

ENDEL RISTHEIN

SISSEJUHATUS ENERGIATEHNIKASSE



Elektriajam

2007

Toimetaja

Kujundanud

Esitrükk 2007

Autoriõigus:

Endel Risthein 2007

Tallinna Tehnikaülikooli elektriajamite ja jõuelektronika instituut 2007

ISBN

Kirjastus:



Elektriajam

Ehitajate tee 5

19086 Tallinn

e-post aa@ttu.ee

Trükk:

EESSÖNA

Käesolev raamat on ette nähtud kasutamiseks eeskätt õpikuna nii bakalaureuseõppe üliõpilastele kohustuslikus õppeaines **Sissejuhatus energiatehnikasse** kui ka magistri- ja doktoriõppe üliõpilastele energiatehniliste teadmiste kordamiseks või värskendamiseks. Raamat võib olla kasulik ka teistele õppeasutustele, tegutsevatele elektriinseneridele ja kõigile energeetikahuvilistele.

Õppeaine **Sissejuhatus energiatehnikasse** võeti Tallinna Tehnikaülikooli elektriainete ja jõuelektronika eriala inseneriõppe kavasse aastal 1990 ja on praegu samanimelise õppesuuna bakalaureuseõppe kavas esimesel kursusel. Õppeaine käsitleb lühidalt ning üldülevaatliselt Maa energiavarusid ja nende rakendamist, energia tootmist, muundamist, edastamist ja salvestamist, energia tarbimisviise, energiaseadmete toimet keskkonnale ja nii Eesti kui ka Euroopa ja maailma energiamaajanduse tulevikuväljavaateid. Õppeaine põhiülesanne on valmistada üliõpilasi ette samade probleemide lähemaks käsitlemiseks erialaainetes (elektriainete, jõuelektronika, elektrivarustus, elektrotehnoloogia, elektrelvalgustus ja muud), kuid selles antakse ka tulevaste inseneride silmaringi laiendavaid teadmisi maailma energeetika- ja keskkonnaprobleemide alal.

Senised kogemused on näidanud, et õppeaines käsitletavat probleemi pakuvad huvi mitte üksnes esimese kursuse üliõpilastele, kellele see aine on määratud, vaid ka magistri- ja doktoriõppe üliõpilastele, energeetika ja elektrotehnika alal tegutsevatele inseneridele ning teistele spetsialistidele ja kõigile neile, kes energeetika nüüdisseisundi või tuleviku vastu huvi tunnevad. Seetõttu on käesoleva õpiku materjalivalik ja käsitusviis mõnevõrra laiem kui see oleks vajalik esimese kursuse üliõpilastele lähteteadmiste andmiseks.

Käesolev raamat sisaldab nii muutumatuid põhitõdesid kui ka pidevalt muutuvate tehniliste lahenduste kirjeldusi ja energeetika arenguandmeid. Sellest tulenevalt võib osutuda otstarbekohaseks kirjastada selle kordustrukke sagedamini kui muude kõrgkooliõpikute korral. Kõiki märkusi, soovitusi ja ettepanekuid, mida autor tänuga vastu võtab, saab juba järgmises trükis seega kindlasti arvestada.

Autor avaldab suurimat tänu akadeemik Arvo Otsale käesoleva raamatu käsikirja põhjaliku ning heasoovliku läbivaatamise, väga asjalike märkuste ja väärtuslike soovitude eest.

Tallinn, aprill 2007.

Autor

SISUKORD

1	SISSEJUHATUS	
1.1	Põhimõisted	6
1.2	Maa energiabilanss	15
1.3	Maa energiavarud	19
1.4	Energeetika ja energiatarbimise ajalooline areng	22
1.5	Maailma maade energia- ja elektritarbimine	33
2	ENERGIA MUUNDAMINE	
2.1	Üldmõisted	43
2.2	Aurugeneraatorid (aurukatlad)	47
2.3	Auruturbiinid	60
2.4	Gaasiturbiinid	66
2.5	Kolbmootorid	69
2.6	Kütuseelemendid	75
2.7	Magnetohüdrodünaamilised generaatorid	80
2.8	Tuumareaktorid	82
2.9	Hüdroturbiinid	93
2.10	Tuuleturbiinid	97
2.11	Fotoelektrilised muundurid	102
2.12	Elektrisingeneraatorid	107
2.13	Elektrimootorid	112
2.14	Muud elektrimuundurid	116
2.15	Soojusvahetid ja -transformaatorid	121
3	ENERGIA EDASTAMINE	
3.1	Üldmõisted	126
3.2	Kütuste edastamine	130
3.3	Mehaanilise energia edastamine	135
3.4	Soojuse edastamine	140
3.5	Elektrienergia edastamine	143
4	ENERGIA SALVESTAMINE	
4.1	Üldmõisted	154
4.2	Mehaanilise energia salvestamine	157
4.3	Hüdroenergia salvestamine	163
4.4	Soojuse salvestamine	165
4.5	Elektrienergia salvestamine	167
4.6	Keemilise energia salvestamine	177
4.7	Kokkuvõte	178

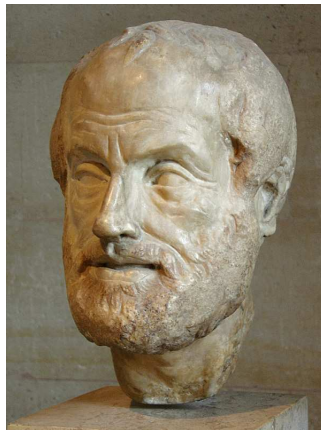
5	ELEKTRIJAAAMAD JA ENERGIASÜSTEEMID	
5.1	Üldmõisted	180
5.2	Põletuskütuselektrijaamad	186
5.3	Tuumaelektrijaamad	193
5.4	Hüdroelektrijaamad	197
5.5	Tuuleelektrijaamad	205
5.6	Geotermaalelektrijaamad	213
5.7	Päikeseelektrijaamad	218
5.8	Alajaamad	226
5.9	Energiasüsteemid	229
6	ENERGIA KASUTAMINE	
6.1	Üldmõisted	237
6.2	Energia mitteelektrilised kasutamisiisid	238
6.3	Elektrijaam	244
6.4	Elekterküte	247
6.5	Elektrotehnoloogia	251
6.6	Elektervalgustus	257
6.7	Ohutuse tagamine elektrienergia kasutamisel	262
6.8	Energia tarbimise struktuur eri rahvamajandusharudes	269
6.9	Rahvamajanduse energia- ja elektribilanss	275
7	ENERGIASEADMETE TOIME KESKKONNALE	
7.1	Üldmõisted	279
7.2	Kasvuhoonenähtus	281
7.3	Maa osoonikihi hõrenemine	292
7.4	Keskkonna saastamine heitainetega	296
7.5	Soojuslik toime keskkonnale	303
7.6	Toime maakasutusele ja maastikule	304
7.7	Elektromagnetväljad	306
7.8	Müra ja valgussaaste	310
8	ENERGEETIKA ARENGUSUUNAD	
8.1	Üldmõisted	312
8.2	Kütusekriis	313
8.3	Hüdro- ja tuuleenergeetika arengusuunad	317
8.4	Tuumaenergeetika arengusuunad	320
8.5	Alternatiivsed energiaallikad	327
8.6	Vesinikuenergeetika	331
8.7	Energia kokkuhoiupõhimõtted	334
8.8	Eesti energeetika tulevikuväljavaated	339

1 SISSEJUHATUS

1.1 PÕHIMÕISTED

Energia on väga vana teaduslik termin. Kreeka filosoof ja loodusteadlane Aristoteles (384–322 eKr) tähistas oma umbes aastal 330 eKr kirjutatud teoses *Metafüüsika* [1.1] sõnaga *ἐνέργεια* inimese *tegevusvõimet*, eeskätt aga *liikumapanekuvõimet*. Selles tähenduses on see sõna praegugi käibel, kuid teaduse ja tehnika arengus on *energia* saanud ka puht füüsikalise määratluse. Nimelt mõeldakse selle all käesoleval ajal

- 1) kitsamas (tava-) mõttes suurust, millega väljendub mingi objekti **võime teha tööd**; selle määratluse andis 1619 austria astronoom ja matemaatik Johannes Kepler (1571–1630), kes sel ajal oli Linzi gümnaasiumi matemaatikaõpetaja, enda poolt kasutuselevõetud füüsikalisele suurusele *facultas* ('võime');
- 2) laiemas mõttes kõigi füüsikaliste objektide (osakeste, kehade, väljade) **liikumise üldist mõõtu**; selle üldistava määratluse andsid 1851–1852 šoti insener ja füüsik William John Macquorn Rankine (1820–1872) ja Glasgow' ülikooli füüsikaproffessor, Londoni Kuningliku Seltsi liige William Thomson.



Aristoteles

William Thomson sündis aastal 1824 Põhja-Iirimaal. Kümneaastaselt astus ta Glasgow' ülikooli, kus tema isa oli valitud matemaatikaproffessoriks. Õpingute ajal huvitus ta prantsuse matemaatiku Jean Baptiste Joseph Fourier' (1768–1830) teosest *Théorie analytique de la chaleur* ja kirjutas aastail 1841 ja 1842 kolm artiklit selle toetuseks. Aastal 1845 käsitles ta esimesena matemaatiliselt Michael Faraday ideed, mille kohaselt elektriline induktsioon ei ole *kaugtoimenähtus*, vaid põhineb elektromagnetvälja muutumisel dielektrikus. Aastal 1846 valiti ta Glasgow' ülikooli loodusteaduse professoriks, kus ta alustas soojusnähtuste põhjalikku uurimist ja juba aastal 1848 võttis kasutusele **absoluutse (termodünaamilise) temperatuuri** mõiste. Soojusnähtuste praktilise rakendamise alal valmistas ta aastal 1852 esimese **soojuspumba**. Aastal 1853 võttis ta esimesena matemaatiliselt käsile siirdenähtused, mis tekivad elektriahelate sisselülitamisel, järgmisel aastal kutsuti ta aga osalema Euroopa ja Ameerika vahelise esimese telegraafikaabli projekteerimises ja paigaldamises. Tema osavõtul projekteeriti ja seadistati hiljem mitmeid teisi telegraafi-merekaableid. Teenete eest telegraafitehnika arendamises tõstis kuninganna Victoria ta aastal 1866 aadliseisusesse ja aastal 1892 sai ta tiitli *lord Kelvin*. Ta tegeles ka tugevvoolu-elektriedastusega (andis nt valemi elektriliinide *majandusliku ristlõike* määramiseks) ja kui aastal 1906 asutati Londonis rahvusvahelise elektrotehnilise standardimise alustamiseks Rahvusvaheline

Elektrotehnikakomisjon (*International Electrotechnical Commission, IEC*), valiti ta selle esimeseks presidendiks. Seda ülesannet täitis ta kuni oma surmani aastal 1907.



William Thomson

Energia võib avalduda väga mitmesugusel kujul. Tähtsamate **energialiikidena** eristatakse

- mehaanilist (potentsiaalset, kineetilist, elastsus-, heli-) energiat,
- soojuslikku siseenergiat (mida nimetatakse ka *soojusenergiaks*),
- keemilist (keemilistes reaktsioonides neelduvat või vabanevat) energiat,
- elektromagnetilist (elektrivälja-, magnetvälja-, kiirgus-) energiat,
- gravitatsioonienergiat,
- tuumaenergiat.

Energia olemust, selle avaldumisvorme, avaldumise seaduspärasusi ja nende matemaatilist väljendamist käsitleb loodusteaduste hulka kuuluv **füüsika**. Energia tehnilist rakendamist käsitleb **energiatehnika**, mis kuulub rakendusteaduste hulka ja mis ühtlasi kujutab endast **tehnika** alajaotist.

Tehnika (ingl *technology*, pr *technique*, sks *Technik*, sm *tekniikka*, vn *техника*), nagu ka teadus, majandus, elukorraldus ja palju muud, kuulub *inimtegevuse valdkondade* hulka ja seda määratletakse kui

loodusseaduste ja -nähtuste tundmisel ning loodusjõudude ja -varude rakendamisel põhinevate teadmiste, töövõtete ja -oskuste kogumit.

Selle määratluse põhimõte pärineb samuti Aristoteleselt, kes esitas sellise arusaama (*τεχνη*, 'oskus, meisterlikkus') oma eelnimetatud teoses *Metafüüsika*.

Tehnika määratluses nimetatud *teadmised* on koondatud **tehnika-** ehk **rakendusteadustesse**, mille hulka kuuluvad peale energiatehnika veel näiteks

- ehitustehnika (mida võib lugeda vanimaks, juba Aristotelese poolt päris mitmekülgset käsitlemist leidnud tehnikateaduseks),
- soojustehnika,
- elektrotehnika,
- elektroonika,
- infotehnika
- ja väga paljud muud tehnikateadused.

Ükski tehnikateadus ei ole rangelt piiritletud ja sisaldab osi, mis kattuvad mitte üksi teiste tehnikateaduste, vaid ka alusteaduste, loodusteaduste, majandusteaduste jne. tehnikat puudutavate osadega. Ka energiatehnika sisaldab endas soojustehnika, elektrotehnika, elektroonika, infotehnika ja mitmete teiste tehnikateaduste, kuid ka alus-, loodus- ja majandusteaduste elemente.

Tehnika määratluses *teadmiste* järel nimetatud *töövõtted* kujutavad endast mitmesuguseid tootmis-, töötlus-, käsitus- jm **menetlusi**, mida kokkuvõtlikult määratletakse kui *menetlustehnikat* ehk **tehnoloogiat**. Tehnoloogiat võib vaadelda niihästi tehnika kui terviku alajaotisena kui ka liigitada eri tehnikateaduste järgi. Nii näiteks eristatakse

- elektrotehnikasse kuuluvat *elektrotehnoloogiat*,
- ehitustehnikasse kuuluvat *ehitustehnoloogiat*,
- infotehnikasse kuuluvat *infotehnoloogiat*.

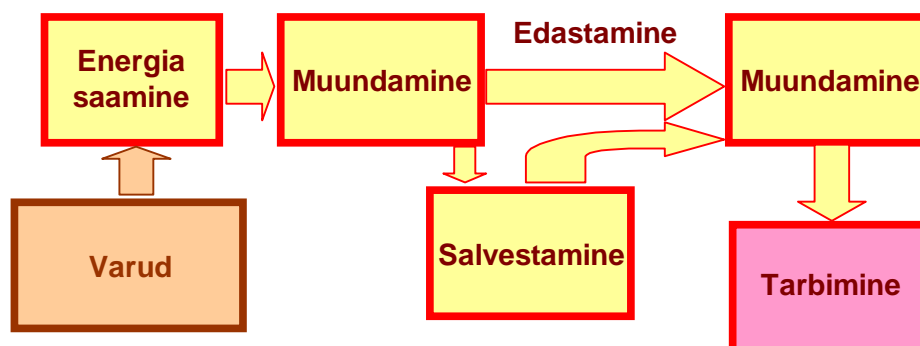
Tehnika määratluses *teadmiste* ja *töövõtete* järel nimetatud **oskusi** tähistatakse samuti mõnikord sõnaga *tehnika*. Räägitakse näiteks

- *metallitööde tehnikast*,
- *elektripaigaldustehnikast*,
- *joonestustehnikast*,
- *arvutikasutustehnikast*,
- *autojuhtimistehnikast*,
- *kirjatehnikast jne.*

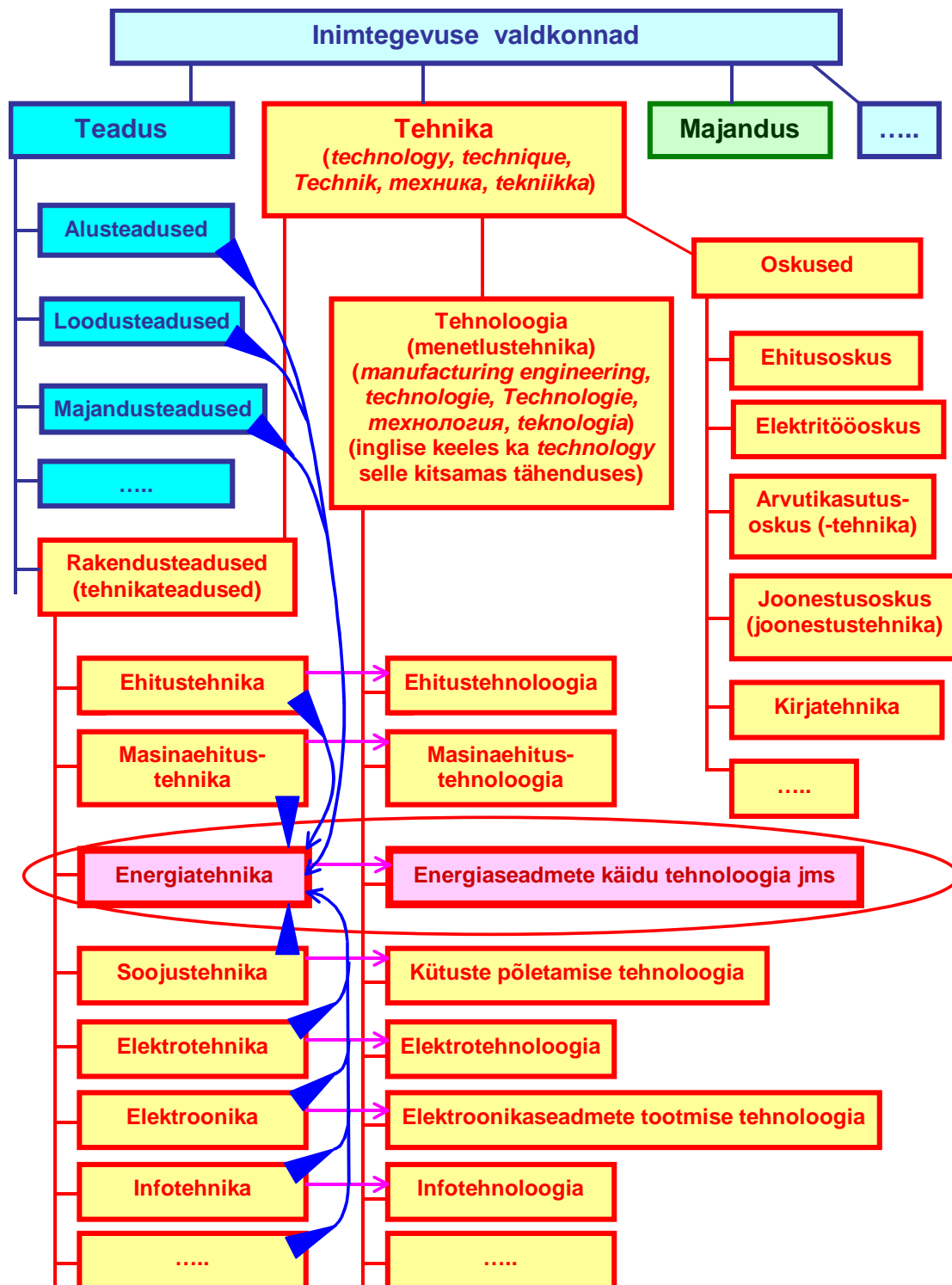
ENERGIATEHNIKA kui üks tehnikateadustest ehk *tehnikaharu* haarab niisiis

- energiavarude kindlakstegemist, uurimist ja hõlvamist,
- energia muundamist,
- energia edastamist,
- energia salvestamist,
- energia kasutamist ja sellega kaasnevat kõrvalnähtusi.

Energiatehnika käsitlusala on lihtsustatult kujutatud joonisel 1.1.1, selle koht teaduses ja tehnikas aga samuti lihtsustatult joonisel 1.1.2.



Joonis 1.1.1. Energiatehnika käsitlusala



Joonis 1.1.2. Energiatehnika seos teiste teadus- ja tehnikaaladega (lihtsustatult)

Tuleb mainida, et oskussõnu **tehnika** ja **tehnoloogia** võidakse eri keeltes ja eri eluvaldkondades määratleda ja kasutada ka mõnevõrra teisiti. Nii näiteks on *tehnikal* vene keeles peale eeltoodud põhitähenduse veel teine tähendus, mis haarab tehnilisi seadmeid, masinaid, aparate ja töövahendeid; tehnikale justkui liidetakse lisaks inimtegevusele veel mingi *esemeline* osa. Nii näiteks võib *ehitustehnika* (*строительная техника*) vene keeles tähendada, nagu meilgi, teatavat rakendusteadust, kuid võib tähendada ka ehitusmasinate ja -

tööriistade kogumit. Vene keele mõjul on sellist ütlemissuvi hakatud mõnel pool ka meil kasutama, kuigi see tekitab segadust ja pealegi ei ole selle järele ka mingit vajadust. Seetõttu tuleks sõna *tehnik*a kasutamisest tehnikaseadmete tähenduses *hoiduda* ja kasutada sel puhul lihtsalt nende seadmete tegelikke nimetusi.

Ingliskeelne sõna **technology** tähendab üldiselt tehnikat, kuid mõnel tehnikaalal võib ta tähendada ka tehnoloogiat (nii näiteks mõistetakse *chemical technology* all enamasti keemilist tehnoloogiat ja *information technology* all sageli infotehnoloogiat – info töötlemist, käsitlemist, edastamist jms). Mitmuslik *technologies* tähendab inglise keeles aga kas mingi tehnikaala või mingi tehnoloogiaavaldkonna üksteisest erinevaid tehnilisi lahendusviise. Seetõttu tuleb sõna *technology* tõlkimisel eesti keelde olla äärmiselt hoolikas ja alati endale selgeks teha, mida selle all algtekstis täpselt on mõeldud. Mingil juhul aga ei tohi seda sõna võtta laensõnana kujul *tehnoloogia*.

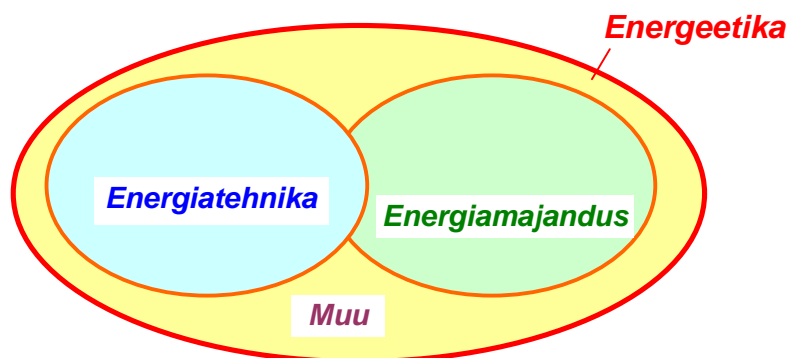
ENERGEETIKA mõiste võttis aastal 1855 kasutusele W. J. M. Rankine, kes samal aastal oli valitud Glasgow' ülikooli professoriks. Selle järgi mõeldakse energeetika all energiatehnikal rajanevat tehnika- ning majandusharu, mis käsitleb energia mitmekülgset rakendamist rahvamajanduses ja muudel inimtegevusaladel. Energeetika alajaotisi on näiteks

- soojusenergeetika,
- hüdroenergeetika,
- tuumaenergeetika,
- elektroenergeetika,

või

- tööstusenergeetika,
- põllumajandusenergeetika,
- kommunaalenergeetika.

Näidetest järeldeb, et energeetika haarab mitte üksi energiatehnikat, vaid ka **energiamajandust**, energiapoliitikat ja energia kasutamise kõrvalnähtusi. Tugevasti lihtsustatult saab sellist kompleksi kirjeldada joonisel 1.1.3 kujutatud põhimõttepildiga.



Joonis 1.1.3. Energiatehnika ja energiamajandus kui energeetika komponendid

Laiemas mõttes võib energeetika all mõista **teadust**, mis haarab igasuguseid energeetilisi protsesse elusas ja eluta looduses; võidakse rääkida näiteks

- bioenergeetikast,
- geoenergeetikast,
- kosmoseenergeetikast

ja muudest energia muundamisel ja selle toimel põhinevatest nähtuskompleksidest.

Energiatehnika tähtsaimad teoreetilised alused on

- termodünaamika kolm põhiseadust (energia jäävuse seadus, energia pöördumatu hajumise ehk *entropia kasvu* seadus, absoluutse nulltemperatuuri saavutamatus),
- energia ja massi ekvivalentsuse seadus.

Kõiki neid käsitletakse üksikasjaliselt **füüsika** selles harus, mida nimetatakse **termodünaamikaks**.

Termodünaamika käsitleb soojusnähtusi ja nende seost aine füüsikalise-keemiliste omadustega. Selle **esimene põhiseadus** (energia jäävuse seadus) tähendab seda, et igal süsteemil on *olekufunktsioonina* olemas siseenergia U , mis võib muutuda ainult kahel viisil:

- energia siirdel väljapoole süsteemi soojusena või tööna,
- energia saamisel väljastpoolt süsteemi.

Suletud süsteemi siseenergia jääb muutumatuks. Seega saab energia eri liike küll üksteiseks muundada, kuid energiat ei saa iseeneslikult toota ega saa seda ka hävitada. Energia muundamisel läheb alati osa energiat hõõrdumise või soojussiidre teel väliskeskkonda kaduma, millest järeldub, et kui süsteemi siseenergia ei muutu, ei saa süsteem sooritada mingit tööd. Teiste sõnadega, igiliikurite (*esimest liiki perpetuum mobile*) valmistamine ei ole võimalik.

Soojus ei ole energia kui olekufunktsioon, vaid ühelt kehalt teisele siirdunud energia. Soojus on seega **protsessifunktsioon** ning sõltub järelikult energiaülekande nähtuse iseloomust. Keha ei saa sisaldada soojust kui energiat, küll aga võib ta energiat soojusena juurde saada või ära anda. Soojuse siirdamise käsitlemisel kasutatakse praktikas piltlikku terminit *soojuskandja*, mis sisuliselt kirjeldab soojuse juurdesaamis- või äraandmisprotsessi.

Ka **töö** on protsessifunktsioon. Kehalt võetud soojust saab muundada tööks või üle kanda kõrgema temperatuuriga kehalt madalama temperatuuriga kehale ainult **ringprotsessi** vahendusel. Soojusjõuseadmetes on ringprotsess *päripidine*, külmutites, soojuspumpades jms on aga tegemist *pöördringprotsessiga*.

Majandusteaduses käsitletakse energiat tihtipeale **kaubana**, mistõttu räägitakse ka energia kui kauba tootmisest, müümisest ja tarbimisest. Selline majandusteaduslik käsitlus erineb seega põhimõtteliselt termodünaamilisest, mille kohaselt energiat ei saa *toota* ega *ära tarbida*, vaid üksnes *muundada*. Sellegipärast tuleb ka majandusteaduslikku käsitlusviisi, eriti kui see kaasneb muude majandusmõistete ja -näitajate käsitlemisega, ka käesolevas õpikus mõnikord arvestada. Nii näiteks tuleb vastavalt sellele majandusteaduslikule oskussõnavarale, mida rakendatakse ÜRO statistikaväljaannetes, ka käesoleva peatüki jaotistes **1.4** ja **1.5** tahtmata kasutada selliseid mõisteid nagu *kaubalise energia tootmine ja tarbimine*, *elektrienergia tootmine ja tarbimine* jms.

Termodünaamika **teine põhiseadus** ütleb, et on olemas energia pöördumatut hajumist iseloomustav olekufunktsioon **entroopia**, mis suletud süsteemis kunagi ei vähene. Kui tähistada entroopiat tähega S , avaldub entroopia muutus dS valemiga

$$dS \geq \delta Q / T$$

δQ süsteemile temperatuuril T antav soojushulk
 T absoluutne temperatuur

Tagastatava protsessi puhul kehtib võrdus, tagastumatu protsessi korral võrratus. Kui protsess on tagastumatu, kasvab suletud süsteemi entroopia ja saavutab tasakaaluolekus oma suurima väärtuse. Entroopia kasvades väheneb süsteemi võime teha tööd ja energia hajub. Termodünaamika teisest põhiseadusest järeldub muuhulgas, et

- kõik spontaansed (ühes suunas kulgevad) protsessid on tagastumatud;
- kõik hõõrdumisega seotud protsessid on tagastumatud;
- tasandamis- ja segamisprotsessid on tagastumatud;
- soojus ei saa iseenesest kanduda madalama temperatuuriga kehalt kõrgema temperatuuriga kehale; et soojust selliselt edastada, on vaja tarbida tööd nagu nt külmutis või soojuspumbas;
- suletud süsteemi tasakaaluolekus on entroopia väärtus maksimaalne;
- soojust ei saa kunagi täielikult muundada tööks;
- igiliikur, mis põhineb soojuse täielikul muundamisel tööks (*teist liiki perpetuum mobile*), on võimatu.

Kuna soojust ei saa kunagi täielikult muundada tööks, on kasutusele võetud mõisted *eksergia* (soojuse tööks muundatav osa) ja *anergia* (tööks muundamatu osa). Ideaalse, *Carnot' ringprotsessil* põhineva soojusjõumasina kasutegurit, kui masina soojussisendi temperatuur on T_1 ja soojusväljundi temperatuur T_2 ($T_2 < T_1$), saab seega väljendada kujul

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} = \frac{\text{eksergia}}{\text{anergia} + \text{eksergia}} \cdot$$

Soojusmasina reaalne kasutegur on sellest alati väiksem. Siit järeldub ka, et kui mehaanilist energiat saadakse mingis masinas (nt auruturbiinis või sisepõlemismootoris) soojuse kaudu, on kasutegur väiksem kui masinatel, millel sellist soojuslikku vahemuundust ei ole (nt hüdroturbiinide korral).

Termodünaamiliste olekufunktsioonide hulka kuuluvad peale eelmainitud siseenergia ja entroopia veel rõhk, temperatuur, ruumala, ainehulk (või aineosakeste arv), tihedus ja entalpia.

Termodünaamika **kolmanda põhiseaduse** sõnastas aastal 1906 Berliini ülikooli füüsikalise keemia professor Walther Hermann Nernst (1864–1941), mistõttu seda nimetatakse ka Nernsti soojusteoreemiks. Selle seaduse järgi ei saa ühtegi ainet jahutada absoluutse nulltemperatuurini.

Massi ja energia ekvivalentsuse seaduse avaldas 21. novembril 1905 Berni patendiameti ekspert Albert Einstein (1879–1955) valemiga [1.2]

$$E = m c^2$$

E energia J

m mass kg

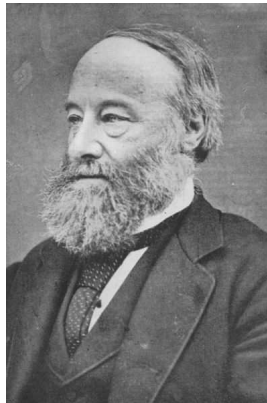
c valguse kiirus ($c = 299\,792\,458$ m/s)

Et energiat väljendada arvuliselt, on seda, nagu iga muud füüsikalist suurust, vaja mingites ühikutes mõõta. **Energia ühik** rahvusvahelises mõõtühikute süsteemis (*Système International d'unités*, SI) [1.3] on põhiühikute (kilogrammi, meetri ja sekundi) alusel aastal 1849 määratletud $\text{kg m}^2 / \text{s}^2$, mis esimesel rahvusvahelisel elektrikute kongressil Pariisis aastal 1881 pandi ette nimetada inglise füüsiku James Prescott Joule'i auks **džauliks (J)**:

$$1 \text{ J} = 1 \text{ kg m}^2 / \text{s}^2 = 1 \text{ N m} = 1 \text{ W s}.$$

Korrutisena avaldatavate liitühikute tähistel kirjutamisel soovitab eelnimetatud standard [1.3] kasutada korrutuspunkti, kuid lubab kasutada ka tühikut (nagu matemaatilistes valemites) ja, kui see ei tekita segadust, kokkukirjutamist. Käesolevas raamatus kasutatakse peaaesjalikult neid kaht lubatavat kirjutusviisi, kuna need on ka mujal, nii eesti- kui ka võõrkeelses tehnilises kirjanduses ja dokumentatsioonis laialt kasutusel.

James Prescott Joule (1818–1889) oli Manchesteri lähedal asuva õllevabriku omanik, kes pidas vajalikuks oma vabriku tehnoloogilisi energiamuundusprotsesse põhjalikult, teaduslikult uurida. Ühena esimestest asendas ta aurumasinad elektrimootoritega ja formuleeris aastal 1840 elektrivoolu soojusliku toime seaduse. Väga põhjalikult uuris ta mehaanilise energia muundamist soojuseks ja tegi aastal 1843 endaehitatud mehhanismi abil kindaks *soojuse mehaanilise ekvivalendi*. Joule'i ja saksa füüsiku Julius Robert von Mayeri (1814–1878) ühelsamal ajal toimunud uurimuste põhjal üldistas saksa füüsik Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1821–1894) Mayeri poolt aastal 1842 formuleeritud **energia jäävuse seadust** aastal 1847 kõigile energiamuundusprotsessidele.



James Prescott Joule

Džaul on suhteliselt väike ühik ja seetõttu kasutatakse energiatesnikas enamasti selle detsimaalkordseid, näiteks

$$1 \text{ kJ (kilodžaul)} = 10^3 \text{ J}$$

$$1 \text{ MJ (megadžaul)} = 10^6 \text{ J}$$

$$1 \text{ GJ (gigadžaul)} = 10^9 \text{ J}$$

$$1 \text{ TJ (teradžaul)} = 10^{12} \text{ J}$$

$$1 \text{ PJ (petadžaul)} = 10^{15} \text{ J}$$

$$1 \text{ EJ (eksadžaul)} = 10^{18} \text{ J}$$

$$1 \text{ ZJ (zettadžaul)} = 10^{21} \text{ J}$$

$$1 \text{ YJ (yottadžaul)} = 10^{24} \text{ J}$$

Kasutatava energia ehk **töö** kui *jõu ja käidud tee korrutise* olid defineerinud aastal 1826 prantsuse matemaatik Jean Victor Poncelet (1788–1867) ja füüsik Gaspard Gustave de Coriolis (1792–1843).

Teatavasti lubab Rahvusvaheline Standardimisorganisatsioon (*International Organization for Standardization, ISO*) samaväärselt SI ajaühikuga *sekund* kasutada ka ühikuid *minut* (min), *tund* (h) ja *päev* (d). Elektro- ja soojustehnikas ongi laialt kasutusel energiaühik *vatt-tund* (Wh) ja selle kümnendkordsed, näiteks

$$1 \text{ Wh} = 3600 \text{ J}, \quad 1 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J} \quad \text{jne.}$$

Kui tahetakse toonitada, et mingi kümnendmurd on **täpne**, kirjutatakse selle viimane kohanumber **paksult**. Seda esitusviisi kasutatakse käesolevas raamatus ka edaspidi.

Soojusühikuna oli energiatehnikas kaua, aastast 1772, kasutusel (ja on kohati praegugi, nt toidus või toiduaines sisalduva energiahulga iseloomustamisel) **kalor** (cal), mida defineeriti kui soojushulka, mis on vajalik 1 g vee temperatuuri tõstmiseks 1 K võrra. See tähendab, et

$$1 \text{ cal} = 4,1868 \text{ J.}$$

Ühikut *kalor* võib Euroopa Liidus kasutada mittesiduvalt ja üksnes lisaks SI ühikule (džaulile) kuni 1. jaanuarini 2010.

Kütustes sisalduvat energiat saab väga näitlikult väljendada teatava kindla ning kergesti mõistetava **tingkütuse** ekvivalentse kogusena. Tingkütuseks on kokku lepitud võtta kas **kivisüsi**, lugedes selle kütteväärtuseks 7000 kcal/kg, või **toornafta**, lugedes selle kütteväärtuseks 10 000 kcal/kg. Sel viisil saadakse SI-välised energiaühikud

$$1 \text{ tce} \text{ ([metric] ton of coal equivalent, süsi-tingkütusetonn) } = 7000 \text{ Mcal} = \\ = 29,31 \text{ GJ} = 8,14 \text{ MWh ja}$$

$$1 \text{ toe} \text{ ([metric] ton of oil equivalent, õli-tingkütusetonn) } = 10\,000 \text{ Mcal} = \\ = 41,87 \text{ GJ} = 11,63 \text{ MWh.}$$

Tuumafüüsikas (nt tuumareaktorites toimuvate protsesside iseloomustamisel) on mittedüstemse energiaühikuna kasutusel **elektronvolt** (tähis **eV**) – energia, mille elektron saab kiirendavas elektriväljas välja jõudude mõjul ühest punktist teise liikudes, kui nende punktide vaheline pinge on 1 V. $1 \text{ eV} = 1,6021 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

USAs ja nüüdseks juba vähemal määral ka Suurbritannias on kasutusel Briti soojusühik (*British thermal unit, Btu*) – soojushulk, mis on vajalik 1 naela vee temperatuuri tõstmiseks 1 °F võrra. $1 \text{ Btu} = 1,0551 \text{ kJ} = 0,2520 \text{ kcal} = 36,0 \cdot 10^{-6} \text{ kgce}$.

Võimsuse ühikuks esitati esimesel rahvusvahelisel elektrikute kongressil Pariisis aastal 1881 universaalse aurumasina leiutaja James Watti (1736...1819, vt jaotis **2.2**) auks **vatt** (W); vajaduse korral kasutatakse selle detsimaalkordseid (kW, MW, GW jne) või detsimaalosi (mW, μW jne).

Esimese rahvusvahelise elektrikute kongressi teisel tööpäeval 21. septembril 1881 kinnitati *praktiliste* elektriühikute nimetused **amper**, **volt**, **oom**, **kulon** ja **farad**. Pandi ette ka energia- ja võimsusühikute nimetused **džaul** ja **vatt** (kusjuures 1 W oleks 1000 J/s), kuid nende

kinnitamine lükati edasi, sest vati definitsiooni ettepanek ei tundunud olevat otstarbekas. Mõlemad ühikud koos vati tänapäevase määratlusega ($1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$) kinnitati neljandal rahvusvahelisel elektrikute kongressil Chicagos aastal 1893.

Varem on võimsusühikuna kasutusel olnud (ja on kohati veel praegugi) **hobujõud**, mille aastal 1770 defineeris James Watt. Aastal 1783 täpsustas ta oma määratlust selliselt, et

$1 \text{ HP (horsepower)} = 33\,000 \text{ lbf ft/min (jõunaeljalga minutis)} = 0,74570 \text{ kW}$,

mis tegelikult (et Watti tehases toodetavad aurumasinad hobuajamitega võrreldes selgelt paremad näiks) oli ligikaudu poolteist korda suurem kui tavalise inglise hobuse keskmine vedamisel arendatav võimsus 8-tunnilise tööpäeva jooksul [1.4].

Enne Watti definitsiooni (ja sageli ka hiljem) väljendati seda võimsusühikut ligikaudselt ja lihtsalt sõnaga *hobune*, vastavalt hobuste arvule hobuajamis või hobuste kujuteldavale arvule tuule- ja vesiajameis.

Prantsusmaal ja Saksamaal hakati hobujõudu meetersüsteemi kasutuseletulekul defineerima kui

$1 \text{ CV (cheval-vapeur)} = 1 \text{ PS (Pferdestärke)} = 75 \text{ kgf m/s (jõukilogramm-meetrit sekundis)} = 0,73550 \text{ kW}$.

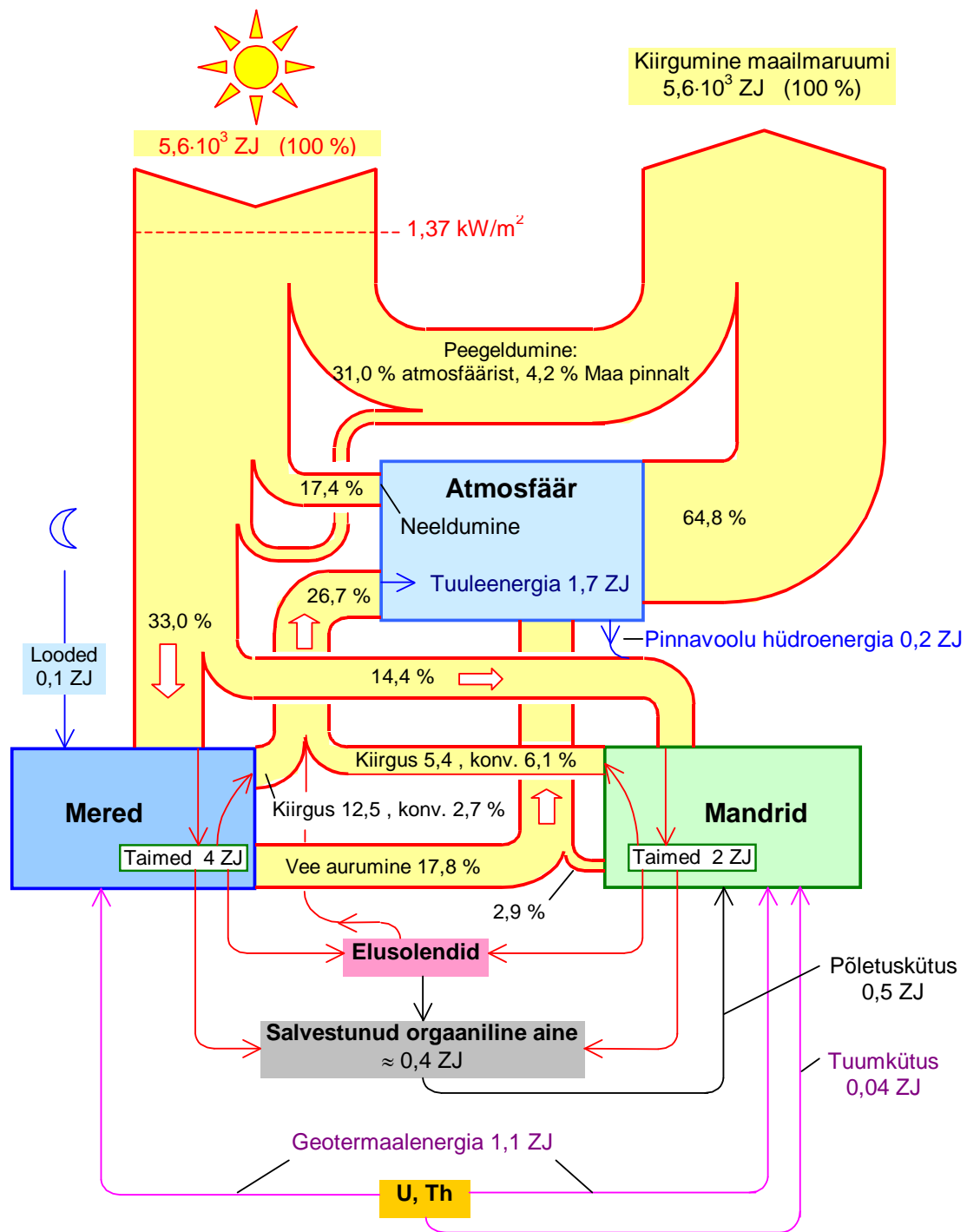
Sama ühik oli kasutusel ka Eesti masinaehituses, kusjuures algul võeti üle saksakeelne lühend PS, 1920ndail aastail mindi aga üle omakeelsele lühendile *hj*.

1.2 MAA ENERGIABILANSS

Inimkond kasutab oma energiavajaduse rahuldamiseks Maa energiavarusid ja elab Maa energiavoogudega määratud kliimaoludes. Ühtlasi on ta alates 20. sajandist hakanud oma tegevusega selgelt mõjutama nii Maa energeetilist tasakaalu kui ka kliimat.

Maakera saab pidevalt energiat kolmest looduslikust ja kahest tehisallikast, mida iseloomustavad järgmised aastased energiakogused (vt joonis 1.2.1) [1.5]:

- 1) Päikeselt tulev kiirgus **$5,6 \cdot 10^3 \text{ ZJ}$** ,
- 2) geotermiaenergia (Maa sisemuses uraani, tooriumi ja vähesel määral ka kaaliumi radioaktiivsel lagunemisel tekkiv soojus) **$1,1 \text{ ZJ}$** ,
- 3) Kuu gravitatsioonilisel toimel tekkivate loodete energia **$0,1 \text{ ZJ}$** ,
- 4) maapõues salvestunud kütuste (kivisöe, nafta, maagaasi, põlevkivi jms) ja nendest saadavate teiseste kütuste (nt nafta rafineerimissaaduste) põletamisel tekkiv soojus **$0,5 \text{ ZJ}$** ,
- 5) maapõuest kaevandatava uraani tehislagundamisega tuumareaktorites (nii tuumaelektriijaamades kui ka plutooniumitehastes, tuumaallvee- ja -pealveelaevades) tekitatav soojus **$0,04 \text{ ZJ}$** .



Joonis 1.2.1. Maa energiabilanss

Aastal 2005 õnnestus Jaapanis antineutriinode voo mõõtmise teel kindlaks teha, et uraan-238, toorium-232 ja kaalium-40 radioaktiivsel lagunemisel Maa sisemuses eralduv soojusvõimsus on vahemikus 16 kuni 60 TW, mis tähendab energiakogust 0,5 kuni 1,9 ZJ aastas [1.6]. Ülalesitatud arväärtust 1,1 ZJ, mis on saadud soojustehniliste mõõtetulemuste hindamise teel aastal 1993, võib lugeda seega kinnitatuks.

Tehisallikate üaltoodud andmed vastavad 2000. aasta seisule ega ole viimase mõne aasta jooksul kuigivõrd oluliselt suurenenud.

Peale eelnimetatud allikate saab Maa energiat tähtede kiirgusena ja Maale sattuvate meteoroidide kineetilise energia muundumisel soojuseks, kuid see energiakogus on eelmistega võrreldes kaduvväike.

Päikeselt tulevat kiirgust iseloomustab päikesekiirte risttasandi kiiritustihedus Maa atmosfääri ülapiiril (*solaarkonstant*) **1372 W/m²**; sellest kiirgusest peegeldub atmosfäärist 31,0 % ja maapinnalt 4,2 % lühilainelise optilise kiirgusena kohe tagasi maailmaruumi. Ülejäänud kogus neeldub soojusena

- atmosfääris (17,4 %),
- meredes (33,0 %),
- mandritel (14,4 %).

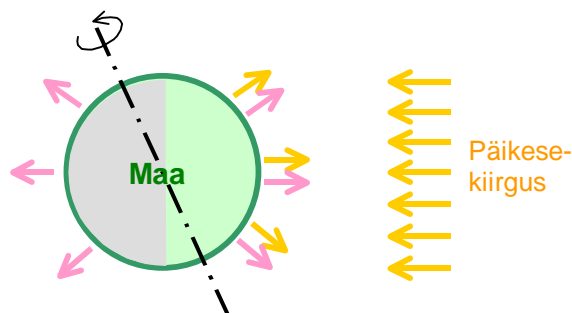
Meredes neeldunud 33,0 protsendist Maale tulevast päikesekiirgusest tagastub atmosfääri

- vee aurumise kaudu 17,8 %,
- pikalainelise soojuskiirgusena 12,5 %,
- konvektsiooni teel 2,7 %.

Mandritelt tagastub samal viisil vastavalt 2,9 %, 5,4 % ja 6,1 % Maale tulevast päikesekiirgusest.

Suhteliselt väikese koguse energiat (**6 ZJ** ehk ligikaudu 10^{-4} % Maale tulevast päikesekiirgusest) haaravad fotosünteesiks maa- ja veetaimed (esimesed ligikaudu 4 ZJ, teised ligikaudu 2 ZJ). Osa sellest tagastavad taimed soojuskiirgusena atmosfääri, osa salvestavad aga *biomassina*. Maapõues või merepõhjas võib surnud biomass aeglaselt muunduda fossiilkütusteks. Osa taimede biomassist tarbivad taimetoiduna elusolendid, kes tarbitud energia samuti osalt soojusena atmosfääri või hüdrofääri eraldavad, osalt aga omaks biomassiks muundavad, mis samuti võib hiljem salvestuda fossiilkütusena. Puiduna, turbana ja väga väikesel määral ka fossiilkütustena salvestub aastas käesoleval ajal ligikaudu 0,4 ZJ energiat.

Atmosfääris ülalkirjeldatud viisil Maa päikesepoolsel osal neeldunud energia (64,8 % maakerale saabuvast päikesekiirgusest) kiirgub Maa mõlemal poolel pikalainelise infrapunase (soojus-) kiirgusena tagasi maailmaruumi, põhjustades maapinna ja õhu temperatuuri ööpäevast vaheldumist (joonis 1.2.2). Väike osa (ligikaudu 1,7 ZJ) muundub enne seda *tuuleenergiaks*, veel väiksem osa (ligikaudu 0,2 ZJ) aga *pinnavoolu hüdroenergiaks*.



Joonis 1.2.2. Päikesekiirguse peegeldumine ja Maa pikalainelise soojuskiirguse kiirgumine maailmaruumi

Kokkuvõttes kiirgub kogu Päikeselt saadav ja Maal endal tekkiv või tekitatav energia maailmaruumi, kusjuures keskmine kiirgusvoog Maa pindalaühiku kohta (*Maa kiirgavus*) on 348 W/m^2 . Kui Maa oleks ideaalne mustkiirgur ja kui tal ei oleks atmosfääri, oleks tema keskmine absoluutne temperatuur sellisel kiirgavusel Stefani-Boltzmanni seaduse

$$M_e = \sigma_0 T^4$$

M_e kiirgavus W/m^2

σ_0 Stefani-Boltzmanni konstant $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \text{ K}^4)$

T absoluutne temperatuur K

alusel

$$T = (M_e / \sigma_0)^{1/4} = (348 / 5,67 \cdot 10^{-8})^{1/4} = 280 \text{ K},$$

mis Celsiuse skaalas on $+7 \text{ }^\circ\text{C}$.

Kuna Maa aga mustkiirgur ei ole, tuleb eeltoodud valemeis konstandi σ_0 asemel kasutada korrutist $\varepsilon \sigma_0$, kus $\varepsilon < 1$ on temperatuurist sõltuv *emissioonitegur* (*kiirgustegur, mustsusaste*), mis arvestab ka atmosfääri olemasolu ja seda, et Maa atmosfääris sisalduvad kolme- ja enamaatomilised gaasid (veeaur H_2O , süsinikdioksiid CO_2 , metaan CH_4 , dilämmastikoksiid N_2O jt) Maa pikalainelist soojuskiirgust selektiivselt neelavad ja seega nii atmosfääri alumise osa (troposfääri) kui ka Maa pinna keskmist temperatuuri tõstavad. Seetõttu on Maa keskmine pinnatemperatuur praegu ligikaudu **15 °C**. Kuna nii tehisprotsessides tekkiv soojus kui ka atmosfääri CO_2 -, CH_4 - ja N_2O -sisaldus (ja ka muude *kasvuhoonegaaside* sisaldus) pidevalt suurenevad, kasvab ka Maa pinna tasakaalutemperatuur aeglaselt, kuid järjest kiiremini. Peatükis 7 vaadeldakse seda väga olulist asjaolu põhjalikumalt, sest nii Maa energiabilanss kui ka tasakaalutemperatuur on hakanud energiamahuka inimtegevuse tagajärjel vägagi märgatavalt ning ohtlikult muutuma.

1.3 MAA ENERGIAVARUD

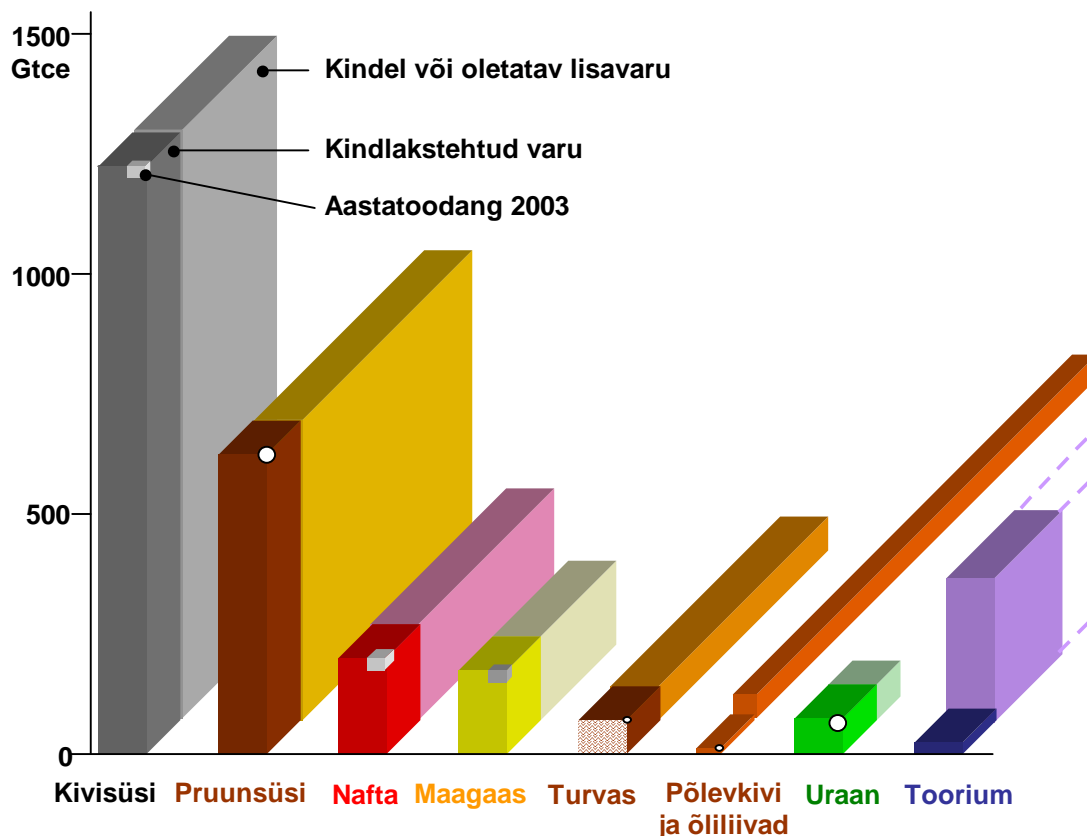
Maa energiavarude all mõeldakse energiatehnikas enamasti üksnes neid varusid, mida inimkond saab põhimõtteliselt oma tarbeks tehniliste võtetega kasutada. Suurem osa käesoleval ajal rakendatavatest energiavarudest (maapõues aegade jooksul salvestunud fossiilkütused ja Maa koosseisu kuuluvad tuumkütused) on **mittetaastuvad** ja võivad seega lähemas või kaugemas tulevikus ammenduda. Mittetaastuvate varude hulka tuleb lugeda ka turvas, sest selle tekkimisprotsess on käesoleval ajal paljudes leiukohtades tugevasti aeglasem kui varude vähenemine kaevandamisel. Väiksemal määral kasutab inimkond **taastuvaid** energiavarusid, mille hulka kuuluvad hüdro- ja tuuleenergia ning kütusena kasutatav biomass (puit, orgaanilised jäätmed jms). Taastuvaks loetakse ka geotermaalenergiat, kuigi radioaktiivsete ainete kogus maapõues on lõplik, ja päikeseenergiat, kuna lähema 1...2 miljardi aasta jooksul ei ole Päikese kiirgusvoo olulist muutumist ette näha.

Mittetaastuvaid energiavarusid iseloomustavad tähtsamad andmed on esitatud tabelis 1.3.1. Andmed põhinevad peamiselt ÜRO 2003. aasta energiastatistika aastaraamatul [1.7] ja on oletatavate varude osas tagasihoidlikumad kui varem kirjanduses esitatud arvamused. Arvestatud on ainult neid varusid, mille hõlvamine võib toimuda *vastuvõetavate kulutustega*. Uraani energiasisalduse hindamisel on lähtutud loodusliku uraani tegelikust kasutusastmest nüüdisaegsetes tuumareaktorites (22 tce energiat 1 kg uraani kohta).

Tabel 1.3.1. Maa mittetaastuvad energiavarud aastal 2003 (Gtce)

Nimetus	Kindlakstehtud varu	Kindel või oletatav lisavaru	Aastatoodang 2003
Kivisüsi	2338	3085	3,9
Pruunsüsi	379	2547	0,59
Nafta	211	1300	5,2
Maagaas	167	400	3,0
Turvas	70	282	0,02
Põlevkivi ja õliliivad	5	200	0,02
Uraan	62	29	0,9
Toorium	15	5000	~0
Deuteerium + liitium 6	>100 000		0

Piltlikult on samad andmed esitatud joonisel 1.3.1. Tabel ja joonis näitavad, et eeloleval 21. sajandil võivad oluliselt väheneda nafta ja maagaasi varud, mis võib kaasa tuua vedel- ja gaaskütuste tunduva kallinemise. Eri maailmajagudes ja eri riikides on olukord erisugune. Nii näiteks ennustatakse naftaleiukohtade ammendumist Põhja-Ameerikas vähem kui 10 aastaga, SRÜ riikides aga ligikaudu 20 aastaga. Üldse on naftat selle tööstusliku kasutamise algusest (alates aastast 1859) kuni 20. sajandi lõpuni avastatud 250 Gt (350 Gtce), ammendatud aga 2001. aasta alguseks 125 Gt ehk 50 %. Seni avastatud maagaasist ($190 \cdot 10^{12} \text{ m}^3$ ehk 220 Gtce) on viimase 30 aasta jooksul ära kasutatud ligikaudu 30 %. Suhteliselt väikesed on ka vastuvõetavaks loetava hinnaga kaevandatava uraani varud. Endastmõistetavalt võib varude arvutuslik kogus kohe suureneada, kui hakatakse leppima kütuste senisest kõrgema hinnaga. Lähemalt vaadeldakse mittetaastuvate energiavarude jaotust ja ammendumisprognose peatükis 8.



Joonis 1.3.1. Maa mittetaastuvad energiavarud aastal 2003

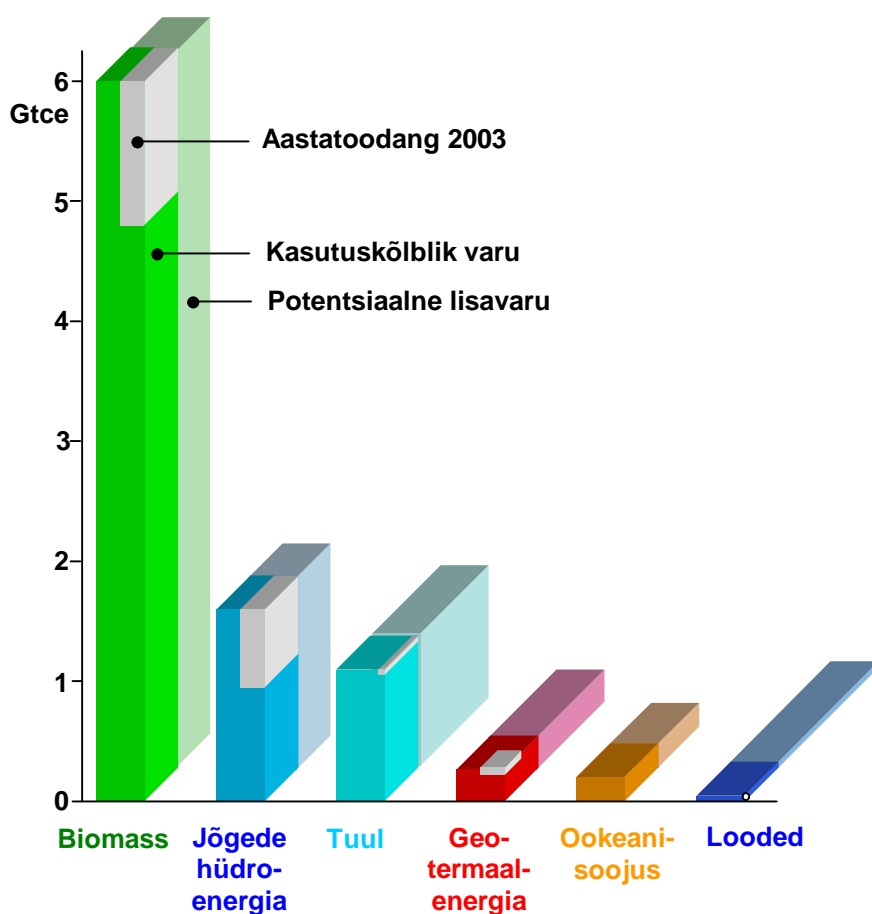
Deuteeriumi (rasket vesinikku) ja liitiumi isotoopi ${}^6\text{Li}$ saab soojuse saamiseks kasutada termotuuma- (*tuumafusiooni*-) reaktoreis, mis praegu on olemas vaid katseseadmeina (vt jaotis **8.4**). Nende tööstuslikku kasutuselevõttu prognoositakse 21. sajandi teisel poolel. Deuteeriumi üldkogus Maakeral leiduvas vees on $23 \cdot 10^{12}$ t, liitiumi isotoobi ${}^6\text{Li}$ kogus Maa koore mandriosades kuni 1 km sügavuseni aga tõenäoliselt $2 \cdot 10^{12}$ t. Kuna 1 kg deuteeriumi koos 3 kg liitiumiga ${}^6\text{Li}$ annab termotuumareaktoris teoreetiliselt 94 GWh ehk $11,6 \cdot 10^3$ tce energiat, võib kas või ühe miljondiku deuteeriumi- ja ühe sajatuhandiku liitiumikoguse kättesaadavaks osutumisel lugeda Maa termotuumaelektrijaamade (vt jaotis **8.4**) tööstuslikuks energiavaruks ligikaudu $80 \cdot 10^3$ Gtce.

Taastuvate energiavarude kasutusvõimaluste kohta on esitatud väga mitmesuguseid hinnanguid. Nii näiteks salvestavad maailma mandrite taimed biomassina ligikaudu 2 ZJ ehk 70 Gtce keemilist energiat aastas (vt joonis **1.2.1**), kuid suurem osa sellest langeb soodele, põlismetsadele ja muudele tehnilist kasutamist mittevõimaldavatele aladele. Kultiveeritavatel aladel kasutatakse suurem osa biomassist toiduainete ja loomasööda tootmiseks ja energia tootmise eesmärgil jääb kasutusvõimalikuks eri hinnanguil 10 kuni 15 Gtce aastas. Sellest omakorda saab tegelikult kasutada umbes pool ehk keskeltläbi 6 Gtce aastas [1.8, 1.9]. Ligikaudse ettekujutuse Maa taastuvatest energiavarudest annavad tabel **1.3.2** ja joonis **1.3.2**. *Kasutuskõlblikeks* loetakse varusid, mille muundamine tehisenergiaks (tavaliselt soojuseks või elektrienergiaks) ei nõua vastuvõtmatult suuri kulutusi.

Tabel 1.3.2. Maa taastuvad energiavarud aastal 2003 (Gtce/a)

Nimetus	Potentsiaalne varu	Kasutuskõlblik varu	Aastatoodang 2003
Päikesekiirgus	Väga suur	3	0,01
Biomass	12	6	0,6
Tuul	3,2	1,1	0,007
Jõgede hüdroenergia	3,2	1,6	0,33
Geotermaalenergia*	2,1	0,7	0,06
Ookeanisoojus*	1,1	0,5	0
Looded*	0,04	0,01	0,0001
Merelained ja -hoovused*	0,005	?	~0

* Maa eeldatavasti sobivates piirkondades.



Joonis 1.3.2. Maa taastuvad energiavarud aastal 2003

Taastuvatest energiavarudest on seni kasutatud peaaugult ainult jõgede hüdroenergiat, kusjuures peaaegu kogu kasutatud hüdroenergia on läinud elektrienergia saamiseks hüdroelektrijaamades. Viimase 10 aasta jooksul on aga ka tuule- ja päikeseenergia kasutamiskiirused laienenud ja kasutamiskulud vähenenud, mistõttu võib prognoosida nende osatähtsuse kiiret suurenemist tulevikus. Taastuvate energiavarude laiemat kasutuselevõttu loetakse tähtsaks mitte üksi mittetaastuvate varude ammendumisohu tõttu, vaid ka seetõttu, et nende kasutamine ei suurenda õhu süsinikdioksiidisisaldust (lähemalt vt peatükid 2 ja 8).