel maapinnast saadakse seosest:

$$v = v(h) = v(10) \cdot \left(\frac{h}{10}\right)^{0,16}$$

kus v(10) on tuulekiirus 10 meetri kõrgusel maapinnast.

- Kasutage kontrolliks ühikanalüüsi, et Betzi seaduse vasakul ja paremal poolel oleksid samad ühikud.
- Arvutage ülaltoodud valemi abil tuulekiirus 50 meetri kõrgusel. Oletame, et v(10) = 15, mis tähendab, et tuule kiirus 10 meetri kõrgusel on 15 m/s.
- Arvutage tuuleturbiini teoreetiliselt maksimaalne võimsus. Leidke arvutamiseks vajalikud väärtused või tehke mõistlikud eeldused. Valige ise, kas arvutate võimsuse väikese, keskmise või suure tuuleturbiini kohta. Kontrollige, et tulemusel oleks õige ühik!
- Hinnake, kui palju tuuleturbiine on vaja tuumaelektrijaama asendamiseks. Leidke arvutamiseks vajalikud väärtused või tehke mõistlikud eeldused.
- Tüüpiline keskmise suurusega tuuleturbiin toodab aastas ligikaudu 5,1 GWh. Kuidas on see võrreldav punktis c arvatud väärtusega? Mõelge, mis põhjusel võivad väärtused olla erinevad, ja arvutage välja, kui palju tuuleturbiine oleks vaja tuumaelektrijaama asendamiseks, kui kõik tuuleturbiinid toodaksid 5,1 GWh aastas.
- Tuumaenergia kasutamine on olnud pikka aega vastuoluline küsimus. Mõtisklege omaette ja püüdke vastata võimalikult üksikasjalikult järgmistele küsimustele. Millised on tuumaenergia ja tuuleenergia eelised ja puudused? Miks on keeruline asendada tuumaenergiat täielikult tuuleenergiaga?



## SOOVITATAVAD LAHENDUSED

a. Betzi seaduses esitatud muutujate ühikanalüüs:

- $P$  tähistab võimsust, mida mõõdetakse vattides (W).
- $\rho$  tähistab õhu tihedust, mida mõõdetakse kilogrammides kuupmeetri kohta ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).
- $r$  tähistab raadiust, mida mõõdetakse meetrites (m). Raadius on kaugus tuuleturbiini tiiviku keskpunktist tiiviku laba servani.
- $v$  tähistab tuulekiirust, mida mõõdetakse meetrites sekundis (m/s).

Betzi seaduse vasakpoolne osa on vattides (W). Betzi seaduse paremal pool on ühikud J/s (džauli sekundis), mis on esitatud järgmiselt:

$$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \text{m}^2 \cdot \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^3 = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{m}^3}{\text{m}^3 \cdot \text{s}^3} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^3} = \frac{\text{J}}{\text{s}}$$

See tuleneb asjaolust, et džaul on *tuletatud SI-ühik*, mida saab väljendada ka järgmiselt:  $\text{J} = \text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$ . Seega on vasakul ja paremal pool samad ühikud, sest  $\text{W} = \text{J}/\text{s}$ .

b. 
$$v(50) = 15 \cdot \left(\frac{50}{10}\right)^{0,16} \approx 19,4 \text{ m/s}$$

Arvutus näitab, et kui 10 meetri kõrgusel puhub tuul 15 m/s, siis 50 meetri kõrgusel on tuulekiirus veidi üle 19 m/s.

c. Keskmise suurusega ärikasutuseks mõeldud tuuleturbiinidel on tavaliselt tiivikulabad raadiusega 20–60 meetrit. Suuremates tuuleparkides kasutatakse kõige võimsamate tuuleturbiinide tiivikulabade raadius võib olla üle 100 meetri. Oletame, et selle tuuleturbiini kõrgus ( $h$ ) on 150 meetrit, raadius ( $r$ ) 50 meetrit ja  $v(10) = 15 \text{ m/s}$ .

Kõigepealt arvutatakse tuulekiirus 150 meetri kõrgusel:

$$v(150) = 15 \cdot \left(\frac{150}{10}\right)^{0,16} \approx 23,1 \text{ m/s}$$

Seejärel arvutatakse Betzi seaduse abil teoreetiliselt maksimaalne võimsus. Õhu tihedus on ligikaudu  $1,2 \text{ kg}/\text{m}^3$ .

$$P = \frac{16}{27} \cdot \frac{1,2 \cdot \pi \cdot 50^2 \cdot 23,1^3}{2} \approx 34,4 \text{ MW}$$



- d. Tuumaelektrijaama energiatoodang sõltub mitmest tegurist, sealhulgas reaktori tüübist, selle võimsusest, tööajast ja kasutegurist. Siinkohal eeldame, et tuumaelektrijaam toodab 7 TWh aastas (ehk 7000 GWh aastas), mis on tüüpiline suurema tuumaelektrijaama väärtus.

Tuuleturbiini teoreetiliselt maksimaalne elektritoodang (E) ühe aasta jooksul arvutatakse nii, et teoreetiliselt maksimaalne võimsus (P) korrutatakse ajaga (t) tundides aastas:

$$E = P \cdot t = 34,4 \text{ MW} \times 24 \text{ tundi päevas} \times 365 \text{ päeva aastas} \approx 301 \text{ GWh/aastas}$$

Seejärel arvutatakse tuumaelektrijaama asendamiseks vajalike tuuleturbiinide arv:

$$\text{Tuuleturbiinide arv} = \frac{7000 \text{ GWh/aasta}}{301 \text{ GWh/aasta}} \approx 23$$

Arvutus näitab, et 7 TWh aastas tootva tuumaelektrijaama asendamiseks on vaja 23 tuuleturbiini.

- e. Arvutatud väärtus (301 GWh aastas) on oluliselt suurem kui tegeliku tuuleturbiini keskmine väärtus (5,1 GWh aastas). See on osaliselt tingitud sellest, et tuulekiirus ei ole alati piisavalt suur, et saavutada maksimaalne tõhusus, ja osaliselt sellest, et me oleme jätnud tähelepanuta kõik hõõrdekadod.

Kui kõik tuuleturbiinid toodavad 5,1 GWh aastas, saame tuuleturbiinide arvu, mis on vajalik tuumaelektrijaama asendamiseks, arvutada järgmiselt.

$$\text{Tuuleturbiinide arv} = \frac{7000 \text{ GWh/aasta}}{5,1 \text{ GWh/aasta}} \approx 1372$$

- f. Tuuma- ja tuuleenergia on mõlemal oma plussid ja miinused. Kuigi tuuleenergia pakub puhast energiat, varieerub selle toodang olenevalt tuuleoludest, mis tekitab probleeme varustuskindlusega. Ülekandekadude vältimiseks on oluline kohene kasutamine või ladustamine, mis vastab täpselt nõudlusele. Tuumaenergia on keskkonnahoidlik, kuid selle ehitamine on kulukas ning sellega kaasnevad julgeoleku- ja jäätmekäitlusprobleemid.

Tuumaenergia täielik asendamine tuuleenergiaga on keeruline. Tuule muutlikkuse tõttu tuleb varustuskindluse tagamiseks kasutada täiendavaid energiaallikaid, näiteks hüdroenergiat. Tuulele omane ettearvamatus muudab võrgu haldamise keeruliseks. Tuumaenergia tagab stabiilse ja pideva energiaravustuse. Üleminek nõuab taristu uuendamist ja investeringuid energiasalvestustehnoloogiasse.