Endel Risthein

Sissejuhatus energiatehnikasse

Elektriajam
2007

Kaane kujundus: OÜ Pult, Sigrid Randoja.
Foto: Jarek Jõepera
Tehniline toimetaja Gädvi Tammann

Autoriõigus:
Endel Risthein 2007
Tallinna Tehnikaülikooli elektriajamite ja jõuelektroonika instituut, 2007

Esitrükk 2007
260 lk.

ISBN 978-9985-69-044-4
Käesolev raamat on kirjastatud AS Eesti Energia toetusel

Kirjastus Elektriajam
Tallinna Tehnikaülikooli elektriajamite ja jõuelektroonika instituut
Ehitajate tee 5
19086 Tallinn
aa@ttu.ee

TALLINNA
RAAMATUTRÜKIKODA
Trükitud Tallinna Raamatutrükikojas
www.trt.ee

SISUKORD

1 SISSEJUHATUS
1.1 Põhimõisted ... 8
1.2 Maa energiabilanss ... 15
1.3 Maa energiavarud ... 17
1.4 Energeetika ja energiatarbimise ajalooline areng ... 20
1.5 Maailma maade energia- ja elektritarbimine ... 28

2 ENERGIA MUUNDAMINE
2.1 Üldmõisted ... 38
2.2 Aurugeneraatorid (aurukatlad) ... 41
2.3 Auruturbiinid ... 49
2.4 Gaasiturbiinid ... 53
2.5 Kolbmootorid ... 55
2.6 Kütuseelemendid ... 59
2.7 Magnetohüdrodünaamilised generaatorid ... 63
2.8 Tuumareaktorid ... 64
2.9 Hüdroturbiinid ... 72
2.10 Tuuleturbiinid ... 75
2.11 Fotoelektrilised muundurid ... 78
2.12 Elektrimasingeneraatorid ... 81
2.13 Elektrimootorid ... 85
2.14 Muud elektrimuundurid ... 87
2.15 Soojusvahetid ja -transformaatorid ... 90

3 ENERGIA EDASTAMINE
3.1 Üldmõisted ... 96
3.2 Kütuste edastamine ... 99
3.3 Mehaanilise energia edastamine ... 103
3.4 Soojuse edastamine ... 105
3.5 Elektrienergia edastamine ... 108

4 ENERGIA SALVESTAMINE
4.1 Üldmõisted ... 118
4.2 Mehaanilise energia salvestamine ... 120
4.3 Hüdroenergia salvestamine ... 124
4.4 Soojuse salvestamine ... 126
4.5 Elektrienergia salvestamine ... 127
4.6 Keemilise energia salvestamine ... 134
4.7 Kokkuvõte ... 135

5 ELEKTRIJAAMAD JA ENERGIASÜSTEEMID
5.1 Üldmõisted ... 138
5.2 Põletuskütuselektrijaamad ... 142
5.3 Tuumaelektrijaamad ... 147
5.4 Hüdroelektrijaamad ... 151
5.5 Tuuleelektrijaamad ... 157
5.6 Geotermaalelektrijaamad ... 163
5.7 Päikeseelektrijaamad ... 167
5.8 Alajaamad ... 173
5.9 Energiasüsteemid ... 175

6 ENERGIA KASUTAMINE
6.1 Üldmõisted ... 182
6.2 Energia mitteelektrilised kasutamisviisid ... 182
6.3 Elektriajam ... 186
6.4 Elekterküte ... 189
6.5 Elektrotehnoloogia ... 191
6.6 Elektervalgustus ... 194
6.7 Ohutuse tagamine elektrienergia kasutamisel ... 198
6.8 Energia tarbimise struktuur eri rahvamajandusharudes ... 203
6.9 Rahvamajanduse energia- ja elektribilanss ... 207

7 ENERGIASEADMETE TOIME KESKKONNALE
7.1 Üldmõisted ... 212
7.2 Kasvuhoonenähtus ... 214
7.3 Maa osoonikihi hõrenemine ... 222
7.4 Keskkonna saastamine heitainetega ... 225
7.5 Soojuslik toime keskkonnale ... 230
7.6 Toime maakasutusele ja maastikule ... 230
7.7 Elektromagnetväljad ... 231
7.8 Müra ja valgussaaste ... 235

8 ENERGEETIKA ARENGUSUUNAD
8.1 Üldmõisted ... 238
8.2 Kütusekriis ... 239
8.3 Hüdro- ja tuuleenergeetika arengusuunad ... 242
8.4 Tuumaenergeetika arengusuunad ... 244
8.5 Alternatiivsed energiaallikad ... 249
8.6 Vesinikuenergeetika ... 253
8.7 Energia kokkuhoiupõhimõtted ... 255
8.8 Eesti energeetika tulevikuväljavaateid ... 258

KASUTATUD KIRJANDUS ... 259

EESSÕNA

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 elektriajamite ja jõuelektroonika eriala inseneriõppe kavasse aastal 1990 ja on praegu samanimelise õppesuuna bakalaureuseõppe kavas esimesel kursusel. Õppeaine käsitleb lühidalt ning üldülevaatlikult Maa energiavarusid ja nende rakendamist, energia saamist, muundamist, edastamist ja salvestamist, energia tarbimisviise, energiaseadmete toimet keskkonnale ja nii Eesti kui ka Euroopa ja maailma energiamajanduse tulevikuväljavaateid. Õppeaine põhiülesanne on valmistada üliõpilasi ette samade probleemide lähemaks käsitlemiseks erialaainetes (elektriajamid, jõuelektroonika, elektrivarustus, elektrotehnoloogia, elektervalgustus ja muud), kuid selles antakse ka tulevaste inseneride silmaringi laiendavaid teadmisi maailma energeetika- ja keskkonnaprobleemide alal.

Senised kogemused on näidanud, et õppeaines käsitletavad probleemid 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 käsitlusviis 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 kordustrükke 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 soovituste eest, AS Eesti Energiale oluliste täpsustuste ja lisamaterjalide eest ning tehnilisele toimetajale Gädvi Tammannile raamatu eeskujuliku kujundamise eest.

Tallinn, juuni 2007. *Autor*

Sissejuhatus 1

1.1 Põhimõisted 8

1.2 Maa energiabilanss 15

1.3 Maa energiavarud 17

1.4 Energeetika ja energiatarbimise ajalooline areng 20

1.5 Maailma maade energia- ja elektritarbimine 28

1 SISSEJUHATUS

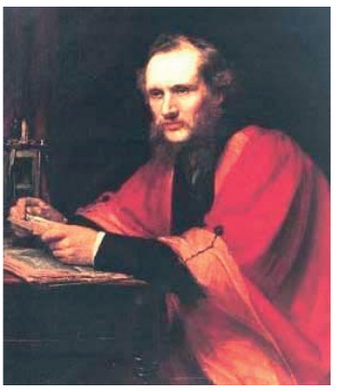
1.1 PÕHIMÕISTED

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 ενεργεια 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 aastal 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 füüsikaprofessor, Londoni Kuningliku Seltsi liige William Thomson.

ARISTOTELES



WILLIAM THOMSON

William Thomson sündis aastal 1824 Põhja-Iirimaal. Kümneaastaselt astus ta Glasgow' ülikooli, kus tema isa oli valitud matemaatikaprofessoriks. 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.

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-, käsitlus- 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

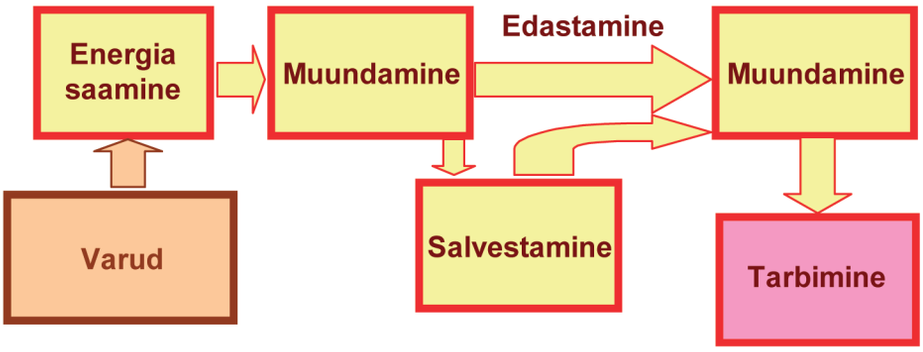
- *metallitööde tehnikast*,
- *elektripaigaldustehnikast,*
- *joonestustehnikast,*
- *arvutikasutustehnikast,*
- *autojuhtimistehnikast,*
- *kirjatehnikast jne.*

ENERGIATEHNIKA kui üks tehnikateadustest ehk *tehnikaharu* haarab niisiis

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

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

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, aparaate 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 ütlemisviisi hakatud mõnelpool ka meil kasutama, kuigi see tekitab segadust ja pealegi ei ole selle järele ka mingit vajadust. Seetõttu tuleks sõna *tehnika* kasutamisest tehnikaseadmete tähenduses *hoiduda* ja kasutada sel puhul lihtsalt nende seadmete tegelikke nimetusi.



Joonis 1.1.1. Energiatehnika käsitlusala

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 tehnoloogiavaldkonna 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 lihtsalt 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 tehnikaning majandusharu, mis käsitleb energia mitmekülgset rakendamist rahvamajanduses ja muudel inimtegevusaladel. Energeetika alajaotisi on näiteks

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

või

- tööstusenergeetika,
- põllumajandusenergeetika,
- kommunaalenergeetika.

Näidetest järeldub, 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.

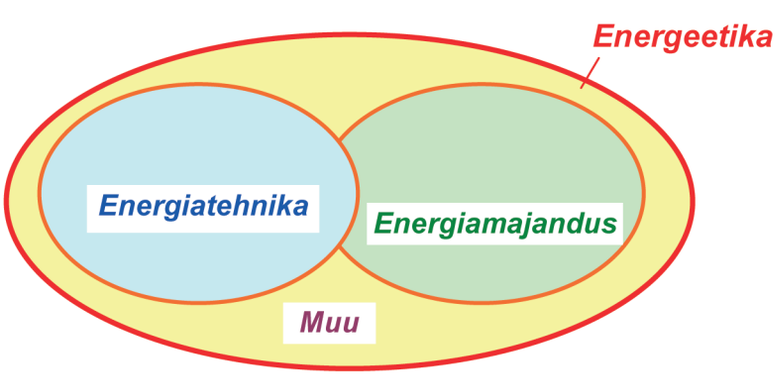
Laiemas mõttes võib energeetika all mõista **teadust**, mis haarab igasuguseid energeetilisi protsesse elusas ja eluta looduses; võidakse rääkida näiteks

- bioenergeetikast,
- geoenergeetikast,
- kosmoseenergeetikast

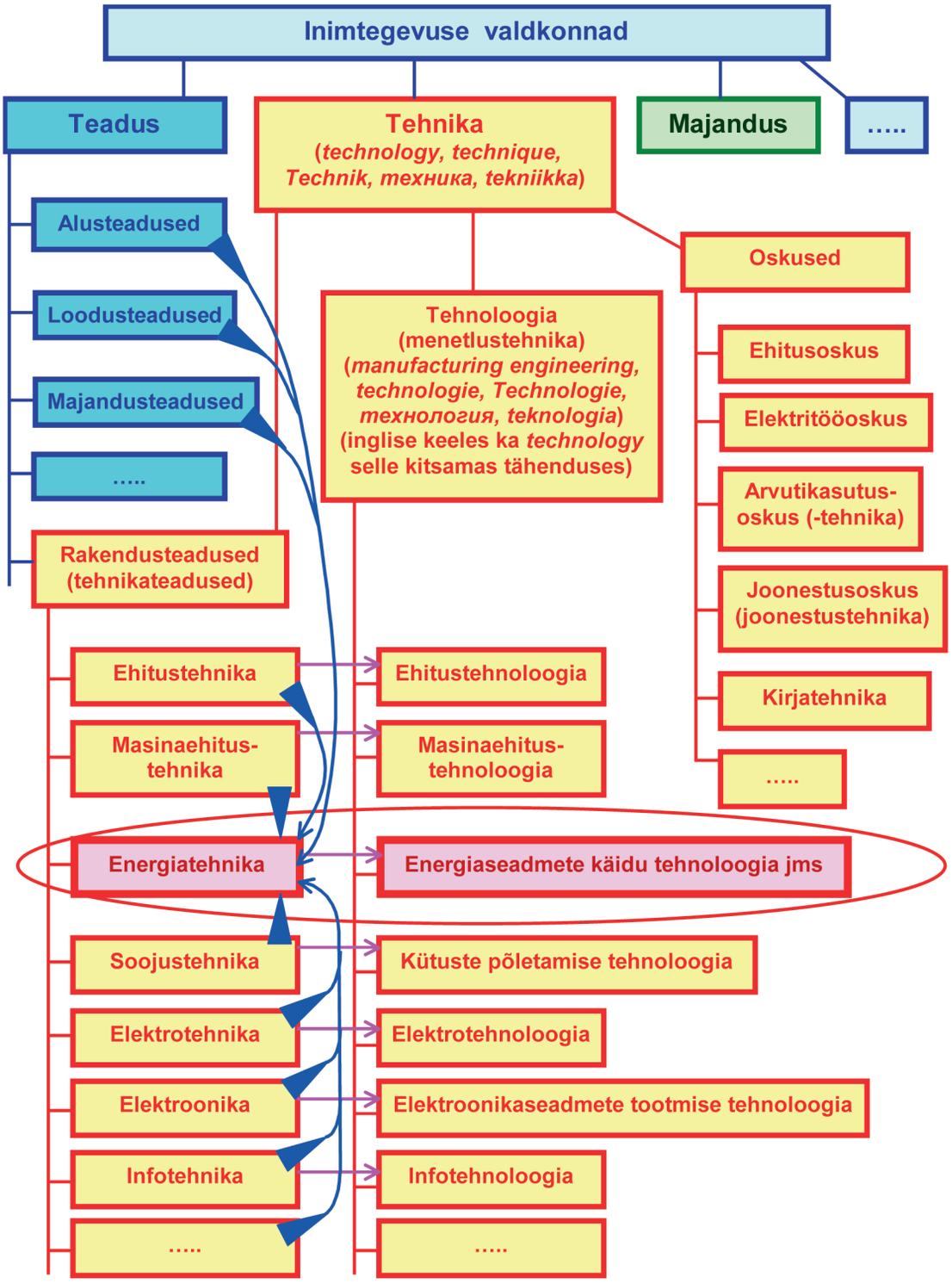
ja muudest energia muundamisel ja selle toimel põhinevatest nähtuskompleksidest.

Energiatehnika tähtsaimad teoreetilised alused on

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



Joonis 1.1.3. Energiatehnika ja energiamajandus kui energeetika komponendid



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

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

Termodünaamika käsitleb soojusnähtusi ja nende seost aine füüsikalis-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 soojussiirde 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 energiaülekandenähtuse 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 käsitlusega, 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** tahes-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 d*S* valemiga

$$\mathrm{d}S \geq \delta Q / T$$

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

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

Sellise ringprotsessi teooria avaldas aastal 1824 prantsuse sõjaväeinsener Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796–1832), kes tõestas ühtlasi, et soojusmootori talitlemiseks on vaja vähemalt kaht eri temperatuuriga soojusallikat. Seega püstitas ta esimesena termodünaamika teise põhiseaduse.

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) valemina [1.2]

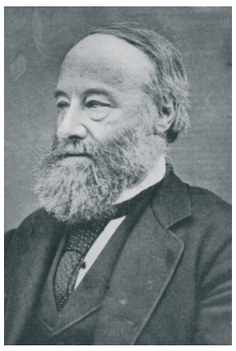
$$E = mc^2$$

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 **kg m² / s²**, mis esimesel rahvusvahelisel elektrikute kongressil Pariisis aastal 1881 pandi ette nimetada inglise füüsiku James Prescott Joule'i auks **džauliks** (**J**):

$$1\ \mathrm{J} = 1\ \mathrm{kg\ m^2 / s^2} = 1\ \mathrm{Nm} = 1\ \mathrm{Ws}.$$

Korrutisena avaldatavate liitühikute tähiste 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 peaasjalikult neid kaht lubatavat kirjutusviisi, kuna need on ka mujal, nii eesti- kui ka võõrkeelses tehnilises kirjanduses ja dokumentatsioonis laialt kasutusel.



JAMES PRESCOTT JOULE

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.

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

1 kJ (kilodžaul) = 10^3 J	1 PJ (petadžaul) = 10^{15} J
1 MJ (megadžaul) = 10^6 J	1 EJ (eksadžaul) = 10^{18} J
1 GJ (gigadžaul) = 10^9 J	1 ZJ (zettadžaul) = 10^{21} J
1 TJ (teradžaul) = 10^{12} J	1 YJ (yottadžaul) = 10^{24} 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

$$1\ \mathrm{Wh} = 3600\ \mathrm{J}, \qquad 1\ \mathrm{kWh} = 3{,}\mathbf{6} \cdot 10^6\ \mathrm{J\ jne.}$$

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 cal = 4,186**8** 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 tce (*[metric] ton of coal equivalent*, süsi-tingkütusetonn) = 7000 Mcal = 29,31 GJ = 8,14 MWh

ja

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

Tuumafüüsikas (nt tuumareaktorites toimuvate protsesside iseloomustamisel) on mittesüsteemse 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 eV = $1{,}6021 \cdot 10^{-19}$ 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 Btu = 1,0551 kJ = 0,2520 kcal = $36{,}0 \cdot 10^{-6}$ 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 W = 1 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 HP (*horsepower*) = 33 000 lbf ft/min (*jõunaeljalga* minutis) = 0,74570 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

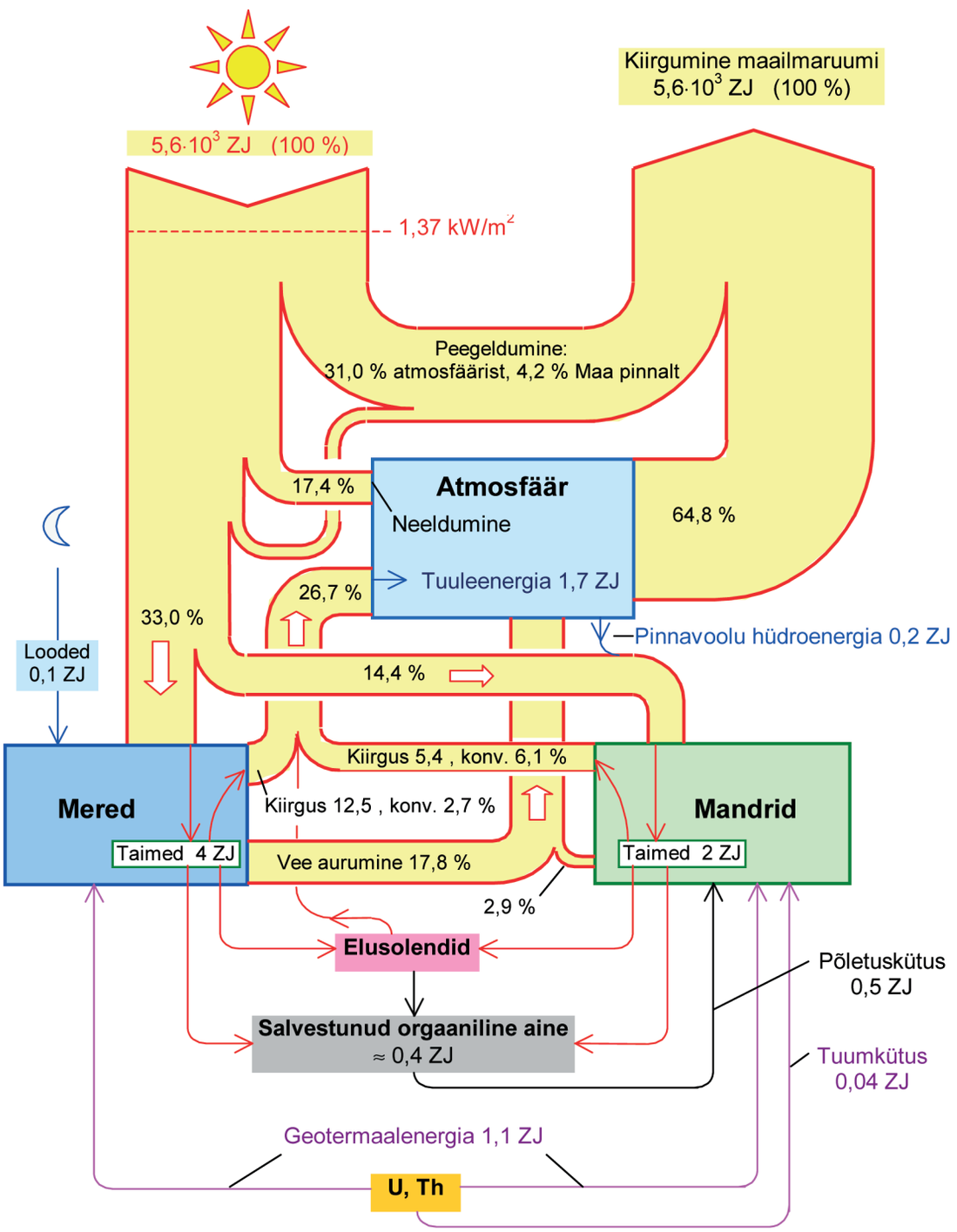
1 CV (*cheval-vapeur*) = **1 PS** (*Pferdestärke*) =
= 75 kgf m/s (jõukilogramm-meetrit sekundis) =
= 0,73550 kW.

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]:



Joonis 1.2.1. Maa energiabilanss

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

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 ülaltoodud 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 meteooride 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

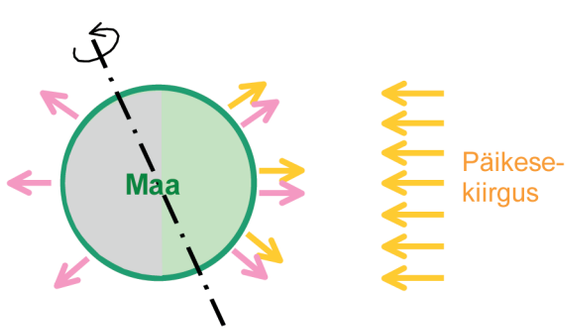
- vee aurumise kaudu 17,8 %,
- pikalainelise soojuskiirgusena 12,5 %,
- konvektsiooni teel 2,7 %.

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 hüdrosfääri 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*.

Kokkuvõttes kiirgub kogu Päikeselt saadav ja Maal endal tekkiv või tekitatav energia maailmaruumi, kusjuures keskmine kiirgusvoog Maa pindalaühiku kohta (*Maa kiirgavus*) on 348 W/m². Kui Maa oleks ideaalne mustkiirgur ja kui tal ei oleks atmosfääri, oleks tema keskmine absoluutne temperatuur sellisel kiirgavusel Stefani-Boltzmanni seaduse



Joonis 1.2.2. Päikesekiirguse peegeldumine ja Maa pikalainelise soojuskiirguse kiirgumine maailmaruumi

$M_e = \sigma_0 T^4$	M_e kiirgavus W/m^2 σ_0 Stefani-Boltzmanni konstant $5{,}67 \cdot 10^{-8}$ W/(m^{2}K^4) T absoluutne temperatuur K

alusel
$T = (M_e / \sigma_0)^{1/4} = (348 / 5{,}67 \cdot 10^{-8})^{1/4} = 280$ K,
mis Celsiuse skaalas on +7 °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).

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 ($190 \cdot 10^{12}$ 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 suureneda, kui hakatakse leppima kütuste senisest kõrgema hinnaga. Lähemalt vaadeldakse mittetaastuvate energiavarude jaotust ja ammendumisprognoose peatükis **8**.

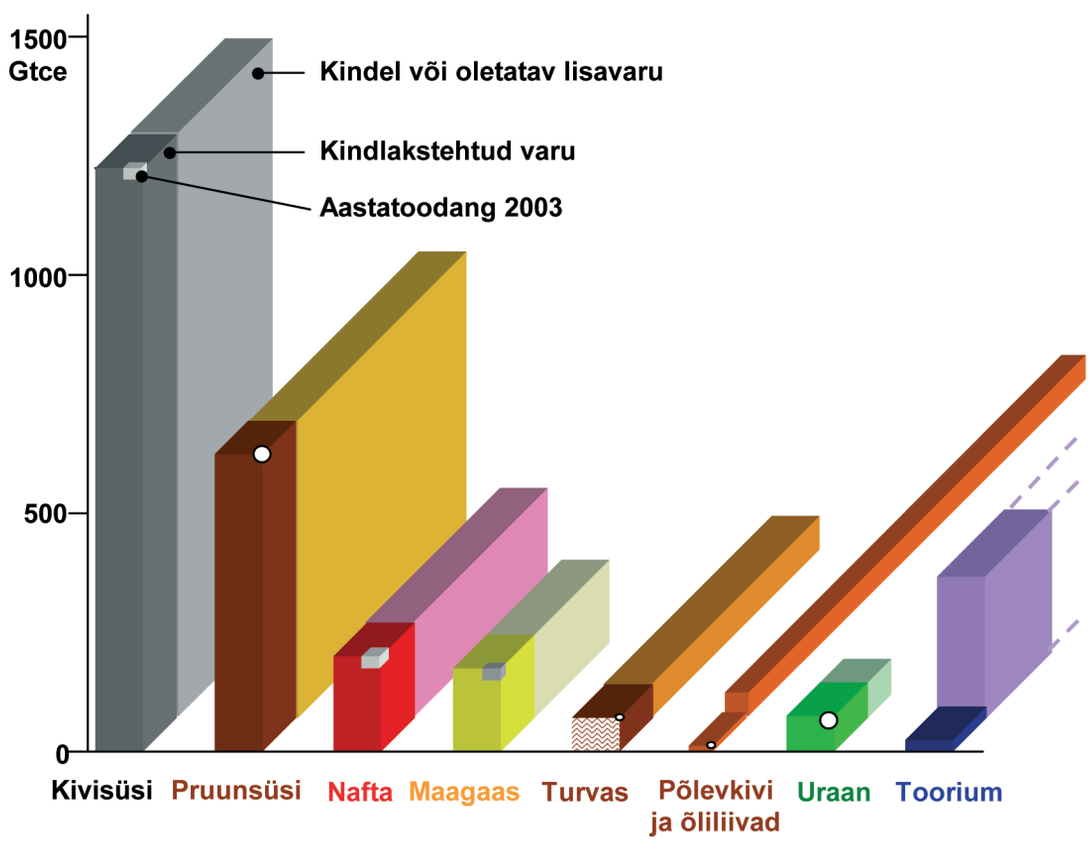
Deuteeriumi (rasket vesinikku) ja liitiumi isotoopi ^{6}Li saab soojuse saamiseks kasutada termotuuma- (*tuumafusiooni-*) reaktoreis, mis praegu on olemas vaid katseseadmeina (vt jaotis **8.4**). Nende tööstus-

Tabel 1.3.1. Maa mittetaastuvad energiavarud aastal 2003 (Gtce)

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

likku kasutuselevõttu prognoositakse 21. sajandi teisel poolel. Deuteeriumi üldkogus Maakeral leiduvas vees on $23 \cdot 10^{12}$ t, liitiumi isotoobi ^{6}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}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



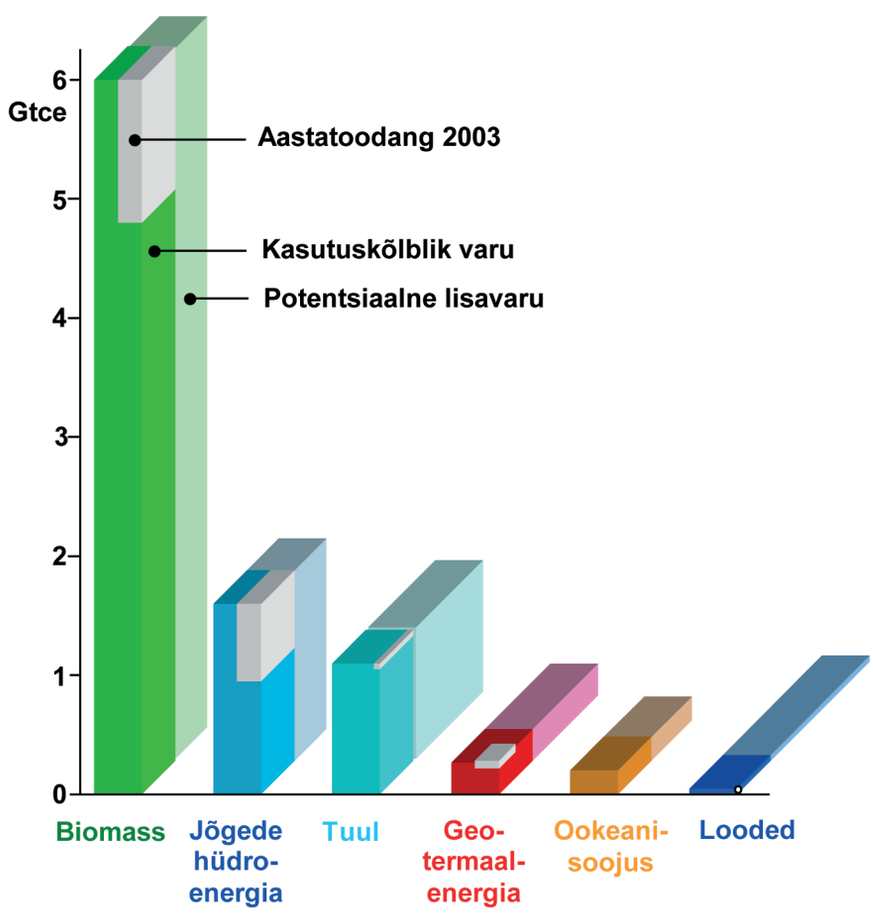
Joonis 1.3.1. Maa mittetaastuvad energiavarud aastal 2003

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

Nimetus	Potent-siaalne varu	Kasu-tuskõlblik varu	Aasta-toodang 2003	Nimetus	Potent-siaalne varu	Kasutus-kõlblik varu	Aasta-toodang 2003	Nimetus	Potent-siaalne varu	Kasutus-kõlblik varu	Aasta-toodang 2003
Päikese-kiirgus	Väga suur	3	0,01	Jõgede hüdroenergia	3,2	1,6	0,33	Looded*	0,04	0,01	0,0001
Biomass	12	6	0,6	Geotermaal-energia*	2,1	0,7	0,06	Merelained ja hoovused	0,005	?	
Tuul	3,2	1,1	0,007	Ookeani-soojus*	1,1	0,5	0	* Maa eeldatavasti sobivates piirkondades			

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.

Taastuvatest energiavarudest on seni kasutatud peaasjalikult ainult jõgede hüdroenergiat, kusjuures peaaegu kogu kasutatud hüdroenergia on läinud elektrienergia saamiseks hüdroelektrijaamades. Viimase 10 aasta jooksul on aga ka tuule- ja päikeseenergia kasutamisviisid 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**).



Joonis 1.3.2. Maa taastuvad energiavarud aastal 2003

1.4 ENERGEETIKA JA ENERGIATARBIMISE AJALOOLINE ARENG

Inimkonna hälliks loetakse Ida-Aafrika keskosa, kus umbes 3 miljoni aasta eest arenes välja esimesi primitiivseid töövahendeid (kättevõetavaid kive, kaikaid ja puuoksi) tundev *Homo habilis* ('oskav inimene') [1.10]. Selliste töövahendite kasutamine tähendas nende **mehaanilise energia** salvestamise, edastamise ja toime rakendamist peaasjalikult selleks, et suurendada käte löögijõudu nt konnakarpide, pähklite ja loomaluude purustamiseks. Kaikaid ja puuoksi sai kasutada ka **kangina** nt söödavate taimejuurikate korjamisel. Homo habilis erines täiesti selgelt inimahvidest, oskas end paremini kohandada keskkonna energiailmingutele (päikesekiirgusele, õhutemperatuurile, tuulele, veevoolule jms) ning sihipärasemalt kasutada oma lihaste jõudu. Elutalitluseks vajalikku energiat sai ta aga, nagu tema eellasedki, üksnes toiduna, mis pidi sisaldama keha talitluseks vajalikku, hapendumise teel muunduvat **keemilist energiat** keskmiselt ligikaudu **8 MJ** inimese kohta päevas. Inimese aastane koos toiduga tarbitav, küllaltki tinglik energiakogus oli seega ligikaudu 3 GJ ehk 0,1 tce.

Kulus mõnisada tuhat aastat ja inimene õppis kättevõetavaid esemeid **viskama**. Selleks oli tarvis mitte üksi eri lihaste koordinatsiooni, vaid ka kauguse hindamist ning visatava eseme massi ja kuju arvestamist, seega **aju** selgelt juhtivat talitlust. Arvatavasti algas just selle tulemusel inimese aju endisest mõnevõrra kiirem areng ning primitiivne mõistuslik tegevus.

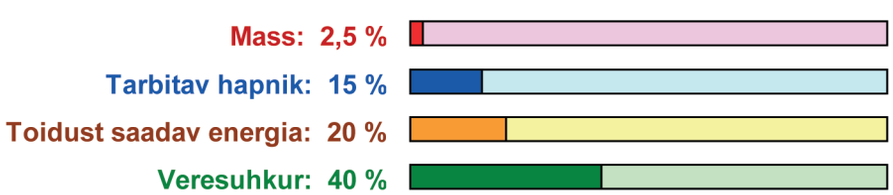
Toiduotsinguil paarikümneliikmeliste rühmadena liikudes jõudis see inimliik Aafrikast Lõuna-Aasiasse ja Lõuna-Euroopasse. Tema edasine areng toimus eri maailmajagudes eri viisil, kuid kõige kiirem oli see Aafrikas, Väike-Aasias ja Hiinas.

Umbes 2 miljoni aasta eest arenes välja püsti käiv *Homo erectus* ('püstine inimene'). Ligikaudu 1,5 miljoni aasta eest saabus see inimliik, mille isendite koguarv oli tõenäoliselt mõnikümmend tuhat, Väike-Aasiasse ja ühtlasi õppis kasutama **tuld**. Vanim seni avastatud laagritulekolle on asunud praeguses Põhja-Iisraelis ja on olnud kasutusel ligikaudu 790 000 aasta eest [1.11]. Tule kasutamise ja säilitamise oskus tegi võimalikuks inimese edukama edasisiirdumise aladele, millel soojad aastaajad vaheldusid külmadega (sealhulgas Euroopasse) ja, mis palju tähtsam, võimaldas toortoidu asemel hakata valmistama keedetud või küpsetatud, kergemini seeditavat toitu. Inimese organismis tõi see endaga kaasa tarbitava energia ümberjaotumise – vähenes toidu seedimiseks vajalik energiatarve ja energiat hakkas, lihtsustatult öeldes, üle jääma ajutegevuse arenemiseks. Sellise arengu tulemusel tarbib inimese aju, mille mass on keskmiselt 2,5 % keha kogumassist, praegu ligikaudu 15 % tarbitavast hapnikust, 20 % toiduga saadavast energiast ja 40 % veresuhkrust (joonis **1.4.1**).

Tule tegemiseks vajas inimene **kütust**, milleks sel ajal sai olla üksnes puit. Tuli hakata valmistama tööriistu puude langetamiseks ja tükeldamaiseks (kivikirveid). Arenes küttimine ja liha töötlemine. Elupaikade ja tuleasemete jaoks tuli murda ja vedada kive. Kõik see nõudis inimeselt mitte üksnes mitmekesisemat kehalist tegevust, vaid ka järjest pingsamat mõttetegevust ja kiirendas mõistuse arengut.

Kuna tule kasutuselevõtt pani aluse inimese kiiremale intellektuaalsele arenemisele, andis see Šveitsi majandusteadlasele Sigrid Knechtile aastal 1972 aluse väita, et *kultuur algas esimese puu langetamisega*. Ühtlasi aga lisas ta pessimistlikult, et *kui ükskord võetakse maha viimane puu, tuleb lõpp ka kultuurile* [1.12].

Tule kasutuselevõtt tähendas seda, et peale toidu hakkas inimene tarbima **soojust** nii toiduvalmistamiseks kui ka primitiivseks kütteks (praeguse keelepruugi järgi – *olmevajadusteks*). Energiat hakkas kuluma senise 8 MJ asemel umbes **20 MJ** inimese kohta päevas (7,5 GJ ehk 0,25 tce aastas) [1.13].



Joonis 1.4.1. Nüüdisinimese aju osatähtsus keha massis ja tarbimises

Arvatakse, et umbes 50 000 aasta eest toimus Lõuna- ja Kagu-Aafrikas elavate inimeste aju ja intellekti arengus mingi geenimutatsioonist tingitud suurem hüpe ja arenes välja kõigi praegu maailmas elavate inimeste otsene eellane – *anatoomiliselt nüüdisaegne Cromagnoni inimene*, kes oskas juba kõneleda ja kes umbes 10 000 aasta jooksul asustas ka Euroopa ja Põhja-Aasia ning jõudis umbes 20 000 aasta eest Ameerikasse ja Austraaliasse [1.14]. Inimene õppis tuld mitte ainult sütena tuha all säilitama (see säilitamisviis oli omal ajal muide hästi teada ka Läänemere ääres elavatel rahvastel), vaid ka kuiva puidu hõõrumise teel tekitama.

Tulehõõrumist – mehaanilise energia muundamist soojuseks – tuleb lugeda esimeseks inimese poolt avastatud tehislikuks energiamuundusnähtuseks.

Tule kasutamisel märkas ta, et tules olnud kive saab kergemini töödelda ja et savi tule toimel kivistub. Savi ja kondijahu segu kuumutamisel hakati umbes 40 000 aastat tagasi saama esimest tehismaterjali – põletatud potisavi (esimest *keraamikat*) ja tekkis uus kütuste kasutamise ala – **põletustehnoloogia**. Vanim teadaolev savinõude tootmiseks ehitatud ahi asub Dolni-Vestonices (Tšehhimaal) [1.15]. Peale savinõude hakati valmistama ka telliseid. Umbes 8000 aastat eKr hakati tuld kasutama kulla, hõbeda ja vase **sepistamiseks** ja umbes 6000 aastat eKr pandi praeguse Iraagi aladel alus **metallurgiale** – metallide (eeskätt vase ja pronksi) sulatamisele ja valamisele. Vastavalt sellele suurenes ka energiatarbimine.

Umbes 8000 aastat eKr, mil inimeste koguarv Maakeral oli juba umbes **5 miljonit**, algas Mesopotaamias ja seda ümbritsevas Väike-Aasias (umbes samal ajal aga ka Ida-Aasias, Mehhikos ja Peruus) **maaviljelus**, mis tõi endaga kaasa püsiasustuse ja suure kultuurilise pöörde, mida ajaloos nimetatakse *neoliitiliseks revolutsiooniks*. Arenes ehitustegevus, ühiskonnakorraldus, veondus ja meresõit. Umbes 4000 aastat eKr hakati Egiptuses esimese **veoloomana** kasutama eeslit, umbes 3500 aastat eKr Mesopotaamias härga ja umbes 3000 aastat eKr Lähis-Idas hobust. Ligikaudu samal ajal leiutati sealsamas sumerlaste poolt **ratas** ja tõhus maismaa-veovahend – **vanker** [1.16], mida peale muude koormate vedamise kasutati ilmselt ka küttepuude veoks. Põlluharimisel, loomapidamisel ja algtööstusel põhinevas ühiskonnas oli energiatarbimine juba umbes **50 MJ** inimese kohta päevas (0,6 tce aastas), mis peaaegu võrdselt jagunes toidule (koos selle valmistamisega), olmele ja tootmistegevusele (põllumajandusele ja tööstusele). Inimeste arv maailmas oli tõusnud ligikaudu **15 miljonile**.

Neoliitikumis võeti peale tule ja veoloomade kasutusele veel üks energiaallikas – **tuul**. Nimelt avastasid Egiptuse (ka teiste Vahemereäärsete alade ja Vahemere saarte) meresõitjad umbes 4000 aastat eKr, et laeva saab liikuma panna papüürusest punutud või muu taolise **purje** abil. Umbes 3500 aastat eKr leiutati kangakudumine ja laevad said endale paindlikumad, kergemad ja vastupidavamad riidest purjed [1.14]. Laevapurjed, nagu see selgub 3. sajandist eKr pärinevatest andmetest, pandi ka esimeste **tuuleveskite** tiibadele.

Kolmnurkse laevapurje taoliste tiibadega tuulikuid võib praegugi näha nt Kreetal ja mujal Lõuna-Euroopas.

Tuulikutest veidi hiljem hakati **vesirataste** abil kasutama **veejõudu**. Esimene sellekohane kirjalik teade on pärit Bütsantsis tegutsenud kreeka füüsikult Philonilt aastast 210 eKr [1.15].

Teisel ja esimesel aastatuhandel eKr, koos Lähis-Ida, Egiptuse, Kreeta, Kreeka ja Rooma kõrgkultuuride tekkega ja rahvaarvu kasvuga hakkas inimtegevus järjest enam mõjutama ka **elukeskkonda**. Puitu tarbiti ehitustegevuses, laevaehituses ja kütusena rohkem kui seda metsades peale kasvas, metsade pindala vähenes, paljude endiste laante asemele tekkisid kõrbealad, millest mitmed on püsinud siiani. Maailma rahvaarv oli meie ajaarvamise alguses eri hinnanguil **150 kuni 300 miljonit**.

Eestis tekkis inimasustus pärast jääkatte taandumist viimase jääaja lõpus umbes 10 000 aasta eest. Meie ajaarvamise alguses oli eestlaste koguarv umbes 20 000 ja nende suhteliselt vähene toime loodusele seisnes põldude laiendamises alepõletuse teel, maalinnade rajamises ja puude kasutamises kütteks. Esimese aastatuhande lõpus osati tõenäoliselt kasutada ka juba veejõudu, sest sellele viitav *veski* on puhtalt eesti päritolu sõna [1.17]. Pealegi on Jägala jõel leitud veskiase, mis pärineb hiljemalt aastast 1162 ehk seega ajast, mil sakslased ega taanlased ei olnud veel Eestimaale jõudnud [1.18].

Rooma impeeriumi tekkimisega kandus tehnika, sealhulgas energiatehnika areng Euroopasse. Soojust toiduvalmistamiseks ja hoonete kütteks saadi küttepuidust, mehaanilist energiat inimjõu, veoloomade (eeskätt hobuste) kasutamisega ja alates 4. sajandist järjest rohkem ka jõgede veejõust. Nii näiteks oli Inglismaal 11. sajandil kasutusel üle 5600

vesiveski, kusjuures elanike arv oli seal sel ajal veidi üle ühe miljoni. Tuuleveskite laiem kasutamine Euroopas algas 12. sajandil ja samal ajal algas ka **kivisöe** kaevandamine. Mõnesaja aasta jooksul sai kivisöest Euroopa tähtsaim tööstuslik kütuseliik ja aastal 1640 õpiti sellest tootma metallurgias vajalikku puhtamat süsikütust – **koksi**.

Inglismaal kasutati lahtistest leiukohtadest saadavat kivisütt juba 9. sajandil (esimene teade pärineb aastast 852), kuid esimese maa-aluse kivisöekaevanduse rajasid aastal 1113 Limburgi hertsogiriigis Klosterroda kloostri mungad [1.15].

Kütuste, hobu-, vee- ja tuulejõu kasutamine toimus pikka aega puhtalt kogemustega saadud viisil. Keskajal algas aga ka energianähtuste teaduslik uurimine ja esimese sellealase tähtsündmusena tuleks märkida inglise loodusteadlase Roger Baconi (1214–1294) tähelepanekut aastal 1260, et kütus saab põleda üksnes õhu juurdevoolu korral ja et õhu juurdevoolu katkemisel leek kaob (põlemine lakkab).

Keskaja suurim saavutus energeetika alal on **aurumasina** kasutuselevõtt. Selle energiamasina areng algas aastal 1688, mil prantsuse füüsik Denis Papin (1647–1712) ehitas esimese *atmosfäärilise* (auru kondenseerumisel ja atmosfäärirõhu toimel põhineva) primitiivse kolbmasina. Esimesed kasutuskõlblikud (kaevandustest vee väljapumpamiseks rakendatavad) masinad ilmusid aastal 1698 (vt jaotis **2.2**). Aastal 1765 alustas aurumasina täiustamist inglise mehaanik James Watt ja aastal **1788** valmis tema universaalne, pöörlevate mehhanismide käitamiseks sobiv masin. Seda aastat loetakse tinglikult ***tööstusliku pöörde*** alguseks, sest oli leiutatud jõuallikas, mida võis paigaldada ükskõik kuhu ja mis võis käitada ükskõik milliseid tööstusseadmeid. Aurumasinat sai paigaldada ka sõidukitele ja eriti hästi õigustasid nad end **veduritel**. Algas raudteede areng, mis tõi endaga kaasa energia tarbimise mitmekordse suurenemise veonduses.

19. sajandil tuli juurde teisigi energiamasinaid. Aastal 1827 leiutati praktiliseks kasutamiseks sobiv **hüdroturbiin** ja aastal 1832 valmistati esimesed katselised **elektrigeneraatorid**. Elektrienergia tööstuslik kasutamine algas aastal 1842, mil inglise tööstur John Stephen Woolrich (1790–1843) paigaldas aurumasinast ja alalisvoolugeneraatorist koosneva agregaadi elektrolüüsivanni toiteks. 1870ndail aastail hakkasid tekkima esimesed tööstusettevõtete elektrijaamad (peamiselt kaarlampvalgustuse toiteks), suurte **avalike elektrijaamade** rajamine algas aga aastal **1882**, pärast esimese *masskasutuselektritarviti* – lihtsalt kasutatava, väikese võimsustarbega, sobivate valgusomadustega ja pikaealise **hõõglambi** leiutamist (1879) ja edukat turustamist USA leiduri Thomas Alva Edisoni (1847–1931) poolt. Seda aastat loetakse suure ***elektrotehnilise pöörde*** alguseks. Elektrienergia tootmise kasvu kiirendas mitte üksnes arenev nõudlus, vaid ka **auruturbiini** leiutamine inglise inseneri Charles Algernon Parsonsi (1854–1931) poolt ja odavat energiat andvate hüdroelektrijaamade rajamine. Juba aastal 1899 tekkis esimene **energiasüsteem** (*Southern California Edison Electric Co*., USA). Maailma elanike arv oli 20. sajandi alguses **1590 miljonit**.

19. sajandi keskel lisandus senistele tahketele kütustele esimene vedelkütus – **nafta**. Väikestes kogustes saadi seda juba varem algelistest kaevudest USA idaosas ja Vene impeeriumis Bakuu lähedal, aastal 1859 puuris aga USA ettevõtja Edwin Laterine Drake (1819–1880) Titusville'i lähedal Pennsylvanias maailma esimese (21 m sügavuse) tööstusliku naftapuuraugu. Nafta rafineerimissaadused – petrool ja bensiin – osutusid väga sobivateks mootorikütusteks ja aastal 1885 ehitas Saksamaa ettevõtja Carl Friedrich Benz (1844–1929) sisepõlemismootori kasutamisel põhineva esimese **auto**.

Gaasiline primaarkütus – **maagaas** – oli tuntud juba antiikajal, kuid esimese maagaasipuuraugu rajas oma krundil USA ettevõtja George Westinghouse (1846–1914) aastal 1884. Seda aastat võib lugeda selle maapõuest saadava kütuse tööstusliku kasutamise alguseks.

20. sajandi esimesel poolel kujunes maailma arenenud riikides välja ***tööstusühiskond***, milles keskmine energiatarbimine inimese kohta tõusis väärtuseni 320 MJ ööpäevas ehk 4 tce aastas (9 % tinglikult toiduna, 42 % olmes, 31 % tööstuses ja põllumajanduses, 18 % transpordis). Aastal 1960 saavutas maailma rahvaarv taseme **3 miljardit**.

Tööstuse areng kulges maailma eri regioonides erisuguse kiirusega. Kõige kiirem oli see Euroopas ja Põhja-Ameerikas, kõige aeglasem Aafrikas. Seetõttu oli ka maailma keskmine energiatarbimine tunduvalt väiksem kui arenenud tööstusühiskonnas – aastal 1900 näiteks ligikaudu 0,7 tce inimese kohta aastas.

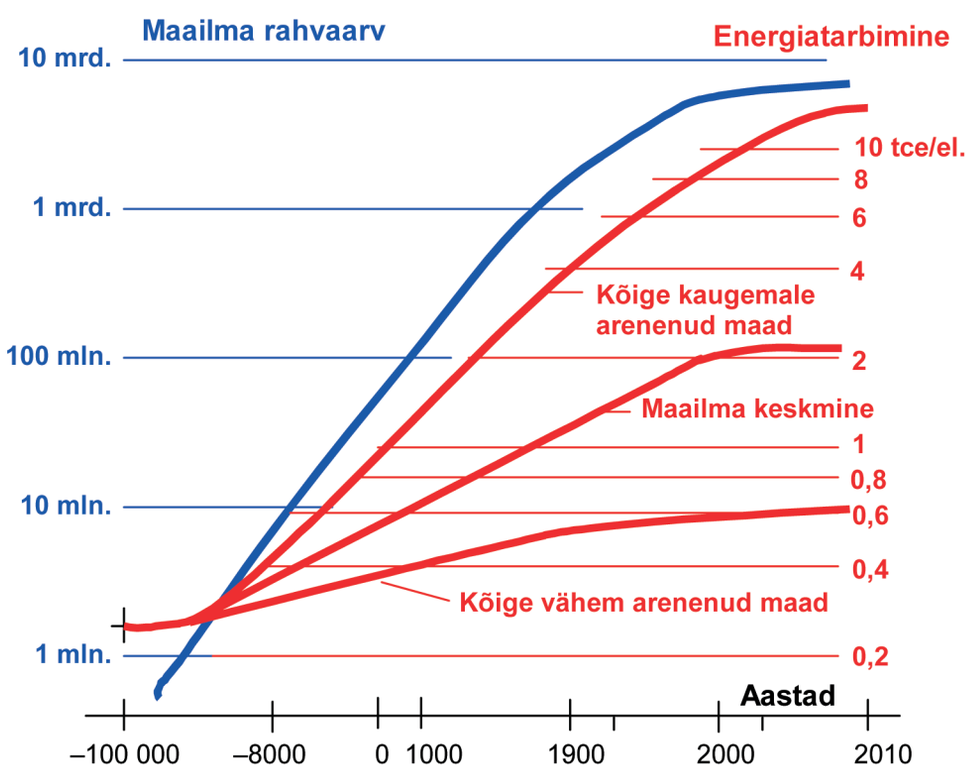
20. sajandi teisel poolel tuli uue energialiigina kasutusele **tuumaenergia**. Maailma esimese tuumareaktori käivitas aastal 1942 Chicagos tuumafüüsik Enrico Fermi (1901–1954), esimene tuuma-

elektrijaam lülitati võrku aga aastal 1954 Obninskis (Venemaal). Ühtlasi tõi aga sajandi viimane veerand endaga kaasa **energiakriisi**, mis algas toornafta hinna hüppelise (4-kordseks) tõstmisega Naftat Eksportivate Maade Organisatsiooni (*Organization of the Petroleum Exporting Countries, OPEC*) poolt aastal 1973. Tekkis vajadus uute *alternatiivsete energiaallikate* järele, milleks kujunesid eeskätt biomass ja tuul. 1990ndail aastail said vaidlematult selgeks ka kütuste põletamisest ja muudest energiamuundusprotsessidest tingitud **kliimamuutused** (ülemaailmne kliima soojenemine). Aastal 1992 kutsus Ühinenud Rahvaste Organisatsioon seetõttu Rio de Janeiros kokku esimese ülemaailmse keskkonna- ja arengukonverentsi, millel osalesid 170 riigi juhid ja millel kavandati meetmeid ohtlike kliimamuutuste aeglustamiseks. Aastal 1997 leppisid maailma tööstusmaad järjekordsel kliimakonverentsil Kyotos kokku piirata konkreetsel määral kütuste põletamisel õhku paiskuva süsinikdioksiidi kogust. Kyotos vastuvõetud protokoll jõustus veebruaris 2005, kuid selle realiseerimine, mis on ette nähtud aastaiks 2010…2012, võib kujuneda väga raskeks. Maailma rahvaarv oli 21. sajandi (2001. aasta) alguses **6,2 miljardit** ja oli 2006. aasta keskel jõudnud **6,56 miljardini**. Iga aastaga kasvab maailma rahvaarv praegu 1,2 % võrra.

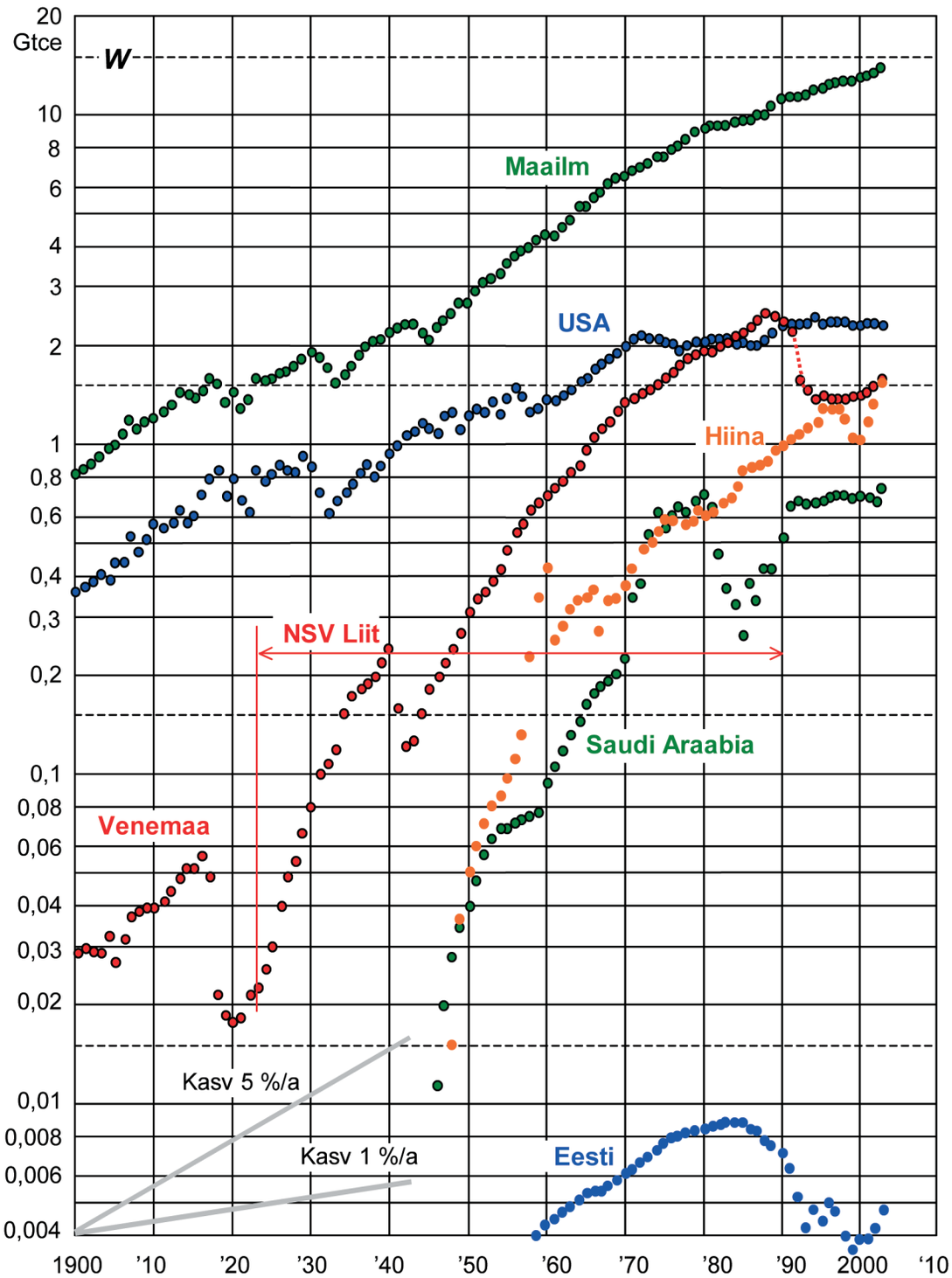
20. sajandi teisel poolel arenesid kõik tehnikaharud, eeskätt aga liiklus-, info- ja arvutustehnika (mõjutades ka energiatehnika paljusid tehnilisi lahendusi) sedavõrd kiiresti, et arenenud maades loetakse tekkinud olevat ***tehnikaühiskond***, mida, arvestades infotehnikavahendite masskasutamist, nimetatakse mõnikord ka ***infoühiskonnaks***. Inimese energiatarbimine on selles ühiskonnatüübis veelgi kasvanud ja on praegu kuni 1000 MJ ööpäevas ehk 12 tce aastas. Kui lugeda energiatarbimiseks tinglikult ka toitumist, moodustab toit selles energiakoguses ainult 4 %, olmevajadused aga 27 %, tööstus ja põllumajandus 40 % ja liiklus 27 %.

Maailma kui terviku energiatarbimise hindamisel tuleb arvestada, et kõrgetasemeline tehnikaühiskond ei haara kaugeltki mitte kogu Maa rahvastikku. Seetõttu on inimkonna praegune **keskmine** energiatarbimine ühe inimese kohta ligikaudu 2 tce aastas. Erinevus tehniliselt arenenud riikide ja maailma keskmise energiatarbimise vahel hakkas selgelt silma paistma juba keskajal ja praegu on maailma keskmine energiatarbimine inimese kohta ligikaudu 5 korda madalam kui nt USAs ja Kanadas. Inimeste energiatarbimise areng on tugevasti lihtsustatult kujutatud joonisel **1.4.2**.

Energeetika ja energiatarbimise areng on eriti kiire olnud viimase 120 aasta jooksul. Kõige selge-



Joonis 1.4.2. Inimeste energiavajaduse kasv maailmas 100 000 aasta jooksul



Joonis 1.4.3. Kaubalise energia tootmine aastail 1900–2003 maailmas, USAs, Venemaal (1923–1990 NSV Liidus), Hiinas, Saudi Araabias ja Eestis

malt iseloomustab seda nn ***kaubaliste*** (hulgi müüdavate) energialiikide (kaubaliste kütuste, tuuma-, hüdro-, tuule-, geotermaal- ja päikeseelektrijaamadest saadava kaubalise elektrienergia) tarbimise kasv. Kasvutempot saab hästi piltlikult iseloomustada tarbimise kahekordistumise ajavahemikega, mis on esitatud tabelis **1.4.1**.

Täpsemalt on kaubaliste energialiikide tootmine (kui kasutada majandusteadlaste oskussõnavara) maailmas 20. sajandil ja 21. sajandi esimestel aastatel kujutatud joonisel **1.4.3**. Samal joonisel on näidatud nende energialiikide tootmine ka neljas neid suurimal hulgal tootvas riigis – USAs, Venemaal, Hiinas ja Saudi Araabias. Riike, mille osa maailma kau-

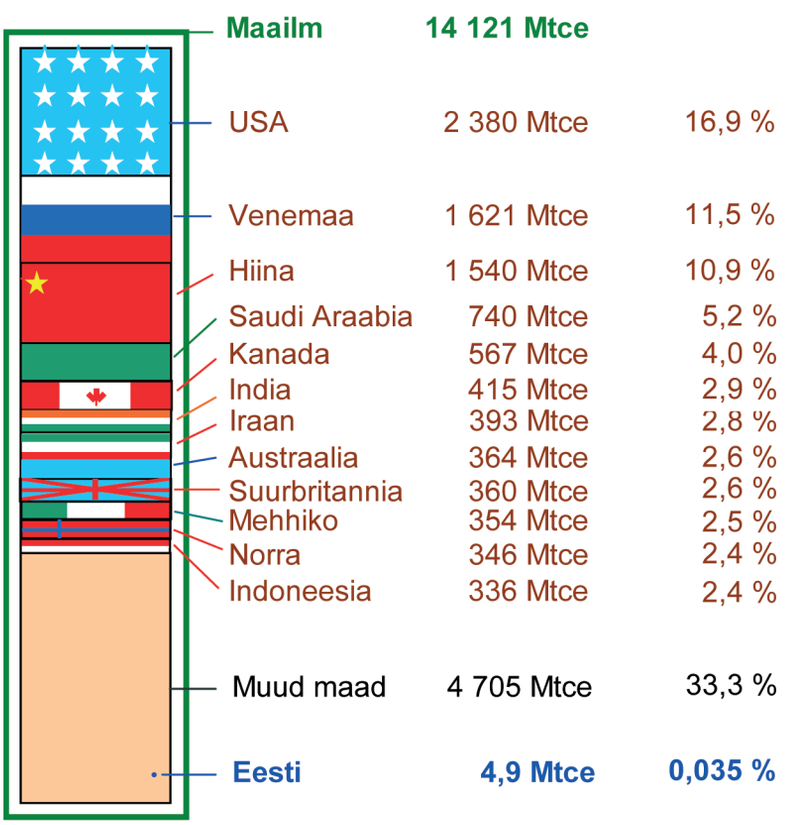
Tabel 1.4.1. Maailma energiatarbimise areng

Aasta	Energiatarbimine Gtce	Aasta	Energiatarbimine Gtce
1905	1	1974	8
1938	2	2010 prognoos	15
1958	4	2013?	16

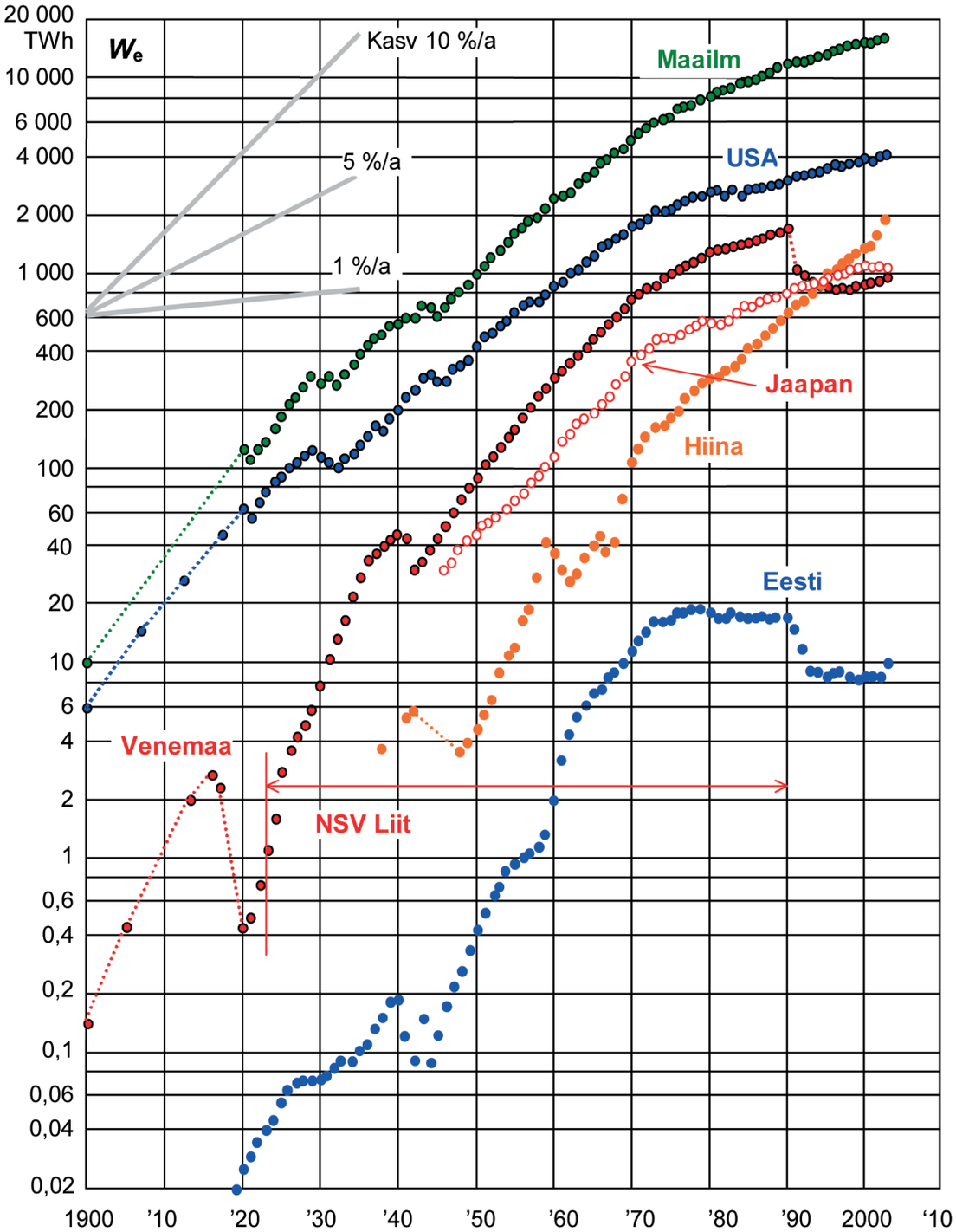
baliste energialiikide toodangus oli vähemalt 2 %, oli aastal 2003 maailmas 12 ja neis toodeti 2/3 maailma kaubalisest primaarenergiast (joonis **1.4.4**).

Kaubaliste energialiikide hulka ei kuulu toit ega enda tarbeks isevarutavad kütused (nt talude ja maaettevõtete küttepuit), naftaleiukohtades ärapõletatav toornafta ja kõrvalgaasid jms. Siia ei kuulu ka tuumareaktorites soojuskadudena eralduv energia ega tuumarelvadesse varutud tuumaenergia. Mittekaubaliste energialiikide arvessevõtt saab olla väga ligikaudne, sest nende kohta ei peeta piisavalt täielikku statistilist arvestust (või ei peeta sellist arvestust üldse).

Tabel **1.4.1** ja joonis **1.4.3** näitavad, et alates 1974. aastast (seega pärast aastal 1973 puhkenud kütusekriisi algust) on energiatarbimise kasv maailmas tervikuna aeglustunud ja mitmeid aastaid isegi paigal püsinud või langenud. Põhiliselt on see tingitud energia kallinemisest ja sellest johtuvalt tööstuslikult arenenumates maades rakendatud säästumeetmetest. Eriti selgelt iseloomustab seda kaubalise primaarenergia (eeskätt kütuste) toodangu stabiliseerumine USAs ja Saudi Araabias alates aastast 1990. Ühtlasi on teadvustunud, et energia tarbimisel on olemas piir, mis on määratud Maa energeetilise tasakaalule ja kliimale avaldatava toimega ja milleks praegu võib lugeda ligikudu **30 Gtce/a**. Mingil määral on maailma energiatarbimise kasvu aeglustanud ka SRÜ ja Ida-Euroopa maade tööstustoodangu ja seega nende energiavajaduse vähenemine aastail 1990–2000 ja hiljemgi. 21. sajandi esimestel aastatel algas aga energiatarbimise kiire kasv Hiinas ja Indias, mistõttu maailma kui terviku energiatarbimine on hakanud kiiremini tõusma. On võimalik, et selle tegelik kasv ületab tabelis **1.4.1** esitatud prognoosi. Ühtlasi on saanud täiesti selgeks, et energiatarbimise piir ei ole määratud niivõrd kasutatava energiakoguse otsese toimega Maa energiabilansile, vaid energia muundamise ja kasutamise kõrvaltoimetega, eeskätt kütuste põletamisel tekkiva süsinikdioksiidi koguse suurenemisega atmosfääris ja sellest tingitud kliimamuutustega. Lähemalt käsitletakse seda probleemi peatükis **7**.



Joonis 1.4.4. Maailma suurimad kaubalise energia tootjad aastal 2003



Joonis 1.4.5. Elektrienergia tootmine 1900–2003 maailmas, USAs (netotoodang), Venemaal (1923–1990 NSV Liidus), Jaapanis, Hiinas ja Eestis

Veel kiirem on olnud **elektrienergia** tarbimise areng, mida iseloomustatakse enamasti üksnes *statistiliselt arvestatava* (energiasüsteemides vm elektrivarustusettevõtetes, suuremates tööstus- ja transpordiettevõtetes jms toodetava) elektrienergiaga (tabel **1.4.2** ja joonis **1.4.5**). Laevadel, rongidel, lennukites, väikeettevõtetes, navigatsiooniseadmetes jms toodetavat elektrienergiat ei saa vastavate andmete puudumise või puudulikkuse tõttu arvesse võtta. Mõnedes maades (nt USAs) ei arvestata ka elektrijaamade omatarbeks minevat elektrienergiat.

Ka elektrienergia tootmises ja tarbimises on selgesti märgata kaht vastupidist tendentsi:

- energia ratsionaalsemast kasutamisest tingitud aeglustumist või koguni vähenemist arenenud tööstusmaades, eeskätt Euroopas;
- kiirenemist arengumaades.

Tabel 1.4.2. Elektrienergia tarbimise areng maailmas

Aasta	Elektri-energia tarbimine PWh	Aasta	Elektri-energia tarbimine PWh
1895	0,005	1971	5
1913	0,05	2010 prognoos	20
1939	0,5		

21. sajandi alguses on elektrienergia tootmise kasvu maailmas eriti mõjutanud Hiina ja India energiamajanduse kiire areng.

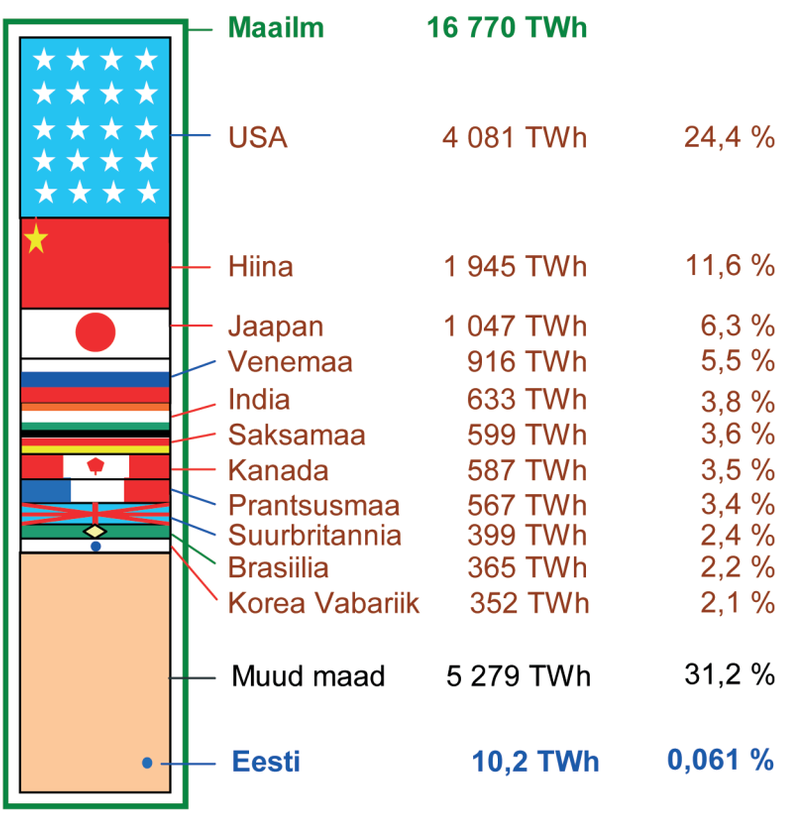
Joonisel **1.4.5** on näidatud elektrenergia tootmise areng neljas suurimal hulgal seda energialiiki tootvas riigis – USAs, Hiinas, Jaapanis ja Venemaal. Riike, mille osa maailma elektrienergia toodangus oli vähemalt 2 %, oli aastal 2003 maailmas 11 ja neis toodeti üle 2/3 maailma elektrienergiast (joonis **1.4.6**).

Ka elektrienergia tootmisel on olemas teatav piir, mis on määratud primaarenergia tootmise piiriga ja sellega, kui suurt osa primaarenergiast kasutatakse elektrienergia tootmiseks. Kui lähtuda sellest, et elektrienergiaks muundatakse ligikaudu kolmandik kogu primaarenergiast ja et muundamise kasutegur on keskmiselt 40 %, saame elektrienergia tootmise piiriks umbes **35 PWh/a**.

Jooniste **1.4.3** ja **1.4.5** ordinaattelgedel on kasutatud, nagu seda statistikas tihti tehakse, *logaritmilist* skaalat. See võimaldab

a) vaadelda mingi suuruse ajalist arengut väga laias väärtustevahemikus (nt joonisel **1.4.5** koguni vahemikus 20 000 : 1);

b) kujutada ajalise arengu funktsioone, kui vaadeldava suuruse aastane suhteline kasv on konstantne, sirgjoontena; juurdekasvu hindamise hõlbustamiseks on joonistel esitatud nt 1-, 5- ja 10-protsendilisele aastasele kasvule vastavad kaldsirged.



Joonis 1.4.6. Maailma suurimad elektrienergia tootjad aastal 2003 (USAs netotoodang)

1.5 MAAILMA MAADE ENERGIA- JA ELEKTRITARBIMINE

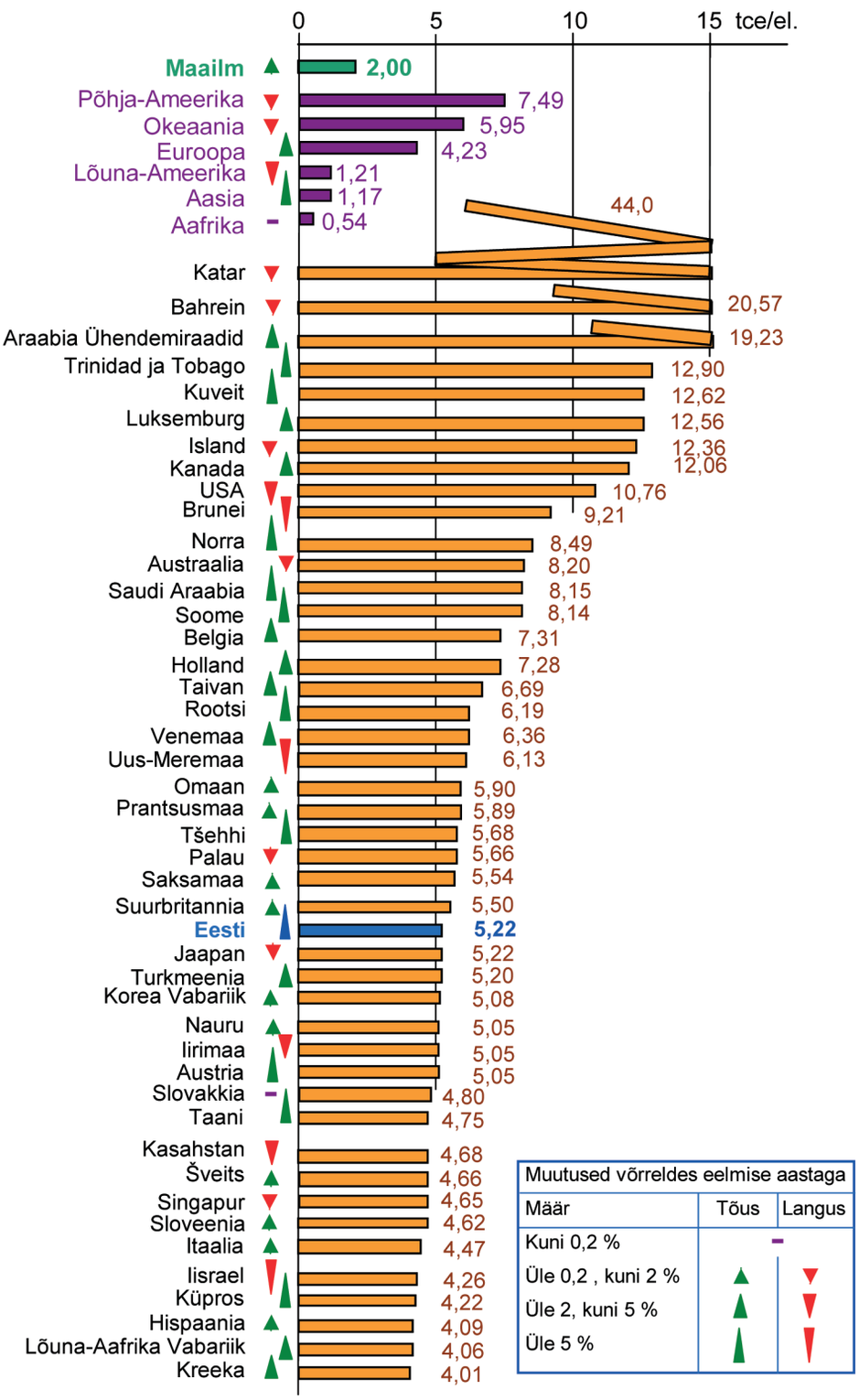
Keskmiselt tarbiti maailmas ÜRO energiastatistika aastaraamatu [1.7] andmeil 2003. aastal **2,00 tce** kaubalist energiat inimese kohta. Kuna tööstus ja energeetika on eri maailmajagudes ja eri maades inimkonna ajaloo vältel arenenud väga ebaühtlaselt, on ka energia tarbimine maailma ulatuses, nagu see järeldub joonisest **1.4.2**, väga erisugune. Põhja-Ameerikas, kuhu ÜRO statistikaametite jaotuse järgi kuuluvad peale USA, Kanada ja Mehhiko ka Kesk-Ameerika ja Kariibi mere riigid, oli kaubalise energia tarbimine elaniku kohta ligi neli korda kõrgem kui maailma keskmine (7,49 tce/el.). Okeaanias (Austraalia, Uus-Meremaa, Vaikse ookeani saareriigid) oli see näitaja kolm korda, Euroopas (koos kogu Venemaaga) aga üle kahe korra kõrgem kui maailma keskmine (vt joonis **1.5.1**). Tugevasti allpool maailma keskmist oli kaubalise energia tarbimine inimese kohta Lõuna-Ameerikas, Aasias (kuhu ÜRO liigituse järgi kuuluvad muide ka Küpros, Gruusia, Armeenia ja Aserbaidžaan) ja Aafrikas. Eriti kõrge oli energiatarbimine Araabia poolsaare nendes väikeriikides, mille majandus põhineb nafta intensiivsel tootmisel ja energiamahukal töötlemisel (Katar, Bahrein, Araabia Ühendemiraadid, Kuveit). Esimesel kohal nende hulgas on Katar (44 tce/el.), kus peale nafta ja naftasaaduste toodetakse kunstväetisi, tsementi ja metalle, mis kõik nõuavad ohtrasti energiat. Arenenud tööstusriikides on kaubalise energia tarbimine elaniku kohta enamasti 2…5 korda kõrgem kui maailma keskmine. Selliste riikide hulka kuuluvad USA ja Kanada, peaaegu kõik Euroopa Liidu ja Euroopa Ühisturu liikmesriigid (sealhulgas Eesti), Venemaa, Jaapan, Korea Vabariik, Iisrael, Lõuna-Aafrika Vabariik ja veel mõned. Euroopa ja Põhja-Ameerika põhjapoolsemas osas suurendab energia eritarbimist loomulikult ka suurem küttevajadus. Joonisel **1.5.1** on esitatud kõik 45 riiki, milles see näitaja oli aastal 2003 üle 2 korra kõrgem kui maailma keskmine. Maailma vaesemates riikides võidakse kaubalist energiat tarbida inimese kohta aga mõnikümmend kuni mõnisada korda vähem kui maailmas keskmiselt; Kesk-Aafrikas asuvas Tšaadis oli tarbimine aastal 2003 näiteks ainult 6 kgce elaniku kohta.

Mitte alati ei pruugi energia kõrge eritarbimine olla tingitud energiamahukatest tööstuslikest tootmisprotsessidest, arenenud veondusest ega külmadest kliimaoludest. Küllalt sageli mõjutavad seda energia ebaratsionaalne kulutamine (nt liikluses) ja suured energiakaod. Et hinnata energia kulutamise ratsionaalsust, võrreldakse energia eritarbimist riigi sisemajanduse kogutoodangu väärtusega elaniku kohta. Joonisel **1.5.2** on nimetatud näitaja esitatud nende 35 riigi kohta, kus see on vähemalt 2 korda kõrgem kui maailma keskmine, joonisel **1.5.3** on aga näidatud energia eritarbimise ja sisemajanduse eri-kogutoodangu omavaheline seos maailma 157 riigis. Joonis **1.5.3** näitab selle vahekorra suurt hajuvust mõlemale poole teatavat tinglikku, joonisel rohelisega tähistatud keskjoont. Eri maade formaalne võrdlemine nende kahe näitaja suhte järgi ei ole seega kuigi korrektne. Selgelt on aga näha suhteliselt suur energiakulu odavat toorainet tootvates maades ja suhteliselt väike energiakulu kalleid kõrgtehnoloogilisi tooteid valmistavates ja kalleid teenuseid osutavates maades. Kogutoodangu väärtuse reaalse kasvu arvutamisel tuleb arvestada ka võrdluseks kasutatava rahaühiku (käesoleval juhul – USA dollari) kursi pidevat muutumist.

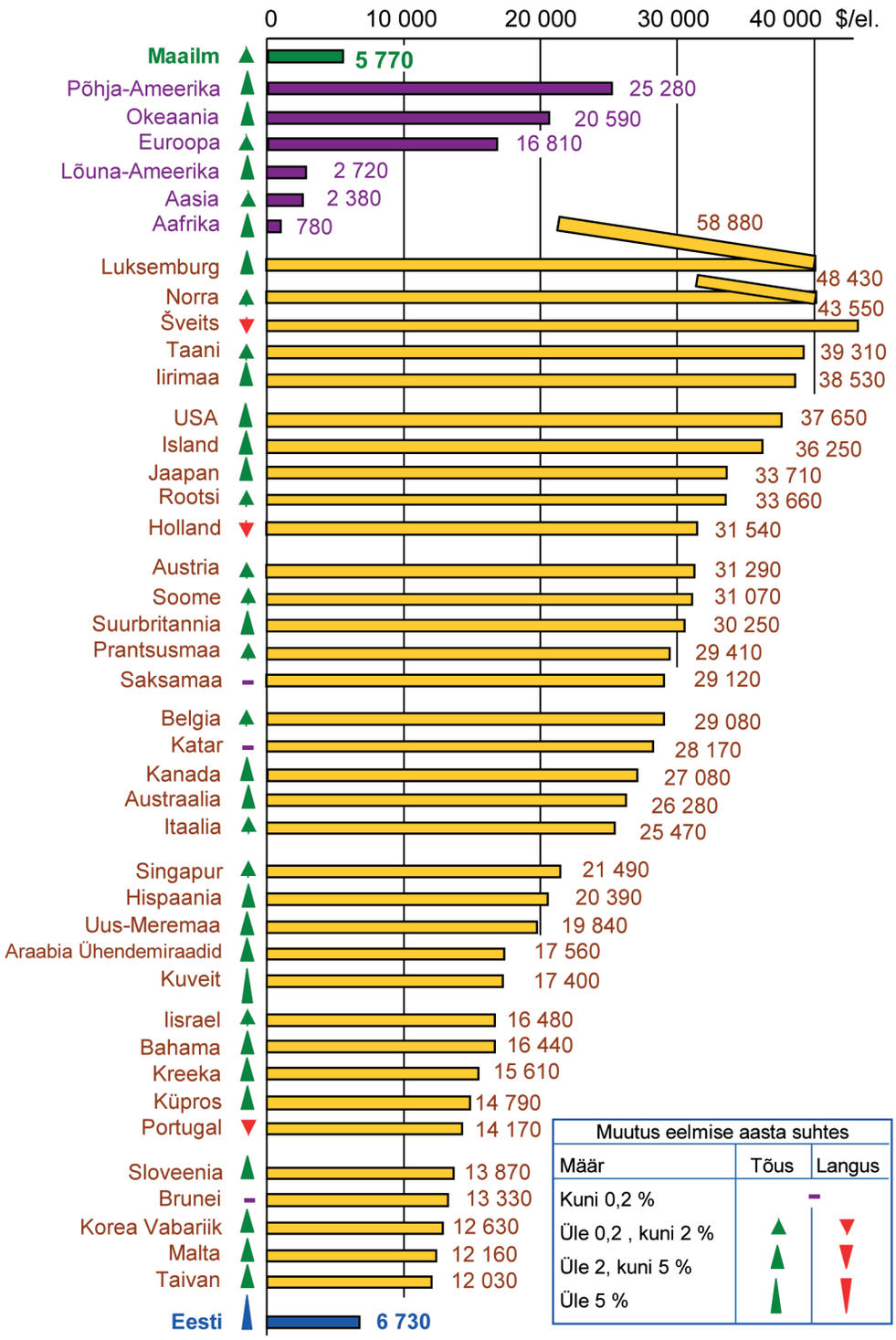
Andmed riikide sisemajanduse kogutoodangu väärtuse kohta on võetud saksa kirjastuse *Fischer* aastaraamatust 2006 [1.19]. Joonisel **1.5.3** ei ole esitatud eripärase rahvamajandusstruktuuriga pisiriigid elanike arvuga alla 300 000 ja mõned riigid, mille kohta vajalikke andmeid ei olnud saada.

Joonisel **1.5.4** on kujutatud kaubalise energia kulu riigi sisemajanduse kogutoodangu väärtuse ühiku kohta nendes riikides, milles kaubalise energia eritarbimine on vähemalt 2 korda kõrgem kui maailma keskmine. Nagu juba öeldud, on see näitaja kõrgtehnoloogilise ja kalli toodangu ning kallite teenuste korral väiksem, toorainet (sealhulgas toorkütuseid) eksportivate maade korral aga suurem. Eestis oli see aastal 2003 veel tugevasti üle Euroopa ja ka maailma keskmise, mis esmajärjekorras ongi seletatav Eesti paljude toodangu- ja teenuseliikide odavusega.

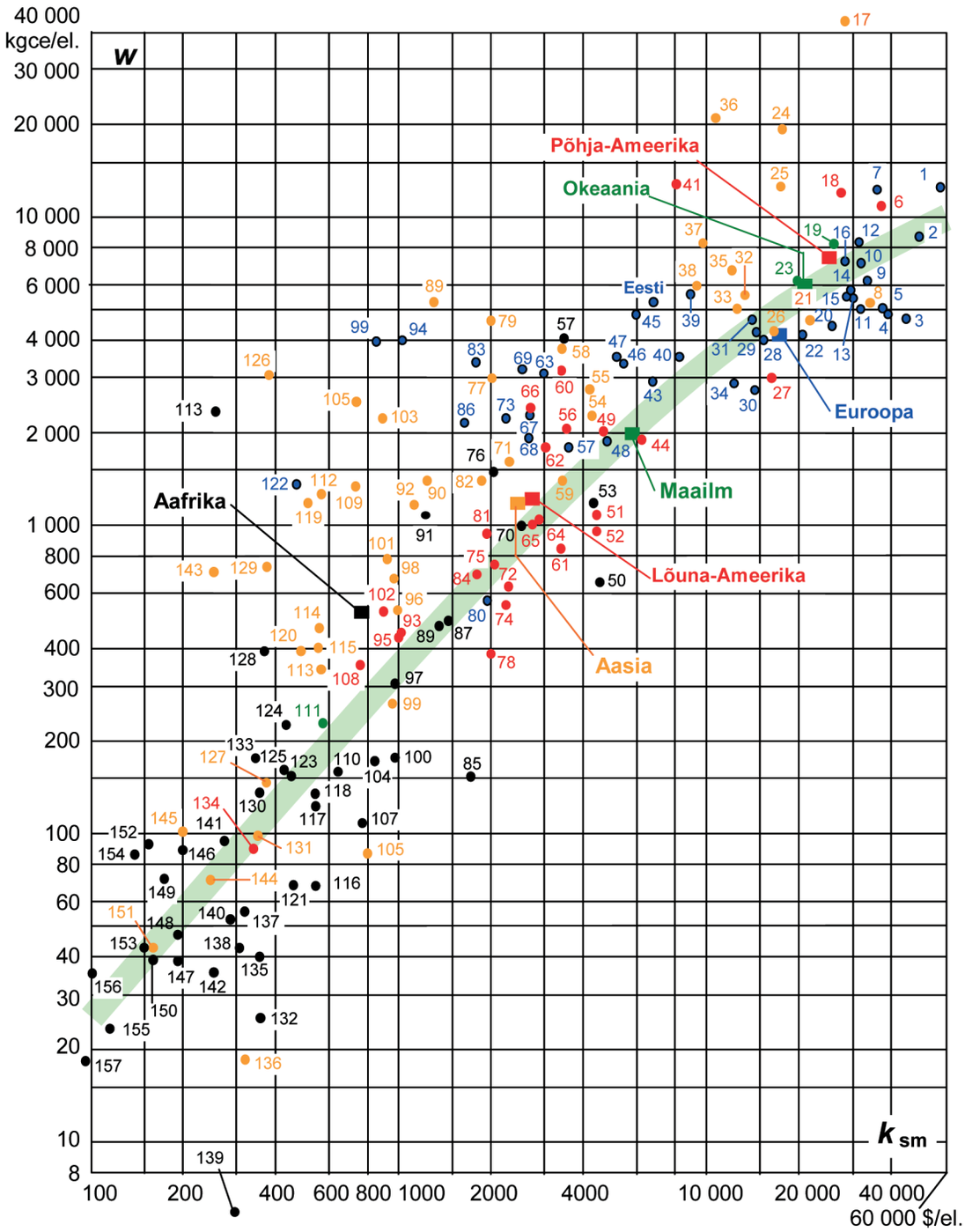
Elektrienergiat tarbiti maailmas 2003. aastal keskmiselt 2,57 MWh inimese kohta. Ka see näitaja oli Põhja-Ameerikas, Okeaanias ja Euroopas kaugelt kõrgem kui Lõuna-Ameerikas, Aasias ja Aafrikas. Eriti kõrge on see maades, kus odavat, nt hüdrojaamadest saadavat elektrienergiat saab ulatuslikult kasutada mitte üksnes elektrimahukates tootmis-



Joonis 1.5.1. Kaubalise energia tarbimine elaniku kohta aastal 2003.
Esitatud on riigid, milles see näitaja on vähemalt kaks korda kõrgem kui maailma keskmine



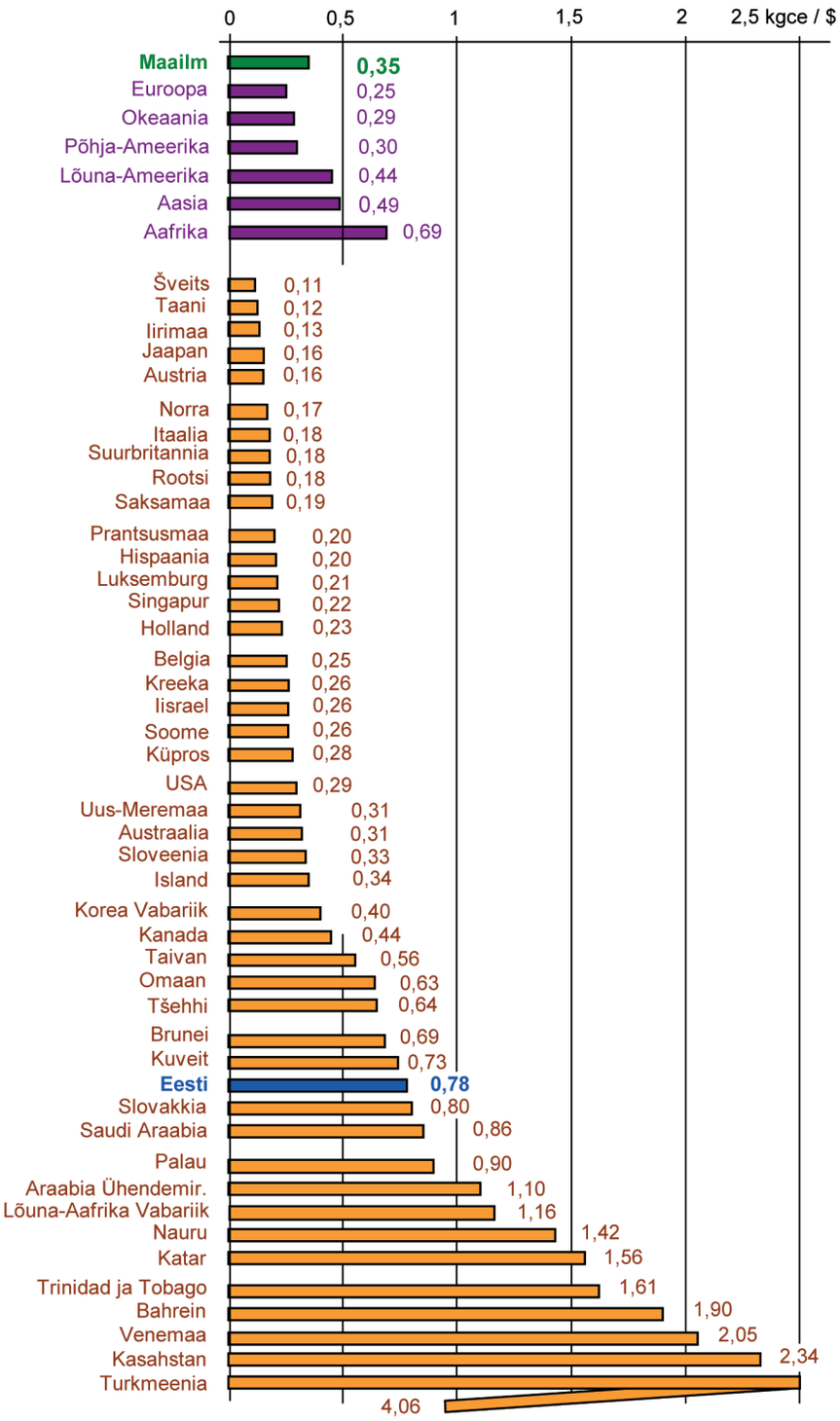
Joonis 1.5.2. Sisemajanduse kogutoodangu väärtus elaniku kohta aastal 2003. Esitatud on riigid, milles see näitaja on vähemalt kaks korda kõrgem kui maailma keskmine



Joonis 1.5.3. Kaubalise energia eritarbimise w ja sisemajanduse eri-kogutoodangu väärtuse k_{sm} vahekord aastal 2003 elaniku kohta. Numbertähiste selgitus vt tabel 1.5.1

Tabel 1.5.1. Joonisel 1.5.3 kasutatud numbertähiste selgitus

1	Luksemburg	54	Liibanon	107	Kamerun
2	Norra	55	Malaisia	108	Nicaragua
3	Šveits	56	Argentina	109	Korea RDV
4	Taani	57	Lõuna-Aafrika Vabariik	110	Senegal
5	Iirimaa	58	Liibüa	111	Paapua-Uusguinea
6	USA	59	Türgi	112	Iraak
7	Island	60	Venezuela	113	Jeemen
8	Jaapan	61	Uruguay	114	India
9	Rootsi	62	Jamaika	115	Pakistan
10	Holland	63	Venemaa	116	Komoorid
11	Austria	64	Kuuba	117	Sudaan
12	Soome	65	Brasiilia	118	Benin
13	Suurbritannia	66	Suriname	119	Mongoolia
14	Prantsusmaa	67	Rumeenia	120	Vietnam
15	Saksamaa	68	Serbia ja Montenegro	121	Guinea
16	Belgia	69	Bulgaaria	122	Moldova
17	Katar	70	Tuneesia	123	Keenia
18	Kanada	71	Tai	124	Nigeeria
19	Austraalia	72	El Salvador	125	Sambia
20	Itaalia	73	Makedoonia	126	Usbekistan
21	Singapur	74	Peruu	127	Bangladesh
22	Hispaania	75	Ecuador	128	Mauretaania
23	Uus-Meremaa	76	Alžeeria	129	Kirgiisia
24	Araabia Ühendemiraadid	77	Iraan	130	Gaana
25	Kuveit	78	Guatemala	131	Laos
26	Iisrael	79	Kasahstan	132	Mali
27	Bahama	80	Albaania	133	Togo
28	Kreeka	81	Dominikaani Vabariik	134	Haiti
29	Küpros	82	Jordaania	135	Burkina Faso
30	Portugal	83	Valgevene	136	Kambodža
31	Sloveenia	84	Kolumbia	137	Madagaskar
32	Brunei	85	Kap Verde	138	Kesk-Aafrika Vabariik
33	Korea Vabariik	86	Bosnia ja Hertsegoviina	139	Tšaad
34	Malta	87	Marokko	140	Tansaania
35	Taivan	88	Zimbabve	141	Gambia
36	Bahrein	89	Turkmeenia	142	Uganda
37	Saudi Araabia	90	Süüria	143	Tadžikistan
38	Omaan	91	Egiptus	144	Nepaal
39	Tšehhi	92	Hiina	145	Myanmar
40	Ungari	93	Paraguay	146	Mosambik
41	Trinidad ja Tobago	94	Ukraina	147	Ruanda
42	Eesti	95	Honduras	148	Niger
43	Horvaatia	96	Filipiinid	149	Eritrea
44	Mehhiko	97	Angoola	150	Malavi
45	Slovakkia	98	Indoneesia	151	Afganistan
46	Poola	99	Sri Lanka	152	Guinea-Bissau
47	Leedu	100	Kongo Vabariik	153	Sierra Leone
48	Läti	101	Armeenia	154	Libeeria
49	Tšiili	102	Boliivia	155	Kongo DV
50	Gabun	103	Aserbaidžan	156	Etioopia
51	Costa Rica	104	Elevandiluurannik	157	Burundi
52	Panama	105	Bhutan		
53	Mauritius	106	Gruusia		



Joonis 1.5.4. Kaubalise energia tarbimine sisemajanduse kogutoodangu väärtuse ühiku kohta aastal 2003 joonisel 1.5.1 esitatud maades

protsessides ja elektriraudteedel, vaid ka hoonete kütteks (Island, Norra, Kanada, Rootsi). Euroopa Liidus (sealhulgas Eestis) ja muudes tööstuslikult arenenud regioonides ning naftat tootvates maades on elektritarbimine inimese kohta enamasti 2…6 korda kõrgem kui maailma keskmine. 41 riiki, milles elektrienergia tarbimine elaniku kohta oli aastal 2003 üle 2 korra kõrgem kui maailma keskmine, on esitatud joonisel **1.5.5**. Nagu juba öeldud, võib elektrienergia kõrge eritarbimine olla tingitud

- elektrimahukatest tootmisprotsessidest tööstuses (elektrometallurgia, elektrokeemiatööstus jms),
- raudteede ja linnatranspordi ulatuslikust elektrifitseerimisest,
- kõigi rahvamajandusharude ja olme kõrgest elektrifitseerimistasemest,
- elekterkütte ulatuslikust rakendamisest.

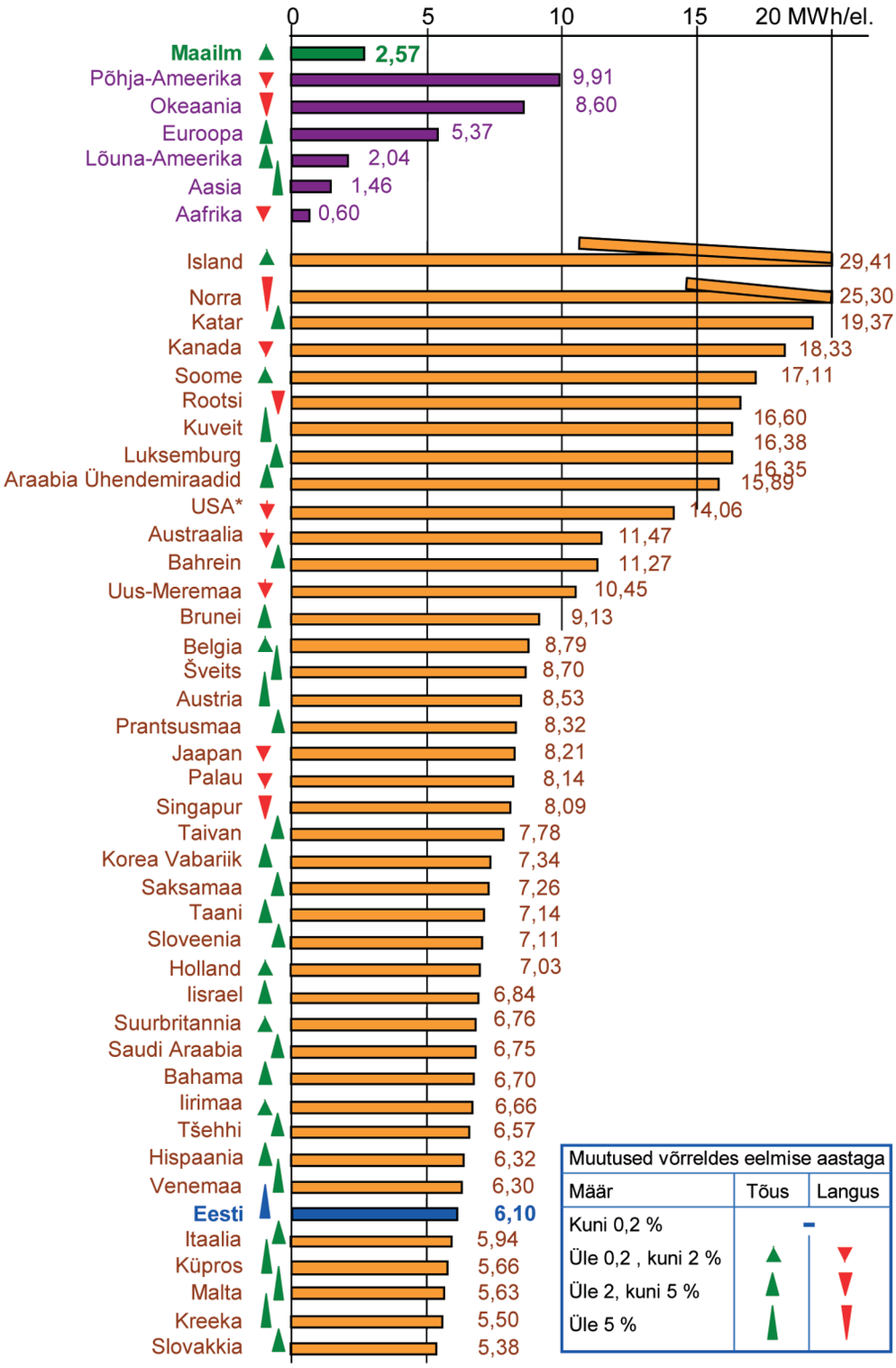
Elektrienergia eritarbimist võivad aga suurendada ka

- elektrienergia eksport, kuna elektrijaamade selle tõttu suurenenud omatarve ja elektrienergia edastuskaod lähevad arvesse riigisisese elektritarbimisena,
- elektrienergia ebaratsionaalne kulutamine ja suured kaod.

Eestis on suhteliselt kõrge elektrienergia eritarbimine tingitud peamiselt kõigi rahvamajandusharude ja olme suhteliselt hästi arenenud elektrifitseerimistasemest. Kuni Eesti iseseisvuse taastamiseni mõjutas seda ka elektrienergia andmine Venemaa loodeosa (eeskätt Leningradi ja Pihkva oblasti) elektrivajaduse rahuldamiseks, mis oli kuni 60 % Eesti elektrijaamade kogutoodangust ja mis vastavalt suurendas elektrijaamade omatarvet ning elektrienergia edastuskadusid.

Eesti elektroenergeetika nagu ka kogu rahvamajandus arenes väga jõudsalt 1930ndail aastail (vt joonis **1.4.5**). Aastaks 1939 oli elektrienergia tootmine kasvanud võrreldes 1919. aastaga 10-kordseks. Aastal 1940 areng seiskus, järgnesid sõjapurustused, kuid sõjaeelne tase taastati juba aastal 1946. Ka NSV Liitu kuulumise ajal oli areng kiire, mis eriti oli tingitud kahe suure, NSV Liidu loodeosa jaoks suurt tähtsust omava põlevkivielektrijaama rajamisest: aastail 1946–1978 suurenes elektrienergia toodang 100 korda. Pärast taasiseseisvumist on elektrienergia tootmise ja tarbimise tase olnud 10 aasta jooksul peaaegu stabiilne, aastal 2006 on aga alanud märkimisväärsem tõus.

Maailmas on maid, mille elektrifitseerimistase on peaaegu olematu ja milles elektrienergia tarbimine inimese kohta on mitusada korda väiksem kui maailma keskmine. Eelpool juba nimetatud Tšaadis tarbiti aastal 2003 elektrienergiat näiteks ainult 11 kWh inimese kohta.



Joonis 1.5.5. Elektrienergia tarbimine elaniku kohta aastal 2003.
Esitatud on riigid, milles see näitaja on vähemalt kaks korda kõrgem kui maailma keskmine

* Ilma elektrijaamade omatarbeta

2 Energia muundamine

2.1 Üldmõisted 38
2.2 Aurugeneraatorid (aurukatlad) 41
2.3 Auruturbiinid 49
2.4 Gaasiturbiinid 53
2.5 Kolbmootorid 55
2.6 Kütuseelemendid 59
2.7 Magnetohüdrodünaamilised generaatorid 63
2.8 Tuumareaktorid 64
2.9 Hüdroturbiinid 72
2.10 Tuuleturbiinid 75
2.11 Fotoelektrilised muundurid 78
2.12 Elektrimasingeneraatorid 81
2.13 Elektrimootorid 85
2.14 Muud elektrimuundurid 87
2.15 Soojusvahetid ja -transformaatorid 90

2 ENERGIA MUUNDAMINE

2.1 ÜLDMÕISTED

Inimene vajab oma tegevuses kõiki energialiike – mehaanilist energiat sõidukite ja mehhanismide liikumapanekuks, soojust ruumide kütteks, kiirgusenergiat valgustuseks jne. Mõnikord saab vajalikku liiki energiat otse loodusest nagu näiteks päikesekiirgust valgustuseks ja veesoojenduseks, tuult purjelaevadele, jõgede veevoolu palkide parvetamiseks või vesiveskite käitamiseks ja kuumaveeallikaid hoonete kütteks. Enamasti tuleb aga mingi loodusest saadav energia (nt kütuses sisalduv keemiline energia) muundada vastavalt kasutamisotstarbele muud liiki energiaks. Sellekohaseid muundamisseadmeid, -vahendeid ja -paigaldisi nimetatakse **energiamuunduriteks**.

Energiamuundurid võivad olla ette nähtud

- ühe energialiigi muundamiseks teiseks,
- ühesama energialiigi iseloomulike omaduste (*parameetrite*) muutmiseks.

Lihtsamais muundureis on muundusprotsess üheastmeline, keerukamais võib astmeid olla rohkem.

Energia pidev muundumine, nagu näitab jaotises **1.2** esitatud joonis **1.2.1** (Maa energiabilanss) toimub ka looduses – Maale langev päikesekiirgus muundub osalt soojuseks, osalt tuule- ja osalt hüdroenergiaks, osalt aga salvestub keemilise energiana; Kuu tiirlemisenergia muundub osalt Maa merede tõusu- ja mõõnaenergiaks, maasisene tuumaenergia soojuseks jne.

Muundusprotsesside lihtsaks ning piltlikuks kujutamiseks kasutatakse sellekohaseid *põhimõtteskeeme*, milles muundureid ja muid tehnilisi seadmeid tähistatakse vastavate *tingmärkidega*. Tehnilise seadme üldiseima tingmärgina kasutatakse ruutu, mida tarbe korral täiendatakse seadme ehitust või otstarvet näitavate sümbol-, täht- või numbertähistega [2.1]; seadmete veelgi selgemaks eristamiseks üksteisest võidakse kasutada värve (joonis **2.1.1**).

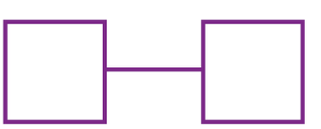
Seadmete omavahelist sidestamist tähistatakse enamasti sirgjoontega (joonis **2.1.2**).

Pöörlevaid masinaid tähistatakse ringikujulise tingmärgiga (joonis **2.1.3**).

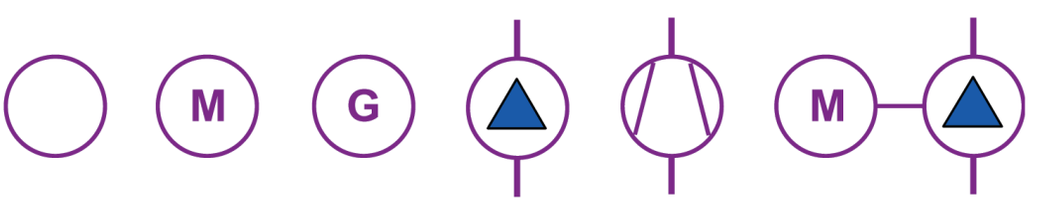
Ringiga tähistatakse mõnikord ka elektriseadmete (nt trafode) mähiseid.

Seadmesse võidakse anda ja seadmest võidakse saada mingit materjali, energiat, informatsiooni või tooteid. Vastavalt sellele võib seadmel olla üks või mitu ***sisendit*** ja üks või mitu ***väljundit***, mida enamasti tähistatakse nooltega (joonis **2.1.4**).

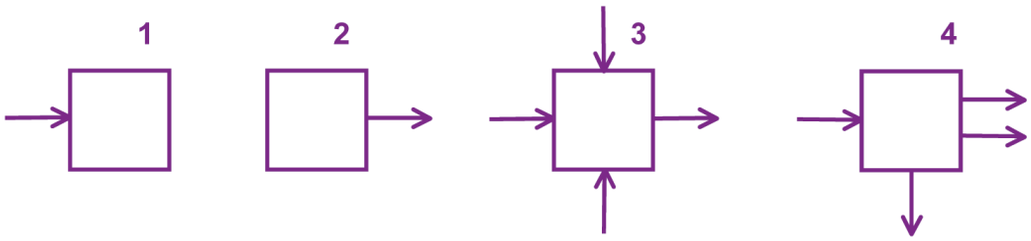
Joonis 2.1.1. Üldtingmärke: vasakul täpsemalt määratlemata tehniline seade, keskel vahelduvvooluseade, paremal tingmärgi värvilise esitusviisi näide



Joonis 2.1.2. Kaks omavahel sidestatud seadet



Joonis 2.1.3. Pöörlevate masinate tähiseid. Vasakult paremale: üldtähis, mootor, generaator, pump, ventilaator (puhur), mootorist ja pumbast koosnev agregaat

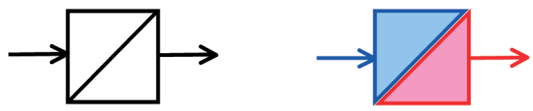


Joonis 2.1.4. Seadme sisendi (*1*), väljundi (*2*), mitme sisendi (*3*) ja mitme väljundi (*4*) kujutamise näiteid

Muundurit tähistatakse seadme tingmärgis diagonaaljoonega. Värvilistel skeemidel võivad muunduri sisend- ja väljundpool olla tähistatud eri värvidega (joonis **2.1.5**).

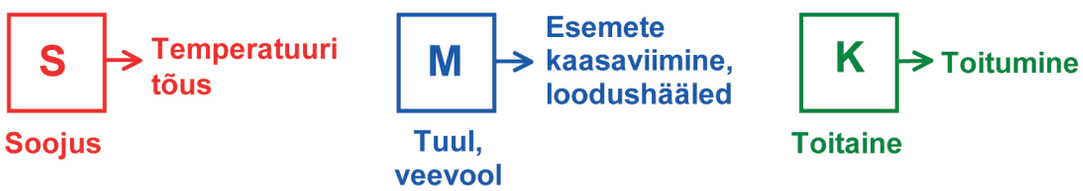
Energiamuundurite tingmärkides tähistatakse energia liiki enamasti mingite kokkulepitud tähtedega. Käesolevas raamatus kasutatakse näiteks tähti

E – elektrienergia,
K – keemiline energia,
M – mehaaniline energia
R – kiirgusenergia,
S – soojus,
T – tuumaenergia

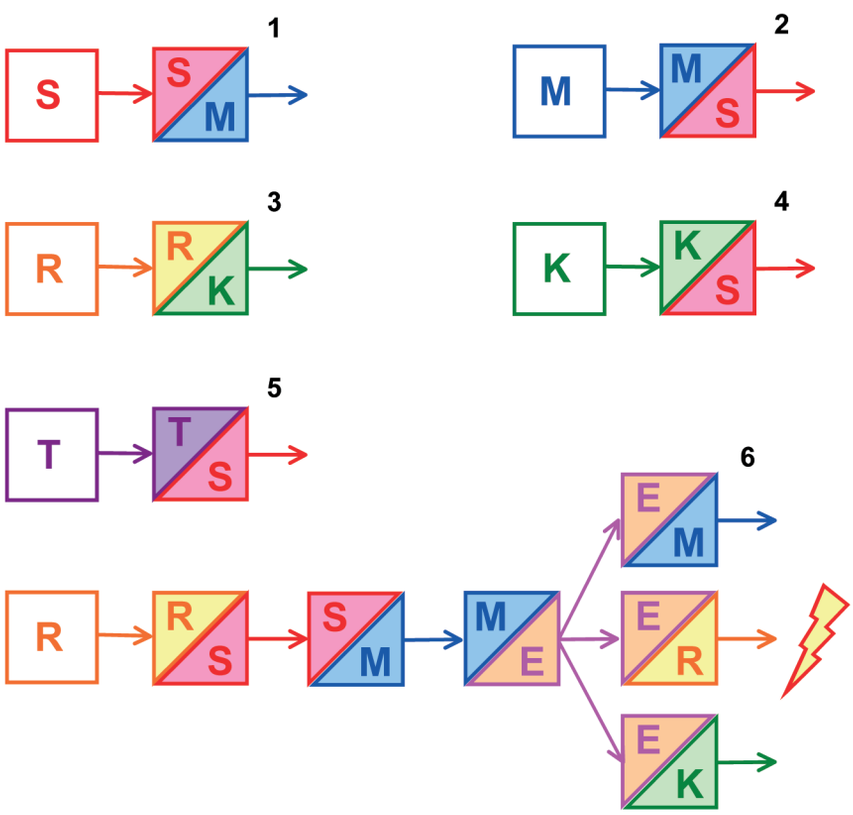


Joonis 2.1.5. Muunduri tähistamise näiteid must-valgetel (vasakul) ja värvilistel (paremal) skeemidel

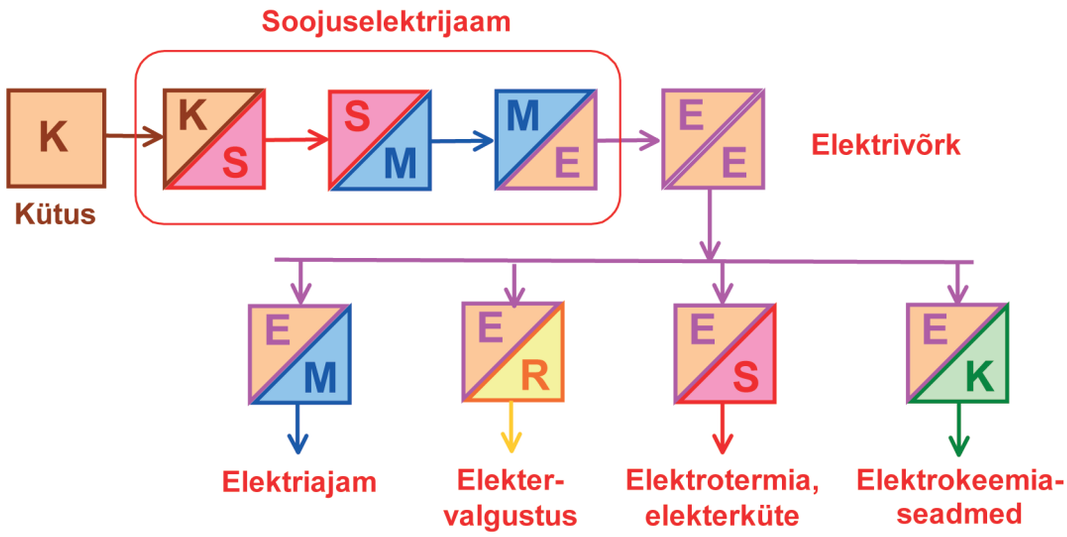
Ülaltoodud tingmärke saab kasutada ka energia looduslike avaldumis- ja muundusprotsesside abstraktseks kujutamiseks nagu näiteks joonistel **2.1.6**. ja **2.1.7**.



Joonis 2.1.6. Energia otsese avaldumise ja toime näiteid looduses



Joonis 2.1.7. Energia muundumise näiteid looduses.
1 **soojuse muundumine õhu või vee liikumise mehaaniliseks energiaks,**
2 **mehaanilise (nt hõõrdumis-) energia muundumine soojuseks,**
3 **Päikese kiirgusenergia muundumine fotosünteesi teel keemiliseks energiaks,**
4 **keemilise energia muundumine nt orgaanilise aine põlemisel soojuseks,**
5 **Maa koostisse kuuluvate radioaktiivsete elementide tuumaenergia muundumine soojuseks (geotermaal-energiaks),**
6 **äikest iseloomustav energiamuundumisahel**



Joonis 2.1.8. Energiamuundamisahel elektrienergia saamisel ja kasutamisel (näide)

Inimtegevuses kasutatakse väga mitmesuguseid energiamuundamisviise. Muundamise eesmärk võib seisneda näiteks

- uue, rakendamiseks sobivaima energialiigi saamises,
- energia paremas edastamises,
- energia paremates jaotamisvõimalustes,
- energia paremas salvestamises,
- energiatarbimisseadmete (*energiatarvitite*) paremas reguleeritavuses.

Kõiki neid nõudeid rahuldab sageli kõige paremini **elektrienergia**, mistõttu käesolevas kursuses vaadeldakse peamiselt selle energialiigi saamise ja kasutamise viise. Vastava energiamuundamisahela üks võimalikest näidetest on esitatud joonisel **2.1.8**.

Energiamuunduri tähtsaimad tunnussuurused on **sisend-** ja **väljundvõimsus**, mida tähistatakse enamasti vastavalt tähtedega $\boldsymbol{P_1}$ ja $\boldsymbol{P_2}$ [2.2]. Väljundvõimsuse teatavat projekteerimisel etteantud, enamasti kestval talitlusel lubatavat väärtust nimetatakse muunduri ***nimivõimsuseks***.

Sisendvõimsuse $\boldsymbol{P_1}$ ja väljundvõimsuse $\boldsymbol{P_2}$ vahe on muundurisisene *kaovõimsus*

$$\Delta P = P_1 - P_2.$$

(vt joonis **2.1.9**), väljund- ja sisendvõimsuse suhe aga muunduri ***kasutegur***

$$\eta = P_2 / P_1.$$

Peale sisend- ja väljundvõimsuse kasutatakse teisigi muundurit iseloomustavaid sisend- ja väljundparameetreid (elektrimuundurite korral nt sisend- ja väljundpinget, sisend- ja väljundvoolu, sisend- ja väljundsagedust).

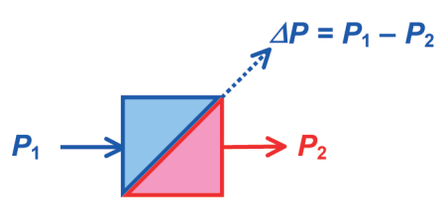
Muundurite valikul on oluline teada ka nende mõõtmeid, massi, maksumust, töökindlusnäitajaid, eluiga, käidukulusid ja mitmesuguseid kõrvaltoimeid. Muundurite omavahelisel võrdlemisel kasutatakse sageli mitmesuguseid ***erinäitajaid*** nagu nt

- nimivõimsust massiühiku kohta $\boldsymbol{P_n / m}$,
- nimivõimsust ruumalaühiku kohta $\boldsymbol{P_n / V}$,
- maksumust nimivõimsuse ühiku kohta $\boldsymbol{C / P_n}$

  ja muid taolisi.

Energia muundamisviiside valikul arvestatakse alati ka nende *majanduslikkust*. Teiste sõnadega, muundamine peab olema *tasuv*.

Majanduslikkus ei tähenda *odavust*, vaid enamasti muundusseadme kõigi soetamis-, kasutamis-, hooldamis-, energia-, materjali-, tööjõu- ja muude kulude vähimat võimalikku summat muunduri kogu kasutusaja (eluea) kestel.



Joonis 2.1.9. Muunduri sisend-, väljund- ja kaovõimsus

2.2 AURUGENERAATORID (AURUKATLAD)

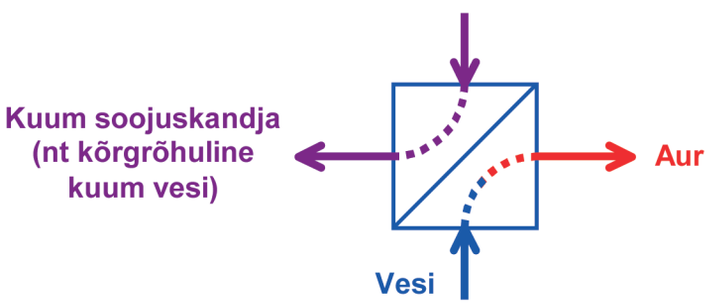
Aurugeneraator ehk **aurukatel** on energiamuundur, milles keemilist, soojus-, kiirgus- vm energiat kasutatakse atmosfäärirõhust kõrgema rõhuga auru (enamasti **veeauru**) tootmiseks [2.3]. Kui aurugeneraator põhineb mingi kütuse põletamisel või sarnaneb sellisega, nimetatakse seda ***aurukatlaks***. Saadava auruga, olenevalt selle temperatuurist ja rõhust, võidakse edastada nii soojust kui ka mehaanilist energiat.

Lihtsaimas aurugeneraatoris saadakse soojust läbikulgevalt kuumalt, enamasti vedelalt ***soojuskandjalt*** (joonis **2.2.1**). Kuna sellisesse aurugeneraatorisse sisestatakse ja sellest väljastatakse soojust, loetatakse sellised seadmed tihti ***soojusvahetite*** hulka kuuluvaiks, kasutades nende kohta (eriti suhteliselt madalate keemistemperatuuride korral) nimetust ***aurusti***.

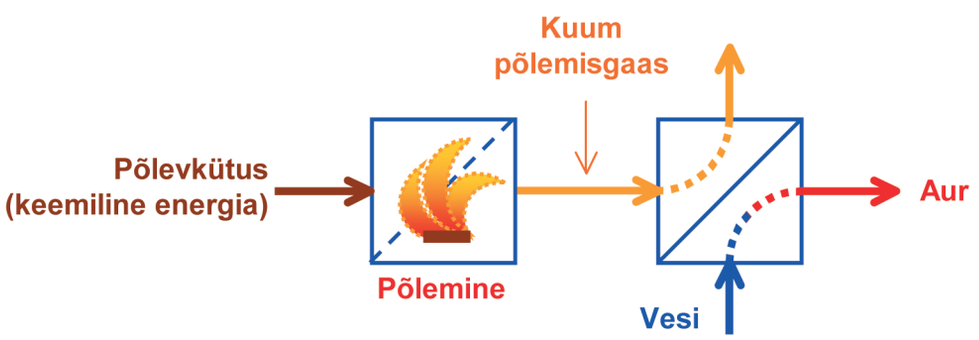
Enamasti muundatakse aga mingit muud liiki energia (nt kütuse keemiline energia) eelnevalt soojuseks (joonis **2.2.2**).

Nagu juba öeldud, põhinevad aurugeneraatorid enamasti **vee** kasutamisel. Vesi on odav, kättesaadav, ei kahjusta keskkonda ning selle erisoojus on suurem kui muudel kõne alla tulevatel vedelikel. Temperatuuril 20 °C on see teatavasti **4,2 kJ/(kg K)**.

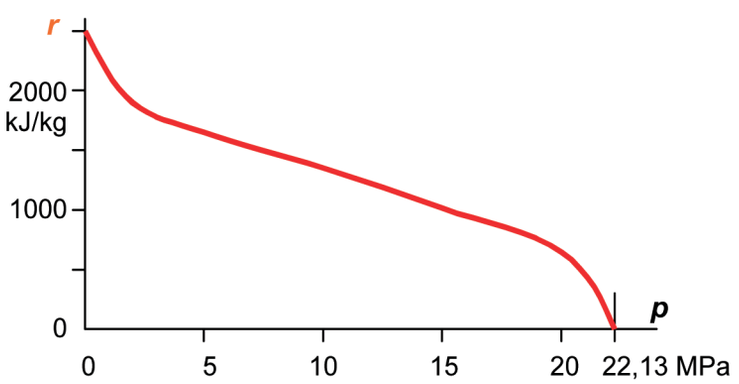
Vee aurustumissoojus on atmosfäärirõhul (101,325 kPa) **2260 kJ/kg**. Rõhu suurenemisel aurustumissoojus väheneb ja on *kriitilisel rõhul* (22,13 MPa) null (vt joonis **2.2.3**); alates kriitilisest rõhust kaob erinevus auru ja vee vahel.



Joonis 2.2.1. Lihtsaima aurugeneraatori põhimõtteskeem



Joonis 2.2.2. Kütuse põletamisel põhineva aurugeneraatori (aurukatla) põhimõtteskeem



Joonis 2.2.3. Vee aurustumissoojuse *r* olenevus rõhust *p*

Soojushulga, erisoojuse ja aurustumissoojuse mõisted võttis kasutusele aastal 1763 Glasgow' ülikooli anatoomia- ja keemiaprofessor Joseph Black (1728–1799).

Aurustumisel tekkinud aur on *küllastatud* ja selle energiasisaldus on suhteliselt väike. Et saada suurema energiasisaldusega auru, tuleb seda ***ülekuumendada***. Seega toimub energia edastamine aurule, kui rõhk on alla kriitilise, kolme astmena:

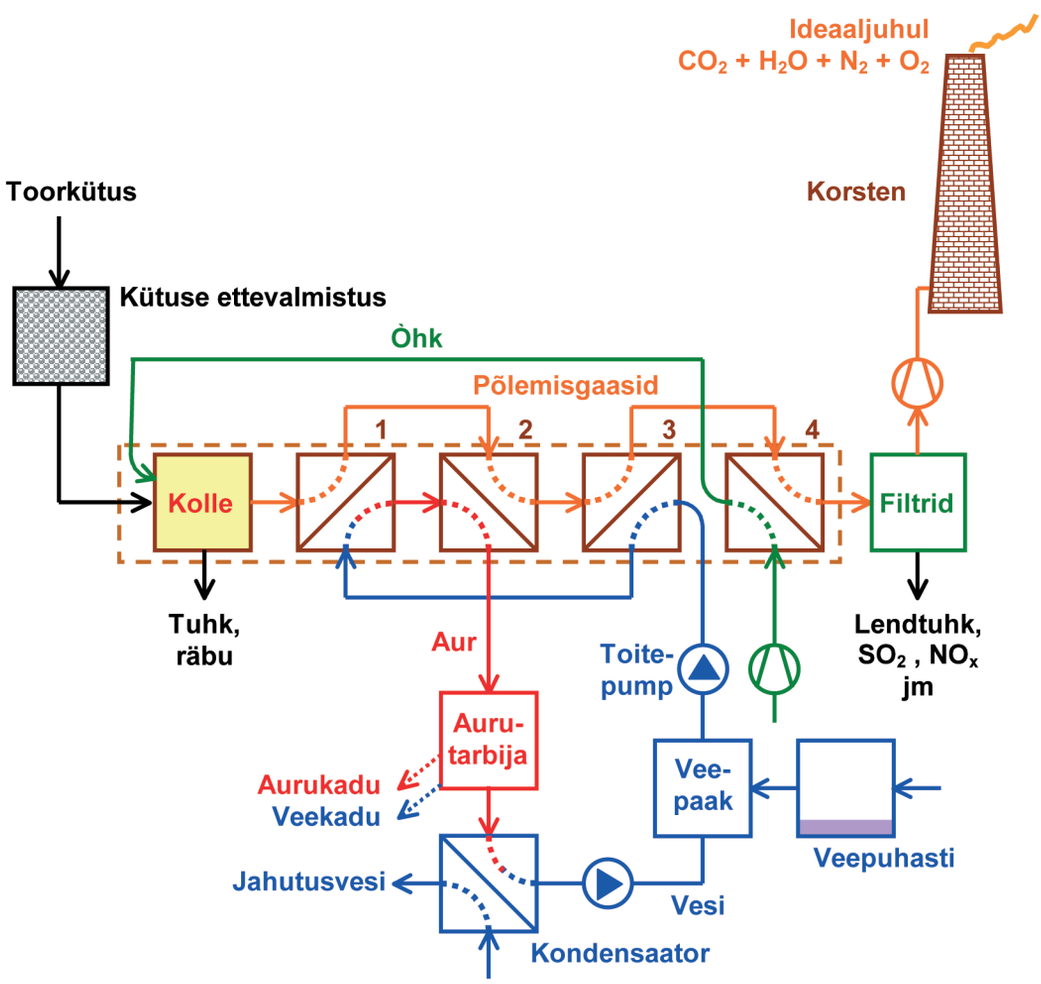
- vee kuumendamine keemistäpini,
- vee aurustamine,
- auru ülekuumendamine.

  Piltlikult on see kujutatud joonisel **2.2.4.**

Kütuse põletamisel põhinevaid aurugeneraatoreid (***aurukatlaid***) on väga mitmesuguse ehitusega. Joonisel **2.2.5** on kujutatud soojuselektrijaamades ja linnade kaugküttekatlamajades kasutatava katelagregaadi üks sagedaimini kasutatavatest põhimõtteskeemidest. Agregaat koosneb järgmistest osadest:

- kolle ja gaasikäigud, milles paiknevad vee- ja aurutorudest moodustatud ***küttepinnad***,
- vee eelsoojendi ehk *ökonomaiser* (ingl *economizer*, 'kokkuhoidu andev seadis') milles kasutatakse põlemisgaaside soojust katla toitevee ettesoojendamiseks,

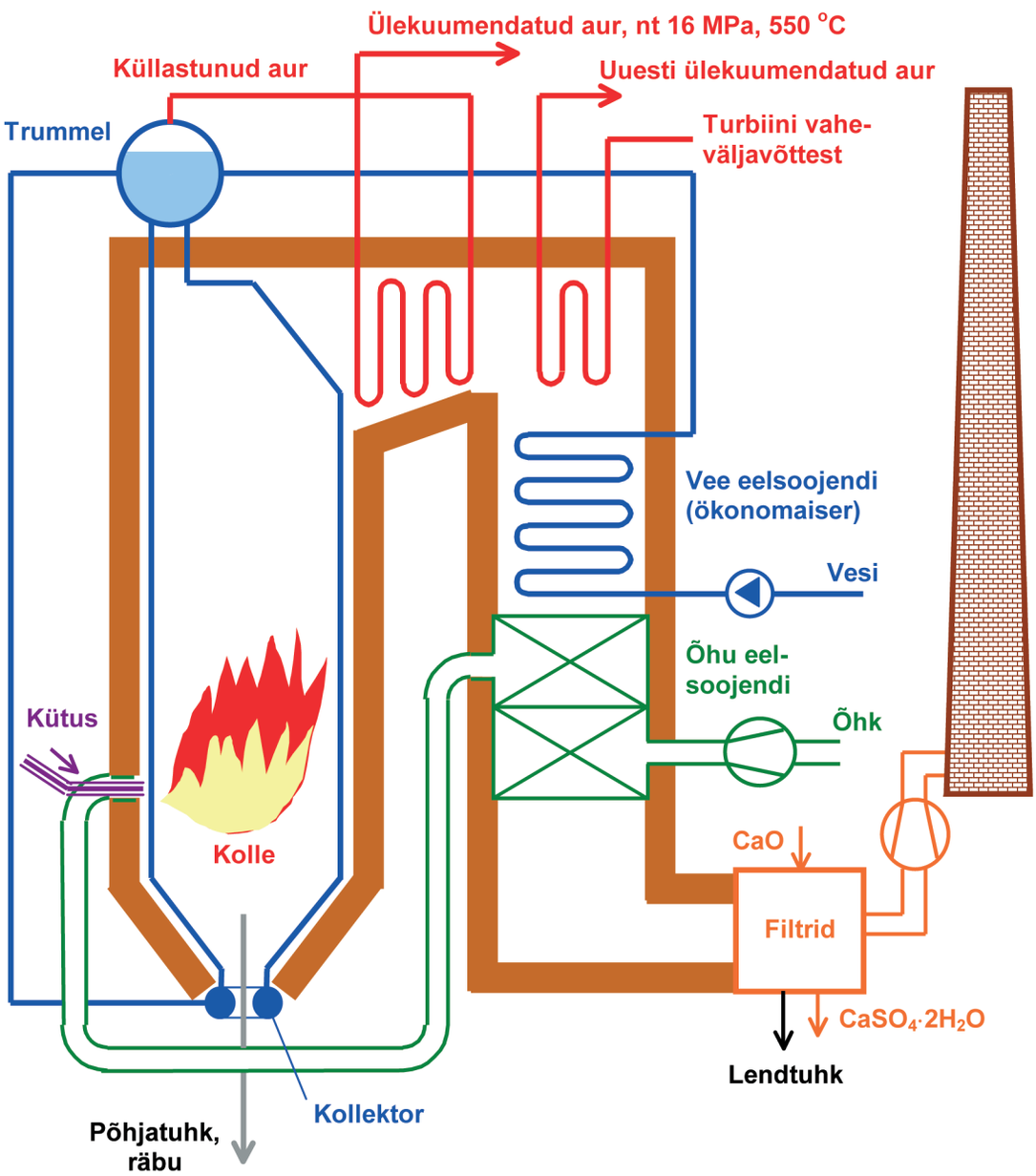
Joonis 2.2.4. Soojuse kulu ülekuumendatud alakriitilise auru tootmisel aurugeneraatoris



Joonis 2.2.5. Tööstusliku aurukatelagregaadi ja auru tarbimise põhimõtteskeem (näide).
***1* kolde küttepinnad, *2* auru ülekuumendi, *3* vee eelsoojendi, *4* õhu eelsoojendi**

- õhu eelsoojendi, milles kasutatakse põlemisgaaside vähenenud, kuid siiski veel piisavalt kõrget temperatuuri koldesse juhitava õhu ettesoojendamiseks,
- filtersüsteem, milles mehaaniliste, elektriliste ja keemiliste meetodite rakendamise teel eraldatakse põlemisgaasidest kekkonnakahjulikud ained (eeskätt lendtuhk, vääveldioksiid SO_2 ja lämmastikoksiidid),
- koldes ja gaasikäikudes tekkiva tuha ja räbu ärastamisseadmestik,
- toiteveepump, õhu- ja tõmbeventilaator,
- kütuse ettevalmistusseadmed (nt tahke kütuse veskid),
- küttepindade puhastamisseadmed,
- automaatreguleerimis-, mõõte- ja signalisatsiooniseadmed,
- kaitseseadmed,
- mitmesugused muud abiseadmed.

Loomuliku tsirkulatsiooniga, alakriitiliste aurupa-rameetritega aurukatla üks võimalikest ehitusviisidest on skemaatiliselt esitatud joonisel **2.2.6**. Kolde ehitus vastab tolm-, vedel- või gaaskütuse põletamisele. Vee aurustamiseks vajalik küttepind koosneb kolde seintele paigaldatud püstsetest rööbitistest aurustustorudest (*ekraantorudest*). Alt on torud omavahel ühendatud ***kollektoriga***, ülal suubuvad nad ***trumlisse***, mis on seadistatud ***auruseparaatoriga***. Kuna ühel läbikäigul muutub torus auruks ainult 5…12 % veest, on trumli ja kollektori vahel

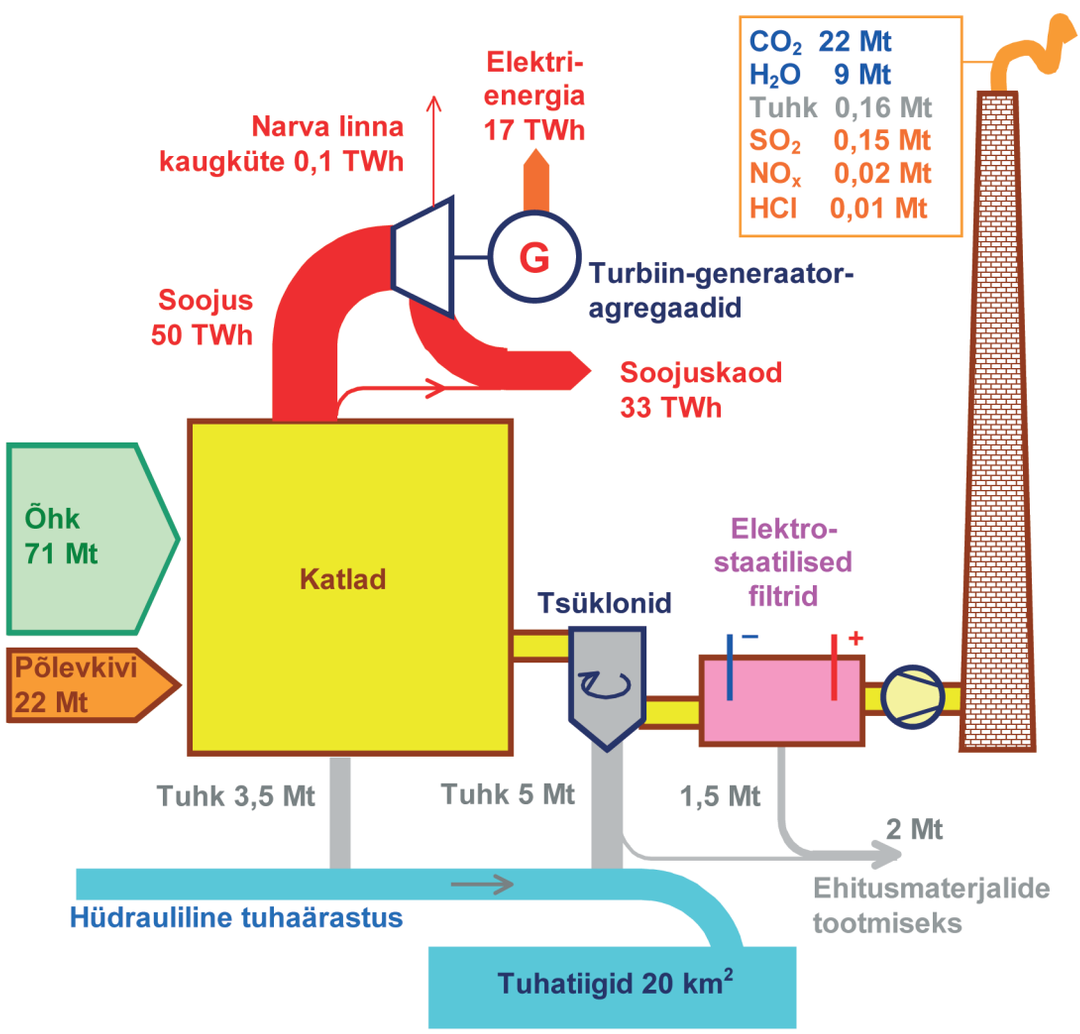


Joonis 2.2.6. Loomuliku tsirkulatsiooniga trummel-aurukatla ehituspõhimõte

ette nähtud pidev loomulik ***veeringlus***. Suhteliselt harva kasutatakse sel otstarbel ka sellekohast ringlus- (tsirkulatsiooni-) pumpa. Trumlist väljuv küllastunud (niiske) aur juhitakse auru ülekuumendisse ja seejärel aurutorustiku kaudu aurutarbijaile.

Ülekuumendi lõpuosas on auru temperatuuri automaatregulaator (joonisel näitamata), mis põhineb sellel, et vajaduse korral pritsitakse aurutorustikus kulgevasse auru (tavaliselt mitmes punktis) vett. Järelküttepindu, nagu näidatud ka joonisel **2.2.5**, kasutatakse vee ja õhu eelsoojendamiseks. Põlemisgaaside soojus kasutatakse seega ära suurimal võimalikul määral, mistõttu aurukatla kasutegur on enamasti 90…93 %. Filtrid kahjulike ainete eraldamiseks põlemisgaasidest on tinglikult näidatud ühtse kompleksina. Tegelikult võivad nad paikneda aurukatla gaasikäikude eri kohtades, sest näiteks lämmastikoksiidide ja kloori konverteerimine teisteks ühenditeks vajab kõrgemat temperatuuri. Vääveldioksiidi saab kõige lihtsamalt eraldada, nagu näidatud joonisel **2.2.6**, põletatud lubja CaO abil, mis ühineb vääveldioksiidi ja veega kipsiks $CaSO_4 \cdot 2H_2O$. On aga teisigi võimalusi, sealhulgas kaubalise väävelhappe H_2SO_4 ja väetisena kasutatava ammooniumsulfaadi $(NH_4)_2SO_4$ tootmine. Lendtuhk, mida eriti palju tekib pruunsöe ja põlevkivi põletamisel, eraldatakse põlemisgaasidest tsentrifuugimisega (*tsüklonite* abil) ja kõrgepingeliste elektrostaatiliste filtritega. Koldest ja gaasikäikudest väljuva tuha ärastamine võib toimuda veega, nagu näiteks Eesti põlevkivielektrijaamades, või kuivalt, mis enamasti on keskkonnasäästlikum.

Võimsates soojuselektrijaamades võib heitmete kogus olla vägagi suur. Joonisel **2.2.7** on näitena esitatud Eesti põlevkivielektrijaamade summaarne kütuse-, heitme- ja energiabilanss aastal 1990, mil need elektrijaamad töötasid suurima võimsusega, kusjuures suitsugaaside puhastamiseks ei kasutatud keemilisi filtreid. Mehaaniliste (tsentrifugaal- ehk *tsüklon*-) ja elektrostaatiliste filtrite abil eraldati



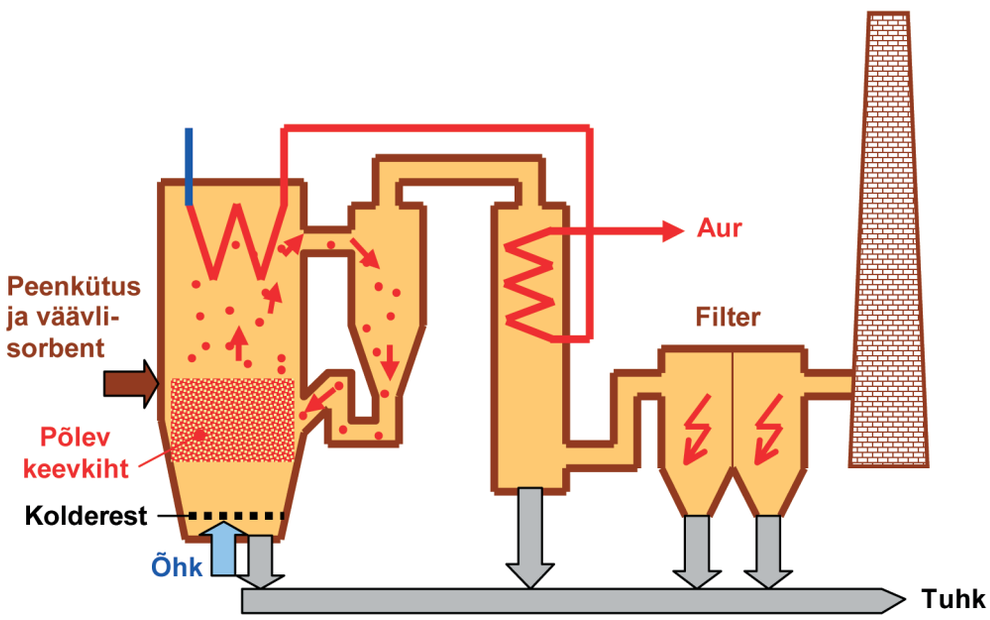
Joonis 2.2.7. Eesti põlevkivielektrijaamade aastane kütuse-, heitme- ja energiabilanss aastal 1990

üksnes lendtuhk [2.4]. Selle aja omapärasus seisnes veel ka selles, et filtritest saadavat peent tuhka kasutati tuhktsementplokkide ja muude ehitusmaterjalide valmistamiseks.

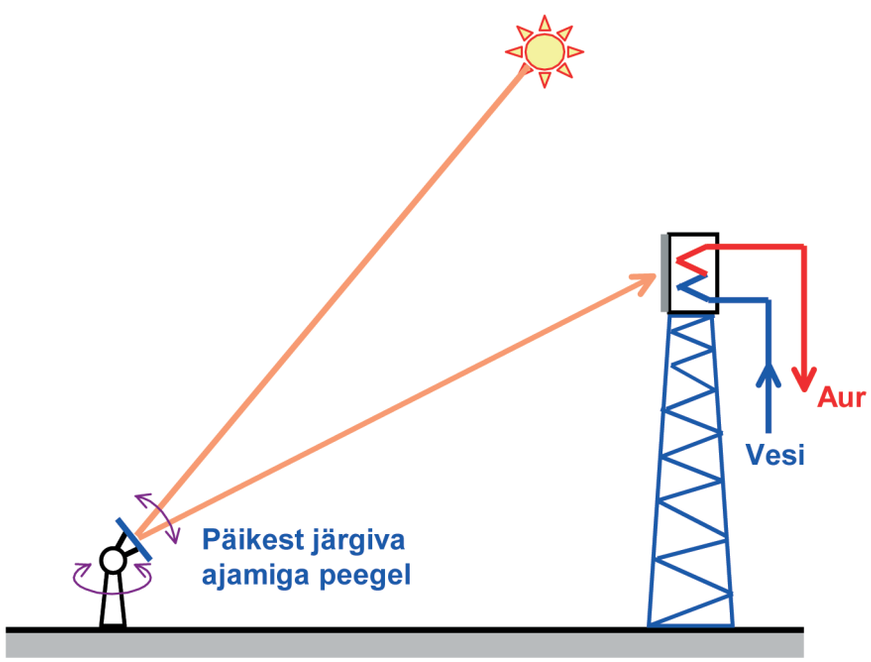
Elektrijaamade aurukateldest väljuva, auruturbiinide toiteks ettenähtud ülekuumendatud auru temperatuur võib olla 450…650 °C, rõhk aga kuni 35 MPa. Nende katelde aurutootlikkus on enamasti vahemikus 10…4000 t/h, mis vastab soojuslikule väljundvõimsusele 3…3500 MW. Keskkütte- ja kaugküttekatlamajade aurukateldes kasutatakse madalamaid aurutemperatuure ja -rõhkusid, soojuslik võimsus jääb neil aga enamasti 100 MW piiridesse.

Trummelkatel ei ole ainus aurukatla liik. Nii näiteks kasutatakse ülekriitiliste auruparameetrite korral trumlita ***otsevoolukatlaid***, mille ehitus tugevasti erineb eelvaadeldust. Ka võib kolde ehitus olla tihti teistsugune – tahket tükk-kütust võidakse põletada restidel, tahket peenkütust aga hõljuvas ***keevkihis*** jne.

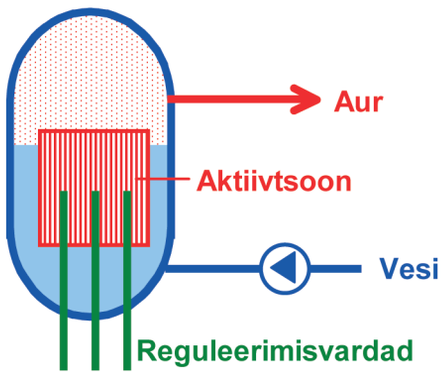
Keevkihtkoldes saavutatakse alttuleva, kolderesti abil ühtlaselt jaotatud õhuga hõljuv tahkest



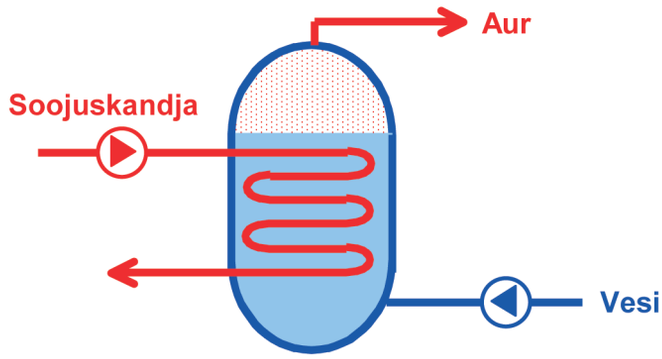
Joonis 2.2.8. Tsirkuleeriva keevkihiga aurukatla põhimõtteline ehitus (tugevasti lihtsustatult). Vee ja õhu eelsoojendi, pumbad ja ventilaatorid ei ole joonisel näidatud



Joonis 2.2.9. Aurugeneraatori kasutamine torn-päikeseelektrijaamas



Joonis 2.2.10. Keevvesi-tuumareaktori ehituspõhimõte



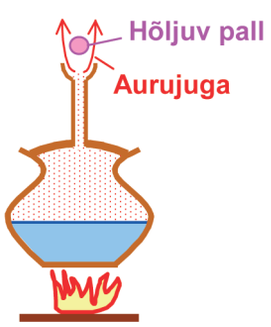
Joonis 2.2.11. Tuuma- ja päikeseelektrijaamades kasutatava aurugeneraatori ehituspõhimõte

peenkütusest (põlevkivi puhul nt osakeste keskmise läbimõõduga ligikaudu 5 mm ja suurima läbimõõduga 40 mm), tuhast ja põlemisgaasist, mõnikord ka liivast koosnev kiht, mis mingil määral sarnaneb keeva vedelikuga (sellest ka nimetus). Keevkihtkollete ja -katlate ehitusviise on väga mitmesuguseid [2.5]. Joonisel **2.2.8** on kujutatud *tsirkuleeriva keevkihiga* kolle, mille põhimõte seisneb selles, et keevkihist eralduvad tahked osakesed suunatakse osaliselt tsüklonkambri kaudu koldesse tagasi.

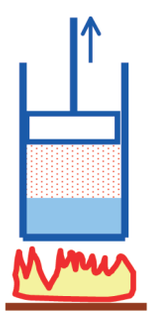
Keevkihis ühineb kütuses sisalduv väävel täielikult kütusele lisatava väävlisorbendiga või (nt põlevkivi puhul) samas kütuses sisalduva kaltsiumiga kaltsiumsulfaadiks, mistõttu ei ole vaja spetsiaalset filtrit vääveldioksiidi eraldamiseks suitsugaasist. Aastal 2004 valmisid Eesti ja Balti elektrijaamas kummaski kaks tsirkuleeriva keevkihiga katelt endiste tolmkütuskatelde asemel. Kumbki katlapaar toidab 215 MW võimsusega auruturbiini.

Peale põlevkütus-aurukatelde on teisigi aurugeneraatorite liike. Torntüüpi päikeseelektrijaamades, mida lähemalt vaadeldakse jaotises **5.7**, kasutatakse näiteks aurugeneraatoreid, mille küttepinda kuumutatakse peeglite (*heliostaatide*) abil kontsentreeritud päikesekiirgusega (joonis **2.2.9**). Peeglite arv sellises elektrijaamas võib ulatuda sadadesse ja tuhandetesse, temperatuur aurugeneraatori kiirgusvastuvõtupinnal on tavaliselt 400…600 °C.

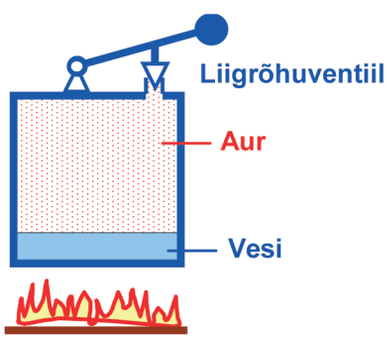
Aurugeneraatoriteks võib lugeda ka tuumaelektrijaamade keevvesireaktoreid (joonis **2.2.10**), mida lähemalt vaadeldakse jaotises **2.8**. Muudest tuumareaktoritest, samuti aga ka päikeselektrijaamade kiirgusvastuvõtjatest (*ressiiveritest*) võidakse soojus ära viia vedelate või gaasiliste soojuskandjatega (veega, vedelmetalliga, sünteetiliste õlidega, soolalahustega, heeliumiga jm), mis suunatakse vastava ehitusega aurugeneraatorisse (joonis **2.2.11**).



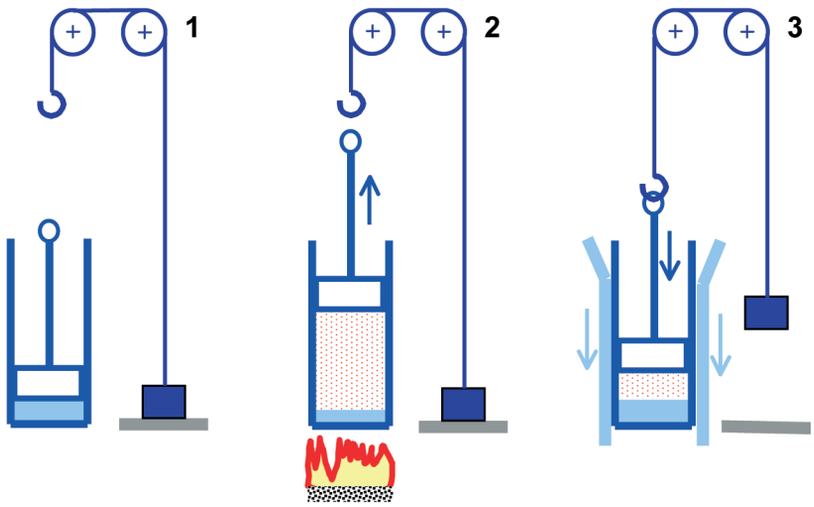
Joonis 2.2.12. Heroni aurujoakatel



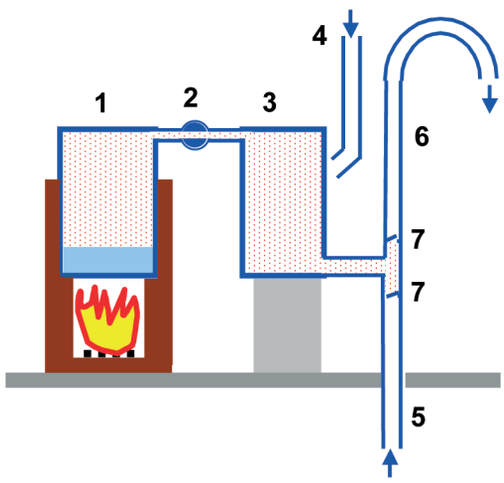
Joonis 2.2.13. Leonardo da Vinci kolbtõstemasin



Joonis 2.2.14. Denis Papini kaitseventiiliga varustatud kinnine aurukatel



Joonis 2.2.15. Papini atmosfääri-aurumasina põhimõte.
***1* algasend,**
***2* kolvi tõstmine aururõhuga ja kolvi-varda haakimine tõstemehhanismiga,**
***3* silindri jahutamine külma veega, kolvi allasurumine õhurõhu toimel ja koorma tõstmine**

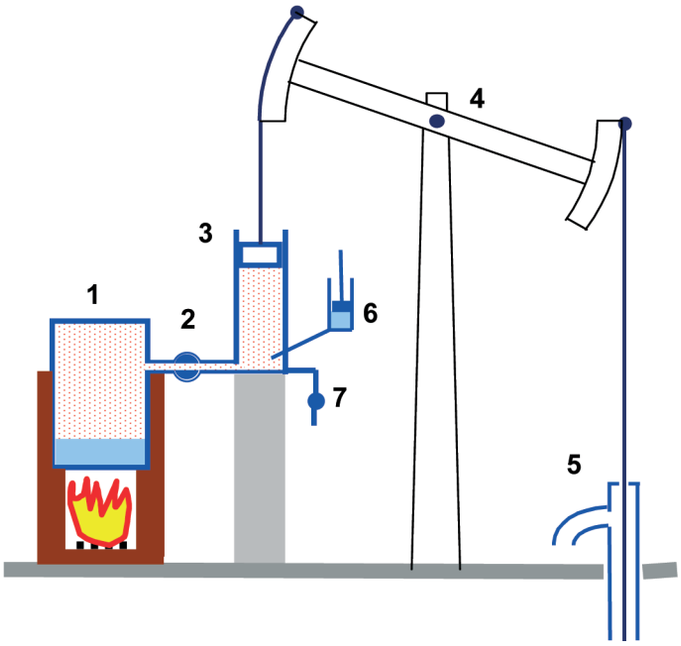


Joonis 2.2.16. Thomas Savery kaevandusepumba ehituspõhimõte.
***1* aurukatel,**
***2* aurukraan (avatakse, nagu joonisel näidatud, silindri täitmisel auruga ja suletakse auru kondenseerimise ajaks),**
***3* aurusilinder-kondensaator,**
***4* jahutusveetoru,**
***5* imitoru,**
***6* vee väljasurvetoru,**
***7* klappventiilid**

Esimeseks aurugeneraatoriks võib lugeda umbes aastal 100 kreeka teadlase Heroni poolt Aleksandrias leiutatud aurujoageneraatorit, mis koosnes kaanetatud veekatlast ja selle kaanest püstselt väljuvast torust [2.6]. Toru lõppes poolsfäärilise kausiga, milles paiknes kerge pall. Aurujoa tekkel tõusis pall üles ja jäi kausi kohale hõljuma (joonis **2.2.12**). Auru kasutamist uuris ka Leonardo da Vinci (1452–1519), kes aastal 1490 valmistas aurul põhineva tõstemasina, aurumasina eelkäija (joonis **2.2.13**) [2.7]. Aastal 1674 avastas prantsuse füüsik Denis Papin (1647–1712), et vee keemistäpp sõltub rõhust. Aastal 1680 valmistas ta seda asjaolu kasutades kinnise kõrgrõhulise kiirkeedupoti, varustas selle aastal 1681 kaitseventiiliga (joonis **2.2.14**) ja hakkas seda koguni edukalt turustama [1.15]. Praegu talitlevad samal põhimõttel *autoklaavid*.

Papin avastas ka, et auru kondenseerimise teel saab tekitada **vaakumi** ja aastal 1690 valmistas ta *atmosfääri-aurumasina*, mis koosnes aurusilindrist, kolvist ja tõstemehhanismist (joonis **2.2.15**). Silindri kuumutamisel aurustub selles olev vesi ja aururõhk tõstab kolvi üles. Kolvi varras haagitakse seejärel tõstemehhanismiga ja silinder jahutatakse külma veega kuni auru kondenseerumiseni; õhurõhk surub kolvi alla ja koorem tõstetakse üles. Papini silinder oli seega ühtaegu nii aurukatel kui ka töömasin ja kondensaator. Aastal 1698 patenteeris inglise mereväeinsener Thomas Savery (1650–1715) eraldi aurukatlal ja Papini väljastjahutataval silindril põhineva pumba (joonis **2.2.16**), mis tegi ühe tõste minutis ja mille kasutegur oli alla 1 %, kuid mille kasutamisomadused olid siiski paremad kui senistel hobuajamitel [2.8].

Aastal 1710 täiustas inglise sepp Thomas Newcomen (1663–1729) Papini ja Savery masinaid, võttes auru kondenseerimiseks kasutusele välise vesijahutuse asemel vee sissepritsimise ja ühendades saadud uut tüüpi jõumasina kolbpumbaga (joonis **2.2.17**). Newcomeni masinad tegid tavaliselt 3…5 kolvikäiku minutis ja nende jõudlus oli üle 30 m^3/h, mis asendas 50 hobust [2.8]. Masinaid hakati kohe laialdaselt kasutama vee väljapumpamiseks kaevandustest. Vaatamata madalale kasutegurile (ligikaudu 1 %) jäid nad tänu oma lihtsusele kasutusele ka pärast palju tõhusamate aurumasinate ilmumist ja viimane seda tüüpi masin demonteeriti alles aastal 1934.

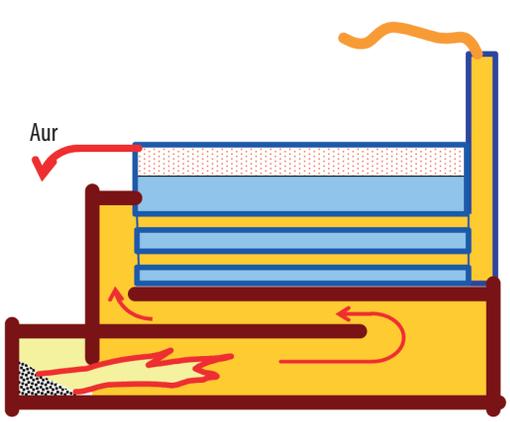


Joonis 2.2.17. Thomas Newcomeni kaevanduse-pumba (tulimasina) ehituspõhimõte.
***1* aurukatel,**
***2* aurukraan (avatakse, nagu joonisel näidatud, silindri täitmisel auruga ja suletakse auru kondenseerimise ajaks),**
***3* aurusilinder-kondensaator,**
***4* nookur,**
***5* kolbpump,**
***6* jahutusvee sissepritsimis-seadmestik,**
***7* kondensaadi väljalaskekraan**

Algelisi atmosfääri-aurumasinaid leiutati ka mujal. Nii näiteks valmistas Altai metallurgiatehase mehaanik Ivan Polzunov (1728–1766) aastal 1766 kahesilindrilise, Venemaa esimese aurumasina, milles auru kondenseerimine toimus, nagu ka Newcomenil, vee sissepritsimise teel. Masinat kasutati ligikaudu ühe aasta jooksul kõrgahju lõõtsasüsteemi ajamina ja see jäi pärast riknemist, kuna leiutaja oli juba surnud, unustusse.

Aastal 1750 võttis inglise kanaliehitusinsener James Brindley (1716–1772) aurukatlas kasutusele toitevee pideva juurdeandmissüsteemi koos ***toitepumbaga***. Aurumasinate ja koos nendega ka aurukatelde kiirem areng algas 1760ndail aastail, mil nende täiustamisega hakkas tegelema šoti mehaanik, Glasgow' ülikooli matemaatikariistade konstruktor James Watt (1736–1819). Aastal 1763 sai ta ülikoolilt tellimuse Newcomeni masina mudeli remontimiseks. Pärast nõupidamist sama ülikooli keemia- ja füüsikaprofessori Joseph Blackiga, kes hiljuti oli avastanud aurustumissoojuse (vt eelpool), tegi ta kindlaks, et masina aurusilindri vahelduv kuumutamine ja jahutamine põhjustab suurt energiakadu, ja võttis aastal 1765 kasutusele väljaspool silindrit paikneva ***kondensaatori*** ning silindri tõhusa ***soojusisolatsiooni*** [2.9]. Kütusekulu vähenes ligi kolm korda. Aastal 1769 sai ta oma leiutisele patendi, kuid masinate tootmisele sai ta asuda alles aastal 1775, mil tema leiutisest huvitus Birminghami tööstur Matthew Boulton (1728–1809). Viimane oskas ette näha uue masina sedavõrd suurt tähtsust, et asutas koos Wattiga tehase *Watt & Boulton*. Peale muude uuenduste olid Watti aurumasinad seadistatud ka uut tüüpi, nii alt kui ka külgedelt köetava aurugeneraatoriga. Järjest teravamaks oli aga läinud vajadus **pöörlevaid mehhanisme käitavate** aurumasinate järele ja aastal 1781 sai Watt patendi esimesele taolisele masinale. Järgmisel aastal valmistas ta sellise silindri, milles aur toimis kolvile vaheldumisi mõlemalt poolt. Aastaks 1788 oli välja kujunenud ***universaalne aurumasin*** planetaarülekandega, hoorattaga ja tsentrifugaalregulaatoriga. Sai võimalikuks aurujõu ulatuslik rakendamine tööstuses ja 19. sajandi alguses ka veovahendeil (aurikutel ja veduritel). J. Watt oli ühtlasi esimene, kes (aastal 1784) kasutas aurukatlast saadavat auru oma tööruumi kütteks.

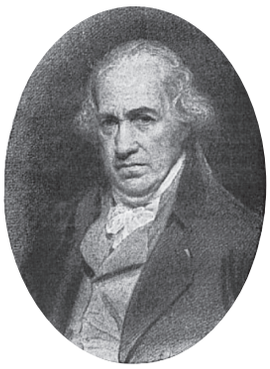
Väljast köetava paak-aurukatla asemel patenteeris inglise insener Neville aastal 1826 tõhusama ***leektorukatla***, milles kuumad põlemisgaasid kulgesid läbi veemahutis paiknevate vasktorude (joonis **2.2.18**) [1.15]. See katlatüüp oli kaua aega kasutusel nii kohtkindlates kui ka vedurite aurumasinate toiteks. Aururõhu suurenedes väärtuseni 1…2 MPa osutus nende töökindlus aga ebapiisavaks ja 19. sajandi keskel hakati järjest sagedamini kasutama ***veetorukatlaid***, mille põhimõtte oli esitanud juba aastal 1766 inglise insener William Blakey. Aastal 1828 avastas inglise metallurg James Beaumont Neilson, et katlakütust saab märgatavalt kokku hoida, kui koldesse antavat õhku ette kuumutada.



Joonis 2.2.18. Leek-suitsutoru-aurukatla ehituspõhimõte

Aastal 1840 hakkas saksa silmaarst, mehaanik ja ettevõtja Ernst Alban (1791–1856) tootma ***kollektori*** ja ***aurutrumliga*** varustatud veetorukatlaid ja aastal 1856 patenteeris USA leidur Stephen Wilcox (1830–1893) suure küttepinnaga, intensiivse loomuliku veeringlusega ja kõrge töökindlusega kaldveetorukatla [2.10]. Selle leiutise alusel asutas ta koos George Babcockiga (1832–1893) aastal 1865 tänapäevani edukalt töötava katlaehitusfirma *Babcock & Wilcox*, kust aastal 1924 ja hiljem saadi katlad muuseas ka Tallinna elektrijaamale. Aastal 1875 formuleerisid Babcock ja Wilcox *12 nõuet täiuslikule aurukatlale*, mis ei ole praegugi oma tähtsust kaotanud.

Auru ***ülekuumendamise***, mis oli patenteeritud juba aastal 1768 Inglismaal, realiseeris aurukateldes esimesena saksa insener Gustav Adolf Hirn aastal 1857. Aastal 1887 tuli kasutusele ***tõmbeventilaator*** (***suitsuimeja***) ja aastal 1894 ***veeringluspump*** ning kivisöe põletamine katla koldes tolmuna.

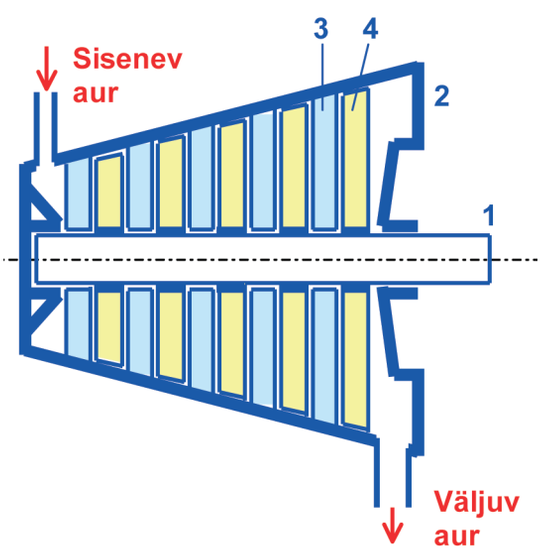


JAMES WATT

Aastal 1922 pani saksa insener Benson ette otsevoolukatla ehituspõhimõtte, Venemaal arendas tõhusaid otsevoolukatlaid aga alates aastast 1933 soojustehnikainsener Leonid Ramzin (1887–1948). Sellised katlad leiavad praegu kasutamist võimsates elektrijaamades ülekriitilistel auruparameetritel. Kütuste põletamise keevkihttehnoloogia tuli kasutusele 1960ndail aastail USAs.

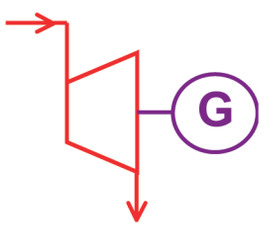
2.3 AURUTURBIINID

Auruturbiinis suunatakse ülekuumutatud aur düüside või ringikujuliselt paigutatud juhtlabade abil turbiini võllil ringikujuliselt paiknevatele töölabadele. Töölabadele toimiv jõud paneb turbiini tööratta pöörlema, kusjuures pöörlemissagedus on enamasti mõni tuhat pööret minutis. Turbiini levinuim ehituspõhimõte on lihtsustatult kujutatud joonisel **2.3.1**.

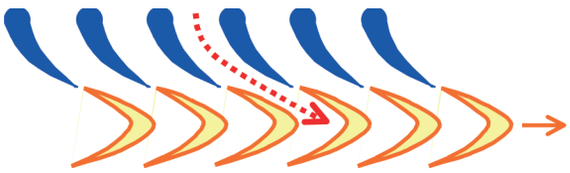


Joonis 2.3.1. Auruturbiini ehituspõhimõte.
1 **rootori võll,** ***2*** **turbiini kere,** ***3*** **juhtlabad,** ***4*** **töölabad**

Nii juht- kui ka töölabasid on labaderingi ümbermõõdul harilikult vähemalt mõnikümmend, järjestikuseid labaderinge (*astmeid*) võib olla mõnest kuni paarikümneni. Kuna aur energiat ära andes paisub, on turbiini kere (mida nimetatakse ka *silindriks*) laieneva koonuse kujuline. Turbiini koonusetaoline ehitus on leitud olevat otstarbekas kajastada ühtlasi turbiini tingmärgis (joonis **2.3.2**).



Joonis 2.3.2. Auruturbiini tingmärk koos sellega ühendatud generaatori tingmärgiga ja turbiini läbiva auru suuna näitamisega



Joonis 2.3.3. Aktiivturbiini juhtlabade (ülemine rida) ja töölabade (alumine rida) ristlõike kujunduse näide

Joonis 2.3.4. Reaktiivturbiini juhtlabade (ülemine rida) ja töölabade (alumine rida) ristlõike kujunduse näide

Töölabadele toimiv jõud võib olla määratud aurujoa otsese rõhuga (*aktiivturbiin*) või labadelt põrkuva joa reaktiivtoimega (*reaktiivturbiin*). Joonisel **2.3.3** on kujutatud aktiivturbiini, joonisel **2.3.4** aga reaktiivturbiini labade ristlõike võimalik kuju.

On ka turbiine, mis sisaldavad nii aktiiv- kui ka reaktiivastmeid (*aktiiv-reaktiivturbiinid*).

Mida kõrgemad on auru parameetrid (rõhk ja temperatuur) ja mida suurem on turbiini nimipöörlemiskiirus, seda väiksemad on ühelsamal võimsusel turbiini mõõtmed ja mass. Seetõttu püütakse valida valida auru parameetrid nii kõrged nagu seda lubab turbiini labade materjal, milleks enamasti on kuumuskindel eriteras. Pöörlemiskiirus on määratud käitatava masina nõutava kiirusega. Kütustpõletavates ja tuumaelektrijaamades kasutatakse auruturbiine sünkroongeneraatorite käitamiseks, mille pöörlemissagedus vahelduvvoolu sagedusel 50 Hz ja minimaalse võimaliku pooluste arvu (2 pooluse) korral on 3000 1/min. Tuumaelektrijaamades, kus auru parameetrid on madalamad, on sageli otstarbekam kasutada väiksemat pöörlemissagedust – 1500 1/min ja vastavalt neljapooluselisi generaatoreid.

Pöörlevate masinate puhul eristatakse **pöörlemiskiirust** ja **pöörlemissagedust**. Esimest mõõdetakse radiaanides sekundis (rad/s) ja väga harva mõne muu nurga- ja ajaühiku jagatisena, teist pööretes sekundis (1/s) või minutis (1/min) ja harva mõne pikema ajaühiku kohta.

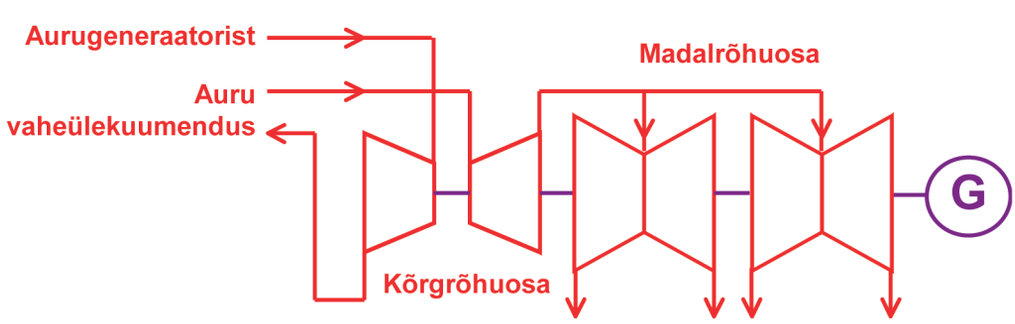
Põhja-Ameerikas ja ka muude maailmajagude mõnedes riikides on vahelduvvoolu sagedus 60 Hz ja generaatorite ning turbiinide pöörlemissagedus vastavalt enamasti 3600 1/min, mis võimaldab vähendada nii turbiinide kui ka generaatorite materjalimahukust võrreldes sagedusega 50 Hz. Turbiini materjalimahukuse vähendamiseks võidakse see mõnikord ette näha suuremale pöörlemissagedusele (nt 10 000 1/min) ja paigutada turbiini ja generaatori vahele reduktor.

Auruturbiinide põhikasutusala on soojuselektrijaamad, kus nende abil saadakse maailmas praegu ligikaudu 82 % kogu elektrienergiast. Valmistatakse neid, nagu ka nende juurde kuuluvaid generaatoreid (*turbogeneraatoreid*) võimsusega mõnest kilovatist kuni võimsuseni ligikaudu 1400 MW. Peale auruturbiinelektrijaamade leiavad nad kasutamist laevade ajamites ja (harvemini) mõnedes tööstuspaigaldistes.

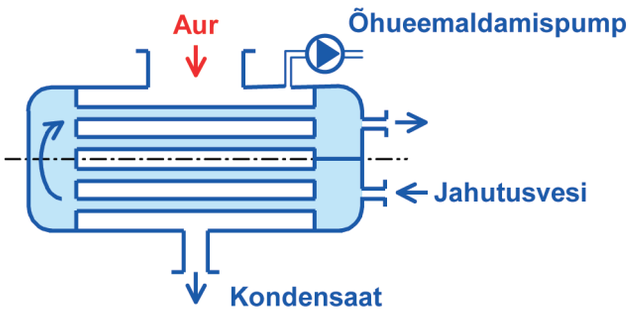
Maailma võimsaimad auruturbiinid on Palueli tuumaelektrijaamas Prantsusmaal. Nende võimsus on 1400 MW, siseneva auru rõhk 7 MPa ja aurutarve 7775 t/h.

Võimsad auruturbiinid võivad koosneda mitmest omavahel ühendatud osaturbiinist nagu see on kujutatud näiteks joonisel **2.3.5**.

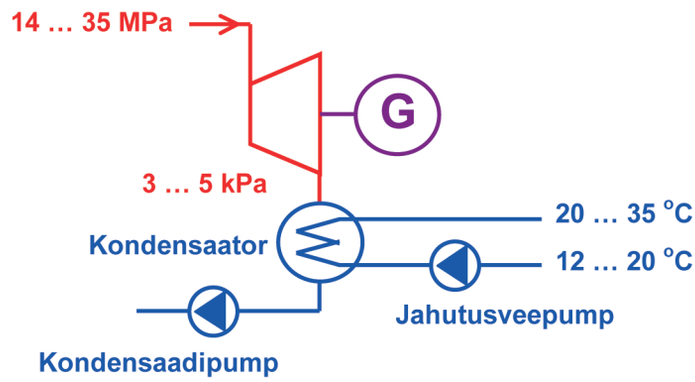
Auruturbiini järel aur enamasti kondenseeritakse (veeldatakse). Selliseid turbiine nimetatakse *konden-*



Joonis 2.3.5. Mitmeosalise auruturbiini ehitusskeemi näide



Joonis 2.3.6. Auruturbiini kondensaatori ehituspõhimõte



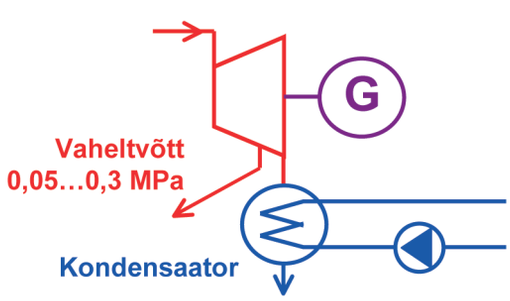
Joonis 2.3.7. Kondensatsioonturbiini ja kondensaatori ühendamisskeem. Aururõhu ja jahutusvee temperatuuri arvväärtused on esitatud näitena

satsioonturbiinideks ja nende juurde kuulub veega või (väga harva) õhuga jahutatav ***kondensaator***, mille ehituspõhimõte on kujutatud joonisel **2.3.6**. Külm jahutusvesi suunatakse läbi torude, mille pinnal aur kondenseerub. Nullilähedane rõhk (tavaliselt 3…5 kPa) saavutatakse jahutusvee piisavalt madala temperatuuriga. Kuna läbi turbiini madalamarõhulise osa tihendite satub aurutrakti mingil määral õhku, on kondensaator varustatud õhueemaldamispumbaga. Turbiini ja kondensaatori ühendusskeem on kujutatud joonisel **2.3.7**.

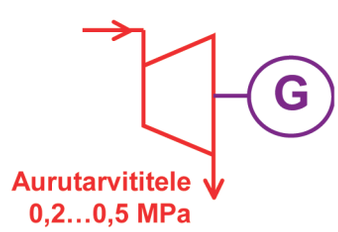
Kondensaatori jahutusveega viiakse ära soojus, mis vabaneb auru kondenseerumisel. Turbiini siseneva kuuma kõrgrõhulise auru energiast moodustab see nüüdisaegsetes soojuselektrijaamades tavaliselt ligikaudu 55 % ja seega võib kondensatsioonturbiini kasuteguriks lugeda neis jaamades ligikaudu 45 %. Auru madalamate parameetrite korral (näiteks tuumaelektrijaamades) võib turbiinagregaadi kasutegur olla veelgi madalam. Kasutegurit saab mõnevõrra tõsta kõrgrõhulise auru ühe- või mitmekordse vahe-ülekuumendusega, nagu see on kujutatud näiteks joonisel **2.3.5**.

Et kondensaatori jahutusvesi liigselt ei kuumeneks (see vähendaks turbiini kasutegurit), on selle kogus suhteliselt suur – 50 kuni 100 kg ühe kilogrammi auru kohta ehk 0,10…0,15 m^3 saadava elektrienergia iga kilovatt-tunni kohta. Kuna jahutusvesi soojeneb kondensaatoris ainult 15…20 K võrra, on selles sisalduva soojuse tehniline rakendamine raske ja enamasti juhitakse soojenenud vesi tagasi kas samasse veekogusse, kust see võeti, või (suletud jahutuskontuuri korral) jahutustorni, kus soojus viiakse ära jahutusõhuga.

Aurus sisalduvat energiat saab täielikumalt kasutada sel teel, et turbiini madalrõhuosast võetakse osa auru muude aurutarvitite (näiteks aurkütte või veekuumutite) toiteks (joonis **2.3.8**). Sellised turbiinid annavad nii mehaanilist energiat kui ka soojust (soojust seejuures enamasti 2…4 korda rohkem kui mehaanilist energiat). Neid nimetatakse ***vahelt-võtuturbiinideks*** ja kasutatakse elektri ja soojuse koostootmisjaamades, mida lähemalt kirjeldatakse jaotises **5.2**. Energia muundamise kasutegur on neis jaamades tavaliselt ligikaudu 60 %. Veel kõrgema kasuteguri (kuni 85 %) võimaldavad saavutada ***vasturõhuturbiinid***, milles kogu väljuv aur, enamasti rõhul 0,2…0,5 MPa, suunatakse tööstuslikele aurutarvititele (joonis **2.3.9**).

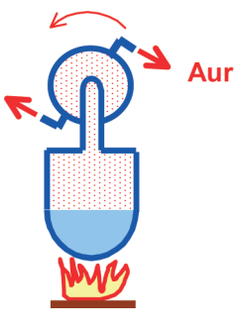


Joonis 2.3.8. Vaheltvõtu-auruturbiini põhimõte

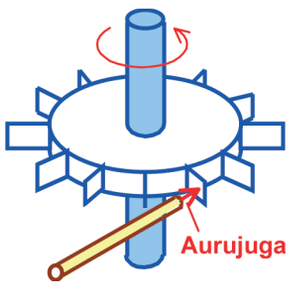


Joonis 2.3.9. Vasturõhu-auruturbiini põhimõte

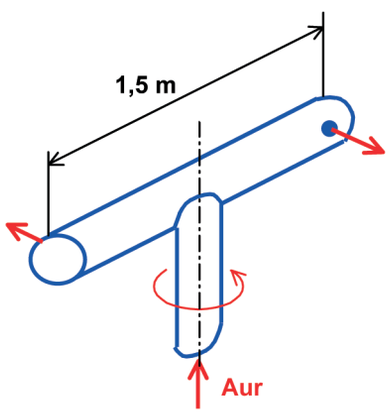
Esimeseks auruturbiiniks (nimelt reaktiiv-auruturbiiniks) võib lugeda umbes aastal 100 kreeka teadlase Heroni poolt Aleksandrias leiutatud *Heroni kera* (joonis **2.3.10**), mis pandi katlas tekitatud auru toimel pöörlema [2.6]. Esimest **aktiivturbiini** (*aururatast*, joonis **2.3.11**), mis oli kasutusel pulbritampimismasina ajamina, kirjeldas oma raamatus aastal 1629 itaalia arhitekt Giovanni Branca (1571–1645) [2.7]. Aastal 1831 valmistas USA mehaanik William Avery T-toru taolise reaktiivturbiini (joonis **2.3.12**) ja kasutas seda saeveski ajamina, kuid see ei suutnud ei kasuteguri ega töökindluse poolest võistelda aurumasinaga. Auruturbiinide tegelik kasutamine algas aastal 1883, mil prantsuse päritolu rootsi insener ja tööstur Carl Gustaf de Laval (1845–1913) valmistas enda poolt varem leiutatud koorelahutajate käitamiseks üheastmelise aktiivturbiini, mille töörattale suunati düüsidest suure kiirusega (ülehelikiirusega) väljuv aur (joonis **2.3.13**). Mõne Lavali turbiini pöörlemissagedus oli kuni 42 000 1/min [1.15].



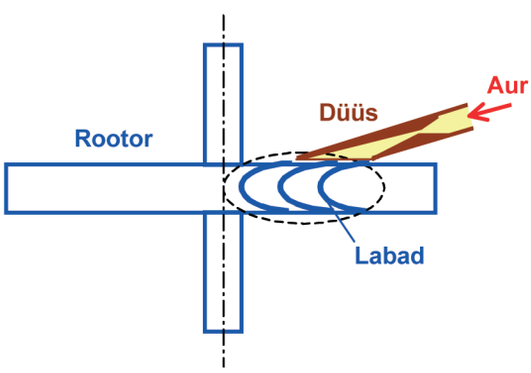
Joonis 2.3.10. Heroni kera



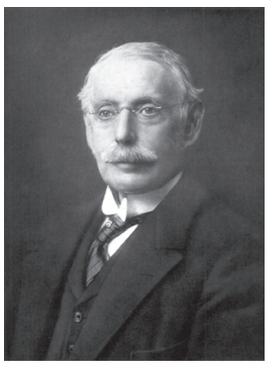
Joonis 2.3.11. G. Branca aururatas



Joonis 2.3.12. W. Avery reaktiiv-auruturbiin



Joonis 2.3.13. C. G. de Lavali aktiiv-auruturbiini talitluspõhimõte



CHARLES ALGERNON PARSONS

Aastal 1884 leiutas iiri päritolu inglise füüsik ja insener, ettevõtte *Clarke, Chapman, Parsons & Co.* elektrotehnikaosakonna juhataja Charles Algernon Parsons (1854–1931) mitmeastmelise reaktiiv-auruturbiini, mille ehitus vastas joonisel **2.3.1** esitatud põhimõttele (väljaarvatult vast see, et aur sisenes Parsonsi turbiini keskelt ja väljus otstelt) ja mille pöörlemissagedus oli 18 000 1/min [2.11]. Esimeste turbiinide võimsus oli 7,5 kW ja Parsons kasutas neid alalisvoolugeneraatori ajamina laevade elektervalgustuse toiteks pingel 100 V. Aastal 1890 paigaldas Parsons esimese kohtkindla turbogeneraatoragregaadi Newcastle'i elektrijaama, valmistas aastal 1892 esimese kondensatsioonturbiini ja lasi ehitada aastal 1894 maailma esimese auruturbiin-sõukruviajamiga laeva nimega *Turbinia*, mis saavutas enneolematu sõidukiiruse 34 sõlme. Aastal 1896 patenteeris Prantsusmaal Saint-Étienne'i mäekõrgkooli professor Auguste Camille Edmond Rateau (1863–1930) aktiiv-auruturbiini, mis võis tõhusalt talitleda väiksematel kiirustel kui reaktiivturbiin, ja USA insener, Thomas Alva Edisoni kaastöötaja Charles Gordon Curtis (1860–1936) valmistas turbiini, milles osa astmeid olid aktiivsed, osa reaktiivsed (aktiiv-reaktiivturbiini); viimaste tootmine algas USAs aastal 1903. Kõik kolm turbiinitüüpi leidsid kiiresti rakendamist elektrijaamades ja laevaajamites, sest võrreldes seni kasutatud aurumasinatega olid nende mass ja ruumivajadus kuni 10 korda väiksemad, kasutegur kuni kolm korda kõrgem, pöörlemiskiirus elektrijaamade generaatoritele sobivam ning seejuures ideaalselt ühtlane jne. Pealegi sai neid valmistada palju suurema nimivõimsusega. Aastaks 1910 lõppes aurumasinate kasutamine soojuselektrijaamades täielikult.

2.4 GAASITURBIINID

Gaasiturbiin sarnaneb oma ehituspõhimõttelt auruturbiiniga (vt joonis **2.3.1**). Erinevus on selles, et auru asemel paneb turbiini rootori pöörlema kütuse põlemisel tekkiv kõrgrõhuline gaas. Kütus põletatakse põlemiskambris, kuhu kõrge rõhu all sisestatakse nii kütus kui ka õhk, kusjuures õhu tihendamiseks vajalik kompressor on samal võllil turbiiniga või kuulub turbiini koostisse (joonised **2.4.1** ja **2.4.2**). Gaasi algrõhk on tavaliselt 0,6…1,2 MPa ja algtemperatuur kuni 900 °C (jahutatavate labade korral aga ka kuni 1600 °C). Turbiini ja kompressori pöörlemapanemiseks kasutatakse enamasti käivitus- (tavaliselt elektri-) mootorit.

Turbiinist väljuva gaasi temperatuur (kuni ligikaudu 500 °C) ja kiirus on enamasti sedavõrd suur, et seda saab tõhusalt kasutada

- komprimeeritud õhu eelsoojendamiseks,
- aurugeneraatori kütteks koos saadava auru rakendamisega auruturbiinis (nt gaasiturbiin-auruturbiin- (*kombi*-) elektrijaamades),
- kuumaveekatla kütteks (nt elektri ja soojuse koostootmis-gaasiturbiinelektrijaamades),
- reaktiivjõu tekitamiseks (nt lennukite turboreaktiivajamites).

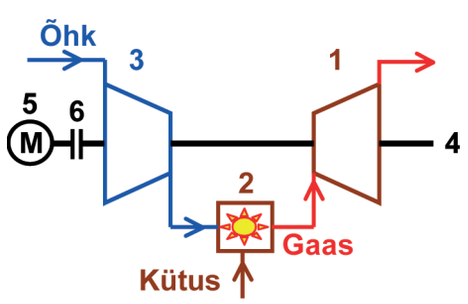
Kasuteguri tõstmiseks kasutatakse gaasiturbiinides sageli kütuse mitmejärgulist põletamist ja õhu mitmeastmelist komprimeerimist. Joonisel **2.4.2** on kujutatud kahe põlemiskambriga ja kaheastmelise kompressoriga nüüdisaegse statsionaarse gaasiturbiinagregaadi põhimõtteskeem. Esimesse põlemiskambrisse juhitava õhu kogus on piisav, et tagada kütuse põlemine mõlemas põlemiskambris.

Elektrijaamades ja varu-elektrivarustusagregaatides kasutatakse gaasiturbiine võimsusega 0,5 kuni 400 MW. Võrreldes auruturbiinidega seisnevad nende eelised

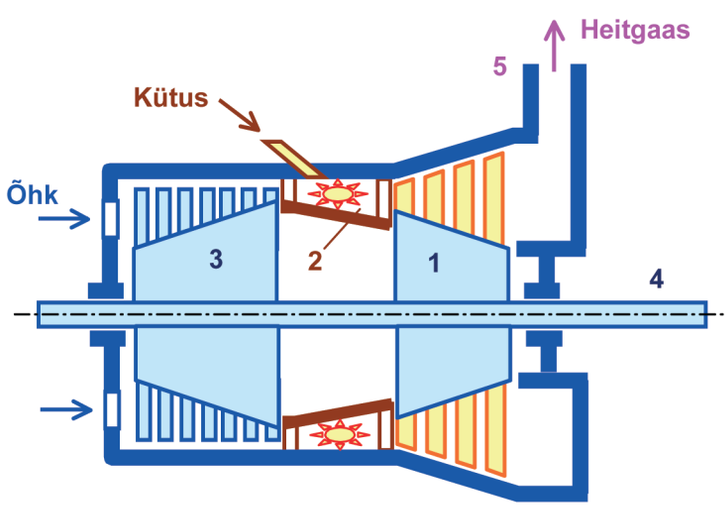
- aurukatla ärajäämises,
- vajaduse puudumises vee järele,
- kiires käivitamises (olenevalt võimsusest, mõne sekundi kuni mõne minuti jooksul),
- väikestes mõõtmetes ja väikeses ruumivajaduses (võrreldes aurukatlast ja auruturbiinist koosneva energiaallikatega on gaasiturbiini jaoks vajalik ruumala ligikaudu 200 korda väiksem),
- heitgaaside väiksemas kahjulikus toimes keskkonnale.

Gaasiturbiini puudusteks võrreldes auruturbiiniga on kallimate kuumuskindlate materjalide (eriteraste ja -sulamite) kasutamine, suurem maksumus, labade ning muude aktiivosade kiirem kulumine ja seetõttu sageda regulaarse hooldamise vajadus ja väiksem eluiga (tavaliselt mitte üle mõnekümne tuhande tunni). Energiakaod gaasiturbiinis ei ole tavaliselt üle 15 %. Turbiinist ja kompressorist koosneva ühtse agregaadi kasutegur, arvestades ka kompressori poolt tarbitavat võimsust, on aga võllil saadava mehaanilise võimsuse järgi enamasti 25…40 % ja seega mõnevõrra madalam kui aurukatlast ja auruturbiinist koosneva energiaallika puhul. Turbiini heitsoojuse ärakasutamisel (nt elektri ja soojuse koostootmisjaamades) võib kasutegur olla kuni 60 %.

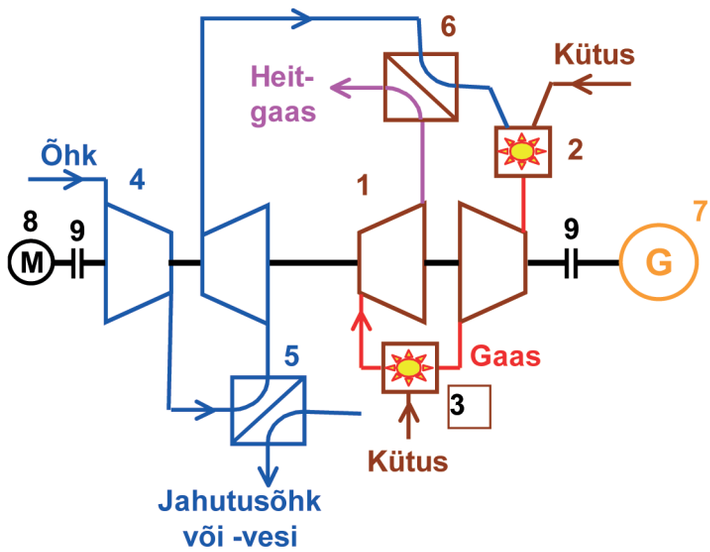
Gaasiturbiinelektrijaamad sobivad kasutamiseks veevaestes regioonides (nt Araabia poolsaare riiki-



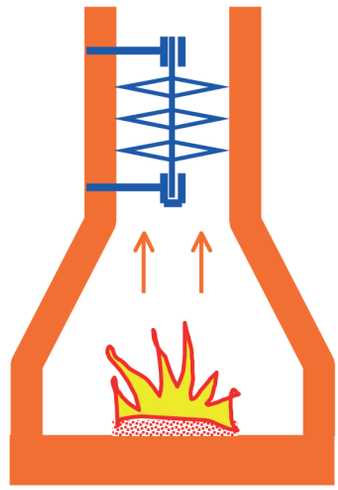
Joonis 2.4.1. Gaasiturbiini põhimõtteskeem.
***1* turbiin, *2* põlemiskamber, *3* kompressor, *4* võll, *5* käivitusmootor, *6* sidur**



Joonis 2.4.2. Lihtsaima gaasiturbiini ehituspõhimõte (näide).
***1* turbiin, *2* põlemiskamber, *3* kompressor, *4* võll, *5* heitgaasikanal**



Joonis 2.4.3. Mitmeastmelise gaasiturbiinagregaadi põhimõtteskeem.
***1* turbiin, *2* esimene põlemiskamber, *3* vahepõlemiskamber,**
***4* kompressor, *5* õhu vahejahuti, *6* õhu eelkuumuti,**
***7* elektrigeneraator, *8* käivitusmootor, *9* sidur**



Joonis 2.4.4.
Leonardo da Vinci gaasiturbiini idee

des) ja kiiresti käivituvate tipukatte- või varuenergiaallikatena. Peale elektrigeneraatorite võivad gaasiturbiinid käitada ka muid masinaid. Väga levinud on nad nt naftarafineerimistehastes ja maagaasitoruliinidel kompressorite ajamitena.

Gaasiturbiine võimsusega kuni mõnikümmend megavatti kasutatakse tõhusalt ka lennukite, laevade ja vedurite ajamites; kütuseks on neil juhtudel enamasti petrool. Lennukiturbiinides tekitatakse veojõud osalt turbiiniga kokkuehitatud tiiviku, osalt reaktiivtoimeliste heitgaasidüüside abil. Võrdlemisi harva on gaasiturbiinid kasutusel autodel.

Maailma suurimal, 555 reisijakohaga reisilennukil *Airbus A380*, mis sooritas oma esimese lennu aastal 2005, on 4 turboreaktiivmootorit *Trent 900* (valmistaja – Suurbritannia firma *Rolls-Royce*), millest igaüks tekitab veojõu 400 kN. See vastab võimsusele ligikaudu 30 MW. Lennuki petroolikulu 100 reisijakilomeetri kohta on veidi alla 3 liitri, mis on väiksem kui senistel lennukitel [2.12].

Vajaduse korral (nt kantavate generaatoragregaatide ja mitmesuguste väikemehhanismide jaoks) saab gaasiturbiine valmistada ka väga väikese võimsusega, nt mõnest vatist mõne kilovatini.

Kütusena kasutatakse gaasiturbiinides enamasti põlevgaase (nt maagaasi) või vedelkütuseid (nt juba mainitud petrooli). On olemas aga ka tahkel kütusel toimivaid gaasiturbiine, kuid sel juhul kuumutatakse kütuse põletamise teel mingit inertset või suhteliselt inertset gaasi (enamasti heeliumi, lämmastikku või õhku), mis suunatakse turbiini ja ringleb kinnises kontuuris.

Esimese seadme, mida võib nimetada gaasiturbiiniks, visandas aastal 1500 Leonardo da Vinci. Nimelt pani ta ette paigutada kamina kohale korstna algusesse, tõusvasse suitsugaasivoolu, järjestikku mitu ühel võllil paiknevat tiivikut, mis võiksid panna pöörlema näiteks praevarda (joonis **2.4.4**). Selle idee realiseeris aastal 1648 inglise mehaanik John Wilkins, kuid eriti laia rakendamist see ei leidnud [2.7].

18. ja 19. sajandil tehti mitmeid katseid gaasiturbiini valmistamiseks, kusjuures joonisel **2.4.1** kujutatud skeemi realiseeris aastal 1872 saksa insener F. Stolze. Ühelgi nendest katsetest ei õnnestunud saada turbiinilt kasulikku võimsust. Esimese kasulikku võimsust andva gaasiturbiini valmistas aastal 1903 Norra insener Ægidius Elling (1861–1949), keda peetaksegi nüüdisaegse gaasiturbiini leiutajaks [2.13]. Aastal 1905 ehitasid prantsuse insenerid Marcel Armengaud ja Charles Lemale Lavali auruturbiini (vt joonis **2.3.13**) ümber gaasiturbiiniks ja saavutasid esmakordselt turbiini majanduslikult vastuvõetava talitluse [1.15]. Aastal 1926 alustas inglise lennuväeohvitser Frank Whittle (1907–1996) uuringuid eesmärgiga rakendada gaasiturbiine lennukiajamina, kuna need võimaldaksid lennukiirust oluliselt suurendada. Esimese reaktiivmootori patenteeris ta aastal 1930 ja pärast mitu aastat kestnud maapealseid katsetusi tõusis aastal 1941 õhku Suurbritannia esimene reaktiivlennuk. Samas suunas töötas Saksamaal alates aastast 1936 insener Hans Joachim Pabst von Ohain (1911–1998), kelle väga kompaktse gaasiturbiiniga maailma esimene reaktiivlennuk valmis aastal 1939.

1930ndail aastail täiustusid ka statsionaarsed gaasiturbiinid ja aastal 1939 paigaldas Šveitsi firma *Brown, Boveri & Cie*. Neuenburgi varuelektrijaama esimese gaasiturbiin-generaator-agregaadi võimsusega 4 MW. Aastal 1947 pandi Suurbritannia mereväes (*Royal Navy*) esimene gaasiturbiin ühele kahuripaadile ja seejärel algas nende turbiinide edukas kasutamine ka muudel laevadel. Esimese gaasiturbiinveduri valmistas aastal 1948 USA kontsern *General Electric* ja esimese gaasiturbiinauto samal aastal inglise firma *Rover*.

Lennukite gaasiturbiine, mis on oma ressursi õhus ammendanud, saab edasi kasutada maapealsetes rakendustes, sealhulgas elektrigeneraatorite käitamiseks. Ka Saaremaa Jaotusvõrgus (Kuressaares) oli aastail 1985…2000 varutoiteallikana kasutusel turbopropellerlennuki An28 gaasiturbiin koos generaatoriga, mille elektriline võimsus oli 3,2 MW. Seni on see jäänud ainsaks Eestis ülesseatud gaasiturbiin-generaator-agregaadiks.

2.5 KOLBMOOTORID

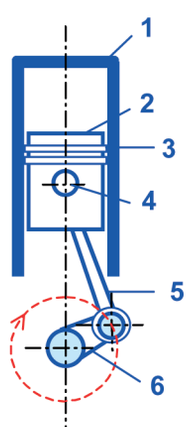
Kolbmootorid põhinevad teatavasti kolvi liikumisel silindris, kusjuures enamasti on see liikumine vahelduvasuunaliselt kulgev ja muundatakse kepsu ja väntvõlli abil pöörlevaks (joonis **2.5.1**).

Kõige laiemalt on sellest mootoriliigist nüüdisajal kasutusel **sisepõlemismootorid**, milles mehaaniline energia tekitatakse gaasilise või vedela kütuse ja õhu segu plahvatuslikul süütamisel. Enamasti on sellised mootorid **neljataktilised**, s.t nende igas töötsüklis toimub järjekorras

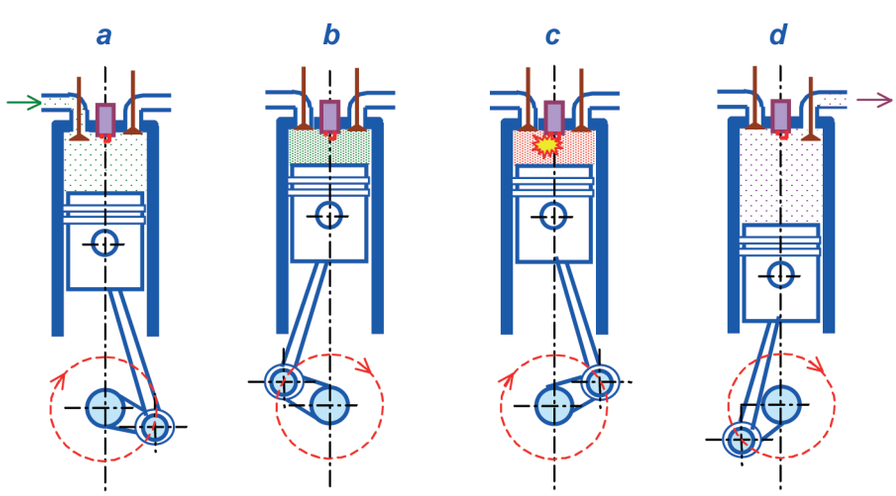
- kütuse ja õhu segu sisselase,
- küttesegu komprimeerimine,
- küttesegu süütamine ja plahvatuslik paisumine koos kolvile toimiva jõu tekkega,
- kütuse põlemissaaduste (heitgaasi) väljalase.

Nagu näitab joonis, teeb väntvõll iga töötsükli (4 takti) jooksul kaks pööret, kusjuures energiat saadakse ainult 0,5 pöörde ajal. Seetõttu vajab ühesilindriline mootor, et käiku ühtlustada ja mittetöötakte ületada, kindlasti **hooratast**. Enamasti kasutatakse aga käigu ühtlustamiseks ja mittetöötaktide ületamiseks mitut (enamasti vähemalt nelja) silindrit mis toimivad ühelesamale väntvõllile (joonis **2.5.3**). Valmistatakse kuni 16 silindriga, kuid on püütud valmistada ka 32 silindriga kolbmootoreid.

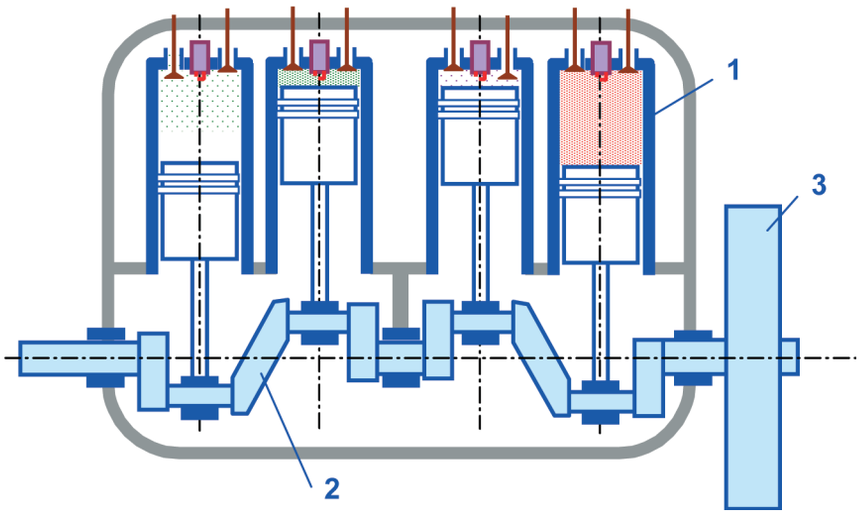
Peale neljataktiliste toodetakse ka kahetaktilisi sisepõlemismootoreid, mille töötsükkel toimub 1 pöörde jooksul. Esimene takt (töötakt) seisneb komprimeeritud küttesegu süttimises ja kolvi allaliiku-



Joonis 2.5.1. Kolbmehhanismi põhiosad. *1* silinder, *2* kolb, *3* kolvirõngad (kolvi ja silindri vahelise pilu tihendamiseks), *4* kolvisõrm, *5* keps, *6* väntvõll



Joonis 2.5.2. Neljataktilise kolbmehhanismi talitluspõhimõte. *1* sisselasketakt, *2* komprimeerimistakt, *3* töötakt, *4* väljalasketakt



Joonis 2.5.3. Neljasilindrilise neljataktilise kolbmootori ehituspõhimõte.
***1* silindriplokk, *2* väntvõll, *3* hooratas (võib ka puududa)**

mises, teine takt – põlemissaaduste väljalaskes ning uue küttesegu sisselaskes ja komprimeerimises.

Elektrilise sädesüütega kolbmootorites, mis on kujutatud joonistel **2.5.1** kuni **2.5.3**, kasutatakse kütusena enamasti bensiini, etanooli (etüülalkoholi, C_2H_5OH), nende segu või süsivesinikgaase (nt maagaasi või propaani). Suhteliselt harva on kasutusel vesinik. On kasutatud ka puidu gaasistamisel saadavat gaasi. Kõige sagedamini kasutatakse selliseid mootoreid sõiduautodel, kus nende võimsus võib olla kuni ligikaudu 250 kW ja erimass 2…4 kg/kW. Väntvõlli pöörlemissagedus on enamasti 3000…5500 1/min. Kiiruse reguleerimiseks ühendatakse mootor enamasti reduktoriga (*käigukastiga*). Kestval talitlusel nimikoormusega võib selliste mootorite kasutegur olla 30…40 %, talitlemisel muutuva koormusega on see aga ligikaudu 15 %. Bensiinimootoreid kasutatakse ka muudel sõidukitel (mootorratastel, mootorpaatidel jms) ning väikemehhanismides (mootorsaagides, muruniitjates jms). Neid saab kasutada ka kantavates elektrigeneraatoragregaatides, mida valmistatakse võimsusega mõnest kilovatist mõnekümne kilovatini.

Esimesteks kolbmootoriteks olid **aurumasinad**, mille arengulugu on käsitletud jaotises **2.2.** 19. sajandi esimesel poolel patenteeriti ka mitmeid ligikaudu samasuguse ehitusega sisepõlemismootoreid, mis aga ei leidnud tegelikku kasutamist. Esimese kasutuskõlbuliku sisepõlemis-kolbmootori valmistas aastal 1860 prantsuse insener Jean Joseph Étienne Lenoir (1822–1900); rõhtsa silindriga, elektrilise sädesüütega mootor võimsusega 9 kW talitles valgustusgaasi ja õhu segul, sarnanes oma ehituselt kahepoolse toimega aurumasinaga ja selle kasutegur oli ligi 5 %. Vaatamata madalale kasutegurile ja mitmele muule puudusele hakati seda mootorit tööstuslikult tootma, sest see oli aurumasinaist tunduvalt kompaktsem ja ohutum. Aastal 1862 valmistas saksa mehaanik ja ettevõtja Nikolaus August Otto (1832–1891) täiuslikuma, püstse silindriga gaasimootori ja asutas nende tootmiseks oma ettevõtte. Aastal 1876 leiutas ta neljataktilise gaasil või piiritusel talitleva mootori, mis osutuks sedavõrd tõhusaks, et kõiki nelja- ja kahetaktilisi sundsüütega, kerge vedelkütusega või gaasiga töötavaid sisepõlemismootoreid hakati nimetama **ottomootoriteks**. Esimese bensiinimootori (pöörlemissagedusega 800…900 1/min) valmistas aastal 1883 Otto tehases töötav masinaehitusinsener Gottlieb Daimler (1834–1900) ja esimese automootori ning auto aastal 1885 saksa insener ja ettevõtja Carl Friedrich Benz (1844–1929). Nüüdisaegse kõrgepingelise elektrilise süütesüsteemi töötas aastal 1902 välja saksa mehaanik ja ettevõtja Robert Bosch (1861–1942), kellelt pärinevad ka paljud muud liiklusvahendite elektriseadmete täiustused. Elektrilise starteri leiutas aastal 1911 USA insener Charles Kettering (1876–1958). [1.15]

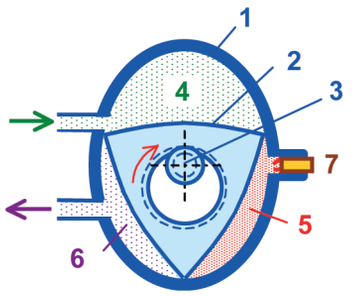
Bensiini põlemisomaduste parandamiseks (detoneerimise ehk *kloppimise* vältimiseks) hakati sellele aastal 1923 USA firma *General Motors* keemiku Thomas Midgley (1889–1944) poolt väljatöötatud menetlusel lisama tetraetüülpliid $(C_2H_5)_4Pb$ (ligikaudu 1 cm^3 iga liitri bensiini kohta). Autode heitgaasis eraldus vastavalt ligikaudu 1 g pliioksiidi PbO iga liitri kasutatud bensiini kohta, mis tõi endaga kaasa õhu, pinnase ja veekogude ulatusliku mürgitamise. Ainuüksi USAs arvatakse olevat sattunud sel teel keskkonda 20. sajandi jooksul 7 Mt pliid [2.14]. Eriti mürgitatud on autoteede ääreala kauguseni kuni mõnisada meetrit. Inimeste sagenenud terviserikete ning keskkonnakahjulikkuse tõttu lõpetati selle lisandi kasutamine enamikus riikides järk-järgult aastail 1970…1990. Euroopa Liidus tervikuna on pliid sisaldav bensiin keelatud alates 1. jaanuarist 2000.

Diiselmootoris, mille leiutas aastal 1892 saksa insener Rudolf Diesel (1858–1913), saavutatakse õhu komprimeerimisel sedavõrd kõrge temperatuur, et sissepritsitav kütus süttib. Tänu elektrilise süütesüsteemi äralangemisele on diiselmootori ehitus lihtsam ja selles saab kasutada raskemaid ning mõnevõrra odavamaid *diislikütuseid*. Viimaseid saadakse enamasti nafta krakkimise teel, kuid naftasaaduste kallinemise ja naftavarude ammendumisohu tõttu on viimasel ajal järjest sagedamini hakatud kasutama õlitaimedest (nt rapsist või sojast) saadavat kütust (*biodiislikütust*). Nagu bensiinimootorid, nii ka diiselmootorid on tavaliselt mitmesilindilised, kusjuures peaaegu võrdsel määral on levinud nii nelja- kui ka kahetaktilised mootorid. Diiselmootorid on kasutusel eeskätt veoautodel, autobussidel, veduritel, laevadel, tankidel ja elektrijaamades, kuid küllalt sageli ka sõiduautodel (näiteks Euroopas on diiselmootoriga varustatud ligikaudu 1/3 kõigist sõiduautodest). Automootorite võimsus võib olla kuni mõnisada kilovatti, vedurimootoreid valmistatakse võimsuseni kuni 6 MW, laevamootoreid võimsuseni kuni 80 MW. Diiselmootorite kasutegur on mõnevõrra kõrgem kui bensiinimootoritel (kuni 42 %), erimass aga mõnevõrra suurem (2,8…6 kg/kW).

Elektrijaamades kasutatakse diiselmootorist ja generaatorist koosnevaid agregaate võimsusega mõnekümnest kilovatist mõnekümne megavatini niihästi pidevtalitluses kui ka tipukatte- ja varutoiteallikatena. Väga levinud on automaatselt (mõne sekundi kuni mõne minuti jooksul) käivituvad töökindlad diisel-varutoiteallikad vastutusrikaste elektritarbijate (haiglate, pankade, lennujaamade, raadio- ja televisioonijaamade jms) elektrivarustussüsteemides.

R. Diesel patenteeris oma mootori aastal 1893 ja esitles seda edukalt Pariisi maailmanäitusel aastal 1900. Pärast seda algas Saksamaa mootoritehas *MAN* (*Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg*) diiselmootorite seeriatootmine ja juba aastal 1903 hakati neid paigaldama laevadele. Aastal 1904 paigaldas see firma maailma esimese diiselmootorgeneraatori Kiievi elektrijaama ja valmistas aastal 1923 maailma esimese diiselveoauto. Esimese diiselsõiduauto võttis tootmisse aastal 1934 saksa firma *Mercedes-Benz* [1.15].

Vahelduvasuunaliselt kiiresti liikuvad kolvid põhjustavad paratamatult mootori vibratsiooni. Selle puuduse vältimiseks on ette pandud valmistatada pöörleva kolviga (rootor-) mootoreid, mille hulgas on levinuim saksa inseneri Felix Heinrich Wankeli



Joonis 2.5.4. Vankelmootori ehituspõhimõte.
***1* silinder, *2* rootor, *3* võll,**
***4* kompressioonikamber, *5* süütekamber,**
***6* väljalaskekamber, *7* süüteküünal**

(1902–1988) aastal 1924 leiutatud ***vankelmootor***. Selle mootori kolmetahuline kolb pöörleb ekstsentriliselt ovaalse (täpsemalt öeldes *epitrohhoidse*) ristlõikega silindris ja paneb üle oma sisehammastuse pöörlema mootori võlli (joonis **2.5.4**).

Rootori ristlõige (*Reuleaux' kolmnurk*) on valitud selliselt, et selle servad libisevad mööda silindri sisepinda, moodustades kolm muutuva mahuga kambrit. Igal rootori tahul toimub igal täispöördel üks neljataktiline töötsükkel ja seega tuleb rootori iga pöörde kohta 3 töötsüklit. Rootori suhtes ekstsentriline võll teeb tavaliselt 3 pööret rootori iga pöörde kohta. Vankelmootori käik on ühtlasem kui kui edasi-tagasi liikuvate kolbidega mootoreil, vibratsioon puudub peaaegu täielikult ja erimass on ligikaudu kaks korda väiksem. Kütuseks on enamasti bensiin, kuid valmistatakse ka diislikütusel talitlevaid mootoreid. Kahe- kuni kuuesilindrilisi vankelmootoreid võimsusega kuni 200 kW on kasutatud eeskätt sõidu- ja sportautodel, väiksemaid aga mootorratastel ja kartautodel. Vankelmootori olulisim puudus on kütuse ebatäielikum põlemine ja seetõttu kahjulike komponentide suurem kogus heitgaasis ning kütuse suurem kulu. Silindri sisepinna kattes ja rootori servades tuleb kasutada kulumiskindlaid erimaterjale, mis teeb mootori suhteliselt kalliks.

Kuna lihtsaid vankelmootoreid saab valmistada väga väikese nimivõimsusega, on neid hakatud kasutama elektrilistes pisitoiteallikates alates võimsusest 0,1 W.

Sisepõlemismootoreis muundub tavaliselt 60…80 % kütuse keemilisest energiast soojuseks. Kuigi suurem osa kaosoojusest eraldub heitgaasiga, vajavad nad intensiivset õhk- või vesijahutust. Ühtlasi saab aga statsionaarsete mootorite jahutusõhku ja -vett kasutada nt ruumide kütteks, töös-

tusettevõtetes mõnikord aga ka tehnoloogilistes protsessides vajaliku auru tootmiseks. Viimasel juhtumil võib nt diisel-koostootmis-elektrijaama kasutegur tõusta ligi 90 protsendini.

Aastal 1998 ehitas firma *Siemens* Saksamaa riigipäevahoonele diisel-koostootmiselektrijaama, mille elektriline võimsus on 1600 ja soojusvõimsus 1840 kW ja mille juurde kuulub kogukas maa-alune suvist soojuse ülejääki vastuvõttev soojussalvesti. Jaama aastane kasutegur on ligikaudu 90 % [2.15].

Nii bensiini- kui ka diiselmootorite üks suurimaid puudusi on **heitgaas**. Kuna kummagi mootoriliigi kütuses on ligikaudu 85 % süsinikku ja 15 % vesinikku, on selle loomulikeks põlemissaadusteks süsinikdioksiid CO_2 ja veeaur H_2O, mis mõlemad kujutavad endast *kasvuhoonegaase* (vt jaotis **7.2**). Peale selle sisaldavad heitgaasid aga ka keskkonna- ja tervise-ohtlikumaid komponente, mille hulgas on

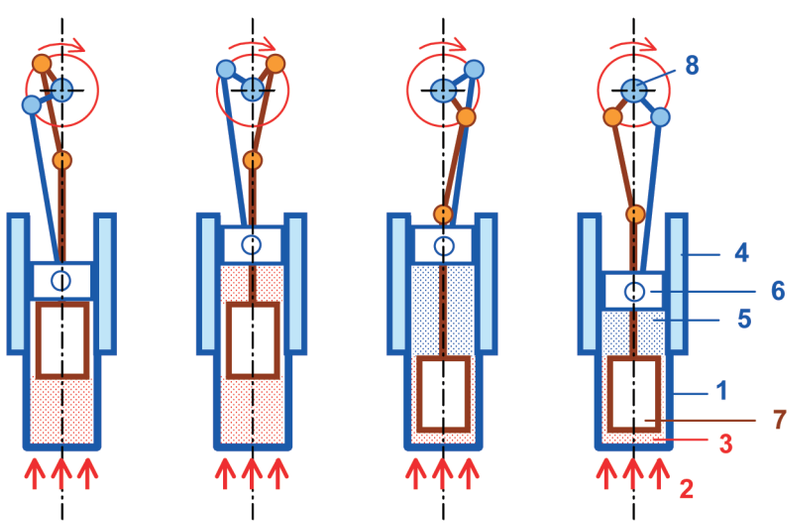
- süsinikoksiid (vingugaas) CO kütuse mittetäieliku põlemise tõttu,
- vääveldioksiid SO_2 kütuste väävlisisalduse tõttu,
- lämmastikoksiidid NO_x õhulämmastiku reageerimise tõttu kõrgel temperatuuril hapnikuga,
- bensool C_6H_6, mis tekib mittetäielikul põlemisel ja mis võib põhjustada vähki ning tuua kaasa vere- ja pärilikkuskahjustusi,
- mitmesugused muud põlemata jäänud lenduvad süsivesinikud,
- diiselmootorite puhul peale selle veel *diislinõgi* – ülipeenteralised põlemata kõrgmolekulaarsed polütsüklilised osakesed, mis tekivad peaasjalikult õhuvaegusest sõidukite kiirendamisel ja mis kuuluvad eriti ohtlike kantserogeensete ainete hulka.

Lähemalt käsitletakse nii neid kui ka teisi saasteaineid ning nende emissiooni vähendamise võimalusi käesoleva raamatu jaotises **7.4.**

Välise küttega kolbmootorite hulgas on levinuim inglise vaimuliku Robert Stirlingi (1790–1878) aastal 1817 leiutatud ***stirlingmootor***, mis põhineb kinnises silindris oleva gaasi (õhu, vesiniku, heeliumi vm) perioodilisel kuumutamisel ja jahutamisel koos selle juhtimisega vaheldumisi kuuma ja külma ruumi (joonis **2.5.5**).

Joonisel kujutatud stirlingmootori silindris on kaks omavahel kooskõlastatult liikuvat kolbi – töökolb, mis annab kuumutatava gaasi paisumistöö edasi väntvõllile või muule mehhanismile, ja väljatõrjekolb, mis suunab kuuma paisunud gaasi seejärel jahutatavasse külma ruumi. Pärast gaasi mahajahutamist suunatakse see väljatõrjekolvi abil uuesti kuumutatavasse ruumi. Joonisel kujutatud väntvõlli asemel on kasutusel ka teisi mehhanisme, nt paarishammasrattaid, mis samuti tagavad mõlema kolvi sünkroniseeritud liikumise. Valmistatakse ka stirlingmootoreid, mille kuum ja külm ruum paiknevad eraldi, omavahel toruga ühendatud silindreis.

Stirlingmootor talitleb seda tõhusamalt, mida suurem on silindri kuuma ja külma ruumi temperatuuride vahe. Seetõttu kasutatakse jahutamiseks mõnikord eriti madalatemperatuurilisi *krüovedelikke*. Silindri kuumutamine võib toimuda mingi kütuse leegiga, kuid võidakse kasutada ka nt kontsentreeritud päikesekiirgust, geotermaalsoojust ja



Joonis 2.5.5. Lihtsaima stirlingmootori ehitus- ja talitluspõhimõte.
***1* silinder, *2* kuumuti, *3* kuum ruum, *4* jahuti (nt veesärk), *5* külm ruum, *6* töökolb, *7* väljatõrjekolb, *8* väntvõll**

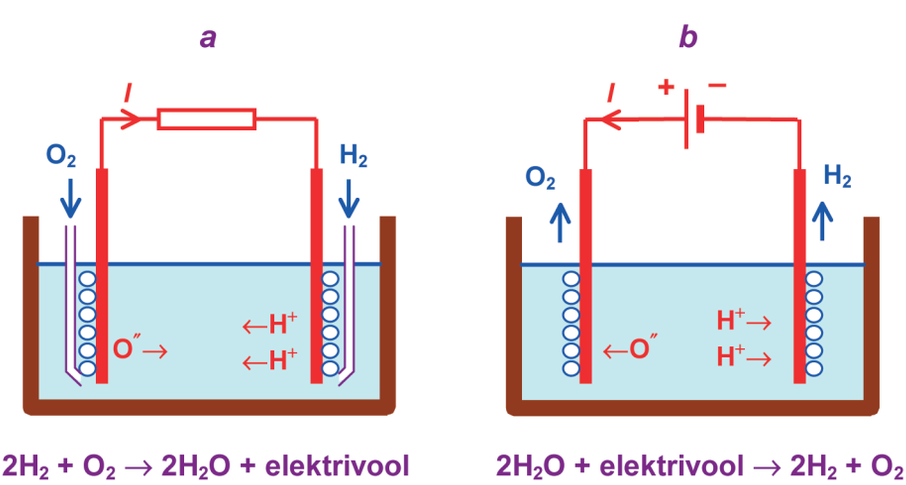
radioaktiivseid isotoope (nt plutooniumi). Stirlingmootori silindris on gaasirõhk palju madalam kui sisepõlemismootorites, mistõttu selle ehitus on lihtsam, kuid mõõtmed enamasti mõnevõrra suuremad. Stirlingmootorite eeliste hulka kuulub ka vaikne käik, mistõttu nad on leidnud kasutamist allveelaevades. Neid valmistatakse nimivõimsusega kuni ligikaudu 100 kW ja kasutatakse paigaldistes, milles nõutakse võimalikult suurt lihtsust ja töökindlust. Ühtlasi võimaldavad nad kasutada kütuseid, mis sisepõlemismootoreis ei tule kõne alla (nt biogaasi).

Stirlingmootor, mis algselt oli kavandatud lõhkeohtlikeks osutunud aurumasinate asendamiseks, on viimaseil aastail leidnud järjest sagedamat rakendamist ka elektroenergeetikas. Nii näiteks hakkas aastal 2005 Lõuna-Saksamaal asuv ettevõte *Sunmachine Vertriebsgesellschaft* turustama üksikehitiste jaoks mõeldud, puidugraanulitega köetavatel stirlingmootoritel põhinevaid mini-koostootmisjaamu elektrilise võimsusega 5 kW, soojusvõimsusega 15 kW, kasuteguriga 90 % ja hinnaga 23 000 eurot, pidades neid seoses elektri- ja soojusvõrkudest saadava energia pideva kallinemisega täiesti konkurentsivõimelisteks suurte energiaettevõtetega [2.16]. Aastal 2006 teatas energiasüsteem *Southern California Edison* kavast rajada 500 MW võimsusega päikeseelektrijaam, milles päikesekiirgus keskendatakse paraboloidpeeglite abil 20 000 stirlingmootorile, mis käitavad generaatoreid võimsusega à 25 kW [2.17].

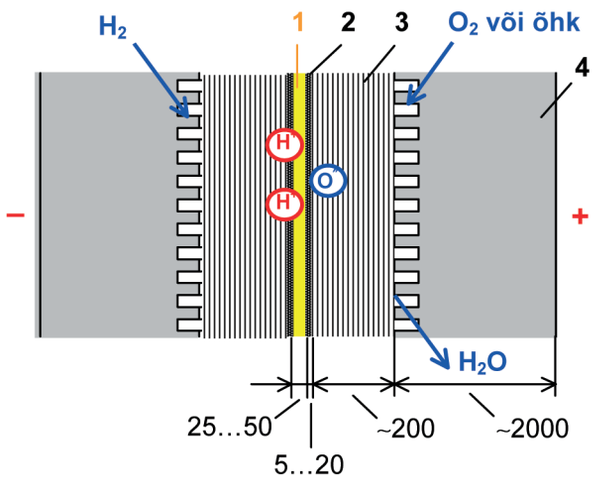
Nii sisepõlemis- kui ka välisküttega mootorid vajavad käivitamiseks lisajõuallikat, milleks enamasti on elektrimootor (starter), kuid kohtkindlates paigaldistes leiavad kasutamist ka suruõhumootorid. Väiksemaid, nt mootorratta- ja paadimootoreid saab käivitada ka inimjõul.

2.6 KÜTUSEELEMENDID

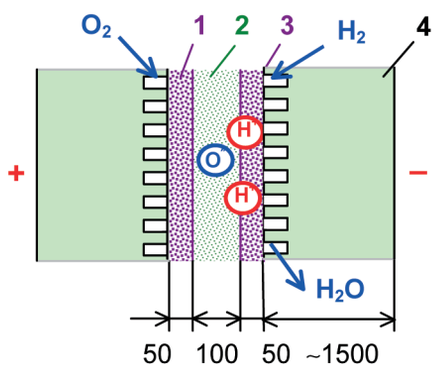
Kütuseelemendiks nimetatakse galvaanielementi, mis muundab omavahel reageerivate ainete keemilise energia elektrienergiaks, kuid mis erineb primaar-galvaanielemendist selle poolest, et reagente antakse sellesse pidevalt juurde. Lihtsaim kütuseelement põhineb vesiniku ja hapniku elektrolüütilisel ühinemisel pärast nende ioniseerimist sellekohasest materjalist valmistatud elektroodidel (joonis **2.6.1,*a***). Sellist reaktsiooni võib nimetada vee elektrolüüsi (joonis **2.6.1,*b***) pöördnähtuseks. Mõlemad reaktsiooniseadmed erinevad teineteisest selle poolest, et vee elektrolüüs võib toimuda elektroodide igasuguse materjali korral, kütuseelemendis on aga vaja katalüsaatori omadustega (nt plaatinast, poorsetest erisulamitest või muudest erimaterjalidest) elektroode. Kütuseelemendi klemmipinge



Joonis 2.6.1. Lihtsaima vesinik-hapnik-kütuseelemendi (*a*) ja vee elektrolüüsiseadme (*b*) talitluspõhimõte



Joonis 2.6.2. Prootonivahetus-polümeermembraaniga kütuseelemendi ehituspõhimõte.
***1* polümeermembraan, nt veega immutatud poorne tetrafluoreteen (naflion), *2* katalüsaatorelektrood (plaatina-nanopartikleid sisaldav poorne süsinik), *3* ülipoorne süsinikpaber, *4* gaasiuuretega varustatud grafiitplaat. Mõõtmed on esitatud mikromeetrites**



Joonis 2.6.3. Kõrgetemperatuurilise oksiidmembraaniga kütuseelemendi ehituspõhimõte.
***1* poorne keraamiline (nt strontsiumilisandiga $LaMnO_3$-) katood, *2* hapnikuioone läbilaskev tsirkooniumoksiidmembraan, *3* poorne keraamiline (nt nikli- ja tsingilisandiga ZrO_2-) anood, *4* kroomisulamist, gaasiuuretega varustatud plaat. Mõõtmed on esitatud mikromeetrites**

on enamasti 0,8…1 V, mistõttu kütuseelementide patareis ühendatakse jadamisi vastavalt nõutavale väljundpingele mõni kuni mõnisada elementi.

Kütuseelement võib olla, nagu näidatud joonisel **2.6.1**, vedela elektrolüüdiga. On kasutatud nt kaaliumhüdroksiidi KOH ja fosforhappe H_3PO_4 lahuseid. Sagedamini kasutatakse aga elektrolüüdi asemel tahkeid ioonivahetusmembraane, mis lasevad läbi kas vesiniku- või hapnikuioone. Nii membraan kui ka elektroodid on sel juhul väga õhukesed (kokku mitte enam kui mõni kümnendik millimeetrit), mistõttu elemendi ehitus võib kujuneda lehetaoliseks. Joonisel **2.6.2** on kujutatud madalatemperatuurilise polümeermembraaniga, joonisel **2.6.3** aga kõrgetemperatuurilise tsirkooniumoksiidmembraaniga kütuseelemendi ehituspõhimõte.

Polümeermembraaniga kütuseelemendid talitlevad membraani ja elektroodide temperatuuril 70…90 °C, kuid mõningad uuemad polümeerid lubavad temperatuuri kuni 220 °C. Nende elektriline kasutegur on tavaliselt ligikaudu 60 %, kuid kui saab kasutada eralduvat soojust, võib resulteeruv kasutegur olla ligikaudu 90 %. Selliste kütuseelementide patareisid saab valmistada väga mitmesuguse nimivõimsusega – mõnest kümnendikust vatist kuni mõnesaja kilovatini, mistõttu nad on leidnud eelistatud kasutamist nii kantavate elektroonikaseadmete (arvutite, mobiiltelefonide) kui ka liiklusvahendite, allveelaevade ja väikehoonete toiteallikaina. Valmistatakse ka kütuseelemente, mis talitlevad mitte vesinikul, vaid metanoolil (metüülalkoholil CH_3OH). Selliste kütuseelementide kasutegur on väiksem (20…30 %) ja hind kõrgem, kuid neid puudusi kompenseerib vedelkütuse lihtne salvestamine ja edastamine. Polümeermembraani ja seega ka kogu kütuseelemendi tööiga on tavaliselt kuni 5000 tundi.

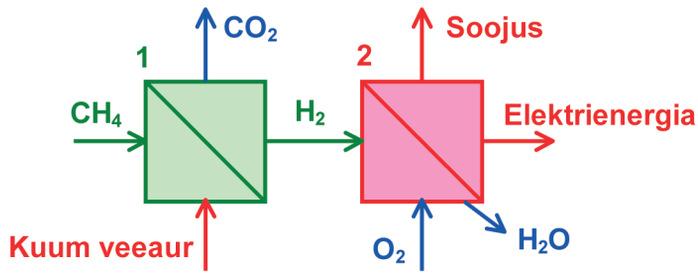
Oksiidmembraaniga kütuseelemendid talitlevad temperatuuril 800…1000 °C ja võivad kütusena kasutada vesinikku või maagaasi, mis sellel temperatuuril reageerib veeauruga ja annab reaktsiooni tulemusel vesiniku ja süsinikdioksiidi:

$$CH_4 + 2H_2O \rightarrow 4H_2 + CO_2.$$

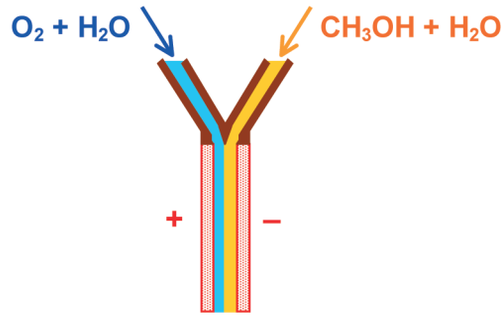
Selles reaktsioonis saab kasutada osa sellest veeaurust, mis tekib kütuseelemendis metaani lagundamisel tekkiva vesiniku ja juurdeantava hapniku ühinemisel:

$$4H_2 + 2O_2 \rightarrow 4H_2O.$$

Kõrgel temperatuuril eralduvat soojust saab kasutada aga ka lisa-veeauru tootmiseks, mida omakorda saab anda soojusvahetisse või auruturbiini. Oksiidmembraaniga kütuseelemendi elektriline kasutegur on 60…70 %, kuid elektrienergia ja soojuse koostootmisel võib saavutada kasuteguri isegi üle 90 %, mistõttu nad sobivad kasutamiseks hoonete ja muude rajatiste kohalikes elektrijaamades. Selliste elementide patareisid valmistatakse seeriaviisiliselt võimsusega mõni kuni mõnisada



Joonis 2.6.4. Reformeri (1) kasutamise näide vesiniku tootmiseks kütuseelementide patareile (2)



Joonis 2.6.5. Membraani- ja elektrolüüdivaba kütuseelemendi ehituspõhimõte

kilovatti. Kütuseelemendi eluiga on tavaliselt 20 000 kuni 30 000 tundi ja see sobib pikaajaliseks kestevtalitluseks. Väljalülitamise korral tuleb kütuseelemendipatareid sellekohase kütteseadme abil hoida normaalsel talitlustemperatuuril, sest käivitamine külmast olekust võib kesta mitu päeva.

Mõnevõrra odavamatel materjalidel põhineb teine kõrgetemperatuuriline kütuseelement, mille elektrolüüdiks on sula kaalium- või liitiumkarbonaat (K_2CO_3 või Li_2CO_3) $LiAlO_2$-maatriksis ja mille töötemperatuur on 600…660 °C (**sulakarbonaat-kütuseelement**). Elektrolüüt laseb läbi karbonaadiioone CO_3', mis tekivad katoodipoolel süsinikdioksiidi ja hapniku ühinemisel. Ka selles elemendis saab kütusena kasutada maagaasi, peale selle aga ka söe- ja biogaasi, mistõttu nad sobivad kasutamiseks kohalikes väikeelektrijaamades võimsusega 10 kW kuni 1 MW, samuti aga ka laevadel ja rööbassõidukitel. Selliste kütuseelementide elektriline kasutegur on väiksem kui oksiidmembraaniga elementidel (60…65 %), eluiga aga pikem (30 000 kuni 40 000 tundi) ja oma hinnalt on nad võistlusvõimelisemad muude kohalike energiaallikatega.

Klassikalist **aluselise (kaaliumhüdroksiid-) elektrolüüdiga** kütuseelementi iseloomustab suur töökindlus, madal töötemperatuur (alla 100 °C) ja kõrge kasutegur (ligikaudu 70 %), kuid selles tuleb kasutada suure väärismetalli- (plaatina-) või erisulamisisaldusega elektroode, mistõttu seda rakendatakse vastutusrikastel juhtudel, nt kosmoseaparaatides, sõjaväeseadmetes ja energiasalvestites võimsusega 5…150 kW. Kütusena kasutatakse vesinikku või hüdrasiini (N_2H_4).

Happelise (fosforhappe-) elektrolüüdiga kütuseelementide töötemperatuur on 160…220 °C, mida võib lugeda ideaalseks, kui kütuseelemente tahetakse kasutada kohalikes elektrienergia ja soojuse koostootmisjaamades. Hape on imbutatud poorsessse ränikarbiid-teflonmembraani, vääris-metallivajadus on väiksem kui aluselise elektrolüüdiga elementides, elektriline kasutegur on aga tunduvalt madalam (ligikaudu 55 %). Kütuseks on puhas vesinik, mida võidakse saada ka maa- või söegaasist kütuseelementide patarei ette lülitatava **reformeri** abil (joonis **2.6.4**). Selliste kütuseelementide patareisid on valmistatud võimsusega kuni 11 MW.

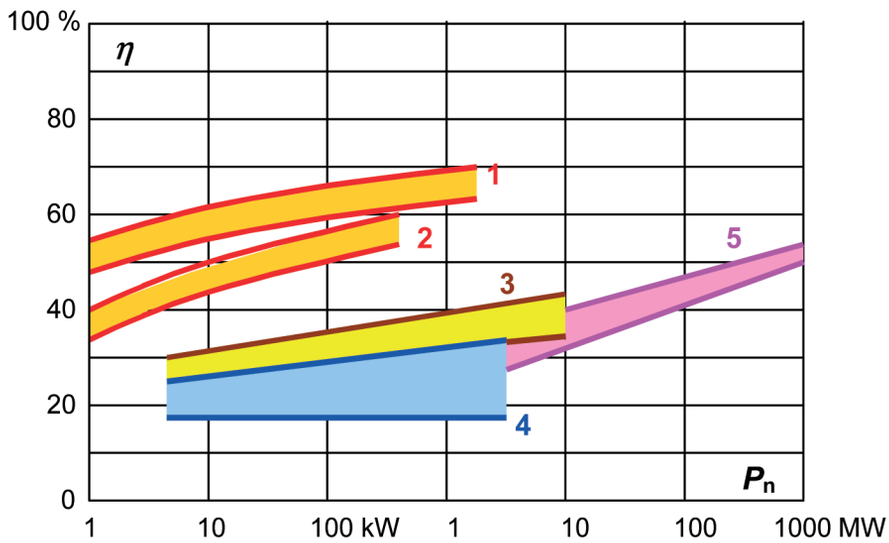
Protsessid reformeris on tegelikult keerukamad kui joonisel **2.6.4** kujutatud ja toimuvad mitmeastmeliselt. Peale süsinikdioksiidi tekib reformeri algastmes ka süsinikoksiid, mille sattumist kütuseelementi tuleb kõigiti vältida, sest see võib plaatinal või erimetallisulamitel põhineva katalüsaatori rivist välja viia. Enne reformerit tuleb gaas puhastada väävlist, mis samuti võiks kütuseelemente kahjustada.

Peale eelnimetatud viie põhiliigi on teisigi kütuseelementide süsteeme. Nende hulgas väärib nimetamist aastal 2006 väljatöötatud membraanivaba mikro-kütuseelement, milles metanooli vesilahus ja hapnikuga rikastatud vesi voolavad kapillaartorus laminaarselt teineteise kõrval. Kummagi vedelikukihi paksus on mõni mikromeeter ja OH'-ioonid liiguvad takistamatult anoodile (joonis **2.6.5**).

Kütuseelementide eelised otto- ja diiselmootorite ning auru- ja gaasiturbiinide ees seisnevad

- kõrgemas kasuteguris (vt joonis **2.6.6**),
- pikemas hooldusvabas talitluses (10 000 kuni 40 000 tundi)
- liikuvate osade puudumises (väljaarvatult pumbad ja ventilaatorid),
- kahjulike heitgaaside puudumises,
- elektrienergia ja soojuse lihtsamas koostootmisvõimaluses,
- müra- ja vibratsioonivabas talitluses.

Vaatamata sellele, et kütuseelemendid on võimsusühiku kohta 2 kuni 3 korda kallimad kui eelnimetatud teised energiamuundurid ja et ka nende ruumivajadus on mitu korda suurem kui nt diisel-



Joonis 2.6.6. Mõningate energiamuundurite kasuteguri (*η*) olenevus nimivõimsusest (P_n) (tugevasti lihtsustatult).
***1* kõrgetemperatuurilised ja aluselise elektrolüüdiga kütuseelemendid,**
***2* madalatemperatuurilised kütuseelemendid, *3* diiselmootorid, *4* ottomootorid, *5* auru- ja gaasiturbiinid**

mootorist ja generaatorist koosnevatel agregaatidel, on nende kasutusala 21. sajandi esimestel aastatel hakanud kiiresti laienema ja pärast aastat 2010 prognoositakse nii kohtkindlates paigaldistes kui ka liiklusvahendites kasutatavate kütuseelementide masstootmist ning sellega seoses ka nende hinna tunduvat vähenemist.

Vesiniku ja hapniku elektrolüütilise (leegita) ühinemist märkas esimesena aastal 1838 Baseli ülikooli keemiaprofessor Christian Friedrich Schönbein (1799–1868), kes selle nähtuse edasiuurimisel avastas aastal 1839 **osooni**. Tema seda nähtust kirjeldava artikli põhjal alustas aastal 1839 vesiniku elektrolüütilise hapendumise uurimist inglise advokaat ja füüsik William Robert Grove (1811–1896), kellel õnnestus valmistada plaatina- ja kuldelektroodidega elektrienergiaallikas, mille ta nimetas *gaasipatareiks*. Väga väikese võimsuse tõttu ei leidnud see tehnilist rakendamist, kuid huvi kütuse otsese muundamise vastu elektrienergiaks säilis ja aastal 1889 valmistasid inglise füüsikud Ludwig Mond ja Charles Langer tõhusama muundusseadme, mille nad nimetasid **kütuseelemendiks** (*fuel cell*) [2.18]. Kütuseelementide teooria esitas aastal 1894 Leipzigi ülikooli elektrokeemiaprofessor, Tartu Ülikooli lõpetanud Wilhelm Friedrich Ostwald (1853–1932), näidates ühtlasi, et nende kasutegur võib teoreetiliselt olla isegi üle 90 %. Kütuseelementide tegelik rakendamine algas 1950ndail aastail, mil Braunschweigi tehnikaülikooli tehnilise füüsika professor Eduard Justi (1904–1986) ja *King's College'i* (Cambridge, Suurbritannia) teadur Francis Thomas Bacon (1904–1992) võtsid KOH-elektrolüüdiga kütuseelemendis teineteisest sõltumatult kasutusele plaatina asemel odavamad poorsest karbonüülniklist elektroodid. Justi saavutas aastal 1955 oma laboratoorsel patareil kasuteguri 76 %, Bacon valmistas aastal 1959 mõnevõrra väiksema kasuteguriga patarei võimsusega 6 kW. Samal aastal rakendas USA firma *Allis-Chalmers* 15-kW kütuseelementide patareid traktoril, firmad *Pratt & Whitney Aircraft* ja *General Electric* töötasid aga välja polümeermembraaniga kütuseelemendi, mis võeti aastal 1965 kasutusele kosmoselaeval *Gemini 5*. Aastal 1968 kasutati kosmoselaeval *Apollo* Baconi KOH-elektrolüüdiga kütuseelemente, millest peale elektrienergia saadi ka joogivett. ZrO_2-membraaniga kütuseelemendi töötas välja aastal 1958 USA firma *Westinghouse*. 1970ndail aastail algas kütuseelementide rakendamine väikeelektrijaamades ja aastal 1983 ehitas USA firma *United Technologies Corp.* kaks H_3PO_4-elektrolüüdil põhinevat elektrijaama (New Yorgis ja Tokios). Esimesed seeriatootmiseks sobivad kütuseelementidega sõiduautod valmistas aastal 1994 ja autobussid aastal 1997 firma *Mercedes-Benz*. Kütusena kasutatakse neis vesinikku, sõiduautodes ka metanooli. Aastal 2006 valmistati Jaapanis ka esimesed kütuseelementidega vedurid ja Saksamaal esimesed väikelaevad (allveelaevades kasutati kütuseelemente juba 1980ndail aastail).

2.7 MAGNETOHÜDRODÜNAAMILISED GENERAATORID

1970ndail ja 1980ndail aastail uuriti ja katsetati maailmas (eeskätt USAs ja NSV Liidus) intensiivselt kütuste põletamisel tekkiva energia vahetu muundamise võimalusi elektrienergiaks **magnetohüdrodünaamiliste generaatorite** abil, mis põhinevad elektromotoorjõu tekkel ioniseeritud gaasivoolus, kui see läbib tugevat magnetvälja. Sellise seadme ehitus- ja talitluspõhimõte on esitatud joonisel **2.7.1**.

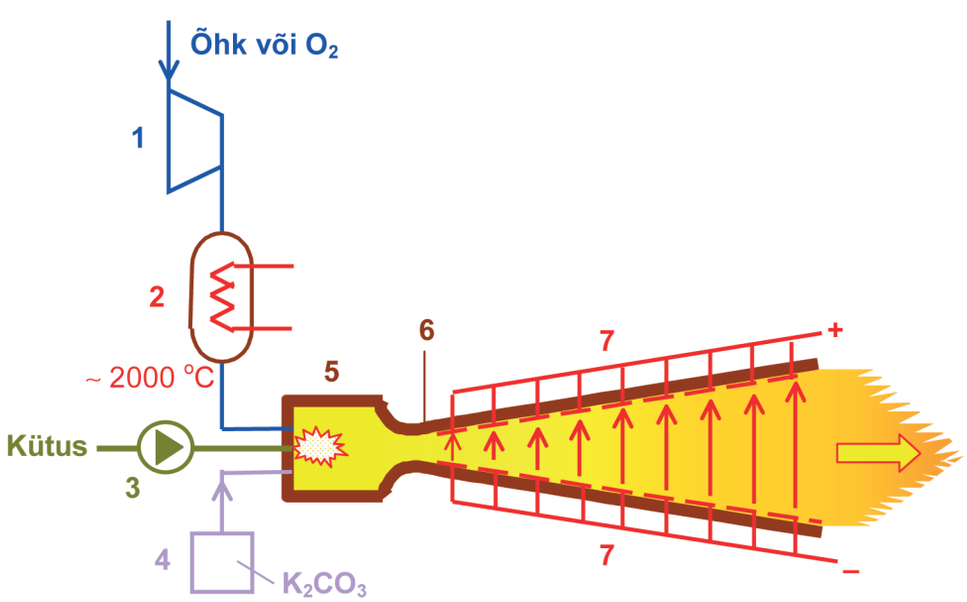
Põlemiskambri väljundis tekitatav rõhk (nt 0,3 MPa) ja kõrge temperatuur (nt 3000 °C) tekitavad suure kiirusega (kuni 1000 m/s) leviva põlemisgaasivoo, milles tugeva magnetvälja (ferromagnetilise magnetsüsteemi kasutamisel kuni 2 T, ülijuhtivate mähiste kasutamisel kuni 8 T) toimel indutseerub kõrge alalis-elektromotoorjõud (kuni ligikaudu 20 kV). Kuna gaasi kiirus ja temperatuur on ka gaasikanalist väljumisel veel vägagi kõrged, on joonisel kujutatud magnetohüdrodünaamilise generaatori kasutegur suhteliselt väike (10…15 %). Väljuva gaasi energia ärakasutamiseks võib selle suunata aga aurukatlasse, mis toidab auruturbiini (joonis **2.7.2**). Sellise kombineeritud süsteemi korral, milles magnetohüdrodünaamilise generaatori osa elektrienergia tootmises on 40…50 %, auruturbiingeneraatori osa aga ülejäävad 60…50 %, võib saavutada kasuteguri kuni ligikaudu 60 %. Veel suurema kasuteguri võib saavutada elektrienergia ja soojuse koostootmisel.

Magnetohüdrodünaamiliste generaatorite põhieelisteks tuleb lugeda kompaktsust ja kiiret käivitumist (2…5 s), mistõttu nende põhikasutusalaks prognoositi elektrijaamade varutoiteagregaate. Neid on ehitatud võimsusega kuni 25 MW, kusjuures aga nende kuumade gaasidega kokkupuutuvate osade (kanali vooderduse, elektroodide jms) tööiga on osutunud liiga lühikeseks (seni mitte üle 1000 h). Nende puudusteks on ka

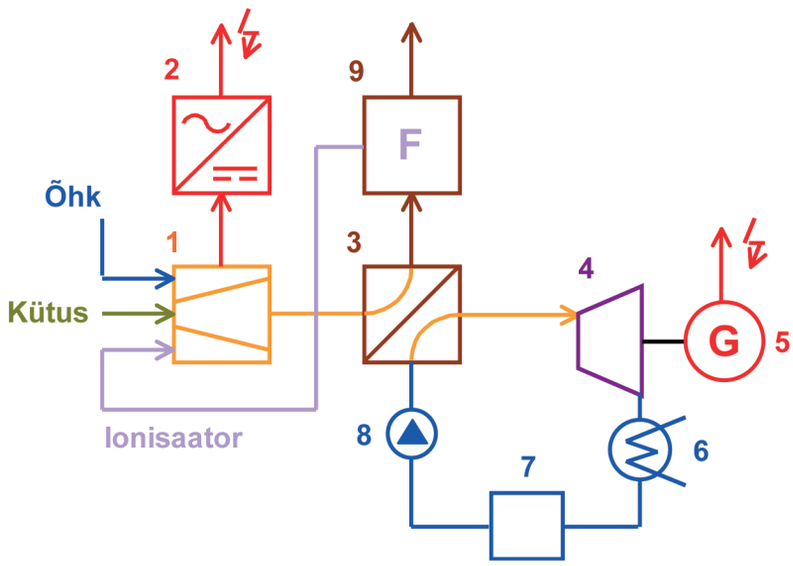
- suure kuumuskindlusega materjalide (nt kanali vooderduseks kasutatava ütrium- või tsirkooniumoksiidi) kallidus,
- ülijuhtivate mähistega magnetsüsteemi kallidus,
- generaatori kui terviku liiga väike töökindlus.

Kõige selle tõttu on kütuste põletamisel põhinevate magnetohüdrodünaamiliste generaatorite edasisest arendamisest loobutud. On valmistatud ka vedelmetallil (nt naatriumil) põhinevaid generaatoreid (vastavaid uurimusi on tehtud ka Tallinna Tehnikaülikooli soojusenergeetika instituudis), kuid ka need ei ole osutunud võistlusvõimelisteks teiste elektrienergiaallikatega.

Magnetohüdrodünaamilise generaatori idee pärineb Michael Faradaylt, kes aastal 1832 väitis isegi, et Maa mag-



Joonis 2.7.1. Magnetohüdrodünaamilise generaatori ehitus- ja talitluspõhimõte.
1 **õhu- või hapnikukompressor,** ***2*** **elektriline või muu eelkuumuti,**
3 **kütuse sissepritsimispump (gaaskütuse korral kompressor),** ***4*** **ionisaatori (nt kaaliumi) sisestusseadis,**
5 **põlemiskamber,** ***6*** **magnetpooluste vahel paiknev gaasikanal,** ***7*** **elektroodid.**
Magnetväli on joonise pinnaga risti, joonise kohal on põhjapoolus.
Elektroodidevahelised nooled näitavad voolu suunda

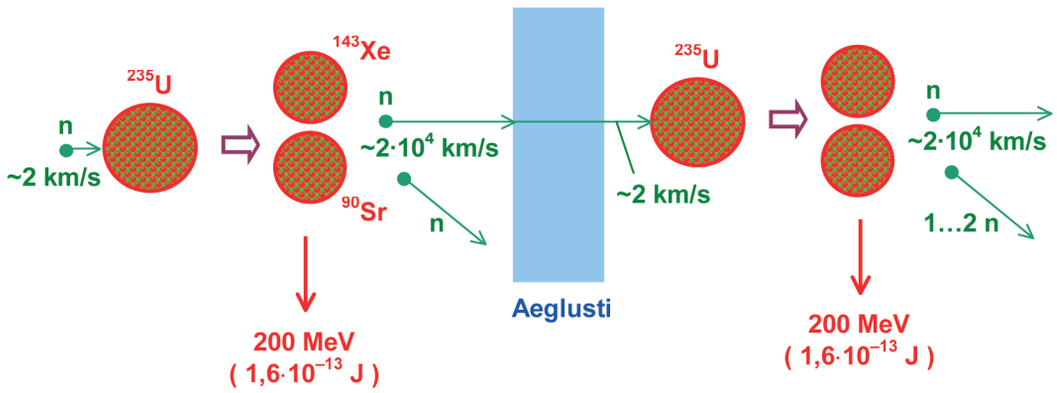


Joonis 2.7.2. Magnetohüdrodünaamilisest generaatorist, aurukatlast ja auruturbiinist koosneva energiaploki põhimõtteskeem. *1* magnetohüdrodünaamiline generaator, *2* vaheldi, *3* aurukatel, *4* auruturbiin, *5* elektrimasingeneraator, *6* kondesaator, *7* veepaak, *8* aurugeneraatori toitepump, *9* ionisaatorifilter

netväljas voolava Thamesi jõe kallaste vahel peaks tekkima elektromotoorjõud. Selle mõõtmise katse tal ei õnnestunud, mis on seletatav selleaegsete mõõteriistade liiga väikese tundlikkusega, sest jõe kallastevaheline elektromotoorjõud on umbes 30 mV. Aastal 1959 valmistati USAs esimene katseline magnetohüdrodünaamiline generaator võimsusega 10 kW, mis talitles 10 sekundit. Esimene elektrijaama paigaldatud generaator (30 kW) valmis aastal 1967 Moskvas ja aastal 1976 algasid NSV Liidu ja USA ühisuuringud võimsate magnetohüdrodünaamiliste generaatorite loomiseks. Nende tulemusena oli kavandatud paigaldada Rjazani soojuselektrijaama energiaplokk, mis oleks koosnenud neljast magnetohüdrodünaamilisest generaatorist koguvõimsusega 270 MW ja auruturbiingeneraatorist võimsusega 310 MW. Selle ploki auruturbiinosa sai valmis, kuid magnetohüdrodünaamiline osa jäi uurimuste katkestamise tõttu ehitamata.

2.8 TUUMAREAKTORID

Kui vähesed erandid välja arvata, põhinevad maailmas praegu kasutusel olevad tuumareaktorid **uraani** isotoobi ^{235}U lõhestumise ahelreaktsiooni tulemusel tekkival soojusel. Enamasti kulgeb ahelreaktsioon selliselt, et uraaniaatomi tuumaga põrkub aeglustatud (*soojuslik*, kiirusega ligikaudu 2 km/s liikuv) neutron, mille toimel aatom lõheneb kaheks kergemaks aatomiks, kusjuures vabaneb keskmiselt 2,5 uut *kiiret* (kiirusega ligikaudu $2 \cdot 10^4$ km/s liikuvat) neutronit. Reaktori stabiilsel talitlusel aeglustatakse osa kiiretest neutronitest sobiva kiiruseni aeglusti ehk *moderaatori* (nt vee, raske vee või grafiidi) abil, misjärel üks neutronitest lõhestab uue uraanituuma. Ülejäänud neutronid neelduvad kütusevarrastes, aeglustis ja reaktori muudes osades, andes neile ära oma energia, mis muundub soojuseks. Aeglustamine põhineb neutroni mitmekordsel (tavaliselt 8- kuni 10-kordsel) põrkumisel aeglusti aatomituumadega ja on vajalik selleks, et suurendada neutroni ja uraaniaatomi tuuma põrkumise tõenäosust. Et ahelreaktsioon oleks stabiilne, peab uraani ^{235}U suhteline kogus tuumkütuses olema teatavates kindlates piirides (tavaliselt 2…5 %) ja protsessi peab saama neutroneid neelavate ainetega (nt boori, kaadmiumi või hafniumiga) tõhusalt reguleerida. Piltlikult ning tugevasti lihtsustatult on sellises tuumareaktoris toimuv ahelreaktsioon kujutatud joonisel **2.8.1**.



Joonis 2.8.1. Ahelreaktsioon soojuslikel neutronitel põhinevas tuumareaktoris. Ksenooni ja strontsiumi asemel (mis on esitatud näitena) võivad uraaniaatomi lõhenemisel tekkida ka mitmesugused muud aatomid tsingist gadoliiniumini

Neutronite neeldumisel uraani ^{238}U tuumas ja sellega kaasnevate muude tuumaprotsesside tulemusel muundub mingi osa uraanist plutooniumiks ^{239}Pu, mida saab kasutada tuumkütusena muud tüüpi tuumareaktorites ja tuumarelvade valmistamiseks.

Uraaniaatomi ^{235}U lõhestumisel vabanev, soojuseks muunduv energia on 200 MeV ehk $1{,}6 \cdot 10^{-13}$ J. Kuna 1 g uraani sisaldab $2{,}6 \cdot 10^{21}$ aatomit, on eelnimetatud ahelreaktsioonil saadav energia massiühiku kohta $8{,}3 \cdot 10^{10}$ J (830 GJ) ehk 23 MWh ehk ligikaudu 1 MWd. Võrdluseks võib mainida, et 1 g tingkütuse (1 gce) põletamisel kasuteguriga 1 saadakse vaid 8,14 Wh soojust.

Looduslik uraan kujutab endast raskemetalli tihedusega 18,95 t/m^3, mis sisaldab

- 99,3 % isotoopi ^{238}U,
- 0,7 % isotoopi ^{235}U,
- 0,006 % isotoopi ^{234}U (vt joonis **2.8.2**).

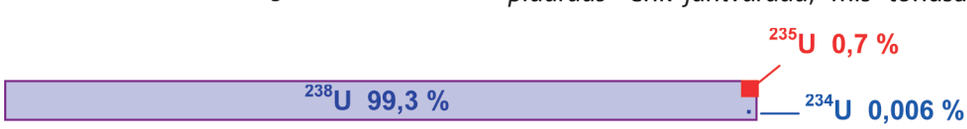
Kuna soojuslikel neutronitel põhinevates tuumareaktorites peab isotoobi ^{235}U suhteline kogus sõltuvalt reaktori liigist, nagu juba öeldud, olema 2…5 %, tuleb looduslikku uraani selle isotoobiga *rikastada*. Sellekohastes rikastamisvabrikutes toimub see enamasti madala keemistäpiga uraanheksafluoriidi UF_6 aurustamise ja sellele järgneva difusioonmenetluse või tsentrifuugimise teel.

Uraani saadakse uraanimaagist oksiidina U_3O_8. Maaki loetakse käitluskõlbulikuks, kui selle iga tonn sisaldab vähemalt 2…2,5 kg uraani. On ka maake, mis sisaldavad uraani isegi ligi 100 kg/t (nt Austraalias). Uraani on aga toodetud aastail 1945–1952 Sillamäel ka Eesti diktüoneema-argiliidist, mille uraanisisaldus on ainult 0,265 kg/t. Uraani sisaldavad ka paljud kivimid ja nt graniidis on seda ligikaudu 1,5 g/t.

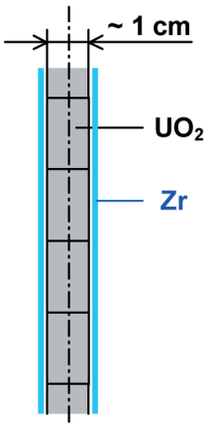
Tuumkütus (rikastatud uraan) viiakse tuumareaktorisse enamasti uraandioksiidina UO_2, kuna selle ühendi kõrge sulamistäpp (2850 °C) suurendab reaktori töökindlust (uraani enda sulamistäpp on 1132 °C). Selle aine pulbrist paagutatakse pulbermetallurgilisel menetlusel keraamilised tabletid läbimõõduga ligikaudu 1 cm ja kõrgusega 2…3 cm, mis lükitakse tsirkooniumist või tsirkooniumisulamist valmistatud torudesse pikkusega tavaliselt 3,5…4,5 m. Sel viisil saadud **kütusevardad** (joonis **2.8.3**) ühendatakse 70 kuni 300 kaupa ruudukujulise ristlõikega kimpudeks, mis paigutatakse reaktorisse enamasti püstasendis üksteisega rööbiti.

Tsirkoonium on hõbevalge plastne metall tihedusega 6,5 Mg/m^3 ja sulamistäpiga 1855 °C. Tsirkoonium ei neela aeglasi neutroneid.

Kütusevarraste ja vardakimpude vahele jääb aeglusti (moderaator), milleks enamasti on **vesi**. Reaktori seda osa, milles paiknevad kütusevardad ja milles toimub energeetiline ahelreaktsioon, nimetatakse ***aktiivtsooniks***. Vesi on seda liiki reaktorites ühtlasi soojuskandja, mille abil edastatakse soojus reaktorist aurugeneraatorisse või, kui vesi reaktoris aurustub, auruturbiini. Peale kütusevarraste paiknevad aktiivtsoonis boori (harvemini kaadmiumi või hafniumi) kõrge sulamistäpiga ühendeid sisaldavad *pidurdus-* ehk *juhtvardad*, mis tõhusalt neelavad



Joonis 2.8.2. Loodusliku uraani isotoopkoostis



Joonis 2.8.3. Soojuslikel neutronitel põhineva tuumareaktori kütusevarda ehituspõhimõte

neutroneid ja võimaldavad seega osaliselt või täielikult aktiivtsooni viimise või sellest eemaldamise teel reaktori võimsust muuta ning tarbe korral reaktoris toimuvat ahelreaktsiooni peatada. Vesireaktorites jätkuvad aga ka pärast reaktori peatamist tuumalagunemisprotsessid, mis võivad tekitada soojust kuni ligikaudu 7 % reaktori nimi-soojusvõimsusest (see on muide üks nende reaktorite puudustest). Et vältida aktiivtsooni liigkuumenemist (mis halvimal juhul võib viia kütusevarraste sulamiseni), on reaktori jahutamine ka pärast selle peatamist väga oluline. Kuigi tuumkütuse sulamine on sellekohaste automaatsete kaitsemeetmete tõttu äärmiselt ebatõenäoline, nähakse vesireaktorite ja nende juurde kuuluvate aurugeneraatorite (kui need olemas on) ümber alati ette tugevad metall- ja betoonkaitseümbrised, mis võimaliku õnnetuse korral välistavad radioaktiivsete ainete pääsu väliskeskkonda.

Tuumareaktorite võimsust väljendab kõige paremini reaktorist soojuskandja abil äraviidav soojusvõimsus. Kuna aga soojust seejärel kasutatakse enamasti lõpptulemusena auruturbiin-generaator-agregaadi käitamiseks, on energeetikas tavaks kujunenud iseloomustada reaktorit elektrigeneraatori nimivõimsusega, nimetades seda (küllaltki tinglikult) reaktori ***elektriliseks võimsuseks***.

Survevesireaktorites (joonis **2.8.4**) koosnevad kütusevardakimbud maatriksitaoliselt paigutatud 14 × 14 kuni 17 × 17 kütusevardast. Suurtes reaktorites soojusliku väljundvõimsusega 4…6 GW (elektrilise võimsusega 900…1600 MW) on selliseid kimpusid tavaliselt 150 kuni 250 ja need sisaldavad kokku 80…100 t uraani. Juhtvarraste jaoks, mis viiakse reaktorisse läbi reaktori kaane, on iga kimbu keskel vastav kanal. Reaktori võimsust saab reguleerida ka boorhappe H_3BO_3 lisamisega veele ning selle kontsentratsiooni muutmisega, kusjuures vee vooluhulk on tuumaelektrijaamade reaktorites enamasti konstantne. Vee rõhk reaktoris võib olla kuni 16 MPa ja reaktorist väljuva vee temperatuur ligikaudu 315 °C. Aurugeneraatoris võimaldab selliste parameetritega soojuskandja tekitada enamikel juhtudel auru rõhuga ligikaudu 6 MPa ja temperatuuriga 275 °C. Auru parameetrid on seega tunduvalt madalamad kui kütuse põletamisel põhinevates aurukateldes (vt jaotis **2.2**), mistõttu soojuse muundamine elektrienergiaks toimub sellises tuumaenergiaplokis märgatavalt madalama kasuteguriga – 25…30 %.

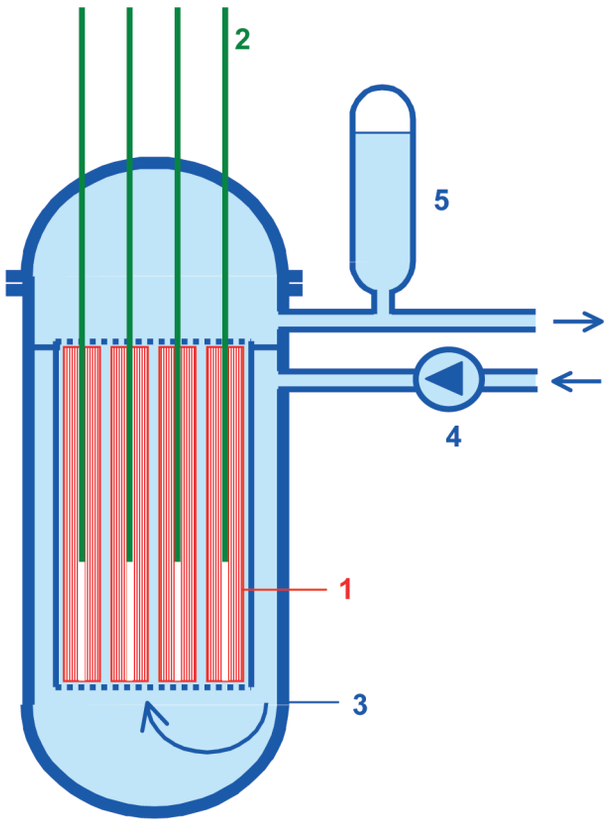
Kui arvestada, et tuumaelektrijaamas muundub elektrienergiaks vähemalt 25 % soojusest, on 1 MWd saamiseks vaja ligikaudu 4 g uraani ^{235}U ehk 0,6 kg looduslikku uraani. Põletuskütuselektrijaamades tuleb sama koguse elektrienergia saamiseks põletada umbes 8 t kivisütt ehk umbes 16 t head põlevkivi.

Survevesireaktor on levinuim tuumareaktori liik. Selliseid reaktoreid on maailma tuumaelektrijaamades ligi 300, allvee- ja pealveelaevades peale selle veel ligikaudu 220. Nende eeliseks on stabiilse talitluse lihtne tagamine, kuna reaktori võimsuse juhuslikul suurenemisel vesi kuumeneb, selle tihedus ning koos sellega neutroneid aeglustav toime väheneb, mistõttu ka reaktori võimsus väheneb (*negatiivne temperatuuri-tagasiside*). Samasugune nähtus tekib ka vee juhuslikul keemaminekul (*negatiivne mulliefekt*). Eeliseks saab lugeda ka seda, et reaktori jahutusvesi, mis on nõrgalt radioaktiivne, ringleb suletud kontuuris ja aurugeneraatorist väljuv aur on radioaktiivsusvaba.

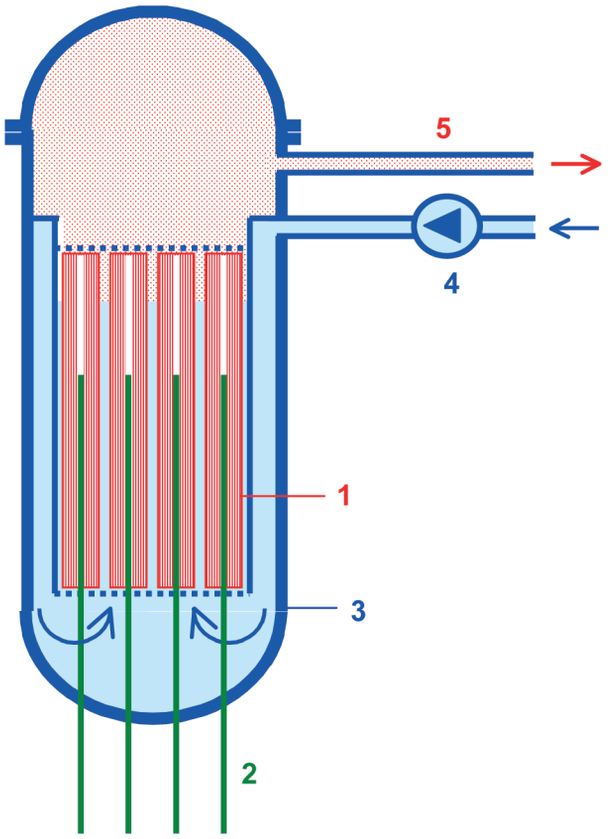
Firmade *Areva NP* (Prantsusmaa) ja *Siemens AG* (Saksamaa) koostöös töötati aastail 2000…2004 välja ülitöökindel *Euroopa survevesireator* elektrilise võimsusega 1600 MW, mille kaitsemeetmete hulgas on

- neli iseseisvalt talitlevat jahutussüsteemi, millest igaüks on võimeline reaktorit pärast väljalülitamist jahutama,
- reaktorit ümbritsev lekketihe lisakest,
- erisüvend ja jahutussüsteem sulametalli vastuvõtmiseks reaktori kütusevarraste sulamise korral,
- kahekordne eelpingestatud betoonist kaitseümbris seinte kogupaksusega 2,6 m.

Esimese sellise reaktori paigaldamine algas aastal 2005 Olkiluoto tuumaelektrijaamas Soomes. Energiaplokk tervikuna peaks valmima aastal 2009.



Joonis 2.8.4. Survevesireaktori ehituspõhimõte.
***1* kütusevardad, *2* juhtvardad, *3* reaktori kest,**
***4* toitepump, *5* rõhuregulaator.**
Juhtvarraste ajamid on näitamata



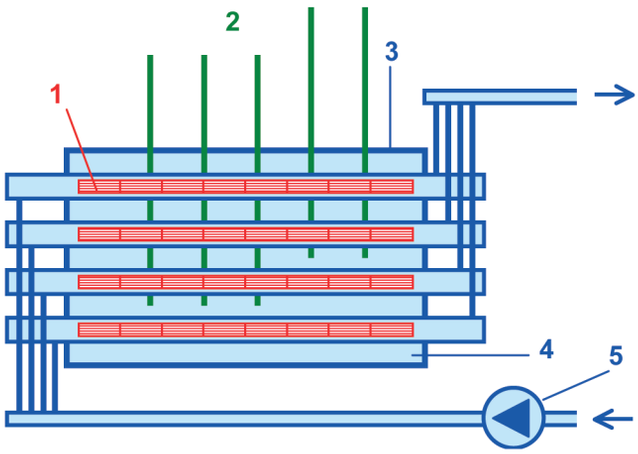
Joonis 2.8.5. Keevvesireaktori ehituspõhimõte.
***1* kütusevardad, *2* juhtvardad, *3* reaktori kest,**
***4* toitepump *5* auruväljund. Sisseehitatud ringluspumbad, auruseparaator, auru ülekuumendussüsteem**
ja juhtvarraste ajamid on näitamata

Esimene survevesireaktor valmis USAs aastal 1953 ja oli ette nähtud kasutamiseks allveelaeval. Pärast mitmekülgseid katsetusi paigaldatigi see aastal 1955 maailma esimesele tuumaallveelaevale *Nautilus*. Tuumaelektrijaamades algas nende kasutamine aastal 1957 (Shippingport, USA, 90 MW). Käesolevas raamatus käsitletakse ainult **tuumaelektrijaamades** kasutatavaid tuumareaktoreid. Allvee- ja pealveelaevade ajameid toitvad tuumareaktorid erinevad neist teistsuguste nõuete tõttu väga oluliselt. Tähtsamateks erinevusteks on muuhulgas

- väiksem soojusvõimsus (20…200 MW);
- uraani suhteliselt suurem kogus ja kõrgem rikastamisaste (^{235}U suhteline osatähtsus 20…96 %), mis võib tagada reaktori talitluse laeva kogu kasutusaja kestel, ilma et tuumkütust oleks vaja vahetada;
- uraani kasutamine reaktoris mitte uraandioksiidi, vaid uraani ja tsirkooniumi sulami kujul;
- vesisoojuskandja muudetav vooluhulk.

Keevvesireaktorite (joonis **2.8.5**) kütusevardakimbud koosnevad 74…100 kütusevardast. Võimsates reaktorites (energiaploki elektrilise nimivõimsusega 1000…1300 MW) on neid kimpusid kuni 800 ja need sisaldavad kokku kuni 140 t uraani. Soojuskandjaks on puhas (boorhappelisandita) vesi, mis reaktoris aurustub ja juhitakse pärast ülekuumendamist auruturbiini. Seega jääb ära survevesireaktorite korral kasutatav aurugeneraator, mis lihtsustab energiaploki ehitust ja tõhustab tuumaenergia muundamist soojuseks. Ühtlasi on aga turbiini minev aur mingil määral (peamiselt hapnikust tekkinud lämmastiku ^{16}N sisalduse tõttu) radioaktiivne, mis nõuab turbiini ümbritsemist kiirguskaitsevarjega. Kuna radioaktiivse isotoobi ^{16}N poolestusaeg on väga väike (7 s), on turbiin praktiliselt kohe pärast väljalülitamist radioaktiivsusvaba.

Rõhk reaktoris on enamasti ligikaudu 7,5 MPa ja vee keemistäpp seega ligikaudu 285 °C. Veetase aktiivtsoonis on tavaliselt 12…15 % kütusevarraste ülemistest otstest allpool, mistõttu aktiivtsooni ülemises osas tekib vähem aeglasi neutroneid ja ahelreaktsiooni intensiivsus on seal väiksem kui alumises osas. Nagu survevesireaktoris, nii ka siin mõjuvad soojuskandja temperatuuri tõus ja mullide



Joonis 2.8.6. CANDU-reaktori ehituspõhimõte.
***1* kütusevardad, *2* juhtvardad, *3* reaktori paak, *4* aeglusti (raske vesi), *5* soojuskandja (raske vee) toitepump.**
Juhtvarraste ajamid on näitamata

teke negatiivse stabiliseeriva tagasisidena. Reaktori võimsuse reguleerimiseks vahemikus 70…100 % kasutatakse soojuskandja vooluhulga muutmist, allpool seda aga juhtvarraste sisestamist aktiivtsooni. Reaktori võimsuse reguleerimine on seega lihtsam ja kergem kui survevesireaktorite puhul, kuid rõhu stabiliseerimine nõuab mõnevõrra keerukamaid juhtarvutiprogramme.

Keevvesireaktoreid oli 2007. aasta alguses maailma tuumaelektrijaamades kokku 73 (neist 28 Jaapanis), seega märgatavalt vähem kui survevesireaktoreid. Nende puuduseks on reaktori väiksem võimsustihedus ja suuremad mõõtmed kui sama võimsusega survevesireaktoril, põhieeliseks aga parem reguleeritavus. Ohutusmeetmed aktiivtsooni sulamise vastu on samasugused nagu survevesireaktorite korral.

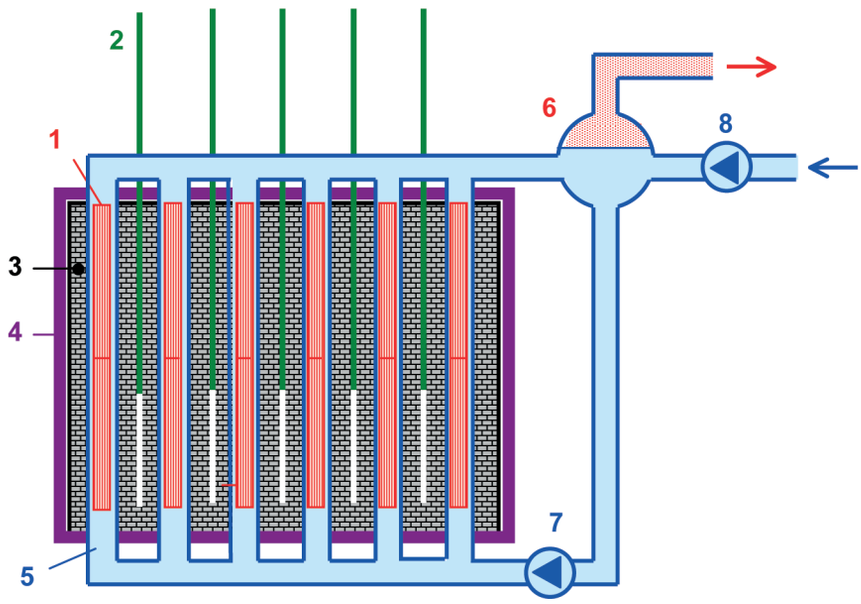
Maailma esimene katseline keevvesireaktor elektrilise võimsusega 5 MW valmis aastal 1956 Argonne'i tuumauuringulaboratooriumis (USA). Esimene tööstuslik seda liiki reaktor elektrilise võimsusega 200 MW alustas talitlust Dresdeni tuumaelektrijaamas (Illinois, USA) aastal 1960.

Peale surve- ja keevvesireaktorite on maailma eri riikide tuumaelektrijaamades kasutusel või väljatöötamisel ka teisi reaktoriliike. Alljärgnevalt on loetletud mõned levinuimad liigid.

Raskevesiaeglustiga ja -soojuskandjaga survevesireaktoreid (*CANDU-reaktoreid*) oli maailmas 2006. aasta keskel 29. Need reaktorid on välja töötatud Kanadas (nimetus *CANDU* tuleb sõnadest *Canada Deuterium Uranium*) ja võimaldavad raske vee D_2O paremate aeglustusomaduste tõttu kasutada tuumkütusena looduslikku (rikastamata) uraani. Reaktori iga kütusevardakimp läbimõõduga 10 cm sisaldab, olenevalt reaktori tüübist, 28…43 varrast, on pikisuunas jaotatud 12 lõiguks pikkusega 0,5 m ja paikneb omaette tsirkooniumsulamist torus, mida läbib soojuskandja rõhu all 7,5…10 MPa. Torud paiknevad rõhtsalt ühises paagis, mis on täidetud madalrõhulise aeglustiga (joonis **2.8.6**). Soojuskandja väljub reaktorist temperatuuriga 280…290 °C ja suunatakse, nagu teistegi survevesireaktorite puhul, aurugeneraatorisse. Reaktorit iseloomustab kõrge töökindlus, odavam tuumkütus, kütusevardakimpude lihtsa vahetamise võimalus reaktorit peatamata ja loodusliku uraani mitu korda parem ärakasutamine.

Esimene (katseline) CANDU-reaktor elektrilise võimsusega 22 MW valmis Kanadas aastal 1962. Praegugi (aastal 2007) põhinevad kõik Kanada tuumaelektrijaamad seda liiki reaktoreil võimsusega enamasti 540…935 MW. CANDU-reaktoris tekib muuhulgas triitiumi (ülirasket vesinikku), mille poolestusaeg on 12,6 a ja mida kasutatakse eeskätt tuumarelvades, kuid ka meditsiinis ja bioloogias ning pikaealiste radioluminestsentslampide valmistamiseks.

Grafiitaeglustiga kanaltüüpi keevvesireaktorid töötati välja NSV Liidus ja olid esialgu ette nähtud kasutamiseks laevadel. Esimene seda liiki reaktor AM-1 (*atomnõi morskoi*) elektrilise võimsusega 5 MW paigaldati aga aastal 1954 maailma esimesse tuumaelektrijaama Obninskis. Aastal 1973 alustas Sosnovõi Bori tuumaelektrijaamas (Peterburi lähedal Venemaal) talitlust esimene suur seda tüüpi reaktor RBMK (*reaktor bolšoi moštšnosti kanalnõi*) elektrilise võimsusega 1000 MW (joonis **2.8.7**).



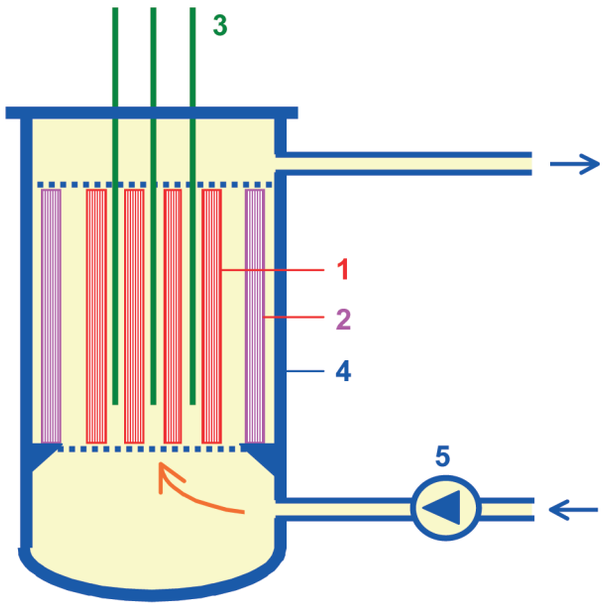
Joonis 2.8.7. Reaktori RBMK ehituspõhimõte.
***1* kütusevardad, *2* juhtvardad, *3* grafiitaeglusti, *4* reaktori kest, *5* kütusevarraste ja soojuskandja (vee) kanalid, *6* aurutrummel, *7* ringluspump, *8* toitepump.**
Kanalite kaaned ja sulgemisventiilid ning juhtvarraste ajamid on näitamata

Reaktor RBMK-1000 kujutab endast silindrikujulist teraskestaga ümbritsetud grafiitplokkide kogumit kõrgusega 7 m ja läbimõõduga 11,8 m; grafiidi üldmass on 1850 t. Läbi grafiidi kulgeb 1693 kütusekanalit, milles igaühes paikneb järjestikku kaks 18-vardalist kütusevardakimpu pikkusega 3,5 m; kokku on reaktoris 192 t uraani, mille rikastusaste on 2 %. Iga kanalit saab eraldi avada ja kütusevardakimpusid seega reaktorit peatamata vahetada. Kanalit läbib soojuskandja (vesi) rõhu all 6,5 MPa, mis reaktoris aurustub; väljuva auru temperatuur on 280 °C. Reaktori soojusvahetussüsteem sarnaneb trummel-aurukatla omaga – selles on 4 aurutrumlit ja 8 ringluspumpa (igaüks võimsusega 5,6 MW); vastavalt sellele on kanalid jaotatud rühmadesse ja alarühmadesse. Reaktori võimsust saab reguleerida 211 juhtvardaga.

Võrreldes vesireaktoritega on grafiitaeglustiga RBMK-reaktoritel rida omapärasusi, millest olulisimad on

- uraani ^{238}U intensiivsem muundamine plutooniumiks, mida saab äratöötanud kütusevarrastest eraldada ja kasutada nt tuumarelvade tootmiseks;
- soojuskandja (vee) toimimine liigsete neutronite neelajana; sellest järeldub, et vee liigkuumenemisel või ülemäärasel keemaminekul soojuslike neutronite kogus ning koos sellega reaktori võimsus suureneb (*positiivne termiline ja mulliefekt*); reaktori ebastabiilsuse teket peab välistama juhtvarraste sisseviimisel põhinev automaatne kaitsesüsteem, kusjuures osa juhtvarrastest (ligikaudu 10 %) peab olema pidevalt üleni reaktori aktiivtsoonis;
- kaitsesüsteemi sätete tahtliku muutmise ja isegi selle tahtliku väljalülitamise võimalus reaktori talitluse ajal;
- vesireaktorite korral kasutatava tugeva (enamasti, nagu eelpool mainitud, kahekordse) kaitseümbrise puudumine, mis tähendab, et reaktori kesta lekke või lõhkemise korral pääsevad radioaktiivsed ained takistamatult väliskeskkonda.

Ööl vastu 26. aprilli 1986 tehti Ukrainas asuva Tšornobili tuumaelektrijaama 4. reaktoril siirdeprotsesside katsetusi, luues seejuures ebakompetentselt reaktori ohtlikke talitlusviise ja lülitades välja reaktori automaatkaitseahelaid [2.19]. Selle tagajärjel algas katsetuste ajal reaktori võimsuse laviinitaoline kasv, kütusevarraste sulamine, vee lagunemine vesinikuks ja hapnikuks ning lõpptagajärjena tekkis paukgaasi plahvatus. Tulekahju ajal paiskus reaktorist keskkonda ligikaudu 120 t aurustunud radioaktiivseid aineid ja ligikaudu 700 t radioaktiivset grafiiti, kusjuures radioaktiivse saaste üldkogus (50 MCi) oli ligikaudu 50 korda suurem kui Hiroshimale aastal 1945 heidetud tuumapommi plahvatusel. Eri hinnanguil arvatakse olevat radioaktiivse kiirituse tagajärjel katastroofile järgnenud 20 aasta jooksul hukkunud 10 000 kuni 30 000 inimest. Pärast katastroofi kaeti Tšornobili tuumaelektri-



Joonis 2.8.8. Paljundusreaktori ehituspõhimõte (näide).
***1* kütusevardad, *2* paljundusvardad, *3* juhtvardad, *4* reaktori kest, *5* naatriumipump**

jaama hävinud reaktor betoonsarkofaagiga, katkestati kahe ehituseloleva reaktori rajamine, lülitati välja kõik 3 säilinud reaktorit, lõpetati selliste reaktorite tootmine ja täiustati Venemaal allesjäänud 12 reaktori kaitsesüsteeme. Leedus paiknevas Ignalina tuumajaamas, kus aastail 1977…1987 oli rajatud kaks seda liiki reaktorit elektrilise projektvõimsusega 1500 MW (tegeliku nimivõimsusega 1300 MW) lülitati esimene reaktor mittevastavuse tõttu Euroopa tuumaohutusnõuetele välja detsembris 2004, teine tuleb välja lülitada aastal 2009.

Kürii (Ci) on radioaktiivse ainekogumi aktiivsuse mõõtühik. Ainekogumi aktiivsus on 1 Ci, kui selles 1 s jooksul laguneb $3{,}700 \cdot 10^{10}$ aatomituuma.

Grafiitaeglustiga, kuid süsinikdioksiidsoojuskandjaga reaktorid töötati välja tuumaenergeetika arengu algaastail Suurbritannias ja on seal praegugi kasutusel. Kütusevardatorud on nendes reaktorites magneesiumisulamist, mistõttu neid nimetataks *magnox*-reaktoriteks (sõnadest *magnesium non-oxidising*). Ka nendes reaktorites saab tõhusalt toota plutooniumi. Kuna radioaktiivse kiirituse risk on nende käidus osutunud liiga suureks, on nende talitlus kavas lõpetada hiljemalt aastal 2010.

Maailma esimeses kommerts-tuumaelektrijaamas *Calder Hall*, mis avati 27. augustil 1956, olid kasutusel magnoksreaktorid elektrilise võimsusega 60,5 MW. Nende põhiülesanne nii selles kui ka hiljem teistes Suurbritannia sama tüüpi tuumaelektrijaamades oli sel ajal aga mitte elektrienergia, vaid plutooniumi tootmine.

Paljundusreaktorid ehk **briiderid** erinevad kõigist eelkäsitletuist selle poolest, et nad põhinevad kiiretel neutronitel ja et neis tekib plutooniumi näol uut tuumkütust enam kui seda reaktoris kulutatakse (sellest ka nimi *breeder,* ingl 'kasvataja, aretaja'). Tekkivast tuumkütusest ja reaktoris kasutatud tuumkütusest saadava energia suhet nimetatakse *paljundusteguriks*, mille väärtus on enamasti piirides 1,2…1,4. Paljundusteguri ülempiiriks peetakse teadaolevate reaktoriliikide korral 1,8.

Nagu juba öeldud, tekib plutoonium ka mittepaljundusreaktorites. Vesiaeglustiga reaktorites on paljundustegur tavaliselt vahemikus 0,4…0,5 ja grafiitaeglustiga reaktorites kuni 0,8.

Enamasti kasutatakse paljundusreaktoris tuumkütusena uraan- ja plutooniumoksiidi segu (kuni 20 % PuO_2 ja vähemalt 80 % UO_2). Peale kütusevarraste on reaktoris paljundusvardad, mis paiknevad kas reaktori aktiivtsoonis või seda ümbritsevas *mantlis* või mõlemas. Paljundusvardad sisaldavad looduslikku või vaesustatud uraani (viimane tekib tootmisjäägina uraani rikastamisel) ja kiirete neutronite ning muude tuumaprotsesside (eeskätt *beetamiinuslagunemise*) toimel muundub neis uraan ^{238}U plutooniumiks ^{239}U. Kuna reaktor põhineb kiiretel neutronitel, ei saa selles soojuskandjana kasutada vett, sest see toimiks neutronite aeglustajana. Enamasti on soojuskandjaks vedel naatrium, mille temperatuur reaktorist väljumisel on tavaliselt 500…600 °C. Väiksemates katselistes reaktorites

on kasutatud ka elavhõbedat ja naatrium-kaalium-eutektikumi, kuna need on vedelad ka toatemperatuuril. Reaktorist väljuva soojuskandja kõrge temperatuur võimaldab reaktori juurde kuuluvas aurugeneraatoris tekitada kõrgrõhulist ülekuumendatud auru (nt 14 MPa, 510 °C) ja suurendada seega tuumaelektrijaama kasutegurit.

Paljundusreaktori üks võimalikest ehituspõhimõtetest on esitatud joonisel **2.8.8**. Väljuv soojuskandja on suhteliselt tugevasti radioaktiivne (sisaldab naatriumi isotoopi ^{24}Na) ja suunatakse seetõttu soojusvahetisse, milles soojus edastatakse teise kontuuri naatrium-soojuskandjale ja alles sellelt aurugeneraatorile.

Reaktor ja esimese kontuuri soojusvaheti võivad paikneda ka ühises paagis. On ka teisi mitmesuguseid ehituspõhimõtteid (sealhulgas nt heeliumi kasutamine soojuskandjana ja tooriumi kasutamine paljunduse lähteainena). Kiiretel neutronitel põhinevate paljundusreaktorite korral on kõrge töökindluse saavutamine osutunud tunduvalt raskemaks kui tavapäraste surve- ja keevvesireaktorite korral. Pealegi on neist saadav plutoonium-tuumkütus kallim kui tavapärane rikastatud uraan ja selle tootmine on kaotanud aktuaalsuse, kuna plutooniumi võib suurel hulgal saada likvideeritavatest tuumarelvadest. Seetõttu oli maailma avalikes tuumaelektrijaamades 2007. aasta alguses talitluses ainult 4 seda liiki reaktorit (Jaapanis, Kasahstanis, Prantsusmaal ja Venemaal). Maailma suurim selline reaktor *Super Phénix* (Creys-Malville, Prantsusmaa) elektrilise võimsusega 1200 MW lülitati talitlusest välja aastal 1997 liiga suurte käidukulude tõttu ning poliitilistel tuumaohutuse kaalutlustel.

Esimene kiiretel neutronitel põhinev katseline paljundusreaktor valmis aastal 1951 USAs ja 20. detsembril 1951 kasutati seda esmakordselt maailmas elektrienergia tootmiseks tuumaenergiast. Esimesel päeval oli toidetava elektriahela (4 hõõglambi) võimsus 800 W, järgmisel päeval saavutati täisvõimsus 100 kW.

On mitmesuguseid teisigi tuumareaktorite liike, mis aga ei ole veel leidnud tegelikku majanduslikult õigustatud rakendamist energeetikas.

Tuumareaktorite kütusevarrastes tekib uraani lagunemise tulemusel hulgaliselt mitmesuguseid radioaktiivseid ja mitteradioaktiivseid aineid. Näitena on tabelis **2.8.1** esitatud selliste ainete kogused (kokku 45 kg) pärast seda, kui 1 tonnist rikastatud uraanist (3,3 % ^{235}U) on reaktoris võetud 34 GWd energiat [2.20].

Tabel 2.8.1. 1 tonnis rikastatud uraanis (3,3 % ^{235}U) tekkivad laguained energiavõtul 34 GWd

Aine	Poolestusaeg	Kogus kg	Keemiline analoog	Ohtlikkus
Plutoonium ^{239}Pu	$2{,}46 \cdot 10^4$ a	~10		●●●●
Kergemad radioaktiivsed isotoobid:				
tseesium ^{137}Cs	33 a	1,768	K	●●●
tehneetsium ^{97}Tc	$26 \cdot 10^6$ a	0,865	Mn	●●●
tsirkoonium ^{95}Zr	65 d	0,796		●●●
strontsium ^{90}Sr	28 a	0,533	Ca	●●●●
rubiidium ^{87}Rb	$5 \cdot 10^{10}$ a	0,246	K	●●●
jood ^{131}I	8,04 d	0,237		●●●
euroopium ^{152}Eu	9,3 h	0,045		●●●
samaarium ^{151}Sm	90 a	0,042		●●●
krüptoon ^{85}Kr	10,6 a	0,026		●
ruteenium ^{106}Ru	1,0 a	0,022	Rh	●●
Mitteradioaktiivsed isotoobid:				
Xe, Nd, Mo, Zr, Ru		21,18		
Ba, Pd, La, Pr, Cs		6,66		
Sm, Te, Y, Rh, Sr		2,605		
Kr, Eu, Gd, Rb, I		0,745		
Kokku		**~45**		

Uraanist tekkinud ainete hulgas on nii inimestele kui ka loomadele eriti ohtlikud

- plutoonium, mille kõik ühendid on mürgised,
- tseesium ^{137}Cs, mis käitub organismis nagu kaalium ja osaleb kõigi keharakkude ainevahetuses,
- strontsium ^{90}Sr, mis käitub organismis nagu kaltsium ja salvestub luudes, jäädes sinna elu lõpuni,
- jood ^{131}I, mis koguneb kilpnäärmesse ja võib põhjustada selle vähki.

Tuumajaamade normaalsel talitlusel ja äratöötanud kütusevarraste normaalsel transpordil ja ladustamisel need ained keskkonda ei pääse. Lühiealised radioaktiivsed isotoobid lagunevad kütusevarraste ajutisel salvestamisel tuumajaamade säilitusbasseinides, plutoonium eraldatatakse taaskäitlemistehases, pikemaealised isotoobid ladustatakse pärast seda konteinerites või valatuna tehiskivisse nn lõpplattu, mis ehitatakse kaljusesse pinnasesse 1…2 km sügavusse. On ehitatud ka maapealseid lõppladusid, mille eeliseks loetakse olevat lihtne järelevalve. Varematel aegadel on tuumajäätmeid ja isegi terveid äratöötanud reaktoreid heidetud merre (eriti palju Barentsi merre).

Uraanituuma lõhestumise neutronitega pommitamisel avastasid 22. detsembril 1938 Berliini *Kaiser-Wilhelm-Institut für Chemie* direktor Otto Hahn (1879–1968) ja sama instituudi keemiateadlane Fritz Straßmann (1902–1980). Aastal 1939 tuvastas O. Hahni endine kaastöötaja, Rootsi põgenenud füüsik Lise Meitner (1878–1968), et tegemist on tuumareaktsiooniga, mille tulemusena vabaneb **tuumaenergia**. Pärast seda algas Saksamaal, USAs ja mujal tuumareaktsioonide intensiivne uurimine eeskätt tuumarelva loomise lootuses. Esimene katseline grafiitaeglustiga, Itaalia-USA füüsiku Enrico Fermi (1901–1954) ja Ungari-USA füüsiku Leo Szilardi (1898–1964) patendi järgi valminud tuumareaktor käivitus 2. detsembril 1942 Chicago ülikoolis.

Eestis on NSV Liidu mereväe Paldiski õppekeskuses talitlenud 2 allveelaeva-tuumareaktorit soojusvõimsusega 70 ja 90 MW, mis pärast NSV Liidu vägede lahkumist peatati. Tuumkütus on reaktoritest kõrvaldatud, kuid nende lammutamine võib alata alles mõnekümne aasta pärast.

2.9 HÜDROTURBIINID

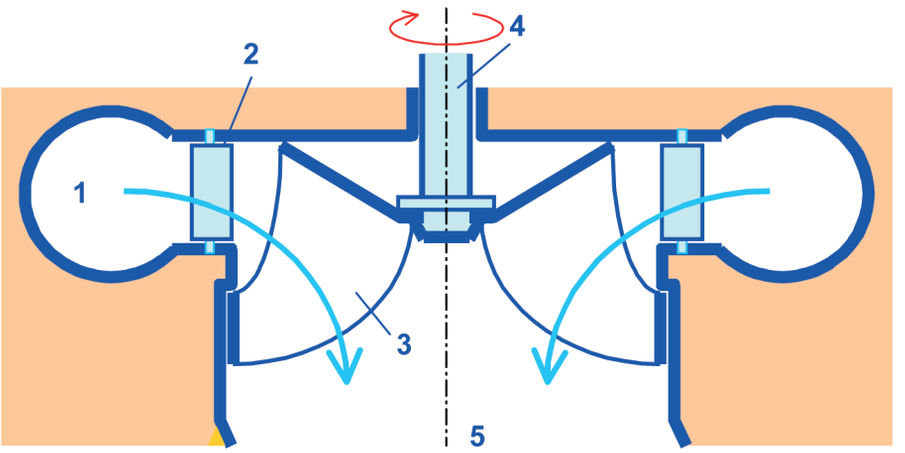
Hüdroturbiin muundab vee kineetilise energia mehaaniliseks pöörlemisenergiaks. Nüüdisaja hüdroelektrijaamades kasutatakse peamiselt kolme liiki hüdroturbiine:

- radiaal-aksiaalseid ehk Francise turbiine,
- pöördlabalisi ehk Kaplani turbiine,
- kopp- ehk Peltoni turbiine.

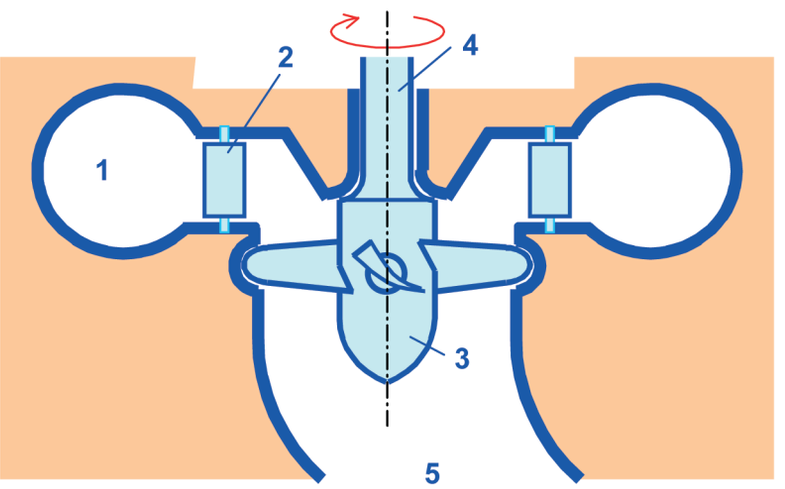
Esimesed kaks kuuluvad reaktiivturbiinide, viimane aktiivturbiinide hulka.

Radiaal-aksiaalturbiini (joonis **2.9.1**) välmis aastal 1849 ühest varasemast (aastal 1838 Samuel B. Howdile antud) patendist lähtudes *Locks and Canal Company of Lowell* (Massachusetts, USA) peainsener James Bicheno Francis (1815–1892). Turbiin on enamasti püstse võlliga ja selle tööratta labad on võlliga jäigalt ühendatud. Väiksemate turbiinide võll võib olla ka rõhtne. Vesi siseneb turbiini hüdroelektrijaama paisjärvest *spiraalkanali* kaudu, mis tagab vee ühtlase sissevoolu tööratta kogu ümbermõõdul, läbides seejuures pööratavatest labadest (16…32 labast) koosnevat *juhtaparaati*. Viimane reguleerib vee vooluhulka ja suunab selle tööratta labadele (neid on tavaliselt 9 kuni 19). Vesi väljub turbiinist telje suunas *imitorusse*. Turbiin on väga lihtsa ning töökindla ehitusega ja sobib kasutamiseks vee rõhukõrgusel 30…650 m (neid on aga olemas ka väiksemale rõhukõrgusele, nt isegi 3 m). Valmistatakse selliseid turbiine enamasti võimsusega 1…800 MW ja rakendatakse kiire langusega (nt mäestiku-) jõgedel, millele saab ehitada kõrgeid paisusid. Turbiini pöörlemissagedus oleneb rõhukõrgusest ja on tavaliselt vahemikus 80…200 1/min.

Eelmisest madalamal rõhul talitleva **pöördlabalise turbiini** (joonis **2.9.2**) konstrueeris laevakruvi eeskujul lausmaajõgede hüdroelektrijaamade jaoks aastal 1912 Brno tehnikaülikooli assistent Viktor Kaplan (1876–1934). Ka see turbiin on lihtsa ja töökindla ehitusega ja seda kasutatakse vee rõhukõrgusel 2…45 m. Selliseid turbiine saab valmistada väga mitmesuguse nimivõimsusega – 10 kW kuni 150 MW. Suuremate turbiinide telg on püstne, väik-



Joonis 2.9.1. Francise turbiini ehituspõhimõte.
***1* spiraalkamber, *2* juhtaparaat, *3* tööratas, *4* võll, *5* imitoru**



Joonis 2.9.2. Kaplani turbiini ehituspõhimõte.
***1* spiraalkamber, *2* juhtaparaat, *3* tööratas, *4* võll, *5* imitoru**

semad turbiinid võivad olla ka rõht- või kaldteljega. Töölabasid on tavaliselt 4 või 6, suurte turbiinide tööratta läbimõõt võib olla kuni 10 m. Turbiinide pöörlemissagedus on üldiselt väiksem kui sama võimsusega Francise turbiinidel ja jääb tavaliselt alla 100 1/min.

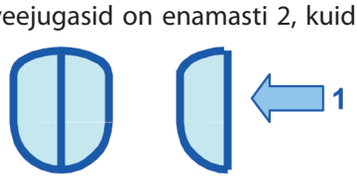
Kaplani turbiiniga väga sarnane on **propellerturbiin**. Erinevus seisneb selles, et propellerturbiini labad on jäigalt ühendatud tööratta võlliga, mis teeb selle ehituse lihtsamaks. Selliseid turbiine valmistatakse samasuguses nimivõimsus- ja nimikiirusvahemikus nagu Kaplani turbiinegi.

Eesti pisihüdroelektrijaamades on peaaegu eranditult kasutusel Kaplani turbiinid. Seda liiki turbiinid võimsusega 40 MW on paigaldatud ka Narva hüdroelektrijaama.

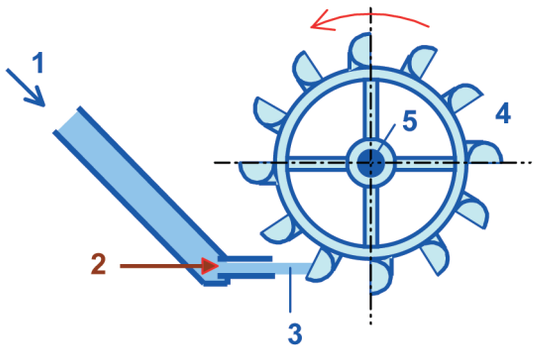
Kopp- ehk **Peltoni turbiin** kujutab endast vesiratta edasiarendust, mis seisneb selles et tööratta lamedad labad on asendatud kaheosaliste koppadega (joonis **2.9.3**), millele suunatakse vaba veejuga (joonis **2.9.4**). Juga jaguneb kaheks (kopa mõlemale poolele) ja paneb tööratta pöörlema. Kopa optimaalne joonkiirus on ligikaudu pool kopale suunatud vee kiirusest.

Esimese koppturbiini valmistas aastal 1878 vesiratta talitlusel tehtud tähelepanekute alusel California ühe kullaleiukoha puusepp Lester Allan Pelton (1829–1908) ja sai sellele aastal 1889 USA patendi.

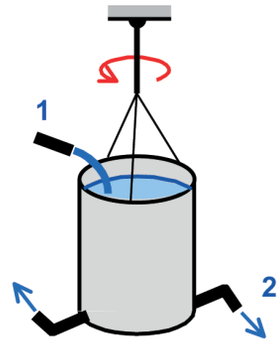
Peltoni turbiin on enamasti rõhtsa võlliga, kuid valmistatakse ka püstvõlliga turbiine. Töörattale toimivaid veejugasid on enamasti 2, kuid võib olla



Joonis 2.9.3. Peltoni turbiini kopa kujunduspõhimõte (eest- ja külgvaade). *1* veejoa suund



Joonis 2.9.4. Peltoni turbiini ehituspõhimõte.
***1* vee juurdeviigutoru, *2* vooluhulga reguleerimisseadis, *3* veejuga, *4* tööratas, *5* võll**



Joonis 2.9.6. Segneri ratas.
***1* juurdevoolu-, *2* äravoolutoru**

ka rohkem. Sellised turbiinid sobivad kasutamiseks rõhukõrgustel 100…1800 m ja nende nimivõimsus võib olla kuni 450 MW. Vee suurema suhtelise energiasisalduse tõttu on nende mõõtmed väiksemad, pöörlemissagedus aga suurem kui Francise ja Kaplani turbiinidel (tavaliselt 500…1500 1/min). Peltoni turbiine kasutatakse eeskätt mägijõgedel, kui hüdroelektrijaama veehoidla saab paikneda palju kõrgemal kui turbiinihoone.

Hüdroturbiine iseloomustab kõrge kasutegur, mis tavaliselt on piirides 90…96 %. Võimsus turbiini võllil avaldub väga lihtsa valemiga

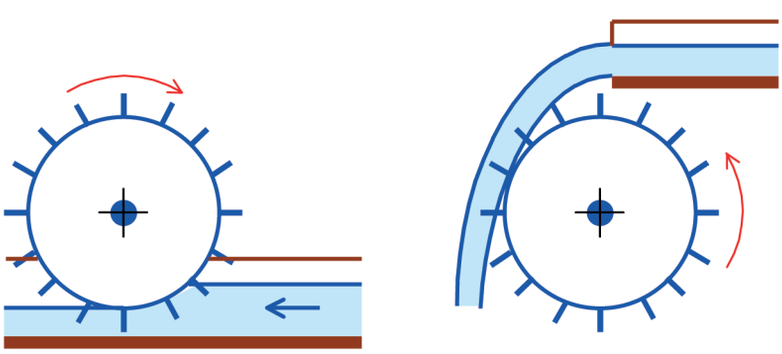
$$P = \eta \rho g H Q$$

P võimsus turbiini võllil W
η turbiini kasutegur
ρ vee tihedus kg/m^3
g raskuskiirendus m/s^2
H rõhukõrgus m,
Q vee vooluhulk m^3/s

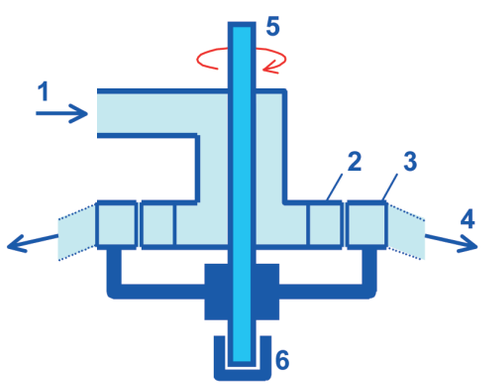
Hüdroturbiini eelkäija on **vesiratas**, mille kohta on kirjalikke teateid Kreeka Väike-Aasia kolooniatest alates aastast 230 eKr. Esimesed, altvoolu-vesirattad paiknesid lihtsalt jõe veevoolus, kuid peagi hakati neid paigutama erikanalitesse (joonis **2.9.5**), millega nende kasuteguriks saadi ligikaudu 30 %. Täiuslikum, ülaltvoolu-vesiratas, milles kasutati nii vee kineetilist energiat kui ka vee raskustoimet, tuli kasutusele keskaja Euroopas ja selle kasutegur oli juba ligikaudu 70 %.

Maailma 17. sajandi võimsaim vesiratassüsteem ehitati aastal 1685 vee pumpamiseks Verailles' lossi ja see koosnes 14 vesirattast läbimõõduga 12 m. Süsteemi koguvõimsus oli ligikaudu 80 hj. Maailma kaks suurimat vesiratast (kumbki 500 hj) paigaldati aga aastal 1858 Kreenholmi Manufaktuuri.

Hüdroturbiini põhimõtte visandas umbes aastal 1500 Leonardo da Vinci, kuid esimese turbiinitaolise seadme – tangentsiaalsete väljavoolutorudega varustatud veeanuma, mis reaktiivjõudude mõjul veevooluga vastupidises suunas pöörlema pandi (joonis **2.9.6**), valmistas aastal 1750 saksa füüsik Johann Andreas von Segner (1707–1777).



Joonis 2.9.5. Altvoolu- (vasakul) ja ülaltvoolu-vesiratas



Joonis 2.9.7. Burdini-Fourneyroni turbiini ehituspõhimõte. *1* vee sissevool, *2* juhtlabad, *3* paljulabaline tööratas, *4* vee väljavool, *5* võll, *6* tugilaager

Aastal 1760 leidis *Segneri ratas* esimest tegelikku rakendust ühes jahuveskis ja pärast seda leidis šveitsi matemaatik Leonhard Euler (1707–1783), kes aastal 1756 oli matemaatiliselt uurinud tuuleturbiine, vajaliku olevat välja töötada ka reaktiiv-hüdroturbiinide matemaatiline teooria. 1820ndate aastate alguses hakati Prantsusmaal otsima veejõu parema rakendamise võimalusi ja aastal 1826 pandi seal välja 6000-frangine auhind sellele, kellel õnnestub välja töötada tööstusele sobiv piisavalt võimas ja vesirattast tõhusam jõumasin. Juba enne seda olid sellesuunalisi uuringuid alustanud Saint-Étienne'i mäekõrgkooli (*École des Mines de Saint-Étienne*) professor Claude Burdin (1790–1873) ja tema õpilane Benoît Fourneyron (1802–1867), kusjuures masin, millele Burdin andis nime ***turbiin***, oli valminud aastal 1824. See aga ei rahuldanud veel auhinnatingimusi ja aastal 1827 esitas Fourneyron selle täiustatud, tegelikuks kasutamiseks sobiva versiooni võimsusega 6 hj ja selle aja kohta vägagi kõrge kasuteguriga 80…85 %. Fourneyron saigi väljakuulutatud auhinna [1.15]. Burdini ja Fourneyroni ühistöös valminud turbiini (joonis **2.9.7**) põhimõte on samasugune nagu Francise turbiinil, ehitus aga vastupidine: vesi suunatakse turbiini aksiaalselt ja väljub radiaalselt, läbi välise tööratta.

Aastal 1838 lõi prantsuse matemaatik ja sõjaväeinsener Jean Victor Poncelet (1788–1867) hüdroturbiinide matemaatilise arvutuse alused ja pärast seda hakati tootma mitmesuguseid teisigi turbiiniliike. Hüdroturbiinid jõudsid suhteliselt kiiresti ka Eestisse. Nii näiteks asendati Kreenholmi Manufaktuuris aastal 1860 eelmainitud võimsad vesirattad 500-hobujõuliste turbiinidega ja aastal 1868 paigaldati sinna maailma selle aja võimsaim turbiin – 1300 hj. Aastal 1890 oli Kreenholmi turbiinide koguvõimsus 6880 hj ja see manufaktuur kuulus maailma suurimate veejõudu kasutavate ettevõtete hulka [2.21].
Hüdroturbiinide kasutamine elektrienergia saamiseks algas aastal 1878 (vt jaotis **5.4**).

2.10 TUULETURBIINID

Tuuleturbiin muundab tuule kineetilise energia mehaaniliseks pöörlemisenergiaks. Nüüdisaja tuuleelektrijaamades kasutatakse peamiselt kahte liiki tuuleturbiine:

- rõhtsa võlliga propellerturbiine,
- püstvõlliga Darrieus' turbiine

Üle 99 % kõigist tuuleturbiinidest kuulub esimesse liiki. Käesoleval ajal valmistatakse neid võimsusega mõnekümnest vatist kuni mõne megavatini; tuuleelektrijaamades on kasutusel enamasti turbiinid võimsusega 0,1…6 MW.

Tuuleturbiini nimivõimsust ei väljendata enamasti võimsusena võllil nagu nt auru-, gaasi- ja hüdroturbiinide puhul (kuigi see on võimalik), vaid turbiiniga ühendatud elektrigeneraatori nimivõimsuse kaudu.

Võimsad (tuuleelektrijaamade) turbiinid koosnevad järgmistest osadest (vt joonis **2.10.1**):

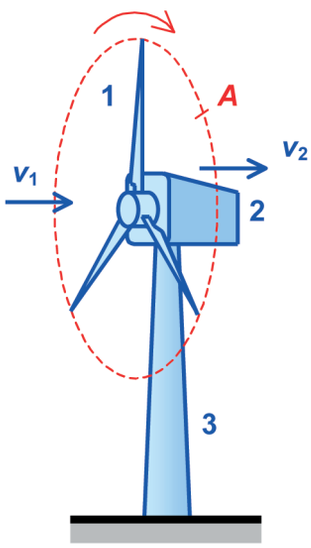
- tiivik, mis omakorda koosneb tiibadest, nabast, võllist ja sageli ka tiibade pööramismehhanismist;
- gondel, mille koosseisu kuuluvad tiiviku võlli laagerdus ja gondli pööramismehhanism; gondlis asuvad ka reduktor (kui see olemas on) ja elektrigeneraator koos oma abiseadmetega;
- mast, mis enamasti on torutaoline ja valmistatakse terasest või terasbetoonist; masti sisemuses nähakse ette trepp või redel; väiksemate turbiinide korral (võimsusega kuni umbes 100 kW) võidakse kasutada ka sõrestikmaste.

Tiivikus on enamasti 3 tiiba, kuid on valmistatud ka kahe- ja (väga harva) ühetiivalisi tiivikuid. Tiiva tipu liikumiskiirus on nüüdisaegsetel võimsatel tuuleturbiinidel 6…8 korda suurem kui tuule kiirus, mistõttu propellerturbiine nimetatakse *kiirekäigulisteks*. Turbiini nimi-pöörlemissagedus on tavaliselt vahemikus 20…40 1/min.

Kui tiivikust mõjutamata tuule kiirus tiiviku ees on v_1, on tuule võimsus tiiviku pöörlemispindalal enne tiivikut

$$P_1 = \frac{1}{2} m v_1^2 / t = \frac{1}{2} \gamma A v_1^3$$

P_1 õhuvoolu võimsus W
$m = \gamma A v_1 t$ pöörlemispindalale suunduva õhu mass kg
γ õhu tihedus (ligikaudu 1,2 kg/m^3)
A tiiviku pöörlemispindala m^2
v_1 õhu kiirus m/s
t aeg s



Joonis 2.10.1. Propellertüüpi tuuleturbiini ehituspõhimõte. *1* tiivik, *2* gondel, *3* mast. *A* tiiviku pöörlemispindala, v_1 tuule kiirus tiiviku ees, v_2 tuule kiirus tiiviku taga

Tuule võimsus tiiviku pöörlemispindalal on seega võrdeline tuule kiiruse kuubiga. Tuule kiiruse vähenemisel väheneb see võimsus kiiresti ja allpool teatavat kiirust ei ole tuuleturbiini kasutamine otstarbekas. Enamasti kasutataksegi tuuleturbiine kohtades, kus aasta keskmine tuulekiirus on vähemalt 5 m/s. Enamik tuuleturbiine nähakse ette tuule kiirusele nimitalitlusel 12…16 m/s, kusjuures turbiin käivitub, kui tuule kiirus on 2…4 m/s, ja lülitub välja, kui tuule kiirus tõuseb üle 25…35 m/s.

Kui tiiviku järel on tuule kiirus v_2 ja kui tiivikut läbinud õhuvoolust äravõetud võimsus muundub täielikult tiiviku pöörlemisvõimsuseks, avaldub see teoreetilise valemiga

$$P_2 = \frac{1}{2}\gamma(v_1^2 - v_2^2) \times \frac{1}{2}(v_1 - v_2)A$$

P_2 tiivikule antav võimsus W
v_2 õhu kiirus tiiviku taga m/s

Kui kasutada lühitähist

$$v_2 / v_1 = x,$$

saame pärast muundusi avaldada turbiini teoreetilise *võimsussuhte* valemiga

$$c_{teor} = P_2 / P_1 = \frac{1}{2}(1 + x)(1 - x^2)$$

c_{teor} teoreetiline võimsussuhe

Suhet P_2 / P_1 ei saa käesoleval juhul nimetada *kasuteguriks*, sest osa õhuvoolust võimsusega P_1 läheb turbiini tiivikust paratamatult mööda ega saa muunduda tiiviku pöörlemisvõimsuseks.

On lihtne tõestada, et selliselt avalduval suurusel on maksimum suhte x väärtusel

$$x = 1 / 3$$

ja nimelt

$$c_{teor} = 16 / 27 \approx 0{,}593.$$

Tuuleturbiini suurim teoreetiliselt võimalik võimsussuhe on seega ligikaudu 59 %, tegelik võimsussuhe aga enamasti vahemikus 40…50 %.

Tuuleturbiini võimsussuhte (sks *Leistungsbeiwert*, ingl *coefficient of power*) mõiste võttis kasutusele ja suurima teoreetiliselt võimaliku võimsussuhte valemi tuletas aastal 1919 Göttingeni (Saksamaa) aerodünaamikainstituudi direktor Albert Betz (1885–1968), mistõttu seda nimetatakse ka *Betzi valemiks*.

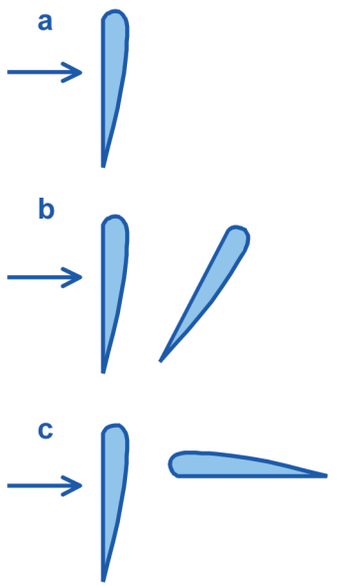
Et tiivik pöörleks konstantse (või ligikaudu konstantse) kiirusega, tuleb tiibadele toimivat jõudu olenevalt tuule kiirusest reguleerida. Väiksematel turbiinidel (võimsusega kuni ligikaudu 500 kW) võivad tiiviku tiivad olla nabaga jäigalt ühendatud, kusjuures aga tiibade ristlõige on sellise kujuga, et tuule kiiruse suurenemisel üle teatava väärtuse tekib aerodünaamiline *vääratusnähtus* ja tiibadele toimiv jõud väheneb. Selline isetoimiv reguleering on väga lihtne, kuid võib tekitada turbiiniga ühendatud elektrigeneraatori võimsuse ja pinge lubamatult suuri kõikumisi ja seetõttu on selle kasutamine harvenenud. Enamasti, eriti aga suuremate turbiinide puhul, kasutatakse reguleerimiseks

- aktiivset vääratusmeetodit, muutes vääratuse tekketingimusi tiibade teatava pööramisega päituult,
- kaldemeetodit, muutes tiibade pöördenurka tuule suhtes tiibade pööramise teel vastutuult.

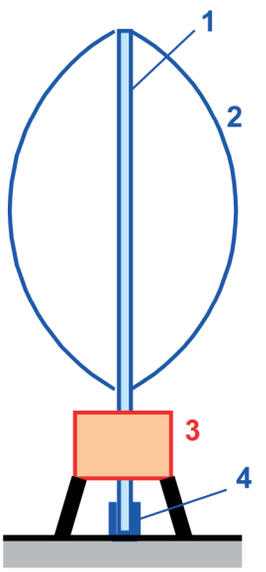
Kõik kolm reguleerimisviisi on lihtsustatult kujutatud joonisel **2.10.2**.

Tiibade pööramismehhanism asub tiiviku nabas. Gondli ja tiiviku pööramine vastavalt tuule suunale toimub automaatselt sellekohase servoajami abil.

Nagu eelpool öeldud, on tuuleturbiini võimsus võrdeline tiiviku pöörlemispindalaga. Seetõttu on võimsate tuuleturbiinide mõõtmed suhteliselt suu-



Joonis 2.10.2. Tiiviku tiibadele mõjuva pöörlemapaneva jõu reguleerimisviisid. *a* vääratusnähtuse abil, *b* aktiivse vääratusmeetodiga, *c* kaldemeetodiga. Nooled näitavad tuule suunda



Joonis 2.10.3. Darrieus' tuuleturbiini ehituspõhimõte. *1* võll, *2* tiib, *3* elektrigeneraator, *4* tugilaager

red. Ettekujutuse saamiseks on mõningad sellekohased ligikaudsed andmed esitatud tabelis **2.10.1**.

Et turbiini tiivad oleksid mehaaniliselt piisavalt tugevad, kasutatakse nende materjalina enamasti klaaskiududega (uuemal ajal ka süsinikkiududega) armeeritud valuvaiku.

Tuuleturbiini eelkäija on puritiibadega tuulik, mille tekkelugu on vaadeldud jaotises **1.4**. Selle võimsussuhe on aga suhteliselt madal (ligikaudu 0,2) ja pöörlemiskiirus väike, mistõttu see ei sobi energeetiliseks kasutamiseks. Veski või turbiini tiiva liikumise aerodünaamilisi seaduspärasusi uuris juba aastal 1738 Baseli ülikooli füüsikaprofessor Daniel Bernoulli (1700–1782), tiiva otstarbekaima kuju valikut aga aastal 1756 Leonhard Euler. Aastal 1903 töötas taani meteoroloog Poul La Cour (1846–1908) nendele uurimustele toetudes ja oma teoreetiliste ja katseliste uurimustulemuste põhjal välja kiirekäigulise kolmetiivalise turbiini, mille sobivalt valitud ristlõikekujuga tiivad olid jäigalt kinnitatud tiiviku nabale. Sellised *taani tüüpi* turbiinid võimsusega mõni kuni mõnikümmend kilovatti tulid nii Taanis kui ka mujal kohe kasutusele elektrienergia saamiseks kohtades, kuhu energiasüsteemide võrgud ei ulatunud. Tuuleturbiinide kasutamine energia andmiseks energiasüsteemidesse algas pärast energiakriisi puhkemist aastal 1973, mil paljud riigid leidsid olevat vajaliku hakata tuuleenergeetikat mitmesuguste soodustuste ja toetustega stimuleerima. Ühtlasi tõi see kaasa turbiinide nimivõimsuse kasvu, töökindluse suurenemise ja nii maksumuse kui ka käidukulude vähenemise, mistõttu tuuleelektrijaamade tähtsus elektroenergeetikas on viimastel aastatel kiiresti kasvanud (vt jaotis **5.6**).

Tabel 2.10.1. Propeller-tuuleturbiinide mõõtmeid

Turbiini nimivõimsus MW	Tiiviku läbimõõt m	Tiiviku naba kõrgus m
0,5…0,6	~ 40	40…65
1,5…2	~ 70	65…115
4,5…6	112…126	120…130

Püstvõlliga turbiinidest on sagedaimini kasutusel kahe või kolme kaarekujulise (täpsemalt – *aheljoonekujulise*) tiivaga turbiin (joonis **2.10.3**), mille patenteeris aastal 1931 prantsuse elektriinsener Georges Darrieus (1888–1979).

Turbiini eelisteks loetakse masti äralangemist, elektrigeneraatori paiknemist maapinna lähedal ja seda, et turbiin talitleb ühessamas asendis tuule igasuguse suuna korral. Ka on selle tormikindlus parem kui propellerturbiinidel. Ühtlasi on Darrieus' turbiinil mitmeid olulisi puudusi, sealhulgas

- tiivikule toimiva tuule väiksem kiirus, sest tiivik on maapinnale ligemal kui masti otsas paiknev propellertiivik,
- väiksem võimsussuhe (piirväärtus ligikaudu 0,4),
- väiksem kiirekäigulisus (enimalt ligikaudu 5),
- kiiruse mittereguleeritavus,

- keerukam toestus (eriti käib see suurte nimivõimsuste kohta),
- suurem materjalimahukus ja erimaksumus.

Nimetatud puuduste tõttu ei ole need turbiinid kuigi laialt kasutusel, olgugi et neid on valmistatud nimivõimsusega kuni 4 MW. Üldse on maailma tuuleelektrijaamades seni paigaldatud ainult ligikaudu 20 seda liiki turbiini, mõned neist on aga hiljem asendatud propellerturbiinidega. Paremini sobivad nad kasutamiseks kohalike energiaallikatena võimsusega mõni kuni mõnikümmend kilovatti.

On olemas ka teisi tuuleturbiinide liike, mille tehnilised näitajad on aga enamasti tagasihoidlikumad kui eelvaadeldud kahel liigil. Nende hulgas väärib siiski mainimist paljutiivaline (õigem oleks sel puhul öelda *paljulabaline*) aeglasekäiguline turbiin (joonis **2.10.4**), mille leiutas aastal 1854 USA mehaanik Daniel Hallady. Selliseid turbiine valmistati võimsusega 0,5…6 kW ja kasutati vee pumpamiseks ameerika farmides. 1887/88. aasta talvel ehitas USA leidur ja ettevõtja Charles

Joonis 2.10.4.
Hallady tuuleturbiini tiiviku ehituspõhimõte

Francis Brush (1849–1929) sellisel turbiinil põhineva maailma esimese tuuleelektrijaama võimsusega 12 kW.

Eestis tulid väikese (mõne kümnendiku kilovati kuni mõne kilovati) võimsusega taani tüüpi tuuleturbiinid koos külgeehitatud alalisvoolugeneraatoritega (*tuulegeneraatorid*) kasutusele 1920ndail aastail kohalike väikeste elektritoiteallikatena (valgustuseks, akude laadimiseks jms). Esimene suurem tuuleturbiin (150 kW) koos elektrigeneraatoriga ja kõige muu juurdekuuluvaga paigaldati aastal 1997 Tahkuna poolsaarele Hiiumaal.,

2.11 FOTOELEKTRILISED MUUNDURID

Fotoelektriliste muundurite hulka kuuluvad
- ventiilfotoelemendid,
- vaakum- ja gaastäitega (lampdiood-) fotoelemendid,
- fototransistorid ja -türistorid,
- elektrokeemilised vedelikelemendid.

Energiatehnikas kasutatakse nendest ainult esimesi, sest ülejäänutel on muundamise kasutegur energeetika seisukohast liiga madal; küll aga leiavad nad kasutamist mõõtetehnikas ja automaatikaseadmeis. Ventiilfotoelementide tähtsaim kasutusala on päikesekiirguse muundamine elektrienergiaks; peale selle saab neid aga edukalt kasutada ka valgusmõõtetehnikas, valgusele reageerivais automaatikaseadmeis ja infotehnikas.

Energeetikas võivad osutuda vastuvõetavateks ka elektrokeemilised fotoelemendid, kuid nende arendamine on alles algusjärgus.

Ventiilfotoelementides kasutatakse kõige sagedamini **räni**. Räni on pooljuht, mille aatom koosneb tuumast ja kolmest elektronkihist, kusjuures välimises kihis on neli elektroni (vt joonis **2.11.1**). Kui räni kristallvõresse viia fosforiaatomeid, mille välimises elektronkihis on viis elektroni (kui räni *doteerida* fosforiga), võib sellises pooljuhikihis (*n-pooljuhis*), mida nimetatakse ka *emitteriks*, tekkida teatud tingimustel vabu elektrone. Räni doteerimisel booriaatomitega, mille välimises elektronkihis on kolm elektroni, saadakse aga *p-pooljuht*, mille kihti nimetatakse ka fotoelemendi *baasiks*. Kahe õhukese (mõne mikromeetri paksuse) p- ja n-pooljuhikihi vahel moodustub **p-n-siire** ehk ruumilaengutsoon. Kui sellesse tsooni läbi kiirguspoolse (enamasti ribalise) elektroodi satuvad piisavalt energiarikkad footonid, põhjustavad need erimärgiliste laengute eraldumist ja laengukandjate (elektronide ja *aukude*) liikumist vastaselektroodidele. Selle tulemusel tekib elektromotoorjõud (vooluta olekus enamasti ligikaudu 0,6 V) ja, kui väline vooluahel on suletud, elektrivool. Normaaltalitlusel on fotoelemendi pinge enamasti ligikaudu 0,5 V.

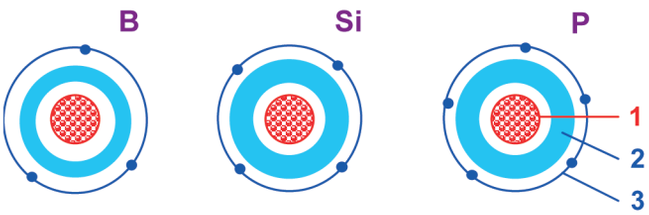
Joonisel **2.11.2** on kujutatud levinuima ränifotoelemendi ehituspõhimõte. Et vältida kiirguse soovimatut peegeldumist fotoelemendi pinnalt, on see kaetud peegeldusvastase (*antirefleks-*) kihiga, milles enamasti kasutatakse titaanoksiidi

TiO_2). Fotoelemendi kogupaksus on nüüdisajal 0,2…0,3 mm ja pindala kuni 15 cm × 15 cm. Sobiva pinge ja voolu saamiseks ühendatakse fotoelemendid jada- ja rööpühenduse kombineerimise teel mooduliteks, need aga omakorda patareideks või patareisektsioonideks.

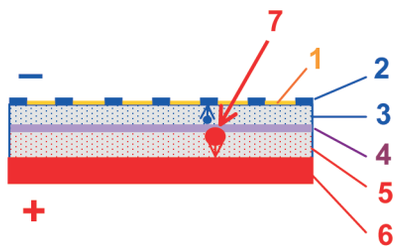
Fotoelemendi tingmärk [2.1] on esitatud joonisel **2.11.3**.

Kuna räni-fotoelemendi muundustegur oleneb vastuvõetava kiirguse lainepikkusest, kusjuures spektraalse muundusteguri maksimum ei lange kokku päikesekiirguse spektraaljaotuse maksimumiga (joonis **2.11.4**), neeldub osa footoneid fotoelemendis ilma laengukandja paare tekitamata (muundudes soojuseks). Kuna tekib ka muid energiakadusid, on monokristall-ränifotoelemendi elektrilise kasuteguri teoreetiline piirväärtus ligikaudu 28 %. Tegelikult on laboratoorsetel katseeksemplaridel saavutatud kasutegur kuni 24 %, tööstuslikult toodetavatel fotoelementidel aga 14…17 %. Vastavalt sellele on kiiritustiheduse 1 kW/m² korral voolutihedus elektroodidel ligikaudu 300…400 A/m².

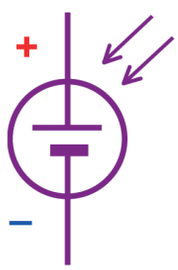
Kui monokristallilise räni asemel kasutada odavamat polükristallilist räni, tekivad lisakaod kristallvõre defektidel ja tööstuslike fotoelementide kasutegur on sel juhul enamasti piirides 13…15 %. Veel väiksem on kasutegur amorfse räni kasutamisel (5…7 %), kuid sel juhul saab fotoelemendi valmistada räni sadestamise teel klaasile väga õhukese kihina (alla 1 μm), mis tugevasti vähendab materjalikulu ja fotoelemendi maksumust. Elektroodidena kasutatakse sel juhul metalloksiidkilesid, mis on piisava juhtivuse saavutamiseks doteeritud sobivate



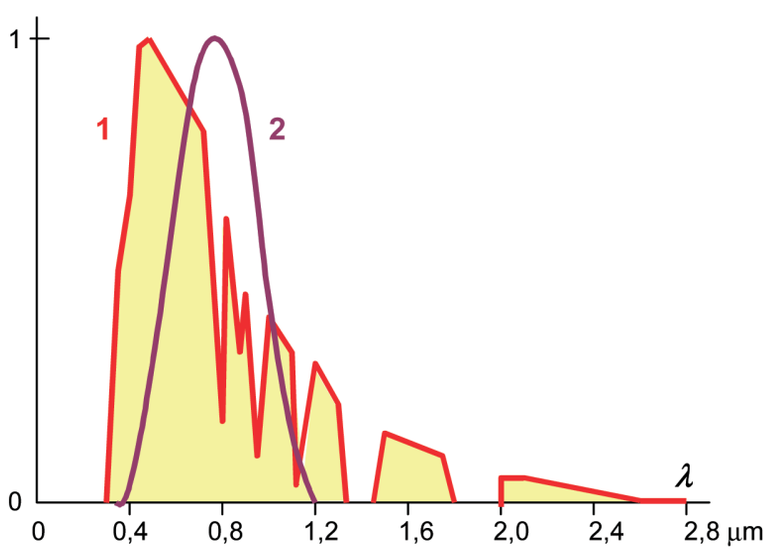
Joonis 2.11.1. Boori, räni ja fosfori aatomite põhimõtteline ehitus. *1* tuum, *2* sisemised elektronkihid, *3* välimine elektronkiht



Joonis 2.11.2. Ränifotoelemendi ehituspõhimõte. *1* peegeldusvastane kiht, *2* ribaline NiCr-elektrood, *3* n-pooljuht (nt fosfordoteeringuga räni) paksusega ligikaudu 2 μm, *4* p-n-siire, *5* p-pooljuht (nt boordoteeringuga räni), *6* metallelektrood, *7* footon ja selle toimel tekkivate laengukandjate paar



Joonis 2.11.3. Fotoelemendi tingmärk



Joonis 2.11.4. Päikesekiirguse suhteline spektraaljaotus Maa pinnal (1, lihtsustatult) ja tüüpilise ränifotoelemendi suhteline spektraalne muundustegur (2). λ lainepikkus. Neeldumisribad kiirgusspektris on tingitud Maa atmosfääris sisalduvast veeaurust ja süsinikdioksiidist

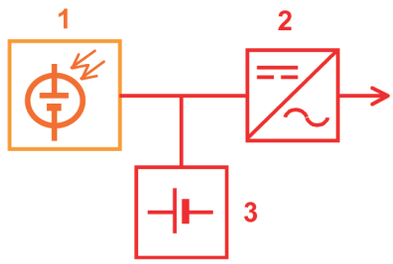
elementidega (nt tinaoksiidiga SnO_2:F või tsinkoksiidiga ZnO:Al). Kuna nii elektood- kui ka pooljuhtkihid on väga õhukesed, vähendavad need klaasi läbipaistvust suhteliselt vähe, mis võimaldab sellist klaasi kasutada nt laeakendes.

Peale räni kasutatakse fotoelementides ka teisi pooljuhtmaterjale, millest levinuimad on galliumarseniid GaAs, kaadmiumtelluriid CdTe ja vaskindium-diseleniid $CuInSe_2$. Igal materjalil on kiirguse spektraalne muundustegur erisugune ja kui luua fotoelement, milles on jadamisi ühendatud kaks või kolm spektri eri osadele tundlikku osaelementi, on nende resulteeruv tundlikkusriba tugevasti laiem kui igal üksikelemendil ja kasutegur vastavalt kõrgem. Selliseid fotomuundureid nimetatakse **tandemfotoelementideks** ja nende kasutegur võib olla kuni 40 %.

Kalli pooljuhtmaterjali kogust fotoelementides ja seega ka nende maksumust saab vähendada kiirguskontsentraatorite (enamasti läätssüsteemide) abil, mis suurendavad fotoelemendi kiiritustihedust kuni mõnikümmend korda. Kontsentraatoritega varustatud tandemfotoelemendipatareide reaalne kasutegur on nüüdisajal ligikaudu 35 %. Kontsentraatori kasutamisel tuleb aga fotoelementide moodul või patarei varustada automaatse ajamiga, mis pöörab selle alati risti päikesekiirtega.

Fotoelementide mooduleid valmistatakse võimsusega mõnest millivatist kuni mõnesaja vatini. Väiksemaid kasutatakse pisitarvitite (kellade, taskuarvutite jms) toiteks, suuremaid valgustusseadmete, valgus-liiklusmärkide ja signalisatsioonisüsteemide toiteallikaina; et tagada toite pidevust, kombineeritakse nad enamasti akudega. Moodulid võidakse ühendada ka patareideks võimsusega kuni mõnikümmend, harvemini ka kuni mõnisada kilovatti ja kasutada kohalike, elektrivõrguga ühendatud elektritoiteallikaina, mis võidakse kinnitada hoonete katustele või lõunapoolsetele seintele. Päikesepatareidega on varustatud ka kõik Maa tehiskaaslased ja kosmosejaamad. Fotoelektrilistes päikeseelektrijaamades võib omavahel kokkuühendatud patareide koguvõimsus olla kuni 10 MW ja enamgi (vt jaotis **5.7**). Katseliselt kasutatakse päikesepatareisid ka elektriautode ja -paatide toiteallikana.

Fotoelementide eelised energiaallikana seisnevad liikuvate osade puudumises, keskkonnasõbralikkuses, hooldamise lihtsuses ja kõrges töökindluses. Nende eluiga on tavaliselt 30…40 aastat. Puuduseks on suhteliselt suur erimaksumus (2000…5000 $/kW), tippvõimsuse väike kasutustegur (päike-



Joonis 2.11.5. Päikesepatareist (1), vaheldist (2) ja akumulaatorist (3) koosneva paigaldise põhimõtteskeem. Lülitus- ja muud abiaparaadid on näitamata

sepaistelistes regioonides toodab päikesepatarei 1 kW tippvõimsuse kohta 1000…2400 kWh elektrienergiat aastas) ja neil põhjustel elektrienergia kõrge omahind (enamasti 10…50 eurotsenti 1 kWh kohta).

Kuna päikesekiirguse tihedus Maa pinnal on ligikaudu 1 kW/m^2, on elektrienergia tootmiseks kasutatavate fotoelementmoodulite eripindala tippvõimsuse järgi kasuteguri 5…15 % korral ligikaudu 6…20 m^2/kW. Seega kujutavad päikesepatareid endast suhteliselt suurepinnalisi paigaldisi. Kui soovitakse ühendada päikesepatareisid elektrivõrguga või toita neist vahelduvvoolutarviteid, tuleb patarei varustada vaheldiga. Autonoomselt talitlevad päikesepatareid varustatakse peale selle enamasti veel akumulaatoriga (joonis **2.11.5**).

Fotoelektrilise efekti avastas juhtivas lahuses aastal 1839 noor prantsuse füüsik Alexandre Edmond Becquerel (1820–1891). Aastal 1877 valmistasid inglise füüsikud William Grylls Adams (1836–1915) ja R. E. Day esimese (seleen-) ventiilfotoelemendi ja aastal 1883 saavutas USA leidur Charles Fritts selle kasuteguriks ligi 1 %. Aastal 1940 avastas USA uurimisinstituudi *Bell Laboratories* füüsik Russell Ohl räni pn-siirde ja sellel asetleidva fotoelektrilise efekti, kuid ka selle kasutegur oli alla 1 %. Aastal 1954 õnnestus samas instituudis räni sihipärase doteerimise teel valmistada tegelikuks kasutamiseks sobiv fotoelement kasuteguriga ligikaudu 6 % ja 4. oktoobril 1955 valmis seal maailma esimene katseline päikesepatarei. Juulis 1962 varustati 3600-elemendilise päikesepatareiga sidesatelliit *Telstar 1*, misjärel algas fotoelementide kasutamine nii Maa tehiskaaslastel kui ka mitmesuguste maapealsete seadmete toiteallikana. 2006. aasta lõpus oli maapealsete energeetiliste päikesepatareide koguvõimsus maailmas ligikaudu 8 GW ja aastane juurdekasv ligikaudu 60 %.

Täpsete filtritega varustatud räni-fotoelemente kasutatakse tõhusate valgustehniliste mõõtemuunduritena, nt luksmeetrites ja heledusmõõturites.

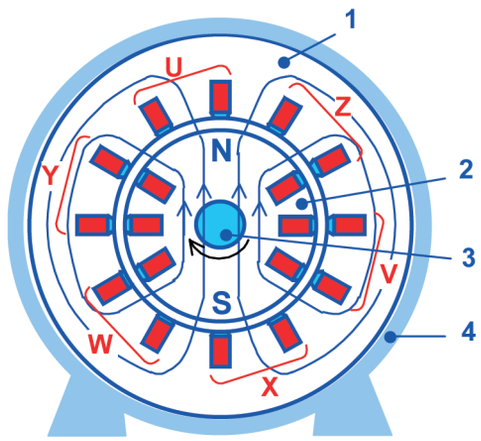
2.12 ELEKTRIMASINGENERAATORID

Elektrimasingeneraator muundab mehaanilist (kineetilist) energiat elektrienergiaks. Energeetikas on kasutusel ainult **pöörlevad elektromagnetilised generaatorid**, mis põhinevad elektromotoorjõu tekkel juhis, millele mingil viisil toimib muutuv magnetväli. Sellise generaatori seda osa, mis on ette nähtud magnetvälja tekitamiseks, nimetatakse ***induktoriks*** ja osa, milles indutseerub elektromotoorjõud, ***ankruks***. Masina pöörlevat osa nimetatakse ***rootoriks***, seisvat osa aga ***staatoriks***. Vahelduvvoolugeneraatorites on induktoriks tavaliselt rootor, alalisvoolugeneraatorites aga staator.

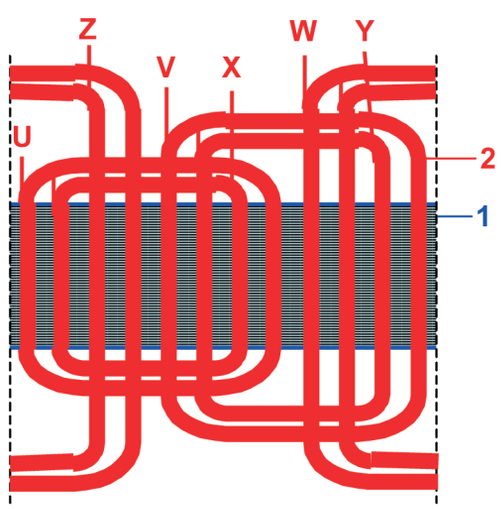
Üle 95 % elektrienergiast toodetakse maailma elektrijaamades **vahelduvvoolu-sünkroongeneraatorite** abil. Sellise generaatori induktor kujutab endast kahe- või enampooluselist elektromagnetit, mille mähises kulgevat alalisvoolu nimetatakse *ergutusvooluks.* Rootori pöörlemisel tekib *pöörlev magnetväli*, mis indutseerib staatori mähises (enamasti kolmefaasilises) vahelduva elektromotoorjõu, kusjuures selle sagedus vastab täpselt (ajaliselt ühtelangevalt, *sünkroonselt*) rootori pöörlemissagedusele (on sellega *sünkronismis*). Kui induktor on näiteks kahepooluseline ja pöörleb sagedusega 3000 1/min ehk 50 1/s, indutseerub staatori mähise igas faasis vahelduv elektromotoorjõud sagedusega 50 Hz. Sellise generaatori ehitus on tugevasti lihtsustatult kujutatud joonisel **2.12.1**.

Staatori magnetahel kujutab endast õhukestest teraslehtedest kokkupressitud pakki, mille uuretesse on paigutatud staatori mähis. Mähis koosneb kolmest faasist, mis on üksteisest 1/3 poolusejaotuse võrra nihutatud ja milles seega indutseeruvad üksteisest 120° võrra nihutatud elektromotoorjõud. Iga faasi mähis koosneb omakorda mitmekeerulistest üksteisega jadamisi või rööbiti ühendatud poolidest, mille kujunduspõhimõte on lihtsustatult esitatud joonisel **2.12.2**. Pooli neid osi, mis paiknevad väljaspool uurdeid, staatori otsapinnal, nimetatakse *laupühendusteks*. Enamasti on poolide arv faasis suurem kui joonisel kujutatud.

Induktori pooluseid ja sellele vastavalt staatorimähise poolusejaotusi võib olla ka rohkem. Mida suurem on pooluste arv, seda aeglasem peab olema ühelsamal sagedusel induktori (rootori) pöörlemine. Kui pooluseid on nt 20, peab induktor elektromotoorjõu sageduse 50 Hz saavutamiseks pöörlema sagedusega 300 1/min.



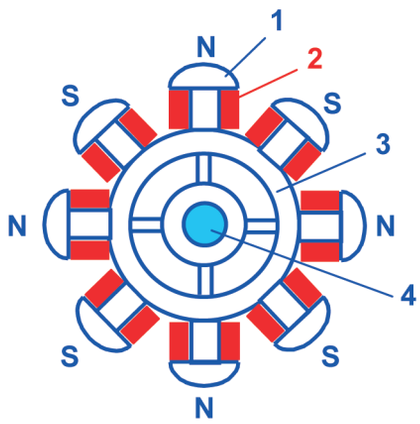
Joonis 2.12.1. Kahepooluselise sünkroongeneraatori ehituspõhimõte. *1* staator (ankur), *2* rootor (induktor), *3* võll, *4* kere. *U-X, V-Y, W-Z* kolme faasi mähiste staatori uuretes paiknevad osad



Joonis 2.12.2. Kahepooluselise sünkroongeneraatori staatorimähise lihtsaim ehituspõhimõte kahe pooli korral faasis. *1* staatori magnetsüsteemi pinnalaotus, *2* mähise poolid, U, V, W faasimähiste algused, X, Y, Z faasimähiste lõpud

Maailma suurimas, Itaipú hüdroelektrijaamas on sagedusel 50 Hz talitlevad generaatorid näiteks 66-pooluselised, sagedusel 60 Hz talitlevad generaatorid aga 78-pooluselised.

Kahe- või neljapooluselise generaatori *ergutusmähis* paikneb, nagu näidatud joonisel **2.12.1**, rootori massiivse terassüdamiku uuretes. See on vajalik *kiirekäiguliste*, pöörlemissagedusel 3000 või 1500 1/min talitlevate, eriti auruturbiinidega ühendamiseks ettenähtud nn *turbogeneraatorite* korral, kui rootori mähisele toimivad tugevad tsentrifugaaljõud. Kui pooluseid on rohkem, on iga poolus varustatud



Joonis 2.12.3. Aeglasekäigulise sünkroongeneraatori rootori ehituspõhimõte.
***1* poolus, *2* ergutusmähis, *3* kinnitusratas, *4* võll**

omaette mähisega (joonis **2.12.3**). Selline ehitusviis on kasutusel *aeglasekäiguliste*, nt pöörlemissagedusel 60 kuni 600 1/min talitlevate, hüdroturbiinidega ühendatavate *hüdrogeneraatorite* korral. Väga sageli on selliste generaatorite võll, vastavalt võimsate hüdroturbiinide ehitusele (vt jaotis **2.9**), püstne.

Sünkroongeneraatori ergutusmähist toidetakse alalisvooluga üle rootori võllil paiknevate kontaktrõngaste enamasti välisest toiteallikast. Varem kasutati selleks spetsiaalset alalisvoolugeneraatorit (*ergutit*), mis oli jäigalt ühendatud generaatori võlliga, uuemal ajal on kasutusel aga lihtsamad ja odavamad pooljuhtalaldid. On aga ka rootoris endas paiknevaid ergutussüsteeme, milles vool indutseeritakse staatorimähise poolt. Kui kasutada magnetvälja tekitamiseks elektromagnetite asemel püsimagneteid, langeb ergutusvooluallikas ära ja generaatori ehitus läheb tunduvalt lihtsamaks ja töökindlamaks, kuid ühtlasi kallimaks. Seetõttu kasutatakse püsimagneteid enamasti suhteliselt väikestel generaatoritel (võimsusega kuni mõnisada kilovatti).

Turbogeneraatorid on tänu silindrilisele, suhteliselt väikese läbimõõduga rootorile väga kompaktse ehitusega. Nende erimass on tavaliselt 0,5…1 kg/kW ja neid saab valmistada võimsusega kuni 1600 MW. Hüdrogeneraatorid on oma ehitu-selt mõnevõrra keerukamad, rootori läbimõõt on suhteliselt suur ja generaatori erimass seetõttu enamasti 3,5…6 kg/kW. Neid on seni valmistatud võimsusega kuni 800 MW.

Generaatori talitlemisel tekivad selles energiakaod, mis on tingitud mähiste aktiivtakistusest (*vaseskaod*), pöörisvooludest ning hüstereesist magnetahela aktiivosades (*rauaskaod*) ja pöörlevate osade laagrite hõõrdumisest (*hõõrdekaod*). Kuigi kogukaod ei ole tavaliselt suuremad kui 1…2 % generaatori võimsusest, võib kadude tagajärjel tekkiva soojuse äraviimine suurte generaatorite korral osutuda raskeks. Kui lihtsustatult eeldada, et generaatori mass on võrdeline võimsusega, on selle joonmõõtmed võrdelised kuupjuurega võimsusest, pindmõõtmed aga võrdelised võimsusega astmes 2/3. Seega suureneb generaatori jahutamiseks vajalik pindala aeglasemalt kui generaatori nimivõimsus. Kui võimsustel kuni mõnisada kilovatti piisab loomulikust õhkjahutusest, tuleb suurematel võimsustel üle minna sundventilatsioonile ja alates ligikaudu võimsusest 100 MW kasutada õhu asemel vesinikku. Veel suuremal võimsusel (nt üle 500 MW) tuleb vesinikjahutust täiendada vesijahutusega. Suurte generaatorite korral tuleb spetsiaalselt jahutada ka laagreid, kasutades selleks enamasti ringlevat õli.

Generaatori soojuseraldust saab tõhusalt vähendada ülijuhtivate ergutusmähiste kasutamise teel. Esimese taolise, laevadel kasutamiseks mõeldud generaatori võimsusega 4 MVA valmistas aastal 2005 Saksamaa elektrotehnikakontsern *Siemens AG* [2.22].

Sünkroongeneraatorite nimipinge on olenevalt võimsusest tavaliselt 0,4…24 kV. On kasutatud ka kõrgemaid nimipingeid (kuni 150 kV), kuid äärmiselt harva. Peale võrgusageduslike sünkroongeneraatorite (sagedusega 50 või 60 Hz) valmistatakse ka kõrgsagedusgeneraatoreid (kuni 30 kHz) ja mõne Euroopa riigi elektriraudteedel kasutatavaid madalama sagedusega generaatoreid (16,67 või 25 Hz).

Sünkroongeneraatorite hulka kuulub põhimõtteliselt ka **sünkroonkompensaator**, mis kujutab endast tühijooksus talitlevat sünkroonmootorit ning genereerib ja annab kõrgepingelisse elektrijaotusvõrku reaktiivvõimsust. Sel teel saab katta kohapealsete tööstuslike elektritarbijate reaktiivvõimsusvajadust ja vabastada energiasüsteemi põhivõrk reaktiivvõimsuse edastamisest.

Peale sünkroongeneraatorite on suhteliselt harva ning suhteliselt väikestel võimsustel (kuni mõni megavatt) kasutusel ka **asünkroongeneraatorid**, mille rootorimähise vool induktseerub staatorivoolu toimel, kui rootor panna pöörlema kiiremini kui staatori võrgusageduslik pöörlev magnetväli. Vajadus selliste generaatorite järele tekib enamasti siis, kui ei saa tagada primaarmasina pöörlemiskiiruse konstantsust, nt tuuleelektrijaamades ja väikestes hüdroelektrijaamades.

Alalisvoolugeneraatori magnetpoolused koos ergutusmähisega paiknevad enamasti staatoris, ankrumähis aga rootoris. Kuna rootori mähises indutseerub selle pöörlemisel vahelduv elektromotoorjõud, tuleb ankur varustada **kommutaatoriga**, mille abil masina väljundis (kommutaatori *harjadel*) saadakse alalis-elektromotoorjõud. Vajadus alalisvoolugeneraatorite järele on nüüdisajal peaaegu kadunud, sest alalisvoolu on lihtsam saada pooljuhtmuundurite abil.

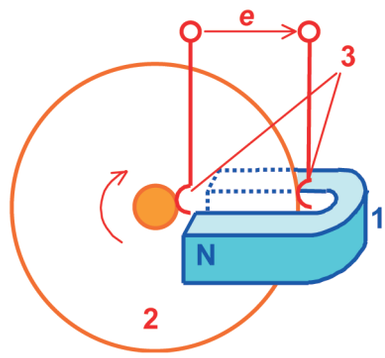
Käesolevas kursuses ei vaadelda elektrimasingeneraatorite ehitust ega omadusi täpsemalt, kuna neid küsimusi käsitletakse põhjalikult bakalaureuseõppe kursuses *Elektrimasinad*.

Elektrimasingeneraatorite hulka kuuluvad ka **elektrostaatilised generaatorid**, mille pöörleval osal tekitatakse hõõrde teel (*triboelektriliselt*) kõrgepingeline elektrilaeng. Esimese taolise generaatori (käsitsi ringiaetava väävelkuuli, millel laeng tekkis hõõrdumisel vastu inimkätt) valmistas aastal 1663 Magdeburgi (Saksamaa) linnapea Otto von Guericke (1602–1686). Oma arengu käigus võimaldasid sellised generaatorid avastada mitmesuguseid elektrinähtusi ja seaduspärasusi. Füüsikaliste eksperimenteerimisvahenditena ei ole nad nüüdisajalgi oma tähtsust kaotanud.

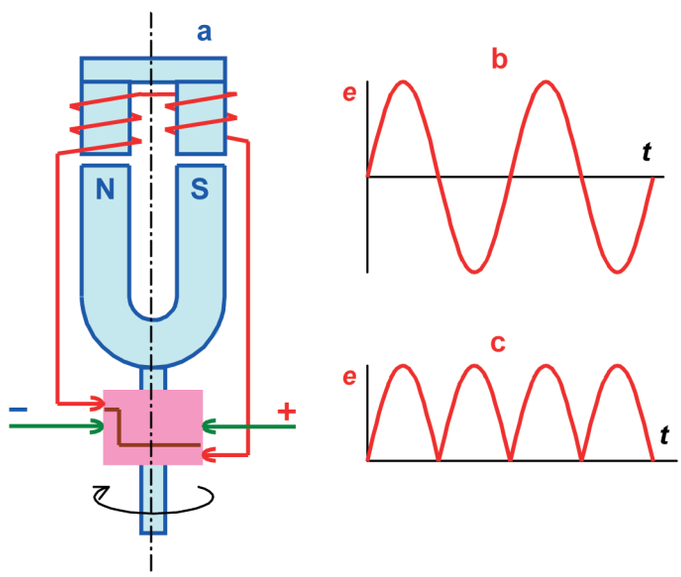
Esimese **magnetelektrilise** generaatori valmistas Londoni Kuningliku Instituudi (*Royal Institution*) professor Michael Faraday (1791–1867) 4. novembril 1831. Generaator koosnes püsimagnetist ja selle pooluste vahel pöörlevast vaskkettast (joonis **2.12.4**). Ketta pöörlemapanemisel indutseerus selle telje ja serva vahel alalis-elektromotoorjõud. Sellise ehituspõhimõttega, kuid täiuslikumaid **unipolaargeneraatoreid** kasutatakse (suhteliselt küll harva) praegugi.

Aasta hiljem, 3. septembril 1832 valmistas Pariisi peenmehaanik Hippolyte Pixii (1808–1835) elektrodünaamika rajaja, akadeemik André Marie Ampère'i (1775–1836) tellimisel ja juhendamisel pöörleva püsimagnetiga, käsitsi ringiaetava generaatori (joonis **2.12.5**).

MICHAEL FARADAY



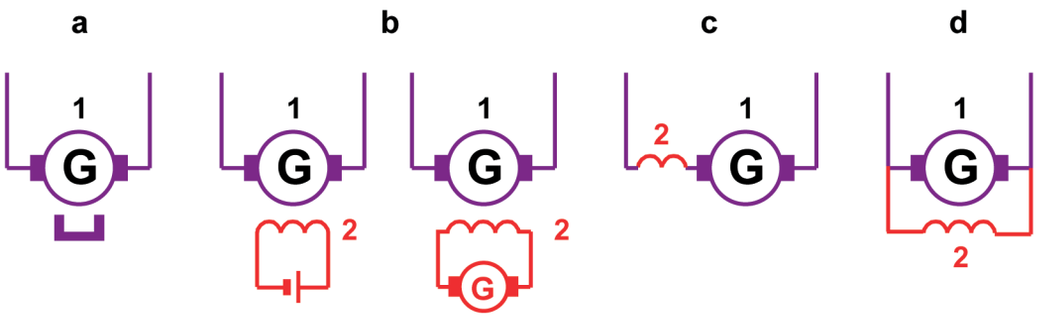
Joonis 2.12.4. Michael Faraday unipolaargeneraatori ehituspõhimõte. *1* magnet, *2* pöörlev vaskketas, *3* harjad



Joonis 2.12.5. Hippolyte Pixii magnetelektrilise generaatori ehituspõhimõte (a), indutseeritav vahelduvelektromotoorjõud (b) ja kommutaatori abil saadav pulseeriv alalis-elektromotoorjõud (c). Masina väntajam koos koonushammasratasülekandega on näitamata

Pixii generaatori ankrumähises indutseeritakse vahelduv elektromotoorjõud. Generaatorist saadava voolu alaldamiseks lisati generaatori pöörlevale osale lahtiste elavhõbekontaktidega kommutaator, mis lülitas generaatori väljundahela ja vahelduvvoolumähise omavahelise ühenduse igal poolpöördel vajalikul viisil ümber. Õige kiiresti asendati see aga lihtsama silindrilise harikommutaatoriga, nagu see on kujutatud joonisel **2.12.5**.

Pixii põhimõttel ehitatud generaatori võttis esimesena tööstuslikult kasutusele Birminghamis (Suurbritannia), galvanoplastikavanni toiteks tööstur John Stephen Woolrich (1790–1843), kasutades primaarmootorina 1-hj aurumasinat. Generaatori pinge oli 3 V, nimivool 25 A ja kasutegur ligikaudu 10 %, kuid taolised, järjest võimsamad generaatorid hakkasid galvaanikatööstuses kiiresti levima.



Joonis 2.12.6. Alalisvoolugeneraatorite ergutuse areng. a püsimagnetergutus (1831), b võõrergutus (1851), c jada-endaergutus (1866), d rööp-endaergutus (1867). *1* ankur, *2* ergutusmähis. Ergutusvoolu reguleerimisreostaadid on näitamata

Aastal 1851 pani Saksamaa sõjaväearst Wilhelm Josef Sinsteden (1803–1891) ette kasutada induktoris püsimagnetite asemel elektromagneteid ja toita neid väiksemast abigeneraatorist; ühtlasi avastas ta, et masina kasutegur suureneb, kui elektromagneti terassüdamik teha mitte massiivne, vaid panna kokku traatidest. Sinstedeni ideed rakendas tegelikkusesse aga alles aastal 1863 Suurbritannia iseõppinud elektriinsener Henry Wilde (1833–1919), kasutades muuhulgas erguti (*exitatrice*) paigutamist generaatori võllile. Aastal 1865 valmistas ta generaatori *enneolematu* võimsusega 1 kW, mille abil ta sai demonstreerida isegi metallide sulatamist ja keevitamist.

Alalisvoolugeneraatorite tähtsaim täiustus oli **endaergutus**, mille põhimõtte oli patenteerinud aastal 1854 Taani riigiraudtee tehnikadirektor Sören Hjorth (1801–1870), kuid mis sel ajal ei leidnud tegelikku kasutamist. Aastal 1866 leiutasid selle üksteisest sõltumatult uuesti mitu elektrotehnikut (sealhulgas H. Wilde) ja laialt sai see tuntuks detsembris 1866, mil saksa tööstur Ernst Werner von Siemens (1816–1892) rakendas seda oma kompaktses ja kõrge kasuteguriga generaatoris. 17. jaanuaril 1867 loeti tema kuulsakssaanud ettekanne *dünamoelektrilise printsiibi* kohta ette Berliini Teaduste Akadeemias. Endaergutus võimaldas loobuda ergutusgeneraatoritest ning hakata elektrienergiat odavalt ning suurtes kogustes tootma, mistõttu aastat 1866 võib lugeda **tugevvoolu-elektrotehnika** sünniaastaks. Esimestes endaergutusega masinates oli ergutusmähis lülitatud ankruga **jadamisi**, kuid veebruaris 1867 teatas inglise elektrotehnik Charles Wheatstone (1802–1875) paremini reguleeritavast **rööpergutusest**, mille peale ta tegelikult olevat tulnud juba enne Siemensi jadaergutust (joonis **2.12.6**).

Vajadus vahelduvvoolugeneraatorite järele tekkis aastal 1876, mil Pariisis tegutsev vene elektrotehnik Pavel Jablotškov (1847–1894) alustas seal vahelduvvoolu-kaarlampide (*Jablotškovi küünalde*) tootmist ja linnatänavate valgustamist. Esimesed selleks vajalikud generaatorid valmistas Pariisi leidur ning tööstur Zénobe Théophile Gramme (1826–1901). Hõõglampide masstootmise algusega aastal 1879 kaotas vahelduvvool mõneks ajaks oma tähtsuse, kuid uuesti tõusis see päevakorrale elektrienergia edastuskauguse suurendamise vajadusega 1880ndate aastate keskel ning kolmefaasilise süsteemi väljatöötamisega aastail 1888…1890 New Yorgi uurimislaboratooriumi *Tesla-Electric Co.* omaniku Nikola Tesla (1856–1943) poolt USAs ja firma *AEG* (*Allgemeine Elektricitäts-Gesellschaft*) tehnikadirektori Michael von Dolivo-Dobrowolsky (1862–1919) poolt Saksamaal. Algas järjest suurema võimsusega sünkroongeneraatorite tootmine rajatavatele soojus- ja hüdroelektrijaamadele. Turbogeneraatorite arengu tähtsaimaks sündmuseks võib seejuures lugeda silindrilise rootori väljatöötamist Šveitsi elektrotehnikatehase *Brown, Boveri & Cie.* kaasasutaja ja -omaniku Charles Eugen Lancelot Browni (1863–1924) poolt aastal 1898. Esimese vesinikjahutusega generaatori (võimsusega 25 MW) valmistas aastal 1937 USA firma *General Electric*, esimese juhtmesisese vesijahutusega generaatori aga aastal 1956 Suurbritannia firma *Metropolitan Vickers*.

2.13 ELEKTRIMOOTORID

Elektrimootor muundab elektrienergia mehaanilise liikumise energiaks. Nagu elektrigeneraator, nii ka elektrimootor koosneb tavaliselt staatorist ja rootorist, mis tähendab, et enamasti tekitab see **pöörlevat** liikumist. On aga ka mootoreid, mille liikuv osa (sel juhul *kulgur*) liigub translatoorselt, enamasti sirgjooneliselt. Selliseid mootoreid nimetatakse *kulg-* ehk *lineaarmootoriteks*.

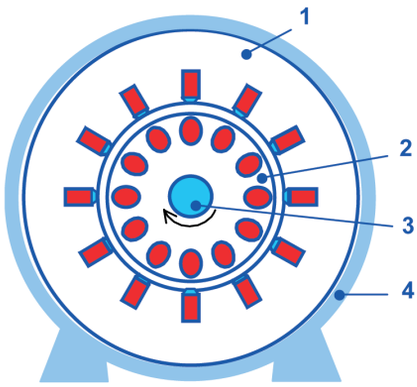
Elektrimootorite ehitust ja kasutamist käsitletakse põhjalikult õppeainetes *Elektrimasinad* ja *Elektriajamid*, mistõttu alljärgnevalt esitatakse üksnes nende mõningad üldomadused, mis võimaldavad neid võrrelda muude (nt sisepõlemis-) mootoritega.

Levinuim elektrimootori liik on kolmefaasiline **lühisrootoriga asünkroonmootor**, mille ehituspõhimõte on esitatud joonisel **2.13.1**.

Selle mootori rootorimähis kujutab endast massiivseid uuretes paiknevaid vask- või alumiiniumvardaid, mis mõlemast otsast on ühendatud lühisrõngastega. Alumiiniumi kasutamise korral moodustatakse kogu mähis tervikuna enamasti survevalu teel. Staatori pöörlev magnetväli indutseerib rootorimähises voolu, mille koostoime staatori magnetväljaga paneb rootori pöörlema. Rootori pöörlemiskiirus on alati väiksem kui staatori magnetvälja oma ja selle suhtelist erinevust staatori magnetvälja pöörlemiskiirusest nimetatakse **libistuseks**. Viimane oleneb mehaanilisest koormusest rootori võllil ja on täiskoormuse korral enamasti 3…5 %. Kiiruse astmeliseks reguleerimiseks võib kasutada ümberlülitatava pooluspaaride arvuga staatorimähist; sel põhimõttel valmistatakse nt 2-, 3- ja 4-kiiruselisi asünkroonmootoreid. Kui soovitakse kiirust reguleerida sujuvalt, toidetakse mootorit enamasti reguleeritavast sagedusmuundurist.

Asünkroonmootori kiiruse sujuvaks reguleerimiseks allapoole nimikiirust on lühisrootoriga mootorite asemel kasutatud **faasirootoriga** mootoreid, mille rootorimähis on samasuguse kolmefaasilise ehitusega nagu staatori oma. Selline mähis ühendatakse võllil paiknevate *kontaktrõngaste* kaudu reguleerimisreostaadiga, milles osa mootori poolt tarbitavast energiast muundub soojuseks. Reguleerimine toimub seega mootori kasuteguri arvel, mistõttu see reguleerimisviis on nüüdisajal suhteliselt harva kasutusel.

Lühisrootoriga asünkroonmootorid on väga kompaktse ja töökindla ehitusega ja seetõttu tunduvalt pikema elueaga kui sisepõlemismootorid. Nii massi kui ka mõõtmete poolest on nad enamasti ühtlasi väiksemad kui sama võimsusega sisepõlemismootorid. Neid saab valmistada väga mitmesuguse nimivõimsusega (mõnekümnest vatist kuni paarikümne megavatini). Väikestel võimsustel (kuni mõnisada vatti) kasutatakse ka ühefaasilisi mootoreid. Asünkroonmootorite, nagu ka kõigi muude elektrimootorite põhieelised sisepõlemismootorite ees seisnevad aga selles, et nad ei vaja kütust ega eralda heitgaase ja et neid on väga lihtne kokku ehitada mitmesuguste töömasinatega, reduktoritega ja muude mehaanikaseadmetega. Elektrimootorite kasutegur on enamasti 90…95 %.



Joonis 2.13.1. Lühisrootoriga asünkroonmootori ehituspõhimõte.
***1* staator, *2* rootor, *3* võll, *4* kere**

Sünkroonmootorid on samasuguse ehitusega nagu sünkroongeneraatorid ja pöörlevad toitepinge konstantse sageduse korral konstantse kiirusega. Nende eeliseks võrreldes asünkroonmootoritega loetakse seda, et nad ei võta võrgust reaktiivenergiat, vaid võivad anda reaktiivenergiat võrku ja katta seega teiste elektritarvitite reaktiivenergiatarbimist. Sünkroonmootorid ei sobi sagedaks käivitamiseks ja on kasutusel enamasti kestva suhteliselt konstantse koormuse ning, nagu juba öeldud, konstantse pöörlemiskiiruse korral.

Alalisvoolumootoreid kasutatakse siis, kui on vaja kiiruse sujuvat reguleerimist. See saavutatakse ankru- ja/või ergutusvoolu muutmisega kas reguleerimisreostaatide abil või mootori toitepinge muutmise teel. Kuna nüüdisajal saab ka vahelduvvoolumootorite kiirust (sagedusmuundurite abil) sujuvalt ning kasutegurit mitte kuigi oluliselt vähendamata reguleerida, on alalisvoolumootorite kasutamine nende keerukama ehituse, kõrgema hinna ja reguleerimisel tekkivate lisakadude tõttu tugevasti vähenenud.

Samm-mootoreid käitatakse pingeimpulssidega. Iga impulsi toimel pöördub rootor teatava kind-

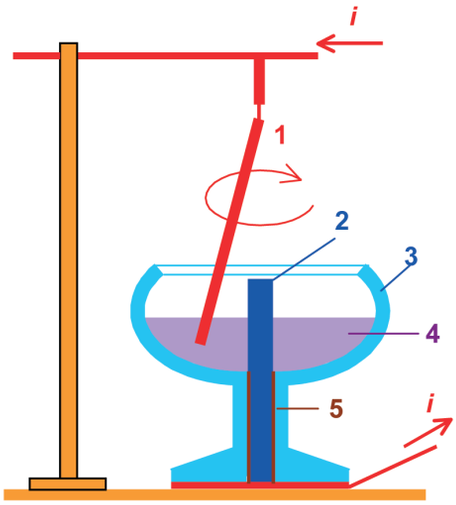
la nurga (nt mõne kraadi) võrra. Selliseid mootoreid kasutatakse aeglasekäigulistes (kas või nt 1 pööret aastas sooritavates) ja täpset positsioneerimist vajavates mehhanismides.

Kulg- ehk lineaarmootoreid kasutatakse translatoorse liikumise saavutamiseks juhtudel, mil pöörleva mootori liikumise muundamine translatoorseks mehaaniliste ülekannete või muude võtete abil ei ole võimalik või otstarbekohane.. Levinuimad on asünkroon-kulgmootorid, kuid saab valmistada ka sünkroon-, alalisvoolu- ja samm-kulgmootoreid.

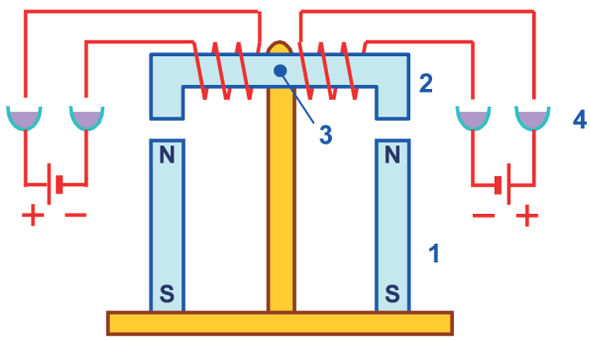
Esimene elektrimootor ei olnud mitte elektromagnetiline, vaid **elektrostaatiline** ja selle valmistas aastal 1748 Philadelphia (USA) kirjastaja Benjamin Franklin (1706–1790). Selle rootor kujutas endast hambulist ketast, millele impulsside kaupa rakendati elektrilaengutest tingitud tõmbe- ja tõukejõudu; ketas tegi 12…15 pööret minutis ja võis kanda kuni 100 hõbemünti. Esimesed **elektromagnetilised** mootorid (seadmed, milles kas voolust läbitud juhe pöörles ümber püsimagneti, nagu see on kujutatud joonisel **2.13.2**, või milles püsimagnet pöörles ümber voolust läbitud juhtme, tehes ühtlasi tööd – segades elavhõbedat) valmistas aastal 1821 Londoni Kuningliku Institutsiooni (*Royal Institution*) assistent Michael Faraday (1791–1867). Esimese mootori, mida oleks saanud ühendada eraldiasetseva töömasinaga, valmistas aastal 1831 Albany (USA) poistekeskkooli matemaatika- ja loodusloõpetaja Joseph Henry (1797–1878). Selle mootori liikuv osa ei olnud aga veel pöörlev, vaid kiikuv (joonis **2.13.3**).

MORITZ HERMANN JACOBI

Pärast Henry mootorit valmistati veel mitmesuguseid vahelduvasuunalise kulgliikumisega katselisi elektrimootoreid. Esimese **pöörleva**, reaalse kasutamise sihiga väljatöötatud elektrimootori valmistas 8. aprillil 1834 Pillau (Ida-Preisimaa) sadama inspektor, Königsbergi ülikoolis elektrotehnikat uuriv ehitusinsener Moritz Hermann Jacobi (1801–1874). Kaheksapooluseline mootor, mille nii staatoris kui ka rootoris oli 4 U-kujulist elektromagnetit ja mis tegi 80…120 pööret minutis, sai toidet galvaanielementide patareist pingega 6 V ja selle võimsus võllil oli ligikaudu 15 W, kasutegur aga ligikaudu 13 %. Oma mootorit uuris ja täiustas



Joonis 2.13.2. Michael Faraday elektrilist pöörlemist demonstreeriva katseseadme põhimõte.
***1* pöörlev metallvarras, *2* varrasmagnet, *3* klaas- või portselananum, *4* elavhõbe, *5* tihend, *i* vool**



Joonis 2.13.3. Joseph Henry kiikuva elektrimootori talitluspõhimõte. *1* püsimagnetid, *2* kiikuv elektromagnet, *3* võll, *4* elavhõbekontaktid

Jacobi muide Tartu Ülikoolis, kuhu ta aastal 1835 oli valitud tsiviilarhitektuuri professoriks [2.23]. 19. sajandi keskel töötati välja järjest kompaktsemaid ja parema kasuteguriga alalisvoolumootoreid, kuid nende tegelikku rakendamist takistas selleaegsete elektrienergiaallikate – galvaanielementide ja algeliste masingeneraatorite väike võimsus ning majanduslik ebaefektiivsus. Elektrimootorite laiem kasutamine sai võimalikuks alles pärast endaergutusega alalisvoolugeneraatorite kasutuselevõttu aastal 1866.

Pärast mitmefaasilise vahelduvvoolusüsteemi kasutuseletulekut (vt jaotis **2.12**) alustas Saksamaa firma AEG elektriinsener Michael von Dolivo-Dobrowolsky asünkroonmootorite valmistamise võimaluste uurimist ja esitas 8. märtsil 1889 patendiavalduse **lühisrootoriga asünkroonmootorile**. Pärast seda algas odavate, töökindlate ja kõrge kasuteguriga vahelduvvoolumootorite lai kasutamine. Nüüdisajal on kõik eelpool nimetatud elektrimootorite liigid saavutanud väga kõrge tehnilise taseme ja leiavad mitmekülgset rakendamist eeskätt kohtkindlates paigaldistes, kuid järjest sagedamini ka liiklusvahendites.

2.14 MUUD ELEKTRIMUUNDURID

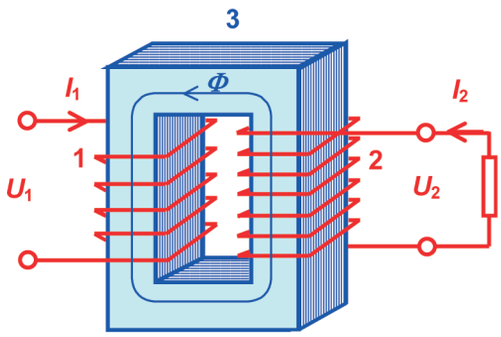
Tihti tekib vajadus muundada teatavate parameetritega (nt voolu liigiga, pingega või sagedusega) elektrienergiat teistsuguste parameetritega elektrienergiaks. Selleks kasutatakse nt

- transformaatoreid (pingemuundureid),
- alaldeid (vahelduvvoolu muundamisel alalisvooluks),
- vaheldeid ehk invertoreid (alalisvoolu muundamisel vahelduvvooluks),
- sagedusmuundureid,
- impulssmuundureid (voolu- või pingeimpulsside tekitamiseks).

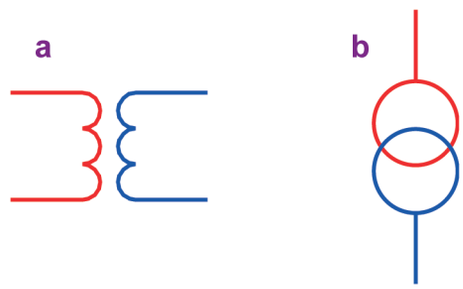
Lihtsaim **transformaator** ehk **trafo** kujutab endast terassüdamikust ja kahest mähisest koosnevat seadet (joonis **2.14.1**). Primaarmähise pingestamisel vahelduvpingega indutseerub sekundaarmähises sama sagedusega elektromotoorjõud. Kui trafo sekundaarmähis ühendada elektritarvitiga, tekib selles elektrivool ja trafo sekundaarklemmidel kujuneb välja elektromotoorjõust mõnevõrra väiksem, koormusest vähesel määral sõltuv sekundaarpinge. Primaar- ja sekundaarpinge suhe (trafo *ülekandesuhe*) on seejuures ligikaudu võrdne primaar- ja sekundaarmähise keerdude arvu suhtega. Trafo lihtsaimad tingmärgid on kujutatud joonisel **2.14.2**; piltlikkuse huvides võidakse trafo eri mähiseid, nagu joonisel näidatud, tähistada eri värvidega.

Trafod võivad olla ühe- või mitmefaasilised ja sekundaarmähiseid võib olla ka enam kui üks. Elektrivõrkudes on enamasti kasutusel kolmefaasilised, ühe või kahe sekundaarmähisega trafod. Kui primaar- ja sekundaarpinge teineteisest suhteliselt vähe erinevad, võidakse kasutada ühemähiselisi trafosid (*autotrafosid*) mille põhimõtteskeem on kujutatud joonisel **2.14.3**.

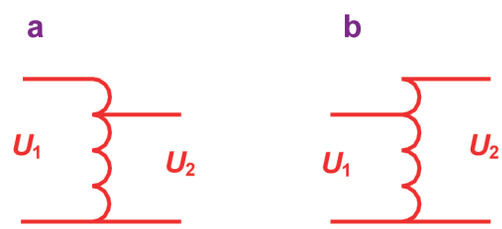
Trafode tähtsamad tunnussuurused on *nimiprimaar-* ja *nimisekundaarpinge*, *nimiprimaar-* ja *nimisekundaarvool* ning *nimisekundaarnäivvõimsus* (*nimivõimsus*). Trafosid saab valmistada niihästi väga väikese (nt mikroelektroonikaahelate jaoks sobiva) kui ka väga suure (nt elektrijaamade võimsatele generaatoritele sobiva) nimivõimsusega (nt 0,1 mVA kuni 1000 MVA). Võimsuskaod trafos – mähiste aktiivtakistusest tingitud *vaseskaod* ja terassüdamikus pöörisvooludest ja hüstereesist tingitud *rauaskaod* on enamasti niivõrd väikesed, et trafo kasutegur on üle 99 %. Sellele vaatamata on võimsates trafodes tekkiv soojusvõimsus tihti nii suur, et selle äraviimiseks tuleb kasutada tõhusat



Joonis 2.14.1. Ühefaasilise kahemähiselise trafo ehituspõhimõte. *1* primaarmähis, *2* sekundaarmähis, *3* südamik. U_1 primaarpinge, U_2 sekundaarpinge, I_1 primaarvool, I_2 sekundaarvool, Φ magnetvoog



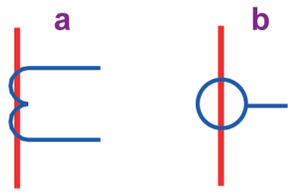
Joonis 2.14.2. Kahemähiselise trafo tingmärk elektriahelate üksikasjalistes (*mitmejoone-*) skeemides (*a*) ja elektrivõrkude (*ühejoone-*) skeemides (*b*)



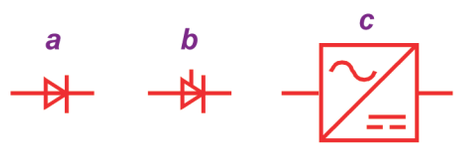
Joonis 2.14.3. Pinget madaldava (a) ja pinget kõrgendava (b) autotrafo põhimõtteskeem

jahutust. Enamasti paigutatakse võimsate trafode aktiivosa (mähised ja südamik) õlipaaki, mis tarbe korral varustatakse soojusvahetitega ja õhk- või vesi-sundjahutusega. Võimsusel kuni 10 MVA (mõnikord ka enam) võidakse kasutada aga ka *kuivtrafosid*, mille mähised on enamasti valatud epoksüüdvaiku. Nende põhieelised seisnevad kõrgemas tuleohutuses ja vedela isoleermaterjali lekkevõimaluse äralangemises, mistõttu neid saab vabamalt paigutada ükskõik millistesse ehitiseosadesse, sealhulgas ükskõik millisele korrusele.

Vahelduvpinge ja -voolu mõõtmisel, eriti, kui on tegemist kõrge pinge või suure vooluga, kasutatakse mõõtemuundureina sageli ***mõõtetrafosid***.



Joonis 2.14.4. Voolutrafo tingmärk mitmejooneskeemis (a) ja ühejooneskeemis (b)



Joonis 2.14.6. Mittetüüritava ventiili (a), tüüritava ventiili (türistori) (b) ja alaldi (c) tingmärk

Pingetrafo ehitus on põhimõtteliselt samasugune nagu jõutrafol ja suhteliselt väikesel ning muutumatul sekundaarkoormusel (ideaaljuhul – tühijooksuolukorras) on trafo ülekandesuhe piisavalt konstantne. Kõigi pingetrafode nimisekundaarpinge on enamasti ühesugune (nt 100 V). Voolutrafode sekundaarmähis on ideaaljuhul lühistatud ja sekundaarvool on võrdeline primaarvooluga; nimisekundaarvool on enamasti 5 A, mõnikord aga ka väiksem (nt 1 A). Voolutrafo tingmärkide näited on esitatud joonisel **2.14.4**.

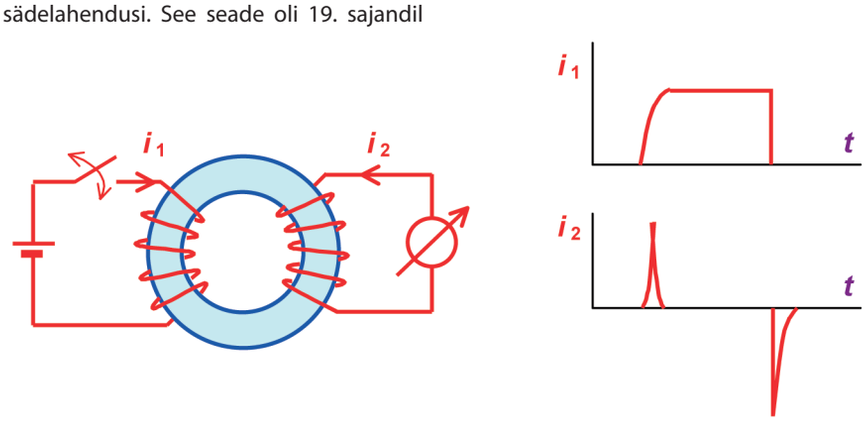
Üksikasjaliselt käsitletakse jõutrafode ehitust ja omadusi õppeaines *Elektrimasinad*, mõõtetrafosid aga õppeainetes *Elektrimõõtmised* ja *Elektrivarustus*.

Esimeseks trafoks võib lugeda Michael Faraday rõngassüdamikust ja kahest mähisest koosnevat *induktsioonrõngast* (ingl *induction ring*), mille abil ta 29. augustil 1831 avastas elektromagnetilise induktsiooni nähtuse (joonis **2.14.5**). Alalisvooluallikaga ühendatud primaarmähise sisse- ja väljalülitamise kiireltmööduval (*transientsel*) siirdeprotsessil tekkis sekundaarmähises pingeimpulss, mistõttu seda seadist võib nimetada *transienditrafoks*.

Faraday avastusest lähtudes valmistas Iirimaal Dublini lähedal asuva Margnoothi kolledži füüsikaõpetaja Nicholas Callan (1799–1864) aastal 1836 katkestist ja trafost koosneva **induktsioonpooli** ehk **sädeinduktori**, millega sai alalisvoolu muundada kõrgepingeliseks vahelduvvooluks ja tekitada pikki sädelahendusi. See seade oli 19. sajandil järjest täiustudes laialt kasutusel elektrilahenduste uurimisel ja sellel põhinevad nüüdisaegsete autode süütepoolid. Esimese vahelduvvoolutrafo patenteeris aastal 1876 Pariisis tegutsev vene elektrotehnik Pavel Jablotškov oma vahelduvvoolu-kaarlampide toiteahelatele. Kuna selle trafo magnetsüdamik ei olnud suletud (nagu Faradayl), vaid kujutas endast sirget traadikimpu, olid tema tehnilised omadused suhteliselt madalad ja mujal see rakendamist ei leidnud. Aastal 1885 valmistasid Budapesti tehase *Ganz & Co.* elektriinsenerid Max Déri (1854–1938), Otto Titus Bláthy (1860–1939) ja Karoly Zipernovsky (1853–1942) suletud toroidaalse traatsüdamikuga trafo ja kasutasid seda edukalt vahelduvvoolu-elektrijaotussüsteemi loomisel. Veel parema ehitusviisiga – E- ja I-kujulistest terasplekkidest kokkulaotud südamikuga trafo valmistas samal aastal USA elektrotehnik William Stanley (1858–1916), misjärel algas vahelduvvoolusüsteemide kiire areng nii Euroopas kui ka Ameerikas. Esimese kolmefaasilise trafo valmistas aastal 1889 Michael von Dolivo-Dobrowolsky.

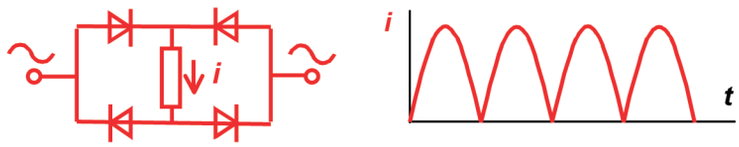
Alaldid põhinevad nüüdisajal enamasti pooljuht- (tavaliselt räni-) ventiilidel – pooljuhtdioodidel, mis lasevad voolu läbi ainult ühes suunas. Ventiili ja alaldi tingmärgid on kujutatud joonisel **2.14.6**.

Lihtsaim alaldi koosneb ühestainsast ventiilist (joonis **2.14.7**), kuid kuna alaldatud vool kujutab endast sel juhul üksteisest eraldatud vooluimpulsse (vahelduvvoolu poolperioode, mistõttu sellist alaldit nimetatakse *poolperioodalaldiks*), kasutatakse seda harva.

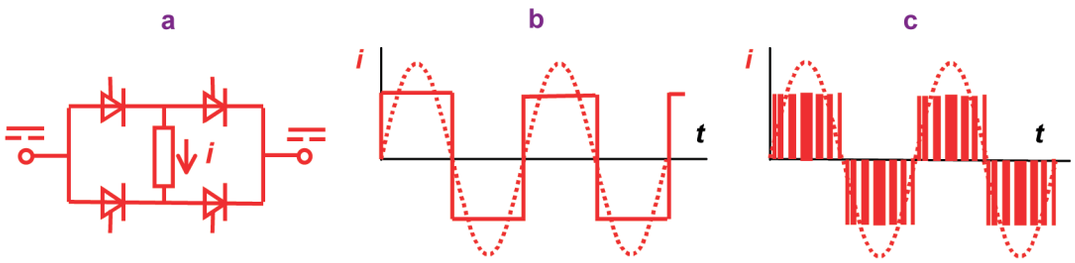


Joonis 2.14.5. Michael Faraday transienditrafo põhimõte. i_1 primaarvool, i_2 sekundaarvool, t aeg

Joonis 2.14.7. Ühest ventiilist koosnev alaldi skeem ja väljundvoolu kuju. *i* voolu hetkväärtus, *t* aeg



Joonis 2.14.8. Sildalaldi skeem ja väljundvoolu kuju. *i* voolu hetkväärtus, *t* aeg



Joonis 2.14.9. Sildvaheldi skeem (a) ja väljundvoolu kuju (*b* nelinurkvool, *c* impulsslaiusmodulatsioon). *i* voolu hetkväärtus, *t* aeg

Kõige sagedamini kasutatakse ***sildalaldeid***, mille skeem on kujutatud joonisel **2.14.8**. Kuna neis alaldatakse vahelduvvoolu mõlemad poollained, nimetatakse neid *täisperioodalalditeks*. Veel ühtlasem vool saadakse kolmefaasilise sildalaldi abil.

Vaheldis kasutatakse *tüüritavaid* pooljuhtdioode (transistore või türistore), mida saab tüürelektroodile rakendatud pinge abil suvaliselt sulgeda või avada (joonis **2.14.9**). Lihtsaima skeemi korral on väljundvoolu kuju nelinurkne, kuid vaheldiga jadamisi lülitatud filtri kasutamisel võidakse saada, nagu enamasti vaja, siinusvool. Arvprogrammjuhtimise kasutamisel võib nelinurkvoolu asemel saada eri laiusega impulssidest koosneva impulsipaki, millest filtri abil on kerge saada siinusvoolu. Tugevasti lihtsustatult on sellise *impulsslaiusmodulatsiooni* põhimõte esitatud joonisel **2.14.9,c**. Vaheldi tingmärk on kujutatud joonisel **2.14.10**.

Sagedusmuundur võib koosneda alaldi ja vaheldi kombinatsioonist (joonis **2.14.11**), kuid võib kasutatada ka keerukamaid skeeme (nt ilma alalisvoolu-vahelülita).

Nii alaldid, vaheldid kui ka sagedusmuundurid võivad olla mitmesugusel viisil reguleeritavad. Üksikasjaliselt käsitletakse nende omadusi ja ehitust elektroonika- ja jõuelektroonikaalastes õppeainetes.

Ühesuunalise elektrijuhtivuse avastas elavhõbe-huumlahenduslambis aastal 1855 prantsuse metallurg ja füüsik, eraõpetlasena tegutsev Jean-Mothée Gaugain (1811–1880), kes nimetas sellise ahelaelemendi elektriliseks **ventiiliks** (pr *soupape*) [2.24]. Hiljem (aastal 1860) uuris ta põhjalikult ka pooljuhtide elektrijuhtivust ja selle sõltuvust voolu suunast. Alaldite tegelik rakendamine algas aga alles pärast seda, kui elektrivõrkudes tuli kasutusele vahelduvvool ja kui Berliini ülikooli füüsika-privaatdotsent Leo Martin Aron (1860–1919) aastal 1892 oli leiutanud elavhõbe-vaakumventiili. Energiaseadmete jaoks sobivate võimsate alaldite valmistamine sai võimalikuks **elavhõbe-kaarlahendusventiili** leiutamisega aastal 1901 USA omaette tegutseva inseneri Peter Cooper Hewitti (1861…1921) poolt ja kuni 1970ndate aastateni olid mitmesugused elavhõbealaldid ja -inverterid jõuelektroonikas (nt elektriraudtee alaldusalajaamades) valitseval kohal. Nõrkvooluelektroonikas algas 20. sajandi alguses etteköeta-

Joonis 2.14.10. Vaheldi tingmärk

Joonis 2.14.11. Alalisvoolu-vahelüliga sagedusmuunduri põhimõtteskeem

va katoodiga vaakumventiilide (*-lampide*) ja aastal 1925 peamiselt seleenil, vaskoksiidil ja germaaniumil põhinevate pooljuhtventiilide kasutamine. 23. detsembril 1947 avastas USA uurimisinstituudi *Bell Laboratories* teadur Walter Houser Brattain (1902–1987) transistorefekti ja 26. veebruaril 1948 esitas ta koos John Bardeeniga (1908–1991) patendiavalduse **transistori** kohta. Aastal 1956 töötati samas instituudis välja p-n-p-n-pooljuhtstruktuur, mille alusel elektrotehnikakontserni *General Electric* teadurid Gordon Hall ja Frank William Gutzwiller aastal 1957 valmistasid esimesed tüüritavad räniventiilid (*silicon controlled rectifier, SCR*). Ameerika Raadiokorporatsioonis (*Radio Corporation of America, RCA*), kus toimusid samal ajal samasuunalised uurimused, hakati neid sõnade *türatron* (tüüritav elavhõbealaldi) ja *transistor* kombineerimise teel nimetama **türistorideks**. Nüüdisaja jõuelektroonika põhinebki eeskätt jõutransistoride ja türistoride kasutamisel.

Muudest elektrimuunduritest võib nimetada

- elektrilisi kuumutusseadmeid, mida lähemalt käsitletakse koos elekterkütte ja elektrotehnoloogiaga (jaotistes **6.4** ja **6.5**),
- elektrilisi valgusallikaid (vt jaotis **6.6**),
- elektrolüüsi- ja galvaanikaseadmeid (vt jaotis **6.5**).

2.15 SOOJUSVAHETID JA -TRANSFORMAATORID

Soojusvaheteid kasutatakse soojuse ülekandmiseks ühest keskkonnast teise, soojustransformaatoreid seejuures külmemast keskkonnast soojemasse. Alljärgnevalt vaadeldakse mõningaid soojusvaheteid ja paljude võimalike soojustransformaatorite hulgast ainult

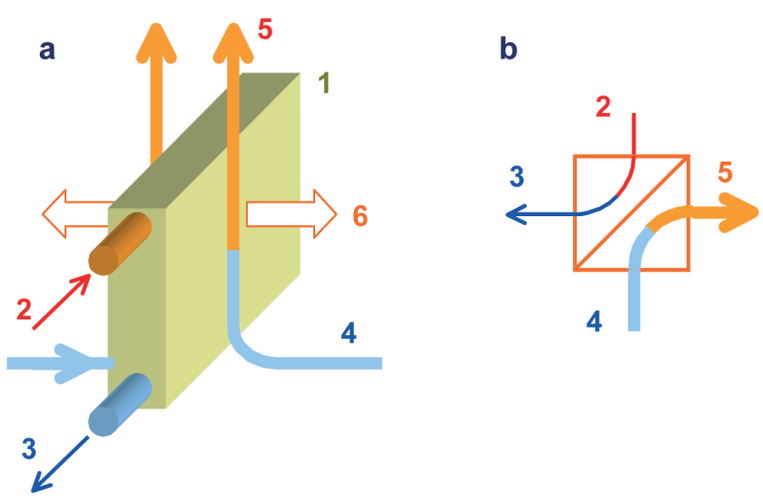
- külmuteid ja
- soojuspumpasid.

Soojusvaheti all mõeldakse seadet soojuse ülekandmiseks kuumemast keskkonnast külmemasse. Üks lihtsaimaid on taoliste seadmete hulgas vesikeskkütte küttekeha, millelt soojus siirdub köetavasse keskkonda osalt loomuliku konvektsiooni, osalt kiirguse teel (joonis **2.15.1**).

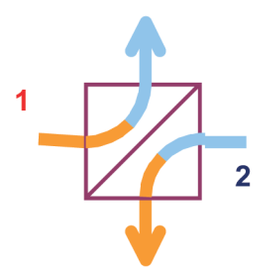
Teise, samuti suhteliselt lihtsa näitena võib esitada mingi ruumi ventileerimisel sissepuhutava värske õhu eelsoojendamist väljapuhutava soojenenud õhuga (joonis **2.15.2**), mis võib anda hoonete küttes küllaltki olulist energiasäästu.

Külmuti ehk **jahuti** on ette nähtud mingi piiratud ruumi temperatuuri alandamiseks allapoole väliskeskkonna temperatuuri mingi nõutava temperatuurini soojuse äraviimise teel kõrgema temperatuuriga väliskeskkonda. Külmutite põhimõtteskeeme on palju ja alljärgnevalt on esitatud neist ainult kaks.

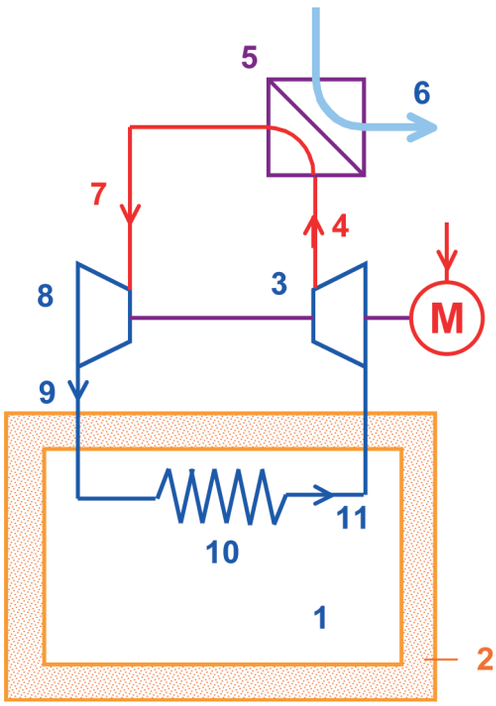
Gaasikompressorkülmuti põhineb mingi gaasi komprimeerimisel, kuumenenud gaasi jahutami-



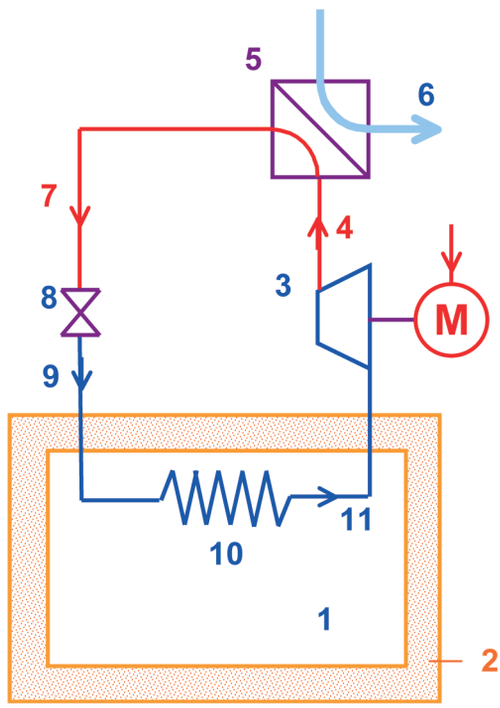
Joonis 2.15.1. Soojusülekanne keskkütte-küttekehalt köetavasse ruumi (*a*) ja selle põhimõtteskeem (*b*). *1* küttekeha, *2* sisenev kuum vesi, *3* väljuv jahtunud vesi, *4* külm ruumiõhk, *5* soojenenud ruumiõhk, *6* soojuskiirgus



Joonis 2.15.2. Soojusvaheti skeem soojuse ülekandel mingist ruumist väljapuhutavalt õhult (*1*) sissepuhutavale värskele õhule (*2*)



Joonis 2.15.3. Gaasikompressorkülmuti põhimõtteskeem. *1* jahutatav ruum, *2* soojusisolatsioon, *3* kompressor, *4* komprimeeritud kuum gaas, *5* soojusvaheti, *6* jahutusõhk või -vesi, *7* jahutatud gaas, *8* detander, *9* paisunud ning sügavjahtunud gaas, *10* jahuti, *11* külm gaas



Joonis 2.15.4. Aurukompressorkülmuti põhimõtteskeem. *1* jahutatav ruum, *2* soojusisolatsioon, *3* kompressor, *4* komprimeeritud kuum aur, *5* soojusvaheti, *6* jahutusõhk või -vesi, *7* vedel soojuskandja, *8* drosselventiil, *9* paisunud, jahtunud ning osaliselt aurustunud vedelik, *10* jahuti (aurusti), *11* aurustunud soojuskandja

sel, jahutatud gaasi paisumisel ja selle suunamisel jahutatavas ruumis paiknevasse, enamasti siugtoru taolisesse jahutisse (joonis **2.15.3**).

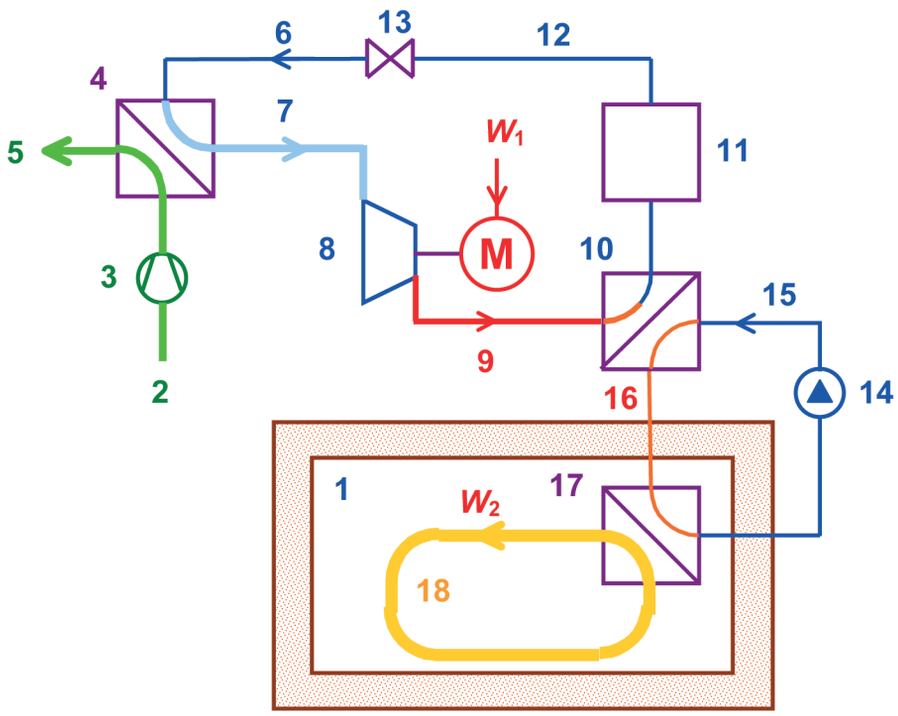
Sellises külmutis võib soojuskandjana kasutada õhku, kuid ka muid gaase. Kuna gaaside maht-erisoojus on suhteliselt väike, on taolise külmuti elementide mõõtmed suhteliselt suured. Seetõttu on enam levinud **aurukompressorkülmutid**, milles soojuskandja vaheldumisi veeldatakse ja aurustatakse (joonis **2.15.4**).

Soojuskandjana kasutatakse sellises külmutis madala keemistäpiga vedelikke, nt propaani C_3H_8 (–42 °C), ammoniaaki NH_3 (–33 °C), butaani C_4H_{10} (–12 °C) või pentaani C_5H_{12} (+9,5 °C). Varem kasutati selleks väga laialt (kodukülmikutes peaaegu eranditult) mitmesuguseid klorofluoroalkaane (*freoone*), mille keemistäpp oli väga sobivalt –25…–35 °C, kuid nüüdisajal on nende kasutamine keelatud, kuna neis sisalduv kloor, sattudes stratosfääri, lõhub Maa osoonikihti (vt jaotis **7.3**). Eriti madalate temperatuuride saamiseks võib kasutada ka nt lämmastikku N_2 (keemistäpp –196 °C).

Ülalesitatud keemistäpid kehtivad atmosfäärirõhul (101,325 kPa).

Kompressorkülmuti teooria esitas aastal 1871 Müncheni tehnikaülikooli masinaehitusprofessor Carl Linde (1842–1934). Aastal 1876 realiseeris ta esimese (ammoniaagil põhineva) külmuti ja aastal 1879 asutas nende tootmiseks tehase, mis tegutseb seniajani. Pärast seda töötati välja mitmesuguseid teisi külmutite liike ja aastal 1931 tõi USA keemiakontsern *Du Pont de Nemours & Co.* turule eelnimetatud tõhusad soojuskandjad – freoonid. Algas freoonkülmikute masstootmine. Aastal 1987 otsustati ÜRO kliimakonverentsil Montrealis freoonid keelata ja aastaks 2000 lõpetati nende kasutamine külmikute soojuskandjana kogu maailmas.

Soojuspump on seade soojuse ülekandmiseks külmemast väliskeskkonnast köetavasse ruumi. Ka selles kasutatakse madala keemistäpiga (–20…+5 °C) soojuskandjaid, mille temperatuuri tõstmiseks rakendatakse komprimeerimist. Joonisel **2.15.5** on kujutatud välisõhust soojust võtva soojuspumba põhimõtteskeem. Välisõhu asemel võib soojust



Joonis 2.15.5. Õhksoojuspumba põhimõtteskeem.
***1* köetav ruum, *2* välisõhk (nt +6 °C), *3* õhupuhur, *4* aurusti, *5* jahtunud välisõhk (nt +2 °C),**
***6* vedel soojuskandja (nt 0 °C), *7* aurustunud soojuskandja (sama temperatuuriga nagu enne aurustit, nt 0 °C),**
***8* kompressor, *9* komprimeeritud kuum aur (nt +60 °C), *10* kondensaator, *11* soojuskandja mahuti,**
***12* vedel jahtunud soojuskandja (nt +40 °C), *13* drosselventiil, *14* keskkütte ringluspump,**
***15* jahtunud vesi (nt +35 °C), *16* kondensaatoris kuumenenud vesi (nt +50 °C), *17* vesiküttekeha,**
***18* köetavas ruumis ringlev õhk. W_1 kompressori tarbitav energia, W_2 köetavasse ruumi antav soojus**

võtta aga ka veekogudest, kaevudest või pinnasest; viimasel juhul paigutatakse pinnasesse rõhtsad või püstsed torud, millest juhitakse läbi vesi või muu (nt mingi külmumiskindel) vahesoojuskandja.

Soojuspumba tõhusust iseloomustatakse köetavasse ruumi antava soojushulga W_2 ja kompressori poolt sama aja jooksul tarbitava energia W_1 suhtega, mida nimetatakse ***soojusteguriks***. Tavaliselt on soojustegur vahemikus 2,5 kuni 3 ja kompressori võimsus vahemikus 2…20 kW; ühepereelamute puhul piisab nt enamasti võimsusest 4…8 kW.

On olemas ka *pööratavaid* soojuspumpasid, mida võidakse suvel kasutada ruumide jahutamiseks (kliimaseadmeina).

Soojuspumba idee esitas juba aastal 1852 William Thomson, kuid soojuspumpade tegelik laiem kasutamine algas alles 1950ndail aastail, kusjuures alul olid neis soojuskandjaiks freoonid. Kui 1990ndail aastail tulid kasutusele keskkonnasõbralikumad soojuskandjad ja kui soojuspumpade tõhusaks automaatreguleerimiseks hakati rakendama töökindlaid, optimaalset talitlust tagavaid ning kergesti häälestatavaid mikroprotsessorsüsteeme, muutusid soojuspumbad majanduslikult soodsateks elamute põhi- või lisaküttevahenditeks. Tähtis on ka see, et soojuspumpade rakendamine võimaldab ühtlasi vähendada kütuste põletamist ja süsinikdioksiidi lisandumist Maa atmosfääri. Eestis arvati 2006. aasta lõpus olevat kasutusel ligi 2000 mitmesugust soojuspumpa ja alates aastast 2010 arvatakse neid lisanduvat igal aastal umbes 1000.

3 Energia edastamine

3.1 Üldmõisted 96

3.2 Kütuste edastamine 99

3.3 Mehaanilise energia edastamine 103

3.4 Soojuse edastamine 105

3.5 Elektrienergia edastamine 108

3 ENERGIA EDASTAMINE

3.1 ÜLDMÕISTED

Energia edastamise all mõeldakse mingi **energialiigi** siirdamist mingilt **energiaallikalt** mingi **energiakandja** vahendusel mingile **energiavastuvõtjale**.

Termin *energiaallikas* on tinglik ega tähenda seda, et seal energia *tekib* või *tekitatakse*. Nagu öeldud jaotises **1.1**, ei saa energia iseendast tekkida ega kaduda, vaid seda saab üksnes muundada ühest liigist teise.

Energia *edastamine* on sihipärane tegevus. Energia võib aga *edastuda* ka inimtahtest ja -tegevusest sõltumatult, nii looduses kui ka tehisseadmetes toimuvate füüsikaliste protsesside tulemusel.

Energiaallikas kujutab endast seadet, paigaldist või looduslikku objekti, mis väljastab kas mingi muundamisprotsessi tulemusel saadavat või mingil viisil salvestatud energiat. Teiste sõnadega, energiaallikaks võib olla mingi ***energiamuundur või -salvesti***, kusjuures mõnikord võivad mõlemad omadused esineda ka koos. Kui energiaallikas muundab mingit üht energialiiki enne väljastamist teiseks energialiigiks, nimetatakse seda enamasti **primaarseks** allikaks; kui allikas energia liiki ei muunda, on tegu **sekundaarse** allikaga.

Selle määratluse järgi on nt Päike ja elektrijaam primaarsed, soojust kiirgav maapind, elektrialajaam ja sagedusmuundur aga sekundaarsed energiaallikad.

Ka **energiavastuvõtja** võib kujutada endast mingit muundurit või salvestit, kusjuures ka siin võivad mõlemad omadused mõnikord esineda koos.

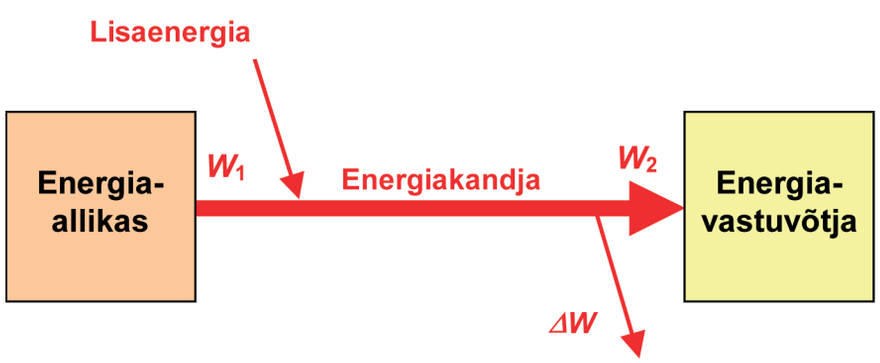
Energiakandjaks on sagedamini, olenevalt edastatava energia liigist,

- tahke, vedel või gaasiline põletuskütus (keemilise energia kandja),
- tuumkütus (tuumaenergia kandja),
- kuumutatud tahked kehad, vedelikud või gaasid (soojuskandjad),
- mitmesugused jõuülekandemehhanismid või nende elemendid,
- kiirgus,
- elektromagnetväli.

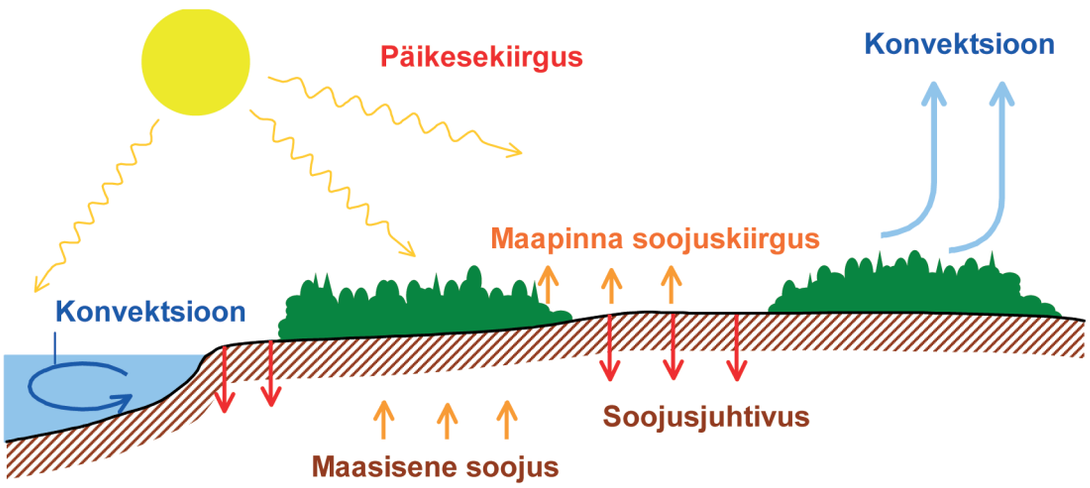
Energia edastamiseks (nt energiakandja liikumapanekuks) on mõnikord tarvis **lisaenergiat** ja edastamisel võivad sageli tekkida **energiakaod**. Ka võivad energia tunnussuurused (*parameetrid*) edastamisel muutuda. Energiaedastuse lihtsaim, kuid neid asjaolusid arvestav põhimõtteskeem on esitatud joonisel **3.1.1**.

Energiaedastust iseloomustatakse enamasti

- edastusvõimsusega,
- edastamiseks vajaliku lisaenergia erikuluga (kuluga edastatava energia ühiku kohta),
- edastamise kasuteguriga $\eta_P = P_2 / P_1$ või $\eta_W = W_2 / W_1$, kus P_1 ja W_1 on allikast väljastatav, P_2 ja W_2 aga vastuvõtjani jõudev võimsus ja energia,



Joonis 3.1.1. Energiaedastuse põhimõte.
W_1 allikast väljastuv, W_2 vastuvõtjasse sisenev energia, ΔW energiakadu



Joonis 3.1.2. Näiteid kiirgusenergia ja soojuse edastumisest looduses

- edastamisvahendite maksumuse ja erimaksumusega,
- edastamise erikuludega,
- edastamisvahendite toimega keskkonnale.

Looduses toimub kõigi energialiikide pidev edastumine ja muundumine. Maa kui energiavastuvõtja saab **kiirgusenergiat** Päikeselt (vt joonis **1.2.1**), kusjuures osa sellest peegeldub tagasi maailmaruumi, osa aga kandub **soojusena** mandritele ja meredele (joonis **3.1.2**). Soojus võib edasi levida soojusjuhtivuse ja konvektsiooni teel nii pinnases, vees kui ka õhus; Maa koore kaudu edastub maapinnale ka maasisene soojus (geotermaalenergia). Otse või pärast mitmesuguseid muundusprotsesse, nagu näitas jaotis **1.2**, siirdub praktiliselt kogu soojus kiirguse teel maailmaruumi.

Eriti suurtes kogustes kandub soojus edasi merehoovustega (nt sooja Golfi hoovusega), kuid ka kõrbealadelt ja Maa muudest soojematest piirkondadest tuleva tuulega.

Muundusprotsessides tekkiv **mehaaniline energia** edastub looduses

- tuulena,
- veevooluna,
- maalihetena,
- helina.

Elusolenditel kaasneb iga liigutus lihaste mehaanilise energia edastamisega.

Keemiline energia, mis algselt tekib ja salvestub taimedes fotosünteesi tulemusel, võib elusloodusses *biomassina* mitmesugusel viisil muunduda ja edastuda.

Keemilise energia edastamisviiside hulka kuulub põhimõtteliselt ka **söömine** – toidu keemilise energia edastamine väliskeskkonnast seedetrakti.

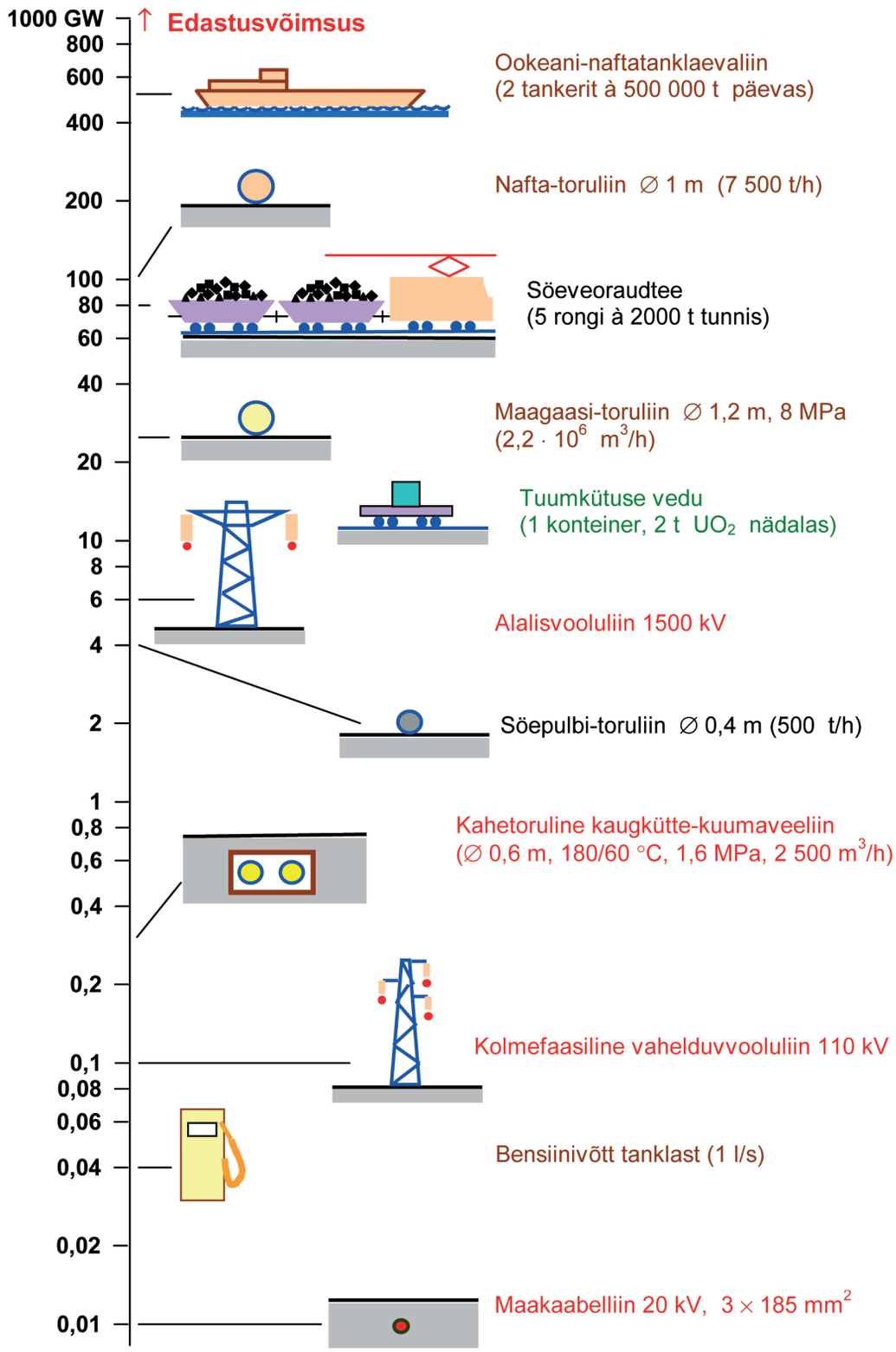
Elektrienergia edastub laetud osakeste liikumisena nt atmosfääris, elektrivooluna välgukanalis või Maa ionosfääris, kuid (väga nõrkade vooludena) ka elusolendite bioelektrilistes protsessides.

Elektrilisi protsesse inimkehas saab ilmestada elektrokardiograafide, elektroentsefalograafide ja muude taoliste mõõteriistade abil.

Energiatehnikas saab vastavalt vajadusele ja mitmesugusel viisil edastada kõiki energialiike –

- **keemilist energiat** kütuste veo teel või vedel- ja gaaskütuste toruliinide kaudu,
- **tuumaenergiat** tuumkütuse veo teel,
- **mehaanilist energiat** mitmesuguste energiaedastusmehhanismide või suruvedelike ja -gaaside abil,
- **soojust** vedelate, gaasiliste või tahkete soojuskandjate abil või soojuskiirgusena,
- **elektrienergiat** elektrijuhtide, vahelduv- või alalisvooluliinide kaudu või elektromagnetilise kiirgusena (nt raadiokiirgusena saateantennidest vastuvõtuantennideni),
- **kiirgusenergiat** nähtava, ultraviolett- või infrapunakiirgusena keskkonnas või kiirgusjuhtides (nt kiudoptilistes kaablites) jms.

Energiaedastuse üks põhinäitajaid on **edastusvõimsus** (edastatava energia kogus ajaühikus). Mõned näited eri energialiikide edastusvõimsuse kohta mõnedel edastusviisidel on esitatud joonisel **3.1.3**.



Joonis 3.1.3. Energiaedastusvõimsuse näiteid

3.2 KÜTUSTE EDASTAMINE

Kütuste edastamine, nagu näitab ka joonis **3.1.3**, on väga tõhus energiaedastusviis, sest keemilise energia suhteline sisaldus kütustes (põletamisel vabaneva energia hulk kütuse massi ühiku kohta ehk *kütteväärtus*) on 15…45 GJ/t. Tabelis **3.2.1** on esitatud tähtsamate energiaseadmeis kasutatavate kütuste kütteväärtused.

Enamiku teiste energialiikide korral on energiasisalduse ja massi suhe palju väiksem (lähemalt vt ptk **4**). Kütuseid saab edastada

- kindlate üksteisele järgnevate kogustena (koormatena, lastidena), kasutades selleks kõikvõimalikke veovahendeid (laevu, ronge, autosid, lennukeid jm),
- pideva vooluna, kasutades selleks mitmesuguseid pidevtranspordivahendeid ja -rajatisi (toruliine, konveiereid, elevaatoreid vms).

Edastusviisi valikul arvestatakse

- kütuse liiki,
- vajalikku kütusekogust ajaühikus (edastusvõimsust),
- edastusrajatiste (maanteede, raudteede, toruliinide vm) olemasolu või nende ehitamise vajadust,
- veovahendi mahutavust,
- veovahendi omamassi (*taara*) ja veetava kütusemassi (*netokoorma*) suhet,
- veokiirust,
- veo piirkaugust,
- peale-, maha- ja ümberlaadimisviise,
- paindlikkust (nt veoteekonna muutmise võimalust),
- töökindlust,
- toimet keskkonnale ja transpordil tekkida võivaid ohtusid,
- energiakulu edastatava kütuse massi ja kauguse ühiku kohta, nt kilovatt-tundides tonnkilomeetri kohta.

Peale selle arvestatakse ka edastamise majandusnäitajaid, sealhulgas

- tööjõukulu,
- veo- või muu edastusvahendi soetamis- ja korrashoiukulusid,
- teede ehitus- ja korrashoiukulusid,
- edastamise üldmaksumust edastatava kütuse massi ja edastuskauguse ühiku kohta, nt kroonides tonnkilomeetri kohta.

Joonisel **3.2.1, 3.2.2** ja **3.2.3** on ligikaudseks orientatsiooniks esitatud mõned näited kütuste keskmiste edastuskauguste, edastusvõime ja edastuse omahinna kohta.

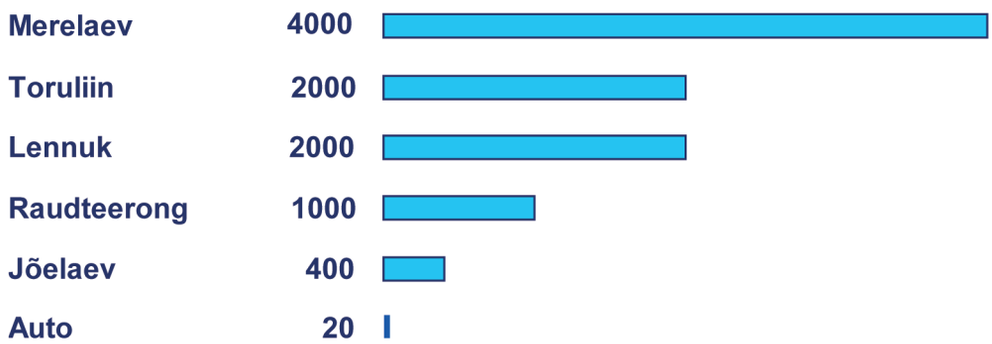
Tabel 3.1.3. Kütuste kütteväärtusi

Kütus	Kütteväärtus	
	GJ/t	MWh/t
Kivisüsi	20…25	5,6…6,9
Koks	29…30	8,0…8,3
Pruunsüsi	8,0…24	2,2…6,7
Põlevkivi	8,0…11,5	2,2…3,2
Freesturvas	7,0…9,0	1,9…2,5
Turbabrikett	15,0…18,0	4,2…5,0
Puit	7,1…13	2,0…3,6
Raske kütteõli (masuut)	40…41	11,1…11,4
Kerge kütteõli	42…43	11,7…11,9
Põlevkiviõli	39…40	10,8…11,1
Bensiin	43…44	11,9…12,2
Diislikütus	42…43	11,7…11,9
Maagaas*	46…47	12,8…13,1
Vedelgaas	45…46	12,5…12,8
Vesinik	142	39,4

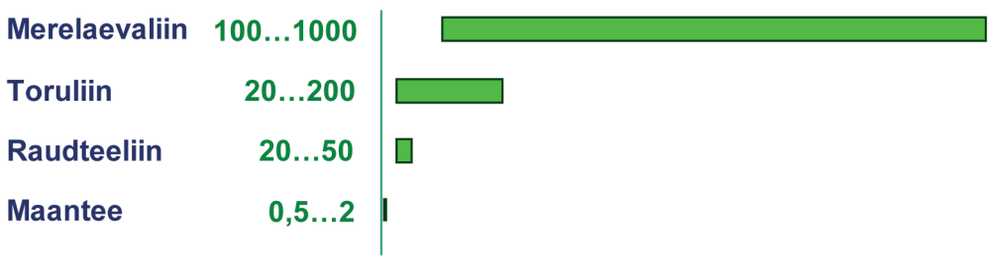
*Kütteväärtus 1000 m^3 kohta on 33…34 GJ ehk 9,2…9,4 MWh.

Suurimaid kütusekoguseid suurimale kaugusele (nt ühest maailmajaost teise) ja seejuures odavalt võimaldavad vedada **ookeanilaevad**. Enamasti veetakse sel viisil toornaftat ja naftasaadusi, kuid ka muid vedelikke, vedelgaasi ja kivisütt. Kohalikeks vedudeks ettenähtud vedelkütusetanklaevad võivad peale võtta 500 kuni 5000, üleookeanivedude tankerid aga 30 000 kuni 550 000 t. Tanklaevu mahutavusega üle 250 000 t nimetatakse *supertankeriteks*.

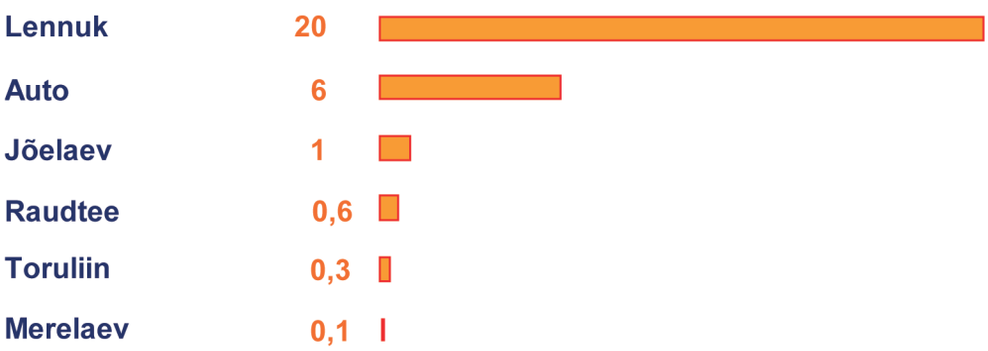
Algul veeti naftat ja naftasaadusi laevadel vaatides ja esimene täislastiga purjekas *Elisabeth Watts* (pardal 1329 vaati petrooli ja kivisöeõli) saabus Ameerikast Londonisse aastal 1861. Maailma esimese naftatanklaeva nimega *Zoroaster* lasi valmistada aastal 1877 Venemaal (Bakuus) tegutsev rootsi naftatööstur Ludvig Nobel (1831–1888) [1.15]. Nüüdisaja suurim tanker ning suurim laev üldse, praeguse nimega *Knock Nevis* (565 000 t, 458 m pikk) ehitati Jaapanis 1979. aastal, vahetas mitu korda omanikku ja seisab alates 2004. aastast Katari naftasadamas toornafta vastuvõtu-, hoiu- ja ümberpumpamisalusena.



Joonis 3.2.1. Kütuste keskmine edastuskaugus (km) mõnedel edastusviisidel



Joonis 3.2.2. Edastusviise iseloomustava edastusvõimsuse näiteid (kütuste massi järgi, Mt/a)



Joonis 3.2.3. Kütuste edastamise keskmine omahind (ct / (t km)) mõnede edastusviiside puhul (väga ligikaudselt). Lühend ct tähendab eurotsenti

Suurte naftakoguste vedu ookeanil kaasneb laevaõnnetuste ning vee ja ranniku naftasaaste riskiga. Nii näiteks sattus 16. märtsil 1978 Prantsusmaa Bretagne'i ranniku lähedal roolirikke tõttu karile Libeeria lipu all sõitev 334 m pikkune supertanker *Amoco Cadiz*. Suurem osa selle 234 000 t suurusest naftalastist valgus merre ja põhjustas enneolematu saastekatastroofi meres ning 200 km pikkusel rannikualal. Euroopa ajaloo suurim veereostus ning Portugali, Hispaania ja Prantsusmaa randade saaste tekkis aga pärast seda, kui 19. novembril 2002 murdus arvatavasti hiidlaine toimel pooleks ja uppus 250 km kaugusel Portugali rannikust Bahama lipu all sõitev tanker *Prestige*, mis oli masuudilastiga teel Ventspilsist Singapuri. Suurem osa 77 000 t suurusest lastist voolas merre. Eesti kõigi aegade suurim vedelkütusereostus tekkis 28. jaanuaril 2006 kindlakstegemata tanklaevast merre sattunud masuudi tõttu 35 km pikkusel rannaribal Dirham–Vihterpalu; hukkunud arvatakse olevat umbes 35 000 seal talvituvat merelindu.

Raskete saasteõnnetuste tõttu on nõuded tankerite ehitusele karmistunud (nt tohib neid alates 1989. aastast valmistada ainult topeltpõhja ja -parrastega), mistõttu naftavedu üle ookeani on läinud kallimaks. Sellegipärast jääb suurte tankerite kasutamine endiselt odavaimaks kütuseveo viisiks. Piltlikult esitab seda tabel **3.2.1**, milles on näidatud, kui kaugele saab vedelkütust vedada 1 eurotsendi eest liitri kohta.

Kivisöe laevtranspordiks kasutatakse jõelaevu mahutavusega 500 kuni 2000 t ja merelaevu mahutavusega kuni 120 000 t. USA kivisöe vedu Euroopasse spetsiaalsete kivisöelaevadega maksab ligikaudu 10…15 eurot tonni kohta.

Raudteetransport on kütuste veol väga laialt kasutusel, kusjuures tahkete kütuste puhul on see jäänud peaaegu ainsaks suurte kütusekoguste maismaaveoviisiks (vedel- ja gaaskütuste korral

Tabel 3.2.1.
Vedelkütuste edastuskaugus 1 ct eest liitri kohta

Edastusvahend	Edastuskaugus km
Supertanker	10 000
Toruliin	500
Jõetanker	250
Raudteerong	140
Tsisternauto	60

on alates teatavast kütusekogusest ajaühikus otstarbekam kasutada toruliine). Rongid koosnevad enamasti 50 kuni 100 vagunist kogumahutavusega 2000 kuni 10 000 t; Eesti raudteel loetakse nt rongi keskmiseks koormaks 3500 t. Kavandatakse ka üliraskekaaluliste rongide kasutamist pealevõetava koormaga kuni 20 000 t, näiteks söe veoks Venemaalt Kesk-Euroopasse. Eesti raudteedel veeti 2005. aastal 55 Mt kütuseid, sealhulgas 36 Mt naftatooteid (peamiselt transiidina), 15 Mt põlevkivi ja 4 Mt kivisütt, mis kokku moodustas 81 % kõigist raudteeveostest (68 Mt) [3.1].

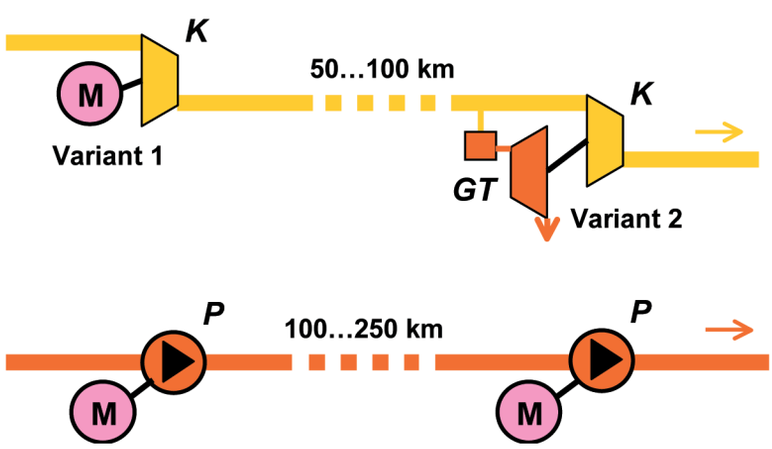
Algeline rööbastransport oli Mesopotaamias tuntud juba 3000 aastat eKr. 14. sajandil hakati Euroopa kaevandustes kasutama puitrööpaid ja aastal 1767 võeti Inglismaal söe- ja maagivagonettide hobuveol kasutusele malmrööpad. Ka maailma esimest auruvedurite rakendamisel põhinevat raudteed Stockton–Darlington, mis avati 27. septembril 1825, hakati kohe kasutama muuhulgas kivsöe veoks [1.15]. Maailma pikim rong (mitte küll söe, vaid maagi veoks) koostati 26. augustil 1989 Lõuna-Aafrika Vabariigis. Rong koosnes 660 vagunist brutomassiga à 105 t ja rongi ulatuses jaotatud 9 elektri- ja 7 diiselvedurist, oli 7,3 km pikk, kaalus ilma veduriteta 69 393 t ja kattis 861 km pikkuse vahemaa 22 tunni ja 40 minutiga.

Kütuste vedu raudteel loetakse töökindlamaks kui muid veoviise. Siiski juhtub ka raudteel õnnetusi. Kõige raskem raudteeõnnetus kütuste veol toimus 22. aprillil 2004 Korea Demokraatlikus Rahvavavabariigis Ryongchoni linna raudteejaamas (20 km kaugusel Hiina piirist), kus põrkasid kokku kaks vedelkütust ja vedelgaasi vedavat rongi; plahvatuses hävisid raudteejaam ja lähedalolevad hooned täielikult, surma või vigastada sai vähemalt 3000 inimest.

Väikese kütteväärtusega kütuste nagu pruunsöe ja põlevkivi vedu õigustab end üksnes raudteel ja suhteliselt väikesele kaugusele (kuni mõnikümmend kilomeetrit).

Lennukeid kui väga kalleid ja seejuures suhteliselt väikese mahutavusega (kuni 250 t) transpordivahendeid kasutatakse kütuseveoks haruharva. Siiski rakendatakse neid nt sõjalennukite tankimiseks õhus.

Vedel- ja eriti gaaskütuste transpordiks saab piisavalt suurte kütusekoguste korral edukalt kasutada **toruliine** torude läbimõõduga 0,3 kuni 1,5 m, kusjuures gaasi edastamiseks jaotusvõrkudes võib torude läbimõõt olla ka tunduvalt väiksem (mõni sentimeeter). Maagaasi-magistraalliinides on gaasi kiirus tavaliselt ligikaudu 10 m/s, rõhk 2,5…10 MPa ja maapealsete liinide iga 50…100 km järel nähakse ette kompressorijaam (vt joonis **3.2.4**). Merealustes maagaasitoruliinides on gaasi rõhk kõrgem (nt 25 MPa) ja kompressorijaam nähakse ette tavaliselt üksnes liini alguses. Kompressorite ajamites



Joonis 3.2.4. Gaaskütuse (ülal) ja vedelkütuse (all) toruliini põhimõtteskeem.
***GT* gaasiturbiin, *K* kompressor, *M* elektrimootor, *P* pump**

võidakse kasutada nii elektrimootoreid kui ka gaasiturbiine, kusjuures viimasel juhul (variant **2** joonisel **3.2.4**) võidakse gaasi võtta samast toruliinist. Tur-biini gaasitarve jääb tavaliselt alla 1 % edastatava gaasi kogusest. Vedelkütuste magistraal-toruliinides on vedeliku kiirus enamasti 1 kuni 2 m/s ja pumbajaamad nähakse ette iga 100…250 km tagant.

Termini *toruliin* kõrval on eesti keeles levinud ka sünonüümtermin *torujuhe*, mis on sattunud eesti keelde aga eksikombel. Nimelt on vene keeles, kust see sõna on võetud, kasutusel termin *трубопровóд* ('toruliin') mida ekslikult (sageli ka vene keeles) on häälдatud teistsuguse, tuttavama, kuid vale rõhuga kujul *трубопрóвод* ('torujuhe'). Käesolevas raamatus kasutatakse korrektset terminit ***toruliin***, mis muide vastab ka muude keelte terminikujule (nt ingl *pipeline*).

Toruliinide kaudu saab transportida ka tahkeid kütuseid, eeskätt kivisütt. Selleks jahvatatakse süsi ligikaudu 1 mm jämedusteks teradeks ja segatakse (vahekorras ligikaudu 1:1) veega. Sellist segu nimetatakse ***pulbiks*** ja seda saab pumbata kuni mõnesaja kilomeetri kaugusele, kus vesi eemaldatakse, süsi tolmuks jahvatatakse ja küttekoldesse suunatakse. Maailma pikim pulbiliin (439 km) varustab söega Mojave soojuselektrijaama (California, USA) Black Mesa (Arizona) söekaevandusest. Vee asemel võib pulbi moodustamiseks kasutada ka mingit vedelkütust, nt naftat või metanooli.

Väidetakse, et maagaasi on edastatud mitte eriti pika bambus-toruliini kaudu Hiina gaasileiukohalt mere äärde, kus seda kasutati merevee aurustamiseks soola tootmisel juba 500 aastat eKr. Maailma esimene nüüdisaegse ehitusega toruliin ehitati aastal 1863 Pennsylvanias (USA) nafta edastamiseks õliväljalt 1,5 miili kaugusel asuvasse rafineerimistehasesse; toru läbimõõt oli 2 tolli. Aastal 1990 valmis Kanadas maailma pikim toruliin Edmonton–Chicago–Montreal (3787 km), mis edastab 6000 m^3 naftat päevas. Kanadat läbib ka maailma pikim maagaasi-toruliin (13 955 km), mis aastal 1995 edastas 67 mln m^3 gaasi. Käesoleval ajal on kõigil mandritel, eeskätt aga Põhja-Ameerikas ja Euroopas välja kujunenud tihedad vedelkütuse- ja maagaasiliinide võrgud. Vedelkütuse-toruliinide puuduseks tuleb lugeda keskkonna ohtliku saastumise riski liini lekke tekkimisel (või tahtlikul kahjustamisel), maagaasiliinide puuduseks aga lekke korral tekkivat plahvatusohtu. Raskeimate tagajärgedega plahvatus toimus 3. juunil 1989 Ufa ja Aša vahel raudteelähedase vedelgaasi-toruliini lekke tagajärjel kahe reisirongi teineteisest möödumise ajal; surma sai 575 ja vigastada üle 600 inimese.

Autovedu on väikeste ja hajutatud kütusetarbijate korral möödapääsmatu. Enamasti kasutatakse selleks spetsiaalseid diiselveokeid, mis olenevalt ehitusest võivad peale võtta 5…50 t kütust. Eri maades on veoautode kogumass (auto enda ja koorma mass kokku) seadustega mitmesugusel viisil piiratud ja on olenevalt riigist tavaliselt 30…60 t. Kuna autode diislikütuse kulu on võrreldes raudteeveo või toruliinide energiatarbega suhteliselt suur – 1,4…4,6 MJ/(t km) (raudteel on see keskmiselt 0,31 MJ/(t km)), on veokaugus enamasti piiratud mõnekümne kilomeetriga.

Esimese veoauto (kandevõimega 1,5 t, mootori võimsusega 4 hj ja sõidukiirusega kuni 16 km/h) valmistas aastal 1896 saksa tööstur Gottlieb Daimler (1834–1900). Autotransport on õnnetusterohkem kui raudtee- või veeteetransport. Seetõttu järgitakse kütusevedudel tsisternautodega spetsiaalseid ohutusreegleid (vedu muu transpordi väiksema intensiivsuse ajal, nt öösel, liikluskeeld tiheda ühistranspordiga tänavatel, kiirusepiirangud jms). Raskeim õnnetus vedelgaasi veol toimus Hispaanias ühe Tarragona supelranna lähedasel teel, kus veoauto plahvatas ja surma sai 216 rannas puhkajat. 3. novembril 1982 hukkus 2 km pikkuses Salangi tunnelis Afganistanis petrooliveoki süttimise tagajärjel ametlikel andmeil 178 NSV Liidu sõjaväelast ja umbes 800 Afganistani tsiviilisikut, kuid on oletatud ka kuni 2 korda suuremat ohvrite arvu.

Tahket kütust saab transportida ka **konveierite** abil. Selline veoviis on levinud kaevandustes ja ehitiste sisetranspordis, kuid seda saab kasutada ka rasketes maastikuoludes, milles raud- või maanteede rajamine tuleks liiga kallis. Konveierliinid tagavad, nagu toruliinidki, kütuste pideva etteande ja nende pikkus võib küündida mõnekümne kilomeetrini; nende põhipuuduseks on suhteliselt suured hõõrdekaod ja seega ka suurem energiatarve kui raudtee- või autotranspordi korral. Maailma pikim konveierliin (Minea Bucraa – Atlandi rannik, 100 km), küll mitte kütuste, vaid fosforiidi veoks, valmis aastal 1972 selleaegses Hispaania Saharas.

Kütuste vedu on väga vana inimese poolt leiutatud energiaedastusviis, sest see pidi tekkima koos tule kasutuselevõtuga ligi miljoni aasta eest ja võis seisneda põletusmaterjali tassimises inimjõul lõkke vm tuleaseme juurde.

3.3 MEHAANILISE ENERGIA EDASTAMINE

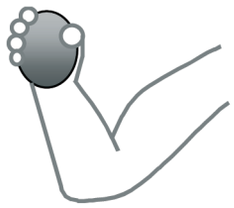
Igasuguse mehaanilise tööriista käsitsemine tähendab mehaanilise energia edastamist inimese lihastelt (enamasti käelihastelt) tööriista kaudu töödeldavale esemele. Seega õppis inimene mehaanilist energiat edastama juba esimeste primitiivsete töötlemata munakivist **löögiriistadega** (joonis **3.3.1**) umbes 3 miljoni aasta eest.

Käeshoitavast kivist arenesid hiljem välja kaabitsad, noad, kirved, vasarad ja muud käeshoitavad tööriistad. Arusaamine, et energiat saab kiviga edastada ka **viskamise** teel, võttis inimesel aega üle 2 miljoni aasta. Kivi või muu eseme viskamiseks mingi märgi pihta oli tarvis mõistuslikult koordineeritud liigutusi ja arvatakse, et just see panigi aluse aju arengule ja aruka tegevuse tekkele.

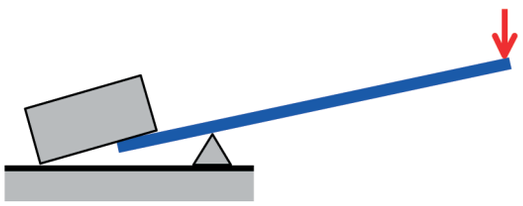
Nagu eelpool juba öeldud (vt jaotis **1.4**), toimus umbes 50 000 aasta eest Lõuna- ja Kagu-Aafrikas inimeste intelligentsi arengus mingi hüpe, mille tulemusel nad õppisid mehaanilise energia edastamiseks kasutama **jõuülekandemehhanisme**. Vanimaks nende hulgas loetakse **kangi** (joonis **3.3.2**). Umbes samal ajal õppis inimene ka tuld **tekitama** (tuld **kasutada** oskas ta juba varem), rakendades selleks käte vahel pöörlemapandavat kuiva puupulka, mis oma otsaga hõõrdus vastu kuiva puitalust; seega oli tekkinud esimene primitiivne **võll**. Mõnevõrra hiljem leiutati **viskoda** ja **vibu**; nii oda kui ka nool osutusid väga tõhusateks mehaanilise energia kandjateks nii jahil kui ka sõjakäikudel. Vibu toimis oma põhimõtte poolest ka tõhusa **energiasalvestina**.

Ligikaudu 5000 aastat enne meie ajaarvamist oskas inimene tule tekitamiseks vajalikku pulka pöörlema panna juba palju kiiremini ja tõhusamalt **silmuspoogna** abil (joonis **3.3.3**). Selles mehhanismis saab juba eristada nöörülekande ja võlli kombinatsiooni ning translatoorse liikumise muundamist pöörlevaks. Umbes 1000 aasta jooksul kujunesid selle mehhanismi alusel välja esimesed trellpuurid ja treipingid.

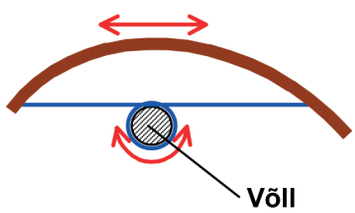
Umbes 3000 aastat eKr leiutati **ratas** ja hakkasid tekkima mitmesugused ratasmehhanismid. Esimeses järjekorras tuleb nimetada endastmõistetavalt **vankrit**, kuid umbes 1500 aastat eKr tulid kasutusele ka rattast, võllist ja viimase ümber keerduvast nöörist või köiest koosnevad **tõstemehhanismid** nagu nt rataskaevud (joonis **3.3.4**). Juba enne seda olid välja arenenud mitmed tähtsad kangmehhanismid, sealhulgas aerud ja kaevuvinnad.



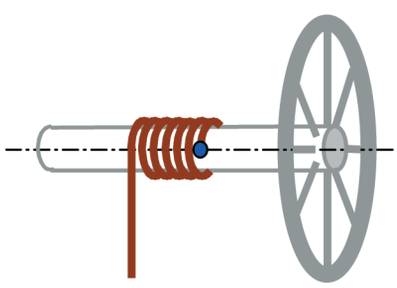
Joonis 3.3.1. Töötlemata munakivi esimese töö- (löögi-) riistana ning energiaedastusvahendina



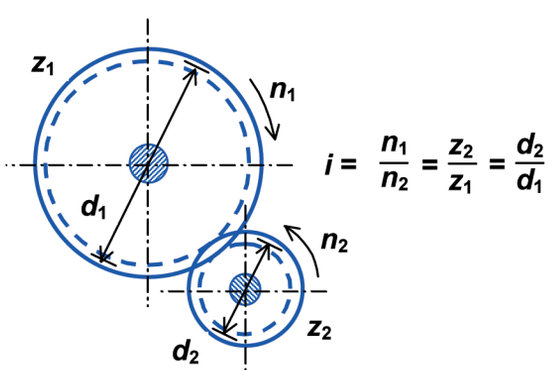
Joonis 3.3.2. Kang



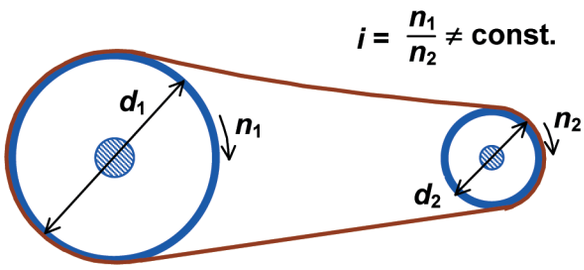
Joonis 3.3.3. Silmuspoogen



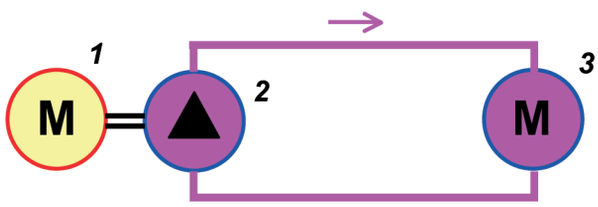
Joonis 3.3.4. Rattast, võllist ja köiest koosnev tõstemehhanism (energia edastus rattalt köiele)



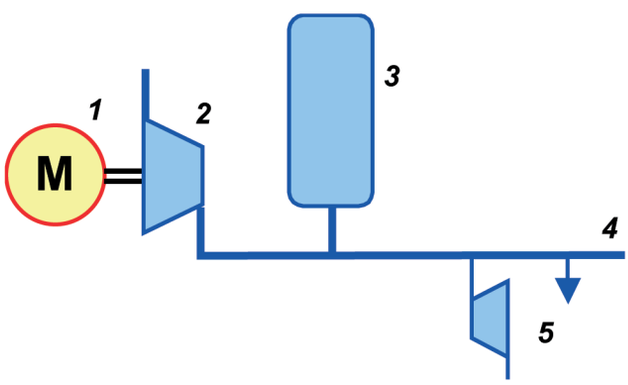
Joonis 3.3.5. Üheastmeline silindriline hammasülekanne. n_1 ja n_2 vedava ja veetava hammasratta pöörlemissagedus, z_1 ja z_2 hammaste arv, d_1 ja d_2 algringjoone läbimõõt (algringjooned ise ei ole joonisel näidatud), i ülekandearv (ülekandetegur)



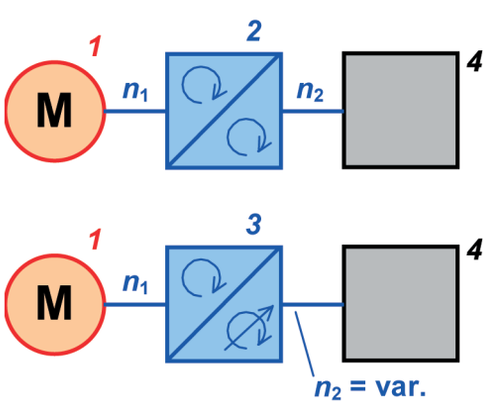
Joonis 3.3.6. Üheastmeline rihmülekanne. d_1 vedava, d_2 veetava rihmaratta läbimõõt, n_1 ja n_2 pöörlemissagedus, *i* ülekandearv (ülekandetegur)



Joonis 3.3.7. Hüdroajami skeem.
***1* elektrimootor, *2* õlipump, *3* hüdromoot**



Joonis 3.3.8. Energiaedastus suruõhuga.
***1* elektrimootor, *2* kompressor, *3* suruõhusalvesti, *4* suruõhumagistraal, *5* suruõhutarvitid**



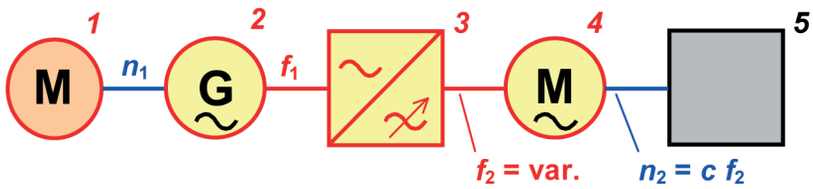
Joonis 3.3.9. Reduktori (ülal) ja variaatori (all) kasutamispõhimõte.
***1* jõumasin (mootor, turbiin vm), *2* reduktor, *3* variaator, *4* töömasin. n_1 sisend-, n_2 väljund-pöörlemissagedus**

Esimesed **hammasratasülekanded** tulid kasutusele võimsates (loomade veojõuga käitatavates) pumbaajamites umbes 1000 aastat eKr ning võeti kasutusele ka **vesiveskites** kohe nende tekkimisel (umbes 200 aastat eKr). Hammasülekannete põhimõtteid ja omadusi käsitles oma umbes aastal 330 eKr ilmunud töödes Aristoteles. Tänapäeval on väga mitmesuguse ehitusviisiga hammasülekanded kasutusel **reduktorites** ja muudes kiiruse muutmiseks ettenähtud mehhanismides. Joonisel **3.3.5** on esitatud lihtsaima üheastmelise hammasülekande kujutamisviis.

Rihmülekannet (joonis **3.3.6**) kirjeldas esimesena Archimedes umbes aastal 250 eKr. Erinevalt hammasülekandest võimaldab see ülekandeviis edastada energiat kaugusele kuni mõnikümmend meetrit. Ülekandearv on määratud vedava ja veetava rihmaratta läbimõõduga, kuid veetava ratta tegelik kiirus on rihma mõninga libisemise tõttu ülekandearvuga määratust mõnevõrra väiksem, kusjuures suhteline vähenemine (*libistus*) sõltub koormusest. Libistust saab vältida, kui kasutada sileda rihma asemel hammasrihma. Oma ehituselt ja omadustelt sarnanevad rihmülekandega ka **köis-, tross- ja kettülekanded**, mis tavalise rihmülekandega võrreldes võimaldavad edastada energiat kuni mõnesaja meetri, mõnikord ka mõne kilomeetri kaugusele.

Mehaanilist energiat saab edastada ka **voolavate vedelikega** (enamasti vee või õliga) ja **surugaasidega** (enamasti suruõhuga). Voolava vee kasutamine algas esimeste vesirataste juurdevoolukanalitega ja jätkub käesoleval ajal hüdroelektrijaamade juurdevoolu- (*derivatsiooni-*) kanalite ja juurdevoolutorudega. Mitmesugustes (nt mõnede tööpinkide) mehhanismides leiab kasutamist **hüdroajam**, mille leiutasid aastal 1874 vennad Salomon ja Johann Jacob Sulzer (Šveits). Energiakandjaks on selles ajamis õli (joonis **3.3.7**). Hüdroajamite eelis seisneb muuhulgas selles, et hüdromootor on väiksem ja lihtsam ning sobib paremini kokku mõnede mehhanismidega kui elektrimootor.

Suruõhku kasutas oma katselises heiteseadmes esimesena Kreeka mehaanik Ktesibios umbes aastal 230 eKr Aleksandrias. Nüüdisaegsetele kompressorist, suruõhusalvestist ja suruõhutarvitistest koosnevatele süsteemidele, mis on kujutatud nt joonisel **3.3.8**, pani aastal 1687 aluse Denis Papin (vt jaotis **2.2**) ja see on väga mitmel viisil kasutusel eeskätt tööstusettevõtetes ja ehitustöödel. Suruõhutööriistad on elektrilistest tööriistadest lihtsamad, ohutumad ja mõõtmetelt väiksemad, kuid nõuavad suru-



Joonis 3.3.10. Sagedusmuundur-elektriajami kasutamispõhimõte töömasina pöörlemissageduse sujuvreguleerimisel. *1* jõumasin (mootor, turbiin vm), *2* vahelduvvoolugeneraator, *3* sagedusmuundur, *4* vahelduvvoolumootor, *5* töömasin. f_1 sagedusmuunduri sisend-, f_2 väljundsagedus, n_1 sisend-, n_2 väljund-pöörlemissagedus, *c* võrdetegur

õhusüsteemi olemasolu, mis enamasti on kallim kui elektrijuhistik. Suruõhku kasutatakse ka elektrijaamades ja alajaamades võimsuslülitite ja muude lülitusaparaatide ajameis.

Mehaanilise energia edastamine võib toimuda koos selle ***parameetrite*** (nt pöörlemiskiiruse) muutmisega. Peale eelpool vaadeldud hammas-, rihm- jms ülekannete võidakse sellel otstarbel kasutada spetsiaalseid mehaanilise energia muundureid – **reduktoreid** ja **variaatoreid** (joonis **3.3.9**). Esimeses on ülekandearv kas konstantne või astmeliselt muudetav, kusjuures astmete arv on tavaliselt 2 kuni 6, teises saab ülekandearvu teatavates piirides muuta sujuvalt.

Muudetava ülekandearvuga reduktorid ja variaatorid on enamasti sedavõrd keerukad ja materjalimahukad, et nende asemel on töömasina kiiruse reguleerimiseks väga sageli otstarbekam kasutada reguleeritavat (eeskätt sagedusmuunduriga) elektriajamit, nagu see on näidatud joonisel **3.3.10**.

Kokkuvõttena võib öelda, et mehaanilist energiat saab edastada ja seejuures muundada väga mitmesugusel viisil, kuid enamasti suhteliselt väikesele kaugusele. Mehaanilise energia esimeste primitiivsete edastamisviiside avastamist inimese poolt koos esimeste tööriistade kasutuselevõtuga loetakse **tehnika** sünniks.

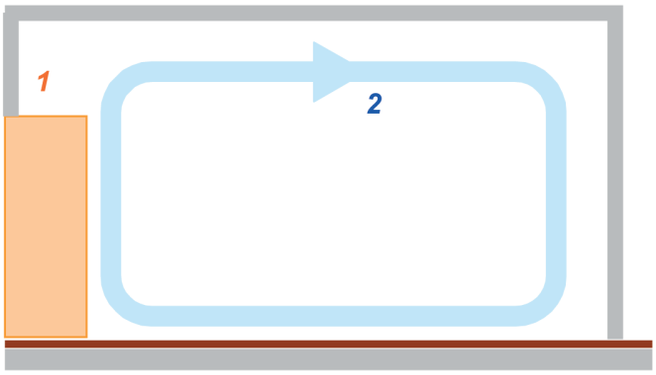
3.4 SOOJUSE EDASTAMINE

Soojust saab edastada mitmesuguste tahkete, vedelate ja gaasiliste **soojuskandjate** abil. Peatükis **2** leidis juba näiteks käsitlemist energia edastamine aurugeneraatorist auruturbiinile ülekuumendatud auru abil, kusjuures edastatav võimsus võis küündida mõne gigavatini. Jaotises **2.15** vaadeldi soojusvaheteid, külmuteid ja soojuspumpi, kus samuti oli tegemist soojuse edastamisega ühest keskkonnast teise.

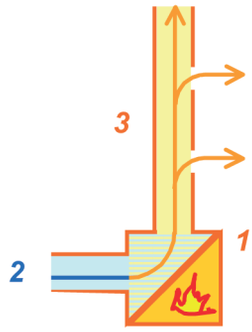
Kõige sagedamini kasutatakse soojuse edastamist mitmesugustes **küttesüsteemides**. Tavalisel ahiküttel levib soojus ruumis õhu loomuliku konvektsiooni teel (joonis **3.4.1**). Sel viisil saab aga kujundada ka keskkütet, nagu seda osati teha juba vanas Roomas 100 aastat eKr kuni 50 m kõrgustes hoonetes (joonis **3.4.2**).

Vesikeskkütte võttis esimesena kasutusele aastal 1716 Newcastle'is Rootsi päritolu mehaanik Mårten Triewald (1691–1747) [2.7] ja nüüdisajal on kuum vesi kujunenud hoonete kesk- ja kaugküttesüsteemides peamiseks soojuskandjaks. Keskküttes on kasutusel mitmesuguseid kuuma vee jaotuse viise küttekehade vahel [3.2]; joonisel **3.4.3** on kujutatud mitmekorruselise hoone *kahetorulise altjaotusega* vesikeskkütte põhimõte.

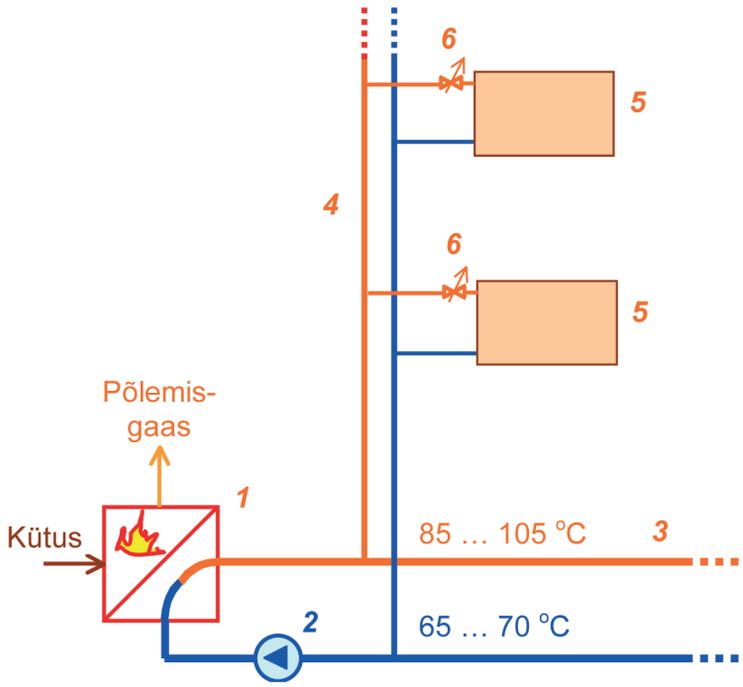
Kaugküte keskkatlamajadest ja sellekohase seadmestikuga elektrijaamadest (*koostootmis-* ehk *termofikatsioonielektrijaamadest*) tuli esmakordselt kasutusele aastal 1893 Hamburgis ja on nüüdisajal väga levinud peaaegu kõigis suuremates linnades soojuse edastamiseks kuni umbes 20 km kaugusele (joonis **3.4.4**). Kaugküte nõuab aga materjalimahu-



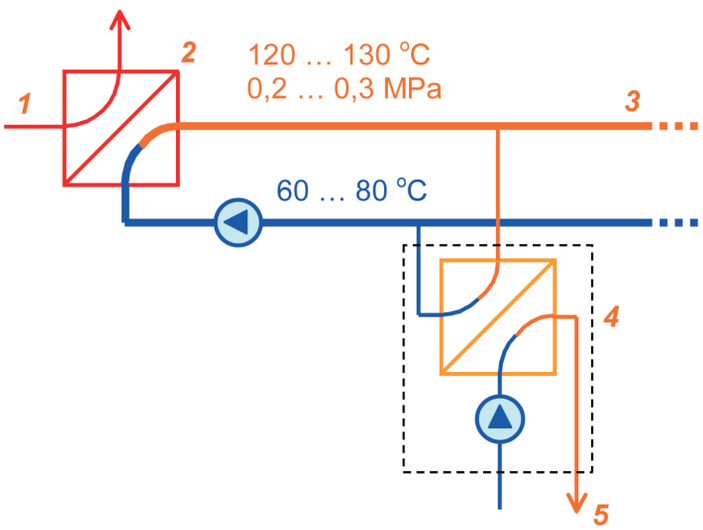
Joonis 3.4.1. Soojuse edastumine ruumis ahiküttel.
***1* ahi, *2* õhu ringlussuund**



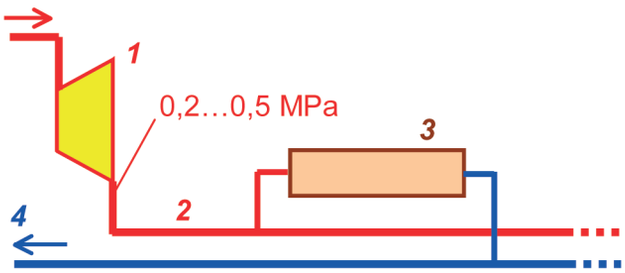
Joonis 3.4.2. Soojuse edastamise põhimõte
õhk-keskküttel. *1* ahi, *2* õhu sissevool, *3* soojaõhukanal



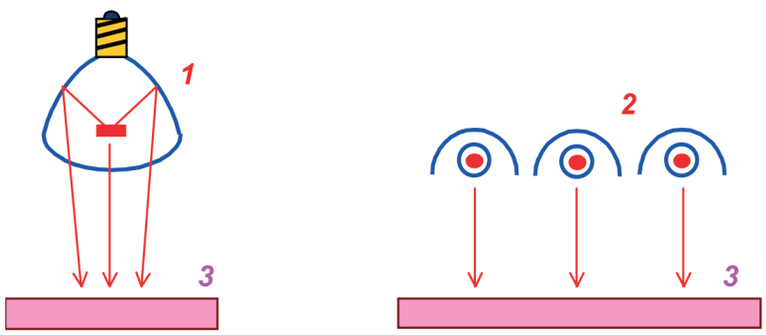
Joonis 3.4.3. Soojuse edastamine vesikeskküttes (näide). *1* kuumaveekatel,
***2* ringluspump, *3* jaotusmagistraal, *4* püstik, *5* küttekeha (*konvektor*), *6* reguleerimisventiil**



Joonis 3.4.4. Soojuse edastamine kaugküttel.
***1* soojuskandja, *2* soojusvaheti (*boiler*), *3* soojusmagistraal, *4* ehitise soojussõlm, *5* keskküttesüsteemi sisend**



Joonis 3.4.5. Aurkeskkütte põhimõte.
***1* vasturõhu- või vaheltvõtu-auruturbiin, *2* aurumagistraal, *3* küttekeha, *4* kondensaaditagastus**



Joonis 3.4.6. Infrapunalampide kasutamise näiteid. *1* infrapuna-peegellamp,
***2* peegelreflektoritega varustatud torukujulised infrapunalambid, *3* kuumutatav ese**

kaid maa-aluseid või maapealseid kuumaveetorustikke ja, et vältida liiga suuri soojuskadusid, nende tõhusat soojusisolatsiooni, mistõttu viimasel ajal on tihtipeale hakatud tagasi pöörduma hoonekatlamajade kasutamisele.

Aurkeskkütet (joonis **3.4.5**) kasutatakse peamiselt oma auruturbiin-elektrijaama omavates tööstusettevõtetes suurte ruumide kütteks kauguseni kuni 1 km. Küttekehades aur veeldub ja tekkiv kondensaat juhitakse tagasi aurugeneraatorisse. Esimesena rakendas aurkütet (oma tööruumi kütteks) aastal 1784 James Watt (vt jaotis **2.2**).

Samal viisil saab auru kui soojuskandjat kasutada ka mitmesugustes tootmisprotsessides (nt puidu aurkuivatamisel).

Soojuse edastamist **tahke** soojuskandja abil kasutatakse suhteliselt harva, peaasjalikult keemiatööstuses (sealhulgas põlevkivi utmisel) ja mitmesuguste materjalide kuumtöötlemisel. Soojuskandja võib olla ka *esemeline* nagu näiteks triikraud või jootekolb.

Optilise (eeskätt *infrapunase*) **kiirgusena** edastatakse soojust mitmesuguste materjalide termilisel töötlemisel (värvkatete kuivatamisel, mõnedes metallisulatusseadmetes jne), kuid ka kiirgusküttes. Energiaallikatena kasutatakse neil juhtudel enamasti elektrilisi kiirgureid, nt infrapunalampe (joonis **3.4.6**).

3.5 ELEKTRIENERGIA EDASTAMINE

Elektrienergiat saab edastada

- elektrijuhtide kaudu (nt elektriliinide abil),
- juhtide kasutamiseta (elektromagnetvälja kaudu).

Energiatehnikas kasutatakse valdavalt esimest viisi, teine viis on kasutusel kõrgsagedus- (eeskätt raadio-) tehnikas.

Oskussõnal **elektrijuht** on kaks tähendust:

1) elektrit juhtiv materjal (nt mingi metall või elektrolüüt),

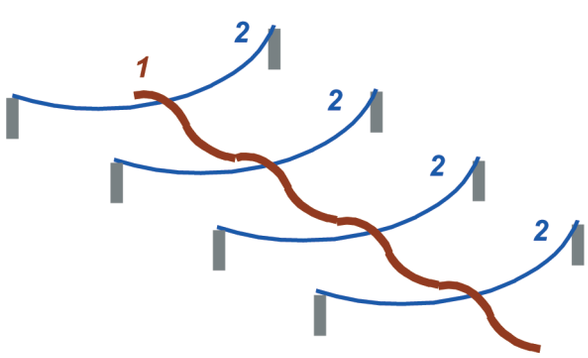
2) elektri edastamist võimaldav seadmekomponent, eritoode, tarind, keha vms.

Esimest tähendust kasutatakse füüsikas ja materjaliõpetuses, kus kõik materjalid liigitatakse elektrijuhtivuse järgi juhtideks, mittejuhtideks (*isolaatoriteks*) ja pooljuhtideks. Energiatehnikas on sagedamini kasutusel teisena nimetatud tähendus.

Elektrienergia edastamine elektrijuhtide kaudu võib toimuda

- **elektriseadme** (elektriallika, -muunduri või -tarviti) ühelt koostisosalt teisele *ühendusjuhtide* abil kaugusele mõnest nanomeetrist (nt integraallülitustes) kuni mõne meetrini (nt suuremais jõuseadmeis);
- **elektripaigaldise** ühelt koostisosalt teisele või ühelt elektripaigaldiselt teisele *elektriliinide* abil kaugusele mõnest meetrist (nt ühe paigaldise piirides) kuni mõne tuhande kilomeetrini (ühest energiasüsteemist teise).

Liinide ja nende sõlmpunktide kogumit elektripaigaldises nimetatakse **juhistikuks**, paigaldisi siduvate liinide ja nende sõlmpunktide kogumit aga **elektrivõrguks**. Vastavalt otstarbele ja ulatusele eristatakse energiasüsteemides põhi- ja jaotusvõrkusid, tööstusettevõtetes ettevõtte- ja tsehhivõrkusid jne.



Joonis 3.5.1. Stephen Gray esimese elektriliini ehituspõhimõte. *1* kanepnöör (juhe), *2* siidnöör (isolaator)

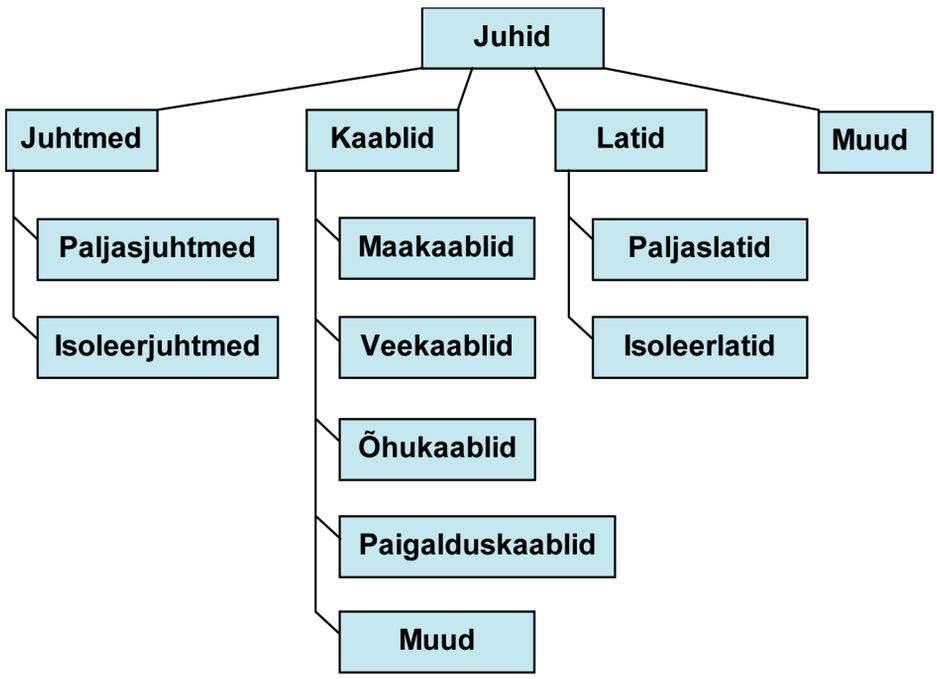
Elektrilaengu edastumise elektrijuhi (linase niidi) kaudu avastas aastal 1663 Magdeburgi linnapea Otto von Guericke (1602–1686), kes samal aastal oli valmistanud maailma esimese elektrostaatilise generaatori. Elektrinähtuste lähem uurimine algas aga alles 18. sajandi alguses ja **2. juulil 1729** paigutas inglise amatöörfüüsik Stephen Gray (1666–1735) elektrilaengu edasikandumise kontrollimiseks rõhtsatele siidnööridele 80,5 jala pikkuse kanepnööri; see oli maailma esimene **elektriliin** (joonis **3.5.1**). 14. juulil korraldas ta avaliku katse, milles liini pikkus oli juba 650 jalga, kusjuures juhe, milleks endiselt oli kanepnöör, paiknes 6 topeltposti vahele tõmmatud 2 jala pikkustel siidnööridel (esimene **õhuliin**). Vaatamata juhtme väga halvale juhtivusele läks katse imestamapanevalt korda; ilmselt oli nöör tänu Inglismaa kliimale piisavalt niiske. Oma katsete alusel võttis Gray esimesena kasutusele ainete jaotamise *juhtivateks ja mittejuhtivateks*. Kümme aastat hiljem (1739) andis teine inglise füüsik Jean Théophile Desaguliers (1683–1744) elektrit juhtivatele kehadele nime ***juht*** (ingl ***conductor***). Esimese **metall-(raud-)juhtmetega õhuliini** ehitas aastal 1744 saksa filosoofiaprofessor Andreas Gordon (1712–1751), esimese katselise (telegraafi-) **kaabelliini** aastal 1841 Peterburis Moritz Hermann Jacobi (vt jaotis **2.13**).

Elektriedastustehnikas kasutatakse nii painduvaid kui ka jäiki juhte. Esimeste hulka kuuluvad mitmesugused ***juhtmed*** ja ***kaablid***, teiste hulka ***latid***. Juhtmed ja latid võivad olla isoleerkattega (*isoleerjuhtmed* ja *-latid*) või ilma selleta (*paljasjuhtmed* ja *-latid*). Isoleerjuhtmed ja kaablid võivad olla *ühe-* või *mitmesoonelised* (sisaldada üht või mitut juhtivat, üksteisest isoleeritud ***soont***). Kaabli tunnuseks on hermeetiline ***mantel***, mis on valmistatud polümeermaterjalist (nt polüvinüülkloriidist) või metallist (nt alumiiniumist, varem aga enamasti pliist) ja mis kaitseb kaabli sooni väliskeskkonna kahjustava toime eest. Juhtide lihtsustatud liigitus nende painduvuse, isolatsiooni ja kasutusala järgi on esitatud joonisel **3.5.2**.

Olenevalt ristlõikest ja vajalikust painduvusest võib juhtmete ja kaablite soonte metallosa olla kas *massiivne* või koosneda *kiududest*; viimasel juhul eristatakse *jämeda-* ja *peenekiulisi* sooni.

Juhtidelt nõutakse

- head elektrijuhtivust,
- häid kontaktomadusi,
- isolatsiooni suurt elektrilist tugevust,
- piisavat mehaanilist tugevust,
- piisavat painduvust,



Joonis 3.5.2. Juhtide liigitus (lihtsustatult)

- pikaajalist keemilist stabiilsust,
- piisavat kuumuskindlust,
- piisavalt suurt soojusmahtuvust,
- kaitstust välistoimete eest,
- keskkonnasõbralikkust,
- käsitsemise lihtsust,
- odavust.

Juhtivmaterjalidest vastavad nendele nõuetele kõige paremini

- puhas (ilma mingite lisanditeta) vask,
- puhas alumiinium (töökindluse kaalutlustel alates ristlõikest 16 mm^2),
- õhuliinijuhtmeis – alumiiniumi ja terase kombinatsioonid.

Isoleermaterjalidest leiavad kõige sagedamini kasutamist

- polüeteen $[C_2H_4]_n$,
- polüvinüülkloriid (polükloroeteen) $[C_2H_3Cl]_n$, mille heade omaduste hulka kuulub *isekustuvus*, kuid mis sisaldab mürgist ning keskkonnaohtlikku kloori,
- sünteeskautšukid (sealhulgas eriti kuumuskindlad *ränikautšukid*).

Elektriedastusliine iseloomustatakse enamasti järgmiste põhinäitajatega:

- voolu liik (vahelduv- või alalisvool); sagedaimini on kasutusel kolmefaasiline vahelduvvool sagedusega 50 või 60 Hz;
- nimipinge, mis võib olla mõni volt kuni ligi 2 MV; paigaldiste elektrijuhistikes on enamasti kasutusel pinge 12 kuni 1000 V, madalpingevõrkudes 230 kuni 690 V, kõrgepingevõrkudes 3 kuni 1200 kV;
- edastatav võimsus, mis võib olla mõnest vatist mõne gigavatini;
- juhtide ristlõige (elektrivarustuspaigaldistes tavaliselt 1 mm^2 kuni 10 000 mm^2);
- liini pikkus (mõni meeter kuni mõni tuhat kilomeetrit),
- ehitusviis (õhu-, kaabel- või lattliin vm).

Elektrijuhistiku või -võrgu liinide **nimipingeks** U_n loetakse juhistikust või võrgust toidetavate elektritarvitite *faasidevahelist* (alalisvoolu puhul *poolustevahelist*) nimipinget. Kui ühefaasilisi tarviteid saab toita nii faasidevahelisel kui ka faasipingel (U_f), esitatakse juhistiku või võrgu nimipinge murruna U_{fn} / U_n, nt 230/400 V.

Kui nimipinge ei ole vahelduvvoolul üle 1000 V või alalisvoolul üle 1500 V, nimetatakse seda **madalpingeks**, vastupidisel juhul aga **kõrgepingeks**. Madalpingepiirkonnas eristatakse veel **väikepinget**, mis ei ole vahelduvvoolu korral üle 50 V, alalisvoolu korral aga mitte üle 120 V.

Väikepingetest on Eestis enim levinud **6**, **12**, **24**, **36** ja **48 V**, väikepinget ületavatest madalpingetest **230**, **400** ja (vähem) **690 V**, kõrgepingetest **6**, **10**, **15**, **20**, **35**, **110**, **220** ja **330 kV**. Pingetest 15 kV ja 220 kV on Eestis kavas loobuda.

Standardsete nimipingete 230 ja 400 V asemel on Eesti paljudes alajaamapiirkondades veel alles vanad, rahvusvahelistega ühtlustamata nimipinged 220 ja 380 V.

Juhte (ja mitmesooneliste juhtide sooni) liigitatakse nende otstarbe ja ülesande järgi

- ***tööjuhtideks*** (siia kuuluvad **faasi-** ja **neutraaljuhid**, kusjuures viimased võivad mõnedes võrkudes või liinides ka puududa);
- ***kaitsejuhtideks***, mis on vajalikud inimeste ohutuse tagamiseks;
- ***abijuhtideks***, mida kasutatakse nt info ja signaalide edastamiseks.

Tööjuhid võivad olla kõik maast isoleeritud, kuid väga sageli on üks neist (enamasti neutraaljuht) **maandatud**. Sellise nn ***talitlusmaandusega*** saavutatakse faasijuhtide ühtlasem pingejaotus maa suhtes, mis nt kõrgepingevõrkudes võimaldab oluliselt vähendada isolatsiooni maksumust.

Kaitsejuhid on ette nähtud selleks, et ühendada elektripaigaldise need osad, mis isolatsioonirikke korral võivad sattuda pinge alla (***pingealtid*** osad) töökindlalt maaga; sellega välditakse ohtliku pinge tekkimist nende osade ja maa vahel ning inimeste elektrilöögiohtu. Sellist maandust nimetatakse ***kaitsemaanduseks***. Vanemates, kuid Eestis veel vägagi laialt kasutusel olevates madalpingevõrkudes on kaitsejuht ühitatud neutraaljuhiga, uuemates võrkudes on aga kaitsejuht töökindluse ja häirekindluse huvides tööjuhtidest lahutatud.

Eesti madalpingevõrkudes on vastavalt eelnimetatud võimalustele kasutusel peaasjalikult kolm ***juhistikusüsteemi*** [3.3]:

- maandamata tööjuhtidega ja iga paigaldise juurde kuuluva kaitsemaandusega nn ***IT-süsteem*** (joonis **3.5.3**),
- maandatud neutraalpunktiga, ühitatud kaitse- ja neutraaljuhiga ning iga paigaldise juurde kuuluva kaitsemaandusega nn ***TN-C-süsteem*** (joonis **3.5.4**),
- maandatud neutraalpunktiga, eraldi kaitse- ja neutraaljuhiga ning iga paigaldise juurde kuuluva kaitsemaandusega nn ***TN-S-süsteem*** (joonis **3.5.5**).

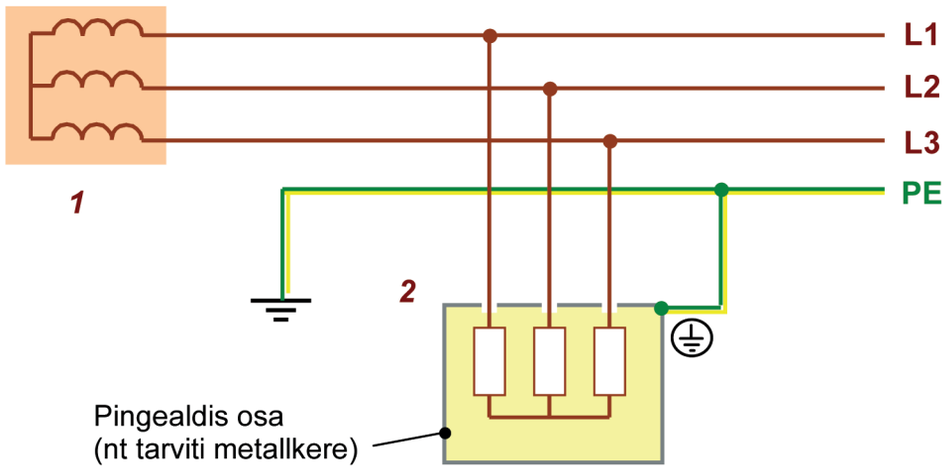
Juhistikusüsteemide rahvusvahelistes, prantsuse keelel põhinevates lühitähistes näitab esimene täht tööjuhtide vahekorda maaga (***I*** – *isolé*, 'isoleeritud', ***T*** – *terre*, 'maa'), teine täht aga kaitsejuhi ühendusviisi (***T*** – *terre*, 'maa', ***N*** – *neutre*, 'neutraal'). Lisatäht näitab kaitsejuhi kombineerimist neutraaljuhiga (***C*** – *combiné*, 'ühitatud') või omaette kaitsejuhi kasutamist (***S*** – *separé*, 'eraldatud'). Kaitsejuhi ühendamist maandatud neutraaliga nimetati varem *nullimiseks*.

Juhtide rahvusvahelised lühitähised joonistel **3.5.3**, **3.5.4** ja **3.5.5** tulenevad inglise keelest. Faasijuhte tähistatakse kujul ***L1***, ***L2*** ja ***L3*** (*live*, 'pingestatud'), neutraaljuhti tähega ***N*** (*neutral*), kaitsejuhti tähega ***P*** (*protection*, 'kaitse'), maandusjuhti tähega ***E*** (*earth*, 'maa'), kaitsemaandusjuhti tähtedega ***PE*** ja neutraaljuhiga ühitatud kaitsejuhti tähtedega ***PEN***. Ühefaasilistel seadmetel, kui need ei ole ette nähtud ühendamiseks mingi kindla faasiga, tähistatakse faasijuhte tähega ***L***. Et juhte saaks paigaldus-, remondi- jm töödel ka nende värvi järgi üksteisest selgesti eristada, on faasijuhtide isolatsioon pruun, must või hall, neutraaljuhi isolatsioon helesinine ja kaitsejuhi (sealhulgas ka PEN-juhi) isolatsioon kollaroheliselriibuline (kollase ja rohelise pindala suhtega ligikaudu 1:1). PEN-juht markeeritakse otstes helesinise lisamärgistusega. Ohutuse tagamise seisukohast loetakse eriti tähtsaks **kaitsejuhtide** õiget ja selget tähistamist. Kaitsejuhi ühendamiskoht pingealti osaga tähistatakse, nagu näidatud joonistel, *kaitsemaanduse sümboliga*.

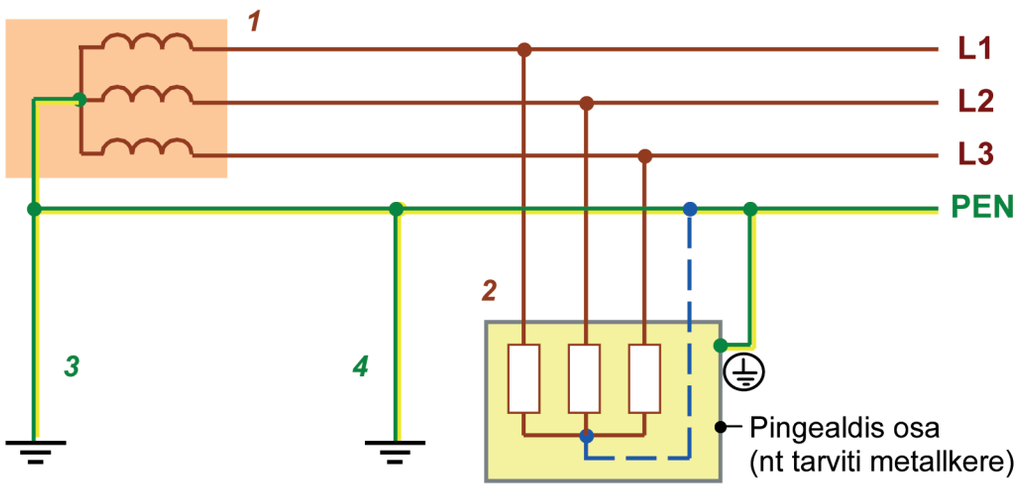
Varem on kasutatud ka teistsuguseid tähiseid nagu nt faasijuhtide tähised *A*, *B* ja *C* või *R*, *S* ja *T*, neutraal- ja kaitsejuhi tähis *0*. Seadmetes ja paigaldistes on maandamata neutraaljuhte varem tähistatud valge, maandatud neutraaljuhte ja kaitsemaandusjuhte aga musta tunnusvärviga.

IT-süsteemides ei too ühe faasi isolatsiooni rike maa suhtes kaasa mingit otsest ohtu inimestele ega seadmetele ega nõua seetõttu ka kohest väljalülitamist. Selle süsteemi kasutamisel on elektrivarustuse katkestused seega suhteliselt harvad ehk, nagu öeldakse, elektrivarustus on *töökindlam*. Seda süsteemi kasutatakse seetõttu vastutusrikastes paigaldistes nagu nt haiglates, raudtee- ja lennujaamades, infotöötlus- ja sidepaigaldistes jne. Süsteemi juurde kuulub ilmtingimata pidevalt talitlev isolatsioonitakistuse ja rikkevoolude järelevalve- ja mõõteaparatuur.

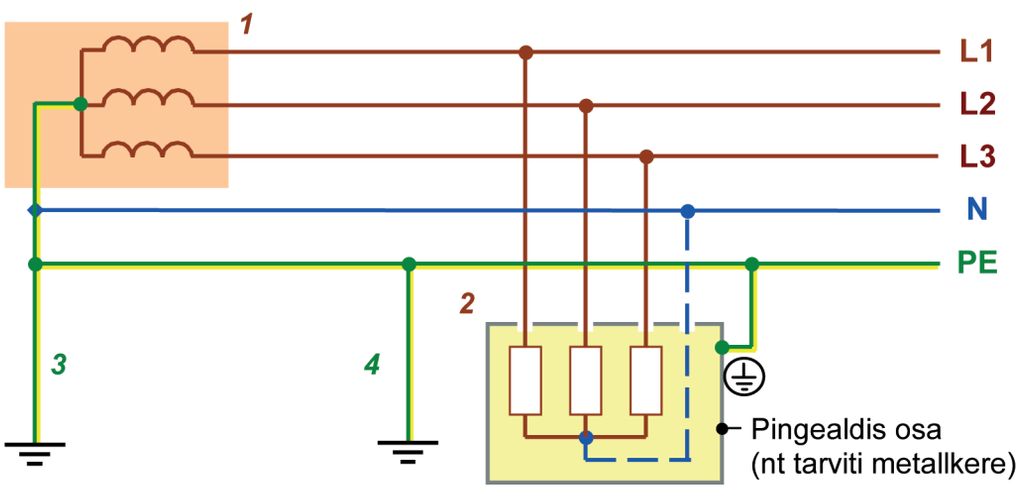
IT-elektriedastussüsteemi tuleb pidada vanimaks elektrienergia edastusviisiks, sest alates aastast 1873, mil prantsuse insener Hippolyte Fontaine (1833…1917) Viini rahvusvahelisel elektrotehnikanäitusel elektrienergia ülekannet generaatorilt mootorile 1 km pikkuste juhtmete kaudu demonstreeris, hakati pidama vajalikuks juhtmeid ja elektripaigaldisi maast hoolikalt isoleerida. Kaitsemaandusega täienes see süsteem Saksamaa Elektrotehnikute Liidu ettepanekul aastal 1898. Eestis on IT-võrgud nimipingega 220 V kasutusel mõne linna (sealhulgas Tallinna) vanemates osades, kuid vananenud viisil – ilma eelnimetatud kontrolliaparatuurita ja enamasti ilma tarbijapaigaldiste kaitsemaandusteta. Järkjärgult on nad kavas asendada TN-C / TN-S- või TN-S-võrkudega.



Joonis 3.5.3. Maast täielikult isoleeritud IT-juhistik. *1* võrku toitva trafo sekundaarmähis, *2* elektritarviti. Kaitsejuht PE on paigaldise kõigi elektritarvitite jaoks enamasti ühine, kuid tarviteid võidakse maandada ka omaette või rühmadena



Joonis 3.5.4. TN-C-juhistik. *1* võrku toitva trafo sekundaarmähis, *2* elektritarviti, *3* võrgu talitlusmaandus, *4* paigaldisemaandus



Joonis 3.5.5. TN-S-juhistik. *1* võrku toitva trafo sekundaarmähis, *2* elektritarviti, *3* võrgu talitlusmaandus, *4* paigaldisemaandus

TN-süsteemides võivad seadmete ja paigaldiste pingealtid osad isolatsioonirikke (nt *kereühenduse*) korral sattuda ohtliku pinge alla, mistõttu kaitseaparaadid (sulavkaitsmed või kaitselülitid) peavad riknenud seadme või juhistikuosa, et tagada inimeste kaitset elektrilöögiohu eest, kiiresti automaatselt välja lülitama. Väljalülitumised on seega põhimõtteliselt sagedamad kui IT-süsteemis, kuid langeb ära isolatsiooni seisundi pideva kontrolli vajadus, mis teeb TN-süsteemi lihtsamaks ja odavamaks.

TN-C-süsteemis, mis põhineb Saksamaa elektrotehnikakontserni AEG (*Allgemeine Elektricitäts-Gesellschaft*) ettepanekul aastast 1913, annab neutraal- ja kaitsejuhi ühitamine teatavat kokkuhoidu, kuid kaasneb puudustega, mis võivad osutuda olulisteks ning viimasel ajal enamasti vastuvõtmatuteks. Tähtsaimad on järgmised kaks puudust:

1) kuna PEN-juht on elektritarvitite kaudu galvaaniliselt ühendatud faasijuhtidega, toob selle katkemine kaasa ohtliku pingetõusu juhi sellel osal, mis ei ole enam maaga ühendatud, ning ohtliku pinge leviku pingealdistele osadele;

2) kuna neutraaljuhis kulgeb alati mingi vool, mis on tingitud faaside ebaühtlasest koormusest, ei ole PEN-juhi pinge maa suhtes null, vaid mõnevõrra (enamasti mõne voldi võrra) kõrgem ja juhi eri osades erisugune; selline pingeerinevus võib olla ohtlik PEN-juhi kaudu maandatud ja omavahel infovahetusliinide kaudu ühendatud mikroelektroonikaseadmeile (nt arvuteile).

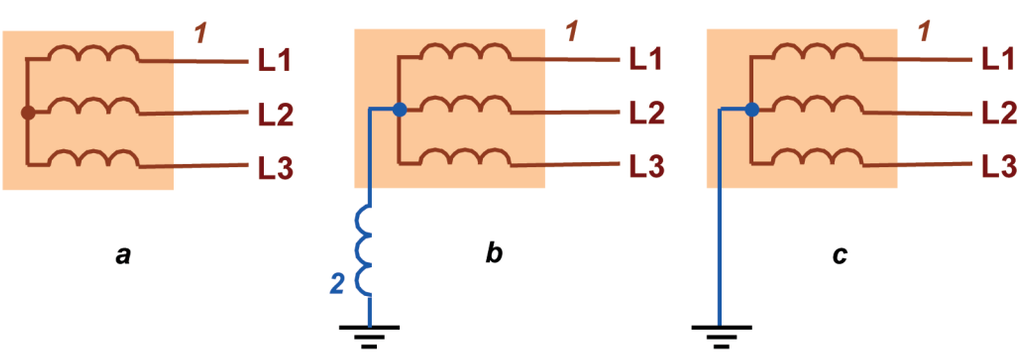
TN-C-juhistikku ei saagi nüüdisajal enam kasutada ehitiste sisepaigaldistes, vaid ainult ehitistevälistes madalpingelistes jaotusvõrkudes. Ehitist toitva liini alguses või hiljemalt ehitise elektrisisendis hargneb PEN-juht omaette kaitse- ja neutraaljuhiks (PE- ja N-juhiks), hargnemispunkt aga ühendatakse paigaldisemaandusega. Teiste sõnadega, hiljemalt ehitise sisendis minnakse TN-C-süsteemilt üle TN-S-süsteemile.

Eestis ehitati aastail 1945 kuni 1995 peaasjalikult TN-C-juhistikke nimipingega 220/380 V; osaliselt on nad üle viidud uuele standardnimipingele 230/400 V. Lähiaastail on ette nähtud see üleminek (enamasti koos üleminekuga TN-S-süsteemile) lõpule viia.

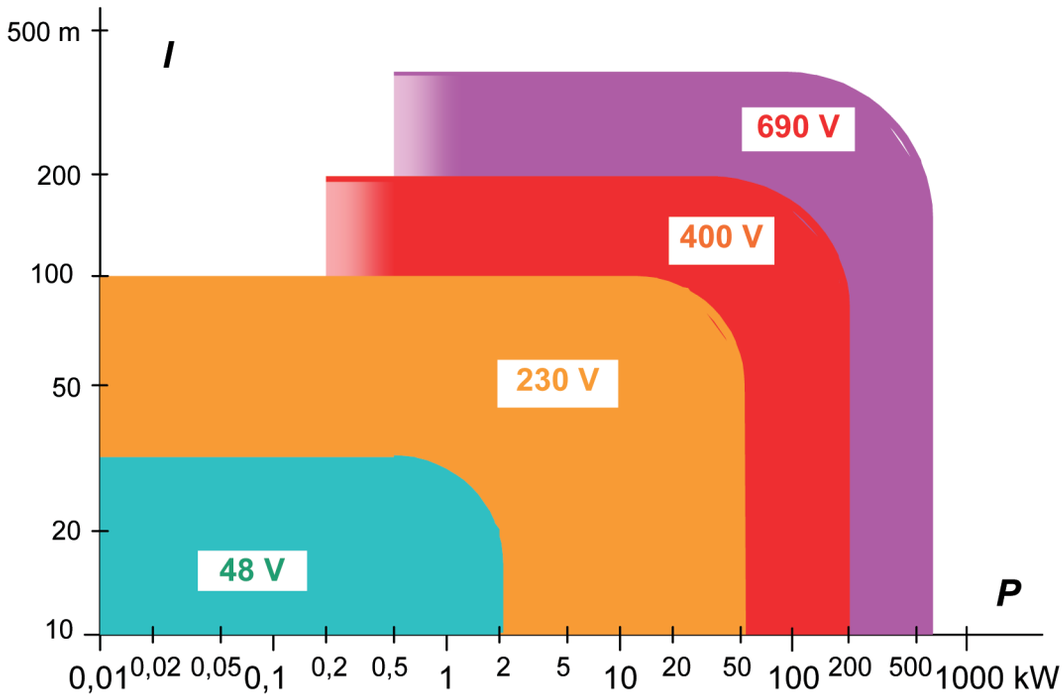
TN-S-süsteemis, mis tuli kasutusele 1930ndail aastail, ei ole kaitsejuht galvaanilises ühenduses tööjuhtidega ning on normaalolukorras *vooluvaba*. See tagab nii inimeste tõõkindlama kaitse elektrilöögiohu eest kui ka mikroelektronseadmete nõuetekohase talitluse. Käesoleval ajal toimub Eestis ja teistes Ida-Euroopa maades ehitiste TN-C-juhistike järkjärguline ümberehitamine TN-S-juhistikeks. Uutes ehitistes TN-C-juhistikke enam ei kasutata.

Kõrgepingevõrkudes pingega kuni 35 kV on toiteallika neutraalpunkt lihtsaimal juhtumil maandamata (joonis **3.5.6,*a***). Ühefaasilisel maaühendusel on rikkevooluahel, analoogiliselt madalpingeliste IT-võrkudega, mahtuvusliku iseloomuga; tekkiv maaühendusvool on suhteliselt väike ega nõua kohest väljalülitamist. Kui võrgu ulatus ja seega ka faasijuhtide kogumahtuvus maa suhtes on sedavõrd suur, et maaühendusvool ületab teatava enimalt lubatava väärtuse, võib neutraalpunkti maandada üle induktiivtakisti (*maandusreaktori*) (joonis **3.5.6,*b***). Induktiivsuse saab seejuures valida selliselt, et maaühenduskohas mahtuvuslik ja induktiivne voolukomponent, mis on teineteisest 180° võrra nihutatud, teineteist kompenseerivad ja maaühendusvool väheneb peaaegu nullini. Sellist nähtust nimetatakse vooluresonantsiks ja sellist maandamisviisi seetõttu ka *resonantsmaandamiseks*. Mõlemal vaadeldud juhtumil võib ühe faasi maaühendusel teiste faaside pinge maa suhtes tõusta faasidevahelise pingeni ja seetõttu tuleb faasijuhtide ja maa vaheline isolatsioon valida selle pinge järgi.

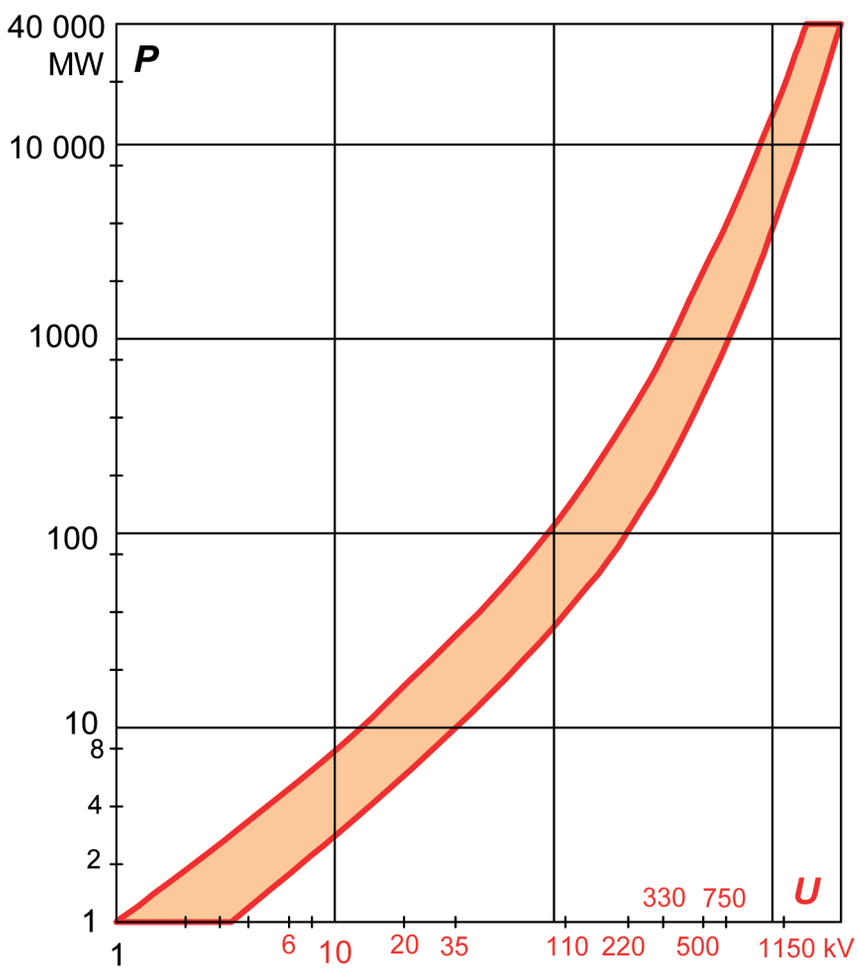
Pingel 110 kV ja üle selle on toiteallika neutraalpunkt otseselt (*jäigalt*) maandatud (joonis **3.5.6,*c***), mistõttu faasijuhtide pinge maa suhtes ei saa tõus-



Joonis 3.5.6. Kõrgepingevõrk maandamata (*a*), resonantsmaandatud (*b*) ja jäigalt maandatud (*c*) neutraaliga.
***1* võrku toitva trafo sekundaarmähis, *2* maandusreaktor**



Joonis 3.5.7. Madalpingelise elektriliini vajaliku nimipinge sõltuvus liini pikkusest ja edastatavast võimsusest (väga ligikaudselt)



Joonis 3.5.8. Kolmefaasiliste kõrgepingeliinide edastatava võimsuse olenevus nimipingest (ligikaudselt)

ta üle faasipinge ja elektriedastusliinide isolatsioon tuleb vastavalt odavam.

Nii madal- kui ka kõrgepingeliinides ja -võrkudes valitakse nimipinge seda suurem, mida suurem on elektrienergia edastuskaugus ja edastatav võimsus. Joonisel **3.5.7** on väga ligikaudselt näidatud standardsete madalpingete kasutusala liini pikkuse ja võimsuse järgi. Kui liinid on pikemad kui joonisel näidatud, võivad neis tekkida lubamatult suured pinge- ja võimsuskaod.

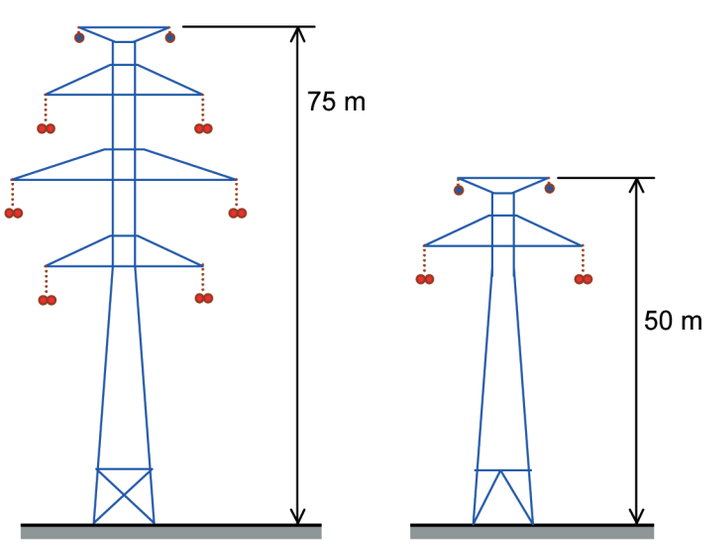
Veel ligikaudsemalt saab liini vajalikku nimipinget kindlaks teha *rusikavalemitega*

$$U_{n.vaj} \geq 1l \quad \text{ja} \quad U_{n.vaj} \geq 1P$$

$U_{n.vaj}$ vajalik nimipinge V
l liini pikkus
P edastatav võimsus kW

Samad valemid kehtivad ka kõrgepingel, kui võtta pinge ühikuks kV, pikkuse ühikuks km ja võimsuse ühikuks MW.

Joonis 3.5.9. Elektrienergia edastamine alalisvoolul. *1* alaldi, *2* alalisvoolu-kõrgepingeliin, *3* vaheldi



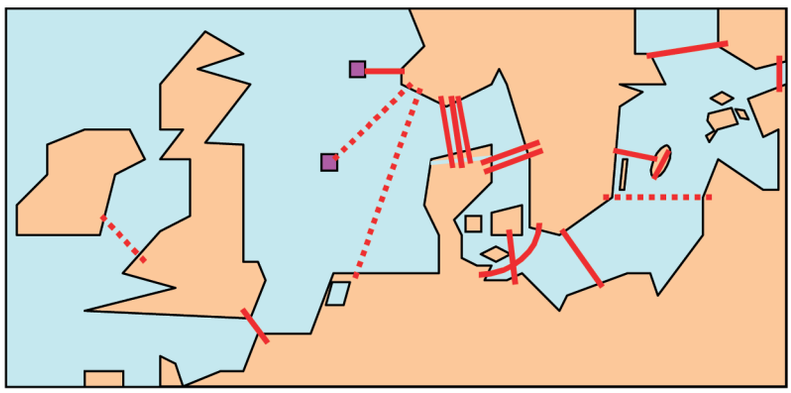
Joonis 3.5.10. Vahelduv- ja alalisvooluliini võrdlus pingel 400 kV, edastusvõimsusel 1400 MW. Vasakul vahelduvvoolu-, paremal alalisvooluõhuliini teras-kandemast. Mastide sõrestikke ei ole joonisel näidatud; mõlemad liinid on varustatud kahe piksekaitsetrossiga

Tegelikult valitakse elektriliinide, -juhistike ja -võrkude pinged ja muud tunnussuurused tehnilis-majanduslike võrdlusarvutustega, võttes arvesse nii investeeringuid kui ka käidukulusid, koormuse ajalist ebaühtlust ja koormuse kasvu tulevikus. Kõrgepingeliinid on tegelikult keskmiselt ligikaudu kolm korda lühemad kui nad ülalesitatud valemite järgi olla võiksid, tegelik edastatav võimsus olenevalt nimipingest on aga esitatud joonisel **3.5.8**.

Kõrgepingelise vahelduvvooluedastuse kiire areng algas pärast mitmefaasilise süsteemi leiutamist USAs Nikola Tesla (1856–1943) poolt aastal 1888 ja Saksamaal Michael von Dolivo-Dobrowolsky (vt jaotised **2.12** ja **2.13**) poolt aastal 1889. Esimese kolmefaasilise kaugedastusliini Lauffen–Frankfurt pingega 15 kV ja pikkusega 175 km ehitasid aastal 1891 Frankfurdi elektrotehnikanäituse puhuks Müncheni eraprojekteerimisbüroo omanik Oskar von Miller (1855–1934) ja M. Dolivo-Dobrowolsky. Aastal 1906 rajati USAs esimene 110-kV liin ja aastal 1953 Rootsis esimene 380-kV liin. Aastal 1967 ehitati Venemaal esimene katseline liin pingega 750 kV (Konakovo–Moskva, 90 km) ja aastal 1986 Kasahstanis liin pingega 1150 kV (Ekibastuz–Kustanai, 900 km). Eestis tuli pinge 110 kV kasutusele aastal 1951 ja pinge 330 kV aastal 1962.

Kui on vaja edastada suurt elektrilist võimsust (nt mõni GW) suurele kaugusele (nt 1000 km või enam), võidakse kolmefaasiliste kõrgepingeliinide asemel kasutada **alalisvoolu**-kõrgepingeliine vastavalt joonisel **3.5.9** esitatud põhimõttele.

Alalisvoolu kasutamisel on nii õhu- kui ka kaabelliinid lihtsamad ja odavamad kui kolmefaasilised vahelduvvooluliinid (vt nt joonis **3.5.10**), kuid nad nõuavad mõlemas otsas võimsaid ning kalleid türistor- või jõutransistormuundureid. Seetõttu oli kogu maailmas 2006. aasta lõpus ainult ligikaudu 60 kõrgepingelist alalisvooluliini. Pikim neist ning maailma pikim elektriliin üldse (1700 km) valmis aastal 1979 ja kulgeb Kongo Demokraatlikus Vabariigis Inga hüdroelektrijaama (Kongo jõel) ja Kolwezi tööstuslinna vahel; liini pinge on ±500 kV ja edastatav võimsus 560 MW. Aastal 1985 oleks pidanud NSV Liidus valmima 3000 km pikkune liin Ekibastuz–Tambov (Kasahstan–Venemaa, ±750 kV, 6000 MW), kuid selle ehitus on jäänud pooleli. Viimasel ajal on pooljuhtmuundurid läinud odavamaks ja alalisvooluedastust on hakatud kasutama ka väiksematel võimsustel. Esimesena maailmas hakkas elektrotehnikakontsern ABB aastal 1997 ehitama *kergeid* kõrgepinge-alalisvooluliine (*HVDC Light*) edastusvõim-



olemasolev liin, ehitamisel või kavas olev liin,
gaasi- või naftapuurplatvorm

Joonis 3.5.11. Alalisvoolu-merekaabelliinid Läänemeres, Taani väinades ja Põhjameres 2006. aasta lõpus

susega mõnikümmend kuni mõnisada megavatti ja pikkusega kuni ligikaudu 100 km. Esimese taolise, aastal 1997 valminud katselise liini Hellsjön–Grängesberg (Kesk-Rootsis) võimsus oli isegi ainult 3 MW, nimipinge ±10 kV ja pikkus 10 km.

Esimese kõrgepingelise alalisvooluliini (Miesbach–München, 57 km, 1,3 kV, 0,8 kW) lülitas talitlusse 25. septembril 1882 prantsuse mäeinsener, elektrienergia kaugedastuse alusepanija Marcel Deprez (1843–1918). Joonisel **3.5.9** kujutatud skeemi (elavhõbemuunduritega) rakendati esmakordselt aastal 1934 firma *General Electric* katseliinil Schenectadys (USA). Esimest, samuti elavhõbemuunduritega tööstuslikku liini (Dessau–Berliin, ±200 kV, 60 MW, 100 km) hakati aastal 1943 rajama Saksamaal, kuid sõja tõttu ei saanud see valmis; pärast sõda seadmed demonteeriti, viidi *reparatsioonide korras* NSV Liitu ja paigaldati liinile Kašira–Moskva (200 kV, 30 MW, 112 km), mis võeti käitu aastal 1950 ja lammutati 1980ndail aastail. Aastail 1950–1953 töötas Rootsi elektrotehnikakontserni *ASEA* (*Allmänna Svenska Elektriska Aktiebolaget*) teadur August Uno Lamm (1904–1989) välja kõrgepingeliste alalisvooluliinide jaoks kõrgtöökindlad elavhõbemuundurid ja aastal 1954 valmis esimene alalisvoolu-merekaabelliin (Rootsi mandrilt Gotlandile, 100 kV, 30 MW). Aastal 1972 algas muundurites türistoride ja aastal 2000 isoleeritud tüürelektroodiga bipolaartransistoride (*insulated gate bipolar transistor, IGBT*) kasutamine. 4. detsembril 2006 pingestati Eesti ja Soome vaheline kahest ühesoonelisest kaablist koosnev IGBT-muunduritega *kerge* alalisvoolu-merekaabelliin Harku–Espoo (350 MW, ±150 kV); liini pikkus koos mõlema merevälise osaga on 105 km. Liini regulaarne talitlus algas 4. jaanuaril 2007 [3.4].

Alalisvooluliine kasutatakse ka selleks, et ühendada omavahel *mittesünkroonselt* talitlevaid energiasüsteeme. Sellisel viisil on nt Norra ja Rootsi energiasüsteemid ühendatud Saksamaa, Taani ja Poola energiasüsteemidega ning Soome energiasüsteem Eesti omaga (joonis **3.5.11**). Samal otstarbel on kasutusel ka naaber-energiasüsteeme ühendavad alalisvoolu-vahelüliga sagedusmuundurid (nt Viiburis Venemaa ja Soome energiasüsteemi vahel).

Pärast seda, kui IBM Zürichi uurimislaboratooriumi (Rüschlikon, Šveits) füüsikateadlased Karl Alexander Müller (*1927) ja Johannes Georg Bednorz (*1950) aprillis 1986 avastasid *kõrgetemperatuurilise* (temperatuuril –200 °C kuni –110 °C saavutatava) ülijuhtivuse, hakati uurima selle reaalse rakendamise võimalusi ka elektriedastusel. Esimene sellel nähtusel põhinev kaabelliin (30 kV, 2000 A, 30 m), milles kasutati vedela lämmastikuga temperatuuril –196 °C jahutatavat keraamilist Bi-Sr-Ca-Cu-O-fooliumi, võeti katselisse käitu aastal 2001 Kopenhaagenis. Sama aasta lõpus paigaldati Detroidis (USA) 120 m pikkune kaabelliin pingega 24 kV, milles juhtiva materjali kogus oli ainult 320 kg; sama edastusvõimsusega vaskkaabli korral oleks vase kogus olnud 4,4 tonni. Ülijuhtivate liinide laiemat rakendamist on aga seni takistanud nende väga kõrge hind.

4 Energia salvestamine

4.1 Üldmõisted 118

4.2 Mehaanilise energia salvestamine 120

4.3 Hüdroenergia salvestamine 124

4.4 Soojuse salvestamine 126

4.5 Elektrienergia salvestamine 127

4.6 Keemilise energia salvestamine 134

4.7 Kokkuvõte 135

4 ENERGIA SALVESTAMINE

4.1 ÜLDMÕISTED

Energia salvestamise all mõeldakse mingi energialiigi siirdamist mingisse seadisesse, seadmesse, paigaldisse või rajatisse (***energiasalvestisse***), et seda sealt vajalikul ajal hiljem samal kujul või muundatult tagasi saada.

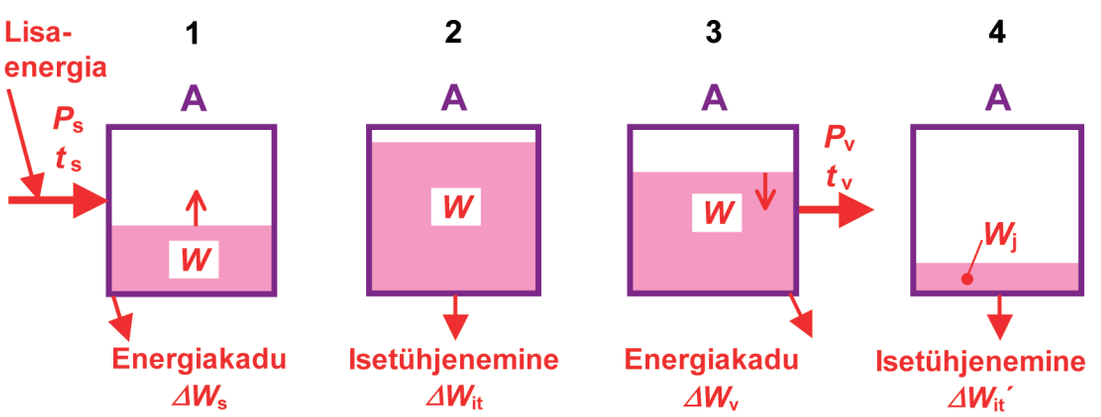
Energia sisestamiseks energiasalvestisse on mõnikord tarvis **lisaenergiat** ja salvestamisprotsessis võivad tihti tekkida **energiakaod**. Pärast energia sisestamist võib salvesti jääda rahuolekusse, kusjuures ka selles olekus võib osa energiat *isetühjenemise* või muude taoliste nähtuste tagajärjel kaduma minna. Ka energia väljastamisel (salvesti *tühjendamisel*) võivad tekkida energiakaod ja pealegi ei pruugi salvestist kätte saada kogu selles salvestunud energiat. Mõnikord on salvesti ehitus ja kasutamispõhimõte sellised, et salvestisse peabki jääma teatav jääkenergia. Salvesti olekud energia sisestamisel, rahuolekus, energia väljastamisel ja pärast väljastamist on skemaatiliselt esitatud joonisel **4.1.1**.

Energia *salvestamine* on sihipärane tegevus. Energia võib aga *salvestuda* ka inimtahtest ja -tegevusest sõltumatult, nii looduses kui ka tehisseadmetes toimuvates füüsikalistes protsessides. Näitena on joonisel **4.1.2** esitatud mõned energia salvestumise viisid looduses. Peale nende tuleb aga nimetada ka

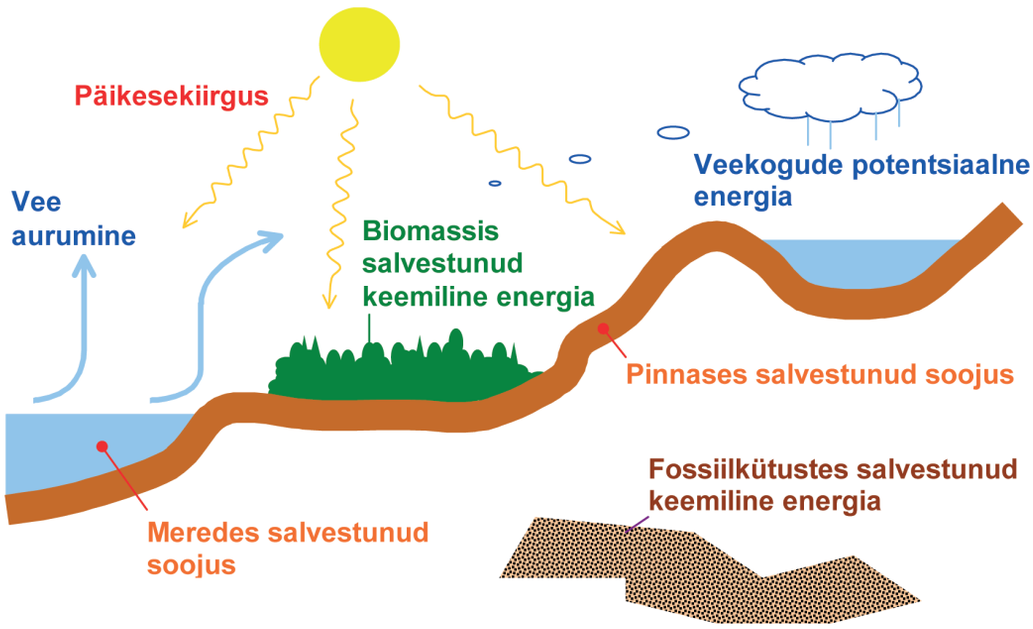
- Maa kuumas vedelas sisemuses salvestunud väga suurt kogust soojust,
- Maa tiirlemise ja pöörlemise kineetilist energiat,
- tuule, veevoolu ja liikuvate esemete kineetilist energiat,
- elusolendites toitumise teel salvestatavat keemilist energiat.

Energia **tehislikul** salvestamisel võib eesmärgiks olla

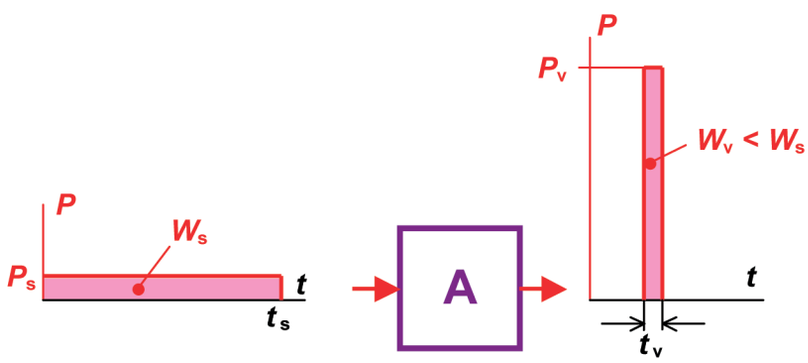
- energiavaru loomine (enamasti kütusevaru kujul) nt energiakandjate vaheajalise saamise korral, energiatarnete ajutise katkemise või kriisiolukordade puhuks jms,
- suure lühiajalise võimsuse saavutamine piiratud võimsusega toiteallikate korral nt välklampide või punktkeevituse kasutamisel (joonis **4.1.3**),
- välistest toiteallikatest sõltumatu energiavarustuse saavutamine nt sõidukites, kantavates ja liikuvates seadmetes (joonis **4.1.4**),
- energiaallika muutliku koormuse ühtlustamine nt kolbmehhanismides, suruõhutööriistade kasutamisel, energiasüsteemide ööpäevase koormusgraafiku liigse ebaühtluse korral (joonis **4.1.5**) jms.



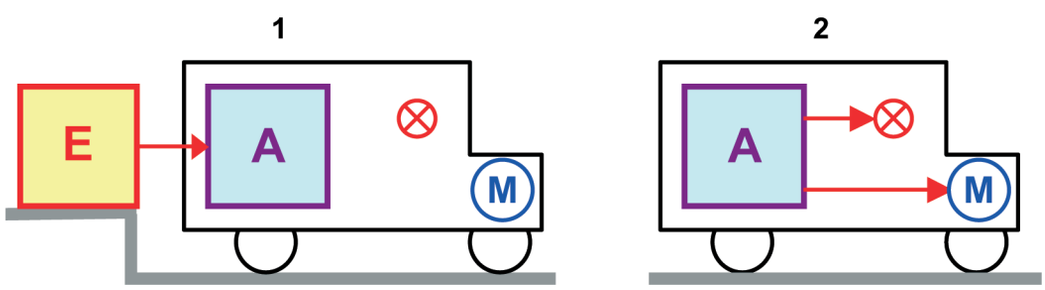
Joonis 4.1.1. Energiasalvesti (A) olekuviise (lihtsustatult).
1 **energia sisestamine,** ***2*** **rahuolek,** ***3*** **energia väljastamine,** ***4*** **tühjendatud olek.** P_s **sisestusvõimsus,** P_s **väljastusvõimsus,** t_s **sisestuse kestus,** t_v **väljastuse kestus,** W **salvestunud energia,** W_j **jääkenergia,** ΔW_s **energiakadu energia sisestamisel,** ΔW_v **energiakadu energia väljastamisel,** ΔW_{it} **energiakadu isetühjenemise tõttu**



Joonis 4.1.2. Näiteid energia salvestumisest looduses



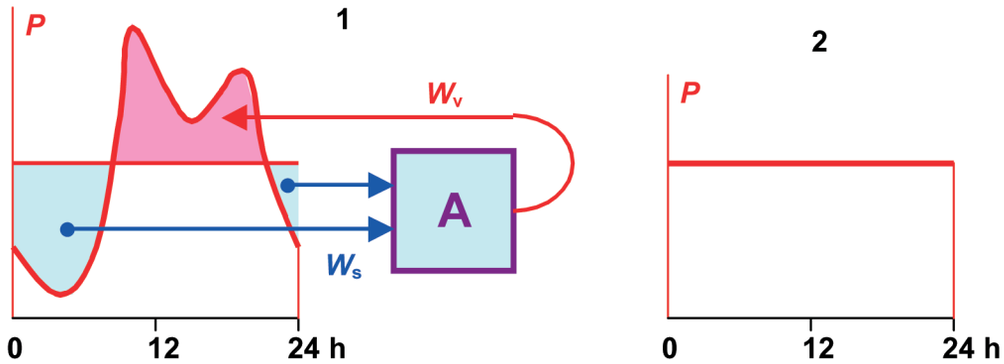
Joonis 4.1.3. Energiasalvesti (*A*) kasutamine tugeva energiaimpulsi saamise eesmärgil



Joonis 4.1.4. Energiasalvesti kasutamine liikuvas energiatarvitis (näide).
***1* salvesti laadimine energiaallikast (*E*), *2* salvestatud energia kasutamine**

Energiasalvesteid iseloomustatakse enamasti

- salvestatava energia liigiga (elektrienergia, soojus, mehaaniline energia, keemiline energia jm),
- salvestatava energia kogusega,
- sisend- ja väljundvõimsusega,
- energia sisestamise ja väljastamise kestusega,
- salvestamise kasuteguriga $\eta_P = W_v / W_s$, kus W_v on salvestist väljastatav, W_s aga salvestisse sisestatav energia,
- salvestusvõimega salvesti massi- või ruumalaühiku kohta (*erisalvestusvõimega*),
- salvesti maksumuse ja erimaksumusega,
- salvestist saadava energia maksumusega energiaühiku kohta.



Joonis 4.1.5. ***1*** **energiasüsteemi ööpäevase koormusgraafiku ühtlustamine öise vaba võimsuse kasutamisel saadava energia W_s salvestamisega ning päevaste koormustippude katmisega salvestist saadava energia W_v abil.** ***2*** **ideaaljuhtumil saadav ühtlane koormusgraafik**

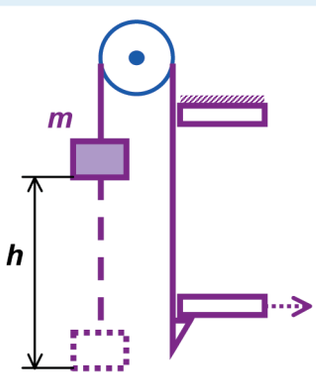
4.2 MEHAANILISE ENERGIA SALVESTAMINE

Nagu järeldub juba jaotises **3.3** öeldust, tähendab igasuguse mehaanilise tööriista käsitsemine mitte üksi mehaanilise energia edastamist inimese lihastelt tööriista kaudu töödeldavale esemele, vaid enne edastamist ka potentsiaalse ja kineetilise energia salvestamist tööriistasse. Seega õppis inimene mehaanilist energiat nii salvestama kui ka edastama oma esimeste primitiivsete löögiriistadega (joonis **3.3.1**) umbes 3 miljoni aasta eest.

Löögiriistas (kivis, vasaras, kirves vms) löögihetkeks salvestunud kineetilise energia kogus massiühiku kohta (*erienergia*) on seda suurem, mida suurema lõppkiiruse inimene on võimeline sellele andma ja avaldub äärmiselt lihtsa valemiga

$$w = \frac{v^2}{2} \quad \left(= \frac{mv^2}{2} : m\right)$$

w erienergia J/kg
v kiirus m/s



Joonis 4.2.1. Raskussalvesti põhimõte

Kui eeldada, et löögiriista lõppkiirus v = 1…10 m/s, saame erienergia võimaliku väärtustevahemiku sel juhtumil 0,5…50 J/kg ehk ligikaudu 0,14…14 mWh/kg.

Samasuguse erivõimsuse võib inimene anda ka viskeriistadele (odadele, bumerangidele jms), mida ta õppis kasutama umbes 1 miljoni aasta eest. Nüüdisaja tippsportlased on võimelised aga ka rohkemaks ja näiteks odaviskel võivad nad anda odale algkiiruse ligikaudu 30 m/s, mis tähendab erienergiat ligikaudu 125 mWh/kg.

Väga lihtne on potentsiaalse energia salvestamine **raskussalvestites** (joonis **4.2.1**), mis võivad kuuluda mitmesuguste vabal langemisel põhinevate löögimehhanismide (nt *rammide*) ja raskusajamite (nt pendel-seinakellade, varem ka mõnede kõrgepingeliste võimsuslülitite ajamite jms) koosseisu.

Raskussalvestis salvestatud energia avaldub lihtsa valemiga

$$W = m\,g\,h$$

W salvestatud energia J
m energiat salvestava keha (raskuse) mass kg
g raskuskiirendus m/s^2 (Maa pinnal g = 9,81 m/s^2)
h raskuse tõstekõrgus m

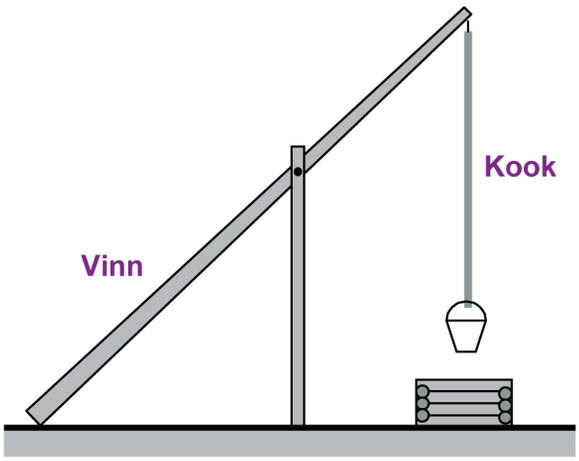
Massiühiku kohta salvestatud energia on seega

$$w = W / m = g\,h$$

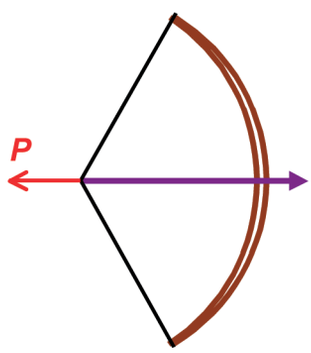
Tõstekõrgus h on enamasti 0,1 … 10 m ja seega võib tavaliselt saavutada erienergia
$w \approx 1 \ldots 100$ J/kg ehk 0,3…30 mWh/kg.

Esimeseks inimese poolt kasutatavaks raskussalvestiks võib lugeda kättevõetavat ja seejärel ülestõstetavat kivi. Raskussalvestil põhines ka soome-ugrilaste vähemalt umbes 5000 aastat tagasi leiutatud vinnkaev (joonis **4.2.2**), milles vinna raskus oli parajasti nii suur, et vett täis ämber ise kaevust üles tõusis.

Vedrusalvestis salvestub energia vedru elastsel deformatsioonil ja vabaneb, kui vedru tagastub oma algkujusse. Seda nähtust pidi inimene märkama juba oma arengu alguses, sest vedrudena (nimelt *paindvedrudena*) toimisid tuule käes või inimjõu rakendamisel puud ja puuoksad. Nüüdisinimese eellane, kes ligikaudu 50 000 aasta eest pidi olema tõusnud järsult kõrgemale intellektuaalsele tasemele (vt jaotis **1.4**), jõudis esimese tehisvedru – **vibu** – ja selle abil lastavate noolte valmistamiseni siiski aga alles ligikaudu 25 000 või 30 000 aasta eest. Vanimad sellest ajast pärinevad kvartsist ja luust nooleotsad on leitud praeguse Sahara alalt, mis siis oli tõenäoliselt metsade ja roheliste lagendike all. Vibu (joonis **4.2.3**) kasutamine arendas inimese intellekti veelgi, sest märgi tabamiseks tuli vibu õigesti pingutada ja noolt, arvestades märgi kaugust, noole tegelikku trajektoori, tuule mõju, märgi liikumist jms, õigesti sihtida. Vibu on ühtlasi *energiamuundur*, sest tema elastsusenergia muundub noole kineetiliseks energiaks. Nool toimib *energiakandjana* ja viib temas salvestatud energia sihtmärgini.

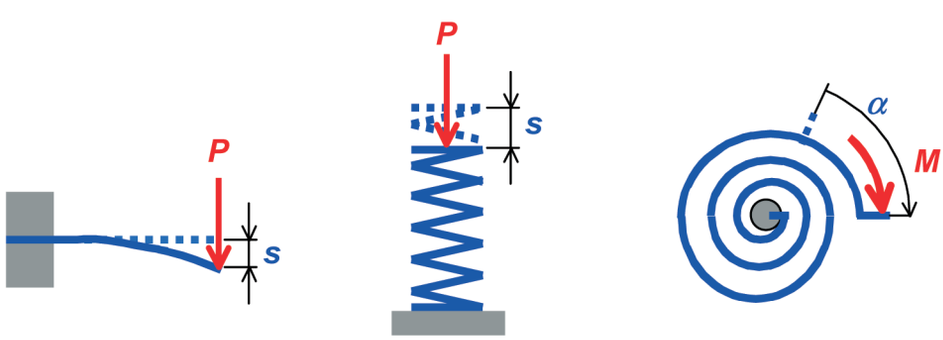


Joonis 4.2.2. Soome-ugrilaste vinnkaev



Joonis 4.2.3. Vibu ja noole kasutuspõhimõte.
***P* vinnastamiseks vajalik jõud**

Vibu leiutamise ajal arvatakse inimese aju olevat juba sedavõrd arenenud, et ta oskas algeliselt rääkida, teha vahet suurema ja väiksema koguse vahel ja tõenäoliselt tundis juba arvusid 1, 2 ja 3. Erinevalt teistest, vähem arenenud ja hiljem hääbunud inimliikidest (nt Euroopa neandertallasest) oli tal tekkinud *sümboolne mõtlemine* ja ilumeel – ta tegi endale kaelaehteid ja oskas end kunstis (kaljumaalingutes, väikeskulptuurides) ja muusikas väljendada (vanim leitud muusikariist – luigeluust flööt – on valmistatud 35 000 aastat tagasi). Loodusjõudusid hakkas ta käsitama kui kõrgemate olevuste – haldjate ja jumalate – tegevuse avaldust.



Joonis 4.2.4. Vedrude ehitusviise. Vasakul paind- (nt leht-) vedru, keskel kruvijooneline, paremal spiraalvedru.
***P* toimiv jõud, *M* toimiv pöördemoment, *s* joondeformatsioon, α nurkdeformatsioon**

Vibu tugevusarvutus näitab, et näiteks tammepuust 1,6 m pikkusesse vibusse, mille mass on 1,5-kordse tugevusvaru korral ligikaudu 0,5 kg, võib tugev mees, kui ta vinnastamisel arendab jõudu 300 N, salvestada ligikaudu 30 J energiat. Salvestusvõime massiühiku kohta on seega ligikaudu 60 J/kg ehk 17 mWh/kg. Samasse suurusjärku võib ulatuda ka mitmesuguste nüüdistehnikas kasutatavate vedrude (joonis **4.2.4**) salvestusvõime.

Vedru deformatsiooni saab väljendada valemiga

$$s = \frac{P}{c}$$

s vedru deformatsioon m
P vedrule toimiv jõud N
c vedru jäikus N/m

Kui deformeerimise alguses on jõud võrdne nulliga, on vedrus salvestatud energia

$$W = \frac{Ps}{2} = \frac{cs^2}{2}$$

W salvestatud energia J
P vedrule toimiv jõud N
c vedru jäikus N/m
s vedru deformatsioon m

Spiraalvedru korral tuleb toimiv jõud neis valemeis asendada toimiva momendiga ja joondeformatsioon nurkdeformatsiooniga.

Vedrud valmistatakse enamasti eriterasest, kuid kasutatakse ka teisi metalle ja sulameid. Kui võrrelda metall-lehtvedru eelpool vaadeldud vibuga, võib kindlaks teha, et selle mõõtmed on küll väiksemad, kuid mass suurem, mistõttu selle salvestusvõime on enamasti piirides 10…30 J/kg ehk 3…10 mWh/kg. Samasugune salvestusvõime iseloomustab ka teistsuguse ehitusega vedrusid.

Vedrusid kasutatakse laialdaselt löök- ja muudes kiiretoimelistes mehhanismides (sealhulgas elektriaparaatide väljalülitamisseadistes), löögi- ja tõukeamortisaatorites, võnkemehhanismides ja vedruajamites. Oma lihtsuse ja odavuse tõttu sobivad nad mõnikord ka väikese võimsusega elektrigeneraatorite käitamiseks (nt väliolukorras kasutamiseks ette nähtud sideaparaatides, raadio- ja televisioonivastuvõtjates).

Üleskeeratavaid vedruajameid hakati kõigepealt kasutama kantavates kellades, mis väidetavasti tulid kasutusele Itaalias aastal 1410. Umbes aastal 1500 projekteeris Leonardo da Vinci spiraalvedruajamiga vankri, mis tema jooniste järgi ehitati Firenze ajaloo- ja teadusmuuseumis aastal 2004 valmis, kusjuures see osutus toimivaks. Seega tuleb Leonardo da Vincit lugeda maailma esimese sisseehitatud energiaallikal põhineva iseliikuva sõiduki leiutajaks.

Võrreldes muude salvestusvõimalustega on raskus- ja vedrusalvestite kasutegur küll kõrge (ligi 100 %), kuid erisalvestusvõime suhteliselt väike. Hoopis tõhusamalt saab mehaanilist energiat salvestada hoorattas (joonis **4.2.5**).

Pöörlevas hoorattas salvestunud energia on määratud valemiga

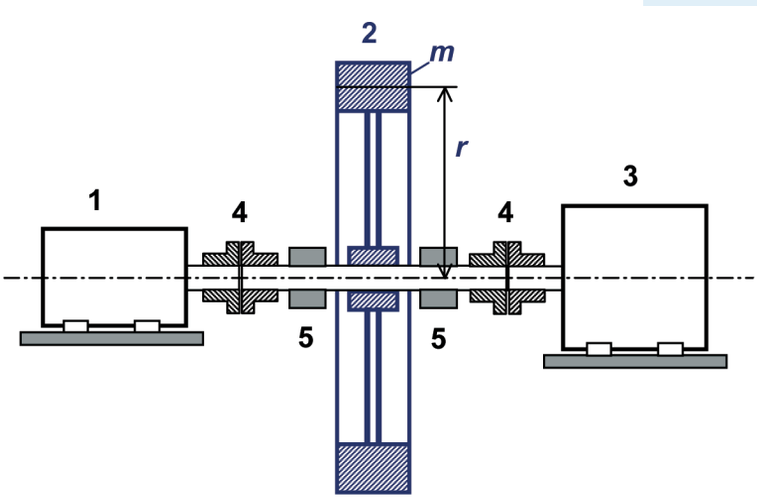
$$W = \frac{J\omega^2}{2}$$

W salvestatud energia J
J hooratta inertsimoment kg m^2
ω pöörlemise nurkkiirus rad/s

Inertsimoment avaldub teatavasti valemiga

$$J = m\,r^2$$

m hooratta mass kg
r inertsiraadius m; ligikaudu võib selle lugeda võrdseks hooratta põia ristlõike keskmise kaugusega ratta teljest



Joonis 4.2.5.
Hooratasajami ehituspõhimõtte näide.
***1* ajammootor, *2* hooratas (lõikes),**
***3* töömasin (energiatarviti), *4* sidurid (lõikes, sidurdusmehhanism näitamata),**
***5* laagrid (toestus näitamata).**
***m* hooratta mass, *r* inertsiraadius**

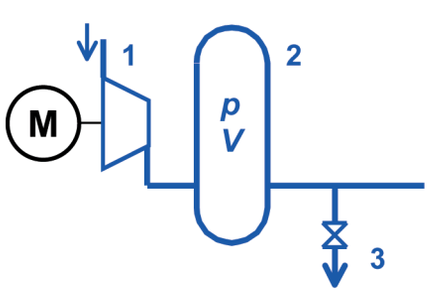
ja seetõttu saab hooratta erisalvestusvõimet avaldada kujul

$$w = \frac{W}{m} = \frac{r^2\omega}{2}$$

w erisalvestusvõime J/kg
W salvestunud energia J
r inertsiraadius m
ω hooratta nurkkiirus rad/s

Hoorattad võivad olla nii rõhtsa (nagu joonisel) kui ka püstse teljega. Kuna nende pöörlemissagedus võib nüüdisajal olla piirides 2000…65 000 1/min ehk pöörlemise nurkkiirus 200…6800 rad/s, inertsiraadius on aga enamasti vastavalt enimalt 1 või 0,2 m, on nende erisalvestusvõime 20 kuni 930 kJ/kg ehk 5 kuni 260 Wh/kg. Kui arvestada ka alustarindite, laagrite ja ümbrise massi, saame umbes kaks korda väiksema erisalvestusvõime, mis aga sellegipoolest on ligi 3 suurusjärku parem kui raskus- ja vedrusalvestitel. Suurtel kiirustel (alates ligikaudu 20 000 p/min) tuleb hoorattaid valmistada sageli mitte enam eriterasest, vaid nt süsinikniitidega armeeritud materjalidest, ja kuul- või rull-laagrite asemel tuleb kasutada magnetlaagreid. See teeb hooratasseadme sageli väga kalliks, mistõttu ka sellest saadava salvestatud energia omahind võib olla vahemikus 300…25 000 eurot 1 kWh kohta. Töökindla ehituse, pika eluea, suhteliselt väikeste mõõtmete, kõrge kasuteguri (92…95 %) ja suure salvestusvõime (1 MJ kuni 6 GJ) tõttu leiavad nad aga sageli kasutamist

- ajammootori või töömasina ajaliselt ebaühtlase pöördemomendi ühtlustamiseks (nt koos kolbmootoritega ja kolbkompressoritega),
- katkematut toidet tagavates agregaatides lühiajalistel (mõni sekund kuni mõni minut kestvatel) toitekatkestustel elektrivõrgus,
- suure lühiajalise (impulsilise) mehaanilise võimsuse saavutamiseks,



Joonis 4.2.6. Suruõhksalvesti põhimõte.
***1* kompressor, *2* suruõhupaak,**
***3* ühendus suruõhutarvitiga. *p* rõhk, *V* paagi ruumala**

- sõidukite vm energiatarvitite autonoomse talitluse tagamiseks teatava aja (kuni mõnekümne minuti) jooksul.

Esimeseks hoorattaks võib lugeda ümarate savinõude valmistamisel kasutatavat pöördlauda (*potiketra*), mis tuli kasutusele Egiptuses umbes 5000 aastat eKr ja mida algul pandi keerlema käetõugetega, hiljem aga pedaalmehhanismiga. Esimese pöördemomenti ühtlustava hooratta võttis oma aurumasinas kasutusele James Watt aastal 1781. Aastal 1948 ehitas Šveitsi tehas *Oerlikon* esimese hooratasautobussi, mis võis sõita hoorattas salvestatud kineetilise energiaga kuni 1 km kaugusele ja oli katselises käidus kuni aastani 1964. Aastal 1970 ehitati Garchingi tuumauurimiskeskuses (Saksamaal) seni võimsaim hooratasseade, mis võis anda võimsust 100 MW ühe kuni kahe minuti kestel.

Tunduvalt odavam on energia salvestamine suruõhu abil, sest suruõhupaak (joonis **4.2.6**) on äärmiselt lihtsa ehitusega ega nõua peaaegu mingisugust hooldust.

Rõhk suruõhupaagis valitakse suruõhutarvitite järgi ja on nt suruõhutööriistade toiteks 0,2…0,5 MPa, kõrgepingeliste õhk-võimsuslülitite jaoks aga enamasti 2 MPa. Suruõhu paisumisel saadav energia oleneb rõhu muutumise iseloomust paisumise ajal ega ole seega paagi ruumala ja rõhuga üheselt määratud. Kui aga algrõhk on võrreldes lõpprõhuga väga suur (nt 2 MPa lõpprõhu 0,1 MPa korral), võib saadava energia mõninga veaga, kuid tugevasti lihtsustatult lugeda võrdseks paagis salvestatud potentsiaalse energiaga ja avaldada kujul

$$W = \frac{pV_0}{2}$$

Arvestades, et

$$V_0 = \frac{p}{p_0}V, \quad V = \frac{m}{\gamma}, \quad \gamma = \frac{p}{p_0}\gamma_0$$

m paagis oleva õhu mass kg
γ õhu tihedus rõhul V g/m³
γ_0 õhu tihedus rõhul V_0 (atmosfäärirõhul) g/m³

saame

$$W = \frac{p^2V}{2\gamma_0} = \frac{pm}{2\gamma_0}$$

Suruõhupaagis oleva õhu erisalvestusvõime on sel juhul seega

$$w = \frac{W}{m} = \frac{p}{2\gamma_0}$$

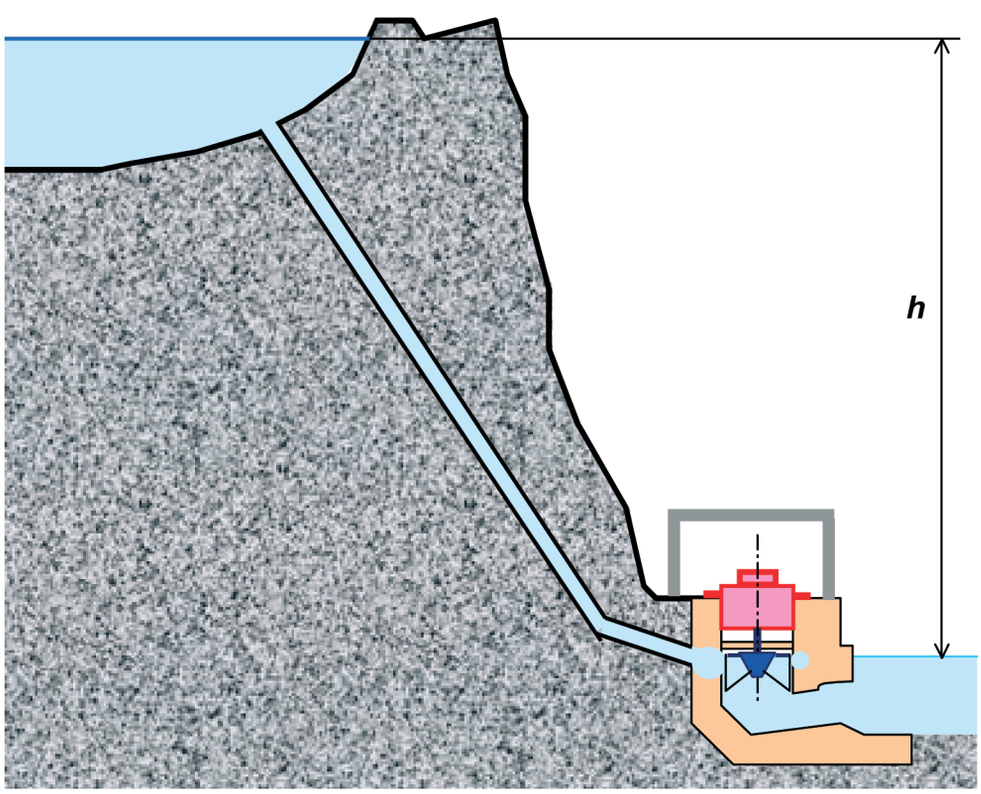
Rõhu 2 MPa ja õhu tiheduse 1 kg/m³ puhul on õhu erisalvestusvõime järelikult ligikaudu 1 MJ/kg. Suruõhksalvesti kui terviku erisalvestusvõime on mitu korda väiksem, sest paagi enda mass on õhu massist palju kordi suurem. Väga ligikaudu võib suruõhksalvestite erisalvestusvõimeks rõhul 0,2…2 MPa lugeda 0,01…0,2 MJ/kg ehk 3…60 Wh/kg. Salvestamise kasutegur on suurusjärgus 50 % ja salvestatud energia omahind tavaliselt ligikaudu 50 eurot 1 kWh kohta.

Suruõhusalvestite maht ei ole tavaliselt suurem kui mõni kuupmeeter. Aastal 1977 ehitati aga Saksamaal Bremeni lähedal asuva Huntorfi gaasiturbiinelektrijaama koormuse ühtlustamiseks kaks maa-alust, 650…800 m sügavusel soolakupli all paiknevat suruõhksalvestit kogumahuga $340 \cdot 10^3$ m³ ja töörõhuga 5…7 MPa. Salvestist võetava energia omahind on ainult ligikaudu 3 eurot 1 kWh kohta.

4.3 HÜDROENERGIA SALVESTAMINE

Hüdroenergia on küll üks mehaanilise energia liikidest, kuid erineb kõigist teistest selle poolest, et seda saab salvestada väga suurtes kogustes ja kasutada sellisel hulgal, mis võimaldab oluliselt ühtlustada energiasüsteemide kütustpõletavate ja tuumaelektrijaamade koormust.

Hüdroenergia salvestamiseks ja taaskasutamiseks rajatakse **pumpelektrijaamu**, mida nimetatakse ka *hüdroakumulatsioonielektrijaamadeks* ja mille ehituspõhimõte on esitatud joonisel **4.3.1**. Jaama juurde kuulub kaks veehoidlat (ülemine ja alumine), mille veetasemete vahe on tavaliselt



Joonis 4.3.1. Pumpelektrijaama ehituspõhimõte

vahemikus 50…500 m. Masinasaalis on *pööratavad* agregaadid, mis võivad talitleda nii mootorpumbana kui ka turbiin-generaatorina; suuremal rõhul (ligikaudu 500 m või enam) kasutatakse eraldi pump- ja turbiinagregaate. Energiasüsteemi miinimumkoormuse ajal pumpavad need vett alumisest veehoidlast ülemisse, süsteemi tippkoormuse ajal aga toodavad elektrienergiat. Kuigi sellise salvestamise kasutegur on 70…85 % ja saadava elektrienergia omahind mitu korda kõrgem kui soojuselektrijaamades, annab soojuselektrijaamade vajaliku võimsuse ning talitluskulude vähenemine sellist säästu, mis täielikult õigustab pumpelektrijaamade olemasolu.

Nagu raskussalvestites, nii ka pumpelektrijaamades saab salvestatud energiat arvutada valemiga

$$W = m\,g\,h$$

W salvestatud energia J

m ülespumbatud vee mass kg

g raskuskiirendus m/s^2 (Maa pinnal g = 9,81 m/s^2)

h ülemise ja alumise veehoidla tasemete vahe m

Ka erisalvestusvõime avaldub samal viisil nagu raskussalvestites –

$$w = W / m = g\,h$$

Veetasemete vahe 50…500 m puhul saame vee energiasisalduse w = 0,5…50 kJ/kg ehk 0,14…14 kWh/kg. Suured veehoidlad võivad aga mahutada energiakoguseid, mis küünivad väärtusteni 1…10 GWh.

Eriti oluliseks peetakse pumpelektrijaamade koostalitlust tuumaelektrijaamadega, et viimased saaksid talitleda võimalikult ühtlase koormusega.

Maailmas on praegu üle 300 pumpelektrijaama. Kümne suurima jaama põhiandmed seisuga 1. jaanuar 2007 on esitatud tabelis **4.3.1**.

Esimene pumpelektrijaam, võimsusega 1 MW ja tasemete vahega 152 m, ehitati aastal 1882 Lettenis (Šveits). Balti riikide ainus pumpelektrijaam võimsusega 900 MW ja tasemete vahega 100 m asub Kruonises (Leedus) ja on ette nähtud eeskätt Ignalina tuumaelektrijaama koormuse tasandamiseks.

Tabel 4.3.1. Maailma 10 suurimat pumpelektrijaama

Nimi või asukoht	Riik	**Võimsus generaatortalitluses MW**	**Veehoidla tasemete vahe m**	**Valmimisaasta**
Kanagawa	Jaapan	2700		2005
Guangzhou	Hiina	2400		2000
Bath County	USA (Virginia)	2100	385	1985
Tianhuangping	Hiina	1980	570	2001
Okutataragi	Jaapan	1932	400	1998
Ludington	USA (Michigan)	1884	110	1973
Dinorwig	Suurbritannia	1800	530	1984
Okukiyotsu	Jaapan	1660	470	1997
Mingtan	Taivan	1650	307	1994
Kazunogawa	Jaapan	1650	714	2001

4.4 SOOJUSE SALVESTAMINE

Soojust saab salvestada suhteliselt lihtsalt – vedelike või tahkete ainete kuumutamisega. Soojuse võtmine sellisest salvestist võib toimuda loomuliku või sundkonvektsiooni teel, kiirguse teel või mingi soojuskandja vahendusel. Lihtsaima soojussalvesti ehituspõhimõte on kujutatud joonisel **4.4.1**.

Salvestatav soojushulk avaldub valemiga

$$W = mc\,(\vartheta_2 - \vartheta_1)$$

W salvestatud soojus J
m salvestusaine mass kg
c salvestusaine erisoojus J/(kgK)
ϑ_2 kuumutustemperatuur °C
ϑ_1 alg- või mahajahtumistemperatuur °C

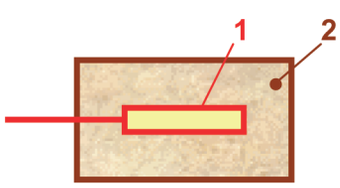
Erisalvestusvõime on seega

$$w = W/m = c\,(\vartheta_2 - \vartheta_1).$$

Üks parimatest salvestusainetest, tänu oma kättesaadavusele, odavusele, keskkonnasõbralikkusele ja suurele erisoojusele (4,2 kJ/(kgK)) on **vesi**. Vett saab atmosfäärirõhul ilma keemaminekuohuta kuumutada aga ainult temperatuurini 95 °C ja kui võtta mahajahtumistemperatuuriks nt 45 °C, on selle erisalvestusvõime

$$w = 4{,}2\,(95 - 45) \approx 200\ \text{kJ/kg} \approx 60\ \text{Wh/kg}.$$

Soojuse salvestamiseks saab kasutada ka metalle, loodus- ja tehiskive, keemilisi ühendeid jms, mille erisoojus on enamasti piirides 0,5…2 kJ/(kgK), kuid mida saab kuumutada nt temperatuurini 750 °C. Sõltuvalt erisoojusest ja lubatavast lõpptemperatuurist on nende materjalide erisalvestusvõime enamasti piirides 50…400 Wh/kg. Elektrilistes salvestusküttekehades kasutatakse sageli magnesiiti (põhiliselt magneesiumoksiidist koosnevat kivimit), mille erisoojus on 1,3 kJ/(kgK), tihedus 3,5 Mg/m³ ja kuumuskindlus 2000 °C. Selle kuumutustemperatuur, arvestades ka salvesti muude materjalide kuumuskindlust ja lubatavat temperatuuri, ei ole tavaliselt üle 800 °C, mis mahajahtumistemperatuuri $\vartheta_1 = 150$ °C puhul annab erisalvestusvõime 230 Wh/kg.



Joonis 4.4.1. Soojussalvesti ehituspõhimõte.
***1* elektriline vm küttekeha, *2* salvestusaine**

Soojuse salvestamisel saab tõhusalt kasutada ka mõnede ainete sulamissoojust. Sel juhul avaldub salvestatud energia valemiga

$$W = m\,[c_t\,(\vartheta_s - \vartheta_1) + C + c_s\,(\vartheta_2 - \vartheta_s)]$$

W salvestatud energia J
m salvestusaine mass kg
c_t erisoojus tahkes olekus J/(kgK)
c_s erisoojus sulas olekus J/(kgK)
C sulamissoojus J/kg
ϑ_1 algtemperatuur °C
ϑ_s sulamistäpp °C
ϑ_2 kuumutustemperatuur °C

Sageli kasutatakse sel otstarbel naatriumhüdroksiidi (NaOH, *seebikivi*), mille erisoojus $c_t \approx c_s \approx 2{,}1$ kJ/(kgK), sulamissoojus $C = 180$ kJ/kg ja sulamistäpp $\vartheta_s = 322$ °C. Kuumutamisel temperatuurini 600 °C ja mahajahtumisel temperatuurini 150 °C on selle aine erisalvestusvõime ümardatult 310 Wh/kg. Veel suurem salvestusvõime – kuni 600 Wh/kg – saavutatakse naatrium-, magneesium- ja liitiumfluoriidide kasutamisel.

Eeltoodud valemites vastavad füüsikaliste suuruste tähised elektrotehnikas kasutatavale tähistussüsteemile. Tuleb aga öelda, et soojustehnikas on mõne suuruse tähistusviis teistsugune ja seda tuleb arvestada soojustehnilise kirjanduse kasutamisel. Tabelis **4.4.1** on esitatud soojustehnilise ja elektrotehnilise tähistusviisi olulisemad erinevused.

Tabel 4.4.1. Füüsikaliste suuruste tähiste erinevusi soojus- ja elektrotehnikas

Füüsikaline suurus	Tähis	
	Soojustehnikas	Elektrotehnikas
Temperatuur	t	ϑ
Aeg	τ	t
Aine tihedus	ρ	γ

Ühtluse huvides kasutatakse käesolevas raamatus füüsikaliste suuruste elektrotehnikas levinud tavale vastavat tähistusviisi.

Soojuse salvestamine on eriti otstarbekohane elekterküttes, võimaldades salvesteid laadida energiasüsteemi koormusmiinimumi ajal (öösel). Soojussalvestina saab seejuures kasutada ka ehitise osi, eeskätt põrandaid ja vahelagesid (vt jaotis **6.4**).

Soojuse salvestumist kaljudes päikesekiirguse toimel oskasid inimesed kasutada tõenäoliselt juba umbes 50 000 aasta eest, rajades oma koopad mägede lõunapoolsetele külgedele. Soojuse esimesteks tehissalvestiteks võib pidada algelisi kerisahjusid, mis tulid kasutusele umbes 5000 aastat eKr. Väga tõhusalt sai soojust salvestada läänemeresoomlaste leiutatud reheahjudes, mida hakati kasutama esimesel aastatuhandel eKr.

4.5 ELEKTRIENERGIA SALVESTAMINE

Elektrienergiat saab salvestada

- kondensaatorites (elektrivälja energiana),
- induktiivpoolides (magnetvälja energiana),
- primaarsetes ja sekundaarsetes galvaanielementides (keemilise energiana).

Lihtsaima **kondensaatori** – *plaatkondensaatori* – põhimõtteline ehitus on kujutatud joonisel **4.5.1**.

Sellise kondensaatori mahtuvus avaldub teatavasti valemiga

$$C = \varepsilon \frac{A}{d}$$

C mahtuvus F
A elektroodi pindala m²
d dielektriku paksus m
ε dielektriku dielektriline läbitavus F/m

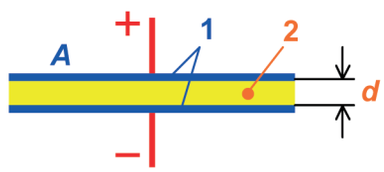
ja kondensaatoris salvestunud energia valemiga

$$W = \frac{CU^2}{2}$$

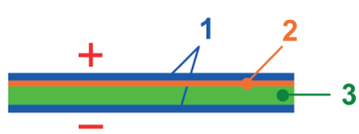
W salvestunud energia J
C kondensaatori mahtuvus F
U kondensaatorile rakendatud pinge V

Kui kasutada fooliumelektroode ja mitmekihilisest kilest koosnevat dielektrikut, saab valmistada rullitaolise ehitusega kondensaatoreid, mille erisalvestusvõime on piirides 10…10⁵ J/kg ehk 0,003…0,1 Wh/kg. Väikese erisalvestusvõime tõttu ei sobi seda tüüpi kondensaatorid energia pikaajaliseks salvestamiseks, kuid nad on laialt kasutusel vahelduvvooluahelate reaktiivvõimsusallikatena ja mahtuvuslike takistitena.

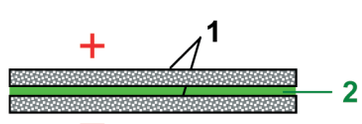
Tunduvalt tõhusamalt saab energiat salvestada **elektrolüütkondensaatoritega**, mille ehituspõhimõte on kujutatud joonisel **4.5.2**.



Joonis 4.5.1. Plaatkondensaatori ehituspõhimõte.
***1* elektroodid, *2* dielektrik**



Joonis 4.5.2. Elektrolüütkondensaatori ehituspõhimõte.
***1* metall-leht või -foolium (alumiinium, tantaal vm),**
***2* metalloksiiddielektrik (Al_2O_3, Ta_2O_5 vm),**
3 elektrolüüdiga (H_3BO_3, H_2SO_4, MnO_2 vm)
ja glütseriiniga immutatud paber vms



Joonis 4.5.3. Ülikondensaatori ehituspõhimõte.
***1* poorsest grafiidist elektroodid, *2* elektrolüüt**

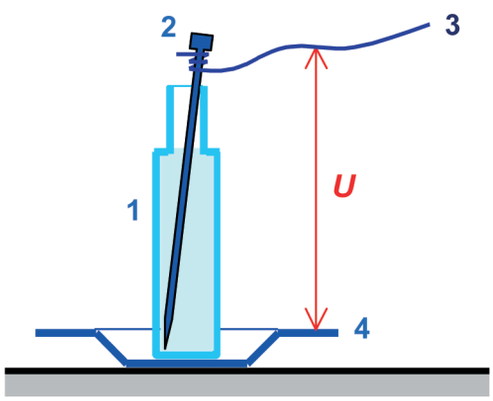
Kuna elektrolüütkondensaatorite dielektriku paksus on suurusjärgus 0,1 μm, saab neid valmistada väga suure mahtuvusega (kuni 1 F), kuid suhteliselt väikesele pingele (tavaliselt mõni volt).

Veel suurema mahtuvusega saab valmistada **ülikondensaatoreid**, mille elektroodid on poorsest grafiidist (joonis **4.5.3**) ja mis põhinevad elektroodi ja elektrolüüdi vahelisel kaksikkihil paksusega mõni kümnendik nanomeetrit. Poorsuse tõttu on elektroodide efektiivne pindala kuni 10 000 m² elektroodi massi 1 g kohta, mis annab võimaluse valmistada väga suure mahtuvusega kondensaatoreid väga

väikeste mõõtmetega. Seni on ülikondensaatoreid valmistatud pingega kuni 2,7 V ja mahtuvusega kuni 3 kF. Nende erisalvestusvõime on enamasti 1…20 Wh/kg.

Vaatamata salvestatud energia kõrgele hinnale (10 000… 50 000 eurot 1 kWh kohta) on ülikondensaatorid tänu oma lihtsusele, väikestele mõõtmetele, töökindlusele ja kõrgele kasutegurile (95 % või enam) hakanud leidma kasutamist akumulaatorite ja muude energiasalvestusvahendite asemel nii sõidukites kui ka mitmesugustes tugevvooluseadmetes, eriti aga siis, kui energiat on tarvis saada impulssidena ja kui nõutakse salvesti kiiret laadimist. Aastal 2005 alustati nt Shanghais ülikondensaatorautobusside katsetamist, kusjuures kondensaatorpatarei laadimine nähti ette bussi igal seisuajal bussipeatustes.

Kondensaatorite võrdlus muude energiasalvestitega on esitatud joonisel **4.5.12** ja tabelis **4.7.1**.



Joonis 4.5.4.
Ewald Jürgen von Kleisti kondensaator.
***1* veega täidetud klaaspudel, *2* nael,**
mis koos veega moodustab ülemise elektroodi,
***3* elektrostaatilise generaatori juurde viiv juhe,**
***4* metalltaldrik (alumine elektrood)**

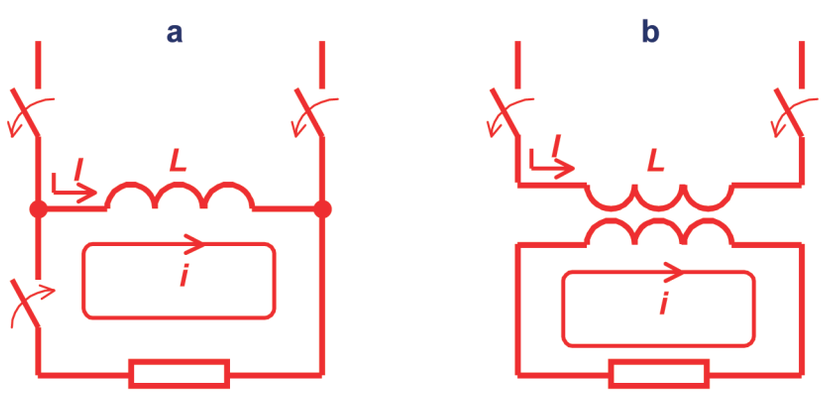
Vanimaiks kondensaatoreiks ja ühtlasi vanimaiks elektrienergiasalvesteiks võib lugeda merevaigust (kr *elektron*) esemeid, mille elektriseerumise villase riidega hõõrumisel avastas kreeka filosoof Thales umbes aastal 590 eKr. Ka esimesed, 17. sajandil leiutatud elektrostaatilised generaatorid (vt jaotis **2.12**) kujutasid endast sisuliselt kera- või silindrikujulisi kondensaatoreid, mille pinnal salvestatud laengutega sai tekitada nt elektrilahendusi. Esimeseks *päris* kondensaatoriks loetakse siiski saksa asjaarmastajafüüsiku, Cammini toomkiriku dekaani Ewald Jürgen von Kleisti (1700–1748) poolt vee elektriseerimise katsetel 11.10.1745 leiutatud *võimenduspudelit* (joonis **4.5.4**), millel saab selgelt eristada kahte elektroodi ja nendevahelist dielektrikut. Esimese plaatkondensaatori valmistas Londonis tegutsev arst John Bevis (1693–1771) aastal 1747 ja esimesed elektrolüütkondensaatorid töötas välja Königsbergi füsioloogiainstituudi juhataja Hermann von Helmholtz (1821–1894) aastal 1853. Poorsel grafiidil põhineva ülikondensaatori patenteeris aastal 1957 USA elektrotehnikakontserni *General Electric* teadur H. I. Becker, kuid nende tegelik valmistamine ja kasutamine algas alles 21. sajandi esimestel aastatel.

Et salvestada energiat **induktiivpoolis**, tuleb selle mähisest läbi juhtida alalisvool, mis tekitab mähisega seotud alalis-magnetvälja. Magnetväljas sisalduv energia võib muunduda elektrienergiaks pooli lülitamisel mingile elektritarvitile koos pooli toiteahela katkestamisega (joonis **4.5.5a**) või sekundaarmähisega varustatud pooli (**trafo**) primaarahela katkestamisega (joonis **4.5.5b**). Elektrienergia võib omakorda muunduda teisteks energialiikideks (soojuseks, mehaaniliseks energiaks vm).

Induktiivpoolis salvestunud energiat saab teatavasti avaldada valemiga

$$W = \frac{LI^2}{2}$$

W salvestunud energia J
L induktiivpooli induktiivsus H
I pooli läbiv vool A



Joonis 4.5.5. Induktiivpoolis salvestunud energia kasutamine elektritarviti lülitamisel pooliga järjestikku (*a*) või sekundaarmähisega varustatud pooli (trafo) primaarahela katkestamisel (*b*). *I* induktiivpoolis või trafo primaarmähises kulgev alalisvool, *L* induktiivsus, *i* tarvitis tekkiv sumbuv vooluimpulss

Induktiivpooli erisalvestusvõime on tavaliselt väga väike, jäädes piiridesse 0,1…1 J/kg ehk 0,03…0,3 mWh/kg. Üksnes ülijuhtivate mähiste korral võivad induktiivpoolid salvestada energiakoguseid, mida saab kasutada nt energiasüsteemides kiirete koormuskõikumiste tasandamiseks.

Esimese induktiivpooli valmistas aastal 1820 André Marie Ampère, magnetväljas salvestunud energia muundumist joonisel **4.5.5b** kujutatud viisil täheldas esimesena aastal 1831 Michael Faraday (vt jaotis **2.14**).

Primaar-galvaanielemendid põhinevad elektromotoorjõu kasutamisel, mis tekib kahe eri materjalist elektroodi vahel, kui need saavad elektrokeemiliselt reageerida nendevahelise elektrolüüdiga. Nendest saadav elektrienergia on määratud reageerivate ainete kogusega (elektroodide ja elektrolüüdi ärakasutatava massiga) ja seda iseloomustatakse

- alg-elektromotoorjõuga (mis tavaliselt, olenevalt elemendi liigist, on 1…3 V),
- etteantud tühjendamisviisil (nt teatava konstantse koormusvoolu või konstantse koormustakistuse korral) koormus-elektriahelasse antava laenguga, mida tavaliselt väljendatakse ampertundides (Ah).

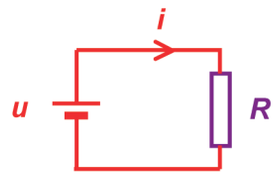
Saadavat energiat, mida võib nimetada ka elemendi salvestusvõimeks, saab arvutada valemiga

$$W = \zeta\, u\, i\, dt$$

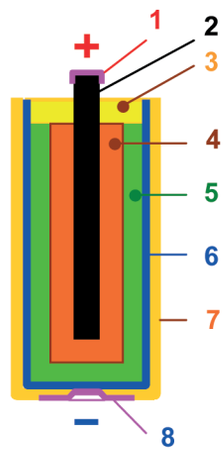
u	elemendi klemmipinge V
i	koormusvool A
t	aeg h
W	saadav energia Wh

Näitena on joonisel **4.5.7** esitatud laialt kasutatava süsi-tsink-primaarelemendi ehituspõhimõte. Selles elemendis tekivad välise elektriahela sulgemisel keemilised reaktsioonid, mille tulemusel anoodi tsingiaatomid lahustuvad, andes ära 2 elektroni ja ühinedes lõpuks tsink-ammooniumkloriidiks, katoodi mangaandioksiid MnO_2 aga redutseerub kolmeväärse mangaani oksiidiks Mn_2O_3. Grafiitvarda ja mangaanoksiidi kokkupuutepinnal areneb seejuures vesinikukiht, mis suurendab elemendi sisetakistust ja vähendab elektromotoorjõudu. Süsi-tsink-elemendi alg-elektromotoorjõud on ligikaudu 1,5 V ja tühjenemisel elektromotoorjõuni 0,8 V võib sellest saada energiat massiühiku kohta, olenevalt konkreetsest tüübist, tavaliselt 60…80 Wh/kg.

Elektrokeemilised reaktsioonid toimuvad galvaanielementides ka siis, kui välisahel on avatud.



Joonis 4.5.6. Galvaanielemendi koormamine vooluga *i* läbi takistuse *R*. *u* elemendi klemmipinge



Joonis 4.5.7. Süsi-tsink-galvaanielemendi ehituspõhimõte. *1* kontaktmüts (nt valgevask), *2* grafiitvarras, *3* isolatsioon, *4* mangaandioksiidkatood, *5* ammooniumkloriidpasta (elektrolüüt), *6* tsinkanood, *7* isoleerkest, *8* põhjakontakt (nt messing)

Sellist protsessi nimetatakse *isetühjenemiseks*; süsi-tsink-elemendi isetühjenemisaeg on ligikaudu 1,5 aastat.

Süsi-tsink-elemendist tunduvalt tõhusam on aluselise (enamasti kaaliumhüdroksiid-) elektrolüüdiga mangaandioksiid-tsink-element. Väliskujult sarnaneb see element ülalvaadelduga, kuid elemendi kest on metallist ning ühendatud positiivse poolusega, grafiitvarda asemel on aga valgevaskvarras. Alg-elektromotoorjõud on samuti 1,5 V, kuid energiamahutavus on ligi kaks korda suurem – tavaliselt 120…130 Wh/kg.

Tüüpilist seda liiki galvaanielementi tüübitähisega AA (läbimõõt 14 mm, pikkus 50 mm, mass 24 g) saab koormata vooluga 50…500 mA, kusjuures elemendi nimilaeng on sellise koormuse alampiiril ligi 3 Ah, ülempiiril aga 2 Ah. Kui lugeda elemendi keskmiseks pingeks tühjenemisel 1,1 V, on elemendist saadav energia ümardatult 2…3 Wh. Kuna taoline element maksab tavaliselt 10…15 krooni, on saadava energia hind suurusjärgus 5000 kr./kWh, mida aga loetakse kantavates väikese võimsusega elektritarvitites (taskulampides, raadiovastuvõtjates jms) vastuvõetavaks.

Veel tõhusamalt saab energiat salvestada liitiumelementides, mille alg-elektromotoorjõud on 3 V, erisalvestusvõime aga olenevalt elemendi elektrokeemilisest süsteemist (on kasutusel ligi 10 mitmesugust katoodimaterjali) 250…600 Wh/kg. Sellised elemendid on enamasti nööbitaolise ehitusega ja neid kasutatakse nt käekellades, taskuarvutites ja muudes väga väikese võimsusega elektritarvitites.

On teisigi primaarelemente nagu nt elavhõbe–tsink (mida elavhõbeda keskkonnaohtlikkuse tõttu enam ei kasutata), hõbe–tsink jt. Neid iseloomustab samuti suhteliselt suur energia erisalvestusvõime, kuid nende kasutusala on suhteliselt kitsam.

Galvaanielementidest saab nende jada-, rööp- ja sega ühendamise teel moodustada vajaliku pinge ja võimsusega *patareisid*. Väga levinud on nt kompaktsed väikepatareid pingega 9 V, mis sisaldavad 6 süsi-tsink-elementi või aluselist mangaandioksiidelementi.

Ühe Bagdadi muuseumis asuva eksponaadi järgi oletatakse, et orgaanilisest happest elektrolüüdiga vask-raud-primaarelemendid olid tuntud juba 3. sajandil eKr Partias (praeguse Iraani põhjaosas). Esimese täpselt teadaoleva primaargalvaanielemendi pani aga kokku aastal 1799 Pavia ülikooli katselise füüsika professor Alessandro Volta (1745–1827). Element koosnes hõbe- ja tsinkkettast, mis olid teineteisest eraldatud niiske (või soolalahuses immutatud) riidega. Elemente sai kergesti laduda ülestikku ja moodustada seega patarei (*Volta samba*). 19. sajandi esimesel poolel leiutati mitmesuguseid vedela elektrolüüdiga elemente ja aastal 1868 valmistas prantsuse elektriinsener Georges Leclanché (1839–1882) esimese *kuiva* süsi-tsink-elemendi, mis täiustatud kujul on praegugi kasutusel. Aluselise mangaandioksiidelemendi leiutas USA firma *Eveready Battery* elektriinsener Lewis Urry aastal 1959 ja liitiumelemendid tulid kasutusele USAs aastal 1991.

Sekundaar-galvaanielementi ehk **akumulaatorit (akut)** saab pärast tühjendamist, olenevalt konkreetsest liigist, mõnisada kuni mõni tuhat korda uuesti laadida. Levinuim on pliiakumulaator, mille ehituspõhimõte on kujutatud joonisel **4.5.8**.

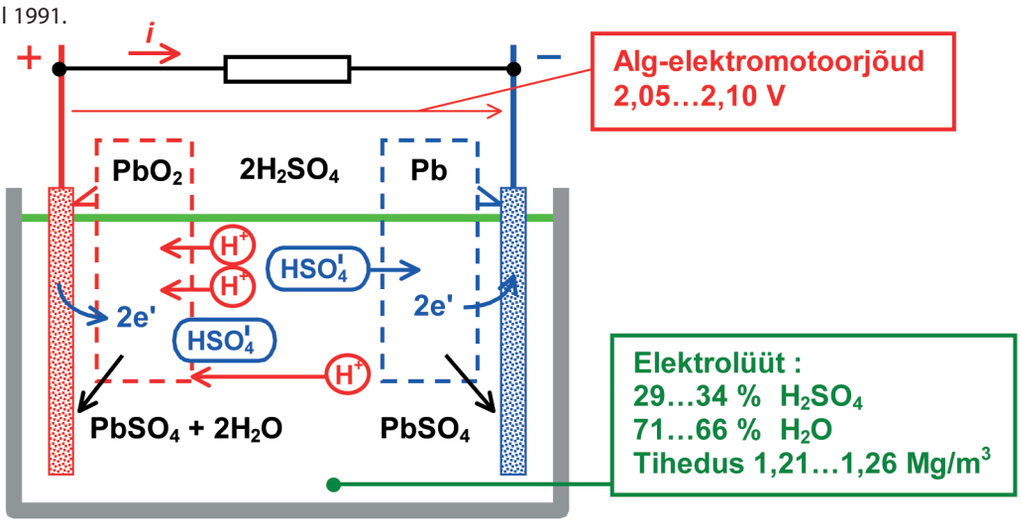
Laetud olekus koosneb sellise aku anood (negatiivne elektrood) pliist ja katood (positiivne elektrood) pliioksiidist PbO_2 . Mõlemad elektroodid on valmistatud urbsetena, et nende aktiivmaterjali kokkupuude elektrolüüdiga oleks võimalikult suurepinnaline. Elektroodide konstruktiivne kujundus võib olenevalt aku otstarbest ja nimilaengust (*mahutavusest*) olla väga mitmesugune [4.1].

Keemilised reaktsioonid aku laadimisel ja tühjenemisel on esitatavad valemiga

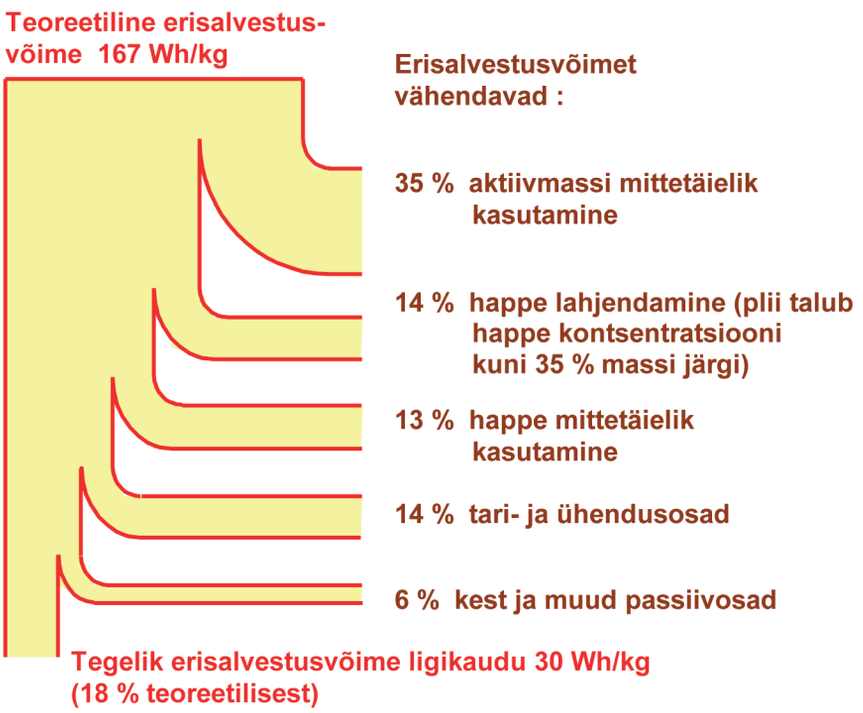
$$PbO_2 + Pb + 2H_2SO_4 \underset{\text{laadimine}}{\overset{\text{tühjenemine}}{\rightleftharpoons}} 2PbSO_4 + H_2O$$

Laadimisreaktsioon vajab teoreetiliselt energiat **167** Wh/kg. Sama suur on järelikult ka aku erisalvestusvõime teoreetiline piir. Tegelik salvestusvõime on aga tugevasti väiksem, mistõttu akust saadakse tühjendamisel elektrienergiat tavaliselt ainult ligikaudu 30 Wh/kg. Salvestusvõime vähenemist põhjustavad faktorid on piltlikult kujutatud joonisel **4.5.9**. Aku kasutegur (tühjenemisel saadava ja laadimisel kulutatava energia suhe) on tavaliselt vahemikus 70…80 %.

Mitmesuguste erivõtetega (happe kontsentratsiooni suurendamisega väärtuseni 39 %, plastikaattariosade ja vaskühenduste kasutamisega jm) on viimasel ajal õnnestunud pliiaku erisalvestusvõimet suurendada kuni väärtuseni 40 Wh/kg ja mõnevõrra isegi enam.



Joonis 4.5.8. Pliiakumulaatori ehituspõhimõte ja tühjenemisprotsessi elektrokeemiline skeem



Joonis 4.5.9. Pliiakumulaatori teoreetiline ja tegelik erisalvestusvõime

Väärib märkimist, et veel paarkümmend aastat tagasi olid kasutusel lahtised kohtkindlad akud, mille erisalvestusvõime oli ainult 5…10 Wh/kg.

Esitatud andmeist järeldub, et võrreldes primaarelementidega on selle akumulaatori (ning, nagu edaspidi näidatakse, ka teiste akumulaatorite) erisalvestusvõime tugevasti väiksem, mis aga enamasti kompenseerub

- paljukordse laadimise võimalusega ja seetõttu ka akust saadava elektrienergia ligikaudu 10 korda väiksema maksumusega,
- võimalusega valmistada akupatareisid väga suure, energeetiliseks kasutamiseks sobiva salvestusvõimega (vajaduse korral nt kuni 100 MWh).

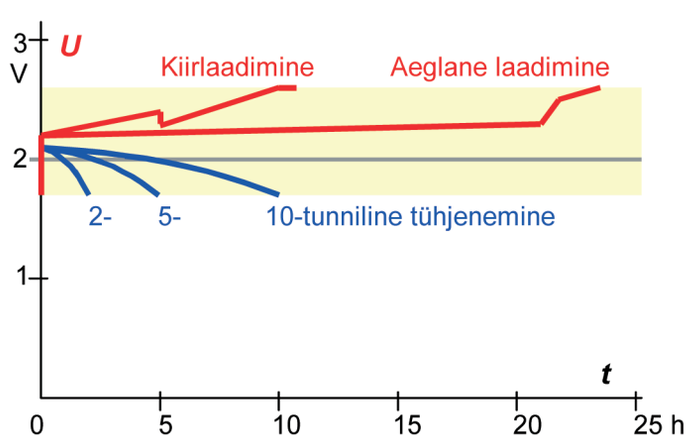
Pliiakumulaatori elektromotoorjõud oleneb elektrolüüdi tihedusest ja seda saab väljendada empiirilise valemiga

$$E = 0{,}84 + \gamma$$

E elektromotoorjõud V
γ elektrolüüdi tihedus Mg/m³

Selle valemi järgi on aku alg-elektromotoorjõud olenevalt aku tüübist 2,05…2,10 V. Aku klemmipinge võib tühjenemisel langeda väärtuseni 1,7 V, laadimise lõpus aga tõusta väärtuseni 2,6 V (joonis **4.5.10**).

Iga tühjenemis- ja laadimistsükkel toob kaasa elektroodide mõningaid taastumatuid muutusi, sealhulgas pliisulfaadi mingi osa taastumatut jää-



Joonis 4.5.10. Pliiakumulaatori pinge muutumine mõnes võimalikus tühjenemis- ja laadimisprotsessis

mist elektroodidesse. Seetõttu kaotab aku teatud arvu (tavaliselt umbes 1000) laadimistsükli järel laengu normaalse vastuvõtuvõime. Sama võib juhtuda ka aku pikaajalisel seismisel, kuna elektrokeemiline tühjenemisprotsess (aeglane *isetühjenemine*) toimub akus ka siis, kui see ei ole ühendatud välisahelaga. Tavaliselt kaotab pliiaku isetühjenemise tagajärjel ööpäeva jooksul 0,5…1 % oma laengust. Selle kompenseerimiseks kasutatakse energeetikaseadmeis pidevat *juurdelaadimist* teataval piisavalt stabiilsel pingel (tavaliselt, olenevalt aku tüübist, pingel 2,15 kuni 2,20 V).

Viimase 20 aasta jooksul on tulnud kasutusele pliiakud, mille elektrolüüt ei ole vedel, vaid geelitaoline, ja aku kest on täielikult suletud (hermeetiline). Selliseid akusid saab paigaldada ükskõik millises asendis ja, kuna nendest ei saa eralduda vee elektrolüüsi tagajärjel vesinikku, ükskõik millistes ruumides.

Peale pliiakude on kasutusel üle 50 mitmesugustel elektrokeemilistel süsteemidel põhineva akumulaatoriliigi. Energiaseadmetes on suhteliselt sageli kasutatud leelis- (KOH-) elektrolüüdiga nikkel-rauda- ja nikkel-kaadmiumakusid elektromotoorjõuga 1,35…1,45 V ja erisalvestusvõimega 15…45 Wh/kg, mis on vähem tundlikud keskkonna temperatuuri kõikumistele ja vähem nõudlikud kasutamisolude suhtes. Ka on nende tööiga pikem (tavaliselt 1000…4000 tühjenemis-laadimistsüklit), kuid nende klemmipinge muutub suuremates piirides kui pliiakul ja ka nende kasutegur on mõnevõrra madalam (50…70 %).

Plii- ja nikkelkaadmiumakupatareisid on ehitatud vägagi suure nimisalvestusvõimega ja kasutatud energiasüsteemide varutoiteallikaina ning elektrijaamade koormuse ühtlustamiseks. Nii näiteks võeti Fairbanksis (Alaska, USA) aastal 2003 käitu maailma suurima võimsusega akupatarei, mis koosneb 13 760 nikkel-kaadmium-elemendist ning on invertori ja trafo kaudu lülitatud süsteemivõrku pingega 138 kV. Patarei nimipinge on 5230 V (maailma kõrgeim) ja energiamahutavus 9 MWh. 99 % ajast talitleb see reaktiivvõimsuse kompesaatorina, kuid võib tarbe korral anda võrku 3 min kestel võimsust 46 MW või 15 min kestel võimsust 27 MW. Patarei kogumass on 1500 t ja see läks maksma 35 mln dollarit; elementide tööiga on 20…30 aastat. On olemas ka suurema salvestusvõimega akupatareisid; näiteks võib Californias varutoiteallikana kasutatav 60-MWh patarei anda 6 tunni kestel võimsust 6 MW.

Akupatareisid on alates nende kasutuseletulekust 19. sajandi teisel poolel püütud kasutada sõidukites, kuna akutoiteline elektriajam võimaldaks saavutada võrreldes sisepõlemismootoritega mitmeid olulisi eeliseid nagu nt

- veomootori(te) tugevasti lihtsam ja kompaktsem ehitus,
- võimalus kasutada mitmemootorilisi ajameid (nt igale rattale eraldi),
- ajami kõrgem kasutegur (80…90 %),
- kiiruse sujuv reguleerimine kogu vajalikus reguleerimispiirkonnas ilma reduktori (käigukasti) kasutamiseta,
- spetsiaalse käivitussüsteemi (startermootori ja -aku) ärajäämine,
- võimalus pidurdusel vabanevat energiat elektriliselt salvestada,
- automaatjuhtimis- ja -reguleerimisvahendite (sealhulgas juhtmevabade süsteemide) lihtsam kasutamine,
- ajami suurem töökindlus, väiksem hooldamisvajadus ning pikem eluiga,
- ohutum käit (tänu tule- ja plahvatusohtliku mootorikütuse ärajäämisele),
- keskkonda saastavate heitgaaside jm heitainete ärajäämine,
- muude elektrienergiaallikate (nt generaatorite) ärajäämine,
- müratu talitlus.

Pliiakude kasutamist elektersõidukites (autodes, paatides, rongides jne) raskendab nende suhteliselt suur mass, mis tavaliselt on suurem kui sisepõlemismootoril, ja vastuvõetava massi korral ühel laadimisel saavutatav liiga väike sõidukaugus (tavaliselt ligikaudu 100 km). Seetõttu on elektersõidukite jaoks välja töötatud mitmeid suurema erisalvestusvõimega akude liike. 1970ndatel aastatel töötati sel eesmärgil välja nt **väävel-naatriumakumulaator**, mille elektromotoorjõud on 2,0…2,1 V, teoreetiline erisalvestusvõime 1,29 kWh/kg ja seni saavutatud tegelik erisalvestusvõime 80 Wh/kg. Selline aku põhineb suhteliselt lihtsal elektrokeemilisel reaktsioonil

$$2Na + xS \underset{\text{laadimine}}{\overset{\text{tühjenemine}}{\rightleftharpoons}} Na_2S_x$$

ja selle ehituspõhimõte on kujutatud joonisel **4.5.11**.

Kuna selles akumulaatoris peavad nii väävel (sulamise algus 119 °C) kui ka naatrium (sulamistäpp 98 °C) olema sulas olekus ja sula väävel peab piisavalt hästi lahustama naatriumsulfiidi (sulamistäpp

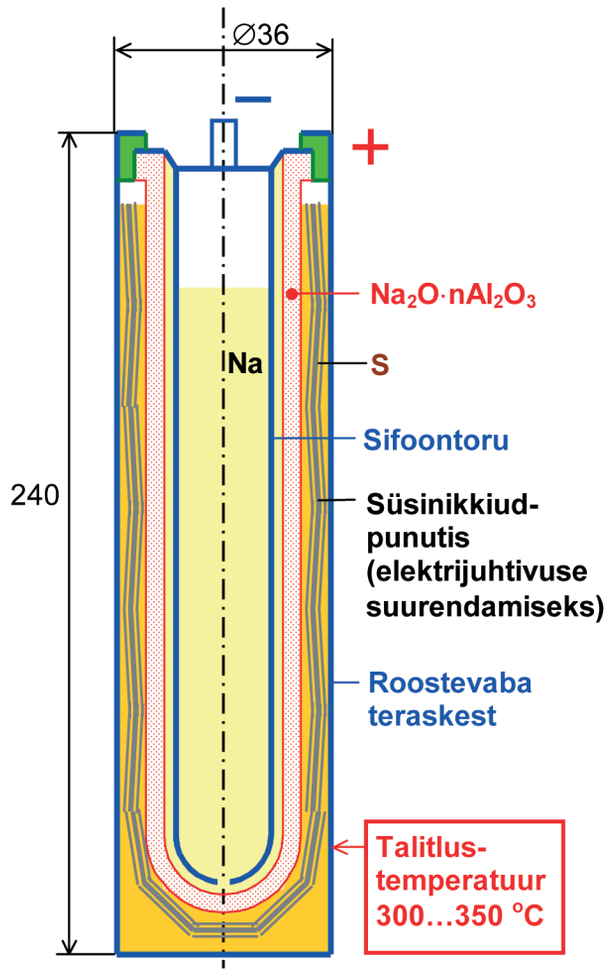
1180 °C), peab akumulaatori talitlustemperatuur olema 300…350 °C. Võrreldes pliiakuga kompenseerivad seda puudust aga aku suurem erisalvestusvõime, väiksemad mõõtmed, suurem tööiga (1500 tühjenemis-laadimis-tsüklit), isetühjenemise täielik puudumine ja liiglaadimise mittevõimalikkus. Aku on hermeetilise ehitusega ja seda võib paigutada ükskõik millises asendis. Kasutegur on ligikaudu samasugune nagu pliiakul (75…80 %). Joonisel **4.5.11** kujutatud akumulaatori nimilaeng 42 Ah ja mass 0,4 kg.

Aastal 1990 paigaldas Saksamaa autootoja *BMW* oma katselisele elektrilisele sõiduautole *BMW 325ix* 224 elemendist koosneva väävel-naatriumakupatarei (180 V, 140 A, 140 Ah, 22 kWh, 276 kg, 360 × 485 × 1420 mm, soojuskadu 170 W). Patarei ühe laenguga võis auto, mis oli varustatud 20-kW elektrimootoriga, linnaoludes sõita 150 km ja arendada kiirust kuni 95 km/h.

Väävel-naatrium-aku kõrge talitlustemperatuur nõuab aga akupatarei väga tõhusat soojusisolatsiooni ning aku üleskütmist enne sõiduki kasutamist. Seetõttu ei ole see leidnud sarjaviisiliselt toodetavates elektriautodes seni kasutamist. Rakendamiskõlbulikuks on aga alates aastast 2005 hakatud pidama hermeetilise ehitusega nikkel-metallhüdriid- ja liitium-ioonakupatareisid, mida enne seda toodeti peaasjalikult väike-elektritarvitite (mobiiltelefonide, videokaamerate, sülearvutite jms) toiteks. Nikkel-metallhüdriidelemendil on alg-elektromotoorjõud 1,25 V ja energia-erimahutavus 60…120 Wh/kg, liitium-ioonelemendil aga vastavalt 3,7…4,2 V ja 100…160 Wh/kg. Mõlemad talitlevad tavalisel keskkonnatemperatuuril. Nendel akupatareidel põhinevate elektriautode suurtootmist ennustatakse aastaks 2010.

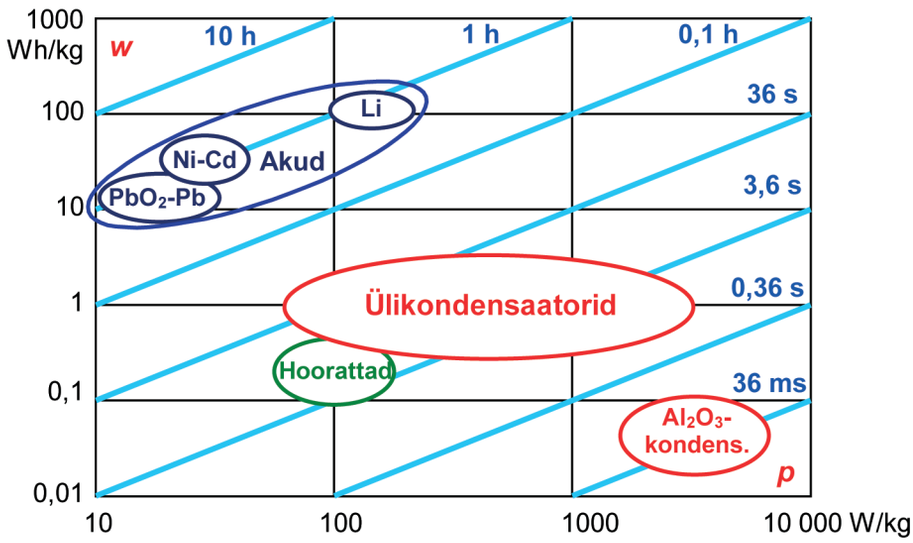
On väga palju muid akumulaatorite liike (üldse ligi 100). Nii näiteks on lennukite elektrivarustussüsteemides, kus seadmete mass peab olema nii väike kui võimalik, kasutusel hõbe-tsink-akud, mille erisalvestusvõime on keskmiselt 100 Wh/kg. Suurima elektromotoorjõuga (6,1 V) ning suurima teoreetilise erisalvestusvõimega (6270 Wh/kg) on fluor-liitiumakud, mis aga ei ole veel jõudnud tootmisesse.

Esimese (plii-) sekundaarelemendi valmistas aastal 1859 Pariisi tehnikaülikooli *Conservatoire des Arts et Métiers* töötav füüsikaassistent Gaston Raimond Planté (1834–1889), kuid selle tegelik laiem kasutamine algas alles aastal 1880, kui prantsuse füüsik Camille Faure (1834–1898) võttis neis kasutusele urbsed elektroodid. Termini *akumulaator* esitas Planté aastal 1872. Nikkel-raud-aku leiutasid teineteisest sõltumatult aastal 1901 USA tööstur Thomas Alva Edison (1847–1931) ja Rootsi tööstur Valdemar Jungner (1869–1924). Viimane leiutas peale selle veel mitu muud leelisaku liiki, sealhulgas nikkel-kaadmium- ja hõbeoksiid-kaadmiumaku. Esimesed väävel-naatriumakud töötati välja Saksamaal aastal 1967 ja esimesed nikkel-metallhüdriidakud USAs aastal 1983. Esimesed katselised liitiumioonakud valmistati aastal 1975, kuid nende tööstuslikud versioonid ilmusid 1990ndail aastail. Esimese akumulaatorsõiduki (akumulaatorkäru) valmistas Camille Faure aastal 1880 ja elektrijaama koormuskõikumiste tasandamiseks kasutas akusid esimesena aastal 1886 Marcel Deprez.



Joonis 4.5.11. Väävel-naatrium-aku ehituspõhimõte (*Brown Boveri & Cie.*, 1983). Naatriumiioonid liiguvad läbi ioonivahetusmembraani ja ühinevad väävliga naatriumsulfiidiks

Primaarelemendid sobivad kasutamiseks kestval koormusel, akumulaatorid aga ka lühiajalisel koormusel. Kondensaatoreid ja induktiivpoole kasutatakse peaasjalikult impulsskoormustel ja koormuste kiirete muutumiste tasandamiseks. Elektrienergiasalvestite mõningate eri liikide kasutusala koormuse kestuse ja tarbitava võimsuse järgi iseloomustab joonis **4.5.12**.



Joonis 4.5.12. Mõnede energiasalvestite erisalvestusvõime (*w*) ja erivõimsuse (*p*) iseloomustavad piirkonnad (ligikaudu)

4.6 KEEMILISE ENERGIA SALVESTAMINE

Keemilise energia lihtsaim salvestamisviis on kütuse ladustamine laohoonetes, väliskuhjatistes, virnades, vallides, mahutites, paakides, balloonides vms. Sellisel salvestamisel on erisalvestusvõime sama suur nagu kütuse kütteväärtus (põlemissoojus massiühiku kohta), mille mõned näited olid esitatud tabelis **3.1.3**.

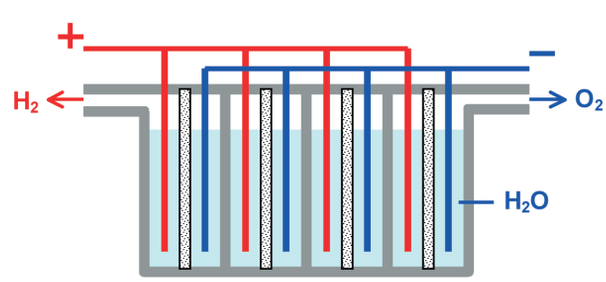
Kütuseid saab ladustada väga suurte kogustena – kuni mõni mln tonni või isegi enam. Elektrijaamades nähakse näiteks ette enamasti 1 kuu kütusevaru. Gaaskütuseid säilitatakse enamasti vedeldatutena (madalal temperatuuril) või kõrge rõhu all. Vesiniku salvestamine on võimalik ka metallhüdriididena (nt Mg_2NiH_4). Maagaasi salvestamiseks suurtes kogustes rajatakse toruliinide võrguga ühendatud suuremahulisi maa-aluseid gaasihoidlaid.

Kuna energia salvestamine kütusena on väga lihtne ja tõhus, võidakse muid energialiike muundada nende salvestamise eesmärgil tehiskütusteks vastavalt joonisel **4.6.1** kujutatud skeemile.

Elektrienergiat võib näiteks salvestada selle muundamise teel vesinikkütuseks vee elektrolüüsi abil (joonis **4.6.2**).

Analoogiliselt keemilise energiaga saab salvestada ka tuumaenergiat, nt rikastatud uraandioksiidiga UO_2 täidetud tuumkütusevarraste kujul. Arvestades tuumkütuse tegelikku ärakasutusastet tuumaelektrijaamades võib selliste kütusevarraste erisalvestusvõimeks lugeda 300…1000 MWh/kg.

Joonis 4.6.1. Energia salvestamine tehiskütusena



Joonis 4.6.2. Vee elektrolüüsiseadme ehituspõhimõte (tugevasti lihtsustatult)

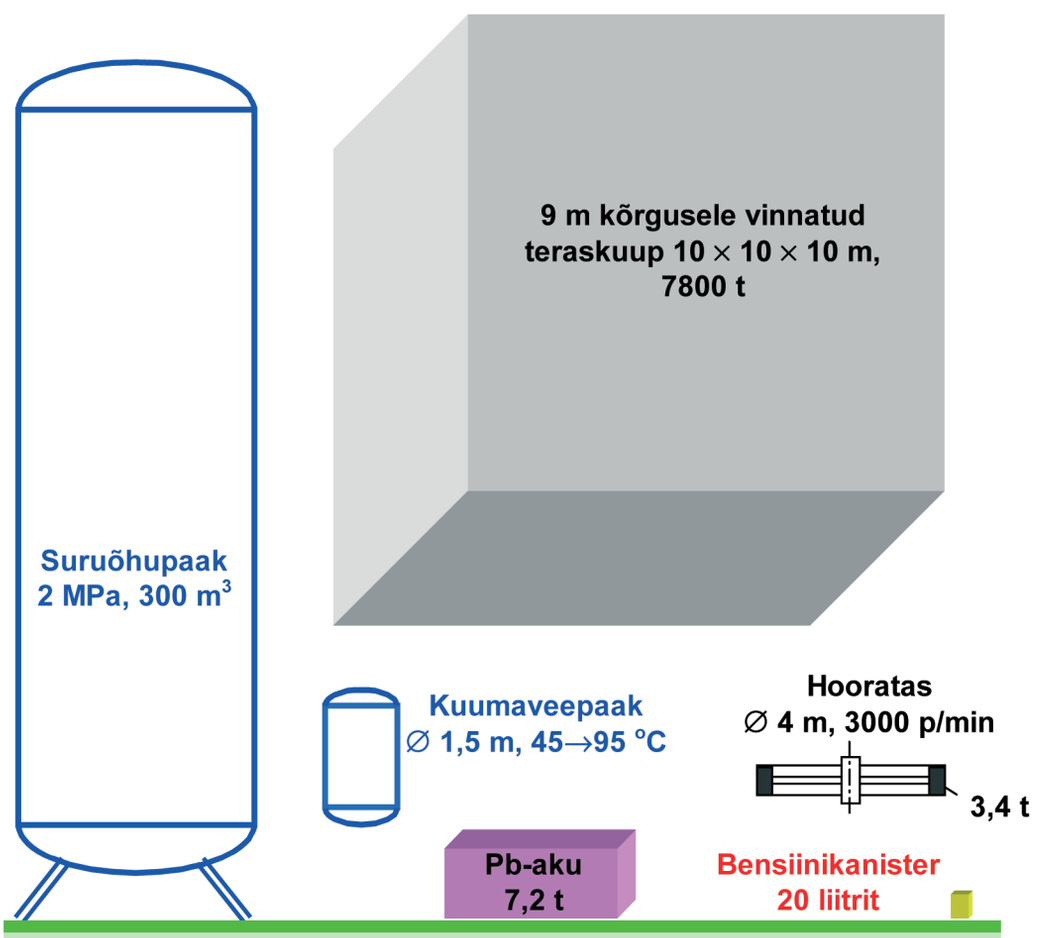
4.7 KOKKUVÕTE

Eri energialiike, nagu näitab käesolev peatükk, saab salvestada erisuguse efektiivsusega. Ligikaudsed võrdlusandmed energia erisalvestusvõime kohta tavalisematel juhtudel on esitatud kõrvalolevas tabelis **4.7.1**. Piltlikult on mõningad nendest andmetest esitatud joonisel **4.7.1.**

Tuleb aga arvestada, et energia erisalvestusvõime massiühiku kohta ei ole ainus kriteerium energiasalvesti valikuks. Mõnikord on tähtis erisalvestusvõime ruumalaühiku kohta, mõnikord aga on oluline mitte energia, vaid võimsus massi- või ruumalühiku kohta. Mõnikord peetakse tähtsaks salvestamise kiirust, mõnikord ehituse lihtsust, väga sageli kasutegurit, töökindlust ja eluiga. Endastmõistetavalt tuleb arvestada ka salvesti enda ja sellest saadava salvestatud energia maksumust.

Tabel 4.7.1. Energia erisalvestusvõime näiteid

Energia liik ja salvestamisviis	Erisalvestusvõime Wh/kg
Tuumaenergia	(300…1000) · 10^6
Keemiline energia (kütustena)	(3…40) · 10^3
Elektrienergia primaarelementides	50…600
Soojus (soojussalvestites)	50…500
Mehaaniline energia hooratastes	5…200
Elektrienergia akumulaatorites	10…100
Mehaaniline energia suruõhuna	3…60
Elektrienergia kondensaatoreis	0,01…3
Mehaaniline energia raskusajamites ja vedrudes	(0,3…20) · 10^{-3}
Elektrienergia induktiivpoolides	(0,03…0,3) · 10^{-3}



Joonis 4.7.1. Mõõtmete ligikaudse võrdluse näiteid eri energiasalvestusviisidel

5 Elektrijaamad ja energia-süsteemid

5.1 Üldmõisted 138

5.2 Põletuskütuselektrijaamad 142

5.3 Tuumaelektrijaamad 147

5.4 Hüdroelektrijaamad 151

5.5 Tuuleelektrijaamad 157

5.6 Geotermaalelektrijaamad 163

5.7 Päikeseelektrijaamad 167

5.8 Alajaamad 173

5.9 Energiasüsteemid 175

5 ELEKTRIJAAMAD JA ENERGIASÜSTEEMID

5.1 ÜLDMÕISTED

Elektrijaamaks nimetatakse enamasti rajatist, mis koosneb

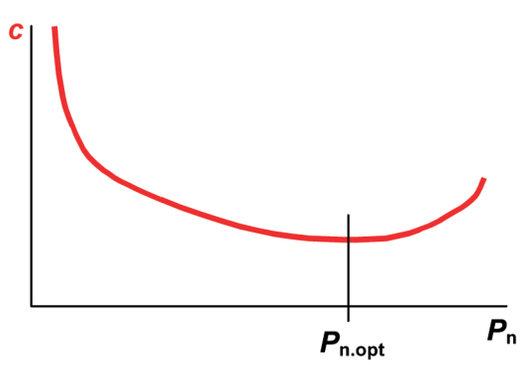
- primaarenergia (või primaarenergiakandja) vastuvõtu- ja töötlusseadmeist,
- seadmeist, mis muundavad primaarenergia elektrienergiaks,
- elektrienergia muundus- ja väljastusseadmeist,
- juhtimis- ja reguleerimisseadmeist,
- mitmesuguse otstarbega abiseadmeist,
- hoonestusest ja muudest ehitistest.

Enamasti koosneb elektrijaam mitmest **energiaplokist,** mis talitlevad rööbiti ja sisaldavad kõiki eelnimetatud osi. Plokid on tavaliselt ühesugused, kuid võivad ka üksteisest nii võimsuse kui ka ülesehituse poolest erineda.

Elektrijaamad on enamasti kohtkindlad, kuid võidakse kasutada ka rong-, laev- ja muid liikuvaid või teisaldatavaid elektrijaamu. Laiemas mõttes võidakse elektrijaamade hulka lugeda ka väikesevõimsuselisi kantavaid (nt mootorgeneraatoritel või akupatareidel põhinevaid) elektrienergiaallikaid.

Primaarenergia liigi järgi eristatakse

- kütustpõletavaid elektrijaamu (*põletuskütuselektrijaamu*),
- hüdroelektrijaamu,
- tuumaelektrijaamu,
- tuuleelektrijaamu,
- geotermaalelektrijaamu,
- päikeseelektrijaamu.



Joonis 5.1.1. Erikulutuste *c* olenevus seadme nimivõimsusest P_n (näide). $P_{n.opt}$ optimaalne nimivõimsus

Kütustpõletavad, tuuma-, geotermaal- ja päikeseelektrijaamad (viimastest väljaarvatult fotoelektrilised) põhinevad kas primaarenergia muundamisel soojuseks või soojuse otsesel kasutamisel, mistõttu nende kohta kasutatakse ühisnimetust **soojuselektrijaamad**.

Soojuselektrijaamad võivad olla ette nähtud üksnes elektrienergia saamiseks, kuid sageli annavad nad tarbijaile nii elektrienergiat kui ka soojust. Viimasel juhul nimetatakse neid **koostootmisjaamadeks**.

Elektrijaamade ja nende energiaplokkide majanduslikud näitajad (maksumus ja käidukulud võimsusühiku kohta, elektrienergia omahind jm) olenevad plokkide nimivõimsusest. Ploki igal elemendil (aurugeneraatoril, turbiinil, generaatoril, trafol jm) on oma **optimaalne võimsus**, mille puhul summaarsed kulutused võimsusühiku kohta (*erikulutused*) on minimaalsed (vt joonis **5.1.1**). Kui võimsus on alla optimaalse, on erikulutused suuremad, sest osa kulutusi sõltub võimsusest vähe või ei sõltu üldse. Kui võimsus on üle optimaalse, võivad kulutused järsult suureneda, kuna tuleb kasutada keerukamaid ja kallimaid tehnilisi lahendusi. Optimaalne võimsus oleneb vaadeldava seadme ehitusest, omapärasustest ja kasutusviisist ja võib ka ajaliselt (koos uute tehniliste lahenduste tekkimisega, tootmistehnoloogia arenguga või hinnasuhete muutumisega) muutuda, kusjuures enamasti tähendab see optimaalse võimsuse suurenemist.

Sageli, nagu näidatud ka joonisel, muutuvad erikulutused mõlemal pool optimumi suhteliselt aeglaselt, mistõttu võib rääkida teatavast *otstarbekate nimivõimsuste piirkonnast*. Samal ajal eksisteerivad aga ka *piirvõimsused*, millest allapoole või ülespoole ei ole antud tüüpi seadmeid otstarbekas valmistada ega kasutada.

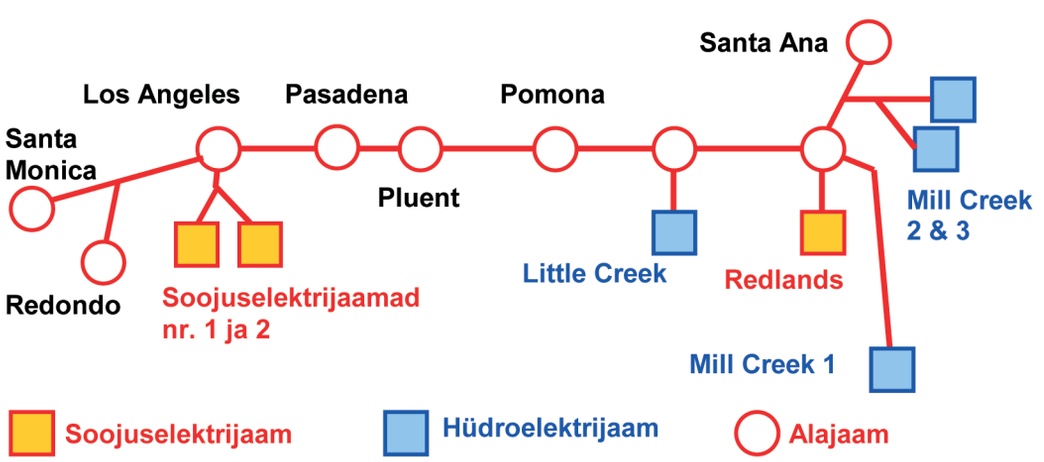
Et üksteist reserveerida, et koormust omavahel optimaalselt jaotada ning et tagada tarbijate töökindel elektrivarustus, ühendatakse elektrijaamad teatava territooriumi ulatuses **energiasüsteemiks**. Peale elektrijaamade kuuluvad sellesse süsteemi veel

- elektriedastusliinidest koosnevad **elektrivõrgud**,
- eri pingega elektrivõrkusid ühendavad või elektritarbijaid toitvad **alajaamad**.

Lihtsamaid, enamasti ühest või kahest trafost koosnevaid alajaamu, mis toidavad elektritarbijate madalpingevõrkusid, nimetatakse ka **trafopunktideks**.

Energiasüsteemid võidakse energiatootmise ja -jaotamise koordinatsiooni eesmärgil ühendada ühest keskusest juhitavaks **ühendenergiasüsteemiks**. Eri riikide energiasüsteemid (või ühendsüsteemid) võivad ühineda ühiseid eesmärke taotlevaks **energialiiduks**. Väga suure territooriumiga riigis võidakse eri regioonide ühendsüsteemid liita riigi **ühtseks energiasüsteemiks**. Ainsana maailma riikidest on selline ühtne energiasüsteem loodud Venemaal.

Maailma esimeseks tööstuslikku elektritarvitit toitvaks **energiaplokiks** tuleb lugeda inglise töösturi John Stephen Woolrichi aurumasinast ja väikepingelisest alalisvoolugeneraatorist koosnevat agregaati, mis seati üles Birminghamis aastal 1842 galvaanikavanni toiteks (vt jaotis **2.12**). Esimese **elektrijaama** ehitas oma elektrimasinatehase kaarlampvalgustuse toiteks Pariisi tööstur Zénobe Théophile Gramme (1826–1901) aastal 1873, esimese **avaliku** (igale soovijale elektrienergiat müüva) elektrijaama (võimsusega 11 kW) aga juunis 1879 San Franciscos USA leidur ning ettevõtja Charles Francis Brush (1849–1929). Elektroenergeetika jõudne areng algas linnahoonete hõõglampvalgustuse toiteks ettenähtud suuremate alalisvoolu-elektrijaamade rajamisega USA leiduri ning ettevõtja Thomas Alva Edisoni (1847–1931) ettevõtte *Edison Electric Lighting Co.* poolt aastal 1882 Londonis (12. jaanuaril, 170 kW) ja New Yorgis (4. septembril, lõppvõimsusega järgmisel aastal 1020 kW). Esimesed **trafoalajaamad** (5 ühetrafolist alajaama 12 km pikkusel liinil, jadamisi ühendatud primaarmähistega, toitegeneraatori võimsusega 25 kW, 2 kV, 133 Hz) võeti kasutusele aastal 1883 Londoni metroojaamade valgustuse toiteks. Pärast suletud magnetsüdamikuga trafo leiutamist aastal 1885 (vt jaotis **2.13**) algas **kõrgepingeliste vahelduvvooluelektrijaamade** ehitamine. Oktoobris 1890 valmis *London Electric Supply Corporation Ltd.* peainseneri Sebastian Ziani de Ferranti (1864–1930) projekti järgi Londoni äärelinnas Deptfordis selle aja maailma suurim elektrijaam (3 ühefaasilist aurumasingeneraatorit à 1000 kW, 85 Hz), mis pingel 10 kV toitis 14 km kaugusel asuvat kesklinna. Esimene **kolmefaasiline** (hüdro-) elektrijaam alustas talitlust Frankfurdi elektrotehnikanäituse puhul 24. augustil 1891 Neckari jõel Lauffenis (200 kW, 40 Hz) ja toitis 175 km pikkuse õhuliini kaudu pingel 15 kV näitusepaviljoni paigaldatud mootoreid ja valgustust. Kogu süsteemi projekteerisid firma *AEG* (*Allgemeine Elektricitäts-Gesellschaft*) peainsener Michael von Dolivo-Dobrowolsky (1862–1919) ja Müncheni era-inseneribüroo omanik Oskar von Miller (1855–1934). Esmakordselt lülitati kaks (teineteisest 2 km kaugusel asuvat) elektrijaama rööptalitlusse aastal 1892 Šveitsi elektrotehnika- ja masinatehase *Oerlikon* elektrivarustussüsteemis; esimene **energiasüsteem** (7 elektrijaama, mis ühendati omavahel õhuliinidega pingel 33 kV) loodi aastal 1899 Californias (*Southern California Edison Co.*, joonis **5.1.2**). Maailma esimene **ühendenergiasüsteem** *PJM* tekkis USAs aastal 1928, mil lülitusid rööptalitlusse kolme osariigi – Pennsylvania, New Jersey ja Marylandi energiasüsteemid. Esimeseks **energialiiduks** võib lugeda algselt 8 Euroopa riiki ühendavat organisatsiooni *Union pour la Coordination de la Production*



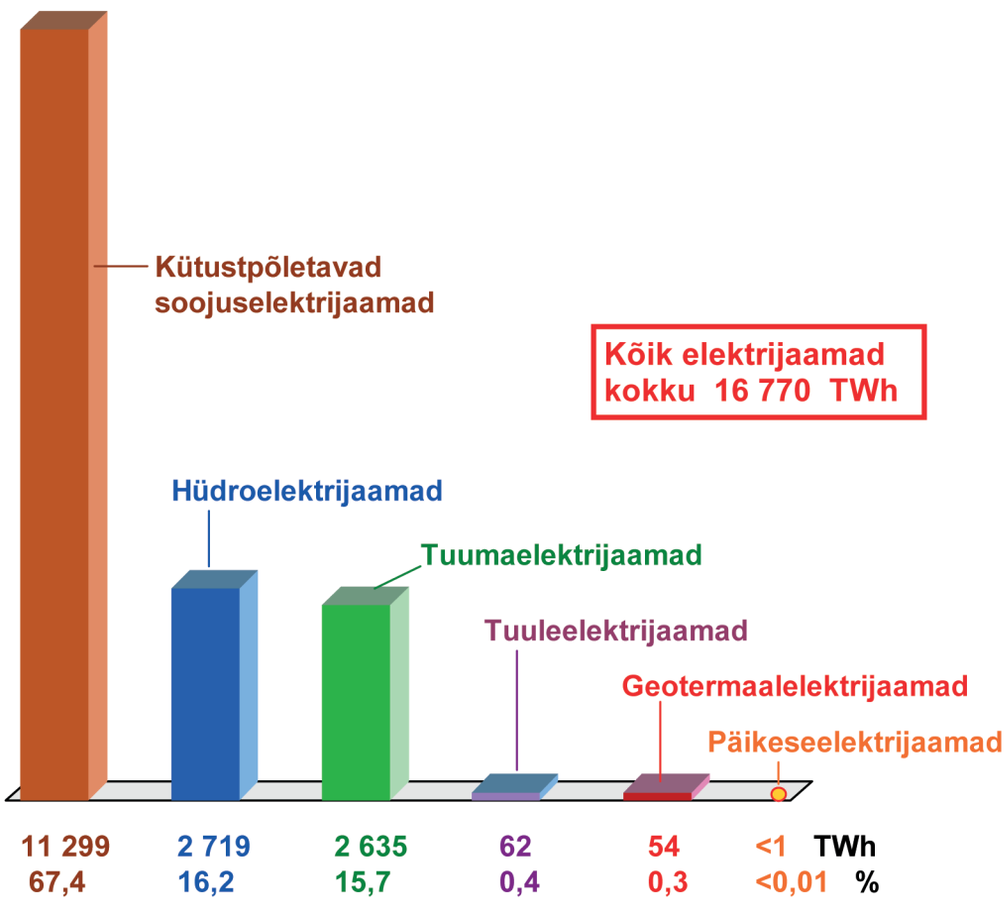
Joonis 5.1.2. Lõuna-California energiasüsteem 1899 (lihtsustatult)

et du Transport de l'Électricité, UCPTE (keskusega Viinis), mis loodi 23. mail 1951 ja reguleeris vastastikkuse alusel nii elektrienergia tootmist kui ka selle vahetust eri maade vahel. Aastast 1999 koordineerib see ainult elektrienergia edastamist, kannab nime *Union pour la Coordination du Transport de l'Électricité* (*UCTE*) ja seisuga 1.1.2007 osalesid selles 28 Euroopa riiki.

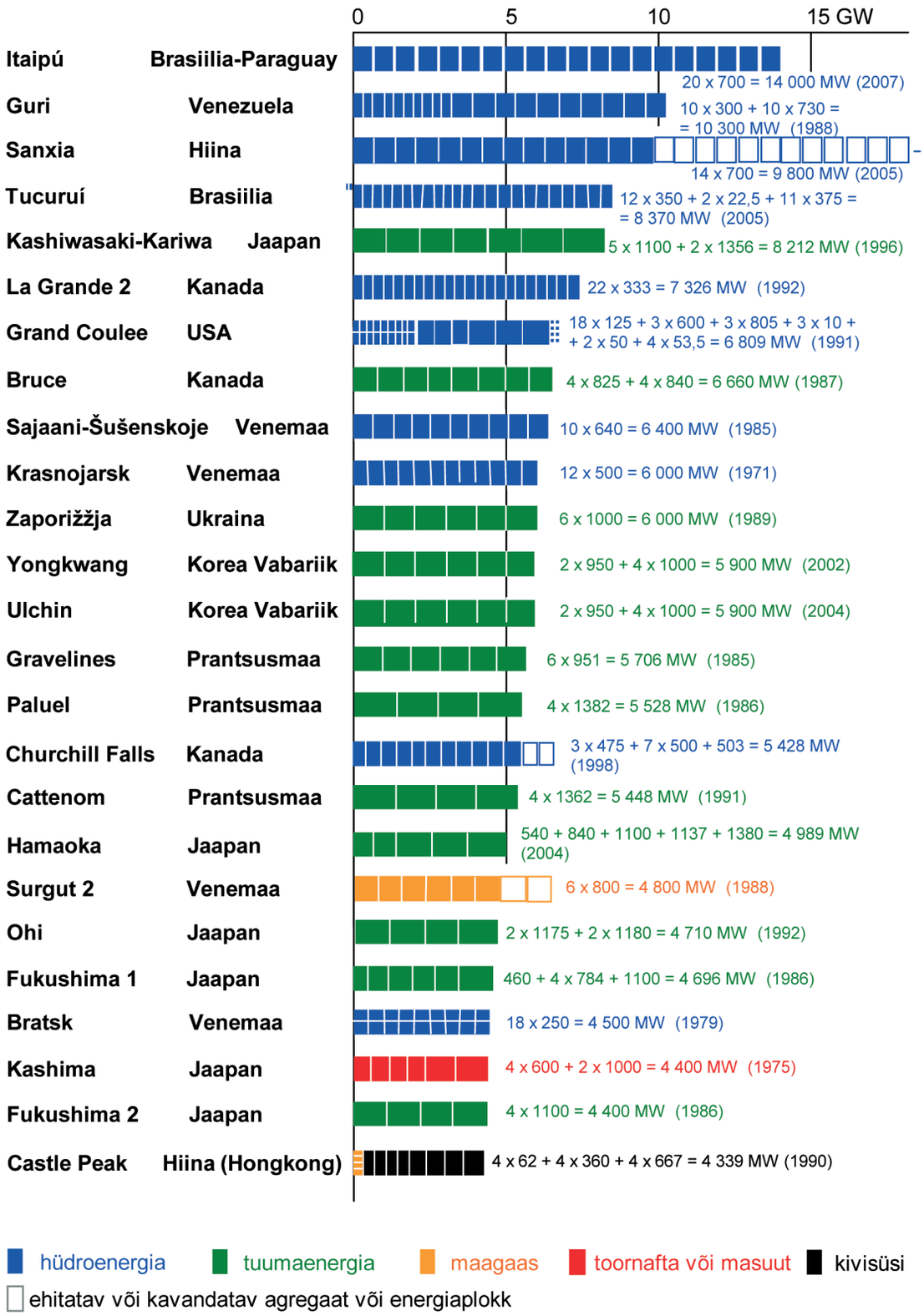
Eestis algas elektrienergia kasutamine aastal 1882, mil Kreenholmi Manufaktuuris seati sisse elektervalgustus. Esimene avalik elektrijaam (100 kW, alalisvool 2 x 220 V) valmis 2. novembril 1907 Pärnus, Eesti energiasüsteem (selleaegse nimega *AS Elektrikeskus*) loodi 8. mail 1939.

Thomas Alva Edison, keda võib lugeda suurtel elektrijaamadel ja -võrkudel põhinevate elektrivarustussüsteemide alusepanijaks, omandas iseseisvalt alghariduse (koolis käis ta ainult ühe aasta), tegi juba lapsena keemia- ja füüsikakatseid ja hakkas 12-aastaselt tööle rongi ajalehepoisina. Kuni aastani 1875 tegeles ta mitmel pool edukalt telegraafialase leiundusega, seejärel aga asutas aastal 1876 New Yorgi lähedal maailma esimese tööstusliku uurimis- ja innovatsioonilaboratooriumi. Aastal 1877 sündis seal esimene head tulu toov leiutis – esmakordselt heli salvestamist võimaldav *fonograaf*. Aastal 1879 huvitus ta elektervalgustusest, töötas välja lihtsad, töökindlad, pikaealised ja odavad süsiniit-hõõglambid, alustas aastal 1880 nende edukat tootmist ja ehitas, nagu juba nimetatud, aastal 1882 esimesed, enneolematult suured elektrijaamad koos avalike jaotusvõrkudega, et varustada elektrienergiaga järjest kasvavat hulka elektritarbijaid, kes kasutasid elektrit peaasjalikult hõõglampvalgustuse toiteks. Ühtlasi formuleeris ta elektrivarustuse üldpõhimõtted, mida ka praegu saab lugeda kehtivaiks, leiutas sulavkaitsmed, esimesed (elektrokeemilised) elektriarvestid ja palju muid madalpingeliste elektrivõrkude ja -juhistike komponente. Üldse sai ta üle 1200 patendi. 2007. aasta alguses oli USAs 9 Edisoni nime kandvat energiasüsteemi. Tema aastal 1878 asutatud ettevõttest *Edison Electric Light Company* on kujunenud maailma suurim elektrotehnikakontsern *General Electric*.

THOMAS ALVA EDISON



Joonis 5.1.3. Maailma elektrienergia toodang jaamaliikide kaupa aastal 2003 [1.7]



Joonis 5.1.4. Maailma 25 suurimat elektrijaama 1. juulil 2007

Eri elektrijaamaliikide osatähtsus on eri riikides erisugune; nii näiteks annavad Norras üle 99 % elektrienergiast hüdroelektrijaamad, Araabia maades saadakse aga kogu elektrienergia vedelkütusega või maagaasiga köetavatest elektrijaamadest. Eri elektrijaamade osa elektrienergia tootmisel maailmas tervikuna aastal 2003 on kujutatud joonisel **5.1.3**. Joonis näitab, et üle kahe kolmandiku maailma elektrienergiatarbest kaetakse kütuste (eeskätt fossiilkütuste) põletamise teel. Lähema 10

aasta jooksul on küll oodata teiste (eeskätt tuule- ja päikese-) elektrijaamade võimsuse kiire kasvu jätkumist, kuid nende osatähtsus jääb ikkagi ainult mõne protsendi piiridesse.

Kolmes tähtsamas elektrijaamaliigis – kütustpõletavates, hüdro- ja tuumaelektri-jaamades – annavad ligi 90 % kogu toodetavast elektrienergiast suured elektrijaamad võimsusega 1000 MW või enam. Energiaplokkide võimsus suurtes soojuselektrijaamades on tavaliselt 100…1300 MW, hüdroelektrijaamades aga 100…800 MW. Jaama piirvõimsus (enimalt lubatav võimsus) on enamasti määratud keskkonnakaitse kaalutlustega ja katastroofiriski piiramise nõuetega. Sellest seisukohast loetakse kütustpõletavate elektrijaamade piirvõimsuseks ligikaudu 4000 MW (gaaskütuse korral ligikaudu 6000 MW), tuumajaamade piirvõimsuseks aga ligikaudu 8000 MW. Hüdroelektrijaamade piirvõimsus on määratud jõgede geoloogiliste omapärasustega (sealhulgas paisjärve alla mineva territooriumi lubatava pindalaga) ja võib veerikaste, suure langusega ja kaljuste kallastega jõgede korral olla ligikaudu kuni 20 000 MW. Joonisel **5.1.4** on esitatud maailma 25 suurimat elektrijaama 2007. aasta keskel.

Maailma võimsaimaks elektrijaamaks on kujunemas Sanxia (tuntud ka kui *Three Gorges*, 'Kolm Kuristikku') hüdroelektrijaam Jangtse jõel Hiinas, mille ehitamine algas aastal 1994 ja millesse tuleb kolm masinasaali 32 hüdroturbiinagregaadiga à 700 MW (kokku 22 400 MW). Detsembris 2005 oli juba valmis ning talitluses esimene masinasaal 14 agregaadiga, mille koguvõimsus on 9800 MW.

5.2 PÕLETUSKÜTUSELEKTRIJAAMAD

Kütuseid põletavates elektrijaamades võidakse elektrigeneraatoreid käitada

- auruturbiinidega,
- gaasiturbiinidega,
- diiselmootoritega,
- bensiinimootoritega,
- gaasimootoritega.

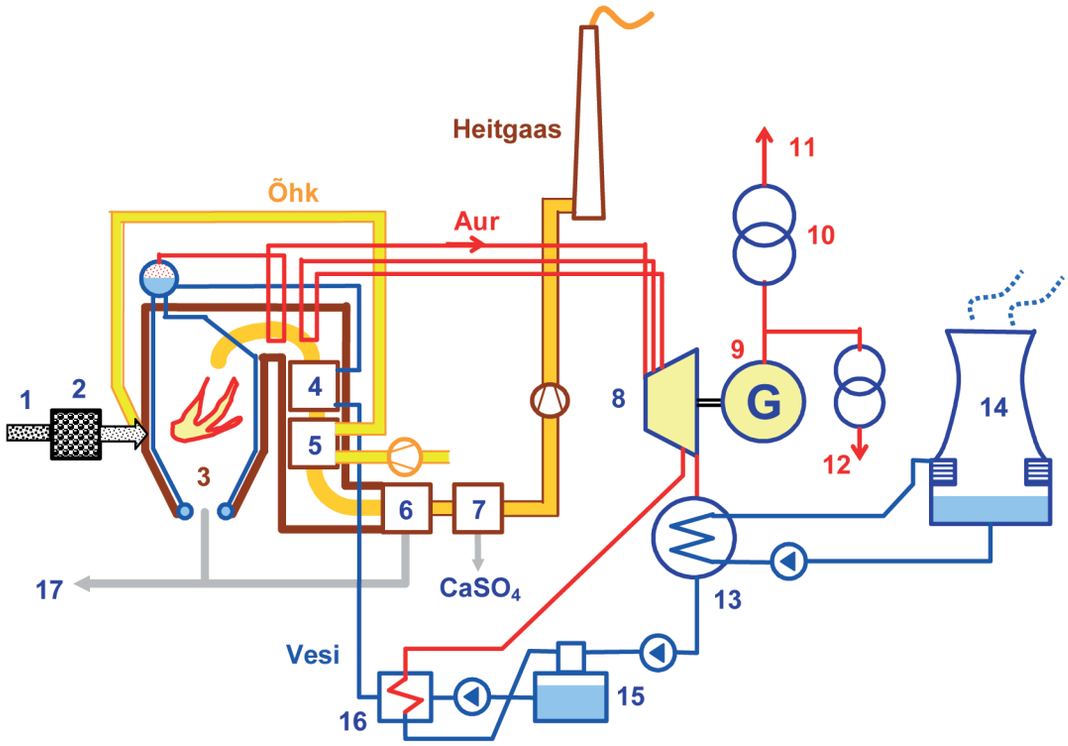
Kütuse põletamine võib toimuda ka kütuseelementides (vt jaotis **2.6**) ja magnetohüdrodünaamilistes generaatorites (vt jaotis **2.7**).

Suurtes kütustpõletavates auruturbiinelektrijaamades saadakse kõige sagedamini üksnes elektrienergiat. Kuna sellised elektrijaamad on seadistatud kondensatsioonturbiinidega, nimetatakse neid ka ***kondensatsioonelektrijaamadeks***. Sellise elektrijaama üks võimalikest tehnoloogilistest põhimõtteskeemidest on esitatud joonisel **5.2.1**.

Suurtes kondensatsioonelektrijaamades (võimsusega 1…8 GW) on energiaploki generaatori võimsus tavaliselt vahemikus 100…600 MW, kuid võib olla ka suurem (kuni 1300 MW). Energiaplokke on tavaliselt 2 kuni 6, kuid võib olla ka enam (nt Balti elektrijaamas oli selle valmimisel 12 energiaplokki). Kütuste korral, mille põletamine ei tekita eriti suuri tehnilisi probleeme (maagaas, toornafta, masuut, kivisüsi), on igas energiaplokis tavaliselt üks aurukatel, suure tuhasisaldusega kütuste korral (pruunsüsi, põlevkivi), mil võimsate katelde ehitamine on tunduvalt raskem, võib katlaid olla rohkem (tavaliselt kaks). Katlaist väljuva auru rõhk on tavaliselt 13…24 MPa ja temperatuur 540…560 °C. Kui ploki võimsus on üle 1000 MW, läheb turbiini ja generaatori konstruktsioon sedavõrd keerukaks ja kalliks, et mõnikord peetakse otstarbekamaks kasutada kahest osast koosnevat (niinimetatud *kahevõllilist*) turbiingeneraatoragregaati.

Maailma võimsaimad ühevõllilised auruturbiingeneraator-agregaadid (1382 MW) talitlevad Palueli tuumaelektrijaamas Prantsusmaal (vt joonis **5.1.4**); esimene neist paigaldati aastal 1984. Võimsaimatest kahevõllilistest agregaatidest (1300 MW) paigaldati kaks esimest aastail 1972 ja 1973 Cumberlandi kivisöe-elektrijaama (Tennessee, USA). Eestis, Narva elektrijaamades on suurimate agregaatide võimsus 215 MW.

Kondensaatori jahutusvett võidakse võtta veekogudest (Narva elektrijaamades näiteks Narva veehoidlast). Kui sobivaid veekogusid jaama läheduses ei ole, kasutatakse ringlevat vett, mida jahutatakse, nagu näidatud joonisel **5.2.1**, jahutustornides. Võidakse kasutada ka õhkjahutusega kondensaatoreid.



Joonis 5.2.1. Kütustpõletava kondensatsioonelektrijaama tehnoloogiline põhimõtteskeem (näide).
***1* kütus, *2* kütusetöötlus, *3* aurukatla kolle, *4* vee eelsoojendi, *5* õhu eelsoojendi, *6* lendtuhafilter, *7* väävlieraldusfilter (keevkihtkatlal puudub), *8* auruturbiin, *9* generaator, *10* pinget tõstev trafo, *11* energiasüsteemi võrku antav elektrienergia, *12* omatarbeks vajalik elektrienergia, *13* aurukondensaator, *14* jahutustorn, *15* deaeraator (õhueemaldi) ja veepaak, *16* toitevee regeneraator, *17* tuhaärastus**

Võimsate generaatorite nimipinge on enamasti 15…20 kV. Et anda energiat energiasüsteemi võrku (enamasti pingel 110…500 kV), nähakse elektrijaamas ette iga generaatori jaoks pingetkõrgendav trafo. Jaama elektriajamite ja muude elektritarvitite toiteks nähakse ette *omatarbetrafod* sekundaarpingega 0,4…10 kV. Omatarbeks kulutavad kondensatsioonelektrijaamad, olenevalt kasutatava kütuse liigist, enamasti 5…8 % generaatorite elektrienergiatoodangust (Narva elektrijaamades on see veidi üle 10 %).

Kütustpõletava kondensatsioonelektrijaama kasuteguri all mõeldakse enamasti generaatorite poolt toodetava elektrienergia (*brutotoodangu*) ja kulutatavas kütuses sisalduva keemilise energia suhet; selguse mõttes nimetatakse seda ka *brutokasuteguriks*. Väga sageli kasutatakse selle näitaja asemel piltlikumalt aga kütusekulu (enamasti taandatuna tingkütusele) toodetud elektrienergia ühiku kohta. Kasuteguri saab sel juhul avaldada valemiga

$$\eta = \frac{1}{8{,}14k}$$

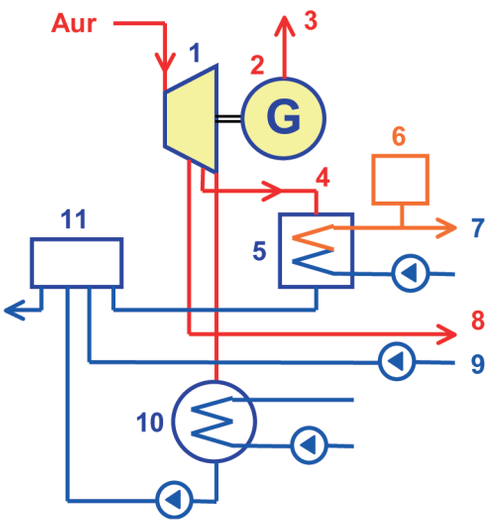
η jaama (bruto)kasutegur
k kütuse erikulu kg/kWh

Sageli esitatakse kütuse erikulu mitte toodetud, vaid jaamast **väljastatud** energia ühiku kohta (jaama *netotoodangu* järgi). Sel juhul saab analoogiliselt eeltoodud valemiga määrata jaama *netokasuteguri*, mis on vastavalt väiksem kui eelnimetatud brutokasutegur. Kui kütusekulu sellise määratluse järgi tahetakse arvutada jaama brutokasutegurit, tuleb kasutada valemit

$$\eta = \frac{1}{8{,}14(1-w_{\mathrm{O}})k_{\mathrm{v}}}$$

η jaama brutokasutegur
k_{v} kütuse erikulu jaamast väljastatud energia järgi kg/kWh
w_{o} jaama suhteline elektrienergia-omatarve

Näide. Elektrijaama kütusekulu väljastatud elektrienergia ühiku kohta on 0,32 kgce/kWh ja jaama omatarve on 7 % kogu toodetud elektrienergiast. Küsitakse, kui suur on jaama brutokasutegur. Vastavalt eeltoodud valemile on see
$\eta = 1 / [8{,}14\ (1 - 0{,}07)\ 0{,}32] = 1 / 2{,}42 = 0{,}41$,
mida võib lugeda küllaltki heaks väärtuseks.

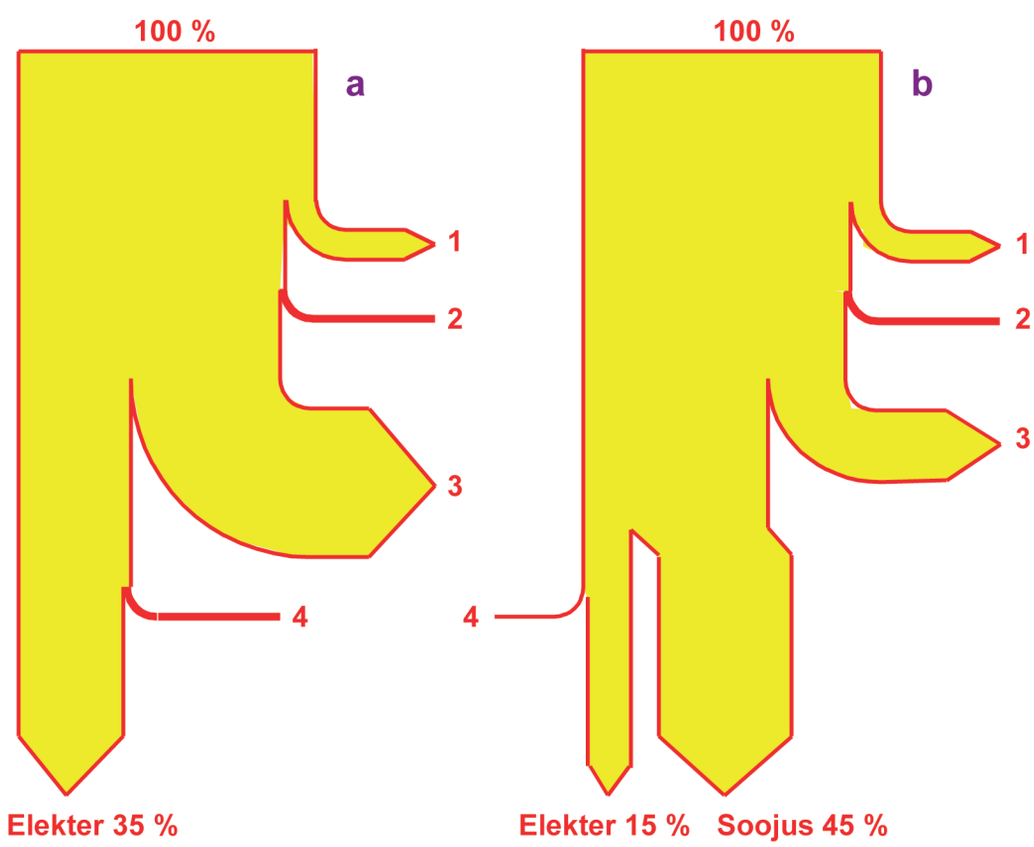


Joonis 5.2.2. Vaheltvõtuturbiini kasutamine koostootmisjaamas (näide).
***1* turbiin, *2* generaator, *3* toodetav elektrienergia, *4* kaugküttetarbeks võetav aur rõhuga 0,05…0,3 MPa, *5* soojusvaheti, *6* soojussalvesti (võib ka puududa), *7* kaugküttevõrku antav kuum vesi, *8* tööstusele tehnoloogilisteks vajadusteks antav aur rõhuga 0,5…2 MPa, *9* kondensaadi tagastus tööstustarbijatelt, *10* kondensaator, *11* deaeraator**

Kütustpõletavate kondensatsioonelektrijaamade brutokasutegur oleneb energiaplokkide ehitusest, võimsusest ning auru parameetritest ja on enamasti piirides 35…40 %, parimatel juhtudel kuni 43 %. Uusimate seadmete ja kütuste uusima põletustehnika rakendamisel loodetakse saavutada kasutegur kuni 50 %.

Auruturbiinelektrijaamades saab kütuses sisalduvat energiat suuremal määral ära kasutada, kui koos elektrienergiaga väljastada elektrijaamast **soojust**. Selliseid jaamu, nagu eespool juba öeldud, nimetatakse ***koostootmisjaamadeks*** ja nendes kasutatakse enamasti *vaheltvõtu-auruturbiine* (vt jaotis **2.3**); üks võimalikest tehnoloogilistest põhimõtteskeemidest on kujutatud joonisel **5.2.2**.

Koostootmisjaamades kasutatavate vaheltvõtuturbiin-generaatorite elektriline võimsus on tavaliselt vahemikus 50…250 MW, kuid võib vastavalt tegelikule vajadusele olla ka väiksem. Auru vaheltvõttusid võib olla üks või rohkem. Peaaegu alati nähakse neist üks, reguleeritav ning suhteliselt madalarõhuline väljavõte ette soojuse andmiseks kaugküttesüsteemi, kuid tööstuslike tehnoloogiliste soojustarbijate olemasolul võidakse lisaks sellele, nagu näidatud joonisel **5.2.2**, kasutada ka kõrge-



Joonis 5.2.3. Kondensatsioonelektrijaama (*a*) ja koostootmisjaama (*b*) energiabilanss (lihtsustatult, näide).
***1* kaod katelagregaadis, *2* kaod aurutorustikus, *3* kondensaatori kaudu eemalduv soojushulk, *4* kaod generaatoris**

marõhulist (rõhuga kuni 2 MPa) väljavõtet. Koostootmisjaama soojuslik võimsus on enamasti 2…4 korda suurem kui elektriline.

Soojustarbijatele antavas aurus arvestatakse ka auru kondenseerumisel eralduvat soojust. Seetõttu on koostootmisjaama üldkasutegur (võttes arvesse nii elektrienergia kui ka soojuse väljastamist) kõrgem kui kondensatsioonjaama oma, olles enamasti vahemikus 50…65 % (vt joonis **5.2.3**).

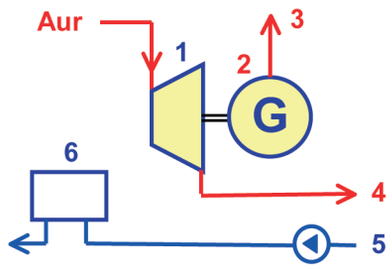
Et koostootmisjaam talitleks suurima võimaliku kasuteguriga, tuleb soojuskoormuse muutumisel vastavalt reguleerida ka jaama elektrilist võimsust. Optimaalne reguleerimine on võimalik üksnes siis, kui jaam on ühendatud energiasüsteemiga, milles koostootmisjaamast saadava võimsuse muutumisel saab vajalikul viisil suurendada või vähendada teiste elektrijaamade võimsust. Lähemalt vaadeldakse seda küsimust jaotises **5.9**.

Koostootmisjaama soojuskoormuse ajalist ebaühtlust saab tasandada, nagu näidatud joonisel **5.2.2**, soojussalvestite (enamasti suuremahuliste kuumaveepaakide) abil. Piisavalt ühtlase soojustarbimise korral võib vajadus soojussalvesti järele ära langeda.

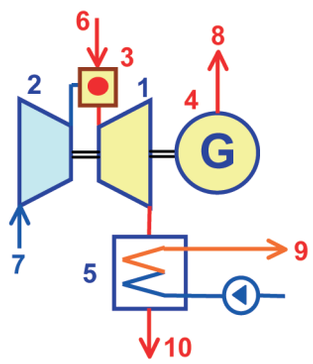
Maailma esimene vasturõhuturbiinide kasutamisel põhinev, linna kaugkütte teel soojusega varustav koostootmisjaam ehitati aastal 1893 Hamburgis. Eestis algas elektri ja soojuse koostootmine Tallinna elektrijaamas aastal 1959. Praegu varustab suurt osa Tallinnast Iru koostootmisjaam, mis alustas talitlust aastal 1980 ja mille elektriline võimsus alates aastast 1982 on 190 MW.

Veel kõrgema kasuteguri (kuni 85 %) saab koostootmisjaamas saavutada siis, kui kogu turbiini läbiv aur kasutatakse ettevõtte tootmisprotsessides või küttesüsteemis. Selliseid turbiine nimetatakse vasturõhuturbiinideks ja nende kasutamise põhimõtteline tehnoloogiline skeem on esitatud joonisel **5.2.4**. Vasturõhuturbiinidel põhinevad koostootmisjaamad leiavad kasutamist peamiselt tööstusettevõtetes ja suurlinnade soojusvarustuses.

Peale suurte auruturbiinelektrijaamade leiavad kasutamist ka väiksemad kondensatsioon- ja koostootmisjaamad, nt elektrilise nimivõimsusega 1…100 MW. Sellised jaamad on sageli otstarbekad ettevõtete ja linnade elektrivarustussüsteemides, eriti kui neis saab kasutada kohalikke kütuseliike (ettevõtete põlevaid tootmisjääke, puiduhaket, turvast jms) või kui energiatarbijad on energiasüsteemi suurtest soojuselektrijaamadest suhteliselt kaugel.



Joonis 5.2.4. Vasturõhuturbiini kasutamise põhimõte (näide). *1* turbiin, *2* generaator, *3* saadav elektrienergia, *4* tehnoloogilistele tarbijatele ja küttesüsteemi minev aur rõhuga 0,2…2 MPa, *5* kondensaadi tagastus, *6* deaeraator



Joonis 5.2.5. Gaasiturbiin-generaator-agregaadi tehnoloogiline põhimõtteskeem (näide, tugevasti lihtsustatult). *1* gaasiturbiin, *2* kompressor, *3* põlemiskamber, *4* generaator, *5* soojusvaheti, *6* gaas- või vedelkütus, *7* õhk, *8* saadav elektrienergia, *9* kuuma veena saadav soojus, *10* heitgaas

Auruturbiinelektrijaamad vajavad vett eeskätt kondensaatori jahutamiseks, sest aurukatel, turbiin ja kondensaator koos abiseadmetega moodustavad suletud kontuuri, milles vee kadu on suhteliselt väike. Veevaestes regioonides, kuid ka odava gaas- või vedelkütuse olemasolul võidakse seetõttu kasutada **gaasiturbiinelektrijaamu**, mille üks võimalikest tehnoloogilistest skeemidest on esitatud joonisel **5.2.5**.

Gaasiturbiine valmistatakse võimsusega 1…150 MW ja gaasiturbiin-elektrijaamade võimsus võib olla kuni 1000 MW ja isegi enam. Kuna gaasiturbiine saab käivitada tunduvalt kiiremini kui auruturbiine (enamasti mõne minutiga) sobivad nad kasutamiseks varutoiteallikatena ja talitlemiseks energiasüsteemi tippvõimsuse ajal.

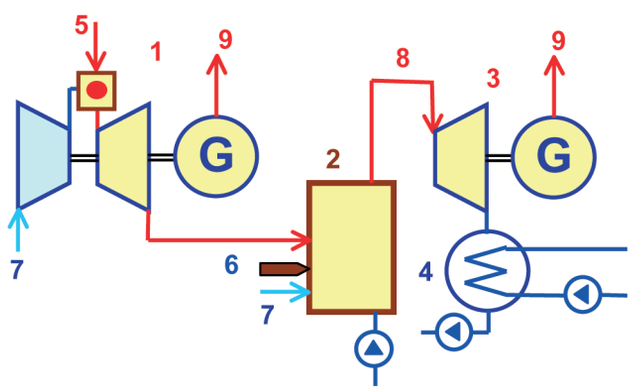
Heitgaasi kõrge temperatuur (tavaliselt enam kui 400 °C) võimaldab kasutada gaasiturbiinelektrijaamu ka soojuse saamiseks, nagu see on näida-

tud joonisel **5.2.5**. Ka saab gaasiturbiine kombineerida auruturbiinidega (joonis **5.2.6**); selliste ***kombi-elektrijaamade*** kasutegur on kondensatsioon-auruturbiinide kasutamisel ligikaudu 60 %.

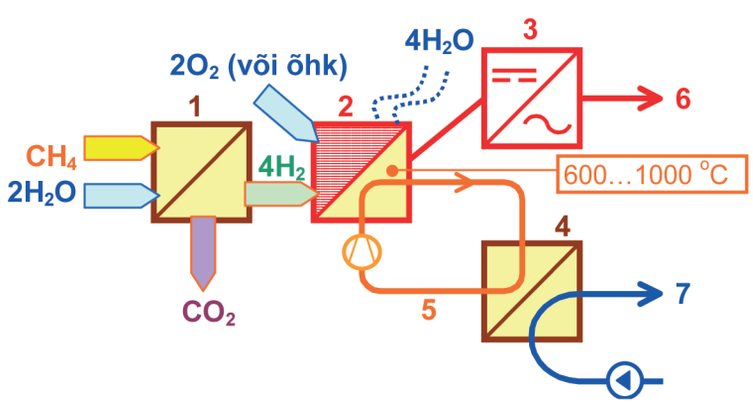
Maailma esimese gaasiturbiin-generaator-agregaadi (võimsusega 4 MW) paigaldas varuenergiaallikana Šveitsi elektrotehnikakontsern *Brown Boveri & Cie* aastal 1939 Neuchâteli elektrijaama. Maailma võimsaim gaasiturbiinelektrijaam (1400 MW, 20 agregaadiga à 70 MW) valmis aastal 1983 Rijadis (Saudi Araabia).

Suhteliselt väikese vajaliku võimsuse korral, kui auru- ja gaasiturbiinid ennast ei õigusta, võidakse kasutada **diiselelektrijaamu**. Kuna diiselmootoreid toodetakse väga laias valikus – nimivõimsusega 1 kW kuni 10 MW, sobivad nad kasutamiseks nii väikeelektrijaamades võimsusega kuni 200 MW kui ka teisaldatavates elektritoiteagregaatides. Neid saab käivitada mõne kuni mõnekümne sekundiga, mis võimaldab neid rakendada vastutusrikaste ehitiste (haiglate, pankade, sõjaväe-, side- ja valitsusasutuste) töökindlate varutoiteallikatena. Diiselagregaatide elektriline kasutegur on ligikaudu 40 %, kuid kui kasutada ka diiselmootorist eralduvat soojust (nagu koostootmisjaamades), võib saavutada üldkasuteguri kuni 80 %.

Maailma esimese diiselelektrijaama (6 agregaadiga à 300 kW) ehitas Kiievisse aastal 1904 Saksamaa mootoritehas *MAN* (*Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg*). Eestis on diiselelektrijaamad olnud kasutusel enne kõrgepingevõrkude väljaarenemist mitmes väikelinnas. Nüüdisaja üks moodsaimatest diiselelektrijaamadest (firmalt *Siemens*, elektrilise võimsusega 1600 ja soojusvõimsusega 1840 kW) asub Saksamaa riigipäevahoones Berliinis. Muuhulgas on selles ette nähtud suvise soojusülejäägi salvestamine talveks maa-alusesse soojussalvestisse, millega on saavutatud jaama aastane kasutegur 90 %.



Joonis 5.2.6. Gaasiturbiini ja auruturbiini koostoime kombielektrijaamas (näide, tugevasti lihtsustatult).
***1* gaasiturbiin-generaator-agregaat, *2* aurukatel, *3* auruturbiinagregaat, *4* kondensaator,**
***5* gaasiturbiinikütus, *6* katlakütus, *7* õhk, *8* aur, *9* saadav elektrienergia**



Joonis 5.2.7. Kütuseelement-koostootmisjaama tehnoloogiline põhimõtteskeem (näide).
***1* reformer, *2* kütuseelemendipatarei, *3* vaheldi, *4* soojusvaheti, *5* kõrgetemperatuuriline soojuskandja (nt õhk),**
***6* saadav elektrienergia, *7* saadav soojus**

Ennustatakse, et aastal 2010 võivad tulla laiemalt kasutusele ka **kütuseelement-koostootmiselektrijaamad**, mis põhinevad kõrgetemperatuurilistel kütuseelemendipatareidel elektrilise võimsusega 10…1000 kW. Sobivaimaks kütuseks on nendes jaamades maagaas, mida saab kasutada kas otse või läbi *reformeri*, milles sellest eraldatakse vesinik (joonis **5.2.7**).

Kütuseelement-koostootmisjaamad sobiksid hästi hoonete (sealhulgas elamute) kohalikeks toiteallikateks ja nende massiline kasutamine tähendaks üleminekut energia *hajutatud tootmisele* koos energia edastuskadude ärajäämisega.

Kütuseelementide katseline rakendamine kohtkindlates energiapaigaldistes algas 1960ndatel aastatel. Suurim sellist tüüpi, fosforhappe-elektrolüüdiga kütuseelementidel põhinev elektrijaam (4,8 MW, kasuteguriga 29 %) valmis aastal 1982 New Yorgis ja oli katselises käidus 2 aastat. Alates ligikaudu aastast 2000 toodavad mitmed energeetikaseadmefirmad kompaktseid kütuseelement-elektri- ja koostootejaamu elektrilise võimsusega peaasjalikult vahemikus 50…250 kW. Nende hulgas väärib esiletõstmist aastal 2003 Hannoveri linnavõrgus kontserni *Siemens AG* poolt paigaldatud kõrgetemperatuurilistel tahkoksiid-kütuseelementidel põhinev koostootmisjaam elektrilise võimsusega 225 ja soojusvõimsusega 160 kW, mis talitleb üldkasuteguriga ligikaudu 80 %.

5.3 TUUMAELEKTRIJAAMAD

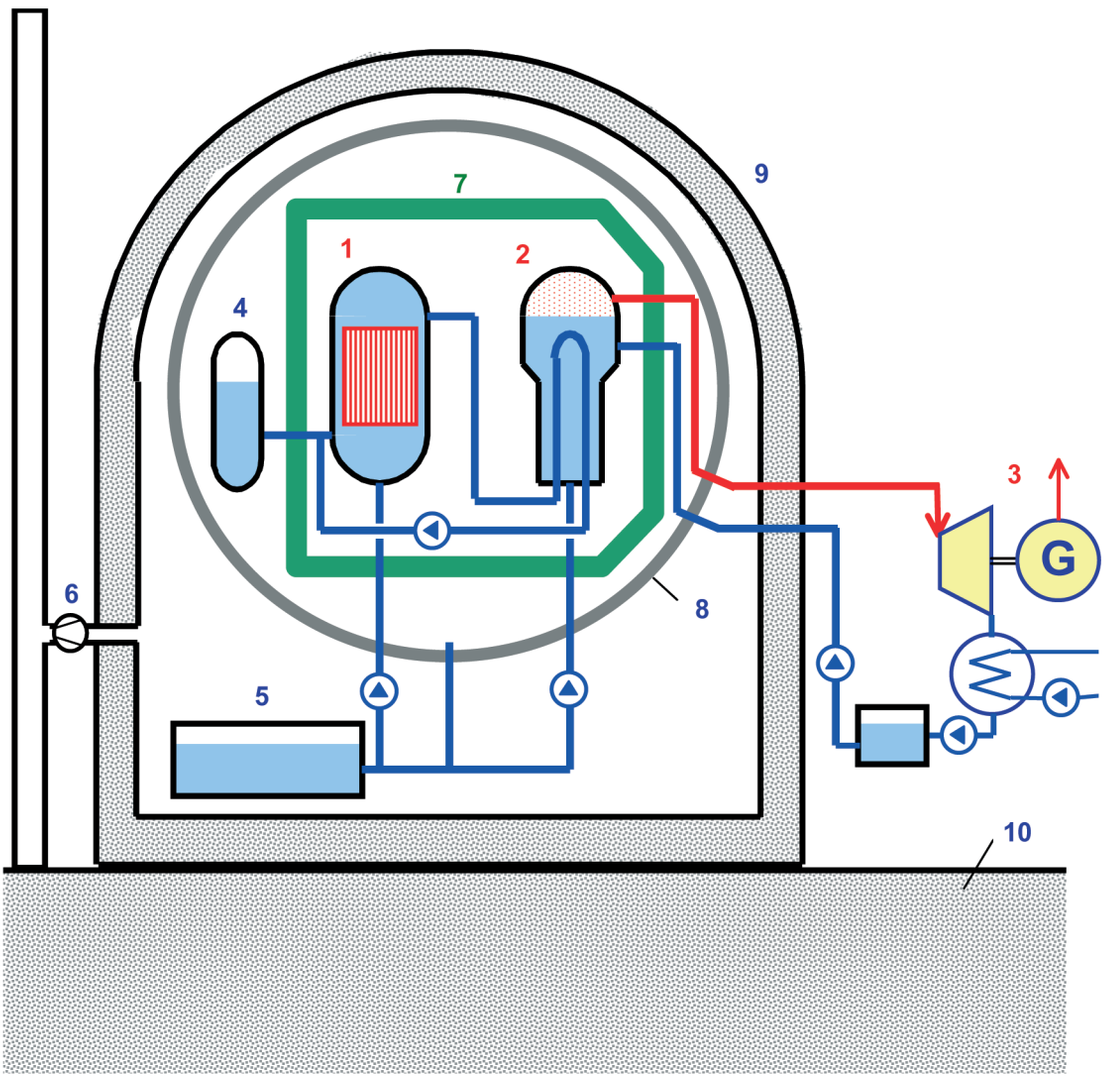
Tuumajaamade osatähtsus maailma elektrienergiatoodangus oli aastal 2003 ligi 16 %. Enamasti kasutatakse neis survevesi- ja keevvesireaktoritega energiaplokke elektrilise võimsusega 400 kuni 1400 MW (vt joonis **5.1.4**), kusjuures nende arv jaamas on tavaliselt vahemikus 1 kuni 6. Aasta 2007 alguses oli maailma tuumajaamades kasutusel kokku 435 reaktorit elektrilise koguvõimsusega 368 GW ja ehitamisel oli 30 reaktorit. Suurim energiaplokk, Prantsusmaa, Saksamaa ja Suurbritannia firmade koostöös projekteeritud ülitöökindla survevesireaktoriga (elektriline võimsus 1600 MW, vt jaotis **2.8**) on ehitamisel Olkiluoto tuumaelektrijaamas Soomes.

Tuumaelektrijaamade ehituses pööratakse erilist tähelepanu ohutuse tagamisele mitmesuguste võimalike rikete puhul. Näitena on joonisel **5.3.1** kujutatud survevesireaktoriga energiaploki ehituspõhimõte, milles võib eristada järgmisi *kaitsebarjääre*:

1) reaktori aktiivtsoonis – kütusevarda tsirkooniumkest sulamistemperatuuriga 1855 °C;
2) reaktori tugev teraskest;
3) reaktorit, aurugeneraatorit ja veeringlustorustikku ümbritsev, radioaktiivset kiirgust tõkestav eribetoonist kinnine ruumtarind;
4) rõhukindel, enamasti sfäärikujuline, eelnimetatud elemente ja ruumtarindit ümbritsev teraskest;
5) kogu reaktoriseadmestikku väljast kaitsev betoonkuppel, mis peab vastu pidama nt ükskõik millisele maailma maade relvastuses olevale raketile ning välistama radioaktiivsete ainete väljapääsu reaktori purunemisel;
6) vundamendiplaat paksusega ligikaudu 10 m, mis peab kinni pidama reaktori aktiivtsooni täielikul sulamisel tekkiva metallikoguse ning välistama selle jõudmise pinnasesse.

Joonisel on skemaatiliselt kujutatud ka reaktori ja aurugeneraatori hädajahutussüsteem, mis rakendub soojuskandja (vee) normaalse ringluse rikke korral. Ploki mitteradioaktiivsed osad (turbiingeneraatoragregaat, aurugeneraatori toitepump, osa aurugeneraatori vee- ja aurutorustikust) paiknevad väljaspool ülalnimetatud kaitsekuplit.

Tuumaelektrijaamades ei ole võimalik saada sama kõrgeid auru parameetreid nagu põletuskütuselektrijaamades. Näiteks survevesireaktori kasutamisel ei ole reaktori ja aurugeneraatori vahelise soojuskandja (vee) rõhk tavaliselt üle 7 MPa ega temperatuur üle 300 °C, mistõttu aurugeneraatorist saadava auru rõhk on piirides 4…6 MPa ja temperatuur 250…300 °C. Seetõttu on ka tuumaelektrijaamade kasutegur madalam (tavaliselt 24…26 %), turbiinide mõõtmed aga suuremad. Sageli valitakse turbiinide nimi-pöörlemissagedus mitte 3000, vaid



Joonis 5.3.1. Tuumaelektrijaama survevesireaktoriga energiaploki ehituspõhimõte (tugevasti lihtsustatult).
***1* reaktor, *2* aurugeneraator, *3* turbiingeneraatoragregaat, *4* vee paisupaak, *5* hädajahutuse veevaru,**
***6* ventilatsioon, *7* kiirguskaitseümbris, *8* rõhukindel terasümbris, *9* betoonkuppel, *10* betoon-vundamendiplaat**

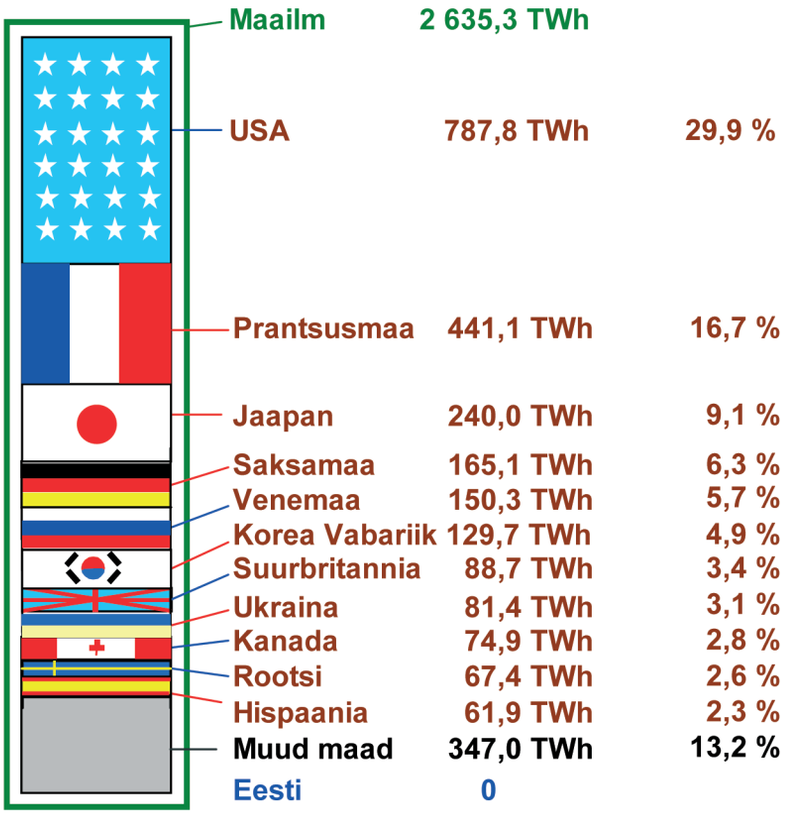
1500 1/min ja ühes energiaplokis nähakse tihti ette mitte üks, vaid kaks turbogeneraatoragregaati.

Nõuded tuumaelektrijaamade ohutusele on viimase 20 aasta jooksul, eriti pärast Tšornobili tuumaelektrijaama katastroofi, mis toimus 1986. aasta aprilli lõpus (vt jaotis **2.8**), tugevasti karmistunud, mistõttu uute tuumajaamade ehitamine on läinud kallimaks ja mitu olemasolevat tuumajaama, mille ohutust ei saa viia vastavusse rahvusvaheliselt kehtivate nõuetega, on tulnud sulgeda.

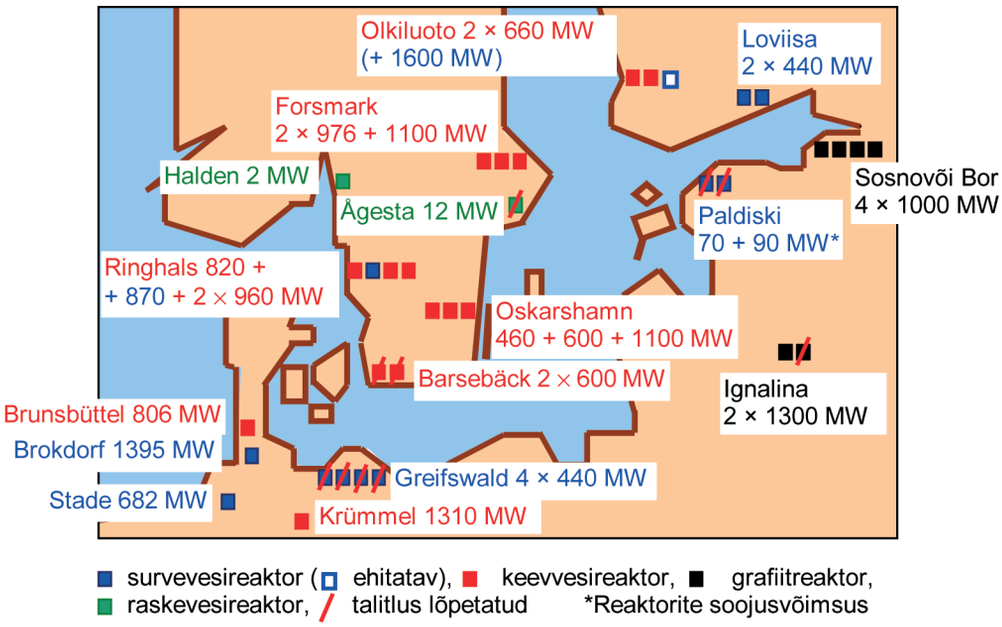
Tuumaelektrijaamu ehitatakse peaasjalikult maades, kus ei ole oma fossiilkütusemaardlaid ja tavakütuste vedu mujalt võib kujuneda liiga kalliks (Jaapan, Prantsusmaa, Rootsi jm). Tähtis on ka tuumaelektrijaamade üks põhieelistest – õhku saastavate ja kliima soojenemist põhjustavate heitgaaside puudumine. Selle tõttu on huvi tuumaelektrijaamade vastu hakanud viimastel aastatel suurenema. Tuumaelektrijaamade elektritoodangust maade kaupa aastal 2003 annab ÜRO statistika-aastaraamatu [1.7] alusel ettekujutuse joonis **5.3.2**, nende paigutustihedusest Läänemere piirkonnas aga joonis **5.3.3**.

Tuumaelektrienergia tarbimine elaniku kohta on piltlikult kujutatud joonisel **5.3.4**.

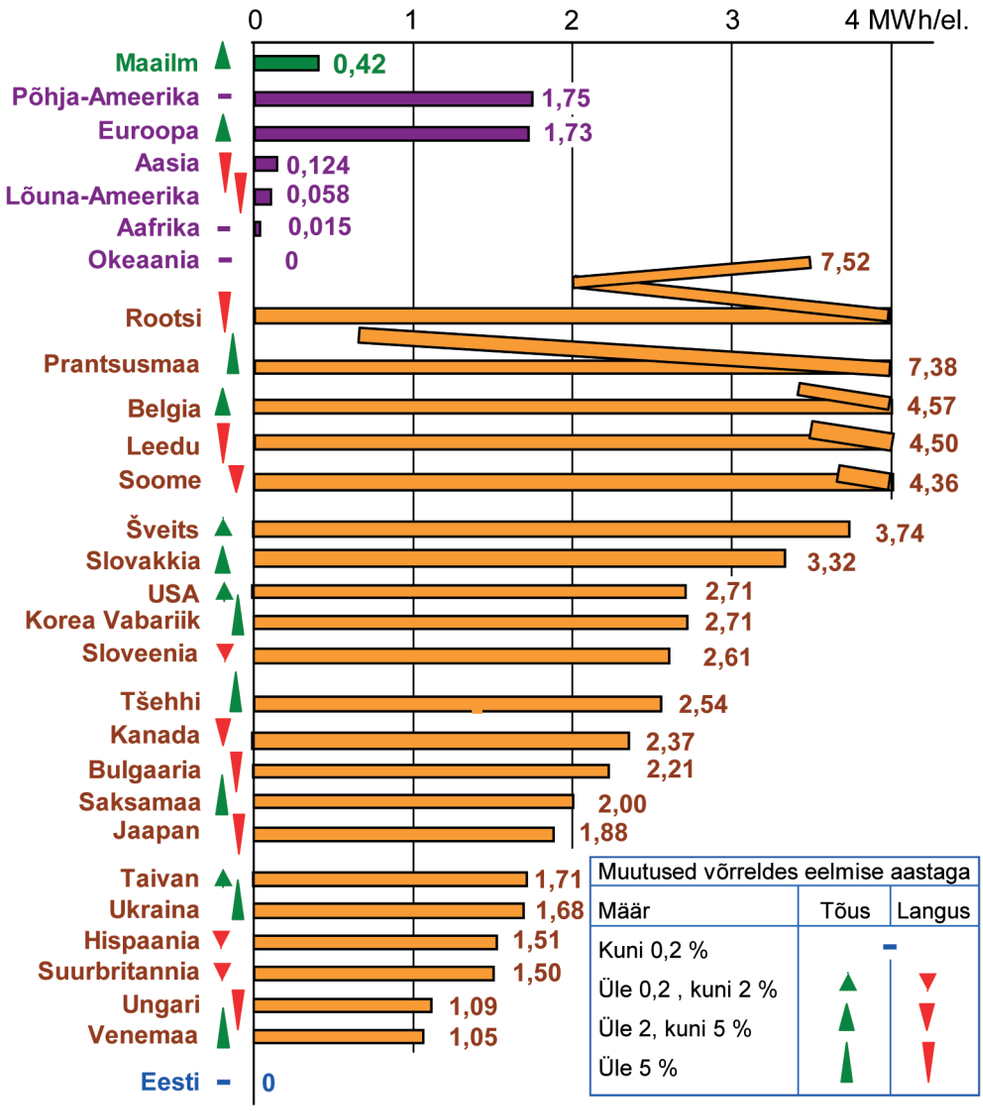
Tuumaelektrijaamade eluiga on tavaliselt 30…40 aastat. Pärast seda kõrvaldatakse reaktoreist tuumkütus ja jaam konserveeritakse. Jaama radioaktiivse (reaktori-) osa lammutamisele saab asuda enamasti alles 10…20 aasta möödumisel pärast jaama seismajätmist, kui radioaktiivse kiirguse foon on langenud piisavalt madalale.



Joonis 5.3.2. Tuumaelektrijaamade elektrienergia toodang aastal 2003 maailma maades, mille osatähtsus maailmatoodangus oli vähemalt 2 %



Joonis 5.3.3. Tuumaelektrijaamad Läänemere ümbruses 2007. aasta algul



Joonis 5.3.4. Tuumaelektrienergia tootmine elaniku kohta aastal 2003 maades, milles see näitaja oli sel aastal vähemalt kaks korda kõrgem kui maailma keskmine

Maailma esimene tuumaelektrijaam valmis aastal 1953 Obninskis (Venemaal, Kaluga lähedal), kusjuures sellesse paigaldati tuumalaeva jaoks valmistatud energiaplokk elektrilise võimsusega 5 ja reaktori soojusvõimsusega 30 MW (kasuteguriga seega 17 %). Aastal 2002 lülitati see jaam talitlusest välja. Esimene jaam, milles reaktorid olid kohe ette nähtud elektrienergia andmiseks energiasüsteemi, lülitati võrku aastal 1956 Suurbritannias (Calder Hall, 4 × 60,5 MW); selle jaama talitlus lõpetati aastail 2002…2003. Reaktorid elektrilise võimsusega 1000 MW ja enam tulid kasutusele aastal 1973. Balti riikide ainus tuumaelektrijaam Ignalinas (Leedus) alustas talitlust 1. märtsil 1984. Jaamas on kaks kanaltüüpi grafiitreaktoriga energiaplokki, mis projekteeriti võimsusele 1500 MW, kuid hiljem loeti nimivõimsuseks 1300 MW. Kuna jaam ei vasta Euroopa turvalisusnõuetele, lülitati selle esimene energiaplokk välja 31. detsembril 2004 ja teise ploki väljalülitamine on ette nähtud aastal 2009. Veebruaris 2006 kirjutasid Balti riikide peaministrid alla kavatsuste protokollile uue tuumajaama ehitamiseks samasse kohta ja oktoobris 2006 otsustasid kolme riigi energiasüsteemide juhid jaama ehitamise reaalseid võimalusi ühiselt edasi arutada.

5.4 HÜDROELEKTRIJAAMAD

Hüdroelektrijaamades rakendatakse elektrienergia tootmiseks veejõudu, mis võib avalduda

- jõgede veevooluna,
- loodetena (veevooluna meretaseme tõusu ja mõõna ajal),
- merelainetusena.

Hüdroelektrijaamade hulka kuuluvad ka jaotises **4.3** käsitletud pumpelektrijaamad.

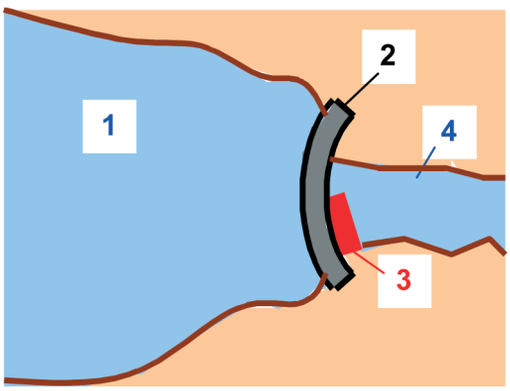
Üle 99,9 % maailma hüdroelektrijaamadest paikneb jõgedel. Jõgede veevoolu aastane energia (*hüdroenergeetiline potentsiaal*) on maailmas kokku ligikaudu 44 PWh/a. Tehniliselt saaks sellest hüdroelektrijaamade ehitamise teel kasutada ligikaudu 13 PWh/a, kuid sageli tuleb arvestada mitmesuguseid piiranguid, mis jaamade rajamist takistavad. Nii näiteks tuleb arvestada

- hüdrojaama võimaliku asukoha liiga suurt kaugust elektrienergia tarbimiskeskustest ja sellest tulenevaid suuri kulutusi elektriedastusliinidele,
- paisjärve liiga suurt pindala ning selle alla jäävate põllumaade, metsade, maastike, loodus- ja ajaloomälestiste kadumaminekut,
- paisjärve alla jäävate asulate ja mõnikord isegi linnade elanike ümberasustamist koos uute asulate rajamisega,
- kohalike kliimaolude ebasoodsat muutumist,
- põhjavee taseme ebasoodsat muutumist paisjärve ümbruses.

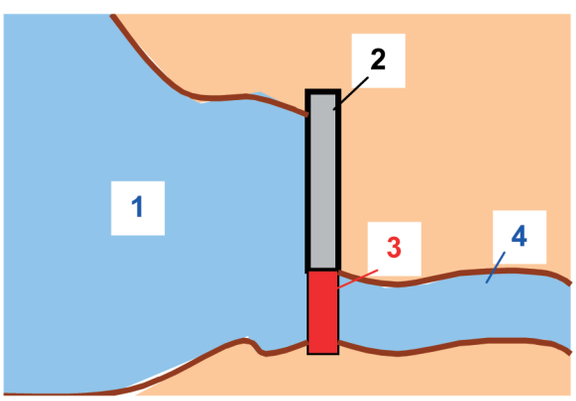
Kõige selle tõttu arvatakse, et majandusliku tasuvuse ja ökoloogiliste kaalutluste arvessevõtmisel saab maailmas rajada hüdroelektrijaamu aastase kogutoodanguga mitte palju üle 9 PWh, mis moodustab umbes 70 % maailma praegusest aastasest elektritarbimisest.

Hüdroelektrijaama ehitamisel tõkestatakse jõgi paisuga, mille kõrgus oleneb jõesängi geoloogilisest struktuurist. Nii näiteks võib paisu kõrgus kaljuste kallastega kitsaste jõgede korral ulatuda 300 meetrini (Nureki hüdroelektrijaamas Vahši jõel Tadžikistanis), lausmaajõgedel on see aga tavaliselt, olenevalt ka jaama võimsusest, mõni kuni mõnikümmend meetrit. Kõrgemate paisude puhul paikneb jaama masinasaal enamasti tammi järel (joonis **5.4.1**), madalamate korral kujutab aga endast paisu osa (joonis **5.4.2**).

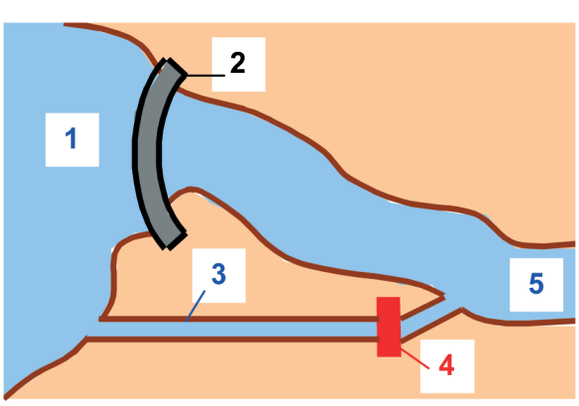
Lausmaajõgedel võib jõe kohaliku suure languse korral osutuda otstarbekaks jõujaamahoone paigutamine paisust eemale ja juhtida vesi sellele juurde *derivatsioonikanali* abil (joonis **5.4.3**). Seda põhi-



Joonis 5.4.1. Hüdroelektrijaama ehituspõhimõte kõrge paisu puhul (*paisutagune* hüdroelektrijaam, näide). *1* paisjärv (*ülemine bjeff*), *2* betoonpais, *3* masinasaal, *4* vee äravool (*alumine bjeff*)



Joonis 5.4.2. Hüdroelektrijaama ehituspõhimõte madala paisu puhul (*paisurinde*-hüdroelektrijaam, näide). *1* paisjärv, *2* paisu puistematerjalist osa, *3* paisu betoonosa ja masinasaal, *4* vee äravool



Joonis 5.4.3. Derivatsiooni-hüdroelektrijaama ehituspõhimõte. *1* paisjärv, *2* betoonpais, *3* derivatsioonikanal, *4* masinasaal, *5* vee äravool

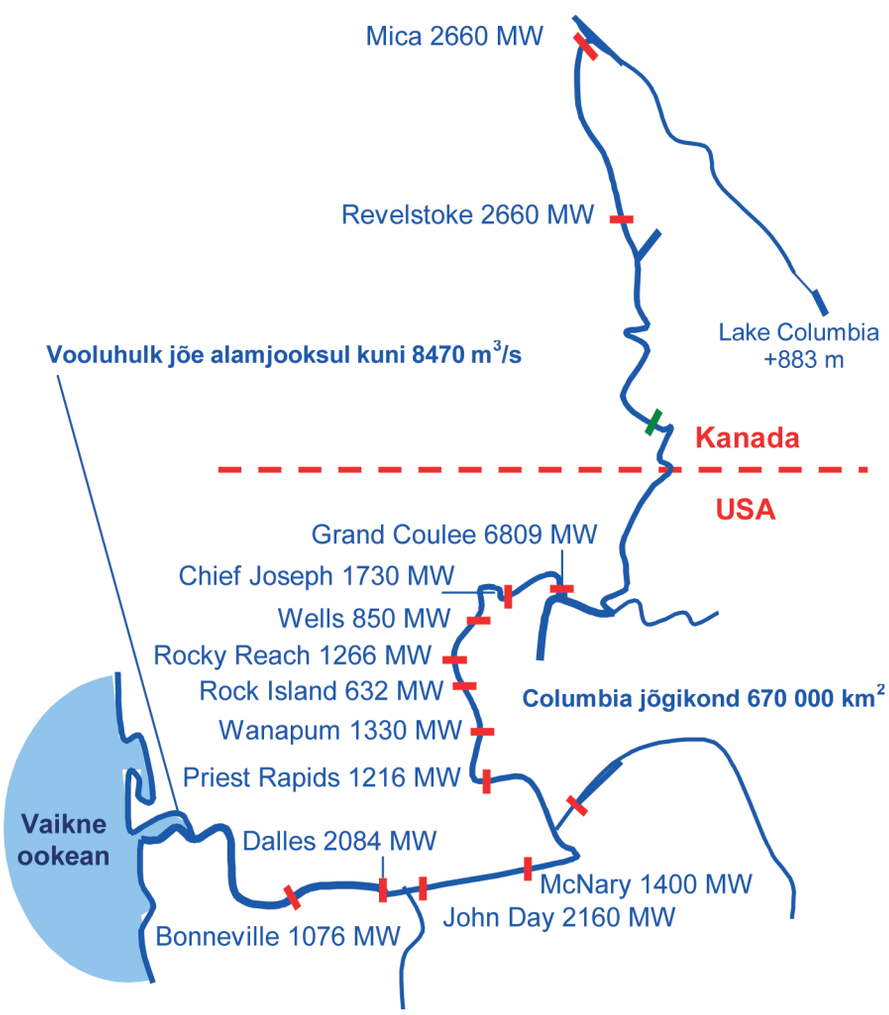
mõtet on kasutatud nt Narva hüdroelektrijaamas. Mägijõgedele ehitatavates hüdroelektrijaamades tuuakse vesi jaamahoonesse maapealsete või maasiseste torude kaudu (samal viisil nagu nt joonisel **4.3.1**).

Hüdroelektrijaamade juurde kuuluvad enamasti ka mitmesugused lisarajatised – laevaliiklust võimaldavad lüüsid, üle tammi kulgevad auto- ja raudteed, kalade migratsiooni kudemiskohtadesse võimaldavad kalatrepid, veevarustus- ja maaniisutuspumbajaamad jm.

Nagu juba öeldud jaotistes **2.9** ja **2.12**, on hüdroturbiinid ja hüdrogeneraatorid suuremate mõõtmetega, materjalimahukamad ja väiksema pöörlemissagedusega kui auruturbiinid ja turbogeneraatorid. Neid võidakse aga valmistada väga laias nimivõimsuste vahemikus – mõnest kilovatist kuni 800 megavatini. Agregaatide arv oleneb jaama võimsusest ja võib olla ühest kuni ligikaudu kolmekümneni (vt nt joonis **5.1.4**). Hüdroelektrijaama kasutegur on enamasti vähemalt 90 % ja elektrienergia kulu omatarbeks ei ole tavaliselt üle 0,5 %. Jaama ehitus on lihtne ning töökindel, eluiga pikk (50…100 aastat, sageli enamgi) ja hoolduskulud madalad, mistõttu hüdrojaamadest saadav elektrienergia on sageli kuni 10 korda odavam kui soojuselektrijaamadest saadav. Suurim probleem, mis hüdrojaamade rajamisel enamasti alati tekib, on, nagu juba öeldud, paisjärve alla jäävate suurte maa-alade üleujutamine, mis võib kaasa tuua muuhulgas tervete asulate ja isegi linnade teise kohta ehitamise.

Sanxia hüdroelektrijaama paisjärve alla jäävalt maa-alalt tuli näiteks Hiinas ümber asustada 1,3 miljonit inimest.

Hüdroelektrijaamade ehitamise võimalused ei ole maailmas veel kaugeltki ammendatud. Nagu eelpool öeldud, saaks maailmas suhteliselt probleemivabalt rajada hüdroelektrijaamu aastase kogutoodanguga kuni 9 PWh, kuid nt aastal 2003 oli nende kogutoodang ainult 2,7 PWh (vt joonis **2.5.7**) ehk 30 % võimalikust. Eri maailmajagudes



Joonis 5.4.4. Hüdroelektrijaamad Columbia jõel aastal 2006

on majanduslikult otstarbekohaste hüdrojaamade ehitamisvõimalusi kasutatud eri määral – Põhja-Ameerikas 49 %, Euroopas koos kogu Venemaaga 37 %, Lõuna-Ameerikas 28 %, Aasias ilma Venemaa Aasia-osata 23 %, Aafrikas aga ainult 4 %. Seetõttu jätkub maailmas niihästi suurte kui ka väiksemate hüdrojaamade rajamine.

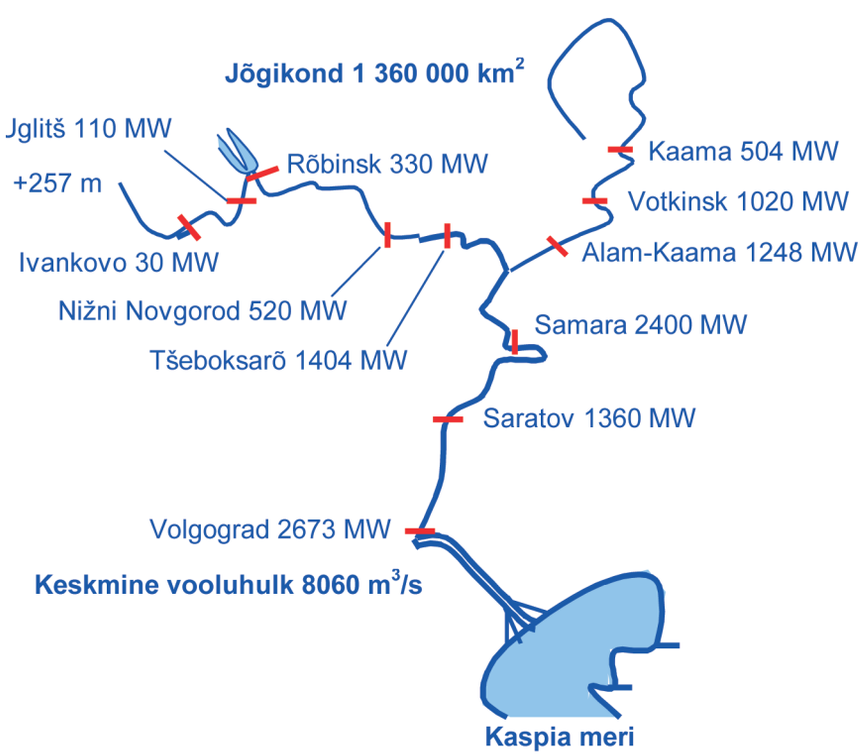
Suurteks loetakse enamasti hüdroelektrijaamu võimsusega vähemalt 1000 MW. Nendest väiksemaid jaamu võimsusega vähemalt 100 MW nimetatakse tavaliselt *keskmise suurusega* jaamadeks, veel väiksemaid jaamu võimsusega vähemalt 5 MW – *väikejaamadeks*. Jaamu võimsusega alla 5 MW nimetatakse *minijaamadeks*, võimsusega alla 0,5 MW – *mikrojaamadeks*. Eestis on seega ainult mini- ja mikrohüdrojaamu.

Ühelsamal jõel võib olla palju hüdrojaamu, mis endastmõistetavalt peavad kasutama veevoolu omavahel kooskõlastatult. Selliseid, sageli suuri territooriume haaravaid komplekse nimetatakse *hüdrojaamakaskaadideks*. Maailma võimsaim kaskaad (25,15 GW) on ehitatud 2250 km pikkusele **Columbia** jõele, mis algab Kanada British Columbia provintsis ja kulgeb läbi USA Washingtoni osariigi (joonis **5.4.4**). See jõgi on osutunud hüdroenergeetiliselt eriti hästi sobivaks, kuna see jookseb kaljuses mägestikus väheasustatud aladel, selle säng on kitsas ja sügav, langus suur (883 m) ja paisjärvede pindala suhteliselt väike. Kaskaadi lõppvõimsuseks (mõne jaama laiendamise teel) on kavandatud 32,4 GW.

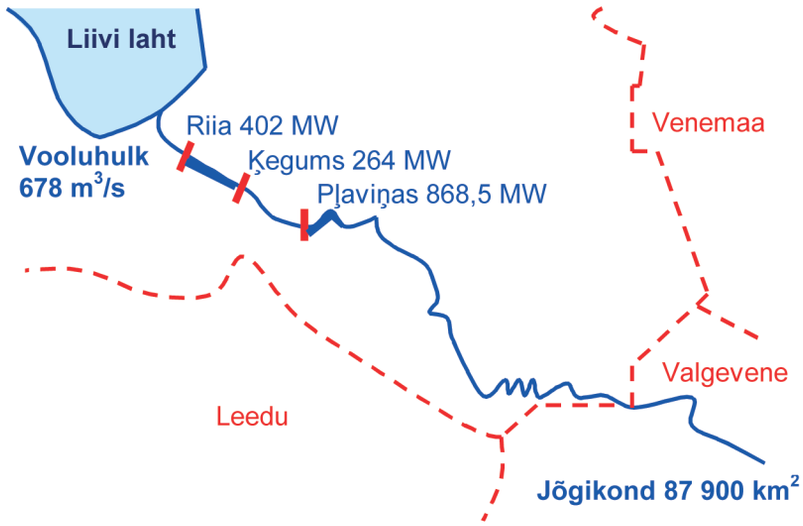
Euroopa suurim on joonisel **5.4.5** kujutatud Volga-Kaama kaskaad võimsusega 11 599 MW (Volgal 8827 MW, Kaamal 2772 MW). Hüdroagregaatide uuendamisel võib kaskaadi kuuluvate jaamade võimsus mõnevõrra suureneda, kuid nende kahe jõe hüdroenergeetilise rakenduskõlbuliku potentsiaali võib lugeda siiski täielikult ammendatuks.

Balti riikide suurim, kolmest hüdroelektrijaamast koosnev kaskaad koguvõimsusega 1534 MW ja aastase energiatoodanguga ligikaudu 3 TWh on Daugava jõel Lätis (joonis **5.4.6**). Kaskaadi neljas jaam oli projekteeritud Daugavpilsi lähedale, kuid jäi rahva tugeva vastuseisu tõttu ehitamata.

Daugava keskjooksule on Valgevenes kavas rajada umbes aastaks 2015 kolm või neli väiksemat hüdroelektrijaama.



Joonis 5.4.5. Volga-Kaama hüdroelektrijaamade kaskaad



Joonis 5.4.6. Daugava hüdroelektrijaamade kaskaad

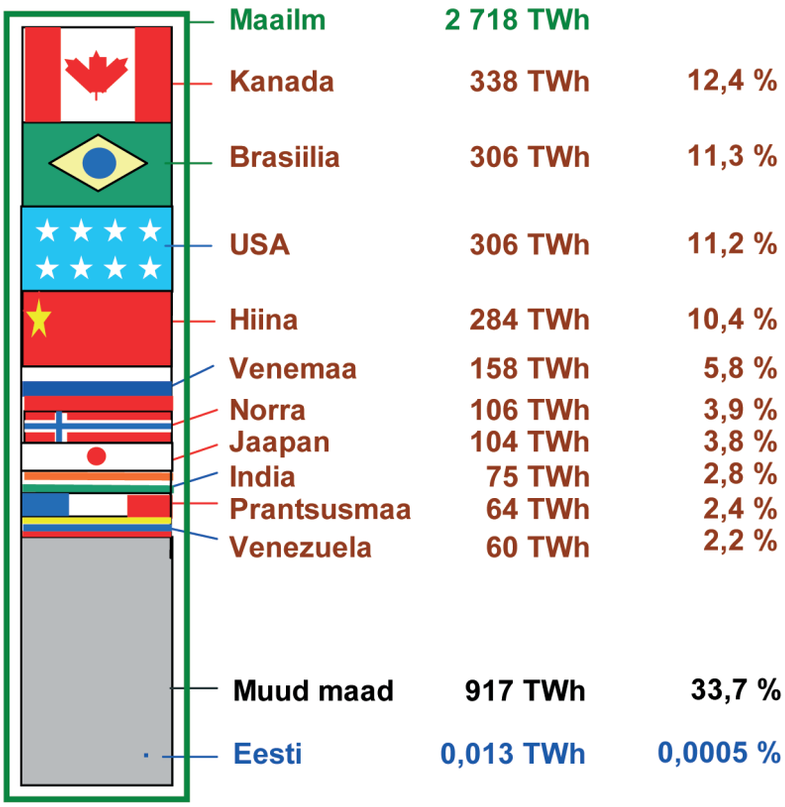
Parimate hüdroenergeetiliste omadustega jõgi maailmas on **Angara**, mille sängi geoloogised omadused on ligikaudu samasugused nagu eelnimetatud Columbia jõel, kuid peale selle tagab Baikali järv selles aastaringselt peaaegu ühtlase vooluhulga. Angara kaskaadi kolme (Irkutski, Bratski ja Ust-Ilimski) hüdroelektrijaama koguvõimsus on praegu 9482 MW. Angara suudme lähedale on rajamisel Bogutšanõ hüdroelektrijaam võimsusega 1620 MW, mis peaks kavade kohaselt valmima aastal 2010.

Maailma uus võimsaim hüdroelektrijaamade kaskaad on tekkimas Jangtse jõele Hiinas, kuhu peale ehitatava Sanxia hüdroelektrijaama (vt joonis **5.1.4**) ja olemasoleva Gezhouba jaama (2700 MW) on kavandatud veel 12 suurt jaama koguvõimsusega ligi 60 GW, mis tulevad rajamisele jõe mägisel ülemjooksul.

Eestis oli 2006. aasta lõpus üle 20 väikese hüdroelektrijaama koguvõimsusega 5,2 MW. Suurim neist on Linnamäe hüdroelektrijaam Jägala jõel (1,152 MW), mis algselt valmis aastal 1924, purustati taanduvate NSV Liidu vägede poolt aastal 1941 ja taastati aastal 2002. Aastal 2005 tootsid Eesti hüdroelektrijaamad 21,5 GWh elektrienergiat, mis moodustas 0,2 % Eesti kogu elektrienergiatoodangust.

Hüdroenergeetika ideeliseks alusepanijaks loetakse Suurbritannia Malmi ja Terase Instituudi presidenti William Siemensit (1823…1883), kes aastal 1877 oma presidendikõnes tõstis tugevalt esile jõgede veejõu kasutamise võimalikkust elektrienergia tootmiseks ja muuhulgas soovitas rakendada selleks Niagara juga, millega ta oli eelmisel aastal tutvunud. Esimese hüdroelektrijaama võimsusega arvatavasti umbes 3 kW ehitas tööstur ja teaduse edendaja lord William George Armstrong (1810–1900) aastal 1878 oma Cragside'i (Northumberland, Suurbritannia) lossi maaligalerii kaarlampvalgustuse toiteks. Ka esimene avalik hüdroelektrijaam ehitati Inglismaal – Wey jõel Godalmingis aastal 1881; jaamas oli kaks Siemensi alalisvoolugeneraatorit koguvõimsusega umbes 6 kW [5.1]. Aastal 1881 algas Niagara joa evitamine elektrienergia tootmiseks; joa kõrval paiknevaid elektrijaamu on laiendatud ja täiustatud üle 100 aasta, kusjuures nimelt sealt on saadud kogemusi muude võimsate hüdroelektrijaamade ehitamiseks. Alates aastast 1998 on Kanada poolel talitluses jaam võimsusega 1804 MW (*Sir Adam Beck*), USA poolel aga võimsusega 2640 MW (*Robert Moses* koos *Lewistoni* pumpelektrijaamaga). Eestis algas veejõu kasutamine elektrienergia saamiseks aastal 1882 Kreenholmi manufaktuuris ja aastal 1893 valmis Kunda tsemenditehase hüdroelektrijaam võimsusega 210 kW, mis sel momendil oli Vene impeeriumi suurim.

Peale jõgede hüdroenergia on püütud kasutada ka **loodete** (merevee tõusu ja mõõna) energiat. Arvatakse, et maailmas saaks reaalselt ehitada loodetel põhinevaid hüdroelektrijaamu koguvõimsusega ligikaudu 36 GW. Sobivaimateks peetakse jõesuudmeid ja kitsaid lahti, kui neis tõusu ja mõõna vahe on vähemalt 5 m. Kõige soodsam on selles suhtes Fundy Bay laht Kanada idarannikul, milles see vahe on kuni 18 m, kuid väga sobivaid kohti on ka nt Suurbritannia lääneranniku ja Kaug-Ida Vaikse ookeani rannikul. Praegu on loodetejaamu võimsusega üle 1 MW maailmas siiski ainult kolm:



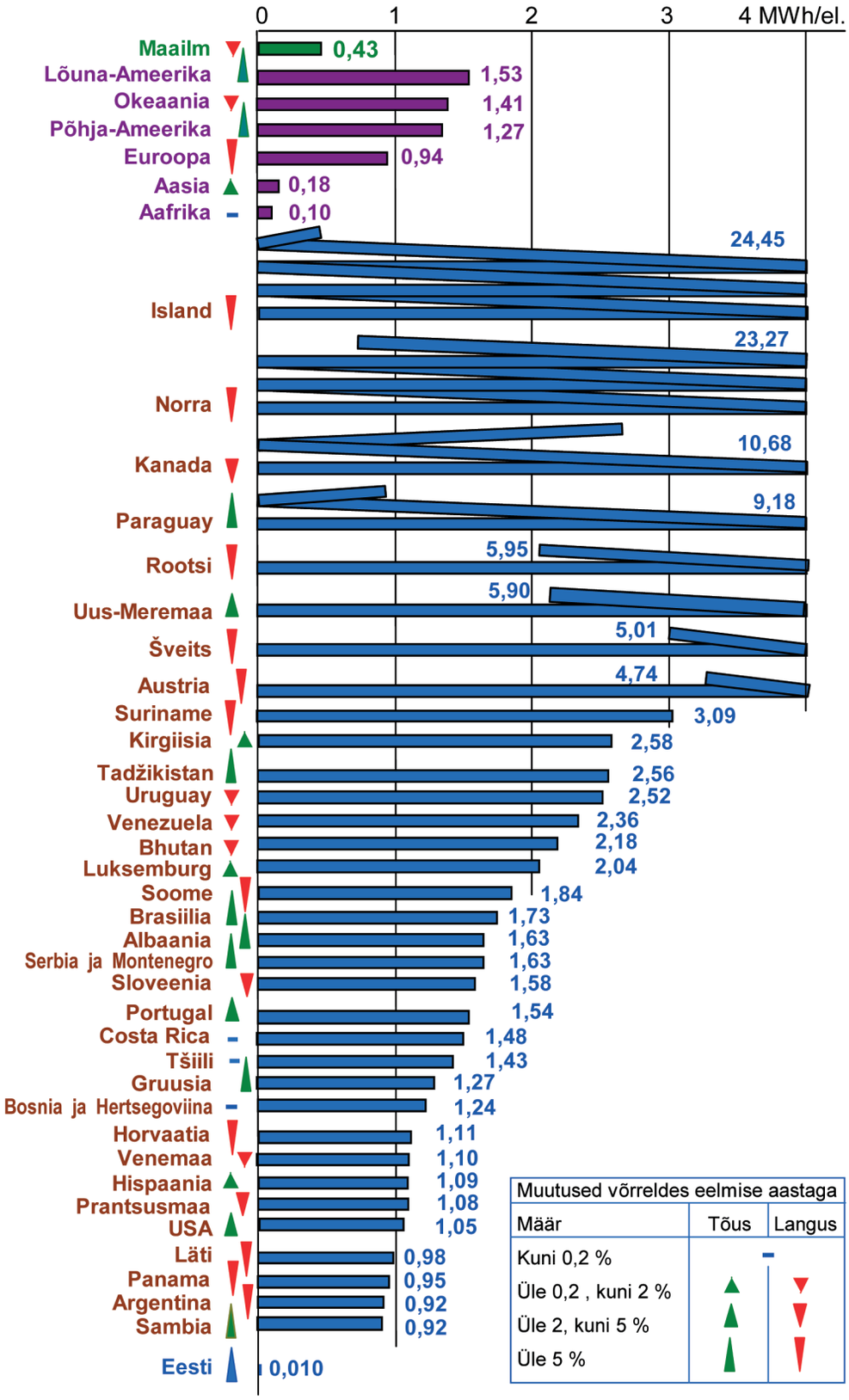
Joonis 5.4.7. Maailma suurimad hüdroelektrienergia tootjad aastal 2003

- Rance (samanimelise jõe suudmes Prantsusmaal) võimsusega 240 MW,
- Annapolis (Fundy Bay ühes sopis Kanadas) võimsusega 20 MW,
- Jianxia (Hiina idarannikul) võimsusega 3,9 MW.

Suurim probleem loodetejaamade ehitamisel on merre või jõesuudmesse rajatava tammi suur materjalimahukus ja maksumus, mistõttu nende jaamade ehitamist ei ole seni peetud tasuvaks. Aastal 2004 alustati Suurbritannias uuringuid tõusu ja mõõna ajal tekkiva veevoolu kasutamiseks ilma tammide ehitamiseta, veealuste propellergeneraatorite abil võimsusega mõni megavatt (umbes samal viisil nagu tuuleelektrijaamades). Järeldusi sellise võtte tasuvuse kohta on oodata lähiaastail.

Veel vähem on elektrienergia saamiseks õnnestunud kasutada **lainete** energiat. On ehitatud hüdropneumaatilisi (torn-) paigaldisi, milles lained juhitakse kitseneva kanali kaudu tornitaolisse ehitisse, kus nad suruvad kokku õhu, mida saab kasutada õhkturbiini käitamiseks. On ka ujuvaid paigaldisi, mille eri osade vahelistes liigendites tekkiv mehaaniline energia antakse üle elektrigeneraatoritele. Aastal 2007 peaks Portugali rannikul valmima esimene elektrienergiat energiasüsteemi võrku andev laineelektrijaam võimsusega 2,25 MW.

Hüdroenergia kasutamise võimalused on eri maades erisugused. Odavaimat hüdroelektrienergiat saadakse suure langusega ja vooluhulgaga mägijõgedest (Euroopas nt Norras, Rootsis, Islandil, Šveitsis, Austrias). Andmed maailma suurimate hüdroelektrienergia tootjamaade kohta, mille osatähtsus maailma hüdroelektrienergia toodangus oli aastal 2003 vähemalt 2 % [1.7], on esitatud joonisel **5.4.7**, hüdroelektrienergia toodang elaniku kohta aga joonisel **5.4.8**.



Joonis 5.4.8. Hüdroelektrienergia tootmine ühe elaniku kohta aastal 2003.
Esitatud on maad, milles see näitaja on vähemalt kaks korda kõrgem kui maailma keskmine

5.5 TUULEELEKTRIJAAMAD

Nagu näitab joonis **1.2.1**, on tuuleenergia teoreetiline varu maailmas üle 8 korra suurem kui hüdroenergia oma. Selle kasutamine on aga tehnilis-majanduslikult otstarbekohane üksnes piirkondades, kus tuule keskmine kiirus aasta jooksul on piisavalt suur. Praeguste hinnasuhete juures loetakse vähimaks vastuvõetavaks aasta keskmiseks tuule kiiruseks tuuleelektrijaamade rajamisel umbes 4,5 m/s. Euroopa Tuuleenergialiidu (*European Wind Energy Association, EWEA*) hinnangute kohaselt on tuule aastakeskmine kiirus

- hea, kui see on 6,9 m/s või üle selle,
- keskpärane, kui see on 6,3 m/s,
- aeglane, kui see on 5,4 m/s või alla selle.

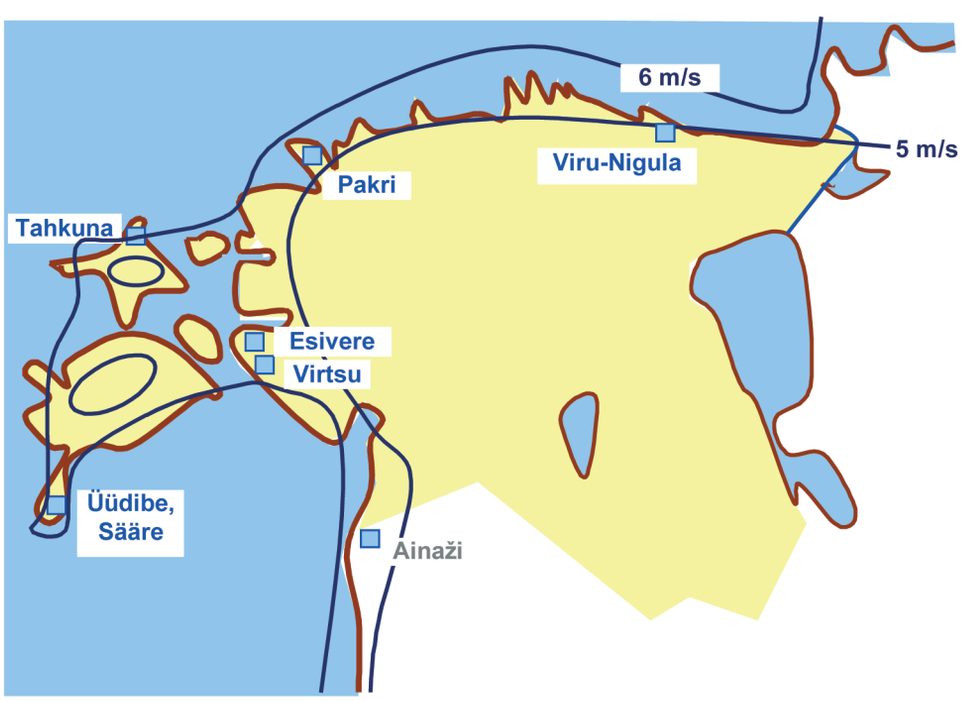
Sellest hinnangust lähtudes valitsevad energeetiliselt head tuuleolud ookeanile avatud rannikualadel kauguseni tavaliselt kuni mõnikümmend kilomeetrit rannikust, veel paremad aga rannikulähedasel mandrilaval. Ka mägestikes (eriti mäeharjadel ja kurudes) võib tuule keskmine kiirus sageli osutuda vastuvõetavaks. Tehniliselt loetakse maailmas võimalikuks püstitada sellistele sobivatele aladele tuuleelektrijaamu elektrienergiatoodanguga ligikaudu 53 PWh aastas, mis on üle kolme korra suurem kui maailma praegune elektritarbimine. Eesti suhteliselt mõõdukad tuuleolud on kujutatud joonisel **5.5.1**.

Nüüdisaja suuremates tuuleelektrijaamades kasutatakse elektrituulikuid võimsusega 0,6 kuni 6 MW, väiksemates võib tuuliku üksikvõimsus olla aga ka tugevasti väiksem (nt kas või mõni kilovatt). Tuulikute arv jaamas võib olla ühest kuni mõnesajani. Kuna tuuleturbiini tiivik pöörleb suhteliselt aeglaselt (mõnest pöördest mõnekümne pöördeni minutis), nähakse turbiini ja generaatori vahel enamasti ette reduktor (joonis **5.5.2,a**), kuid töökindluse suurendamise ja hoolduse lihtsustamise huvides võidakse kasutada ka paljupooluselisi väikesekiiruselisi generaatoreid (joonis **5.5.2,b**).

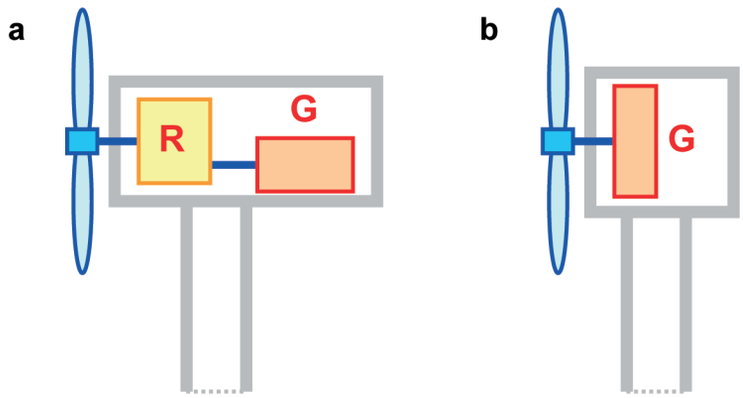
Kuna turbiini optimaalne pöörlemissagedus oleneb tuule tugevusest, ei saa tuuleelektrijaamades kasutada otse elektrivõrku ühendatavaid sünkroongeneraatoreid. Nüüdisajal on kasutusel peaasjalikult kolm generaatori liiki:

- lühisrootoriga asünkroongeneraator (joonis **5.5.3**),
- faasirootoriga asünkroongeneraator (joonis **5.5.4**),
- sagedusmuunduri kaudu võrku ühendatav sünkroongeneraator (joonis **5.5.5**).

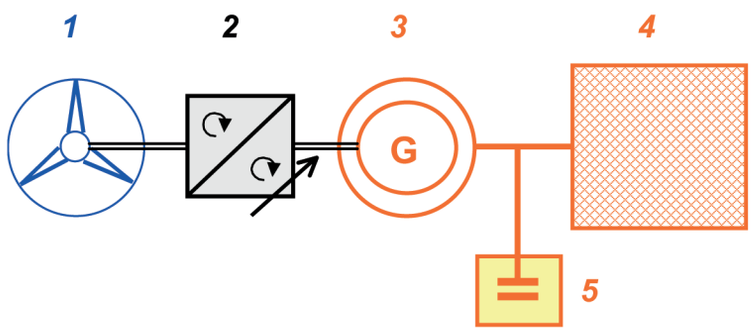
Kuna tuuleolud on nii aasta kui ka ööpäeva kestel muutlikud, ei saa tuuleelektrijaamad talitleda pidevalt täisvõimsusega nagu nt tuumaelektrijaa-



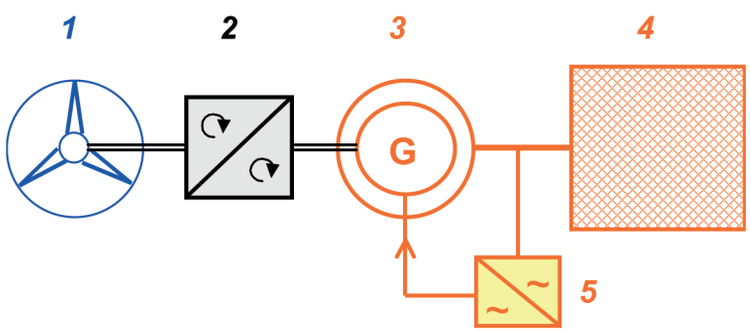
Joonis 5.5.1. Aasta keskmine tuulekiirus Eesti rannikualadel.
Kaardil on näidatud ka Eesti suurimad tuuleelektrijaamad 2007. aasta aprillis



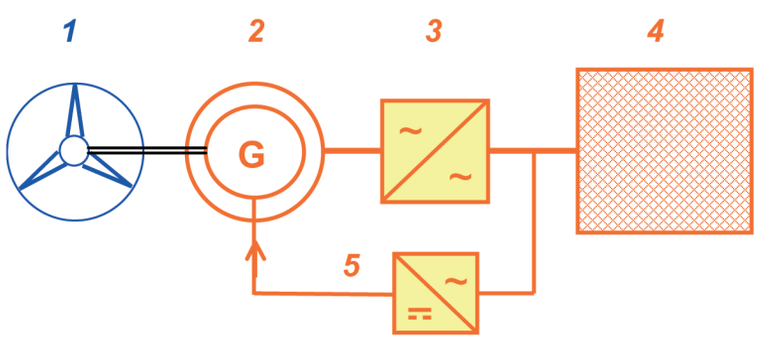
Joonis 5.5.2. Tuuleturbiini ja generaatori ühendamine reduktori kaudu (*a*) ja otse (*b*) (tugevasti lihtsustatud kujutuses). *G* generaator, *R* reduktor



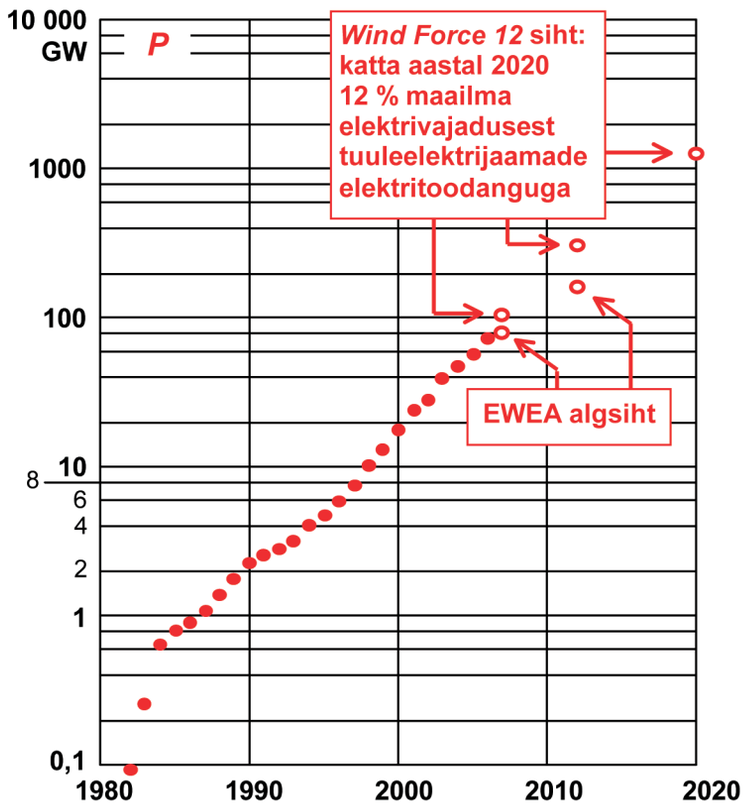
Joonis 5.5.3. Lühisrootor-asünkroongeneraatoriga tuulik. *1* tiivik, *2* muudetava ülekandeteguriga reduktor, *3* generaator, *4* elektrivõrk, *5* reaktiivvõimsust genereeriv kondensaatorpatarei



Joonis 5.5.4. Faasirootor-asünkroongeneraatoriga tuulik. *1* tiivik, *2* reduktor, *3* generaator, *4* elektrivõrk, *5* sagedusmuundur



Joonis 5.5.5. Aeglase sünkroongeneraatoriga, reduktorita tuulik. *1* tiivik, *2* generaator, *3* sagedusmuundur, *4* elektrivõrk, *5* generaatori ergutusmähist toitev alaldi



Joonis 5.5.6. Maailma tuuleelektrijaamade võimsuse kasv

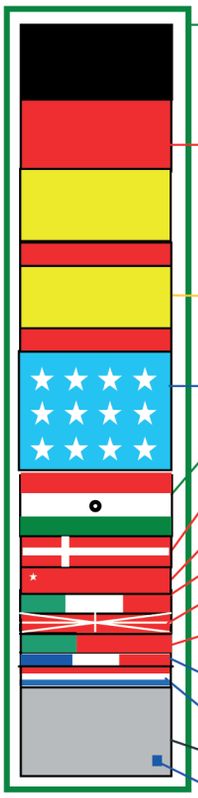
mad. Tavaliselt on tuuleelektrijaamade nimivõimsuse aastane ekvivalentne kasutusaeg vahemikus 1500…3000 h/a, kuid on piirkondi (nt Californias), kus see ultub 4000 tunnini aastas. Tuuleelektrijaamade ehitusmaksumus on viimase 10 aasta jooksul kiiresti vähenenud ja on samas suurusjärgus nagu kütustpõletavatel elektrijaamadel või isegi väiksem. Aastal 2005 oli see näiteks 900…1150 eurot 1 kW kohta, mistõttu ka tuuleelektrijaamadest saadava elektrienergia omahind on lähenemas soojuselektrijaamade omale; aastal 2005 oli see Euroopas 4…9 c/kWh. Võttes arvesse elektrituuliku eluiga (20…30 aastat), võib järeldada, et oma elu-ea jooksul annab selline tuulik 60…80 korda rohkem elektrienergiat kui seda kulub tuuleagregaadi valmistamiseks. Kõige selle tõttu on tuuleelektrijaamade võimsus kogu maailmas kiiresti kasvanud (vt joonis **5.5.6**) ja aastaks 2020 ennustatakse, et nende osatähtsus elektrienergia tootmisel saavutab 12 % [5.2].

Tuuleelektrijaamade kõikuv ja sageli kiiresti muutuv võimsus raskendab energiasüsteemi teiste elektrijaamade talitlust, kuna need peavad suutma kompenseerida tuuleelektrijaamade võimsuskõikumisi ja isegi nende ootamatut väljalülitumist nt tormi või tuulevaikuse järsul tekkel. Seetõttu on tuuleelektrijaamade lubataval võimsusel energiasüsteemis teatav piir, mis praegu arvatakse olevat enimalt 20 %. Probleemi saaks lahendada energiasalvestite (nt võimsate akupatareide) abil, kuid neid peetakse käesoleval ajal liiga kalliteks.

Et paremini korraldada võimsate tuuleelektrijaamade koostalitlust olemasolevate energiasüsteemidega, on kavandatud kõigi Euroopasse Põhjamere mandrilavale rajatavate tuuleelektrijaamade omavaheline ühendamine. Sellise ühissüsteemi summaarne võimsus oleks ajaliselt tunduvalt ühtlasem kui iga üksiku tuuleelektrijaama võimsus, mistõttu loodetakse, et selle ühendamine olemasolevate energiasüsteemidega ei kutsu esile viimaste talitluse olulist halvenemist.

Tuuleelektrijaamade võimsus maailma kõige enam tuuleenergiat kasutavates maades on esitatud joonisel **5.5.7**, võimsus elaniku kohta aga joonisel **5.5.8** [5.3].

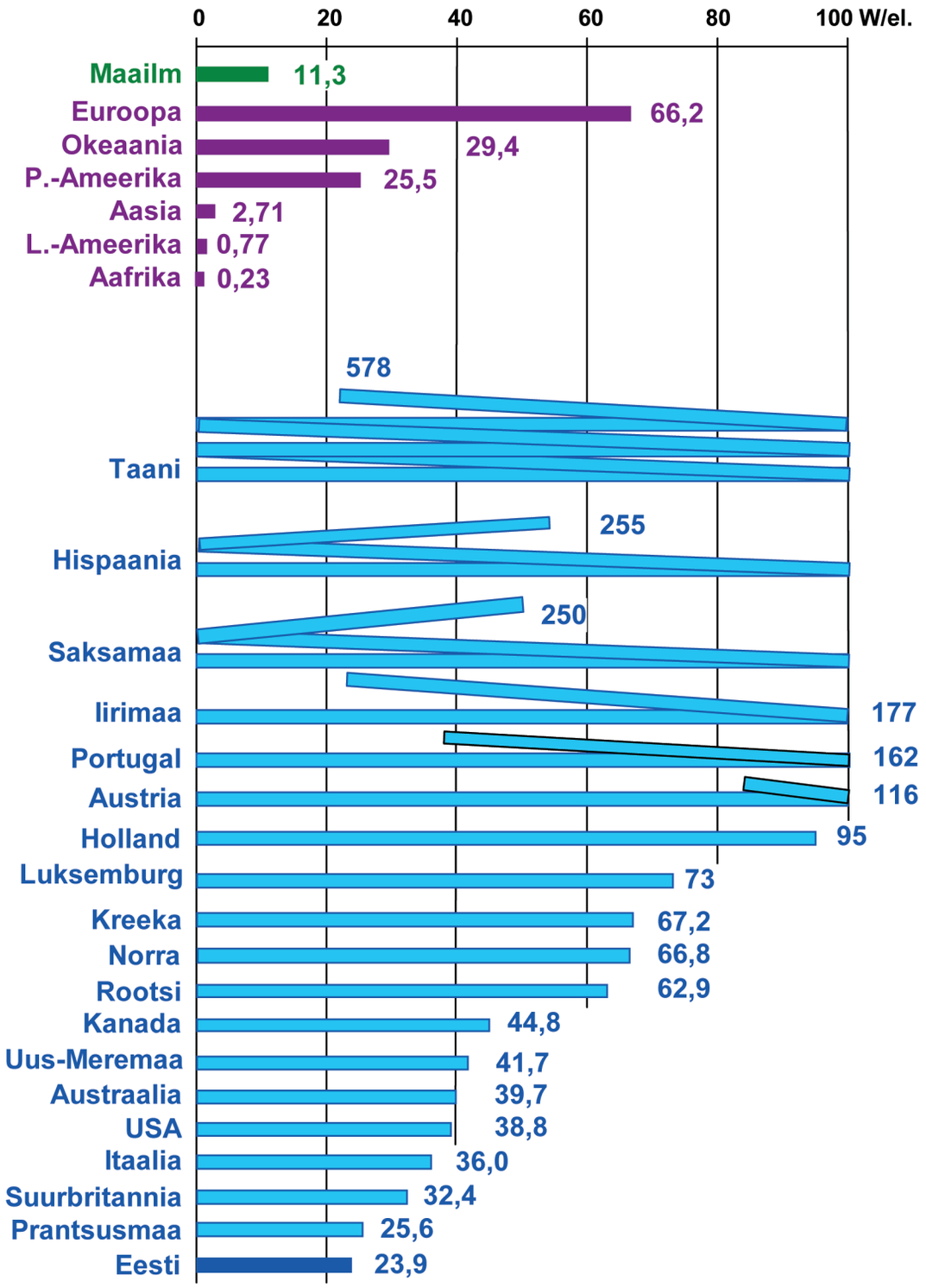
Esimese tuuleelektrijaama ehitas aastal 1888 Clevelandis (USA) oma elamu elektritoiteks leidur ning ettevõtja Charles Francis Brush (1849–1929). Jaam koosnes 144-labalisest puittiivikust läbimõõduga 17 m, 2-astmelisest hammasülekandest, alalisvoolugeneraatorist võimsusega 12 kW ja akupatareist ning talitles laitmatult 20 aastat. Aastal 1897



Maailm	74 223 MW	
Saksamaa	20 622 MW	27,8 %
Hispaania	11 615 MW	15,7 %
USA	11 603 MW	15,6 %
India	6 270 MW	8,4 %
Taani	3 136 MW	4,2 %
Hiina	2 604 MW	3,5 %
Itaalia	2 123 MW	2,9 %
Suurbritannia	1 963 MW	2,7 %
Portugal	1 716 MW	2,3 %
Prantsusmaa	1 567 MW	2,1 %
Holland	1 560 MW	2,1 %
Muud maad	9 444 MW	12,7 %
Eesti	32 MW	0,043 %

Joonis 5.5.7. Tuuleelektrijaamade võimsus 2006. aasta lõpus maailma maades, kus see on vähemalt 2 % maailma nende jaamade koguvõimsusest

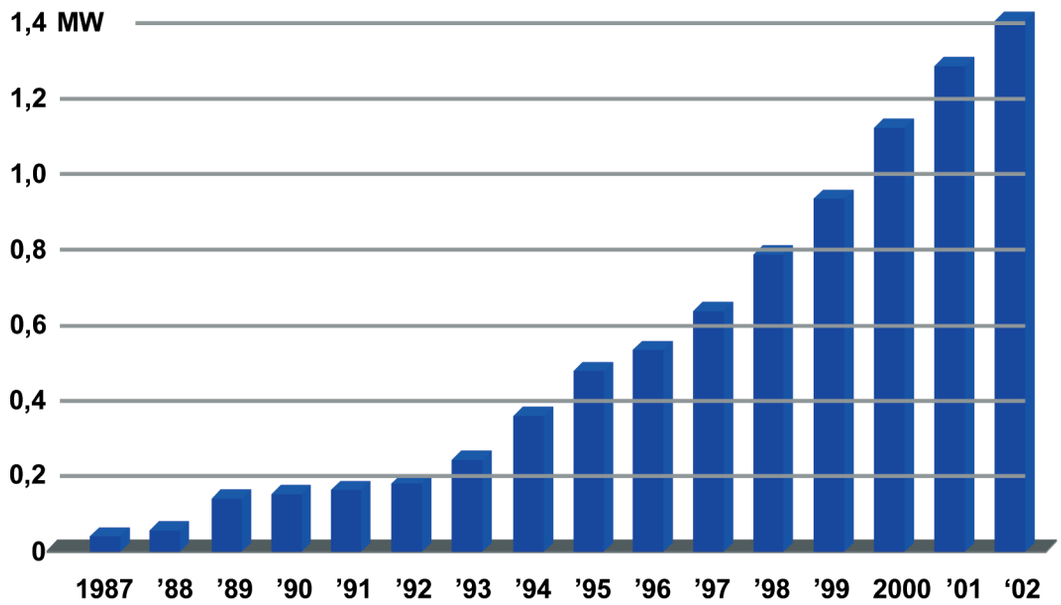
ehitas Askovi rahvaülikooli (Taani) õpetaja, meteoroloog Poul la Cour (1846–1908) kahest tuuleveski taolise ehitusega elektrituulikust võimsusega ligikaudu 5 kW koosneva tuuleelektrijaama, mida ta kasutas vesiniku tootmiseks vee elektrolüüsi teel. Vesinikku kasutas ta gaasilampides oma kooli valgustamiseks. Ühtlasi uuris ta tuuleturbiinide seaduspärasusi, propageeris oma kursustel tuuleenergia kasutamist ja asutas maailma esimese tuuleenergeetika ajakirja. Kõige selle tulemusel algas Taanis 20. sajandi alguses 20…35 kW võimsusega tuuleelektrijaamade hoogne kasutamine ja aastal 1918 oli seal juba 120 sellist jaama koguvõimsusega 3 MW. Et saada tuuleelektrijaamast vahelduvvoolu, algas Saksamaal aastal 1922 asünkroongeneraatorite kasutamine. Aastail 1930–1940 ehitati maailmas mitu katselist ühest tuulikust koosnevat tuuleelektrijaama võimsusega kuni 100 kW. Tehnilis-majanduslike näitajate poolest ei suutnud aga tuuleelektrijaamad konkureerida järjest võimsamate soojus- ja hüdroelektrijaamadega, mistõttu nad kuni 1970ndate aastateni kuigi laia kasutamist ei leidnud. Olukord muutus aastal 1973, kui algas ülemaailmne energiakriis, mille põhjus seisnes nafta ja naftasaaduste, kuid ka muude kütuste järsus kallinemises. Et uurida ja koordineerida alternatiivsete energiaallikate, sealhulgas tuule kasutamist, loodi nt USAs samal aastal energeetikadepartemang (*Department of Energy, DOE*) ja aastal 1974 asutati USA Tuuleenergialiit (*American Wind Energy Association, AWEA*). Esimese riigina Euroopas võeti Taanis aastal 1976 vastu riiklik programm tuuleenergeetika taaselustamiseks. USAs kehtestati sedavõrd soodsad tingimused tuuleelektrijaamade ehitajatele ja energiatootjatele, et aastail 1980–1985 ehitati nt Californias üle 100 mitmesuguse tuuleelektrijaama võimsusega kuni 100 MW, kasutades neis elektrituulikuid võimsusega 25 kuni 250 kW. Aastal 1982 loodi Euroopa Tuuleenergialiit (*European Wind Energy Association, EWEA*) ja aastal 1985 algas tuuleenergeetikaseadmete kiire areng kogu maailmas. Eesti esimene energiat elektrivõrku andev tuuleelektrijaam võimsusega 150 kW ehitati aastal 1997 Tahkuna poolsaarele Hiiumaal ja aastal 2001 loodi Eesti Tuuleenergia Assotsiatsioon. Praegu suureneb tuuleelektrijaamade võimsus maailmas 20…25 % võrra aastas ja ühtlasi valmistatakse järjest võimsamaid elektrituulikuid; näitena on joonisel **5.5.9** esitatud elektrituulikute keskmise võimsuse areng Saksamaal aastani 2002. Ühtlasi rajatakse järjest võimsamaid tuuleelektrijaamu ja 2006. aasta lõpus oli maailmas 30 tuuleparki, mille võimsus oli üle 100 MW. Tabelis **5.5.1** on esitatud maailma 10 võimsaima tuulepargi loetelu 2006. aasta lõpus.



Joonis 5.5.8. Tuuleelektrijaamade võimsus elaniku kohta 2006. aasta lõpus. Esitatud on maad, milles see näitaja on vähemalt kaks korda suurem kui maailma keskmine

Eestis oli 2007. aasta aprillis 7 enam kui 100 kW võimsusega tuuleelektrijaama, mille tähtsamad andmed on esitatud tabelis **5.5.2**.

Aastail 1986–1990 asus Vättas (Saaremaal) NSV Liidu Tuuleenergeetikainstituudi uurimisotstarbeline tuuleelektrijaam, kus katsetati Venemaal valmistatud 4 kuni 30 kW võimsusega tuulegeneraatoragregaate. Aastal 1989 oli nende koguvõimsus 346 kW, millega Vätta tuuleelektrijaam oli kogu NSV Liidu tolle aja võimsaim.



Joonis 5.5.9. Aasta jooksul paigaldatud tuulegeneraatorite keskmine võimsus Saksamaal aastail 1987 kuni 2002 [5.4]

Tabel 5.5.1. Maailma 10 suurimat tuuleparki 2006. aasta lõpus

Nimi või asukoht	Asukohariik	Võimsus MW	Valmimisaasta
Horse Hollow	USA (Texas)	736	2006
King Mountain	USA (Texas)	278	2001
Sweetwater	USA (Texas)	264	2005
Stateline Wind Project	USA (Washington ja Oregon)	263	2001
Maple Ridge	USA (New York)	231	2006
Blue Canyon	USA (Oklahoma)	225	2005
Lake Benton	USA (Minnesota)	211	1999
New Mexico WEC	USA (New Mexico)	204	2003
Storm Lake	USA (Iowa)	193	1999
Prince Project	Kanada (Ontario)	189	2006

Tabel 5.5.2. Eesti suurimad tuuleelektrijaamad 2007. aasta juunis

Asukoht	Tuulikute arv ja võimsus MW	Valmimisaasta
Viru-Nigula	8 × 3,0 = 24,0	2007
Pakri	8 × 2,3 = 18,4	2005
Esivere	4 × 2,0 = 8,0	2005
Üüdibe	4 × 0,5 = 2,0	2004
Virtsu	3 × 0,6 = 1,8	2002
Sääre	2 × 0,225 = 0,45	2004
Tahkuna	0,15	1997

5.6 GEOTERMAALELEKTRIJAAMAD

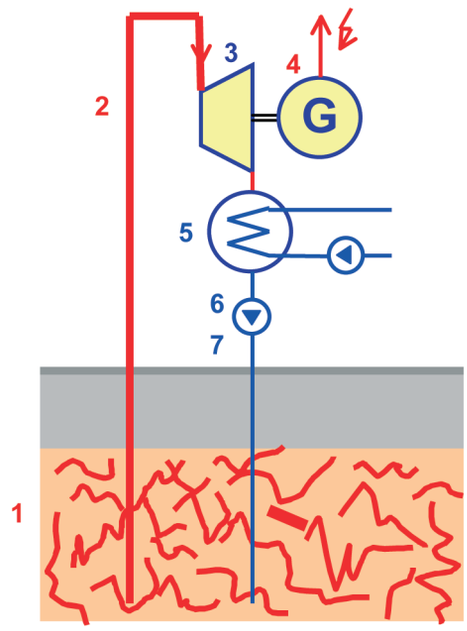
Geotermaalelektrijaamad põhinevad uraani ja tooriumi radioaktiivsel lagunemisel tekkinud maasisese soojuse kasutamisel. Geotermaalsoojusvoo keskmine intensiivsus Maa pinnal on 50,5 mW/m^2 ja temperatuuri tõus Maa sisemuse suunas keskmiselt ligikaudu 30 K/km, mida on praktiliseks kasutamiseks liiga vähe. Maa tektooniliselt aktiivsetes piirkondades (Põhja- ja Lõuna-Ameerika lääneranniku mägestikes, Kamtšatkast Uus-Meremaani ulatuvas seismilises vööndis, Islandil, Kesk-Itaalias ja paljudes muudes paikades) võib aga soojusvoog olla paiguti mõnisada korda intensiivsem ja temperatuuri tõus võib küündida väärtuseni 200 K/km. Sellistes oludes on Maa sisemise soojuse kasutamine elektrienergia ja soojuse saamiseks tehnilis-majanduslikult sageli täiesti otstarbekas, eriti kui soojus on salvestunud maa-alustes kuumaveekogudes või kuuma auruna. Geotermaalelektrijaamade soojusvõtu vastuvõetavaks sügavuseks loetakse enamasti kuni 3 km.

Nüüdisaja geotermaalelektrijaamad põhinevad auruturbiinidel, mis kasutavad enamasti

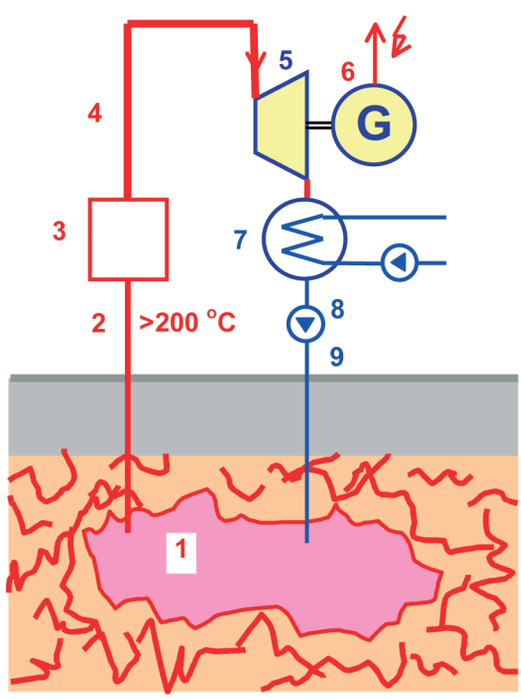
- maasisest kuuma ülekuumenenud auru (joonis **5.6.1**),
- maasisese kõrgrõhulise kuuma vee (temperatuuriga tavaliselt üle 200 °C) aurustamist (joonis **5.6.2**),
- maasisese kuuma vee (temperatuuriga tavaliselt 100…200 °C) juhtimist aurugeneraatorisse, kus aurustatakse mingit madala keemistäpiga vedelikku (joonis **5.6.3**).

Geotermaalelektrijaamade turbogeneraatoragregaatide nimivõimsus on enamasti 5…100 MW (väga harva rohkem), agregaatide arv jaamas võib olla ühest kuni paarikümneni. Eeltoodud joonistel näidatud kondensatsioonturbiinide asemel kasutatakse soojustarbijate olemasolul ka vasturõhuturbiine (rajatakse geotermaal-koostootejaamu). Maailma 10 suurimat geotermaalelektrijaama 2005. aasta lõpus on esitatud tabelis **5.6.1**. Kõigis nendes võidakse aga vanu agregaate demonteerida või uute vastu välja vahetada, samuti aga ka jaamu laiendada, mistõttu nende andmed varem või hiljem võivad muutuda.

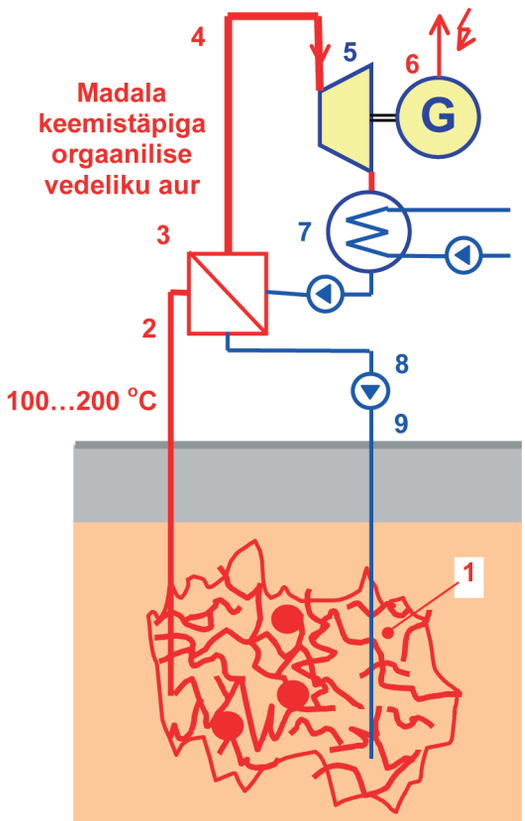
Geotermaalelektrijaamad on oma koosseisult ja ehituselt tunduvalt lihtsamad ja seetõttu enamasti ka odavamad kui muud soojuselektrijaamad, eriti kui saab kasutada ülekuumenenud geotermaalset auru. Nad ei eralda atmosfääri süsinikdioksiidi ega



Joonis 5.6.1. Maasisest kuuma auru kasutav geotermaalelektrijaam. *1* auruga täidetud lõhesid ja kaverne sisaldav kaljupinnas, *2* auruvõtutoru(d), *3* auruturbiin, *4* elektrigeneraator, *5* kondensaator, *6* pump, *7* vee tagasijuhtimistoru(d)



Joonis 5.6.2. Maasisest kuuma vett kasutav geotermaalelektrijaam. *1* maa-alune kuumaveekogu, *2* veevõtutoru(d), *3* aurusti, *4* aurutoru, *5* auruturbiin, *6* elektrigeneraator, *7* kondensaator, *8* pump, *9* vee tagasijuhtimistoru(d)



Joonis 5.6.3. Kuumast kuivast kivimikihist võetaval soojusel põhinev binaar-geotermaalelektrijaam. *1* tehislikult lõheliseks muudetud kaljuosa, *2* veevõtutoru(d), *3* aurugeneraator, *4* aurutoru, *5* auruturbiin, *6* elektrigeneraator, *7* kondensaator, *8* pump, *9* vee tagasijuhtimistoru(d)

muid gaase ja elektrienergia omatarve on neis tunduvalt väiksem kui muudes soojuselektrijaamades. Mõnevõrra keerukam ja kallim on soojuse saamine kuivast kuumast kivimikihist, mis enamasti asub ka sügavamal kui kasutatavad auru- ja kuumaveekogud. Seetõttu on seda liiki geotermaalelektrijaamu seni ehitatud suhteliselt vähe (kogu maailmas alla kümne). Geotermaaljaamade võimsust saab lihtsalt ning kiiresti reguleerida, kuid nad võivad talitleda ka kestvalt nimivõimsusega. See annab võimaluse sobitada neid kergesti energiasüsteemi mis tahes talitlusnõuetega. Mõnes geotermaalpiirkonnas võib aga probleeme tekitada aurus ja vees sisalduvate soolade väljafiltreerimine.

Geotermaal-elektrienergia tootmisest maade kaupa annab rahvusvahelisele geotermiakonverentsile aastal 2005 esitatud analüüsi [5.5] andmeil ettekujutuse joonis **5.6.4**, toodangust elaniku kohta geotermaalenergiat intensiivselt kasutavates maades aga joonis **5.6.5**.

Balti riikide ainus kasutuskõlbulik geotermaalpiirkond asub Leedus, Klaipeda ja Kretinga ümbruses. Kuni 2,5 km sügavuses paikneva kuuma kuiva liivakivikihi kasutamisel põhinevates binaar-geotermaaljaamades saaks seal toota elektrienergiat kuni 0,8 TWh aastas ja sinna ongi kavas rajada aastaks 2010 kaks suhteliselt väikest geotermaalelektrijaama (Klaipeda ja Vydmantai) koguvõimsusega mõni megavatt.

Tabel 5.6.1. Maailma 10 suurimat geotermaalelektrijaama 2005. aasta lõpus

Nimi või asukoht	Asukohariik	Agregaatide arv ja võimsus MW	Aasta*
Geysers	USA (California)	6 × 55 + 2 × 110 + 113 + 4 × 118 + + 138 = 1273	1985
Tongonan	Filipiinid	3 + 6 × 37,5 + 10 × 55 = 778	2004
Cerro Prieto	Mehhiko	4 × 25 + 4 × 37,5 + 30 + 4 × 110 = 720	2000
Makiling-Banahao	Filipiinid	2 × 47,5 + 6 × 55 = 425	1987
Salton Sea	USA (California)	1,5 + 3,5 + 5 + 9,5 + 10 + 11,5 + 30 + 3 × 36 + 50 + + 51 + 54 = 334	2000
Gunung Salak	Indoneesia	6 × 55 = 330	2000
Coso	USA (California)	8 × 30 + 32 = 272	1999
Tiwi	Filipiinid	4 × 55 + 43 = 263	2002
Geothermal 1 + 2	USA (California)	4 × 55 = 220	1986
Palinpinon	Filipiinid	2 × 1,5 + 5 × 37,5 = 190,5	1994

* Valmimis- või viimase renoveerimise aasta

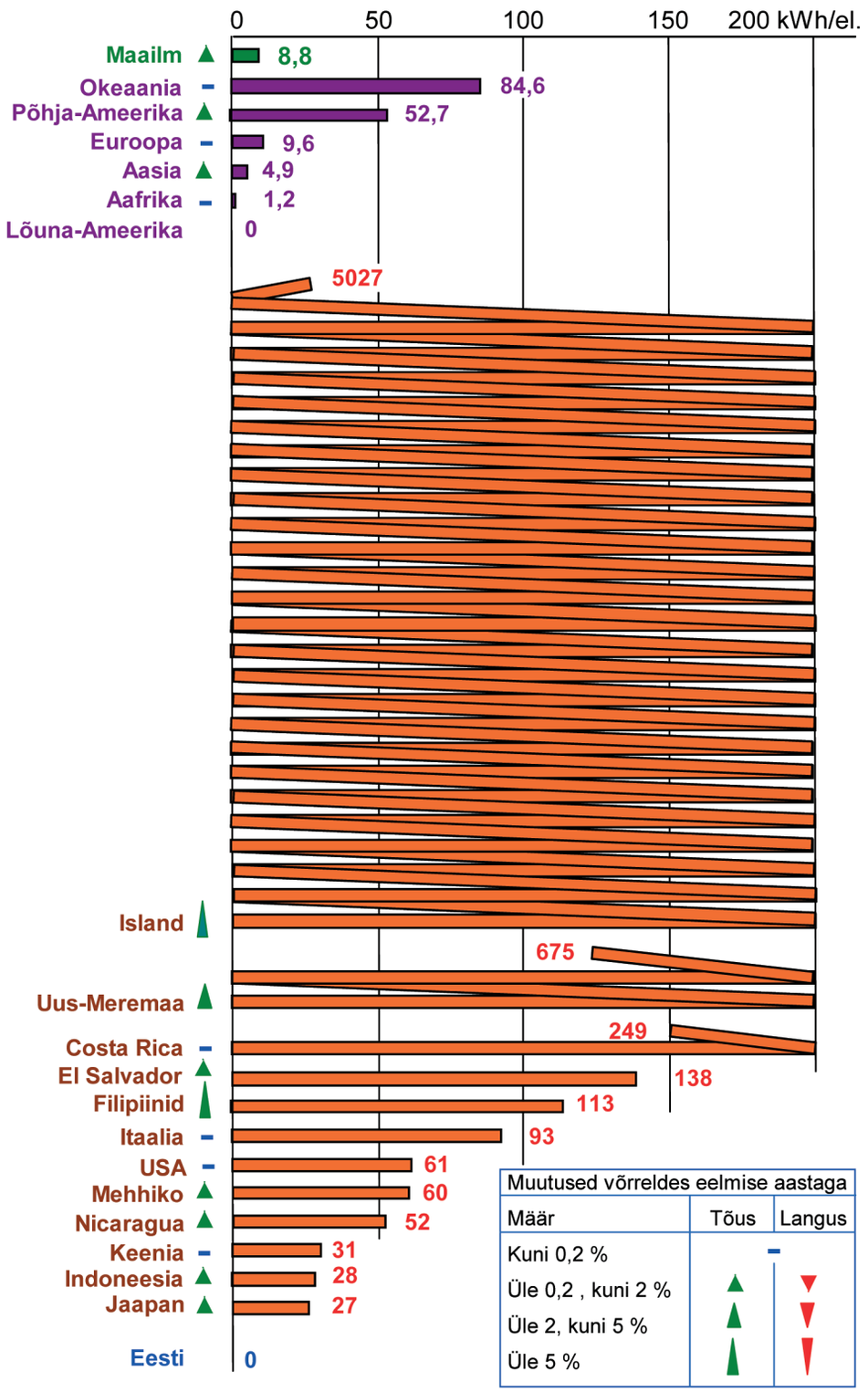
Maailm	56,79 TWh	
USA	17,92 TWh	31,6 %
Filipiinid	9,25 TWh	16,3 %
Mehhiko	6,28 TWh	11,1 %
Indoneesia	6,08 TWh	10,7 %
Itaalia	5,34 TWh	9,4 %
Jaapan	3,47 TWh	6,1 %
Uus-Meremaa	2,77 TWh	4,9 %
Island	1,48 TWh	2,6 %
Costa Rica	1,15 TWh	2,0 %
Muud maad	3,04 TWh	5,3 %
Eesti	0	

Joonis 5.6.4. Maailma suurimad geotermaalelektrienergia tootjad aastal 2005

Geotermaalsoojust saab kasutada ka otse, ilma elektrienergiaks muundamata. Eeskätt rakendatakse seda hoonete kütteks, kusjuures eriti suures ulatuses tehakse seda Islandil; nii näiteks on Reykjavikis välja ehitatud kogu linna haarav geotermaal-kaugküttesüsteem.

Arheoloogiliste uurimustega on kindlaks tehtud, et maapinnale tulevat termaalvett kasutasid Lipari saarele (Messina lähedal) asunud kreetalased tervistavates kuuma mineraalvee vannides ja basseinides oskuslikult juba 18.–16. sajandil eKr. Veel varem, ligikaudu 10 000 aastat tagasi, arvatakse olevat geisrite kuuma vett samal otstarbel kasutanud Põhja-Ameerika indiaanlased. Kindlalt on teada, et aastal 215 lasi Rooma keiser Caracalla (186–217) ehitada termaalveel põhinevad kuulsad *termid*, mis mahutasid kuni 1000 inimest. Taolisi supelasutusi ehitati Rooma impeeriumis ka mujale (sealhulgas nt praegusesse Budapesti). Aastal 1818 hakkas prantsuse ettevõtja François Jacques de Larderel (1789–1858) Toscana provintsis (Kesk-Itaalias) eraldama vulkaanilisest veest ja mudast vulkaanilise auru abil boorhapet ja asutas selleks väikese tehase. Sellesse paika tekkis linn, mis sai nime *Larderello*. Suurema boorhappetehase ehitas samasse paika aastal 1904 itaalia keemiateadlane vürst Piero Ginori-Conti (1865–1939), kes ühtlasi pani vulkaanilise auruga samal aastal esimesena maailmas käima aurumasina ja elektrigeneraatori (0,7 kW). 10. märtsil 1914 alustas samas talitlust maailma esimene geotermaalelektrijaam *Larderello 1* võimsusega 250 kW. Aastal 1949 saavutas jaam, mille esimene järk oli selleks ajaks suletud, kuid olid välja ehitatud järgud *2* ja *3*, võimsuse 185,5 MW. Geotermaalelektrijaamade intensiivsem rajamine algas 1950ndail aastail ja aastal 1960 võeti Californias käitu maailma suurima seda liiki jaama *Geysers* esimene agregaat. Geotermaalenergia kasutamine hoonete kaugkütteks algas Islandil aastal 1928. Aastal 1970 hakkas Jaapani elektrotehnikakontsern *Toshiba* sarjaviisiliselt tootma geotermaal-turbogeneraatoragregaate võimsusega enamasti 55 või 110 MW, mida rakendatakse nii Jaapani kui ka Filipiinide, Indoneesia ja teiste, eeskätt Aasia riikidesse rajatavates geotermaalelektrijaamades.

Binaar-geotermaalelektrijaamadega, rohkem aga soojuspumpadega sarnanevad *ookeanivee pinnakihi soojust* kasutavad elektrijaamad, mida alates aastast 1930 on õnnestunud ehitada üksnes katselistena ja võimsusega kuni 1 MW. Ükski nendest jaamadest ei ole talitlenud kauem kui mõni kuu, kuid loodetakse, et aastal 2004 India lääneranniku asuva Tuticorini sadama lähedal käitu võetud, parvel paiknev jaam võimsusega 1 MW osutub töökindlamaks. USAs, Jaapanis ja mujal on koostatud projekte võimsusega kuni 100 MW, mis on aga seni veel realiseerimata.

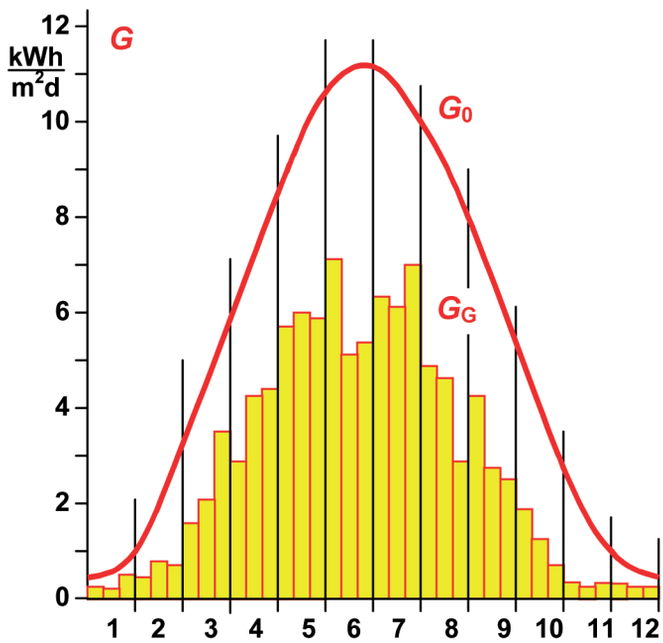


Joonis 5.6.5. Geotermaalelektrienergia tootmine ühe elaniku kohta aastal 2005. Esitatud on riigid, milles see näitaja on vähemalt *2* korda suurem kui maailma keskmine

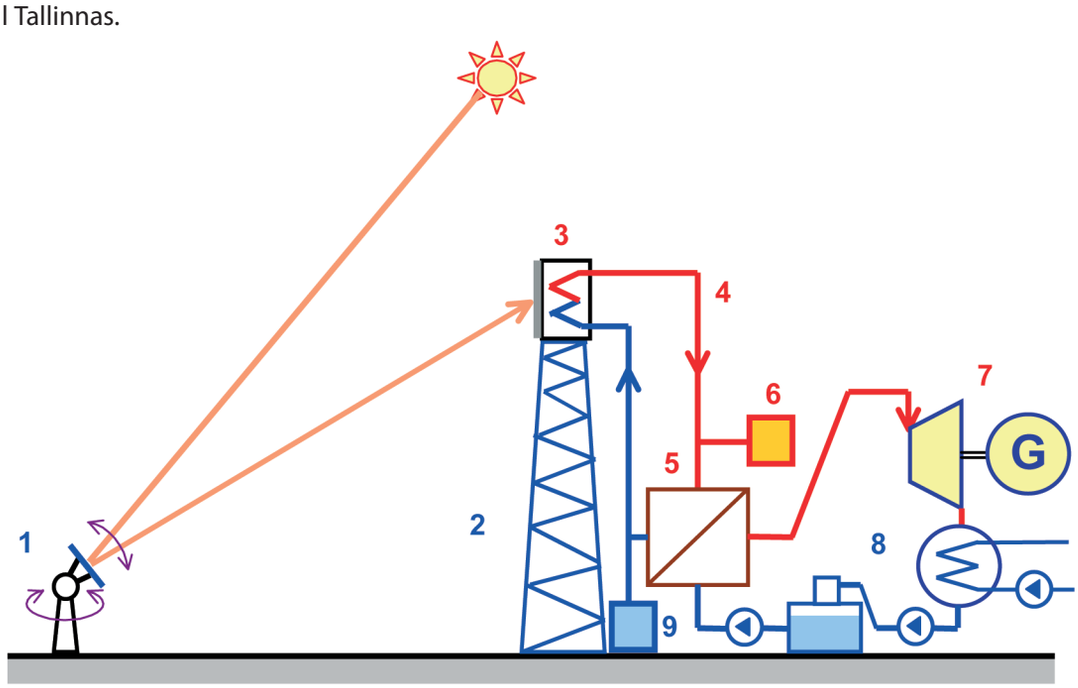
5.7 PÄIKESEELEKTRIJAAMAD

Päikesekiirgust, mille tihedus maapinnal risti päikesekiirtega on ligikaudu 1 kW/m², saab suhteliselt lihtsalt muundada nii soojuseks kui ka elektrienergiaks ning mõlemal kujul nii edastada kui ka salvestada. Energia salvestamist on hakatud lugema isegi möödapääsmatuks, sest elektri- või soojustarbimist on vaja katta ka sel ajal, kui päikesekiirguse madalam intensiivsus ei taga jaama normaalse võimsusega talitlust.

Päikesekiirguse kiiritustihedus maapinnal koosneb otsesest päikesekiirgusest ja hajutatud taevakiirgusest. Enamik päikeseelektrijaamu kasutab üksnes otsest päikesekiirgust ja annab energiat seega ainult päikesepaistelisel ajal. Nende rajamine on otstarbekas Maa sellistes piirkondades, kus taevas on enamuse päevaajast pilvitu, seega eeskätt kõrbealadel, kuid ka mõnelpool mujal, enamasti Maa ekvatoriaal- ja troopikavöötmes asuvatel vähestе sademetega aladel. On aga ka jaamu (nt fotoelektrilisi), mis võivad peale otsese päikesekiirguse kasutada ka hajukiirgust ning leida rakendamist Maa parasvöötmeski, sealhulgas nt Baltimaades. Parasvöötmes tuleb aga arvestada taolisest jaamast saadava energia suurt aastaajalist kõikumist. Näitena on joonisel **5.7.1** esitatud rõhttasandi keskmise kümnepäevase kiiritustiheduse muutumine aasta jooksul Tallinnas.



Joonis 5.7.1. Keskmise kümnepäevane kiiritustihedus rõhttasandil Tallinnas näitena võetud aastal. G_0 atmosfääri ülapiiril, G_G maapinnal



Joonis 5.7.2. Torn-päikeseelektrijaama ehituspõhimõte (skemaatiliselt). *1* päikese suunda järgiva ajamiga peegel, *2* torn, *3* kiirguse vastuvõtuseadis, *4* kõrge keemistäpiga vedel soojuskandja, *5* aurugeneraator, *6* soojussalvesti, *7* auruturbiin-generaator-agregaat, *8* kondensaator, *9* soojuskandja varu

Joonis näitab, et rõhtne (ega ka muu) liikumatu tasand ei sobi kuigi hästi päikesekiirguse vastuvõtuks. Kui võtta aga kiirgust vastu reguleeritaval, päikesekiirte suuna järgi orienteeritaval tasandil, saab kiiritustiheduse nii aastast kui ka päevast kõikumist tugevasti vähendada.

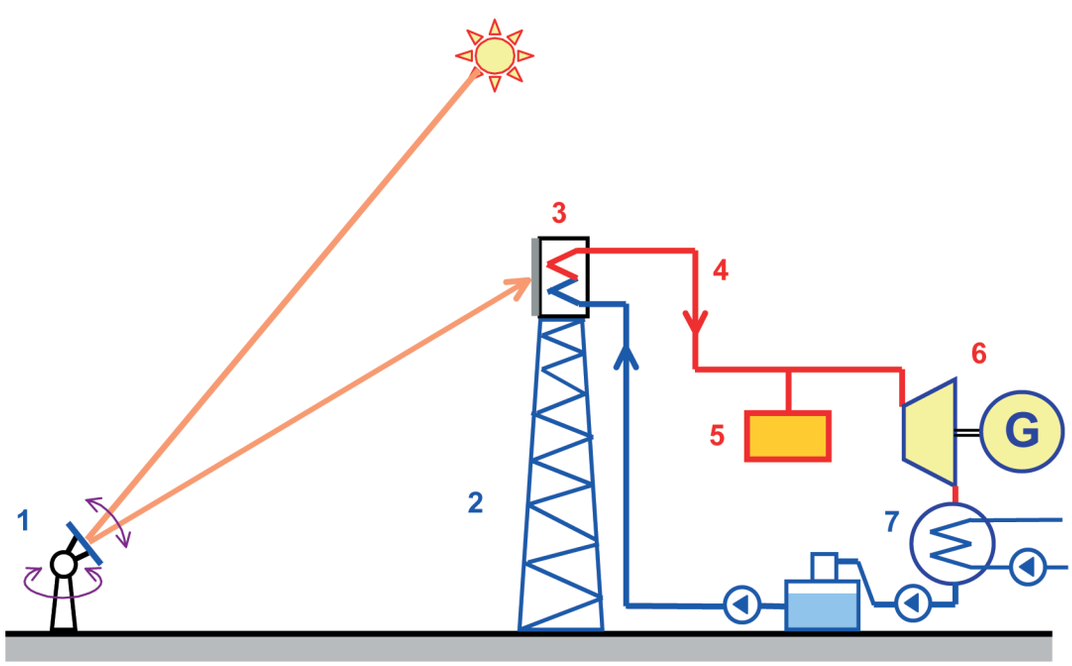
Päikeseelektrijaamad ja muud päikesekiirgust kasutavad paigaldised võib jagada kahte rühma:

- kiirguse kontsentreerimisega peegel- või läätssüsteemide abil (nt paraboloidpeegel- ja torntüüpi päikeseelektrijaamad),
- kiirguse kontsentreerimiseta (nt õhuturbiin- ja tiiktüüpi päikeseelektrijaamad ja enamik fotoelektrilisi elektrijaamu).

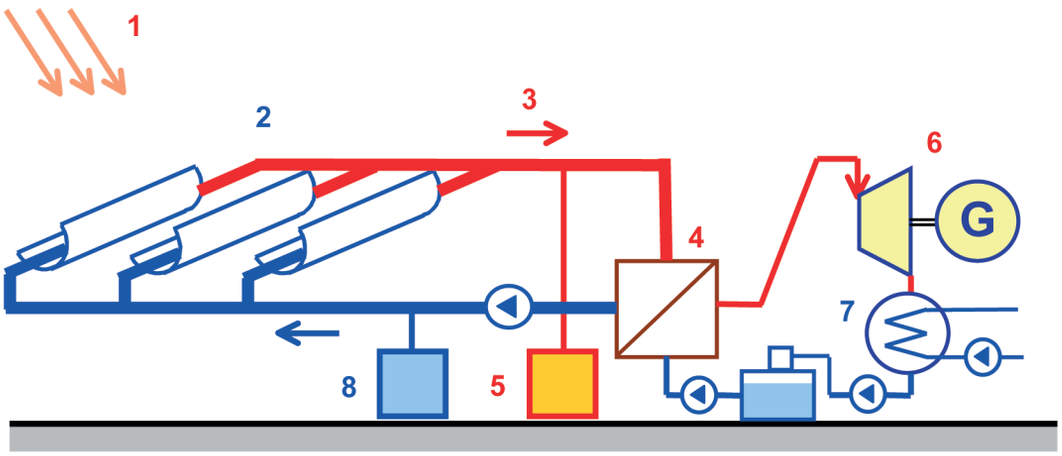
Torn-päikeseelektrijaamades kasutatakse päikesekiirguse kontsentreerimiseks automaatselt, järgiv- või programmjuhtimisega elektriajami abil pööratavaid tasapeegleid (*heliostaate*), mis suunavad kiirguse väiksemapinnalisele, suure neeldumisteguriga (nt 0,95 või enam) vastuvõtuseadisele (joonis **5.7.2**).

Seni ehitatud torn-päikeseelektrijaamades on ühe heliostaadi pindala kuni ligikaudu 100 m^2 ja heliostaatide arv kuni 2500. Kiirgusvastuvõtja vastuvõtupinnal saavutatakse tavaliselt kiiritustihedus kuni 600 kW/m^2, mis võimaldab kuumutada soojuskandjat (nt sünteetilist õlitaolist vedelikku või leelismetallnitraati) temperatuurini kuni ligikaudu 1000 °C. Enamasti kasutatakse siiski madalamat temperatuuri (500,,,600 °C). Joonisel **5.7.2** kujutatud kahekontuurilise skeemi asemel võidakse kasutada ka ühekontuurilist, mille puhul torni tipus paikneb päikesekiirgusega köetav aurugeneraator (joonis **5.7.3**).

Esimene torntüüpi päikeseelektrijaam (võimsusega 64 kW), mille ehitus vastas ligikaudu joonisele **5.7.3**, kuid milles heliostaatide asemel kasutati 2500 m^2 suurust paraboolpeeglit, lülitati pidulikult talitlusse 25. jaanuaril 1977 Odeillos (Prantsusmaa Püreneedes). Aastal 1981 valmis Mojave kõrbes Daggettis (California, USA) joonisele **5.7.2** vastava skeemiga päikeseelektrijaam *Solar One* väljundvõimsusega 10 MW. Selles jaamas oli 1818 heliostaati kogupindalaga 72 500 m^2 ja see oli käidus aastani 1986. Seejärel jaam renoveeriti, lisades veel 108 heliostaati kogupindalaga 10 260 m^2 ja võttes soojuskandjana kasutusele naatrium- ja kaaliumnitraadi segu (60 % $NaNO_3$ ja 40 % KNO_3). Jaama (*Solar Two*) väljundvõimsuseks jäi 10 MW. Ehitamisel on sama tüüpi elektrijaam *Solar Tres* võimsusega 15 MW, peeglite üldpindalaga 240 000 m^2 ja soojussalvestusvõimega 600 MWh, mis tagab jaama ühtlase väljundvõimsuse kogu suve jooksul ja nimivõimsuse aastase kasutusteguri 65 %. Lõuna Aafrika Vabariigis algasid aastal 1998 uurimused taolist tüüpi jaama *Northern Cape* ehitamiseks väljundvõimsusega 100 MW (4000…5000 heliostaati à 140 m^2).



Joonis 5.7.3. Ühekontuurilise torn-päikeseelektrijaama ehituspõhimõte (skemaatiliselt).
***1* päikese suunda järgiva ajamiga peegel, *2* torn, *3* aurugeneraator, *4* aur, *5* aurusalvesti, *6* auruturbiin-generaator-agregaat, *7* kondensaator**



Joonis 5.7.4. Rennpeegel-päikeseelektrijaama ehituspõhimõte (skemaatiliselt).
***1* päikesekiirgus, *2* rennpeeglite väli, *3* kõrge keemistäpiga vedel soojuskandja, *4* aurugeneraator, *5* soojussalvesti, *6* auruturbiin-generaator-agregaat, *7* kondensaator, *8* soojuskandja varu**

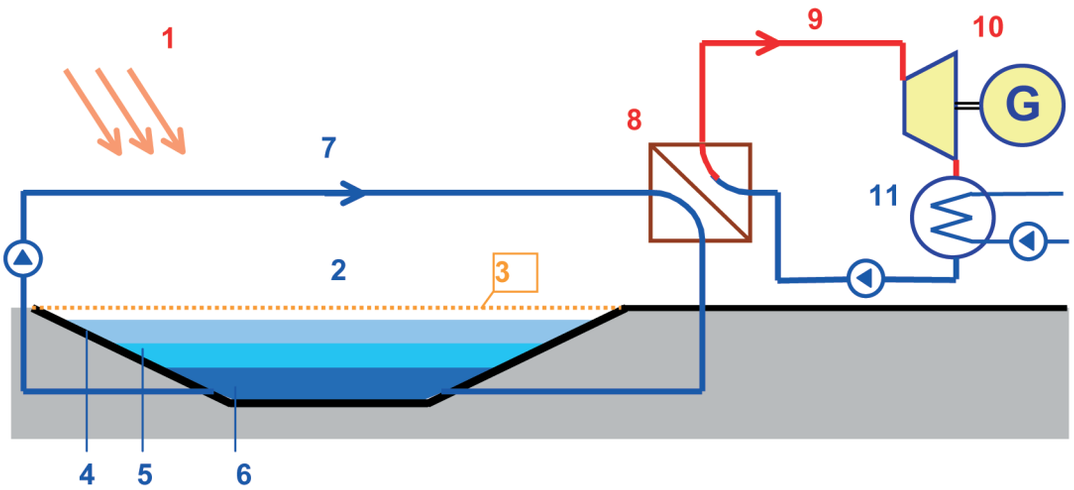
Torntüüpi päikeseelektrijaamade kasutegur on vahemikus 12…20 %. Ühelsamal väljundvõimsusel on sellised päikeseelektrijaamad 2,5…3 korda kallimad kui klassikalised põletuskütus-elektrijaamad, kuid seda puudust kompenseerib nende põhieelis – süsinikdioksiidi ja muude heitmete täielik puudumine.

Mõnevõrra lihtsama ehitusega on paraboolsilinderpinnal põhinevate **rennpeeglitega** päikeseelektrijaamad, mille ehituspõhimõte on esitatud joonisel **5.7.4**.

Kõrge keemistäpiga vedel soojuskandja kulgeb mustapinnalistes suure neeldumisteguriga terastorudes, mis paiknevad rennpeeglite fookuses, ja kuumeneb enamasti temperatuurini 300…400 °C; aurugeneraatoris jahtub see tavaliselt temperatuurini 120…130 °C. Soojuskadude vähendamiseks on eelnimetatud terastorud ümbritsetud veel klaastorudega. Rennpeegli laius on tavaliselt 2…5 m ja pikkus kuni 150 m. Erinevalt heliostaatidest saab paraboloidrennidel muuta päikese järgimisel üksnes kaldenurka, mitte aga rõhtsat suunanurka. Seetõttu on päikesekiirguse kasutustegur selles süsteemis väiksem (tavaliselt 10…12 %), kuid kogu süsteem on lihtsam ja odavam ning seda on kergem ehitada suhteliselt suure nimivõimsusega.

Rennpeeglite kasutamine väikese võimsusega elektrijaamades algas juba 1930ndail aastail. Aastail 1984…1986 valmis aga eelmainitud tornjaama *Solar One* kõrval maailma esimene suure võimsusega rennpeegeljaam, mis koosnes kahest järgust *SEGS-I* ja *SEGS-II* väljundvõimsusega vastavalt 13,8 ja 30 MW (*SEGS = Solar Energy Generating System*). Aastail 1987…1989 valmis samas Mojave kõrbes, 30 km nimetatust eemal, paigas nimega Kramer Junction 5 järgust (*SEGS-III* kuni *SEGS-VII*) koosnev päikeseelektrijaam väljundvõimsusega 5 x 30 = 150 MW, aastail 1989…1990 aga paigas nimega Harper Lake maailma seniajani võimsaim päikeseelektrijaam 92 + 108 MV (*SEGS VIII* ja *SEGS-IX*). Sama tüüpi, kuid mõnevõrra väiksema võimsusega elektrijaamu on mujalgi ja näiteks aastail 2007…2008 peaks Hispaanias Granada provintsis valmima selline elektrijaam võimsusega 100 MW, mille rennpeeglid võtavad enda alla pindala 1,3 km x 1,5 km.

Pöördparaboloidpeegleid on päikesekiirguse kontsentreerimiseks kasutatud seni peamiselt väikese võimsusega (kuni 10 kW) pisielektrijaamades ja kuumutus- või keeduseadmeis (sealhulgas toiduvalmistamiseks). Aastal 2005 sõlmis USA firma *Stirling Energy Systems Inc.* aga Lõuna-California energiasüsteemiga (*Southern California Edison*) lepingu sellistel kontsentraatoritel põhineva 500 MW võimsusega elektrijaama ehitamiseks. Jaamas on ette nähtud 20 000 paraboloidpeeglit läbimõõduga 12 m (tegelikult koosnevad need 89 osapeeglist), mis järgivad päikese suunda ja kontsentreerivad päikesekiirguse stirlingmootoreile võimsusega 25 kW. Jaam peaks tõenäoliselt valmima aastaks 2010 ja seda kavatsetakse hiljem laiendada võimsuseni 850 MW. Californias on kavandatud ka teisi samasuguseid elektrijaamu.



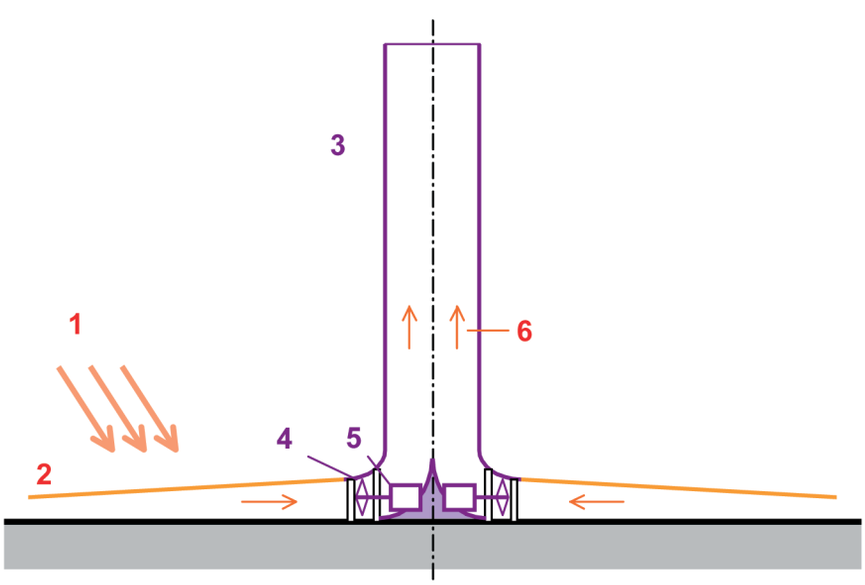
Joonis 5.7.5. Tiik-päikeseelektrijaama ehituspõhimõte (skemaatiliselt).
***1* päikesekiirgus, *2* päikesetiik, *3* lainetusvastane võrk, *4* vee lahja pinnakiht, *5* vee keskkiht (põhja suunas suureneva soolsusega), *6* vee suure soolsusega põhjakiht, *7* kuum soolalahus, *8* aurusti, *9* madala keemistäpiga vedeliku aur, *10* auruturbiin-generaator-agregaat, *11* kondensaator**

Päikesekiirguse kontsentreerimisel põhinevate (peamiselt rennpeegel- ja torntüüpi) soojuselektrijaamade koguvõimsus maailmas oli 2005. aasta lõpus ligi 400 MW. Päikeseelektrijaamu saab kujundada ka ilma päikesekiirguse kontsentreerimiseta. On olemas kolme liiki selliseid jaamu:

- *päikesetiigil* põhinevad jaamad,
- päikesekiirguse toimel kuumenenud õhu ülesvoolul põhinevad jaamad,
- fotoelementidel põhinevad jaamad.

Päikesetiik kujutab endast madalat (tavaliselt sügavusega ligikaudu 3 m) veega täidetud basseini, mille põhjakihi vee tihedus on mingi soola lahustamise teel muudetud suuremaks kui ülemiste kihtide oma. Pinnakihi läbipaistvuse ja põhja tumeda pinnakatte tõttu neeldub päikesekiirgus vee põhjakihis, mistõttu selle temperatuur tõuseb väärtuseni 90 °C või isegi kõrgemale, pinnakihi temperatuur jääb aga tavaliselt tasemele ligikaudu 30 °C. Konvektiivset soojusülekannet põhjakihist pinnakihti takistab põhjakihi suurem tihedus. Kuumenenud soolalahust saab kasutada madala keemistäpiga soojuskandja aurustamiseks, kusjuures aur suunatakse sellekohase eriehitusega auruturbiini (joonis **5.7.5**).

Turbiini juurde kuuluva kondensaatori jahutusvett võib võtta sama tiigi pinnakihist ja suunata samasse tagasi. Jaama kasutegur on vahemikus



Joonis 5.7.6. Õhuvoolu-päikeseelektrijaama ehituspõhimõte.
***1* päikesekiirgus, *2* õhukollektori läbipaistev kate, *3* korsten, *4* õhuturbiin, *5* generaator, *6* õhuvool**

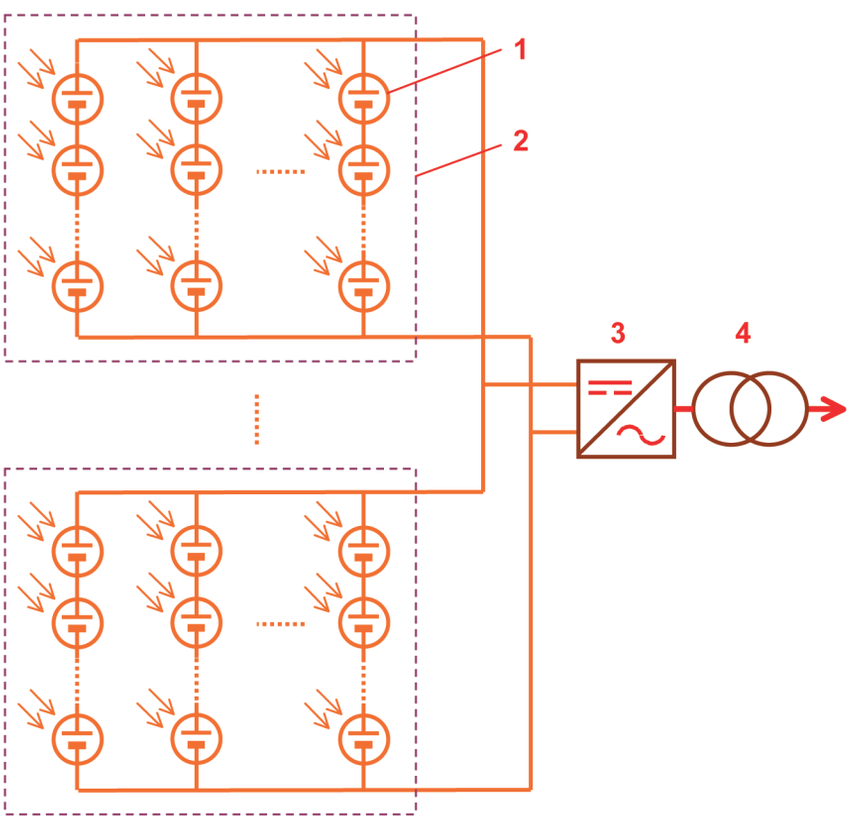
4…8 % ja ühesugusel võimsusel on selle üldpindala sama suur nagu rennpeegelelektrijaamadel. Jaama eelis teiste päikeseelektrijaamade ees seisneb pideva, päikesepaistest sõltumatu talitluse võimaluses, sest soojussalvesti ülesannet täidab tiik ise.

Maailma esimene seda liiki elektrijaam (tiigi pindalaga 7000 m^2 ja generaatori talitlusvõimsusega 150 kW) valmis aastal 1979 Iisraelis, Surnumere lähedal. Aastast 1986 talitleb teine selline jaam (tiigi pindalaga 3350 m^2 ja generaatori võimsusega 100 kW) El Paso linnas (Texas, USA) ja kuulub Texase ülikoolile. Aastal 1993 võeti talitlusse sama liiki ning ligikaudu samasuguse võimsuse jaam Indias, Gujarati provintsis asuva Bhuj linna lähedal. Suuremaid jaamu seni ehitatud ei ole.

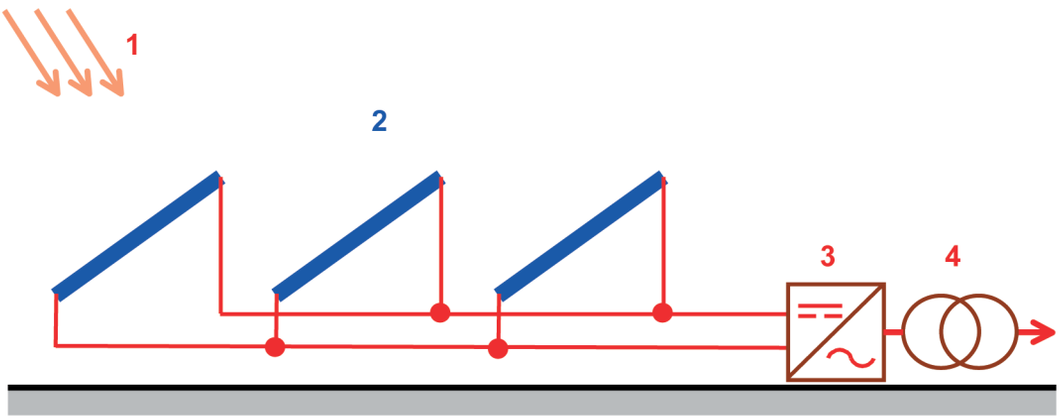
Tõusval õhuvoolul põhineva päikeseelektrijaama ehituspõhimõte on kujutatud joonisel **5.7.6**. Jaam koosneb maapinna lähedal paiknevast lamedast, läbipaistva (nt polümeerkile-) kattega õhukollektorist, milles õhk päikesekiirguse toimel kuumeneb, ja kollektori keskel asuvast korstnast, mis tekitab tugeva loomuliku tõmbe. Korstna jalamil paiknevad rõhtsa teljega õhuturbiinid. Väiksemate jaamade korral võib kasutada aga ka ühtainust, korstnas paiknevat püstse võlliga turbiini. Õhukollektoris võib jaama talitluse ühtlustamiseks olla ette nähtud vesi- või muu soojussalvesti.

Sellise elektrijaama idee pärineb juba aastast 1903, kuid esimene ning seni ainus jaam võimsusega 50 kW ehitati aastal 1982 Manzaraneses (Hispaanias, 150 km Madridist lõuna pool). Kollektori läbimõõt oli 244 m, korstna läbimõõt 10 m ja kõrgus 195 m. Jaam sai tormi tõttu kahjustada ja lammutati aastal 1989. Austraalias, Victoria osariigis on kavatsusel rajada mitu sellist liiki jaama võimsusega à 200 MW, mille kollektori läbimõõt oleks ligi 6 km, korstna läbimõõt 130 m ja korstna kõrgus 1000 m. Ümber korstna jalami tuleks paigutada 32 turbiin-generaator-agregaati ja jaama erimaksumuseks arvatakse kujunevat 1500…2000 $/kW.

Fotoelement- ehk fotogalvaanilistes elektrijaamades muundatakse päikesekiirgus otseselt alalisvoolu-elektrienergiaks ventiilfotoelementide abil (vt jaotis **2.11**). Selleks moodustatakse fotoelementidest lamedad, tavaliselt mõne ruutmeetri suurused paneelid (moodulid), mis ühendatakse sobiva pinge saamiseks jadamisi. Moodulijadadest moodustatakse rööpühendamise teel sektsioonid, mis omakorda ühendatakse vastavalt soovitavale võimsusele rööbiti. Sektsioonid või nende rühmad varustatakse vahelditega, mis lülitatakse toidetavasse elektrivõrku. Lihtsustatult on taoline skeem esitatud joonisel **5.7.7**, päikeseelektrijaama ehitusliku kujunduse põhimõte aga joonisel **5.7.8**.



Joonis 5.7.7. Fotoelement-päikeseelektrijaama põhimõtteskeem. *1* fotoelektriline moodul, *2* fotoelektriline sektsioon, *3* vaheldi, *4* trafo. Lülitus- ja kaitseaparaadid ning muud abiseadmed on näitamata



Joonis 5.7.8. Fotoelement-päikeseelektrijaama ehituspõhimõte (skemaatiliselt).
***1* päikesekiirgus, *2* fotoelektriliste paneelide väli, *3* alaldi, *4* trafo**

Ühe fotoelektrilise mooduli (päikesepaneeli) võimsus on tavaliselt 50…1000 W, moodulite arv võib aga suurtes päikeseelektrijaamades olla kuni mõnisada tuhat. Moodulid võivad olla paigaldatud mingis kindlas asendis, mis vastab päikese keskmisele kõrgusele ja suunale, kuid võivad olla ka automaatselt, päikest järgivalt kallutatavad ja pööratavad. Olenevalt fotoelementide liigist on sellise päikeseelektrijaama kasutegur käesoleval ajal vahemikus 10…20 % ja erimaksumus 4000…5000 eurot kilovati kohta.

Maailma esimene katseline fotoelektriline päikeseelektrijaam ehitati aastal 1977 Massachusettsi tehnikaülikoolis (*Massachusetts Institute of Technology*, USA). Aastail 1995…2000 odavnesid fotoelemendid sel määral, et selliste elektrijaamade rajamine, arvestades seejuures nende keskkonnasõbralikkust, esialgu võimsusega kuni 1 MW, muutus majanduslikult otstarbekohaseks. Aastal 2006 ehitati Pockingis (Saksamaal, Bayeri liidumaal) jaam võimsusega 10 MW ja aastal 2009 peaks Portugalis Moura linna lähedal valmima jaam võimsusega 62 MW. On hakatud uurima ka võimalusi suurte fotoelektriliste päikeseelektrijaamade rajamiseks Põhja-Aafrikasse ja toodetava elektrienergia edastamiseks Euroopasse.

Väga palju on üle kogu maailma ehitatud väiksema võimsusega fotoelement-päikeseelektrijaamu (võimsusega 10…1000 kW) üksikhoonete ja hoonerühmade elektrivarustuseks. Taolised energiapaigaldised võivad osutuda otstarbekaiks isegi Eesti päikeseoludes. Üldse oli maailmas 2005. aasta lõpus fotoelektrilisi päikese-elektrijaamu koguvõimsusega 5,4 GW, millest elektrivõrku oli lülitatud 3,1 GW.

Aastal 1968 esitas USA füüsik Peter E. Glaser idee paigaldada päikesepaneelid Maa tehiskaaslasele, mis tiirleb 36 000 km kõrgusel (asudes, nagu paljud side-tehiskaaslased, Maa mingi kindla punkti kohal), muundada saadav alalisvool ülikõrgsagedus-vahelduvvooluks (sagedusega 2,5 GHz ehk lainepikkusega 12 cm) ja edastada see paraboloid-suundantenni abil Maale. Võimsuse 5…10 GW korral oleks päi-kesepatarei pindala ligikaudu 50…100 km^2, saateantenni läbimõõt 1…1,5 km, vastuvõtuantenni läbimõõt 10…14 km ja elektriedastuse kasutegur ligikaudu 70 %. Seniajani ei ole aga veel teada, millal selle idee realiseerimine tehnilis-majanduslikult võimalikuks võib osutuda.

5.8 ALAJAAMAD

Alajaamad on elektrivõrkudes ette nähtud enamasti pinge muundamiseks, kuid neis võidakse muundada ka voolu liiki. Ühtlasi toimub alajaamades ka muundatud elektrienergia jaotamine. Vastavalt muundusviisile eristatakse

- trafoalajaamu, mis pinget enamasti madaldavad, kuid on ka pinget kõrgendavaid trafoalajaamu;
- alaldusalajaamu;
- inverteralajaamu;
- sagedusmuunduralajaamu.

Alljärgnevalt vaadeldakse lühidalt trafoalajaamade seadmestikku ja ehitust.

Enamasti koosneb pinget madaldav trafoalajaam kolmest selgelt piiritletud seadmekompleksist (vt joonis **5.8.1**):

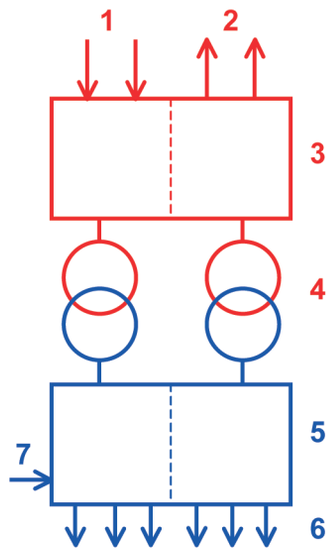
- ülempingejaotla,
- trafod,
- alampingejaotla.

Töökindluse tagamise huvides on trafosid alajaamas enamasti kaks. Lihtsamatel juhtudel, kui tarbijad taluvad alajaamaseadmete remonditöödest või riketest tingitud elektrikatkestusi, võib alajaamas olla ka üksainus trafo. Selliseid, enamasti linnade ja maapiirkondade madalpingevõrkusid toitvaid alajaamu nimetatakse *trafopunktideks*. Selliseid alajaamu võib aga ka omavahel vastastikku reserveerida, nähes selleks ette vastava ühendusliini (nagu nt liin *7* joonisel **5.8.1**).

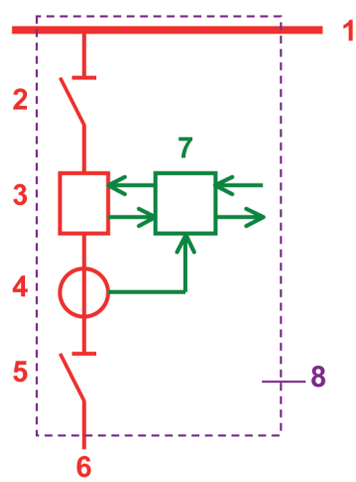
Alajaama jaotlad ja trafod võivad paikneda omaette hoones, mingi muu hoone sellekohastes ruumides (mõlemal juhul nimetatakse sellist alajaama *sisealajaamaks*) või väljas (*välis- ehk vabaõhualajaam*). On ka alajaamu, mille osa seadmeid (nt ülempingejaotla ja trafod) paiknevad vabas õhus, osa aga (nt alampingejaotla) siseruumides.

Nii kõrge- kui ka madalpingejaotla on jagatud vastavalt trafode arvule ***sektsioonideks***, mis võivad olla pidevalt kokku ühendatud, kuid võivad olla ka eraldatud ja lülitatakse kokku ainult vajaduse korral (nt ühe trafo väljalülitamisel). Joonisel **5.8.1** on sektsioonide piirid tähistatud mõttelise punktiirjoonega. Sektsiooni iga liini ja trafo ahelas nähakse ette lülitus- ja kaitseaparaadid, mis koondatakse teistest ahelatest eraldatult nn *lahtrisse*. Lahtrid ühendatakse omavahel kogumislattidega (joonis **5.8.2**).

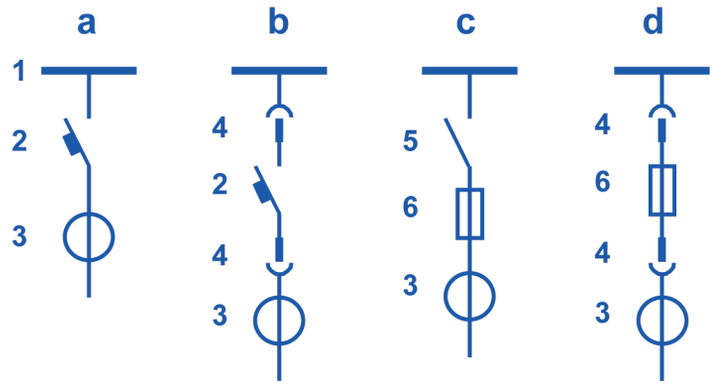
Kõrgepingejaotla lahtri koosseisu kuuluvate lülitus- ja kaitseadmete hulgas on tähtsaimal kohal **võimsuslüliti**, mille abil peab saama liini või trafot sisse ja välja lülitada ja mis peab olema võimeline



Joonis 5.8.1.
Pinget madaldava alajaama struktuur (näide).
***1* sisenevad ülempingeliinid,**
***2* väljuvad ülempingeliinid (võivad ka puududa),**
***3* ülempingejaotla,**
***4* trafod, *5* alampingejaotla,**
***6* väljuvad alampingeliinid,**
***7* sisenev(ad) alampingeliin(id)**
(ei pruugi olla ette nähtud)



Joonis 5.8.2. Kõrgepingejaotla lahtri skeem (näide).
***1* kogumislatid, *2* latilahklüliti,**
***3* võimsuslüliti, *4* voolutrafo,**
***5* liinilahklüliti,**
***6* ühendus liini või trafoga,**
***7* juhtimis-, kaitse-, mõõte- ja**
signalisatsioonisüsteem,
***8* lahter**



Joonis 5.8.3. Madalpingejaotla lahtrite skeeme (näited).
***a* kohtkindla, *b* väljatõmmatava kaitselülitiga, *c* kohtkindla, *d* väljatõmmatava sulavkaitsmekomplektiga.**
***1* kogumislatid, *2* kaitseliiliti, *3* voolutrafo (kui see on mõõtmisteks vajalik), *4* pistikühendus,**
***5* vinnaklüliti, *6* sulavkaitse**

ka rikete korral tekkida võivat lühisvoolu töökindlalt katkestama. Väljalülitamisel tekkivat elektrikaart kustutatakse võimsuslülitis, olenevalt selle ehitusest,

- õlis,
- suruõhujoas,
- vaakumis,
- elegaasis (väävelheksafluoriidis SF_6).

Vastavalt sellele eristatakse õli-, õhk-, vaakum ja elegaas-võimsuslüliteid. On ka mõningaid muid, harvemini esinevaid lülitite ehitusviise. Võimsuslüliteid juhitakse nüüdisajal enamasti mikroprotsessorsüsteemi abil, mille kaudu saab edastada tahtlikke käsklusi ja mis töötleb elektriahelaist saadavat informatsiooni ning käivitab tarbe korral vastava automaatse lülitustoimingu. Ühtlasi annab see juhtimiskeskusele infot lüliti seisundi ning sooritatud lülitustoimingute kohta koos vajalike mõõteandmetega.

Varem põhines võimsuslülitite automaatjuhtimine mitmesugustel elektromagnetilistel ja muudel *releedel*. Olemasolevates vanemates paigaldistes on neid praegugi kasutusel.

Võimsuslüliti ülevaatuseks või remondiks on seda vaja lahtri muudest, pinge all olevatest osadest töökindlalt lahutada. Selleks kasutatakse ***lahklüliteid***, mille sisse- ja väljalülitamine tohib toimuda ükskõnes vooluvabas olekus (võimsuslüliti väljalülitatud seisundis). Ühtlasi peavad nad tagama inimeste ohutuse (*kaitselahutuse*), mistõttu lahklüliti ajam on väljalülitatud seisundis enamasti lukustatav. Kogumislattidepoolset lahklülitit nimetatakse *latilahklülitiks*, liinipoolset aga *liinilahklülitiks*. Kui liini pingestumine muudest allikatest on täiesti välistatud, võib liinilahklüliti ära jääda.

Pingel kuni umbes 20 kV võib lahtri ehitus olla selline, et võimsuslüliti paikneb väljatõmmataval *vankril*. Sel juhtumil asendavad lahklüliteid kõrgepingelised pistikühendused, mille üks pool paikneb vankril, teine pool aga lahtri kohtkindlal osal.

Mõnes lihtsamas paigaldises saab lühisvoolude lahutamiseks kasutada võimsuslüliti asemel kõrgepingelisi sulavkaitsmeid. Sel juhul toimuvad lülitustoimingud *koormuslülitite* abil, mille kaarekustutusseadis on lihtsam ja väiksema lahutusvõimega kui võimsuslülititel.

Madalpingejaotlate lahtrites nähakse lühisvoolude katkestamiseks ette **kaitselülitid** või **sulavkaitsmed**, mis võivad olla paigutatud kohtkindlalt või väljatõmmatavatel tarinditel (joonis **5.8.3**). Kui madalpingelist kaitse-, vinnak- vm lülitit saab kasutada kaitselahutuseks (*turvalülitina*), nähakse väljalülitatud seisundis tavaliselt ette selle käepideme lukustamise võimalus.

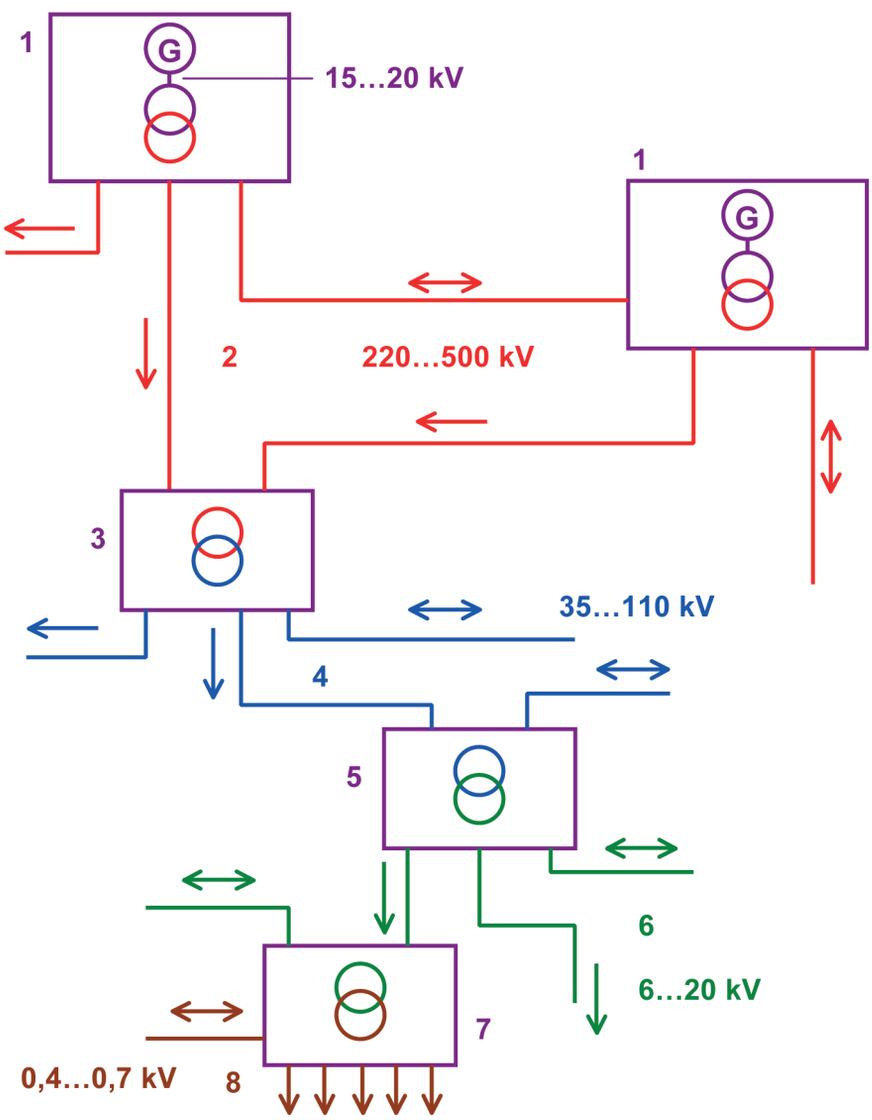
Välispaigalduseks ettenähtavad trafod on enamasti õlitäitega. Et trafo lekke korral vältida pinnase saastumist õliga, nähakse trafo all ette õlikogumisvann või õli juhtimine alajaama ühtsesse õlikogumissüsteemi. Sama kehtib ka õlitäitega trafode paigaldamisel siseruumidesse. Sisepaigaldusel võidakse aga kasutada õlivabu (*kuivi*) trafosid, mis selliseid meetmeid ei nõua ja mida seetõttu saab vajaduse korral paigutada ka nt tootmisruumidesse ja hoonete ülemistele korrustele.

Alajaamade ehitust ja projekteerimist vaadeldakse põhjalikult õppeaines *Elektrivarustus*.

5.9 ENERGIASÜSTEEMID

Energiasüsteemid, nagu juba mainitud jaotises **5.1**, koosnevad elektrijaamadest, mitmesuguse pingega elektrivõrkudest ja alajaamadest. Energiasüsteemi koostisse võivad kuuluda ka kaugkütte-soojusvõrgud. Energiasüsteemi ülesehituspõhimõte (ilma soojusvõrkudeta) on esitatud joonisel **5.9.1**.

Energiasüsteemi elektrijaamad on ühendatud süsteemi **põhivõrku**, mis tavaliselt talitleb pingel 220…500 kV (Eestis 110…330 kV, kusjuures sellesse kuuluvad ka 35-kV merekaabelliinid mandri ja Saaremaa vahel). Põhivõrgu alajaamad toidavad regioonide jaotusvõrke, mis talitlevad tavaliselt pingel 35…110 kV (Eestis 15, 20 või 35 kV). Regioonivõrgu alajaamadest saavad toidet linnade, ettevõtete ja maakohtade kõrgepingelised jaotusvõrgud, mis tavaliselt talitlevad pingel 6…20 kV (Eestis 6 või 10 kV). Kohaliku jaotusvõrgu alajaamad toidavad kohalikke alajaamu, mille sekundaarpinge on tavaliselt 400…690 V (Eestis 230 või 400 V). Tarbijate elektrivarustuse suurema töökindluse saavutamiseks on kõrgepingeliinid tavaliselt dubleeritud ja/või moodustavad kinniseid kontuure (*suletud* võrgu), mistõttu võrgu mingi ühe liini väljalangemine ei too endaga tavaliselt kaasa võrgu alajaamade väljalülitumist ega tarbijate elektrivarustuse katkemist.



Joonis 5.9.1. Energiasüsteemi ülesehituspõhimõte. *1* elektrijaam, *2* energiasüsteemi põhivõrk, *3* põhivõrgu alajaam, *4* regiooni jaotusvõrk, *5* regioonivõrgu alajaam, *6* linna, maakoha või ettevõtte kohalik jaotusvõrk, *7* kohaliku võrgu alajaam, *8* madalpingevõrk

Tabel 5.9.1.
Eesti suurimad elektrijaamad 2007. aasta alguses

Nimi või asukoht	Agregaatide arv ja võimsus MW	Aasta*
Eesti Elektrijaam	7 × 200 + 215 = 1675	2004
Balti Elektrijaam	3 × 200 + 215 = 815	2005
Iru	100 + 90 = 190	1982
Kohtla-Järve	4 × 12 = 48	1978

* Valmimis- või viimase renoveerimise aasta

Energiasüsteemiga rööbiti võivad talitleda ettevõtete ja linnade oma elektrijaamad, mis suurendavad tarbijate elektrivarustuse töökindlust ja hajutavad elektrienergia tootmist.

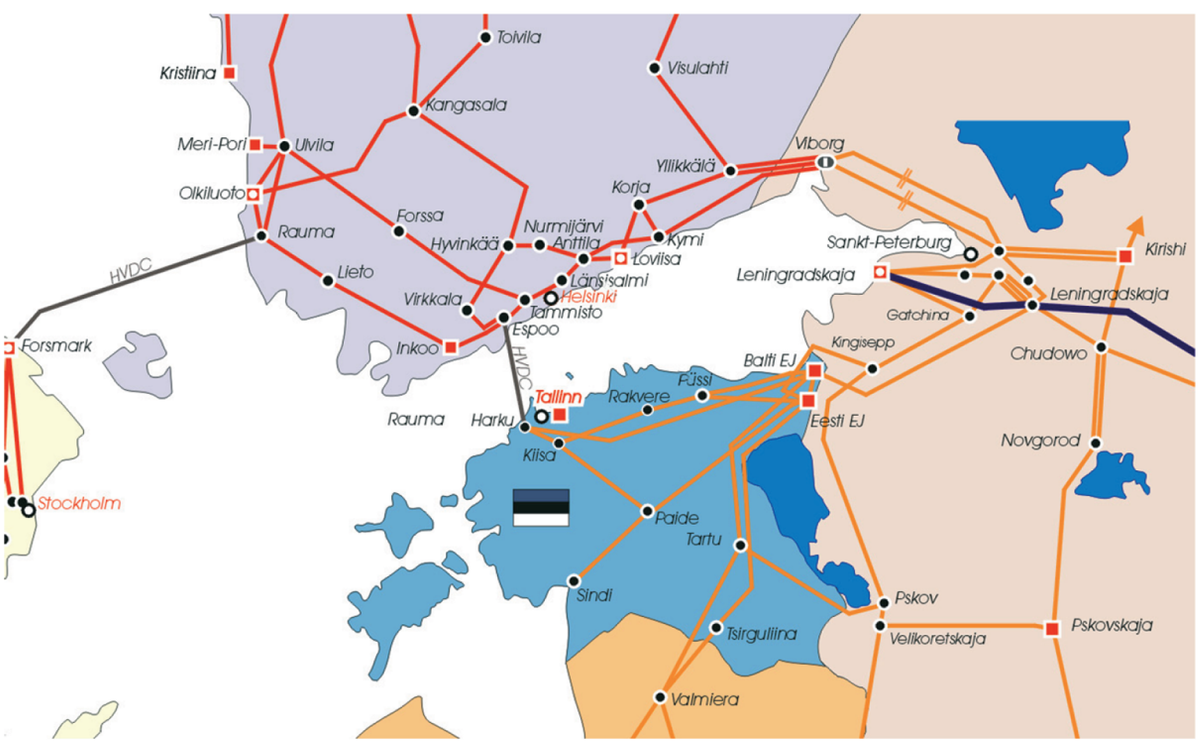
Eesti energiasüsteemi suurimad elektrijaamad on esitatud tabelis **5.9.1**, elektrijaamade paigutus, põhivõrgu liinid pingega 330 kV ja nendega ühendatud alajaamad on aga näidatud joonisel **5.9.2**. Süsteemi omapärasuseks võib lugeda seda, et selle suurimad elektrijaamad paiknevad riigi kirdepiiri lähedal, suurimad tarbijad (sealhulgas Tallinn) aga riigi lääneosas, mistõttu elektrienergiat tuleb edastada suhteliselt kaugele (ligikaudu 200 km).

Joonisel 5.9.2 on esitatud ka lähimad Eesti naaberriikide Venemaa ja Läti liinid pingega 330 kV, Soome ja Rootsi liinid pingega 380 kV, alalisvoolu-merekaabelliinid (HVDC), Leningradi tuumaelektrijaamast lähtuv liin pingega 750 kV (tähistatud tumesinise värviga) ning liinidega seotud suuremad elektrijaamad ja alajaamad.

Eesti energiasüsteem on 330-kV liinide kaudu ühendatud Läti, Leedu ja Venemaa energiasüsteemiga. Venemaa, muud SRÜ riigid ja Balti riigid moodustavad omavahel sünkronismis talitleva energiasüsteemide kompleksi. Euroopas on veel kolm erisuguse sagedusreguleerimisviisiga energiasüsteemide ühendust:

- Euroopa mandriosa (väljaarvatult Skandinaavia maad), millega on sünkroonselt ühendatud ka Türgi ja Marokko energiasüsteemid,
- Skandinaavia (Soome, Rootsi, Norra ja Själlandi saar Taanis),
- Suurbritannia ja Iirimaa.

Euroopa ja SRÜ energialiitude sagedusreguleerimissüsteemi põhierinevus üksteisest seisneb selles, et Euroopa energialiitudes juhitakse sagedust detsentraliseeritult, Venemaa ühtses energiasüsteemis ja sellega ühendatud teistes riikides aga tsentraliseeritult.



Joonis 5.9.2. Eesti energiasüsteemi ja naaberriikide Eestile lähimad suurimad elektrijaamad, alajaamad ja põhivõrgu liinid pingega 330, 380 ja 750 kV ning alalisvoolu-merekaabelliinid. Joonis on saadud AS Eesti Energialt

Sageduse kõikumised kummaski energiasüsteemide kompleksis on seega erisugused ja seetõttu ei saa need talitleda omavahel sünkronismis. Eri sagedusreguleerimisviisiga energiasüsteeme saab omavahel ühendada üksnes kõrgepingeliste alalisvooluliinide või alalisvoolu-vahelüliga muundusjaamade kaudu.

Mandri-Euroopa riikide (väljaarvatult Skandinaavia, Baltimaade ja SRÜ) energiasüsteemid on ühendatud Euroopa Elektriedastuse Koordineerimise Liitu (*Union pour la Coordination du Transport de l'Électricité, UCTE*), mille elektrijaamade koguvõimsus 2006. aasta lõpus oli ligikaudu 630 GW ja mis koordineerib riikidevahelist elektrienergiaedastust vastavalt Euroopa elektrituru ning elektrivarustuse töökindluse nõuetele. Liit asutati Euroopa Majandusühenduse algatusel aastal 1951 ja kuni aastani 1999 koordineeris see ka elektrienergia tootmist (*Union pour la Coordination de la Production et du Transport de l'Électricité, UCPTE*), nähes muuseas ette, et iga liikmesriik peab hoidma 2,5 % oma võimsusest sellises reservis, mis võimaldab seda koheselt (1 sekundi jooksul) kasutusele võtta. Koordineerimiskeskus asub Viinis.

Teine taoline liit – *NORDEL* – koordineerib alates aastast 1963 elektrisüsteemide arengut Soomes, Rootsis, Norras, Taanis ja Islandil.

Nii riigisisese kui ka rahvusvahelise vaba **elektriturg** loomist peetakse vajalikuks eri tootjate konkurentsi tugevdamiseks, nende monopoolse seisundi kaotamiseks ja lõpptulemusena tarbijatele antava elektrienergia hinna vähendamiseks. Kui elektriturg on vaba, saavad tarbijad osta elektrienergiat vabalt valitavatelt elektrivarustusorganisatsioonidelt.

Energiasüsteemi peaülesanne on tarbijate töökindla, võimalikult katkematu elektrivarustuse tagamine. Selleks nähakse energiasüsteemides ette

- võimsusvaru (nt suurima elektrienergiat tootva agregaadi võimsuse asendamiseks selle väljalangemise korral),
- suletud võrkude kasutamine, milles ühe liini väljalangemisel jätkub elektrienergia katkematu edastamine talitlusse jäänud liinide kaudu,
- töökindlate energiamuundurite, liinide ja lülitusaparaatide kasutamine ning nende dubleerimine,
- loodustoimetele (tormile, jäitele, pakasele jm) vastupidavate liinide ja välisseadmete kasutamine,
- kestva ülekoormuse korral – koormuste ümberjaotamine, reservagregaatide juurdelülitamine jms,
- operatiivne juhtimine,
- seadmete korrasoleku pidev kontroll ning kulunud või vananenud seadmete või seadmeosade ennetav vahetamine,
- rikete tekke korral – riknenud elemendi kiire ning selektiivne väljalülitamine töökindla ning täpse kaitseaparatuuri kasutamise teel,
- süsteemi kõigi elementide vastupidavus lühisvoolude lühiajalisele soojuslikule ja elektrodünaamilisele toimele,
- õhuliinide (ja mõnikord ka muude elementide) automaatne ühe- või mitmekordne taaslülitamine, kui on tõenäoline, et rike pärast väljalülitamist kaob,
- reservtoiteallikate ja rervühenduste automaatne sisselülitamine põhitoiteallika väljalangemisel,
- süsteemi talitlust ja seisundit iseloomustava informatsiooni automaatne, edastamine, töötlemine ja salvestamine,
- universaalsete, mikroprotsessoritel ja arvutitel põhinevate seire-, mõõte-, juhtimis-, signalisatsiooni- ja kaitsesüsteemide kasutamine.

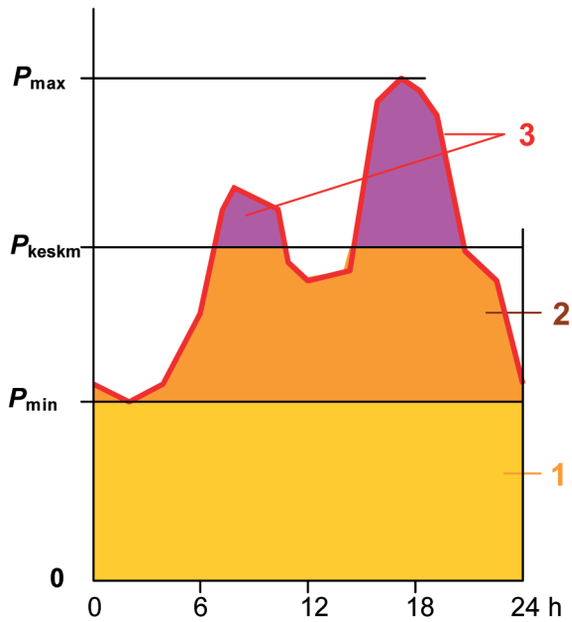
Universaalseid arvutitel ja mikroprotsessorseadmeil põhinevaid seire-, mõõte-, andmetöötlus-, juhtimis-, signalisatsiooni- ja kaitsesüsteeme tähistatakse tehnikakirjanduses sageli ingliskeelse lühendiga *SCADA* (*Supervisory Control and Data Acquisition*).

Ülaltoodud loetelu ei ole ammendav. Energiasüsteemid kasutavad kõiki võimalusi, et tagada tarbijatele mitte üksnes katkematu elektrivarustus, vaid ka elektrienergia kvaliteet (pinge ja sageduse stabiilsus, vahelduvpinge ja -voolu siinuselisus jms).

Energiasüsteemi talitluse töökindlust, eriti aga majanduslikkust mõjutab süsteemi elektrilise koormuse ööpäevane ja nädalane (vähemal määral ka aastane) kõikumine. Seetõttu on kõik energiasüsteemid huvitatud oma koormuse ajalisest ühtlustamisest.

Joonisel **5.9.3** on esitatud energiasüsteemi üks tüüpilistest ööpäevastest koormusgraafikutest. Seda iseloomustavad teatav minimaalvõimsus P_{min}, mis langeb enamasti ööle, teatav maksimaalvõimsus P_{max}, mis võib, olenevalt elektritarbijate koosseisust ja tarbimisviisist, langeda hommikule või õhtule, ja keskmine võimsus P_{keskm}, mis võrdub ööpäeva kestel tarbitud energia ja ööpäeva kestuse jagatisega.

Koormust, mis ulatub nullist kuni ööpäeva minimaalkoormuseni ja mis on kogu ööpäeva jooksul järelikult konstantne, nimetatakse baas- ehk põhikoormuseks. Seda koormust katavad jaamad, mille elektrilise võimsuse muutmine on raske või ebasoo-



Joonis 5.9.3. Energiasüsteemi ööpäevane koormusgraafik (näide).
***1* baaskoormus (põhikoormus),**
***2* pooltippkoormus,**
***3* tippkoormus**

vitav (nt tuumaelektrijaamad), mille reguleerimine toimub soojusvõimsuse järgi (elektri ja soojuse koostootmisjaamad) või mille võimsus oleneb loodusnähtustest (nt tuule- ja päikeseelektrijaamad). Koormust, mis ulatub minimaalsest ööpäeva keskmiseni ja mis muutub ööpäeva jooksul suhteliselt suurtes piirides, nimetatakse pooltippkoormuseks ja seda katavad enamasti kütustpõletavad kondensatsioonelektrijaamad ja hüdroelektrijaamad. Koormust, mis ulatub ööpäeva keskmisest maksimaalkoormuseni ja mis kestab tavaliselt mõni tund kaks korda ööpäevas, nimetatakse tippkoormuseks. Seda koormust katavad kiiresti käivitatavad ning kergesti reguleeritavad elektrijaamad (hüdroelektrijaamad, diisel- ja gaasiturbiinelektrijaamad jms, nende puudumisel aga kütustpõletavad kondensatsioonelektrijaamad).

Koormusgraafikut saab tõhusalt ühtlustada pump-elektrijaamade abil (vt jaotis **4.3**), mis öösel salvestavad energiat, suurendades sellega baaskoormust, koormustippude ajal aga katavad energiavajadust, vähendades sellega teiste, tippude katteks vähem sobivate elektrijaamade koormust. Samal otstarbel saab kasutada ka muid energiasalvesteid.

Peale energia salvestamise saab koormusgraafiku ühtlustamiseks kasutada ka muid võtteid. Nende hulgas on levinuim elektrienergia sellise kahe- või mitmeastmelise elektritarbimise tariifi kehtestamine, mis stimuleerib tarbijaid oma ööpäevast või nädalast (mõnikord ka aastast) tarbimisgraafikut ühtlustama. Nii näiteks kasutatakse tööstusettevõtete puhul väga sageli nii tarbitava elektrienergia kui ka ööpäeva tipptarbimise maksustamist vastavalt valemile

$$B = \alpha P_{max} + \beta W_a$$

B tasu tarbitud aktiiv-elektrienergia eest
α tasu ööpäeva maksimaalvõimsuse ühiku eest
P_{max} ööpäeva maksimaalne tarbitav võimsus
β tasu aktiiv-elektrienergia ühiku eest
W_a aktiiv-elektrienergia tarbimine arveldusajavahemikus (nt kuus)

Ööpäeva maksimaalvõimsus lepitakse elektrivarustussüsteemi ja tarbija vahel kokku ja kui seda peaks ületatama, võidakse võtta vastavat lisatasu. Peale aktiiv-elektrienergia nähakse tööstustarbijate puhul ette ka reaktiivenergia eest tasumine.

Väiketarbijatele (nt elanikele) võidakse kehtestada lihtsam kaheastmeline tariif, mille kohaselt öösel või puhkepäevadel tarbitud energia on odavam ja mis samuti stimuleerib tarbijat reguleerima oma elektritarbimist energiasüsteemile soodsal viisil. Energia eest tasumine toimub sel juhul valemi järgi

$$B = \beta_p W_p + \beta_s W_s$$

B tasu tarbitud elektrienergia eest
β_p tasu päevaajal tarbitud elektrienergia ühiku eest
W_p tööpäevade päevaajal tarbitud elektrienergia
β_s tasu soodusajal tarbitud elektrienergia ühiku eest
W_s soodusajal (öösel ja puhkepäevadel) tarbitud elektrienergia

Soodustariif on olenevalt stimuleerimisvajadusest tavaliselt 2 kuni 3 korda madalam kui päevatariif. Reaktiivenergia eest väiketarbijailt tavaliselt tasu ei võeta.

Energiasüsteemid võivad kehtestada erisoodustusi sellistele tarbijatele, kes tarbivad elektrienergiat põhiliselt väljaspool energiasüsteemi tipuaegu (nt kui metallisulatusahjud talitlevad ettevõttes ainult öötundidel).

Tulevikus võivad öist elektritarbimist hakata soodsalt suurendama elektriautod, mille akusid on otstarbekas laadida öösel. Kui laetud aku tagab läbisõidu 100...150 km ja kui autot kasutatakse tavalisel viisil linnaliiklusoludes, tekib vajadus aku lisalaadimise järele päeva kestel tõenäoliselt üsna harva.

Eri maades ja eri energiasüsteemides võivad elektrienergia tariifid olla väga erisugused. Nii näiteks on maades, mis saavad kasutada hüdroelektrienergiat, elektrienergia odavam, kui aga elektrijaamades tuleb kasutada kallist importkütust, on ka elektrienergia kallim. Elektritariifide kehtestamisel võetakse arvesse ka tarbijate elektritarbimise ajalist ühtlust. Nii näiteks on tariifid olmetarbijatele (*kodutarbijatele*) tavaliselt 1,5 kuni 2 korda kõrgemad kui tööstustarbijatele, sest nad tarbivad elektrienergiat suuremal määral energiasüsteemi tipuaegadel.

Elektrijaamade ja energiasüsteemide koormusgraafikuid saab ühtlustada ka süsteemidevahelise energiavahetusega (eriti kui süsteemid asuvad eri ajavööndites). Samal eesmärgil on kasutatud ka naaberettevõtete tööaegade nihutamist üksteise suhtes.

Kui koormus on ajaliselt ebaühtlane, ei saa elektrijaamad talitleda kestvalt oma nimi- ehk paigaldatud võimsusega, mille all mõeldakse paigaldatud generaatorite nimivõimsuste summat. Seda asjaolu saab väljendada kahel viisil:

a) nimivõimsuse kasutusteguriga

$$k_k = P_{keskm} / P_n$$

P_{keskm} aasta keskmine võimsus MW (= W / 8760, kus W on aastane elektrienergia toodang MWh ja 8760 on aasta kestus tundides)

P_n jaama nimivõimsus MW

b) nimivõimsuse aastase kasutuskestusega

$$T_k = W / P_n$$

W aastane elektrienergia toodang MWh

P_n jaama nimivõimsus MW

Kui jaam talitleks kogu aasta kestel oma nimivõimsusega, oleks T_k = 8760 h/a. Koormuse kõikumise, võimsuse varukshoidmise ja seadmete hoolduseks vajalike talitlusvaheaegade tõttu on see suurus aga väiksem, olenedes jaama liigist ja sellest, kas jaam katab energiasüsteemi baas-, pooltipp- või tippkoormust. Nii näiteks on see

- tuumaelektrijaamadel 7000…8000 h/a,
- kütustpõletavatel soojuselektrijaamadel 4000…6000 h/a,
- tuuleelektrijaamadel 1500…4000 h/a.

Selle näitajaga iseloomustatakse ka energiasüsteemi talitlust tervikuna ja riigi kõigi elektrijaamade talitlust tervikuna. 2003. aastal oli see Eesti avalikes elektrijaamades kokkuvõetult 3964 h/a, maailma avalikes elektrijaamades aga 4383 (sealhulgas kütustpõletavates soojuselektrijaamades 4343, hüdroelektrijaamades 3349, tuumaelektrijaamades 7087 ja geotermaal- ning tuuleelektrijaamades 2350 h/a [1.7].

6

Energia kasutamine

6.1 Üldmõisted 182

6.2 Energia mitteelektrilised kasutamisviisid 182

6.3 Elektriajam 186

6.4 Elekterküte 189

6.5 Elektrotehnoloogia 191

6.6 Elektervalgustus 194

6.7 Ohutuse tagamine elektrienergia kasutamisel 198

6.8 Energia tarbimise struktuur eri rahvamajandusharudes 203

6.9 Rahvamajanduse energia- ja elektribilanss 207

6 ENERGIA KASUTAMINE

6.1 ÜLDMÕISTED

Nüüdisühiskonnas kasutab inimene oma vajaduste rahuldamiseks (toitainete tootmiseks ja toiduvalmistamiseks, kodu- ja tööruumide kütteks ja hooldamiseks, töövahendite käitamiseks, valgustuseks, sõitudeks ja vedudeks, meelelahutuseks jne) tunduvalt enam energiat kui seda oleks vaja tema puht füsioloogilise energiatarbe katteks. Keha elutegevuse alalhoiuks on inimesele toiduna vaja ainult 11…12 MJ (vanades ühikutes 2700…2900 kcal) energiat ööpäevas, mis tähendab, et inimkeha ööpäevane keskmine tarbitav võimsus on 130…140 W.

Füüsilise töö sooritamisel on keha energiavajadus suurem. Kestval tööl võib inimene oma lihaste jõul arendada võimsust kuni umbes 100 W, spordis võib see olla aga ka tunduvalt rohkem. Nii näiteks võivad tippjalgratturid saavutada pikamaasõitudel kestevõimsuse 550 W, mis vastab umbes hobuse võimsusele koormatud vankri veol. Lühiajaliselt võib aga ka tavainimene arendada mitu korda suuremat võimsust kui kestval tööl. Kui näiteks joosta trepist üles kõrgusele $h = 3$ m ajaga $t = 2$ s, on jalalihastega arendatav võimsus kehamassi $m = 80$ kg ja raskuskiirenduse $g = 9{,}81$ m/s^2 korral

$$P = \frac{mgh}{t} = \frac{80 \cdot 9{,}81 \cdot 3}{2} \approx 1{,}2 \cdot 10^3 \text{ W}.$$

Nüüdisaja tööstusühiskonnas on inimese tegelik energiavajadus kasvanud vägagi suureks (vt joonis **1.4.2**), olenedes seejuures loomulikult Maa kliimavöötmest. Põhjalaiusel 50° …60°, sealhulgas Eestis, on energiavajadus, kui sellesse tinglikult lugeda ka toit, ühe elaniku kohta ligikaudu järgmine:

- toiduna 0,3 tce/a
- toitainete tootmiseks ja toiduvalmistamiseks 1 tce/a
- kodu- ja tööruumide kütteks 1 tce/a
- elektrienergia tootmiseks 1 tce/a
- tööstuslikeks tootmisprotsessideks 1,5 tce/a
- sõitudeks ja vedudeks 1 tce/a

Kokku teeb see ligikaudu 5,5 tce/a, mis on kooskõlas jaotises **1.5** (joonisel **1.5.1**) esitatud andmetega kaubalise energia tarbimise kohta. Suurtarbimisühiskonnas nagu näiteks USAs on energiatarbimine inimese kohta kuni umbes kaks korda suurem, eriti energiamahukate tööstusharude olemasolul (nt naftatööstusriikides) aga veelgi suurem.

6.2 ENERGIA MITTEELEKTRILISED KASUTAMISVIISID

Maailma kaubalise energia toodangust, mis aastal 2003 oli veidi üle 14 Gtce (vt joonis **1.4.3**), kulutatakse elektrienergia saamiseks ligi 40 %, kusjuures saadava elektrienergia kogus oli 2003. aastal ligi 17 PWh ehk kivisöe-tingkütusele ümberarvutatult ligi 2,1 Gtce (joonis **6.2.1**).

Suurem osa kütustest kasutatakse seega mitte elektrienergia tootmiseks, vaid muuks otstarbeks (kütteks, tööstuslikes tehnoloogilistes protsessides, liikluses jne).

Hoonete kütteks kasutatakse peaasjalikult mitmesuguseid tahkeid, vedelaid ja gaasilisi kütuseid (sagedaimini kütteõlisid, maagaasi, kivisütt ja puitu). Võidakse kasutada aga ka geotermaalenergiat (nt Islandil kaetakse sel viisil peaaegu kogu küttevajadus). Kütteviisidest võidakse kasutada nii kohtkütet (nt mingi ruumi või ruumiosa jaoks) kui ka keskkütet ja kaugkütet, nähes ette kütuste põletamise vastavalt kas ahjudes, gaasipõletites, keskküttekateldes, keskkatlamajades või elektrienergia ja soojuse

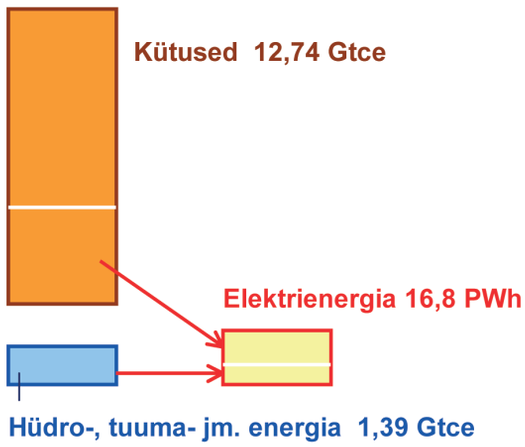
koostootmisjaamades, viimasel ajal aga ka kütuseelemendipatareides. Keskkütte korral võidakse ette näha kiirgusel ja/või konvektsioonil põhinevate küttekehade (radiaatorite, konvektorite) kasutamine (vt jaotis **3.4**) või kuumaveetorude paigaldamine ehitustarindeisse (eeskätt põrandaisse).

Hoonete kütteks ja soojaveevarustuseks on viimasel ajal järjest laiemalt hakatud rakendama **päikesekiirgust**, kuna sel viisil saab vähendada kütuste põletamise vajadust ja kahjulike põlemissaaduste paiskumist atmosfääri. Päikesekiirguse kasutamine võib olla *passiivne* ja seisneda nt hoone lõunapoolsete välisseinte katmises kiirgust neelavate paneelidega, kuid sagedamini rakendatakse mitmesuguseid, enamasti hoone katusel paiknevaid veekuumuteid, mis ühendatakse hoone keskküttesüsteemi, soojaveetorustiku ja soojussalvestiga [1.9].

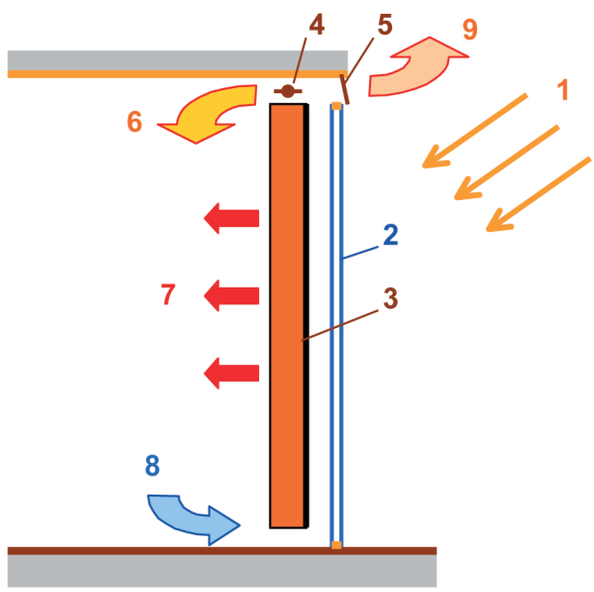
Lihtsaima passiivse päikesekütte põhimõte on kujutatud joonisel **6.2.2**. Hoone välissein on materjalist, mis peab hästi neelama päikesekiirgust, kusjuures selle soojusmahtuvus peab olema võimalikult suur ja selle soojusjuhtuvus peab võimaldama soojusülekannet hoonesse. Võidakse kasutada nt seina katmist metallipigmenti sisaldava polümeerplaadiga, lihtsaimal juhul aga ka hoone seina töötlemist tumedaks. Mõlemal juhul tuleks aga sein klaasida ning jätta klaasi ja seina (või eelnimetatud katteplaadi) vahele õhupilu. Sellise seina välispinna temperatuur võib päikesepaistelise ilmaga isegi talvel tõusta kõrgemaks kui hoone sisetemperatuur. Et päikeseküte oleks tõhusam, võidakse sellises seinas ette näha ventilatsioon, mis suunab õhupilus soojenenud õhku köetavasse ruumi.

Eelkirjeldatud passiiv-päikesekütesüsteemi idee esitati USAs aastal 1881, kuid jäi tähelepanuta. Aastal 1960 tõestas aga prantsuse keemiainsener Félix Trombe (1906–1985), kes põhjalikult uuris päikesekiirguse rakendamise võimalusi, et sellise süsteemiga saab kütteks vajalikku energiat oluliselt säästa ja avaldas koos arhitekt Jacques Micheliga taolise seina ehituspõhimõtted, misjärel algas selle tegelik kasutamine. Kirjanduses nimetatakse sellise ehitusega välisseina sageli *Trombe'i* ehk *Trombe'i-Micheli seinaks*.

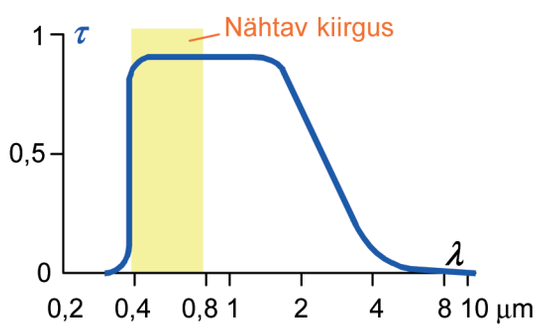
Õhu kuumenemine päikesepoolselt klaasiga kaetud suletud ruumis on seletatav klaasi omadusega lasta peaaegu takistamatult (läbitusteguriga ligikaudu 0,9) läbi lühilainelist päikesekiirgust (maksimumiga lainepikkusel 0,5 μm), täielikult neelata ning vähesel määral tagasi peegeldada aga soojenenud pinnalt lähtuvat pikalainelist soojuskiirgust, mille maksimum on tavaliselt lainepikkusel 10 μm (joonis **6.2.3**).



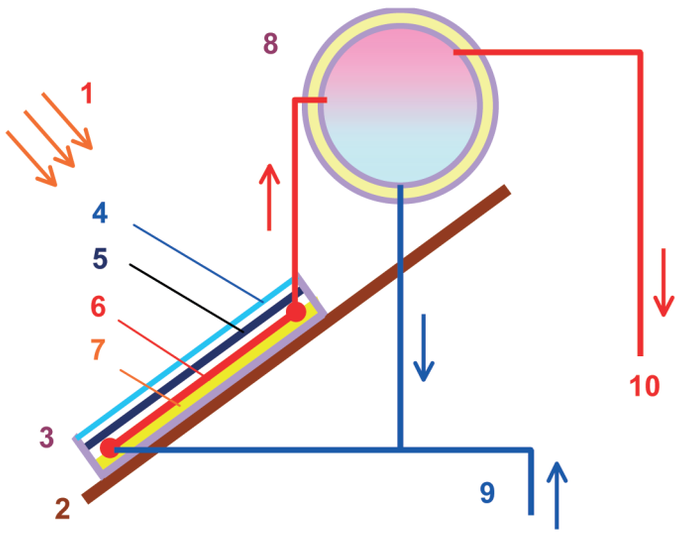
Joonis 6.2.1. Maailmas toodetava primaarse kaubalise energia kasutamine elektrienergia saamiseks aastal 2003



Joonis 6.2.2. Trombe'i seina ehituspõhimõte. *1* päikesekiirgus, *2* topeltklaas, *3* musta välispinnaga betoon- või tellissein, *4* päikesepaiste kestval puudumisel suletav klapp, *5* mittevajaliku soojenenud õhu väljalaskeklapp (nt suvel), *6* soe õhk, *7* seina soojuskiirgus, *8* külm õhk, *9* mittevajalikult soojenenud õhk



Joonis 6.2.3. Klaasi läbitusteguri τ olenevus kiirguse lainepikkusest λ (näide)

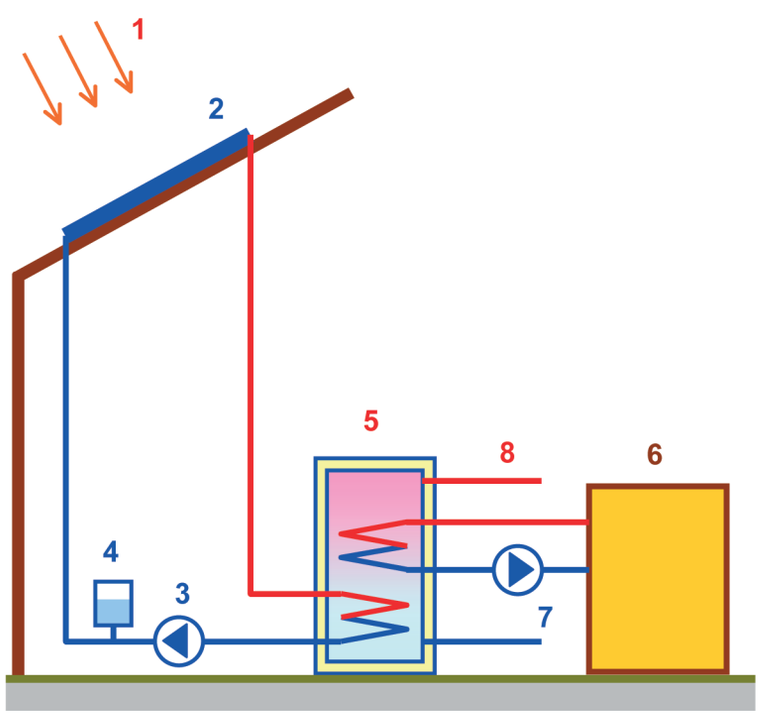


Joonis 6.2.4. Passiivse päikese-veekuumutuse põhimõte.
***1* päikesekiirgus, *2* katusepind,**
***3* kiirguskollektor, *4* klaas,**
***5* kiirgustneelava pinnaga vaskplaat,**
***6* rööbitised vasktorud, *7* soojusisolatsioon,**
***8* veepaak,**
***9* ühendus veevarustustorustikuga,**
***10* ühendus soojaveetarvititega**

Klaasialuse pinna soojenemisel põhinevad ka mitmesugused kasvuhooned ja taimelavad. Esimene kirjalik teade klaasseintega kasvuhoonete kasutamisest pärineb Rooma loodusteadlaselt ja riigimehelt Plinius Vanemalt (23…79), kes kirjutab, et juba aastal 30 kasvatati neis keiser Tiberiuse (–42…37) jaoks kurke, mis oli keisri lemmikroog [2.7].

Lõuna-Euroopas, muudes Vahemeremaades, USA lõunapoolsetes osariikides ja mitmel pool mujal kasutatakse päikesekiirgust vee kuumutamiseks katusel paiknevate kiirguskollektorite abil. Joonisel **6.2.4** on skemaatiliselt kujutatud lihtsaima, vee loomulikul ringlusel põhineva passiivse veekuumutusseadme ehitus.

Kiirguskollektor kujutab endast lamedat kasti, mis harilikult paikneb katuse pinnal, kuid võib olla ka sellesse süvistatud. Päikesekiirgus langeb läbi kollektori katteklaasi plaadile, mis on kaetud kiirgust hästi neelava kattekihiga. Viimases kasutatakse nüüdisajal mitmesuguseid musti nikli- või kroomiühendeid, eriti tõhusaks on aga osutunud titaannitriidist ja titaanoksiididest (TiN, TiO, TiO_2) moodustatud ligikaudu 0,1 μm paksune (*tinoks*-) kiht, millega kaetud kollektor neelab 90…95 % temale langevast päikesekiirgusest [6.1]. Plaadi all on rööbitised, mõlemast otsast omavahel ühendatud vasktorud, milles vesi kuumeneb ja tõuseb veepaaki.



Joonis 6.2.5. Päikesekiirguskollektori ühendamine hoone soojaveesüsteemiga.
***1* päikesekiirgus, *2* kiirguskollektor, *3* ringluspump, *4* paisunõu, *5* soojaveesalvesti,**
***6* kütust kasutav, elektriline vm veekuumuti, *7* ühendus veevarustustorustikuga, *8* ühendus soojaveetarvititega**

Esimese primitiivse päikesekiirguskollektori (klaasitud puitkasti) valmistas aastal 1767 Genfi ülikooli filosoofiaprofessor Horace-Bénédict de Saussure (1740–1799), saavutades selle põhjas temperatuuri kuni 110 °C. Esimese nüüdisaegsetele sarnaneva, rööbitistest veetorudest koosneva kollektori patenteeris aastal 1891 USA leidur Clarence Kemp, kes hakkas neid ka oma kodulinnas Baltimore'is valmistama ja mööma. Joonisel **6.2.4** kujutatud, kollektorist ja veepaagist koosnev seade tuli kasutusele USAs aastal 1909, nende lai rakendamine algas aga alles pärast vedelkütuste järsku kallinemist aastal 1973.

Joonisel **6.2.4** kujutatud veekuumutussüsteemi, mille kollektoris ja paagis ringleb tarbevesi, saab kasutada üksnes seal, kus ei ole karta vee külmumist, nt Lõuna-Euroopas ja Vahemeremaades. Kui paikkonna õhutemperatuur võib langeda alla nulli, tuleb veele lisada külmumisvastaseid lisandeid (nt etaandiooli) ja näha kollektoris ja selle juurde kuuluvas torustikus ette suletud veeringlus. Sellise päikesekollektori ühendamine hoone soojaveesüsteemiga on skemaatiliselt kujutatud joonisel **6.2.5**. Süsteemi juhtimiseks ja reguleerimiseks kasutatav automaatikaaparatuur ei ole joonisel näidatud.

2005. aasta lõpus oli maailmas 46 mln maja, mille soojaveevarustuses ja/või hoonete küttes kasutati päikesekollektoreid, küttevõimsuse kokkuhoiuks aga lisaks sellele (harvemini eraldi) Trombe'i (klaasitud) seinu. Päikesekollektorite üldpindala oli seejuures $125 \cdot 10^6$ m^2 ja nende soojuslik võimsus kokku 88 GW [6.2].

Esimese ühepereelamu (põrandapinnaga 120 m^2), milles peaaegu kogu kütteks ja soojaveevarustuseks vajalik energia (80 % aastasest energiakulust) saadi katusele paigutatud päikesekollektorite abil, kasutades energiakulu vähendamiseks ka Trombe'i seina, ehitas aastal 1973 Delaware'i ülikool (USA) [1.15]. Hoone elektritarbimist kattis fotoelektriline päikesepatarei. Eesti esimene, 40 m^2 suurune päikesekiirguskollektor paigaldati Vändra haigla katusele aastal 1995 [6.3].

Päikesekiirguse kasutamiseks võib tinglikult lugeda ka soojuse võtmist soojuspumpade abil välisõhust, veekogudest, põhjaveest või pinnasest, kuhu päikeseenergia on looduslike energiaedastusprotsesside tulemusel salvestunud (vt jaotis **2.15**).

Põhimõtteliselt saab hoonete kütteks kasutada ka tuuleenergiat (mehaanilise energia muundamise teel soojuseks) ja tuumaenergiat (tuumaenergial töötavatest koostootmisjaamadest kaugkütte teel). Tuumaelektrijaamade kasutamist kaugkütte eesmärgil loetakse siiski liiga riskantseks, sest koostootmis-tuumaelektrijaamad peaksid paiknema sel juhul liiga lähedal soojusenergia tarbijatele. Maailmas on ainult üks selline jaam ja see asub Venemaal, Tšuktši poolsaarel Anadõri linna lähedal: see on aastal 1976. valminud Bilibino tuumajaam 4 energiaplokiga, millest igaüks väljastab soojusvõimsust 29 MW ja elektrivõimsust 12 MW.

Üksikhoonete kütteks on viimastel aastatel hakatud rakendama mitmesuguseid väike-koostootmisagregaate. Nii näiteks toodetakse Saksamaal, nagu varem juba mainitud, alates aastast 2006 puidugraanulitega köetavaid stirlingmootoragregaate elektrilise võimsusega 5 kW ja soojusvõimsusega 15 kW, mis edukalt konkureerivad kaugküttega.

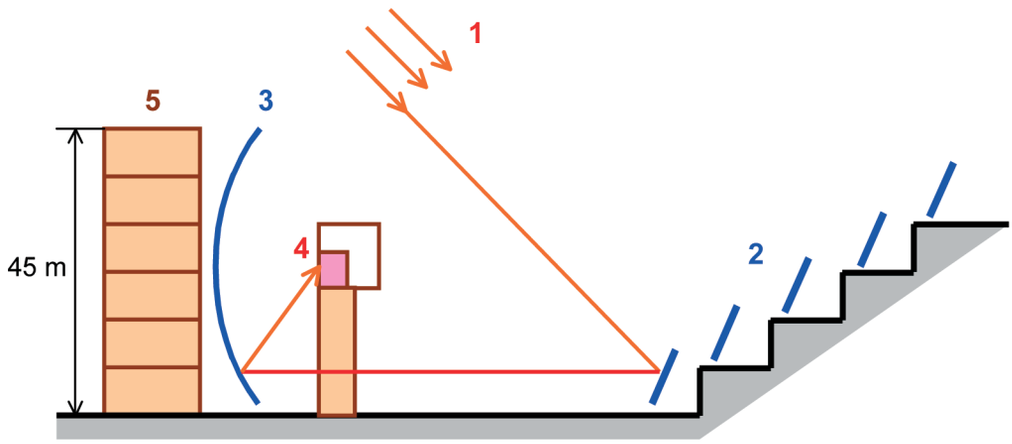
Tööstuslikes tootmisprotsessides võidakse kasutada

- lähteainete (nt. koksi, toornafta, maagaasi, puidu vm) põletamisel või termilisel muundamisel saadavat soojust (teiste sõnadega – kasutada lähteaines sisalduvat keemilist energiat),
- kütuste põletamisel saadavat soojust (soojuskandjate, nt kuuma vee, veeauru või kuuma gaasi vahendusel),
- sisepõlemismootorite, gaasiturbiinide või muude primaarmootorite abil (mootorikütuste põletamisel) saadavat mehaanilist energiat.

Tööstuslikes soojuse kasutamisel põhinevates protsessides on rakendatud ka päikeseenergiat. Suurim taoline seade – kontsentreeritud päikesekiirgusel talitlev metallisulatusahi soojusvõimsusega 1000 kW – valmis aastal 1969 Odeillos (Prantsuse Püreneedes). Päikesekiirgust võtavad vastu 63 heliostaati à 45 m^2 ja kontsentreerivad selle paraboolpeeglile pindalaga 2000 m^2. Viimaselt suunatakse kiirgus tiiglile, milles saavutatakse temperatuur kuni 4000 °C [6.4]. Süsteemi ehituspõhimõte on kujutatud joonisel **6.2.6**.

Päikeskiirgust on kasutatud ka auru tootmiseks aurumasinatele ja -turbiinidele. Nii näiteks valmistas prantsuse matemaatikaõpetaja Augustin Mouchot (1825…1912) aastal 1866 päikesekiirgusel talitleva aurumasina, sai selle eest Pariisi maailmanäitusel aastal 1878 kuldmedali ja ehitas aastal 1875 Alžeerias päikese-aurumasinast ja pumbast koosneva agregaadi, mis võis toota 2500 liitrit vett tunnis [2.7].

Väliolukorras (nt ekspeditsioonidel) kasutatakse sageli päikesekiirgusel talitlevaid toiduvalmistusseadmeid, mis enamasti koosnevad paraboloid-



Joonis 6.2.6. Odeillo päikese-metallisulatusahju ehituspõhimõte (tugevasti lihtsustatult).
***1* päikesekiirgus, *2* heliostaadid, *3* paraboloidpeegel, *4* ahi, *5* ettevõtte- ja büroohoone**

peeglist läbimõõduga kuni 2 m ja selle fookusesse paigutatavast keedunõust.

Liikluses ja veonduses kasutatakse laialt

- mootorikütuseid (bensiini, diislikütust, petrooli, gaasi),
- katlakütuseid (auruturbiinlaevadel)
- tuumaenergiat (peamiselt allvee- jm sõjalaevadel ja jäämurdjatel; kaubalaevadel on tuumaenergia kasutamine osutunud mittevõistlusvõimeliseks teiste energialiikidega).

Tunduvalt väiksemas ulatuses ja peaasjalikult jahtidel, muudel spordilaevadel, purilennukitel ja katselistes sõidukites leiab kasutamist

- tuuleenergia ja
- päikeseenergia.

Ilma elektrilise vahemuundamiseta kasutatakse, nagu juba öeldud, ligikaudu 60 % kaubalisest primaarenergiast. Kui arvestada ka mittekaubalisi energialiike, on primaarenergia mitteelektrilise kasutamise osatähtsus oletatavasti ligikaudu 75 %.

Suurimate mitteelektriliste energiatarbijate hulka kuuluvad

- metallurgia (kõrgahjud, terasetootmine, valutööstus jm),
- ehitusmaterjalide (tsemendi, lubja, telliste jm) tootmine,
- mineraalväetiste tootmine,
- naftasaaduste tootmine,
- keemiatööstus ja paljud muud tööstusharud.

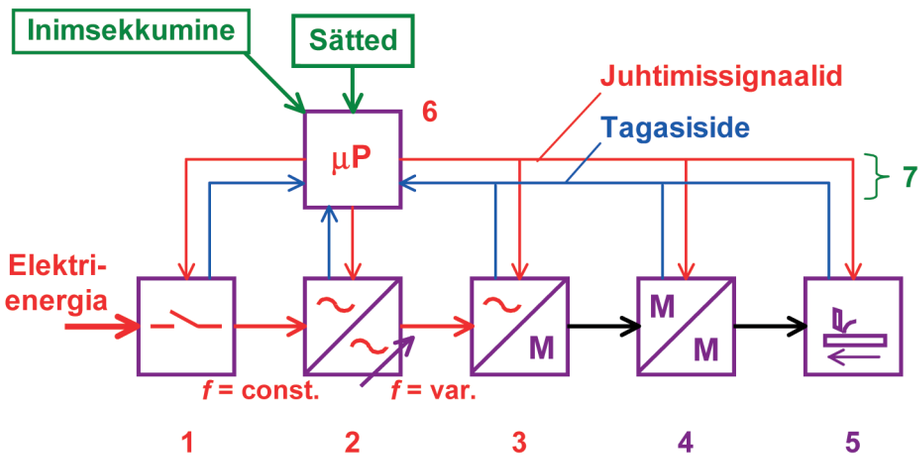
6.3 ELEKTRIAJAM

Elektriajamiks nimetatakse elektrienergia kasutamisel põhinevat seadet või süsteemi kehade, ainete, mehhanismide, masinate vms liikumapanekuks. Selleks otstarbeks võidakse elektriajameis kasutada

- elektrimootoreid,
- elektromagneteid,
- muid sihipärase elektromagnetvälja tekitamisel põhinevaid vahendeid.

Elektriajami ajaloo alguseks võib põhimõtteliselt lugeda Benjamin Franklini katseid elektrostaatilise mootoriga aastal 1748 (vt jaotis **2.15**). Kuigi Franklin arvas, et selliseid mootoreid võiks kasutada näiteks praevarda- või tornikellaajamites, ei suudetud neid liiga väikese võimsuse tõttu tegelikkuses realiseerida. Reaalsetes mehhanismides vajaliku võimsusega elektriajamid said võimalikuks alles pärast elektromagnetismi avastamist ja esimeseks elektromagnetiliseks elektriajamiks tuleb pidada Michael Faraday katseseadet, mille ta valmistas 3. septembril 1821 ja milles voolust läbitud varras pöörles ümber seisva magneti (vt joonis **2.13.2**).

Faraday esimest elektriajamit võib nimetada *elektromagnetiliseks segistiks*, sest pöörlev varras paneb anumas oleva vedeliku (elavhõbeda) keeriseliselt liikuma. Kuna aga vool kulgeb ka elavhõbedas, tekivad selles vedelmetallis endas samuti liikumapanevad magnetohüdrodünaamilised jõud. Seega sisaldab Faraday katseseade endas ka esimese *magnetohüdrodünaamilise ajami* tunnuseid.



Joonis 6.3.1. Vahelduvvoolu-elektriajami struktuuri näide.
***1* lülitus- ja kaitseaparatuur, *2* sagedusmuundur, *3* elektrimootor või muu elektromehaaniline muundur,**
***4* reduktor või muu mehaaniline muundur, *5* töömasin, *6* mikroprotsessor-juhtimissüsteem,**
***7* infoedastusväil (paljujuhtmeline süsteem, juhtmepaar, raadiokanal, valguskaabel vm); *f* sagedus**

1820ndatel ja 1830ndatel aastatel esitati mitmesuguseid elektrimasinate ja -ajamite ehitusviise, mis põhinesid vahelduvasuunalisel kulgliikumisel, matkides kolb-aurumasinaid. **Rakendusliku elektriajami** tegelikuks sünniks tuleb aga lugeda Moritz Hermann Jacobi maailma esimese pöörleva elektrimootori (vt jaotis **2.13**) kasutamist maailma esimesel elektriajamiga sõidukil – merepaadil, mis võis peale võtta kuni 12 inimest ja arendada kiirust 2…3 versta tunnis. Sellise paadi esimene katsetamine toimus Peterburis Neeva jõel 25. septembril 1838 nii päri- kui ka vastuvoolu sõites.

Elektrimootorite ja -ajamite laiem kasutamine algas 1870ndail aastail, pärast generaatorite **endaergutuse** leiutamist (vt jaotis **2.12**), mis tõi endaga kaasa elektrijaamade ehitamise ja neist saadava elektrienergia märgatava odavnemise. Viimase aja olulisim arengusamm seisneb türistor- ja transistorajamite kasutuselevõtus 1990ndail aastail koos mikroprotsessor-automaatjuhtimise rakendamisega. Käesoleval ajal moodustavad elektriajamid maailma energeetikas suurima elektritarvitite rühma, tarbides ligikaudu 2/3 kogu toodetavast elektrienergiast.

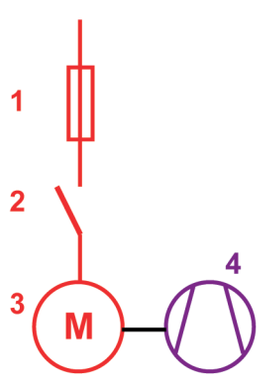
Nüüdisaegse sujuvalt ning kõrge kasuteguriga reguleeritava ja mikroprotsessorsüsteemi abil automaatselt juhitava elektriajami üks võimalikest põhimõtteskeemidest on esitatud joonisel **6.3.1**.

Kui elektriajam peab täitma keerukaid programme, kuulub selle juurde vastava tarkvaraga **elektronarvuti**. Elektriajami koosseisus võib olla veel mitmesuguseid joonisel **6.3.1** näitamata elemente nagu nt elektromagnetilisi sidureid, hoorattaid, abivooluallikaid jm.

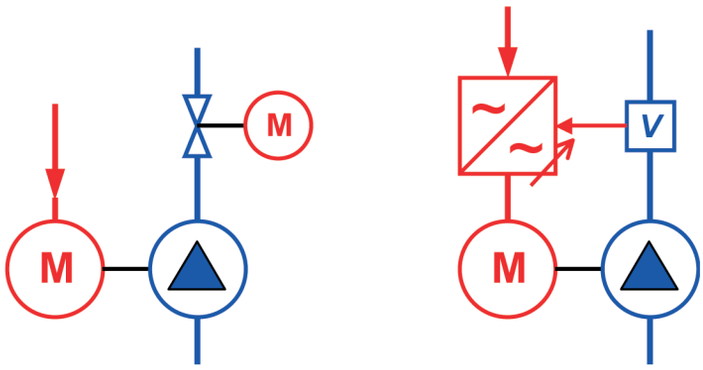
Kui töömasin ei nõua kiiruse sujuvat reguleerimist ega keerukat automatiseerimist, võib elektriajami struktuur olla tunduvalt lihtsam kui joonisel **6.3.1** esitatu. Näitena on joonisel **6.3.2** esitatud lihtsaima mittereguleeritava ning käsitsi sisse- ja väljalülitatava asünkroon-elektriajami põhimõtteskeem.

Elektriajameid saab luua väga mitmesuguste nimiparameetritega. Nende võimsus võib olla mõnest millivatist mõnekümne megavatini, töömasinale edastatav pöörlemissagedus ühest pöördest aastas (või veelgi vähem) kuni mõnekümne tuhande pöördeni minutis, reguleerimise ulatus kuni 1000:1 ja isegi enam. Elektrimootoritena on nüüdisajal enamasti kasutusel kolmefaasilised asünkroon- ja sünkroonmootorid, kuid leiavad kasutamist ka alalisvoolumootorid, samm-mootorid ja mitmesugused muud mootorite liigid.

Sujuvalt reguleeritavate sagedusmuundur-elektriajamite kasutamine võib anda suurt elektrienergia



Joonis 6.3.2. Käsitsi juhitav mittereguleeritav elektriajam. *1* kaitseaparatuur (nt sulavkaitsmed), *2* lülitusaparaat (nt kontaktor), *3* elektrimootor, *4* töömasin (nt ventilaator)



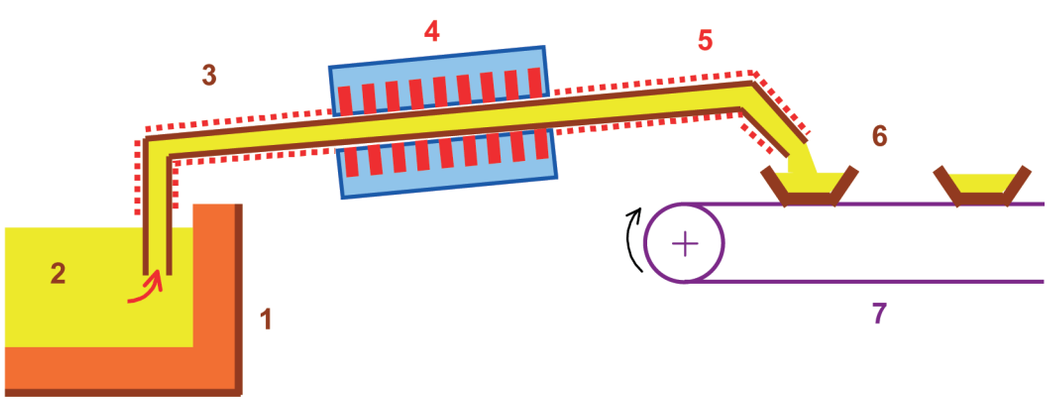
Joonis 6.3.3. Pumba tootlikkuse reguleerimine reguleerventiiliga (vasakul) ja sagedusmuundurajamiga (paremal). *V* vooluhulgaandur

kokkuhoidu muutliku tootlikkusega pumpade ja ventilaatorite käitamisel võrreldes senise ventiil- või siiberreguleerimisega. Joonisel **6.3.3** on skemaatiliselt kujutatud traditsiooniline konstantse kiirusega talitleva pumba vooluhulga reguleerimine vastava ajamiga varustatud ventiili abil ja nüüdisaegne sagedusmuundurajam. Kui pumba ööpäevane koormustegur (keskmise ja suurima võimsuse suhe) on, nagu tavaliselt, vahemikus 30 kuni 60 %, saadakse sagedusmuundurajami rakendamisel energiasääst vastavalt 60 kuni 45 %.

Nagu juba öeldud, võidakse elektriajameis kasutada mitte üksnes pöörlevaid elektrimootoreid, vaid ka kulgmootoreid, elektromagneteid ja muid elektromagnetvälja tekitamise vahendeid. Joonisel **6.3.4** on näitena kujutatud sulametalli (nt magneesiumi) doseerimiseks kasutatav magnetohüdrodünaamiline ajam, mis 1960ndail aastail töötati välja Tallinna Tehnikaülikooli selleaegses elektriajamite kateedris ja võeti aastal 1966 edukalt kasutusele Kasahstani titaani- ja magneesiumikombinaatides. Taolisi ajameid kasutatakse ka mõnede tuumareaktorite vedelmetall-soojuskandja (naatriumi, kaaliumi, liitiumi vms) pumpamiseks (vt jaotis **2.8**).

Keerukates tootmis-, transpordi- jm seadmeis võib olla kasutusel mitu elektriajamit, mis peavad talitlema omavahel kooskõlastatult. Keerukaimate elektriajamisüsteemide hulka kuuluvad nt tööstusrobotite ajamikompleksid, mis sisaldavad mitmesuguseid andureid käsitlusobjektide ja nende asukoha tuvastamiseks, roboti eri organite ühtset ning täpset programmjuhtimissüsteemi, eriehitusega mootoreid ja magnetmehhanisme jms. Ka elektriautod, kui näiteks nende igal rattal on omaette ajam ja omaette pöördemehhanism, on võimalikud üksnes kooskõlastatud täpse, kiire, paindliku ja äärmiselt töökindla, arvutil põhineva juhtimissüsteemi olemasolul.

Elektriajameid käsitletakse põhjalikult õppesuuna *Elektriajamid ja jõuelektroonika* põhiõppeainetes.



Joonis 6.3.4. Sulametalli doseerimiseks valukonveierile kasutatava magnetohüdrodünaamilise elektriajami põhimõte. *1* sulatusahi, *2* sulametall (magneesium, alumiinium vm), *3* sulametallitoru, *4* kulgmagnetvälja tekitav induktor, *5* sulametallitoru ümbritsev ettekuumutusmähis, *6* valuvorm, *7* valukonveier

6.4 ELEKTERKÜTE

Võrreldes muude kütteviisidega on elekterküte tunduvalt lihtsam, töökindlam ja paindlikum. Kuna aga elektrienergia on kallim kui kütustes sisalduv energia, vajab elekterkütte kasutamine alati teatavat tehnilis-majanduslikku põhjendamist.

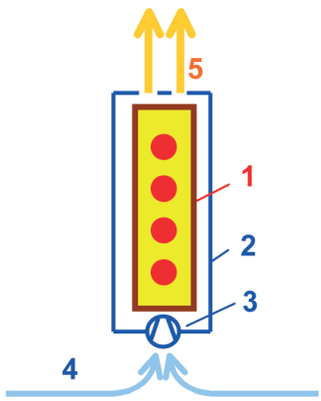
Elekterkütte eelised teiste kütteviiside ees seisnevad

- suuremas paindlikkuses ja mitmekülgsuses,
- lihtsa kombineerimise võimaluses teiste kütteviisidega,
- võimaluses loobuda vee kasutamisest küttesüsteemis ja seega võimalike veekahjustuste välistamises küttesüsteemi riketel,
- väiksemas tuleohus võrreldes kütuste põletamisega,
- kerges automatiseerimises ja optimaalse reguleerimise võimaluses,
- väikestes paigaldus- ja hoolduskuludes,
- suuremas töökindluses,
- energiakulu täpse arvestamise võimaluses,
- elektrienergia odavama öötariifi kasutamise võimaluses ning seejuures ühtlasi energiasüsteemi ööpäevase koormusgraafiku soodsas reguleerimises.

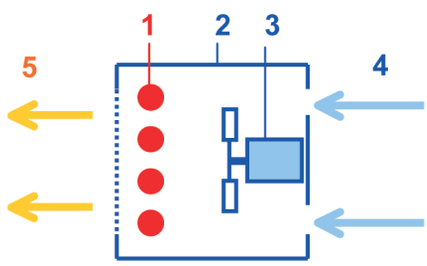
Elekterkütte põhipuudusteks loetakse

- elektrienergia kallidust,
- ehitise elektrijuhistiku kallinemist, sest sageli tuleb elekterkütteseadmete toiteks ette näha omaette juhistik,
- vajadust tugevdada ehitise soojusisolatsiooni, mis kalli elekterkütte kasutamisel on eriti vajalik.

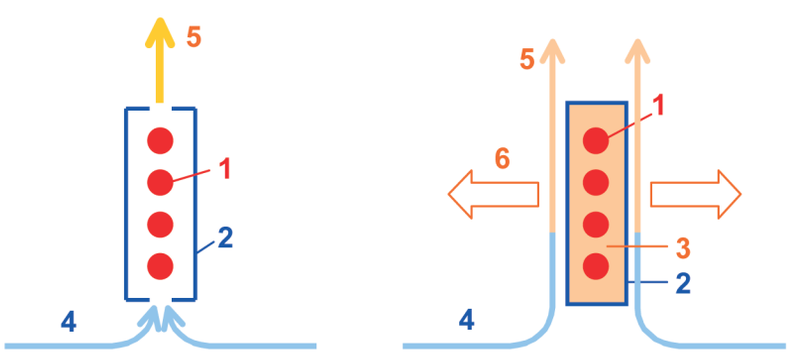
Elekterkütet saab realiseerida nii **otse-** kui ka **salvestusküttena**. Joonisel **6.4.1** on kujutatud tüüpiliste toaoludes kasutatavate otseküttekonvektorite (konvektsioon-soojusülekande ülekaaluga küttekehade) ja -radiaatorite (kiirgusliku soojusülekande ülekaaluga küttekehade), joonisel **6.4.2** aga samades oludes kasutatava salvestusküttekonvektori ehituspõhimõte. Viimane köetakse üles nt öösel, elektrienergia soodustariifi kehtimise ajal, soojust aga viiakse ära nii öösel kui ka päeval, reguleeritava läbipuhumisventilaatori abil. Lihtsamates (väiksema võimsusega) salvestusküttekehades võidakse kasutada ka loomulikku konvektsiooni.



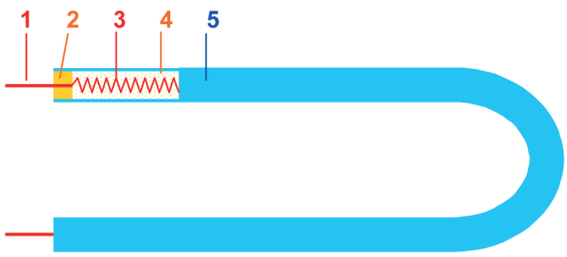
Joonis 6.4.2. Elektrilise salvestusküttekeha ehituspõhimõte. *1* kivimist, keraamiline vm salvestusmaterjal koos kütteelementidega, *2* ümbris, *3* ventilaator, *4* külma õhu juurdevool, *5* soojenenud õhu äravool



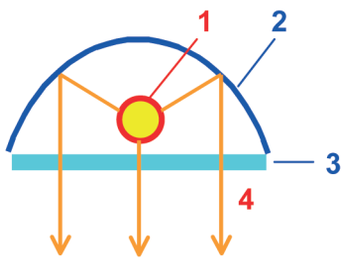
Joonis 6.4.3. Elektrilise soojaõhupuhuri ehituspõhimõte. *1* kütteelemendid, *2* ümbris, *3* ventilaator, *4* külma õhu juurdevool, *5* soojenenud õhu äravool



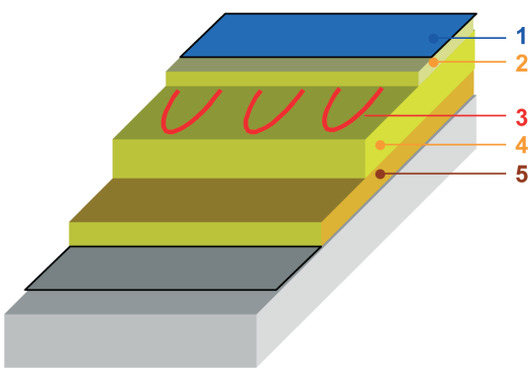
Joonis 6.4.1. Elektrilise konvektori (vasakul) ja radiaatori (paremal) ehituspõhimõte. *1* elektriline kütteelement, *2* ümbris, *3* täitevedelik (nt õli), *4* külma õhu konvektiivne juurdevool, *5* soojenenud õhu äravool, *6* soojuskiirgus



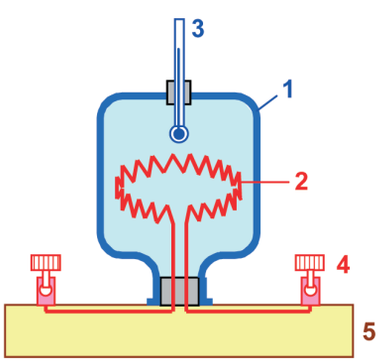
Joonis 6.4.4.
Torukujuline elektriline kütteelement (näide).
***1* sisseviik, *2* sisseviigu isolatsioon, *3* takistustraadist keermik, *4* täitematerjal (SiO_2 või MgO), *5* metalltoru**



Joonis 6.4.5. Elektriline kiirgusküttekeha (näide).
***1* kütteelement, *2* reflektor, *3* kaitseklaas, *4* soojuskiirgus**



Joonis 6.4.6. Elektrilise põrandaküttе põhimõte.
***1* põranda pealiskate (põrandakivid või -plaadid, parkett, plastikaatkate vm), *2* tasanduskiht, *3* küttekaabel, *4* betoon, *5* soojusisolatsioon**



Joonis 6.4.6. Emil Lenzi katseseade elektrivoolu soojusliku toime uurimiseks.
***1* piiritusega täidetud pudel, *2* elektriline küttekeha, *3* termomeeter, *4* klemm, *5* puidust alusplaat**

Tuleb mainida, et kõnekeeles nimetatakse radiaatoriteks ekslikult tihtipeale ka neid küttekehi, mis annavad soojust köetavasse ruumi põhiliselt konvektsiooni teel.

Ruumide kiireks või lühiajaliseks üleskütmiseks leiavad sageli kasutamist ***soojaõhupuhurid*** (joonis **6.4.3**).

Kõigis eelnimetatud küttevahendites kasutatakse enamasti torukujulisi kütteelemente, milles takistustraadist keermikku ümbritseb kokkupressitud peeneteraline räni- või magneesiumoksiid ja roostevabast terasest või muust tugevast ning korrosioonikindlast metallist kest (joonis **6.4.4**). Sellised elemendid on väga töökindlad ja tagavad oma sellekohasel paigaldamisel kõrgetasemelise elektriohutuse. Kasutatakse ka madala- ja kõrgetemperatuurilisi kiirgusküttekehi (joonis **6.4.5**).

Elekterkuumutust võidakse kasutada ka keskküttes. Sel juhul on keskküttekatel enamasti seadistatud samasuguste kütteelementidega nagu ülalvaadeldud kohtküttevahendid, kuid mõnedes tööstuspaigaldistes võidakse kasutada ka *elektroodkatlaid*, milles elektrienergia muundub soojuseks vees endas.

Väga levinud on elektriliste **küttekaablite** kasutamine. Eeskätt kasutatakse neid hoonete põrandaküttes (joonis **6.4.6**), kuid levinud on ka nende kasutamine katuserennide, vihmaveetorude ja veevarustustorude jäätumise vältimiseks, lume sulatamiseks katustel, kõnniteedel ja tänavatel jne.

Hoonete kütteks kasutatakse ka laeküttekilesid, mida saab suhteliselt lihtsalt (ripplae moodustamise teel) paigaldada ka olemasolevatesse hoonetesse.

Hoonete elekterkütet reguleeritakse enamasti automaatselt, soovitavale temperatuurile seatavate *termostaatide* abil. Täpsemaks automaatreguleerimiseks võidakse kasutada hooneväliseid temperatuuri, tuulesuuna, tuulekiiruse jm andureid.

Esimesena kasutas elektrilist küttekeha (elektrivoolu soojusliku toime uurimisel joonisel **6.4.7** kujutatud viisil) aastal 1842 Peterburi Teaduste Akadeemia akadeemik, Tartust pärit füüsik Heinrich Friedrich Emil Lenz (1804–1865). Elekterkütte katseline uurimine algas aastal 1907, kui Romanos (Põhja-Itaalia) ehitati esimesed elektrilised salvestusahjud. Tegeliku kasutamise alguseks tuleb lugeda aastat 1912, mil Seattle'is (USA) varustati elekterküttega neli esimest elumaja. Käesoleval ajal kasutatakse elekterkütet laialdaselt odava elektrienergia saadavuse korral (nt. Norras ja Kanadas), kuid ka mugavuse ja töökindluse huvides. Paljud energiasüsteemid (nt Kesk-Euroopas) stimuleerivad salvestus-elekterkütte kasutamist regulaatortarbijana süsteemi ööpaevase koormusgraafiku tasandamise eesmärgil.

6.5 ELEKTROTEHNOLOOGIA

Elektrotehnoloogia seisneb elektrinähtuste otseses rakendamises materjalide ja esemete töötlemiseks. Nende nähtuste toime võib olla elektrotermiline, elektrokeemiline, magnetiline, elektrostaatiline, mehaaniline, kiirguslik või kombineeritud. Tööstuslikud elektrotehnoloogiaseadmed tarbivad tänapäeval ligikaudu 25 % kogu tööstuses kasutatavast elektrienergiast.

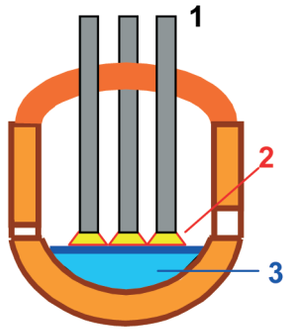
Võimsaimad elektrotehnoloogiaseadmed on **metallisulatusahjud**. Nende põhiliikidena eristatakse füüsikalise põhimõtte ja elektrotermiliste protsesside iseloomu järgi

- kaarahjusid,
- induktsioonahjusid,
- takistusahjusid,
- kiirgusahjusid,
- elektronkiirahjusid.

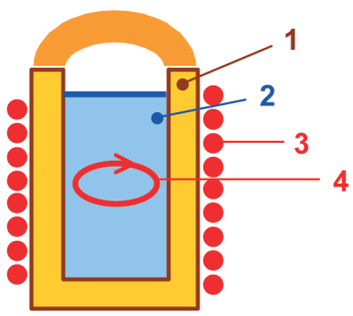
Kaarahjus sulatatakse metall alalis- või vahelduvvoolu-elektrikaare toimel, mis tekitatakse metalli ja grafiitelektroodide vahel (joonis **6.5.1**). Kaare intensiivust saab reguleerida voolu muutmisega ja elektroodide kaugusega metallist. Selliseid ahjusid saab valmistada võimsusega kuni mõnikümmend megavatti ja neid kasutatakse eeskätt terase, kuid ka muude metallide ja sulamite tootmisel.

Induktsioonahi koosneb lihtsaimal juhul tiiglist ja seda ümbritsevast vahelduvvoolumähisest, mis indutseerib sulatatavas metallis tugeva pöörisvoolu (joonis **6.5.2**). Erinevalt kaarahjust, milles kõrgetemperatuuriline elektrikaar võib esile kutsuda oksüdatsiooniprotsesse, on induktsioonahjudest saadav metall enamasti puhtam. Tarbe korral võib tiigel olla õhutihedalt suletud, kusjuures selle vaba ruum võib olla täidetud inertgaasiga (nt argooniga).

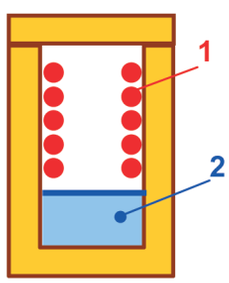
Takistusahjudes toimub sulatatava metalli kuumutamine enamasti kaudselt – kõrgetemperatuuriliste metall- (nt malm-), ränikarbiid- (*karborundum*-) vm küttekehade abil, mis paiknevad ahju seintel ja/või laes (joonis **6.5.3**). Saavutatav temperatuur on piiratud küttekeha materjaliga ja ahju keskkonnaga. Õhus talitlevate küttekehade lubatav temperatuur ei ole tavaliselt üle 1000 °C, mistõttu sellised ahjud sobivad ainult mõningate värviliste metallide sulatamiseks. Inertgaas- või vaakumahjude korral võidakse nt volframküttekehadega saavutada aga temperatuur kuni 3000 °C. Harvemini kasutatakse *otsekuumutust* voolu juhtimisega läbi sulatatava metalli.



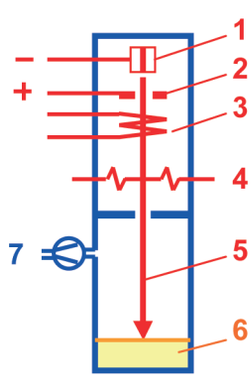
Joonis 6.5.1. Kolmefaasilise kaarahju ehituspõhimõte.
***1* grafiitelektroodid, *2* elektrikaar, *3* sulatatav metall**



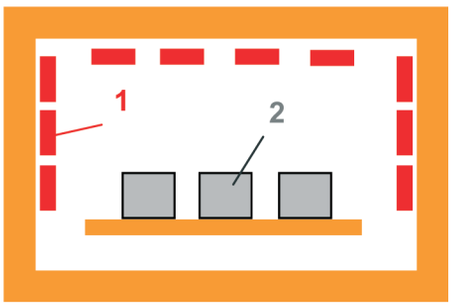
Joonis 6.5.2. Induktsioonahju ehituspõhimõte.
***1* tiigel, *2* sulatatav metall, *3* induktormähis, *4* indutseeritud vool sulatatavas metallis**



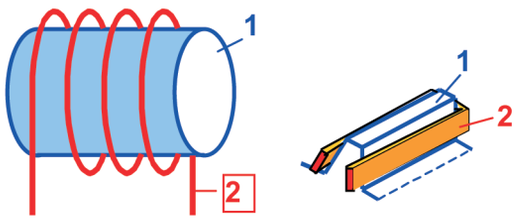
Joonis 6.5.3. Takistusahju ehituspõhimõte.
***1* küttekehad, *2* sulatatav metall. Metalli väljalaskesüsteem on näitamata**



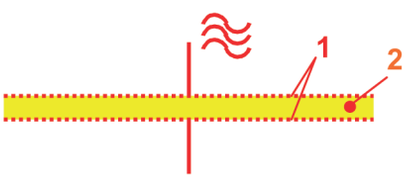
Joonis 6.5.4. Elektronkiirahju ehituspõhimõte.
***1* elektronkahur, *2* anood, *3* magnetlääts, *4* nihutusmähis, *5* elektronkiir, *6* sulatatav metall, *7* vaakumpump**



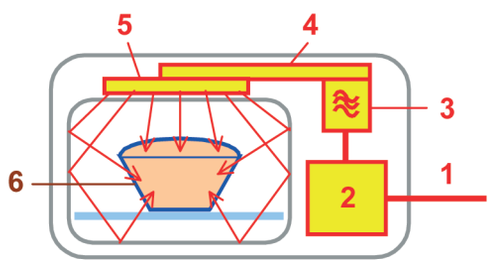
Joonis 6.5.5. Elektrilise takistusahju ehituspõhimõte. *1* küttekeha, *2* kuumutatav ese



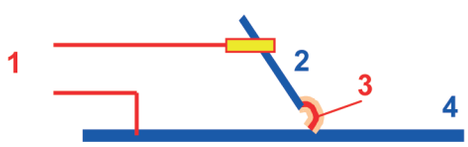
Joonis 6.5.6. Induktsioonkuumutus. Vasakul madalsageduslikku, paremal kõrgsageduslikku kuumutuse põhimõte. *1* kuumutatav ese (paremal – näitena hammasratta hammas), *2* induktor



Joonis 6.5.7. Dielektrilise kuumutuse põhimõte. *1* võrk- vm elektroodid, *2* kuumutatav materjal



Joonis 6.5.8. Mikrolaineahju ehituspõhimõte. *1* elektritoide, *2* muundus-, juhtimis-, reguleerimis- ja automaatikaplokk, *3* magnetrongeneraator, *4* lainejuht, *5* ketasantenn, *6* kuumutatav ese



Joonis 6.5.9. Kaarkeevituse põhimõte. *1* elektritoide, *2* keevituselektrood, *3* keevituskaar, *4* keevitatav detail

Kiirgusahjud põhinevad enamasti infrapunakiirguse kasutamisel, mis tavaliselt saadakse väikesemõõtmeliste halogeenhõõglampide ja kiirgust kontsentreeriva peegelsüsteemi abil analoogiliselt joonisega **6.4.5**. Metallitiigel võib seejuures tarbe korral paikneda hermeetiliselt suletud, kvartsklaasist kaanega kambris.

Elektronkiirahjusid (joonis **6.5.4**) kasutatakse enamasti ülipuhtate metallide saamiseks nende sulatamise teel vaakumis. Ahju ülaosas paikneb võimas eriehitusega katood (*elektronkahur*), millest väljuvat elektronivoogu saab magnetläätsega fookustada ja juhtimismähise abil nihutada.

Esimese metallisulatus-elektriahju (terasesulatus-kaarahju) ehitas aastal 1883 saksa-inglise ettevõtja William Siemens (1823…1883). Induktsioonahju leiutas aastal 1899 rootsi metallurg Frederik Adolf Kjellin (1872…1910).

Elektrienergiat kasutatakse ka metallide ja muude materjalide **kuumutamiseks** nende termilisel töötlemisel (karastamisel, lõõmutamisel, kuivatamisel, liimimisel jms). Selleks võidakse kasutada

- otsest või kaudset takistuskuumutust,
- madal- või kõrgsageduslikku induktsioonkuumutust,
- dielektrilist kuumutust,
- kiirguskuumutust.

Üks lihtsamaid kuumutusviise seisneb **takistusahju** kasutamises (joonis **6.5.5**). Ahju köetakse piisavalt kõrgetemperatuuriliste metall- (nt malm), ränikarbiid- vm küttekehadega, mis paiknevad ahju sisepindadel (seintel, laes, põrandal või sobivatel kandetarinditel). Sageli läbib sellist ahju konveier, millel termiliselt töödeldavad (nt portselan-) esemed võivad vastavalt tehnoloogilise protsessi kujundusele läbida järjekorras mitut eri temperatuuriga tsooni.

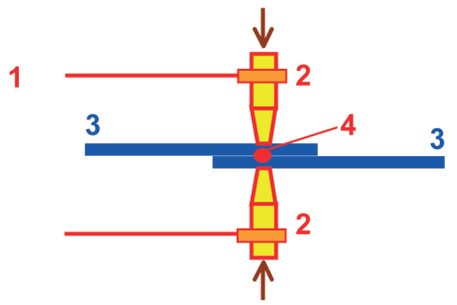
Takistusahjudega sarnanevad ka **autoklaavid**, milles elektriliste küttekehade abil luuakse kõrgrõhuline veeaurukeskkond materjalide töötlemiseks või katsetamiseks.

Induktsioonkuumutamisel ümbritsetakse kuumutatav metallese või selle osa sobivalt kujundatud induktoriga, mis võib koosneda ühest või mitmest vajaliku kujuga keerust või olla kujundatud korrapärase mähisena (joonis **6.5.6**). Madalal sagedusel (mõnest hertsist mõnekümne hertsini) tungib elektriväli metalli suhteliselt suure sügavuseni ja sobib näiteks lõõmutamiseks. Kõrgel sagedusel (mõnest mõnesaja kilohertsini) on elektromagnetvälja sisse-

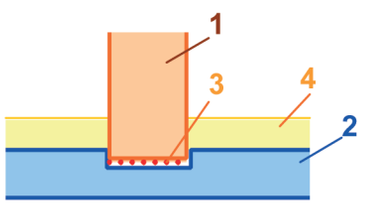
tungimissügavus sageli vaid mõni kümnendik millimeetrit, mistõttu selline kuumutusviis sobib eriti hästi pindkarastuseks.

Dielektriline kuumutus põhineb kõrgsagedusliku (sagedusega mõni kuni mõnisada megahertsi) elektrivälja rakendamises dielektrilisele materjalile tasapinnalise kondensaatori taoliste, enamasti võrkelektroodide vahel (joonis **6.5.7**). Kuna dielektrik ei ole kunagi ideaalne (lõpmata suure eritakistusega), tekib selles energia neeldumine ning kuumenemine ja selle tulemusel soovikohased füüsikalised protsessid (kuivamine, kõvenemine, polümeriseerumine jms).

Kiirgusahjud võivad põhineda ülikõrgsagedusliku raadiokiirguse või optilise (enamasti infrapunase) kiirguse kasutamisel. Väga levinud on nt suhteliselt väikese võimsusega (kuni mõni kilovatt) *mikrolaineahjud*, milles magnetrongeneraatorite abil saadav kiirgus (tavaliselt standardse lainepikkusega 12,25 cm) suunatakse lainejuhi ja antenni abil ahju kuumutusruumi, kus see neeldub kuumutatavas esemes (joonis **6.5.8**). Enamasti kasutatakse selliseid ahjusid toiduvalmistamiseks, kuid neid võidakse rakendada ka muul otstarbel.



Joonis 6.5.10. Punktkeevituse põhimõte.
***1* elektritoide, *2* keevituselektroodid,**
***3* keevitatavad detailid, *4* kokkusulamispunkt**



Joonis 6.5.11. Elektroerosioontöötluse põhimõte.
***1* elektrood, *2* töödeldav ese, *3* säde- või impulsslahendus pilus laiusega 0,01…0,2 mm,**
***4* isoleervedelik (nt petrool või õli)**

Mikrolaineahju ehitamise võimaluse avastas juhuslikult radarseadmete uurimisel aastal 1945 USA elektroonikafirma *Raytheon Corporation* insener, tehnikadoktor Percy Spencer (1894…1970), kes aga kohe taipas selle avastuse suurt tähtsust olmeelektroonikas. Sama firma alustaski aastal 1953 esimesena maailmas olme-mikrolaineahjude tootmist [1.15].

Elektrotehnoloogia üks tähtsaimaid alajaotusi on **elekterkeevitus**. Käesoleval ajal on laialt kasutusel

- kaarkeevitus,
- kontaktkeevitus (punkt- ja joonkeevitus),
- elektronkiirkeevitus,
- laserkeevitus.

Kaarkeevitusel sulatatakse enamasti keevituselektrood elektrikaare toimel *keevisõmbluse* näol liidetavate metallosade vahele (joonis **6.5.9**). Keevitamine võib toimuda käsitsi, kuid kasutatakse ka mitmesuguseid keevitusmasinaid ja -roboteid. Keevituse parim kvaliteet saadakse **alalisvoolu** kasutamisel, mistõttu nüüdisajal toidetakse keevituskaart enamasti sellekohastest *keevitusaladditest*. Varem on kasutatud ka keevitustrafosid (need on praegugi veel kasutusel) ja veel varem alalisvoolu-keevitusgeneraatoreid.

Kontaktkeevitus põhineb soojuse tugeval eraldumisel, kui vool läbib kokkukeevitatavate detailide kokkupuutekoha kontakttakistust (joonis **6.5.10**). Kontaktkeevituse levinuim liik – **punktkeevitus** on laialt levinud lehtmaterjalist keerukate detailide kokkuühendamisel nt autotööstuses ja toimub sageli *keevitusrobotite* abil.

Elektronkiirkeevitus toimub samal põhimõttel nagu elektronkiir-metallisulatus (vt joonis **6.5.4**). **Laserkeevitust** kasutatakse väga peente ja täpsete keevisõmbluste saavutamiseks mitte üksi metallide, vaid ka elektriliselt mittejuhtivate materjalide ja kahe või enama eri materjali kokkukeevitamisel.

Keevitusviise on tugevasti rohkem kui eespool loetletud. Mõningaid keevitamisel kasutatavaid protsesse (eeskätt elektrikaart ja laserkiirt) saab kasutada ka materjalide **lõikamiseks**.

Kaarkeevitust kasutas esimesena aastal 1890 vene insener Nikolai Slavjanov (1854–1897), kontaktkeevitust aga aastal 1886 USA viljakas leidur ning ettevõtja professor Elihu Thomson (1853–1937).

Vanimaks elektrotehnoloogiliseks menetluseks tuleb lugeda **elektrolüüsi**, sest juba aastal 1803 õnnestus rootsi keemikul ja mineraloogil Jöns Jacob Berzeliusel (1779–1848) eraldada sel viisil soolalahustest puhtaid metalle ja veel varem (aastal 1800)

olid inglise füüsikud Anthony Carlisle (1768–1840) ja William Nicholson (1753–1815) lahutanud vee elektrolüüsi teel vesinikuks ja hapnikuks. Käesoleval ajal saadakse elektrolüüsi teel kogu elektrotehnika jaoks vajalik vask ja alumiinium ning mitmeid teisi puhtaid metalle. Seejuures on alumiiniumi elektrolüüs üks kõige energiamahukamatest tööstusprotsessidest (1 t alumiiniumi saamiseks on vaja ligikaudu 14 MWh elektrienergiat). Tunduvalt väiksema võimsusega on **galvaaniliste pinnakatete** saamiseks (hõbetamiseks, kuldamiseks, kroomimiseks, nikeldamiseks jne) vajalikud galvaanikavannid.

Elektrotehnoloogiliste protsesside hulgas väärib nimetamist ka **elektroerosioontöötlus**, mis põhineb töödeldava eseme korrosioonil säde- või impulsslahenduse toimel, mida rakendatakse sagedusega mõnikümmend hertsi kuni mõni kiloherts (joonis **6.5.11**). Sellisel viisil võidakse näiteks puurida ükskõik millise kujuga avasid (sealhulgas ka nt kõverjoonelise teljega) ükskõik kui kõvasse metalli; need eelised kompenseerivad enamasti täielikult töötluse aegluse.

Elektroerosioontöötluse alused lõid vene masinaehitustehnoloogid abielupaar Boris ja Natalja Lazarenko aastal 1943.

6.6 ELEKTERVALGUSTUS

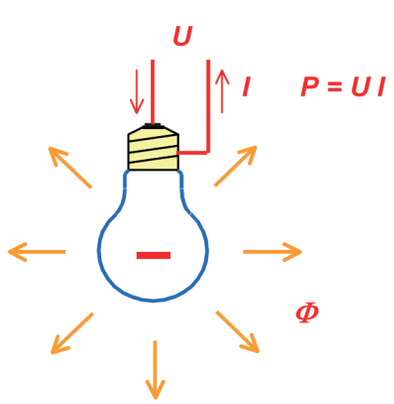
Valgustuseks kulub maailmas ligikaudu 10 % kogu toodetavast elektrienergiast. **Valgusallikaina** kasutatakse seejuures peaasjalikult kolme liiki lampe –

- hõõglampe,
- lahenduslampe,
- valgusdioode.

On olemas ka muid lambiliike, kuid nende osatähtsus võrreldes kolme mainituga on kaduvväike.

Valgusallikad paiknevad **valgustusvahendeis**, mille hulgas olulisimad on

- valgustid,
- prožektorid,
- projektorid,
- valgussignalisatsioonivahendid.



Joonis 6.6.1. Energia muundamine elektrilises valgusallikas. *U* pinge, *I* vool, *P* võimsus, Φ valgusvoog

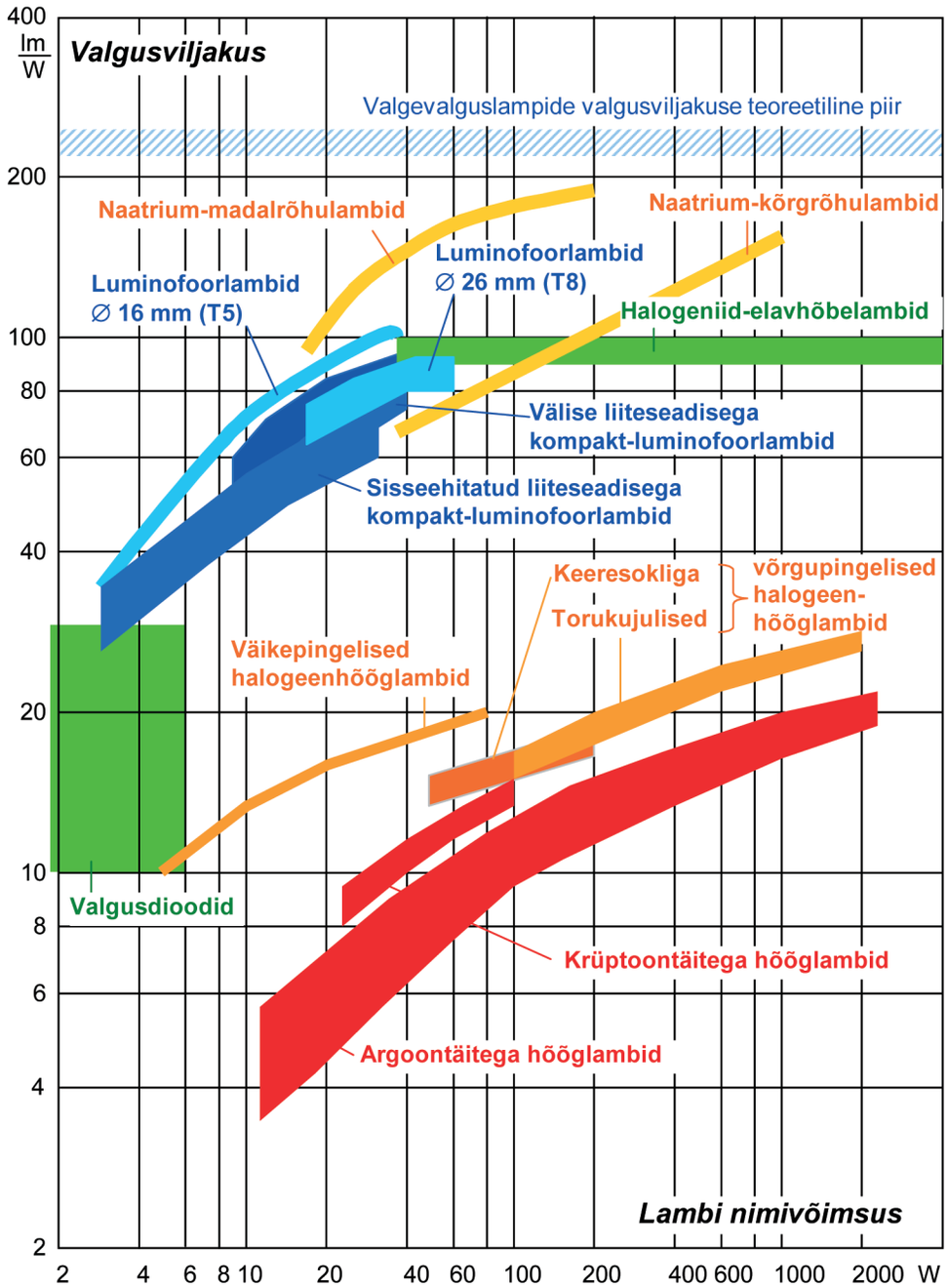
Valgustatavate alade järgi eristatakse sise- ja välisvalgustust, otstarbe järgi – töö-, turva-, signalisatsiooni-, valve-, ehis-, reklaam- jm valgustust. Kõige enam kasutab inimene sisetöökohtade valgustust, mis ühtlasi on, arvestades väga mitmesuguseid tehtavaid töid ja ümbruseolusid, kõige mitmekesisem. Keskmise keerukusega nägemistööde korral (näiteks lugemisel ja kirjutamisel) kasutatakse tööruumides enamasti **üldvalgustust**, keerukatel töödel, kui tugevamat valgustust on vaja suhteliselt väikesel tööpinnal, lisaks üldvalgustusele veel **kohtvalgustust**.

Elektrilisi valgusallikaid iseloomustatakse paljude tunnussuuruste ja omadustega, millest olulisimad on

- nimipinge U_n,
- nimivõimsus P_n,
- nimivalgusvoog Φ_n,
- nimivalgusviljakus $\eta_n = \Phi_n / P_n$ (nimivalgusvoo ja nimivõimsuse suhe).

Lihtsustatult on valgusallika tunnussuurused esitatud joonisel **6.6.1**.

Valgusvoo ühik on teatavasti **luumen** (lm), valgusviljakuse ühik seega **luumen vati kohta** (lm/W). Valgusviljakuse teoreetiline piir on 683 lm/W, mis oleks võimalik siis, kui lambi kogu tarbitav võimsus muunduks ilma mingite kadudeta monokromaatiliseks kiirguseks lainepikkusega 555 nm (sellel lainepikkusel on inimsilm kiirgusele kõige tundlikum). Ühtlase spektriga valge valguse korral on suurim



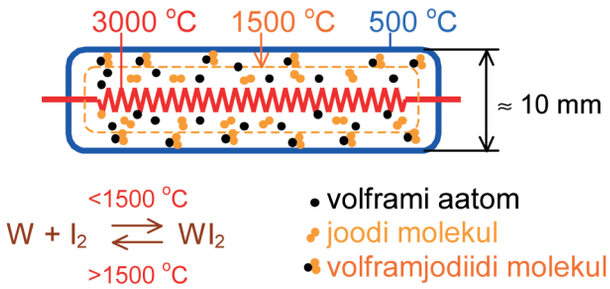
Joonis 6.6.2. Mõnede lambiliikide valgusviljakus olenevalt lambi nimivõimsusest

võimalik valgusviljakus ligikaudu 250 lm/W. Valgusallikate tegelik valgusviljakus on enamasti vahemikus 10 kuni 100 lm/W, olenedes lambi tüübist ja nimivõimsusest. Mõnede lambiliikide valgusviljakused on esitatud joonisel **6.6.2**.

Valgusviljakusega iseloomustatakse mitte üksi elektrilisi, vaid ka muid valgusallikaid. Nii näiteks on küünla valgusviljakus 0,1…0,2 lm/W, Päikese valgusviljakus 110 lm/W ja jaanimardika valgusviljakus ligi 500 lm/W.

Hõõglampide hõõgniidid valmistatakse nüüdisajal peaaegu eranditult **volframist**, mille sulamistemperatuur on 3380 °C ja mis, olenevalt lambi tüübist ja võimsusest, talitleb temperatuuril 2300…3100 °C. Mida kõrgem on talitlustemperatuur, seda kõrgem on lambi valgusviljakus. Võimalikult kõrge talitlustemperatuuri saavutamiseks kasutatakse eeskätt

- hõõgniidi kujundamist keermikuna või topeltkeermikuna (sellega väheneb niidi aurustumispindala),



Joonis 6.6.3.
Halogeen- (jood-) hõõglambi talitluspõhimõte (näide)

- lambi täitmist võimalikult raske inertgaasiga (enamasti argooni või krüptooniga),
- halogeenide (enamasti joodi või broomi) lisamist täitegaasile.

Valgusviljakust suurendab ka väiksem nimipinge, sest sel juhul on samaksjääval võimsusel lambi vool ning hõõgniidi ristlõige suurem, mistõttu lubatav temperatuur on mõnevõrra kõrgem.

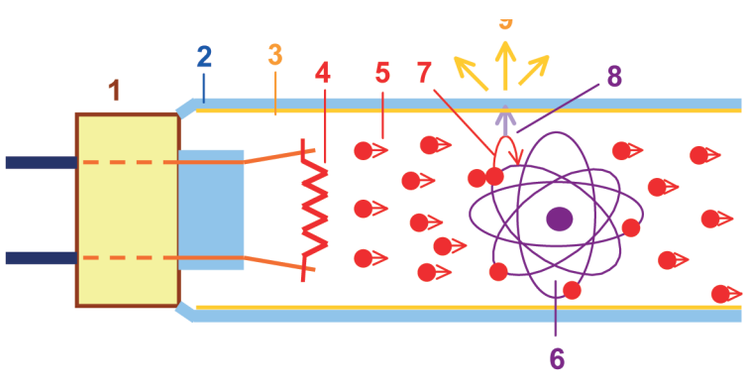
Halogeenhõõglambid põhinevad sellel, et hõõgniidilt aurustunud volfram ühineb mingi halogeeniga (enamasti joodi või broomiga) *volframhalogeniidiks*, mille aurustumistemperatuur on tugevasti madalam kui volframil. Kui lambi kolvi temperatuur on piisavalt kõrge, ei saa see ühend kolvile sadestuda, mistõttu lambis tekib halogeniidi ja volframi aurude küllastus ja hõõgniidi aurustumine lakkab. Et seda saavutada, peab kolvi temperatuur olema enamasti ligikaudu 500 °C. Seetõttu valmistatakse selliste lampide kolvid kuumuskindlast kvartsklaasist ja nende mõõtmed on tugevasti väiksemad kui tavalistel hõõglampidel. Halogeenhõõglambi talitluspõhimõte on esitatud joonisel **6.6.3**.

Esimesed masskasutamiseks sobivad (süsiniit-) hõõglambid valmistasid aastal 1879 USA leidur ning tööstur Thomas Alva Edison (1847–1931) ja inglise leidur ning tööstur Joseph Wilson Swan (1828–1914). Volframniitide tootmise tehnoloogia töötas välja aastal 1906 USA füüsik William David Coolidge (1873–1975), inertgaastäite võttis kasutusele aastal 1913 USA keemik ning füüsik Irving Langmuir (1881–1957), halogeenhõõglampide tootmist alustas aastal 1958 USA firma *General Electric*.

Hõõglambid on lihtsa ehitusega, väikeste mõõtmetega, odavad ja hõlpsad kasutada, kuid nende puudusteks on madal valgusviljakus (enamasti 10…30 lm/W) ja suhteliselt lühike eluiga (tavaliselt 1000…2000 tundi). Seetõttu on laialt kasutusel **lahenduslambid**, mis enamasti põhinevad **kaarlahendusel** madala sulamistäpiga metalli (enamasti elavhõbeda või naatriumi) aurus. Selliste lampide valgusviljakus on olenevalt lambi tüübist ja võimsusest enamasti vahemikus 40…150 lm/W, eluiga aga tavaliselt 5 000 kuni 15 000 tundi. Ka võib lahenduslampides nt luminofooride kasutamise teel saada mitmesuguse, sealhulgas päevavalguse taolise spektriga valgust, mis on eriti tähtis siis, kui nägemistöö nõuab värvide õiget tuvastamist.

Levinuima lahenduslambi – madalrõhulise, luminofoor-sisekattega elavhõbelambi (*madalrõhuluminofoorlambi*) ehituspõhimõte on kujutatud joonisel **6.6.4**. Seda liiki lambid annavad praegu ligikaudu 90 % kogu maailma elektriliste valgusallikate valgusvoost.

Madalrõhu-elavhõbelambis on luminofoori kasutamine hädavajalik, kuna elavhõbe-kaarlahenduses tekib peaasjalikult ultraviolettkiirgus, mis on valgustuseks sobimatu. Teine võimalus vastuvõeta-



Joonis 6.6.4. Torukujulise madalrõhu-luminofoorlambi ehitus- ja talitluspõhimõte.
***1* sokkel, *2* kolb, *3* kolvi sisepinnale kantud luminofoorikiht, *4* elektrood,**
***5* elektronide voog, *6* elavhõbeda-aatom, *7* elavhõbeda-aatomi elektroni ergastumine**
ja naasmine stabiilsele tasemele, *8* ultraviolettkiirguse kvant, *9* luminofooris muundatud väljundkiirgus

va kiirgusspektri saamiseks seisneb kõrgema rõhu (tavaliselt 10…200 kPa) ja muudest metallidest (naatriumist, indiumist, talliumist jm) lisandite kasutamises. Et need metallid ei saaks sadestuda kolvile, viiakse nad lampi halogeniidide kujul, mistõttu selliseid lampe nimetatakse **halogeniidlampideks**. Lisametallide sobiva valikuga võib saavutada kõrge valgusviljakuse (enamasti 90…100 lm/W) ja päevavalgusega praktiliselt ühtiva spektri.

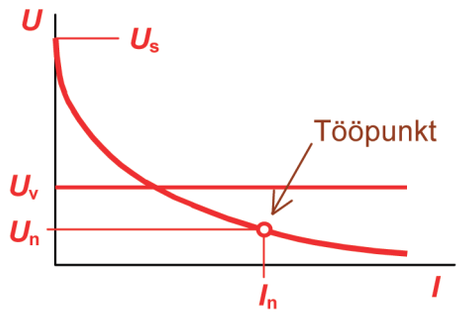
Kaarlahendusel **naatriumiaurus** ultraviolettkiirgust ei teki. Madalrõhuliste naatriumlampide valgus on aga monokromaatiline (kollakas, lainepikkusega 589 nm), mistõttu selles valguses ei saa eristada värve. Lambi valgusviljakus on aga kõrge (kuni 200 lm/W) ja sellised lambid sobivad hästi teede ja tänavate valgustamiseks. Kõrgrõhulampide spekter on laiem, kuid samuti oranžikaskollane, mistõttu ka neid lampe kasutatakse peaasjalikult välisvalgustuses.

Kaarlahenduse pinge sõltuvus voolust on teatavasti langev (joonis **6.6.5**), mistõttu kaarlahenduslampe ei saa lülitada otse võrgupingele (tekiks voolulaviin ja lamp põleks läbi). Peale selle on kaare süütamiseks enamasti vaja võrgupingest kõrgemat pingeimpulssi. Seetõttu tuleb kõik lahenduslambid varustada **liiteseadisega**, mis tagab lambi süttimise ning stabiilse talitluse.

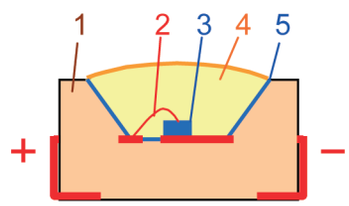
Lihtsaim liiteseadis koosneb vahelduvvoolu korral induktiivtakistist (*drosselist*), mis ühendatakse lambiga jadamisi, ja impulsspingeallikast (*süüturist*). Nüüdisajal eelistatakse liiteseadisena aga **sagedusmuundurit** väljundsagedusega 20…50 kHz, mis tagab

- lambi värelusvaba talitluse (*väreluseks* nimetatakse vahelduvvoolulampidele omast valgusvoo perioodilist muutumist vastavalt voolu hetkväärtuse perioodilisele muutumisele; lahenduslampide värelus võrgusagedusel võib mõnikord lubamatult häirida inimese silma ja aju talitlust),
- lambi süttimise ilma spetsiaalsete süüturite kasutamiseta,
- kiire ja sujuva süttimise,
- väiksema energiakao (ligikaudu kaks korda väiksema kui drosseli kasutamisel),
- lambi pikema eluea,
- lambi kõrgema valgusviljakuse,
- liiteseadise väiksema massi.

Liiteseadis võib kujutada endast eraldi aparaati, kuid võib olla ka lambiga kokku ehitatud. Liiteseadist sisaldavat lampi nimetatakse **kompaktlambiks** ja tihtipeale varustatakse see samasuguse keere-



Joonis 6.6.5. Kaarlahenduslambi pinge sõltuvus voolust (alalisvoolul).
***I_n* lambi nimivool, *U_n* lambi nimipinge, *U_v* võrgupinge, *U_s* lambi süütamiseks vähimalt vajalik pinge**



Joonis 6.6.6. Jõu-valgusdioodi ehituspõhimõte.
***1* alus, *2* kuld-kontakttraat,**
***3* pooljuhtdiood, *4* lääts (võib sisaldada luminofoori),**
***5* peegelpind**

sokliga nagu hõõglambid, et energiasäästu eesmärgil saaks hõõglampe kompakt-lahenduslampide vastu lihtsalt välja vahetada. Selle omaduse tõttu nimetatakse selliseid lampe ka **säästulampideks**.

Esimese lahenduslambi (süsielektroodide vahel vabas õhus põleva alalisvoolu-elektrikaarega) valmistas oma laboratooriumilaua valgustamiseks aastal 1844 prantsuse füüsik Jean Bernard Léon Foucault (1819–1868). Tänavate ja välistöökohtade valgustamiseks sobiva lihtsa vahelduvvoolukaarlambi leiutas aastal 1876 Pariisis tegutsev vene telegraafiinsener Pavel Jablotškov (1847–1894). Katselisi madalrõhulisi elavhõbe-luminofoorlampe demonstreeris firma *Osram* Pariisi maailmanäitusel aastal 1935, kaubalisi seda tüüpe lampe aga USA firmad *General Electric* ja *Westinghouse* New Yorgi ja San Francisco maailmanäitusel aastal 1938. *General Electric* töötas aastal 1963 välja ka naatriumkõrgrõhulambid, mida praegu eelistatult kasutatakse tänavavalgustuses. Halogeniid-elavhõbelampe hakkas aastal 1969 esimesena tootma Saksamaa firma *Osram*, kes rakendas neid väga efektselt aastal 1972 Müncheni olümpiamängude spordirajatistes. Esimesed kompakt-luminofoorlambid töötas aastal 1981 välja Hollandi firma *Philips*.

Alates aastast 2000 on peaaegu plahvatuslikult hakanud levima **valgusdioodide** kasutamine valgustuspaigaldistes. Valgusdiood on väikepingeline (enamasti alalispingel 3…7 V talitlev) väikesemõõtmeline (läbimõõduga enamasti 1…5 mm) pooljuhtelement, mis on varustatud sisseehitatud nõguspeegli ja läätsega ja mis seetõttu kiirgab valgust kitsama või laiema vihuna mingis ühes suunas. Neid saab valmistada nii värvilistena (punastena, kollastena, rohelistena, sinistena) kui ka valgetena. Valgustuseks võidakse kasutada kas valgeid valgusdioode või värviliste dioodide selliseid kombinatsioone, mis värvide segunemisel annavad valge valguse. Valgustuseks ettenähtud *jõu-valgusdioodide* (joonis **6.6.6**) üksikvõimsus on käesoleval ajal 1…5 W, nimipinge 3,6 või 6,8 V, valgusviljakus 10…30 lm/W ja eluiga kuni 40 000 tundi. Väikese üksikvõimsuse tõttu valmistatakse mitmest valgusdioodist koosnevaid mooduleid, mida võidakse kujundada tavapäraste lampidena, valgusplaatidena või -lintidena.

Esimesed (punased) valgusdioodid valgusviljakusega 0,2 lm/W tulid kasutusele USAs aastal 1961 ja leidsid kohe kasutamist pisi-signaallampidena. Aastal 1975 lisandusid oranžid, kollased ja rohelised valgusdioodid, mis võimaldasid luua mitmevärvilisi valgussignalisatsiooniseadiseid valgusviljakusega ligikaudu 2 lm/W. Kasutamine töövalgustuses sai võimalikuks pärast siniste valgusdioodide väljatöötamist aastal 1982, eriti aga pärast valgete ning senistest võimsamate valgusdioodide turuletulekut. Praegu on valgusdioodid hakanud reklaamvalgustuses välja tõrjuma kõrgepingelisi huumlahenduslampe, valgusfoorides, autode signaaltuledes ja kandevalgustites aga hööglampe.

6.7 OHUTUSE TAGAMINE ELEKTRIENERGIA KASUTAMISEL

Pingestatud juhtivate osade puudutamisel (kõrgepingepaigaldistes aga isegi nendele osadele lähenemisel) võib inimene saada elektrilöögi. Elektrivoolu toime inimesele oleneb voolu liigist, voolu väärtusest ja kestusest. Eluohtlik on vool siis, kui see kulgeb läbi inimese südame ja kutsub esile südamevatsakeste lihaste koordineerimatu virvenduse (*fibrillatsiooni*). Sel juhul lakkab vereringe ja kogu inimkeha, sealhulgas aju, ei saa enam verega edasikantavast hapnikku ega veresuhkrut. Aju võib verevarustuse katkemist taluda enimalt 5 minutit, misjärel saabub surm. Loomkatsetega on kindlaks tehtud, et impulssvoolu korral tekib südamevatsakeste virvendus siis, kui vooluimpulss satub vatsakeste kokkutõmbefaasi keskosale, mille kestus on ligikaudu 10…20 % südametegevuse perioodist ehk ligikaudu 0,1…0,2 s. Elektrokardiogrammil vastab sellele niinimetatud *T-saki* algusosa (joonis **6.7.1**) Seega võivad väga lühikesed vooluimpulsid, kui nad ei satu sellele kriitilisele ajavahemikule, osutuda ka voolu suure väärtuse korral mõnikord ohututeks.

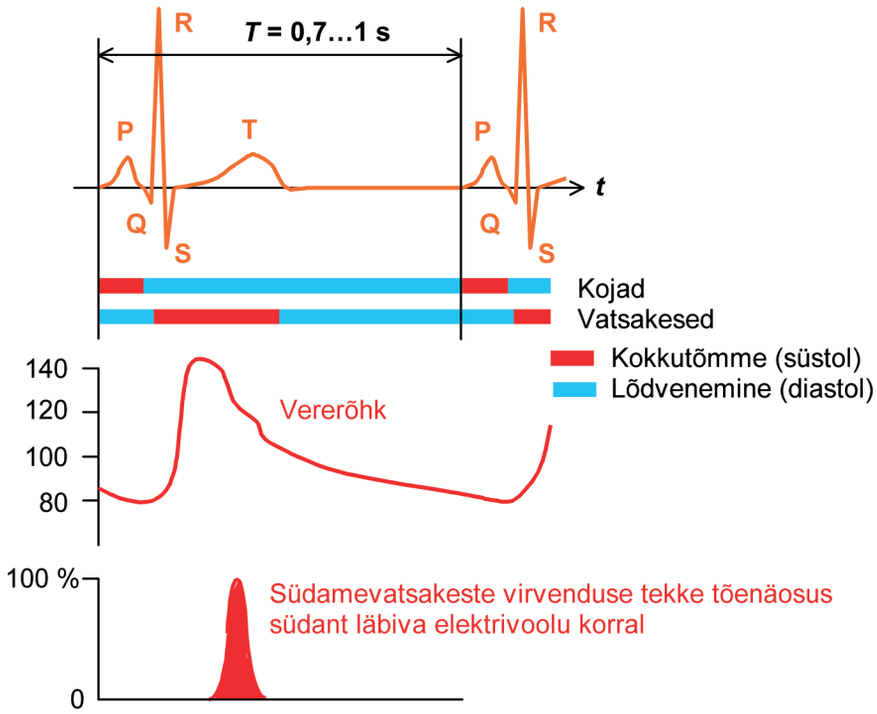
Eeltoodu ning sellekohaste uurimuste alusel on Rahvusvaheline Elektrotehnikakomisjon koostanud voolu ohtlikkust iseloomustavad diagrammid [6.5], mis vahelduvvoolu jaoks on kujutatud joonisel **6.7.2**.

Joonisel **6.7.2** iseloomustatakse voolu ja selle kestuse toimet nelja piirkonnaga:

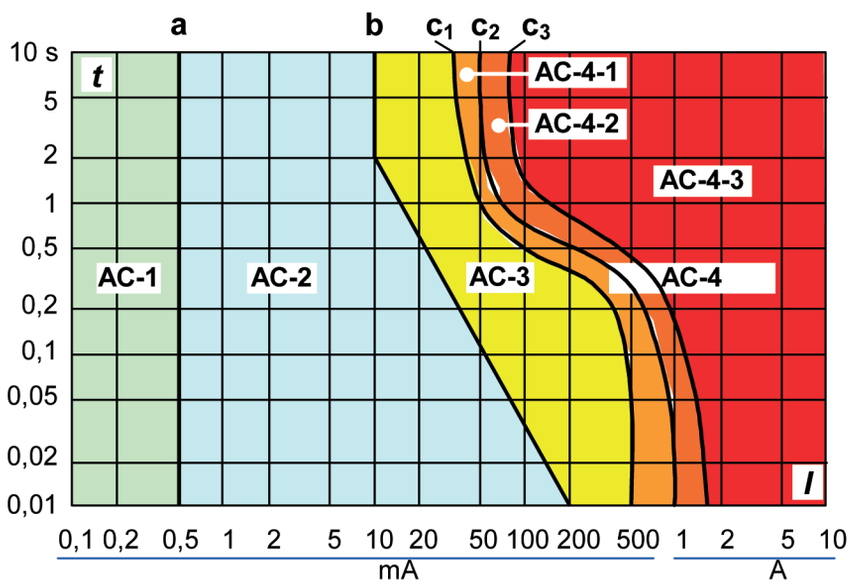
- piirkond **AC-1** (voolu väärtuseni kuni 0,5 mA), milles inimene voolu tavaliselt peaaegu üldse ei tunne,
- piirkond **AC-2**, milles voolu toime on selgelt tunda, kuid tavaliselt ei põhjusta see mingeid ohtlikke füsioloogilisi nähtusi,
- piirkond **AC-3**, milles vool tavaliselt ei põhjusta organismi kahjustusi, võib aga esile kutsuda lihaste krampi, hingamisraskusi ja südametegevuse rütmihäireid, kuid veel mitte südamevatsakeste virvendust,
- piirkond **AC-4**, milles vool võib põhjustada südamevatsakeste virvendust ning selle tagajärjel vereringe peatumist.

Eluohtlik piirkond AC-4 jagatakse kolmeks alapiirkonnaks:

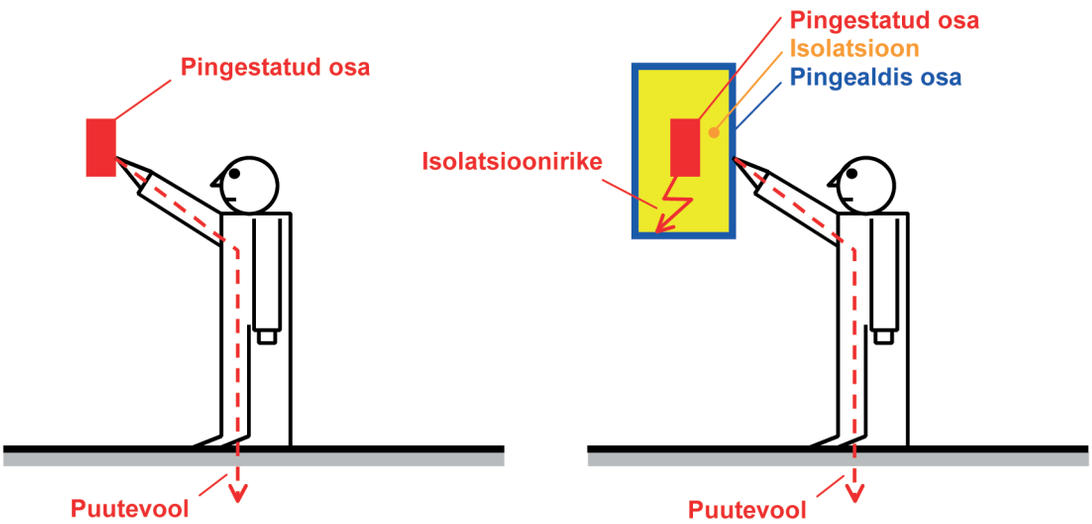
- piirkond **AC-4-1**, milles südamevatsakeste virvenduse tekke tõenäosus on suhteliselt väike ega ületa tavaliselt 5 %,



Joonis 6.7.1. Elektrokardiogramm, südamekodade ja -vatsakeste talitlus, vererõhk ja vatsakeste virvenduse tekke tõenäosus südant läbiva elektrivoolu korral (kõik tugevasti lihtsustatult). *t* aeg, *T* südametegevuse periood



Joonis 6.7.2. Võrgusageduslikku (sagedusega 50 või 60 Hz) vahelduvvoolu toime täiskasvanud inimesele. *I* inimkeha läbiva voolu efektiivväärtus, *t* voolu kestus. *AC-1, AC-2, AC-3, AC-4-1, AC-4-2* ja *AC-4-3* voolu toime piirkonnad, *a, b,* c_1, c_2 ja c_3 piirkondadevahelised läviköverad



Joonis 6.7.3. Otsepuutel (vasakul) ja kaudpuutel (paremal) tekkiv elektrilöök (näited)

- piirkond **AC-4-2**, milles südamevatsakeste virvenduse tekke tõenäosus on suurem kui 5 %, kuid mitte üle 50 %,
- piirkond **AC-4-3**, milles südamevatsakeste virvenduse tekke tõenäosus on suurem kui 50 %.

Lühend *AC* tuleb ingliskeelsest terminist *alternating current* ('vahelduvvool').

Madalpingepaigaldistes nimipingega 230/400 V võib inimene sattuda halvimal juhul faasidevahelise pinge alla, mille efektiivväärtus on 400 V. Kuna inimese keha takistus on tavaliselt 0,5…2 kΩ, võib läbi keha kulgeda vool 0,2…0,8 A, mis on selgelt eluohtlik.

Inimene võib pinge alla sattuda kahel viisil:

- puudutades elektriseadme osa, mis normaaltalitlusel on pingestatud (***otsepuute*** teel nagu joonisel **6.7.3** vasakul),
- puudutades elektriseadme või muu seadme osa, mis on sattunud pinge alla isolatsioonirikke tõttu (***kaudpuute*** teel nagu joonisel **6.7.3** paremal); elektriseadme juhtivaid osi, mis isolatsioonirikke korral pinge alla võivad sattuda, nmetatakse ***pingealdisteks*** osadeks.

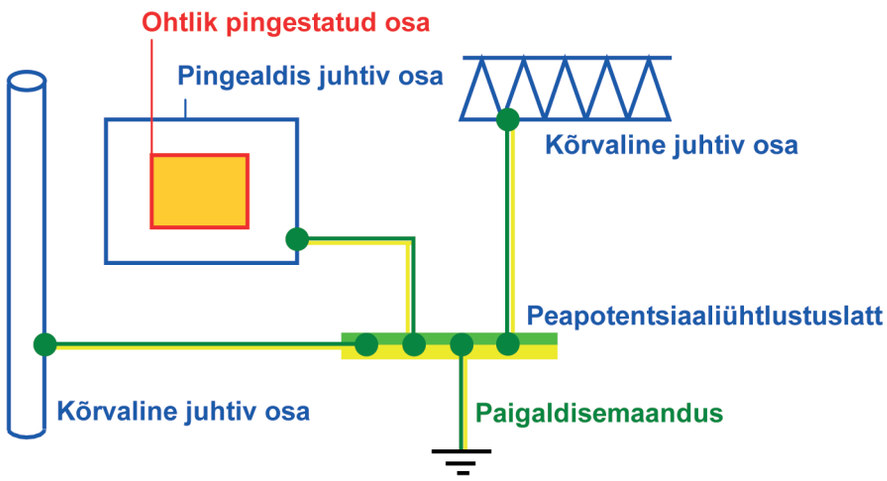
Kaitset otsepuute eest nimetatakse ***põhikaitseks*** ja seda saab realiseerida järgmiste kaitsevõtetega:

- **põhiisolatsioon** (isolatsioon, mida ei saa kõrvaldada muidu kui purustamise teel);
- kõrgemat ohutustaset tagav **lisaisolatsioon** (nt topelt- või tugevdatud isolatsioon); seda isolatsiooni nimetatakse ka *kaitseisolatsiooniks*;
- **kaitseväikepinge**, mille korral läbi inimkeha ei saa tekkida eluohtlikku voolu; selle pinge enimalt lubatav väärtus nii juhtide vahel kui ka maa suhtes on vahelduvvoolluahelates 50 V, alalisvooluahelates aga 120 V;
- puudutamist takistavad **kaitsekatted** ja -**ümbrised**;
- lähenemist takistavad **kaitsetõkked**;
- **mittejuhtiva ümbruse** loomine (isoleerpõrandate ja -seinte vms näol);
- elektriseadme paigutamine **väljapoole puutekööndivust**;
- pingealustel töödel – **isoleertööriistade ja -kaitsevahendite** kasutamine.

Kaitset kaudpuute korral (***rikkekaitset***) saab realiseerida

- pingealdiste osade maandamisega kaitsejuhtide kaudu (**kaitsemaandamisega**),
- seadme kiire **automaatse väljalülitamisega** pingealdiste osade pinge alla sattumisel,
- pingealdiste ja kõrvaliste juhtivate osade **potentsiaalide ühtlustamisega** potentsiaaliühtlustusjuhtide abil,
- **elektrilise eraldusega** nt spetsiaalsete eraldustrafode abil,
- samaaegselt põhikaitsega nt kaitseisolatsiooni, kaitseväikepinge, kaitsekatete jms abil.

Nimetatud kaitsevõtteid võib kasutada ka mitmel viisil kombineeritult [6.6]. Igal juhul peavad aga kõigis elektripaigaldistes olema kasutusel **mõlemad kaitseviisid**, nii põhi- kui ka rikkekaitse. Eriti ohtlikes oludes (märja ümbruse, välisolude jms



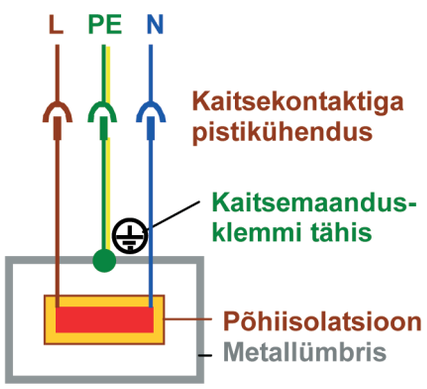
Joonis 6.7.4. Potentsiaaliühtlustuse põhimõte ehitise elektrisisendis

korral) tuleb aga ette näha veel ***lisakaitse***, mida madalpingepaigaldistes realiseeritakse **rikkevoolukaitselülititega**. Sellised kaitselülitid rakenduvad siis, kui rikkel, mis võib olla tingitud inimese sattumisest pinge alla otse- või kaudpuute teel, tekib vool 30 mA või enam. Joonise **6.7.2** järgi võib sellest suurema voolu kestval toimel tekkida südamevatsakeste virvenduse oht. Peale selle nõutakse, et see lüliti rakenduks hiljemalt 30 ms jooksul, mis hoiab ära ohtliku kestusega vooluimpulsi tekke voolu korral kuni umbes 0,4 A (selline vool võib aga tekkida, nagu eelpool näidatud, otsepuutel pinge 400 V korral inimkeha takistuse 1 kΩ juures).

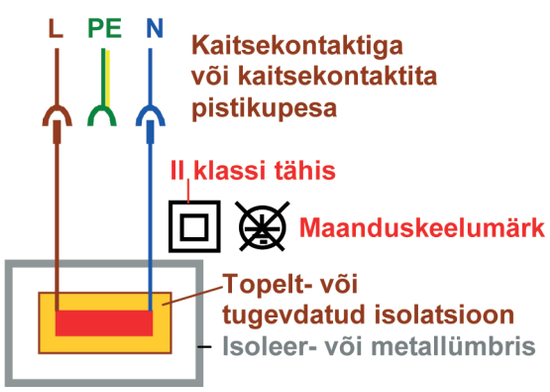
Eriti tähtsaks loetakse **potentsiaaliühtlustust** koos paigaldisemaandusega, mis soovitatakse paigutada kinnise kontuurina (järgides ehitise perimeetrit) ehitise vundamenti (*vundamendimaandusena*). Potentsiaaliühtlustuse (joonis **6.7.4**) kasutamisel on kõigi puutevõimalike juhtivate osade potentsiaal ühesugune ja puutepinge on kaudpuute korral järelikult ligikaudu null.

Kõigi madalpingeliste elektritarvitite ehituses, nagu juba öeldud, peab olema ette nähtud nii põhikui ka rikkekaitse, vajaduse korral rakendatakse aga ka lisakaitset. Põhi- ja rikkekaitseviiside järgi jagatakse nad kolme kaitseklassi:

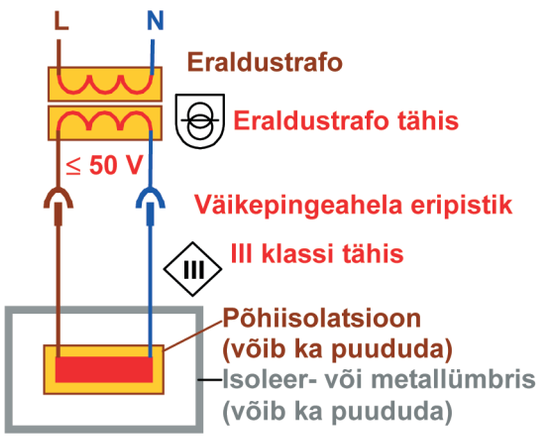
- I klass, mille põhikaitse on tagatud põhiisolatsiooniga, rikkekaitse aga maandatud kaitsejuhi külgeühendamisega (joonis **6.7.5**);
- II klass, milles nii põhi kui ka rikkekaitse on tagatud topelt- või tugevdatud isolatsiooniga (joonis **6.7.6**);



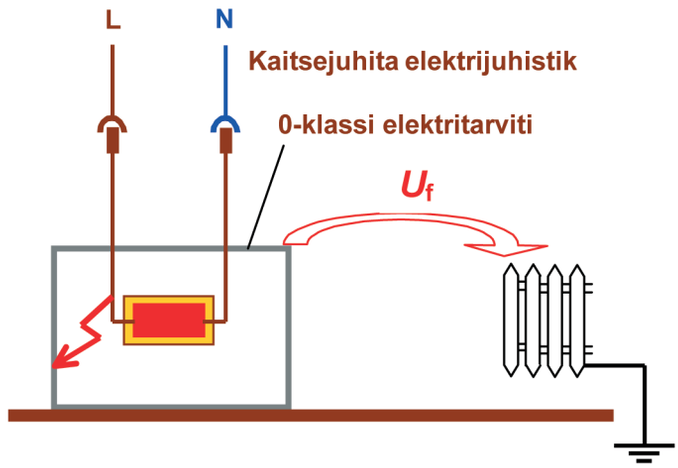
Joonis 6.7.5. Pistikupesast toidetava I klassi elektritarviti ühendusskeem



Joonis 6.7.6. Pistikupesast toidetava II klassi elektritarviti ühendusskeem



Joonis 6.7.7. Pistikupesast toidetava III klassi elektritarviti ühendusskeem



Joonis 6.7.8. Kestva kaudpuuteohu tekkimine 0-klassi elektritarviti isolatsioonirikke korral. U_f faasipingega võrduv puutepinge

- III klass, milles nii põhi- kui ka rikkekaitse on tagatud kaitseväikepinge kasutamisega (joonis **6.7.7**).

NSV Liidus kehtinud standardid ja eeskirjad lubasid kasutada ka *0-klassi* elektritarviteid, milles oli, nagu I klassi tarvititel, olemas põhiisolatsioon, kuid mille metallümbrise ühendamine kaitsejuhiga ei olnud ette nähtud. Eeldati, et rikkekaitsena saab kasutada elektritarviti paigutamist *mittejuhtivasse ümbrusesse*. Vastavalt sellele ei nähtud elamute, ärihoonete, koolide ega muude taoliste ehitiste elektrijuhistikes ette kaitsejuhti. Kuna neis hoonetes tegelikult mittejuhtivat ümbrust ei olnud (ümbrus loetakse juhtivaks, kui selles on vee- või kanalisatsioonitorusid, valamuid, keskkütte küttekehi ja maaga ühendatud metall- ja betoontarindeid), jäi rikkekaitse rakendamata ja iga isolatsioonirike võis tekitada eluohtliku olukorra. Joonisel **6.7.8** on kujutatud üks sellistest, rahvusvaheliste standardite järgi lubamatutest olukordadest.

0-klassi elektritarviteid enam müügil ei ole, kuid kui hoone elektrijuhistikus ei ole kaitsejuhti, muutub ka I klassi tarviti 0-klassi tarvitiks. Seetõttu on Eestis praegu käimas olemasolevate hoonete elektrijuhistike rekonstrueerimine, mis seisneb üleminekus TN-S-juhistikele (vt jaotis **3.5**) ja ühtlasi ebatöökindlate alumiiniumjuhtmete asendamises vaskjuhtmetega.

NSV Liidud toodeti ka elektritarviteid, millel ei olnud isegi põhikaitset (põhiisolatsiooni), nagu näiteks lahtise küttekeermikuga elektripliite ja lahtise ehitusega hõõgkiirgureid.

Elektriohutusnõuded on rangelt sätestatud **elektriohutusseaduses** ja elektripaigaldiste ehitust ja käitu käsitlevates rahvusvahelistes standardites, millega kõik elektrikud elektriohutuskoolitustel põhjalikult tutvuvad.

Eestis korraldab standardimist Eesti Standardikeskus, mis on alates 1. jaanuarist 2004 Euroopa Standardimiskomitee (*Comité Européen de Normalisation, CEN*) ja Euroopa Elektrotehnilise Standardimise Komitee (*Comité Européen de Normalisation Électrotechnique, CENELEC*) täisliige. Vastavalt nende organisatsioonide sisekorrale tuleb Eestis üle võtta kõik Euroopa standardid, sealhulgas loomulikult ka need, milles sätestatakse üksikasjalised nõuded elektriohutusele. Standardeid rakendatakse kõigis uutes ja renoveeritavates elektripaigaldistes.

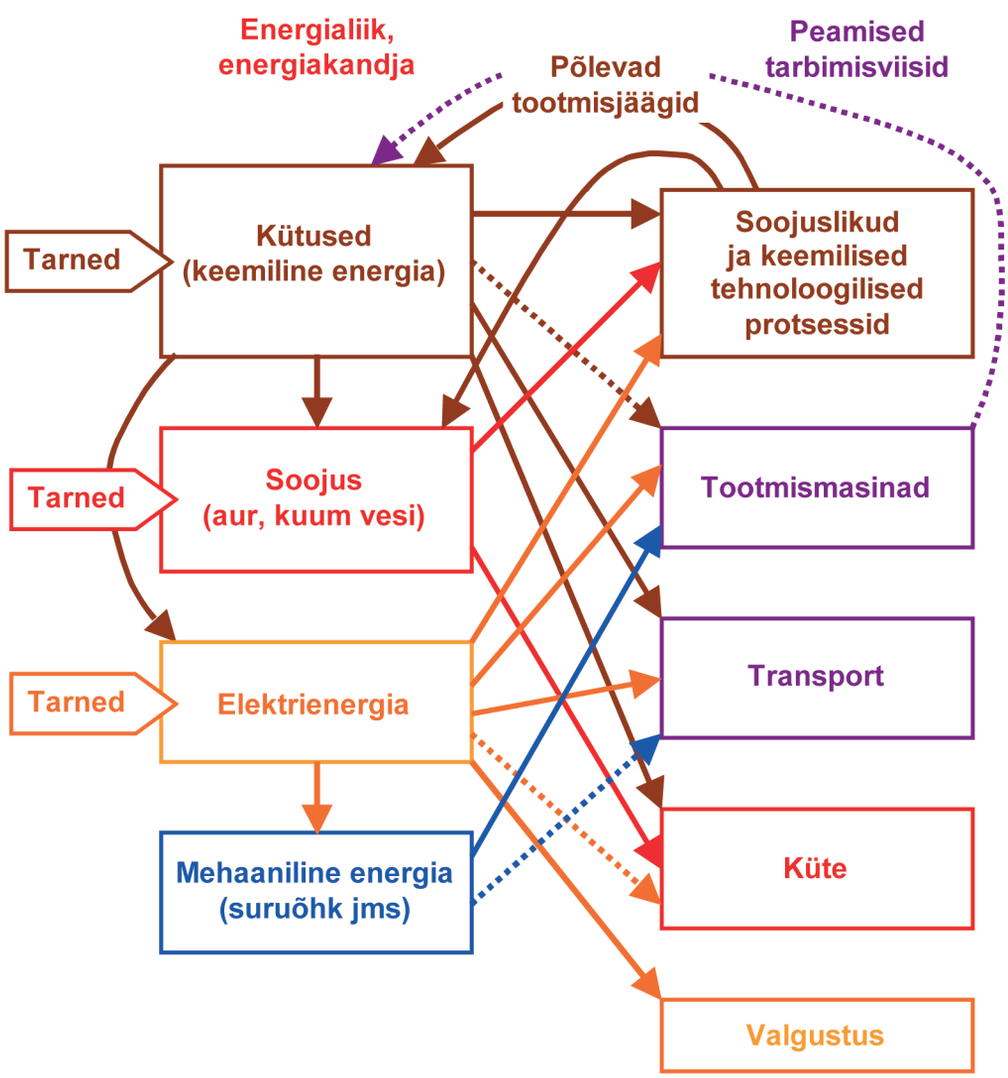
8.8 ENERGIA TARBIMISE STRUKTUUR ERI RAHVAMAJANDUSHARUDES

Käesolevas jaotises vaadeldakse lühidalt energia tarbimise struktuuri ja omapärasusi

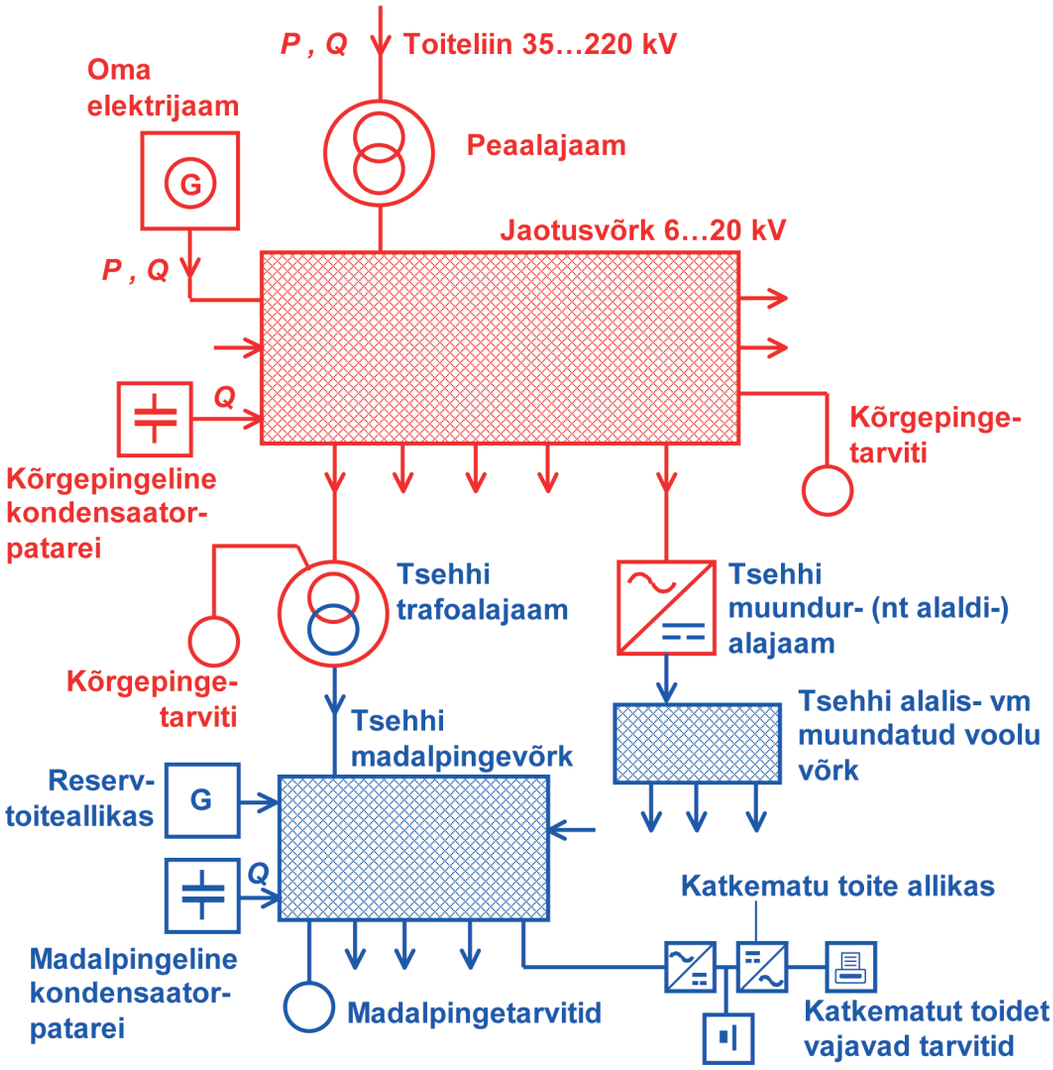
- tööstuses,
- põllumajanduses,
- transpordis,
- elamumajanduses.

Tööstusettevõtted ostavad vajalikke kütuseid, soojust ja elektrienergiat enamasti väljast, kuid neil võivad olla ka oma küttekatlamajad, elektrijaamad (enamasti koostootejaamad) ja muud energiamuundamisseadmed ja -paigaldised. Mõnedes ettevõtetes saab kütustena kasutada ka põlevaid tootmisjääke (koksigaasi, puidujäätmeid jms). Tugevasti lihtsustatult on ettevõttes tarbitavad energialiigid ja tarbimisviisid ühe võimaliku näitena esitatud joonisel **6.8.1**.

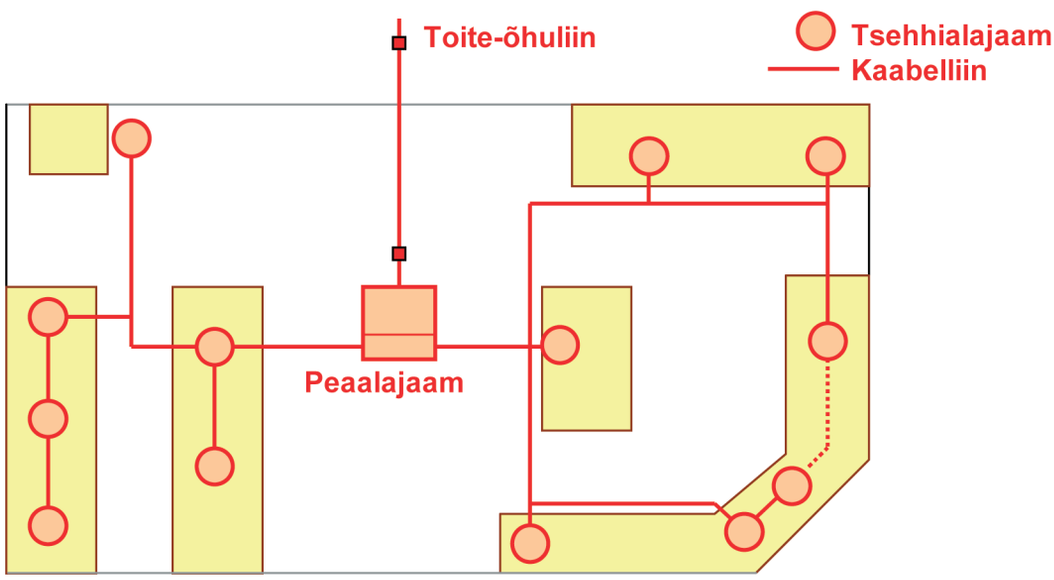
Eriti olulisel kohal on tööstusettevõttes **elektrienergia** tarbimine. See toimub ettevõtte elektrivarustussüsteemi kaudu, mille põhimõtteline struktuur on kujutatud joonisel **6.8.2**. Tavaliselt saab ettevõte põhilise osa elektrienergiast ostu teel mingist elektrivarustusettevõttest, nt energiasüsteemi jaotusvõrgust. Suurtes ettevõtetes võetakse sel teel saadav elektrienergia pingel 35…220 kV vastu ettevõtte peaalajaamas, kus see transformeeritakse jaotuspingele 6…20 kV. Transformeerimine madalpingele toimub tsehhialajaamades, mida suurtes ettevõtetes võib olla kuni mõnikümmend.



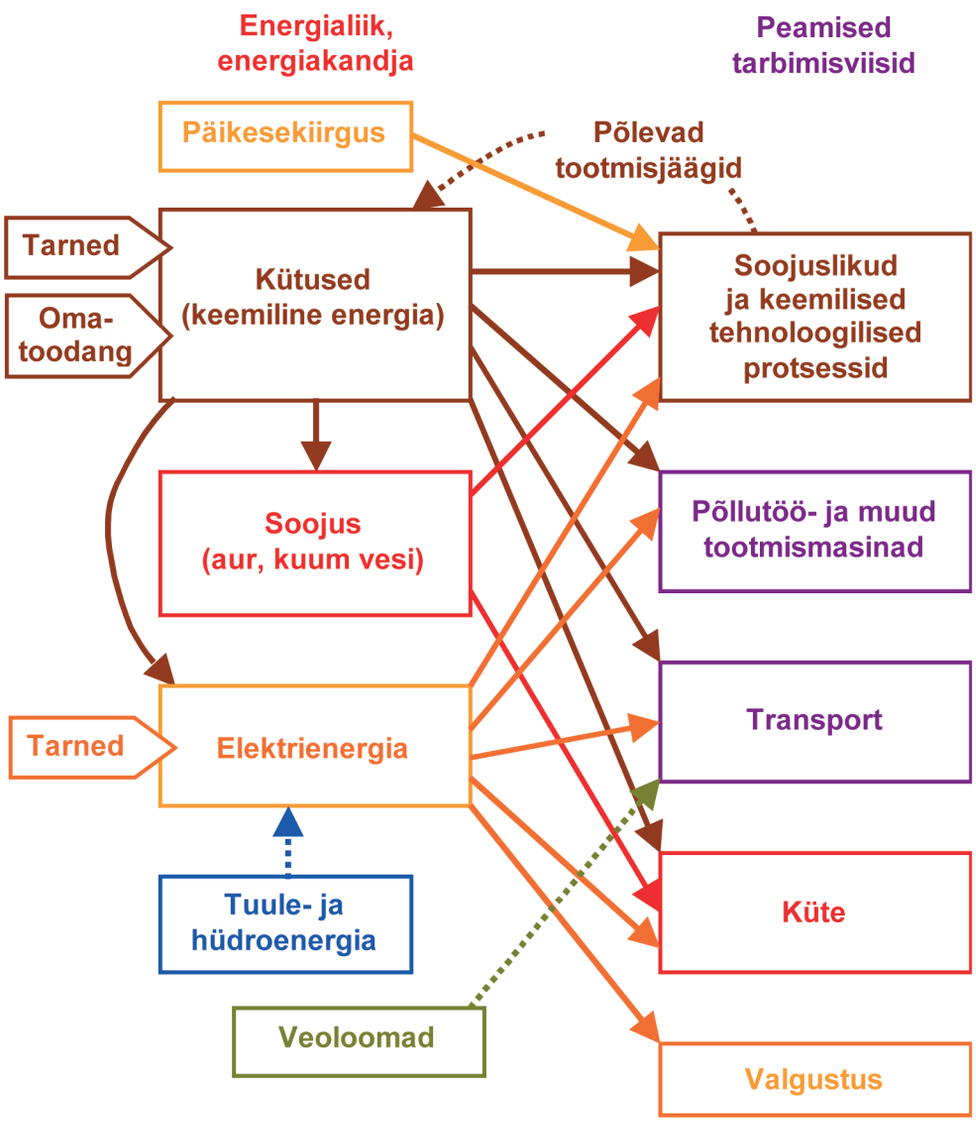
Joonis 6.8.1. Energia tarbimine tööstusettevõttes (näide)



Joonis 6.8.2. Suurettevõtte elektrivarustussüsteemi struktuur (näide)



Joonis 6.8.3. Suurettevõtte kõrgepinge-jaotusvõrgu plaan (näide).
Ühes kaabelliinis võib olla mitu kaablit ja ühes tsehhialajaamas üks või kaks trafot



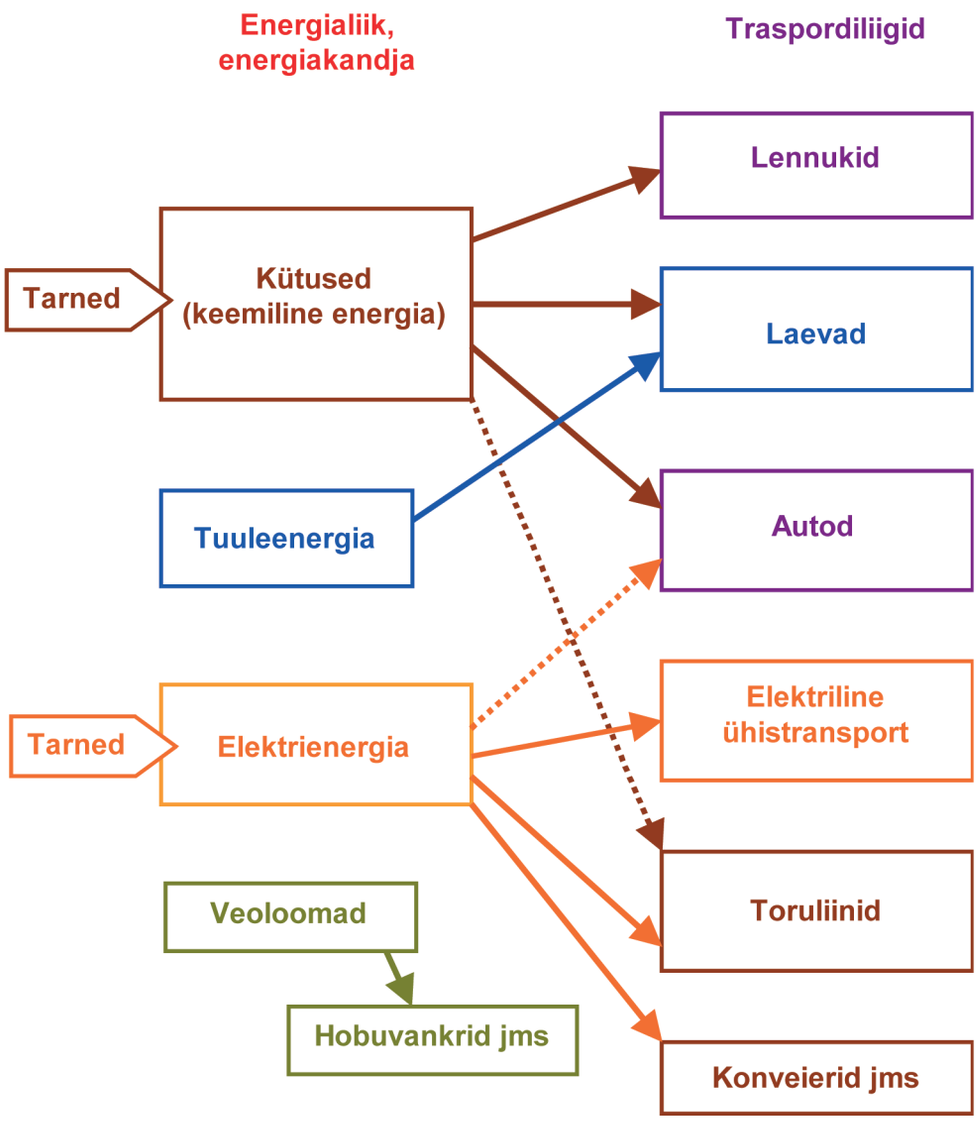
Joonis 6.8.4. Energia tarbimine põllumajandusettevõttes (näide)

Kõrgepingetarvitid (nt elektrimootorid võimsusega mõni megavatt) saavad toidet enamasti tsehhialajaamade ülempingepoolelt. Ettevõttel võib olla ka oma pidevalt talitlev või varutoiteallikana ettenähtav elektrijaam, tsehhide madalpingevõrkudes võidakse aga kasutada varutoiteagregaate ja eriti vastutusrikaste tarvitite (nt arvutitel põhinevate juhtimissüsteemide) katkestusvaba toidet tagavaid akumulaatortoiteallikaid, mida ingliskeelse lühendi järgi on hakatud nimetama *upsideks* (*Uninterrupted Power Supply, UPS*). Kuna vahelduvvoolutarvitid vajavad mitte üksnes aktiiv- vaid ka reaktiivenergiat, nähakse nii tsehhivõrkudes kui ka ettevõtte jaotusvõrgus reaktiivenergiaallikaina ette automaatselt reguleeritavad kondensaatorpatareid.

Ettevõtte peaalajaam ja tsehhialajaamad püütakse paigutada selliselt, et neist toidetavad võrgud koosneksid võimalikult lühikestest liinidest. Üks võimalikest alajaamade paigutamise ja jaotusvõrgu kujundamise näidetest on esitatud joonisel **6.8.3**.

Põllumajandusettevõtte energiatarbimise struktuur sarnaneb tööstusettevõtte omale, kuid sellel on ka mõningaid olulisi erinevusi. Tuleb kõne alla näiteks küttepuidu varumine omast metsast, tuule-, päikese- ja hüdroenergia kasutamine. Välistatud ei ole ka veoloomade rakendamine. Üks võimalikest näidetest on esitatud joonisel **6.8.4**.

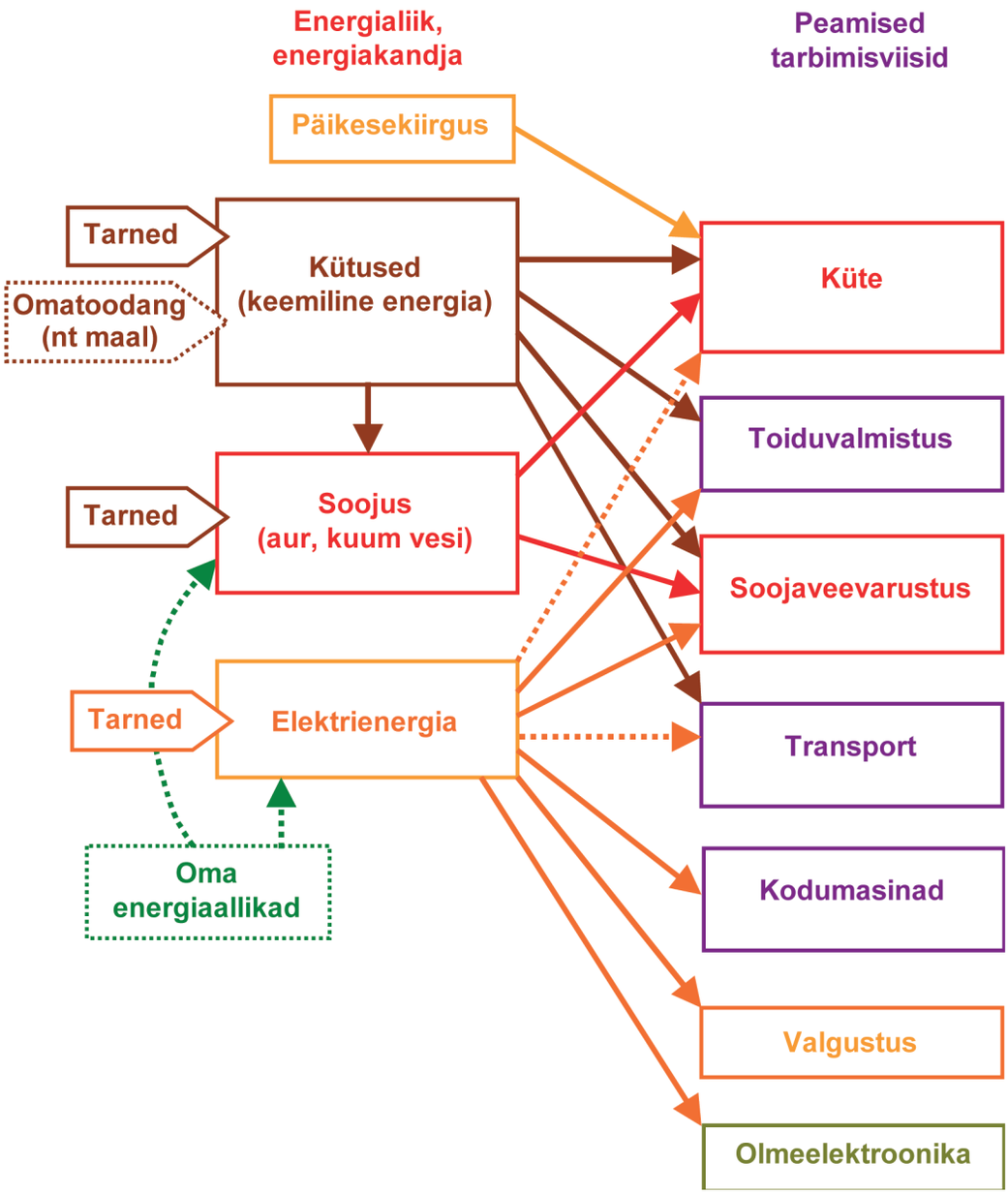
Transpordis kasutatakse peaasjalikult mitmesuguseid katla- ja mootorikütuseid ja väiksemal määral elektrienergiat, kuid ei ole välistatud ka



Joonis 6.8.5. Energia tarbimisviise transpordis

tuule- ja päikeseenergia ja veoloomade rakendamine. Laeva-, raudtee- ja autotranspordis võidakse mehaaniliste jõumasinate energia muundada elektrieneergiaks, mida on veoajamites lihtsam jaotada ja reguleerida. Lihtsustatult on energia kasutamise viisid transpordis esitatud joonisel **6.8.5**.

Elamumajanduses olenevad energia tarbimisviisid sellest, kas on tegemist korter- või ühepere-elamuga ja kas elamu asub linnas või maal. Väga lihtsustatult on energiatarbimise struktuur elamumajanduses esitatud joonisel **6.8.6**. Ligikaudu samasugune võib energiatarbimise struktuur olla ka teenindusettevõtetes, koolides ja muudes taolistes asutustes.



Joonis 6.8.6. Energia tarbimine elamumajanduses (näide)

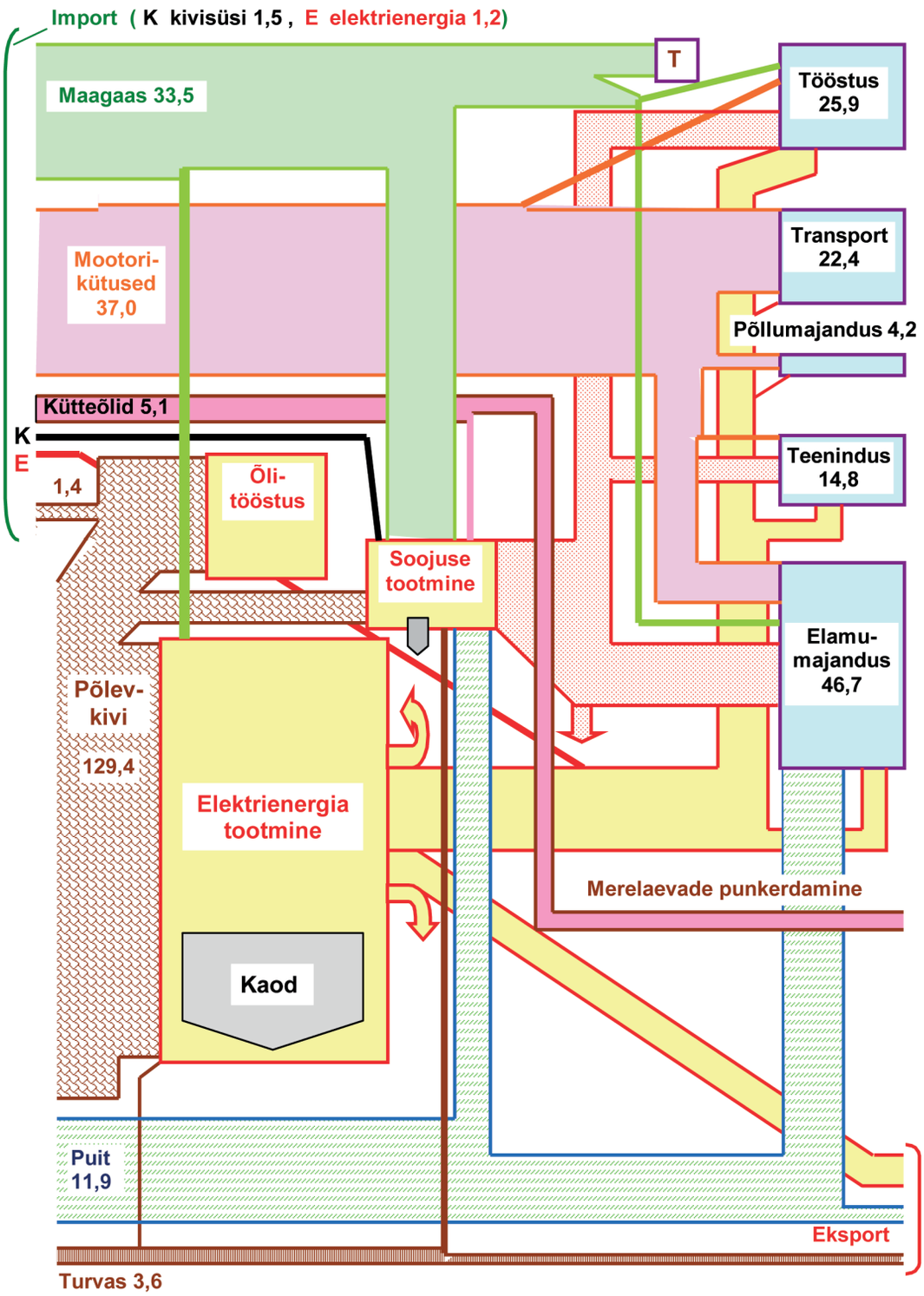
6.9 RAHVAMAJANDUSE ENERGIA- JA ELEKTRIBILANSS

Et saada ülevaadet kasutatavatest energialiikidest, energia muundamisest ja kasutamisest rahvamajanduses tervikuna, koostavad kõik riigid igal aastal **energiabilansse**. Selliseid bilansse võib koostada väga erisuguse üksikasjalikkusega ja esitada tabelite või joonistena. Bilansis näidatakse energia import ja eksport, energia tootmine omal maal, energia tarbimine rahvamajandusharude või ettevõtteliikide kaupa, energiakaod jms.

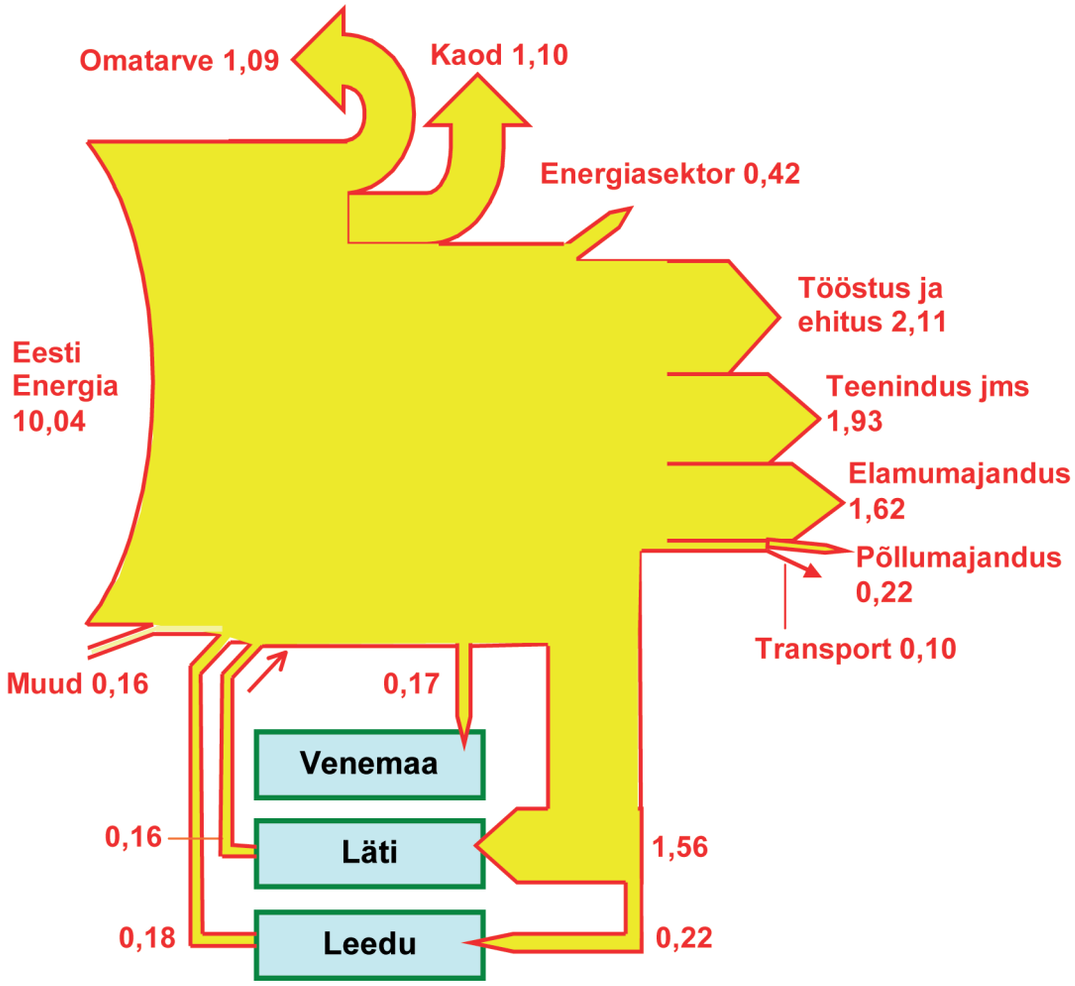
Samal eesmärgil ja samal viisil koostavad energiabilansse ka tööstus- ja muud ettevõtted.

Joonisel **6.9.1** on näitena kujutatud Eesti energiabilanss aastal 2005 [6.7].

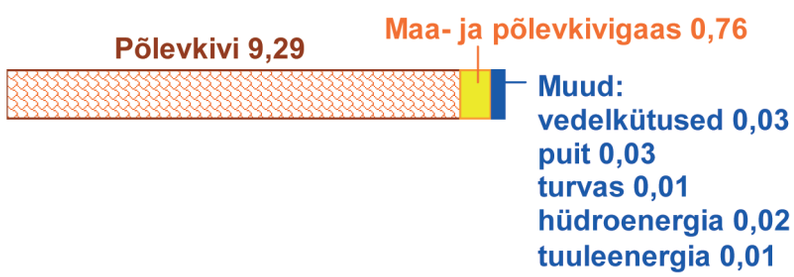
Eesti **elektribilanss** aastal 2005 on esitatud joonisel **6.9.2**. Elektrienergia toodang primaarenergialiikide järgi on kujutatud joonisel **6.9.3**.



Joonis 6.9.1. Eesti energiabilanss petadžaulides (PJ) aastal 2005 (tugevasti lihtsustatult). Väheolulisi energialiike (hüdro- ja tuuleenergiat jms) ei ole joonisel kujutatud



Joonis 6.9.2. Eesti elektribilanss aastal 2005 (TWh)



Joonis 6.9.3. Elektrienergia tootmiseks kasutatavate primaarenergiaallikate jaotus Eestis aastal 2005 (TWh)

7

Energia-seadmete toime keskkonnale

7.1 Üldmõisted 212

7.2 Kasvuhoonenähtus 214

7.3 Maa osoonikihi hõrenemine 222

7.4 Keskkonna saastamine heitainetega 225

7.5 Soojuslik toime keskkonnale 230

7.6 Toime maakasutusele ja maastikule 230

7.7 Elektromagnetväljad 232

7.8 Müra ja valgussaaste 235

7 ENERGIASEADMETE TOIME KESKKONNALE

7.1 ÜLDMÕISTED

Inimtegevus hakkas mõjutama ja muutma elukeskkonda ligikaudu 10 000 aastat tagasi, mil tekkis põlluharimine ja rohulagendike ja metsade asemele tuli hakata rajama põldusid. *Alepõletamist* põldude loomiseks kasutati ka Eestis ligikaudu 2000…2500 aastat eKr. Ligikaudu samal ajal oli Vahemere ääres tekkinud juba aga ka tunduvalt suurem vajadus kütte- ja tarbepuidu järele, mida oli tarvis metallide sulatamiseks ja laevade ehitamiseks. Metsade maharaiumine võttis kohati nii suure ulatuse, et algas kaitseta jäänud pinnase intensiivne erosioon ja metsade asemele tekkisid kõrbealad, mis püsivad seniajani.

Juba Rooma riigis hakkas tekkima uusi tööndusharusid (nt klaasitööstus) ja kaevandusi, mis kõik vajasid puitu. Linnades hakkas õhku järjest rohkem paiskuma kütuse põletamisel tekkivat suitsu, mistõttu juba umbes aastal 150 tuli senatil anda korraldus viia Rooma klaasisulatusahjud linnast välja. Aastal 1273 keelas Inglismaa kuningas Edward I (1239–1307) Londonis surmanuhtluse ähvardusel kivisöe põletamise, kuna see sisaldas väävlit ja tekkiv suits koos sageli linna katva uduga muutis linna õhu mitte üksnes läbipaistmatuks, vaid kahjustas inimeste ja veoloomade tervist ning ehitiste ning sõiduvahendite metallosi. 18. sajandi neljandal veerandil toimunud tööstuslik pööre tõi kaasa aurumasinate võidukäigu ja kivisöe laiaulatusliku tööstusliku põletamise, tööstuses endas hakkas aga tekkima järjest rohkem mürgiseid heitmeid, mis enamasti lasti lihtsalt veekogudesse ja jõgedesse. Keskajal oli Euroopa kaotanud suure osa oma metsadest ja aastaks 1900 oli Euroopas juba kümneid surnud jõgesid.

Veel kiiremini arenes kütuste ja tööstustoorainete kasutamine 20. sajandil. Alates ligikaudu 1960ndaist aastaist on energiavarude hõlvamine ja energia kasutamine hakanud nii tugevasti mõjutama Maa keskkonnaolusid, et see on endaga kaasa toonud **Maa kliima muutumise**. Kui enne seda oli Maa, vaatamata inimtegevusele, enamvähem energeetilises tasakaaluolukorras, mis perioodiliste kõikumistega, kuid üldkokkuvõttes ilma suuremate globaalsete muutusteta on kestnud vähemalt viimased 100 000 aastat, siis nüüd on tekkinud siirdeolukord, mille lõpptagajärgi ei osata geofüüsikaliste siirdenähtuste raske prognoosimise ning väga keerukate omavaheliste sõltuvuste tõttu veel ette näha.

20. sajandi jooksul kasvas maailma rahvaarv peaaegu neljakordseks – 1,6 miljardilt 6,1 miljardini, inimkonna aastane energiatarve ainuüksi *kaubaliste* energialiikide järgi (vt käesoleva kursuse jaotis **1.4**) aga enam kui 16-kordseks – tasemelt 0,8 Gtce/a tasemeni 13 Gtce/a. Kasvanud inimkond vajab peale energia ka toitu, eluaset ja loodusvaradest saadavaid tooteid. Kõige selle tõttu on inimtegevuse negatiivne toime oma elukeskkonnale, Maa kliimale ja loodusele (taime- ja loomariigile) lähenemas teatavale kriitilisele piirile, mille ületamine võib kaasneda katastroofiliste kahjudega. Arvatakse koguni, et see piir on juba saavutatud [7.1].

Negatiivsete muutuste all inimühiskonnas ja looduses peetakse silmas enamasti järgmist:

- kliimamuutusi atmosfääri koosseisu muutumise tagajärjel,
- fossiilkütuste ja muude maavarade ammendumist,
- taastuvate loodusvarade, sealhulgas eriti metsade pindala vähenemist (metsade jätkuvat hoolimatut maharaiumist),
- õhu, vee ja pinnase saastamist gaasiliste, vedelate ja tahkete heitainetega,
- veekogude eutrofeerumist saastamise tagajärjel lämmastikuühenditega,
- loodusmaastike ja nendega seotud taime- ja loomaliikide kiirenevat kadumist,
- loodusvarade (sealhulgas energiavarude) ebavõrdsest jaotusest tingitud poliitilisi pingeid riikide ja regioonide vahel,
- vähem arenenud maade ülerahvastumist, vaesumist, kultuurilist mandumist ja näljahädasid,
- ülemaailmselt suurenevat linnastumist,

- mikroorganismide (bakterite ja viiruste) uute mutatsioonide ja nendest tingitud uute haiguste tekkimist,
- tootmis-, liiklus- ja olmeõnnetuste kasvu,
- kuritegevuse kasvu,
- rahvastiku massiliseks kujuneda ähvardavat migratsiooni vaesematest riikidest rikkamatesse,
- sõjalisteks konfliktideks arenevaid eluruumitülisid.

On tekkinud vajadus Maa elukeskkonda riiklike seaduste ja rahvusvaheliste kokkulepetega kaitsta. Nõudeid vee ja õhu puhtusele hakati Euroopas ulatuslikumalt kehtestama 18. sajandil, esimesed looduskaitseseadused võeti vastu 20. sajandi esimesel poolel (Eestis näiteks aastal 1935). Esimesed rahvusvahelised otsused keskkonnakaitse arendamiseks tehti aastal 1972 Ühinenud Rahvaste Organisatsiooni (ÜRO) inimkeskkonna konverentsil Stockholmis. Aastal 1992 tuli Rio de Janeiros kokku ÜRO Keskkonna- ja Arengukonverents, millest võtsid osa 172 riiki, kusjuures 108 neist olid esindatud riigipeade või valitsusjuhtidega. Konverents võttis vastu maailma jätkusuutlikku arengut kavandava otsuse ***Agenda 21***, mille põhjal nt Eestis aastal 1995 kehtestati ***säästva arengu seadus***. Keskkonnakaitset koordineerib Eestis 1989. aastal loodud Keskkonnaministeerium. 4. mail 2001 kinnitas Euroopa Komisjon programmi *Puhas Õhk Euroopale* (*Clean Air for Europe, CAFE*), milles nähakse ette õhu puhtuse kontrolli meetmed ja saasteainete piiramise üleeuroopaliste normatiivide väljatöötamine.

Detsembris 1997, ÜRO järjekordsel kliimakonverentsil Kyotos lepiti kokku konkreetsetes meetmetes Maa kliima soojenemise aeglustamiseks. Kyoto protokoll [7.2] jõustus pärast ratifitseerimist enamiku riikide poolt veebruaris 2005. Lähemalt vaadeldakse selle konverentsi otsuseid ja nende põhjal ettenähtavat edasist arengut jaotises **7.2**.

Kuna kõige rohkem ohustavad Maa elukeskkonda need muutused, mis nüüdisajal toimuvad Maa kliimas, asutasid ÜRO Meteoroloogiaorganisatsioon (*World Meteorological Organization, WMO*) ja ÜRO Keskkonnaprogramm (*United Nations Environment Programme, UNEP*) aastal 1988 **Riikidevahelise Kliimamuutuste Komisjoni** (*Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC*), mille peaülesanne on uurida inimtegevusest põhjustatud kliimamuutuste riske, koostada prognoose 21. sajandi kohta ning välja töötada meetmeid kliimamuutuste aeglustamiseks või peatamiseks. 2006. aastal osalesid selle organisatsiooni tegevuses üle 2500 teadlase 130 riigist. IPCC on seni koostanud kolm kliimamuutusi hindavat aruannet (*Assessment Report*), mis ilmusid aastail 1990, 1995 ja 2001. Neljas aruanne peaks valmima 2007. aasta novembris. 2. veebruaril 2007 lõppes Pariisis IPCC töörühma nr 1 (*WGI*) järjekordne, 10. sessioon, millel põhjalikult arutati kliimamuutuste võimalikku arengut 21. sajandil ja nende füüsikalisi põhjusi ning koostati maailma poliitikutele määratud kokkuvõte [7.3].

Järgmiste etappidena võeti 6. aprillil Brüsselis ja 4. mail Bangkokis vastu teiste töörühmade uurimiskokkuvõtted, milles muuhulgas prognoositakse, et kui aastaks 2015 ei õnnestu Maa kliima soojenemist peatada, võivad tagajärjed olla katstroofilised.

Käesolevas peatükis käsitletakse üksnes neid toimeid keskkonnale, mis on tingitud energiatarbimisest ja energiaseadmetes toimuvatest protsessidest. Ühtlasi vaadeldakse võtteid, mida saab kasutada energia kasutamise negatiivsete toimete vähendamiseks.

Esimeseks laia kõlapinda leidnud signaaliks ohtude kohta, mis inimtegevuse tagajärjel on tekkinud elukeskkonnale, tuleb pidada USA merebioloogi Rachel Louise Carsoni (1907–1964) aastal 1962 ilmunud raamatut *Silent spring* [7.4] (eesti keeles *Hääletu kevad*, ilmus aastal 1968), milles kujutati pestitsiidide (eriti aastal 1939 šveitsi biokeemiku Paul Hermann Mülleri poolt sünteesitud ja aastal 1948 Nobeli preemia vääriliseks tunnistatud diklorofenüül-trikloroetaani, DDT) piiramatust kasutamisest tulenevaid raskeid tagajärgi.

Detsembris 1971 alustas Vancouveris (Kanadas) tegevust looduskaitseliikumine *Greenpeace*, mis seadis endale eesmärgiks elukeskkonna (eeskätt maailmamere) kaitsmise tehnogeensete ohtude eest. 2007. aasta alguses oli sellel maailma eri riikides 45 rahvuslikku bürood.

Aastal 1972 asutas rühm teadlasi rahvusvahelise ***Rooma Klubi***, mis andis samal aastal välja suurt tähelepanu äratanud raamatu *The limits to growth ('Kasvu piirid')*. Selles näidati veenvalt, et kõik loodusvarad on lõplikud ja et igasugusel, sealhulgas energiatarbimise kasvul on alati mingi piir. 2007. aasta alguses oli sellel klubil 27 rahvuslikku ühendust, sealhulgas jaanuaris 2001 asutatud *Eesti Rooma Klubi*.

7.2 KASVUHOONENÄHTUS

Kasvuhoonetes ja taimelavades saavutatakse väliskeskkonna suhtes kõrgem, taimedele soodus temperatuur teatavasti klaasi, kilede või muude läbipaistvate materjalide abil, kasutades nende omadust lasta peaaegu takistamatult läbi lühilainelist päikesekiirgust, täielikult neelata ning mõnel määral tagasi peegeldada aga mulla ja taimede pinnalt lähtuvat pikalainelist soojuskiirgust. Klaasi selliseid omadusi kasutatakse ka hoonete passiivses päikeseküttes (vt jaotis **6.2**). Ligikaudu samal viisil toimib aga ka Maa atmosfäär, mis sisaldab Maa pinna pikalainelist soojuskiirgust neelavaid gaase.

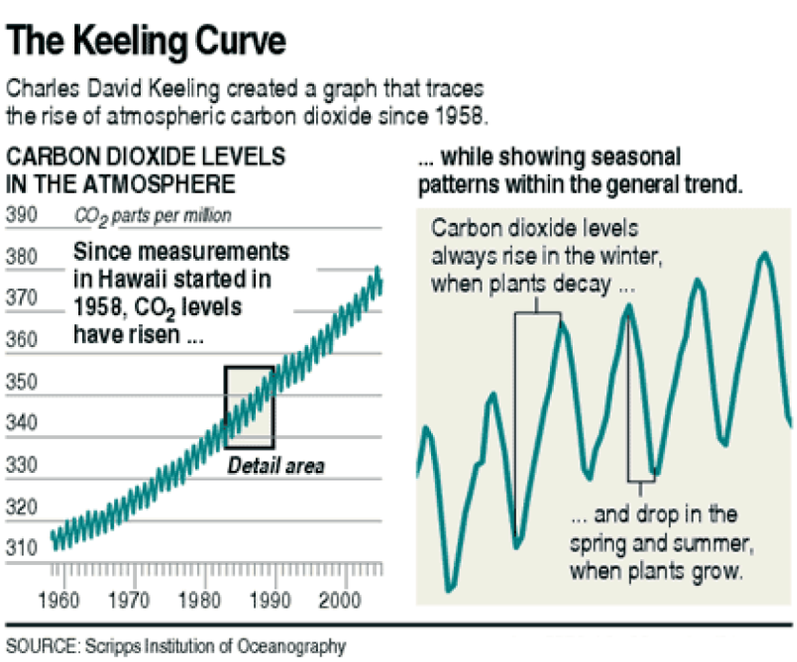
Maa atmosfääris võib läbipaistvuse järgi optilisele kiirgusele eristada kahte liiki aineid:

- üheaatomilised ja kaheaatomilistest molekulidest koosnevad gaasid (väärisgaasid, lämmastik ja hapnik), mis on ühtmoodi läbipaistvad nii lühikui ka pikalainelisele optilisele kiirgusele;
- enama-aatomilistest molekulidest koosnevad gaasid nagu veeaur H_2O, süsinikdioksiid CO_2, metaan CH_4, dilämmastikoksiid N_2O, osoon O_3 ja mõned muud, mis lasevad läbi lühilainelist (nähtavat ja lühemalainelist infrapunast) kiirgust, kuid peavad kinni pikalainelise (10…100 μm) infrapunakiirguse, takistades selle hajumist maailmaruumi.

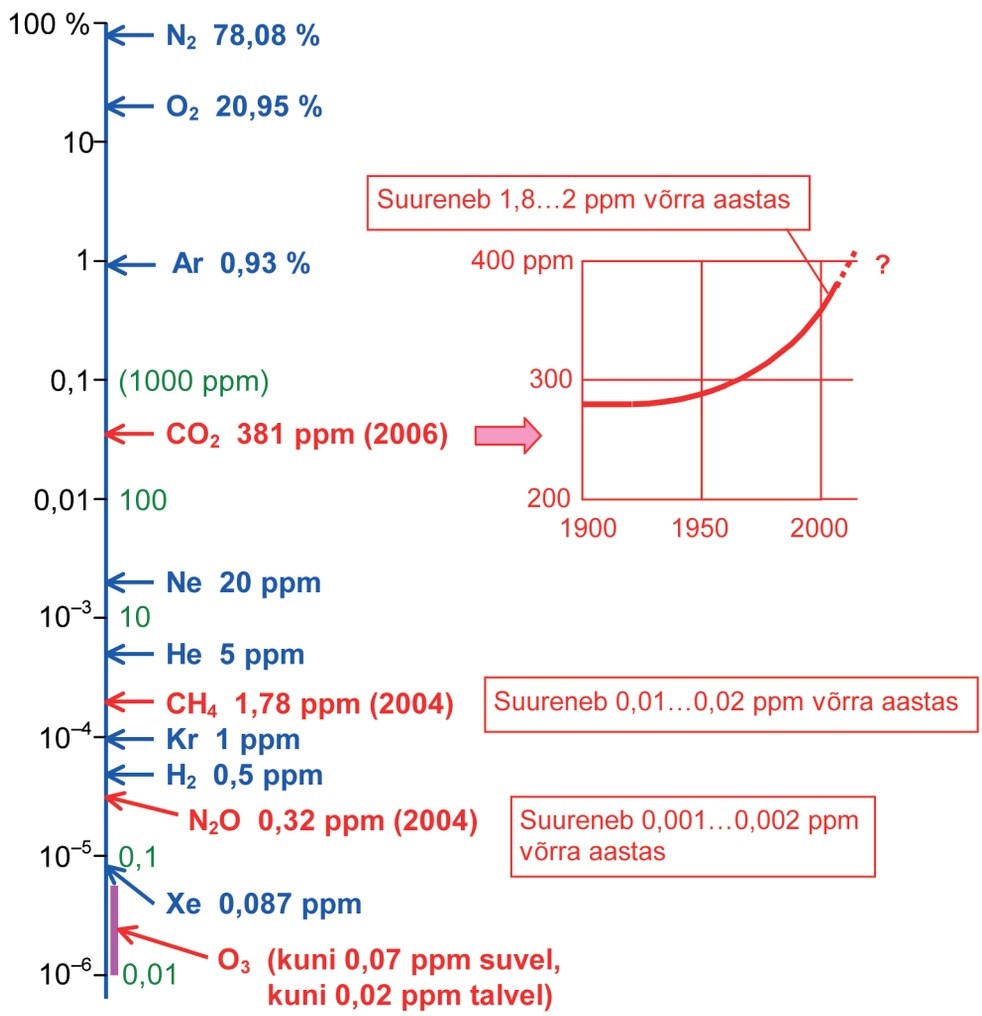
Teisena nimetatud gaasid mõjutavad Maa soojusbilanssi järelikult ligikaudu samasugusel viisil nagu kasvuhooneklaas kasvuhoone oma, mistõttu seda nähtust nimetatakse piltlikult ***kasvuhoonenähtuseks*** ja seda esilekutsuvaid gaase ***kasvuhoonegaasideks***.

Maa atmosfääri võrdlemine kasvuhooneklaasiga ei ole siiski mitte täiesti korrektne, sest kasvuhoone sisemuse soojenemine on rohkem tingitud sellest, et klaas ei lase soojust konvektsiooni teel väliskeskkonda siirduda. Oskussõna *kasvuhoonenähtus* on aga väga piltlik ja seetõttu laialt kasutusel.

Esimesena käsitles atmosfääris sisalduvate gaaside mõju Maa pinnatemperatuurile aastal 1827 ühes oma kirjutises prantsuse matemaatik, soojuse levi matemaatilise teooria alusepanija Jean Baptiste Joseph Fourier (1768–1830), kes, täheldades analoogiat klaasiga, nimetaski selle mõju *kasvuhooneefektiks* (*l'effet de serre*). Põhjalikult uuris Maa pinnatemperatuuri sõltuvust õhu süsinikdioksiidisisaldusest Stockholmi ülikooli füüsikaprofessor Svante Arrhenius (1859–1927), kes oma esimeses sellealases töös aastal 1896 tuli muuseas järeldusele, et *kui õhu CO_2-sisaldus suureneb geomeetriliselt, kasvab Maa pinnatemperatuur aritmeetiliselt*. Kui näiteks CO_2-sisaldus peaks suurenema kahekordseks, kasvaks Maa pinnatemperatuur 4 °C võrra. Nüüdisajal ollakse seisukohal, et temperatuuri tegelik tõus oleks sel juhul tõenäoliselt vahemikus 1,5…4,5 °C, kuid ei saa välistada ka suuremat tõusu.



Joonis 7.2.1. Keelingi kõver (originaalkujul)



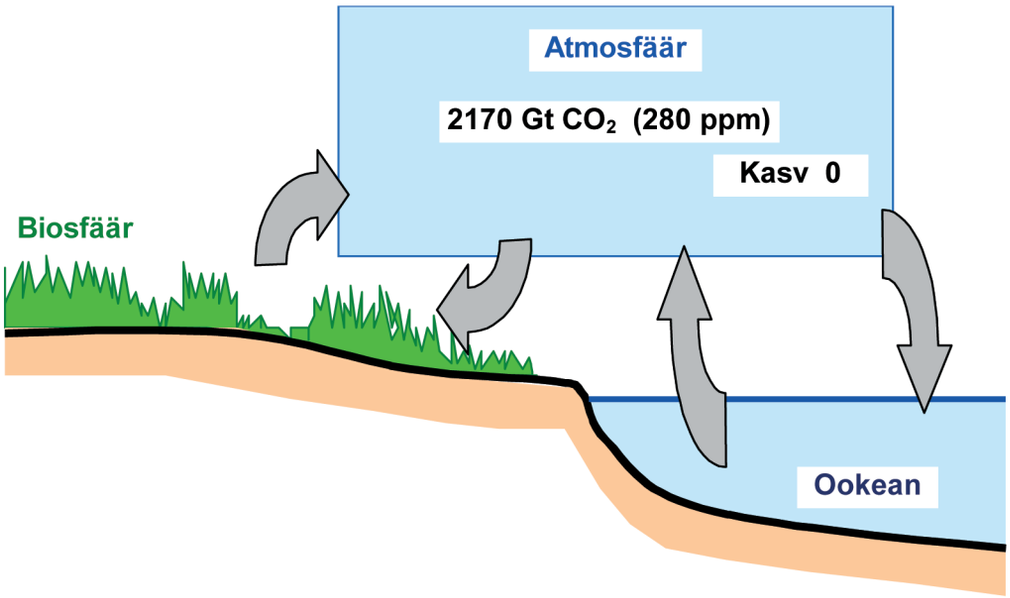
Joonis 7.2.2. Maa atmosfääri kuiva õhu koostis ruumala järgi.
Paremal süsinikdioksiidi suhtelise koguse muutumine aastail 1900 kuni 2006 (Keelingi kõvera järgi, lihtsustatult)

Rahvusvahelisel geofüüsika-aastal 1957/58 alustas USA geokeemik, La Jollas (California) asuva okeanograafiainstituudi *Scripps Institution of Oceanography* teadur Charles David Keeling (1928–2005) Havail, Mauna Loa observatooriumis õhu CO_2-sisalduse süstemaatilisi mõõtmisi, mis kestavad seniajani. Joonisel **7.2.1** on esitatud tema poolt nende mõõtmiste alusel koostatud ajafunktsioon, mis veenvalt näitab õhu CO_2-sisalduse kiiret suurenemist viimase 40 aasta jooksul [7.5]. Joonisel kujutatud graafikut nimetatakse ***Keelingi kõveraks*** ja seda peetakse 20. sajandi kõige tähtsamaks geofüüsikaliste mõõtmiste tulemuseks. Koos inimkonna teaduse, tehnika ja meditsiini teisi suursaavutusi esitavate kujutistega on Keelingi kõver graveeritud Washigtonis asuva USA rahvuslike akadeemiate hoone halli seinale.

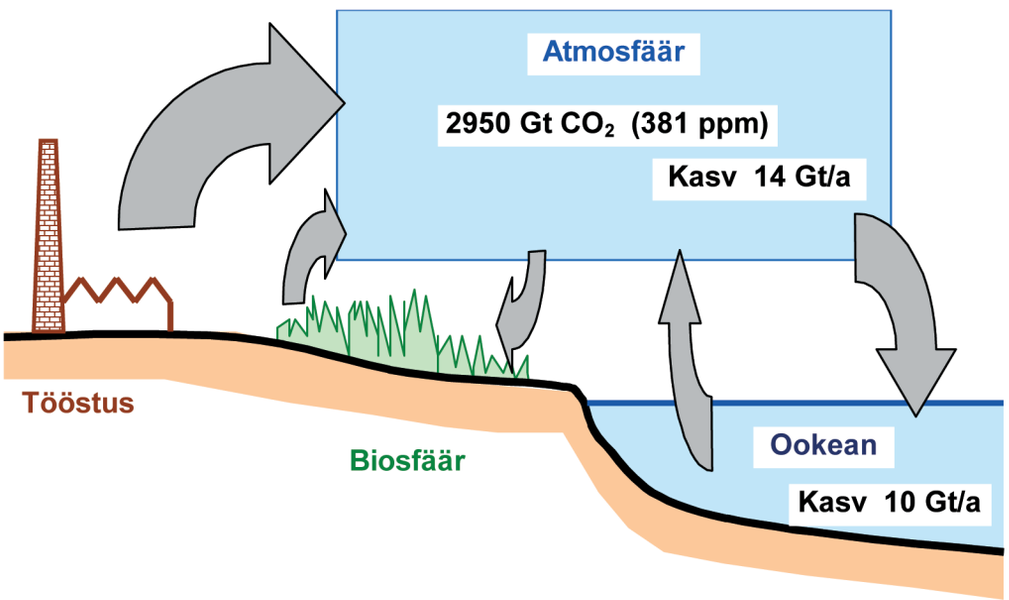
Kõige olulisem kasvuhoonegaas on siiski **veeaur**, mida eraldub Maa ookeanide ja muude veekogude pinnalt $14 \cdot 10^6$ m^3/s ja mille olemasolu õhus (pilvedena ja õhuniiskusena, keskmiselt 4 % õhu massist) on tingitud seega peaasjalikult looduslikest protsessidest ega olene vähemalt seniajani kuigi suurel määral inimeste tahtlikust tegevusest. Veeauru osatähtsus kasvuhoonenähtuse tekitajana on käesoleval ajal ligikaudu 60 %.

Muude gaaside suhteline kogus kuivas õhus on kujutatud joonisel **7.2.2**. Kasvuhoonegaaside hulka kuuluvad neist, nagu eelpool juba nimetatud,

- süsinikdioksiid (CO_2), mille osatähtsus kasvuhoonenähtuse tekkes on praegu ligikaudu 26 % ja mille suhteline kogus Maa atmosfääris, nagu näitab Keelingi kõver, on võrreldes aastatega 1900…1930 suurenenud väärtuselt 280 ppm väärtuseni 381 ppm aastal 2006 (suhtelise suuruse mittesüsteemne, kuid lühiduse huvides siiski päris sageli kasutatav ühik **ppm** tähendab *miljondikku*), kusjuures selline suurenemine on tingitud peaasjalikult fossiilsete, süsinikku sisaldavate kütuste järjest laiemaulatuslikust põletamisest (vt joonised **7.2.3** ja **7.2.4**); süsinikdioksiid tekib aga ka karbonaatmineraalide lagunemisel (näi-



Joonis 7.2.3. Süsinikdioksiidi ringlus looduses eeltööstuslikul ajal



Joonis 7.2.4. Süsinikdioksiidi ringlus looduses tööstuslikul ajal. Arvväärtused vastavad aastale 2006

teks põlevkivi põletamisel) ja nende reageerimisel väävliga (nt SO_2 absorbeerimisel);

- metaan (CH_4) millest ligikaudu 40 % tekib elusloodusest inimestest sõltumatult (nt soogaasina), 60 % aga inimtegevuse tagajärjel (loomakasvatuses, riisiviljeluses, söekaevandustes, maagaasi tootmisel, maagaasi-toruliinide leketel jm);
- dilämmastikoksiid (N_2O, tuntud ka kui *naerugaas*), millest ligikaudu 2/3 tekib looduses inimestest sõltumatult, 1/3 aga inimtegevuse tagajärjel (sisepõlemismootorite heitgaasina, biomassi põletamisel, mõnedes tööstusprotsessides, mõnede fossiilkütuste põletamisel keevkihtkoldes jm),
- maapinnalähedane osoon (O_3), millest ligikaudu pool tekib inimtegevuse tagajärjel (sisepõlemismootorite heitgaasina, mõnedes tööstusprotsessides, õhku paiskunud lämmastikoksiidide reageerimisel hapnikuga jm).

Kolme viimatinimetatud gaasi osatähtsus kasvuhoonenähtuse tekkes on vaatamata nende väikesele kogusele ligikaudu 14 %, sest metaan on 10…60 korda, N_2O ja O_3 aga 200 korda tugevama pikalainelist kiirgust neelava toimega kui süsinikdioksiid.

Kasvuhoonenähtust mõjutab ka vääveldioksiid (SO_2), mida maapiirkondade õhus on ligikaudu 0,02 mg/m³, mereõhus kuni 0,1 mg/m³ ja tööstuspiirkondade õhus tihti kuni 0,5 mg/m³ või enamgi. Arvestada tuleb ka klororfluoroalkaane (*freoone*), mille toime on $10^3 \ldots 10^4$ korda suurem kui süsinikdioksiidil ja mis varem sattusid õhku suurel hulgal aerosoolpakendite täitegaasina, värvilahustitena, riknenud olmekülmikutest jne. Kuna freoonide kasutamine keelustati aastal 1987 (vt jaotis **7.3**), on nende osatähtsus kasvuhoonenähtuses tugevasti vähenenud. Veel tuleb arvestada väävelheksafluoriidi (SF_6), mida kasutatatakse elektrilistes kõrgepingeaparaatides isoleer- ja kaarekustutusgaasina (vt jaotis **5.8**) ja mille toime on 23 900 korda suurem kui süsinikdioksiidil; õhku võib see sattuda ebaõigel käsitsemisel või aparaatide lekke tagajärjel.

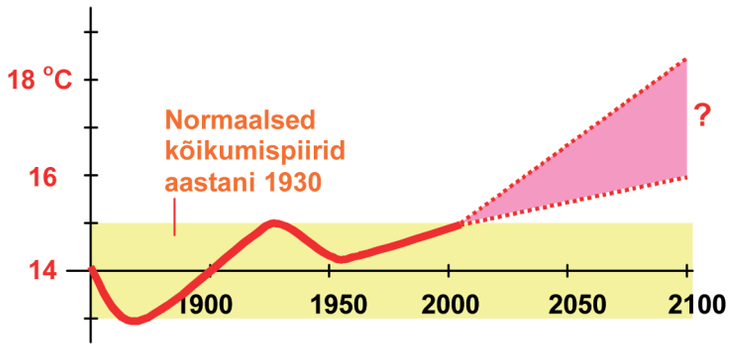
Õhu läbipaistvust nii päikesekiirgusele kui ka pikalainelisele soojuskiirgusele mõjutavad ka tolm, nõgi ja muud õhku sattunud tahked osakesed. Enamasti mõjuvad nad kasvuhoonenähtust nõrgendavalt.

Kasvuhoonegaaside koguse suurenemine õhus toob kaasa, nagu juba eelpool öeldud, kliima soojenemise. Eeltööstuslikul ajal, mil süsinikdioksiidi suhteline kogus õhus oli stabiilselt ligikaudu 280 ppm, kõikus Maa aasta keskmine pinnatemperatuur viimase 2000 aasta jooksul piirides 13 kuni 15 °C. Viimase 50 aasta jooksul on see aga suurenenud ligi 1 K võrra ja aastaks 2100, kui inimkonna energiatarbimises midagi otsustavalt ei muutu, ennustatakse temperatuuri tõusu mitmesuguste arvutuslike stsenaariumide järgi 1,1…6,4 K võrra, kusjuures kõige tõenäolisemaks peetakse tõusu 2…4,5 K [7.3]. Tugevasti lihtsustatult on Maa keskmise pinnatemperatuuri muutumine esitatud joonisel **7.2.5**.

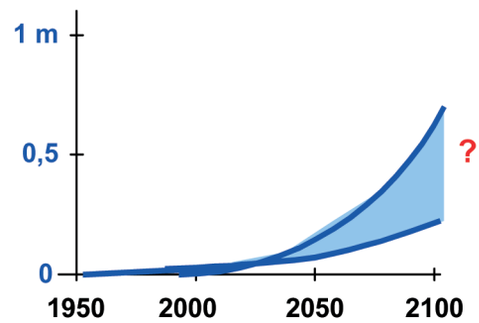
Kliima soojenemist on märgata ka Eestis: aastakeskmise temperatuuri väärtuste kesksirge läbis 1866. aastal 4,5 °C, 2003. aastal aga 5,3 °C.

Maa kliima soojenemine, eriti kui see peaks saavutama 2 K, toob endaga kaasa

- mannerjää sulamise (igal aastal arvatakse seda sulavat umbes 125 Gt) ja ookeanitaseme olulise tõusu,
- jääliustike sulamise,
- õhu intensiivsema tsirkulatsiooni (tormide sagenemise, sademete jaotuse muutumise ja tõenäoliselt mitmesuguseid muid ettenägematuid nähtusi),



Joonis 7.2.5. Maa keskmise pinnatemperatuuri muutumine viimase 150 aasta jooksul ja prognoos aastani 2100 (tugevasti lihtsustatult)



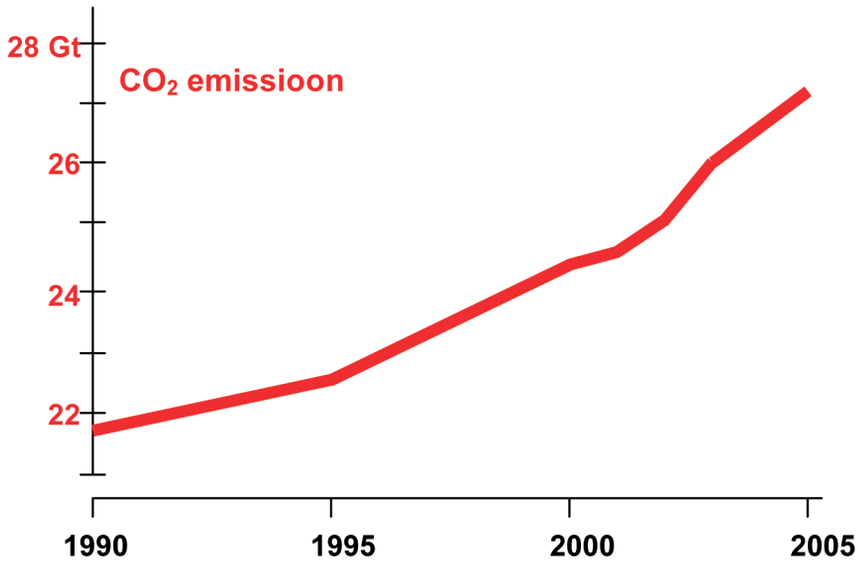
Joonis 7.2.6. Ookeani taseme tõusu miinimum- ja maksimumprognoos aastani 2100

- maailmamere hapendumise, kuna see peab neelama rohkem süsinikdioksiidi kui varem (vt joonis **7.2.4**), see aga muutub veega ühinedes süsihappeks H_2CO_3.

Merepinna tõus ei ole tingitud üksnes kasvuhoonenähtuse tugevnemisest. Nii näiteks tõusis merepind 20. sajandi jooksul, mille esimesel poolel kasvuhoonenähtuse kuigi olulist tugevnemist veel ei täheldatud, 17 cm võrra. 21. sajandiks prognoositakse aga kiiremat tõusu ja aastal 2100 võib merepind olla 2000. aastaga võrreldes eri arvutusstsenaariumide järgi 18…59 cm võrra kõrgem [7.3]. Kõige tõenäolisemaks peetakse merepinna tõusu 30…40 cm võrra (joonis **7.2.6**), mis aga tähendab maailma väga paljude madalate rannikualade üleujutamist, sealhulgas ka Eestis.

Kõige suuremal määral on kliima soojenemine ja muud sellega seotud protsessid, nagu juba öeldud, tingitud **süsinikdioksiidi** suhtelise koguse suurenemisest õhus. Süsinikdioksiid tekib aga süsinikku sisaldavate kütuste põletamisel, reaktsioonil

$$C + O_2 \rightarrow CO_2.$$

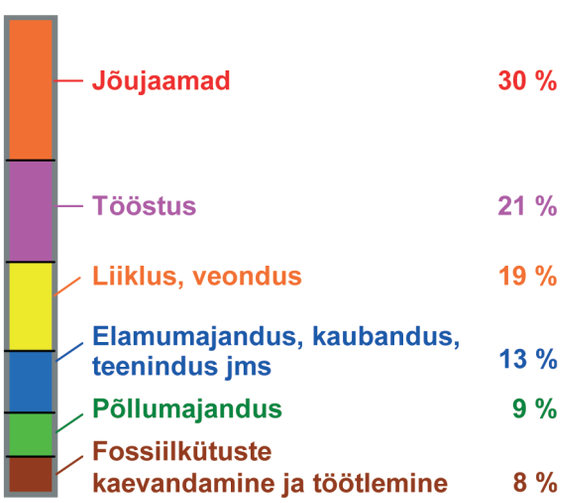


Joonis 7.2.7. Süsinikdioksiidi eraldumine Maa atmosfääri kütuste põletamise tagajärjel aastail 1990…2005

Kuna süsiniku aatommass on 12, hapniku aatommass 16 ja süsinikdioksiidi moolmass seega 44, saab arvutada, et 1 kg süsiniku kohta tekib 3,67 kg süsinikdioksiidi. Metaani (moolmass 16) põlemisel reaktsiooni järgi

$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 4H_2O.$$

tekib süsinikdioksiidi 1 kg metaani kohta vastavalt 2,75 kg. Ligilähedaselt samasugune kogus süsinikdioksiidi tekib ka 1 kg nafta või naftasaaduste põlemisel. Jõujaamades, tööstuses, elamumajanduses, liikluses ja mujal kasutatavate kütuste põlemisel paiskub käesoleval ajal Maa atmosfääri ligikaudu 27 Gt süsinikdioksiidi aastas (joonis **7.2.7**).

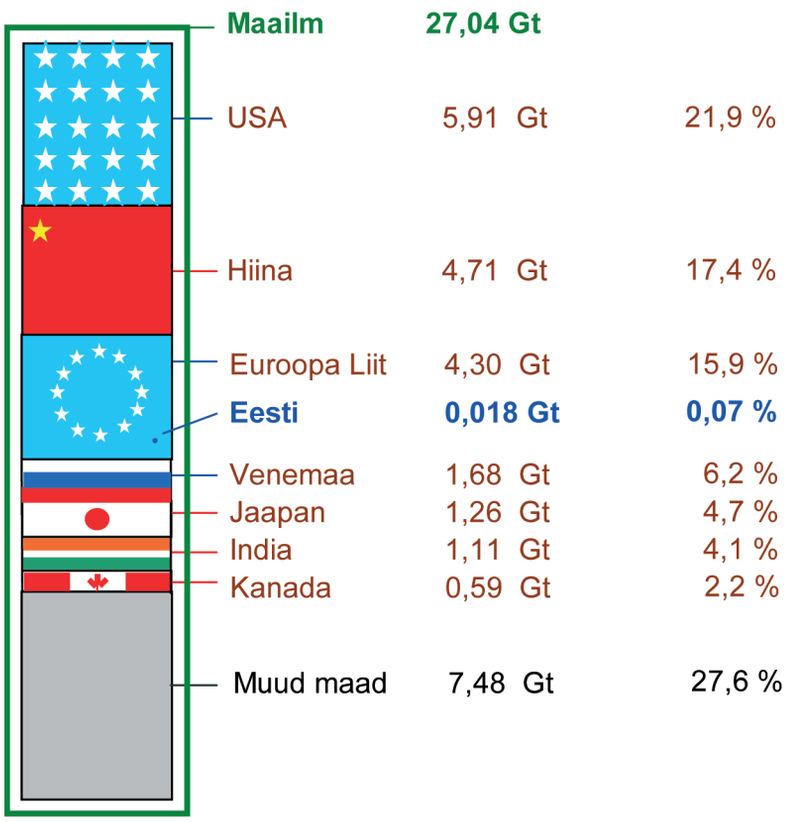


Joonis 7.2.8. Süsinikdioksiidi emissiooni jaotus inimtegevuse alade järgi aastal 2004

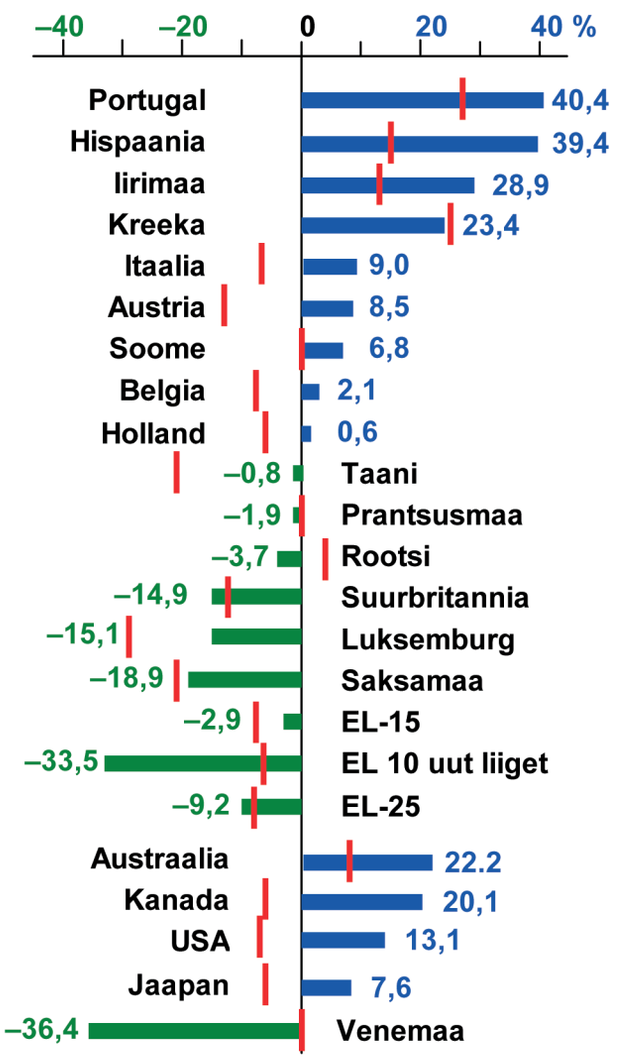
Süsinikdioksiidi emissiooni jaotus inimtegevuse alade järgi aastal 2004 on esitatud joonisel **7.2.8**, maailma riikide järgi USA Energiadepartemangu (*Department of Energy, DOE*) enenergiainformatsiooni osakonna (*Energy Information Administration, EIA*) andmetabelite alusel aastal 2004 aga joonisel **7.2.9**.

Murettekitavate kliimamuutuste tõttu kutsuti aprillis 1995 Berliinis kokku ÜRO kliimamuutuste raamkonventsiooni allakirjutanud maade (188 riigi) esimene kliimakonverents ministrite tasemel ja otsustati alustada etapiviisilist tegevust CO_2 atmosfääripaiskumise vähendamiseks. Seejärel arutati süsinikdioksiidi emissiooni vähendamise võimalusi ÜRO järjekordsel kliimakonverentsil detsembris 1997 Kyotos ja lepiti kokku vähendada seda tööstusriikides hiljemalt aastaks 2012 võrreldes 1990. aasta tasemega 5,2 % võrra [7.2]. Euroopa Liidu jaoks nähti ette vähenemine 8 % võrra, kusjuures see aga liidu selleaegse 15 liikme vahel omaette kokkuleppe järgi ümber jaotati (vt joonis **7.2.10**). Vähendamisnõue 8 % käib ka liidu kümne hiljem vastuvõetud liikme, sealhulgas Eesti kohta; erandiks on Poola ja Ungari (6 %). Norra võib emissiooni 1 % võrra ja Island 10 % võrra suurendada, Venemaa ja Ukraina võivad jääda 1990. aasta tasemele. USA jaoks kehtestati vähendamisnõue 7 %, Austraalia võis aga oma emissiooni 8 % võrra suurendada.

Ühtlasi lepiti kokku, et Kyoto protokoll jõustub 90. päeval pärast seda, kui selle on ratifitseerinud vähemalt 55 riiki, mille CO_2 emissioon oli aastal 1990 kokku vähemalt 55 % maailma koguemis-



Joonis 7.2.9. Süsinikdioksiidi emissiooni jaotus maailmas aastal 2004

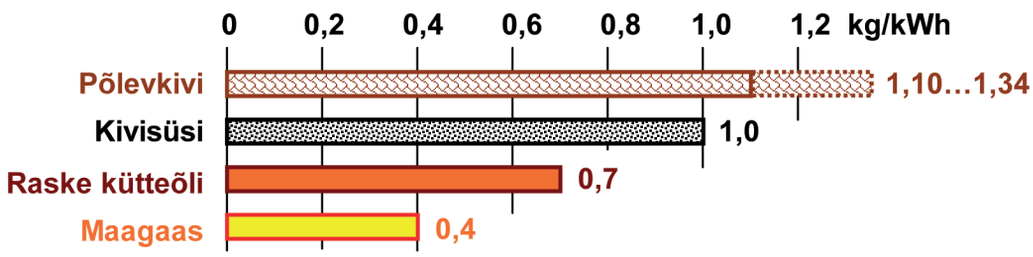


siioonist. See tingimus täitus detsembris 2004, mil protokolli ratifitseeris Venemaa. Seisuga 1. jaanuar 2007 on selle on ratifitseerinud 141 riiki ja regionaalset majandusühendust. USA ja Austraalia keeldusid protokolli ratifitseerimast ja näevad kliimamuutuste ohu vähendamist ette teisel viisil – tuumaenergeetika arendamise teel, naftal põhinevate mootorikütuste asendamise teel biokütustega, energia säästumeetmete abil jne.

Aastal 2006 liitus Kyoto protokolliga sisuliselt USA California osariik, kus aastaks 2020 on seatud eesmärgiks viia kasvuhoonegaaside emissioon 1990. aasta tasemele. Selleks on kasutusele võetud või kavandatud mitmesuguseid meetmeid eeskätt CO_2 emissiooni vähendamiseks (süsinikkütuste kasutamise piiramine, tuule- ja päikeseenergia kasutamise laiendamine, kütuseelement- ja akumulaator-elektriautode kasutuselevõtt jne).

Kyoto protokollis on nähtud ette meetmed ka teiste kasvuhoonegaaside emissiooni piiramiseks. Peale süsinikdioksiidi, metaani ja dilämmastikoksiidi nimetatakse selles

Joonis 7.2.10. Kasvuhoonegaaside emissiooni vähendamise või lubatud suurenemise kokkulepe aastaks 2012 aasta 1990 suhtes (punane püstjoon) ja tegelik muutus aastal 2003 mõnedes riikides ja Euroopa Liidus (*EL*) tervikuna



Joonis 7.2.11. Süsinikdioksiidi teke elektrienergia tootmisel põletuskütuselektrijaamades. Põlevkivi puhul kehtib väiksem väärtus keevkihtkollete, suurem väärtus tolmkütuskollete kohta

- osaliselt halogeniseeritud klorofluoroalkaane (*freoone* jms),
- perfluoreeritud süsivesinikke,
- väävelheksafluoriidi (*elegaasi*, SF_6).

Esimesed neist on varem olnud laialt kasutusel soojuskandjaina külmikutes ja soojuspumpades, lahustitena, vahtpolümeermaterjalide täitegaasina, aerosoolpakendite survegaasina, tulekustustusvahendites ja mujal. Alates aastast 1989 on nende kasutamine peaaegu täielikult keelatud (vt jaotis **7.3**).

Teise rühma kuulub ainult kaks ainet – tetrafluormetaan CF_4, mida kasutatakse alumiiniumi tootmisel, ja heksafluoretaan C_2F_6, mida loetakse asendamatuks pooljuhtkomponentide tootmisel ja mille emissioon on viimase 20 aasta jooksul kümnekordistunud. Kuna nende emissioon on võrreldes teiste kasvuhoonegaasidega suhteliselt väike, on nende osatähtsus kasvuhoonenähtuse tekitamises, vaatamata molekulide äärmiselt tugevale kiirgustneelavale toimele, seni ligikaudu 300 korda väiksem kui süsinikdioksiidil.

Väävelheksafluoriidi kasutatakse mitte üksi elektriaparaatides, kus selle lekkimine on suhteliselt vähe tõenäoline, vaid ka inertse kaitsegaasina magneesiumi valuseadmetes, kust see kergesti satub õhku. Valuseadmete täiustamisel saab seda aga asendada teiste inertgaasidega. Euroopa Liidus on selle gaasi kasutamine mujal kui elektriaparaatides alates aastast 2007 keelatud.

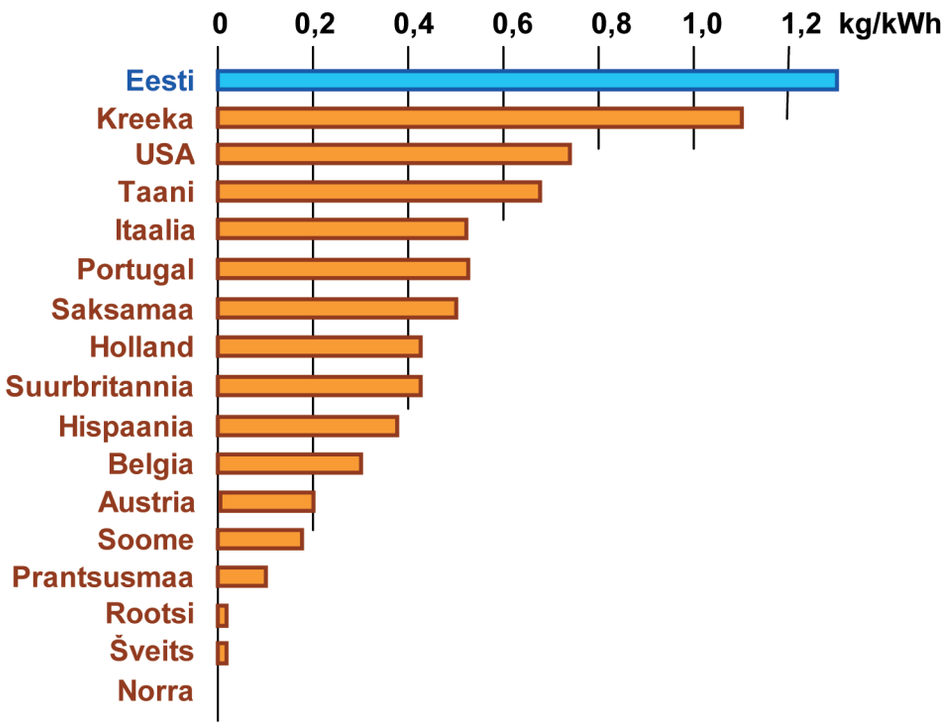
Fluoriühendid CF_4, C_2F_6 ja SF_6 on suure tihedusega ja keemiliselt äärmiselt stabiilsed, mistõttu nad võivad troposfääris püsida ligikaudu 10 000 aastat enne kuni nad jõuavad stratosfääri, kus nad ultraviolettkiirguse toimel lagunevad. Nende kogus õhus ning kasvuhoonenähtust tugevdav toime kasvab seega pidevalt ja võib juba nt aastal 2020 tõusta vägagi oluliseks.

Eestis on Kyoto protokolli nõuded täidetud, kuna elektrijaamadest väljastatava energia kogus on võrreldes 1990. aastaga 17 % võrra vähenenud ja kuigi mootorikütuste tarbimine liikluses on päris tugevasti suurenenud, on kaubalise energia kogutarbimine vähenenud 1990. aastaga võrreldes ligi 30 % võrra. Tuleb aga öelda, et Eesti põlevkivielektrijaamades tekib süsinikdioksiidi toodetava elektrienergia ühiku kohta mõnevõrra enam kui muude kütuste kasutamisel (joonis **7.2.11**). Riikides, kus elektrienergiat toodetakse mitte üksi kütustpõletavates, vaid ka tuuma-, hüdro-, tuule-, geotermaal- ja päikeseelektrijaamades, on süsinikdioksiidi teke toodetava elektrienergia ühiku kohta märgatavalt väiksem kui Eestis (joonis **7.2.12**).

Süsinikdioksiidi emissiooni loodetakse vähendada muuhulgas sel teel, et riik eraldab kütuseid kasutavatele ettevõtetele CO_2-emissiooniõiguse sertifikaate, kusjuures ettevõtted, mis neid täielikult ei kasuta, võivad neid müüa teistele ettevõtetele. Samal viisil võivad riigid, milles Kyoto protokolli nõuded on täidetud, müüa oma CO_2-kvoote teistele riikidele. Aastal 2005 rakendus Euroopas katselises korras CO_2-kaubandus ja CO_2-börs, kusjuures selle kasvuhoonegaasi 1 t emissiooniõiguse hind on 2005. ja 2006. aastail kõikunud vahemikus 10…30 eurot. Aastal 2008 on kavas alustada regulaarset kauplemist CO_2-kvootidega.

Põhiliste meetmetena kasvuhoonenähtuse toime vähendamiseks nähakse ette

- tuuma-, hüdro-, tuule-, geotermaal- ja päikeseenergia laiemat kasutamist põletatavate kütuste asemel,
- maagaasi kasutamist tahkete kütuste asemel,
- taastuvate kütuste (eeskätt puidu) kasutamist mittetaastuvate kütuste asemel, lähtudes sellest, et puidu põletamisel eraldub süsinikdioksiidi täpselt sama palju nagu puit oma moodustumisel õhust on võtnud,



Joonis 7.2.12. Süsinikdioksiidi teke elektrienergia tootmisel mõnedes riikides aastal 2000, arvestades riigi kõiki elektrijaamaliike

- bensiini asendamist maagaasiga ja taimedest (nt suhkruroost) saadava etanooliga,
- traditsioonilise diislikütuse asendamist taimeõlist (nt rapsiõlist) saadava *biodiislikütusega*,
- vesinikul, maagaasil ja metanoolil talitlevate kütuseelementide kasutuselevõttu,
- ehitiste paremat soojuslikku isoleerimist küttevajaduse vähendamise eesmärgil,
- energia säästlikumat kasutamist,
- energiakadude vähendamist.

On arutusel ka gaasilise või veeldatud süsinikdioksiidi pumpamine maa alla, nt naftaleiukohtades, kus see ühtlasi tagab nafta pumpamist hõlbustava rõhu.

Kyoto protokollis on kehtestatud kasvuhoonegaaside emissiooni vähendamise eesmärgid aastani 2012. Edasisi eesmärke arutati veebruaris 2007 Euroopa Liidu liikmesriikide keskkonnaministrite nõupidamisel ja lepiti kokku, et aastaks 2020 tuleks kasvuhoonegaaside emissiooni vähendada 1990. aastaga võrreldes 20 % võrra. Samal ajal toimus New Yorgis 100 suurima rahvusvahelise tööstuskontserni (nagu nt *General Electric*, *Air France*, *Volvo* jt) tippjuhtide nõupidamine, millel leiti et ka tööstus kui *üks osa nii probleemist kui ka selle lahendusest* peab rakendama tõhusaid meetmeid kasvuhoonegaaside emissiooni vähendamiseks, mis nõuab küll kulutusi, kuid mittetegutsemine tähendaks olukorra tõsidust arvestades juba liiga suurt riski.

Kuna suure osa õhku paiskuvast süsinikdioksiidist annavad liiklusvahendid (vt joonis **7.2.8**), on Euroopa Liidus arutusel ettepanek kehtestada neile CO_2 emissiooni standardväärtuseks 120 g sõidukilomeetri kohta. Autodele, mille CO_2-emissioon on üle 140 g, tuleks autotootjail osta *emissioonilubа*, mis teeb need autod kallimaks. Nii näiteks kallineks *Citroen* (145 g/km) 150 euro võrra, *Porsche* (297 g/km) aga 4650 euro võrra. Autod, mille emissioon on väiksem, läheksid vastavalt odavamaks; näiteks odavneks *Smart* (116 g/km) 720 euro võrra [7.6].

Süsinikdioksiidi emissiooni vähendamist saab stimuleerida ka süsinikku sisaldavate kütuste (sealhulgas ka nt maagaasi ja mootorikütuste) lisamaksustamise teel. Šveitsis esitati 2006. aastal ettepanek kehtestada selliseks emissioonimaksuks kuni 36 franki 1 tonni CO_2 kohta, mis tähendaks nt maagaasi kallinemist 12 % võrra [7.7].

Alates aastast 2005 on kasvuhoonegaaside emissiooni vähendamisele maailma kõigis arenenud tööstusmaades hakatud pöörama äärmiselt tõsist tähelepanu, mistõttu lähimail aastail on oodata mitmesuguseid tehnilisi, majanduslikke ja seadusandlikke meetmeid süsinikku sisaldavate, eeskätt fossiilkütuste põletamise piiramiseks.

7.3 MAA OSOONIKIHI HÕRENEMINE

Maa atmosfäär, mida tavaliselt loetakse ulatuvaks kõrguseni kuni 80 km, koosneb mitmest eri omadustega kihist. Alumine kiht – **troposfäär** – ulatub kõrguseni kuni umbes 10 km ja sisaldab 80…90 % atmosfääri kogu õhumassist. Iga kilomeetri kohta langeb õhu temperatuur keskmiselt 6,5 K võrra ja on selle kihi ülemisel piiril –60 °C. Temperatuuri sellise jaotuse tõttu on õhk troposfääris pidevas liikumises – alumine soojem õhk tõuseb üles, ülemine külmem õhk laskub alla. Tuuled ja soojema õhu tõus hajutavad võimalikke saasteaineid üle kogu troposfääri, sademed kannavad neid aga maapinnale. Õhurõhk, mis maapinnal on ümardatult 100 kPa, on troposfääri ülapiiril 20…25 kPa.

Troposfääri piirist (*tropopausist*) ülespoole jääb õhu temperatuur umbes 20 km kõrguseni konstantseks, siis aga hakkab tõusma ja saavutab umbes 50 km kõrgusel väärtuse 0 °C. Seda atmosfääriosa nimetatakse **stratosfääriks**. Ligikaudu 5 km ulatuses jääb temperatuur jällegi konstantseks (*stratopaus*) ja hakkab siis uuesti langema. Seda osa atmosfäärist nimetatakse **mesosfääriks**. Õhurõhk stratosfääri ülapiiril on ligikaudu 0,1 kPa.

Kuna stratosfääri alumises osas on temperatuur madalam, ülemises osas aga kõrgem, on seal õhu ringlus väga aeglane. Saasteained, mis stratosfääri satuvad, võivad sinna seetõttu jääda mitmekümneks aastaks.

Atmosfääri eri kihid ja nende temperatuurijaotus on lihtsustatult kujutatud joonisel **7.3.1**.

Päikesekiirgus atmosfääri ülapiiril sisaldab peale nähtava ja infrapunakiirguse võrdlemisi tugevat ultraviolettkiirgust lainepikkusega alates 150 nm. Selle kiirguse lühemalainelist osa kuni lainepikkuseni 280 nm (*UV-C-kiirgust*) iseloomustab kiirguskvantide $h\nu$ (h Plancki konstant, ν sagedus) suur energia ja ainemolekule lõhkuv toime. Kuna see kiirgus hävitab ka elusrakke, sealhulgas baktereid, nimetatakse seda sageli *bakteritsiidkiirguseks*. Stratosfääris lõhestab kiirgus lainepikkusega kuni 240 nm hapnikumolekule ja muundub seega hapnikuaatomite kineetiliseks (soojusliku liikumise) energiaks. Reaktsioon

$$O_2 \rightarrow O + O$$

neelab selle osa päikesekiirgusest stratosfääris (kõrgusel ligikaudu 30 km) täielikult. Atomaarne hapnik on keemiliselt väga aktiivne ja ühineb hapnikumolekuliga osooniks:

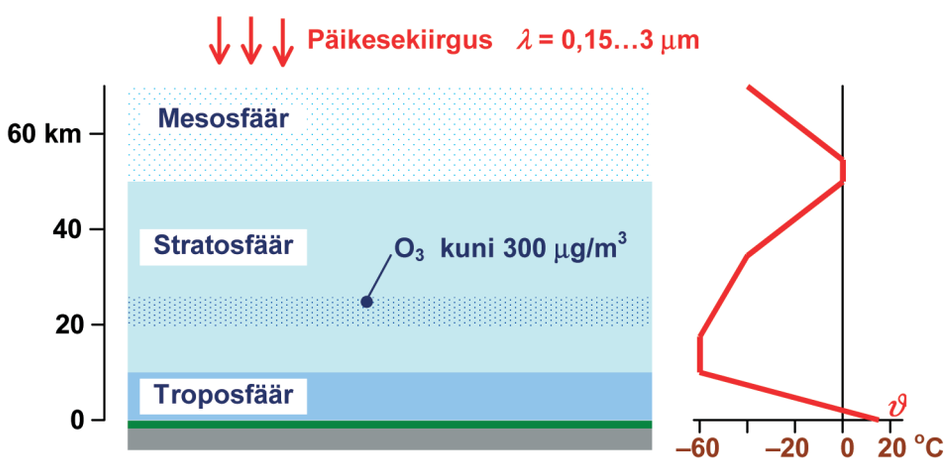
$$O + O_2 \rightarrow O_3.$$

Stratosfääris on selle reaktsiooni tulemusel tekkinud **osoonikiht**, mille tihedaim osa asub kõrgusel 20…25 km. Osoonimolekul ei ole Päikese ultraviolettkiirguses püsiv ja kiirgus lainepikkusega 200…310 nm, neeldudes selles molekulis, lagundab selle ühe- ja kaheaatomiliseks hapnikuks:

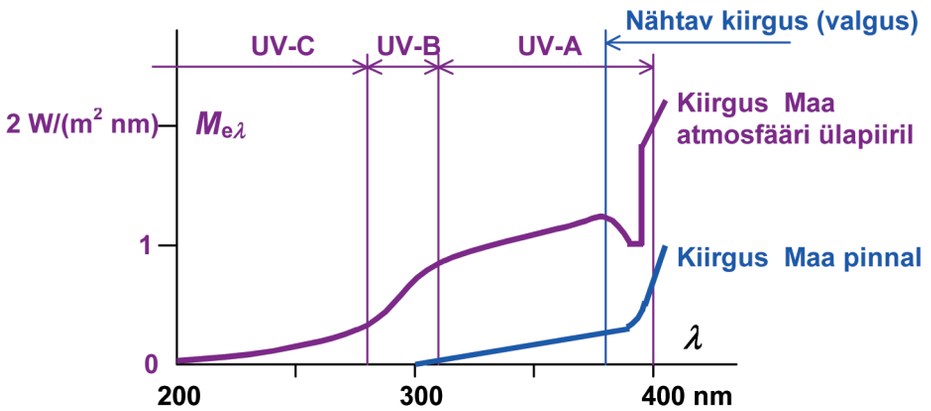
$$O_3 \rightarrow O + O_2$$

Kiirguse selline toime on tugevaim lainepikkusel 280 nm. Hapnikumolekul lõhestub seega uuesti ja osoonikihis tekib ringprotsess hapniku ja osooni teatava tasakaalusuhtega

$$3O_2 \rightleftarrows 2O_3$$



Joonis 7.3.1. Atmosfääri ehitus ja temperatuurijaotus (tugevasti lihtsustatult)



Joonis 7.3.2. Ultraviolettkiirgavuse spektraaltihedus $M_{e\lambda}$ väljaspool Maa atmosfääri (ülemine kõver) ja Maa pinnal (alumine kõver)

kusjuures kogu ultraviolettkiirgus lainepikkusega kuni umbes 310 nm täielikult neeldub (joonis **7.3.2**). Kiirguse neeldumisest on tingitud ka stratosfääri soojenemine.

Osoonikihi fotokeemilise teooria töötas oma uurimustes välja aastal 1930 inglise geofüüsik Sidney Chapman (1888–1970). Käesolevas õpikus on osoonikihis asetleidvad protsessid esitatud tugevasti lihtsustatult, sest tegelikult osalevad neis oma katalüütilise toimega ka teiste gaaside molekulid.

Nagu näitab joonis **7.3.2**, neelab Maa osoonikiht

- suure osa ultraviolettkiirgusest lainepikkusega 315…400 nm, mida tähistatakse rahvusvaheliselt tähtedega ***UV-A*** ja milles sisaldub kiirguse päevitustoime maksimum,
- peaaegu täielikult ultraviolettkiirguse lainepikkusega 280…315 nm, mida tähistatakse rahvusvaheliselt tähtedega ***UV-B*** ja milles sisaldub kiirguse erüteem- (nahapõletikku tekitava) toime maksimum,
- täielikult ultraviolettkiirguse lainepikkusega 100…280 nm, mida tähistatakse rahvusvaheliselt tähtedega ***UV-C*** ja milles sisaldub kiirguse bakteritsiid- (mikroorganisme hävitava) toime maksimum.

Ultraviolettkiirguse piirkond UV-A ei ole inimesele ega teistele elusolenditele ohtlik, kuid selle liigne intensiivsus võib tekitada naha, silmade ja teiste kiirgusele toimele alluvate organite põletust (erüteemi). Võib öelda, et osoonikiht on nõrgendanud selle osa ultraviolettkiirgusest soodsalt tasemeni, millele inimene ja teised elusolendid on osutunud suuteliseks kohanema.

Piirkondade UV-B ja eriti UV-C ultraviolettkiirgus kutsub nahas, silmades ja muudes kiirguse toimele aldistes kehaosades esile haiguslikke nähtusi – põletust, rakkude hävimist, kasvajate teket jm. Võib öelda, et tänu Maa atmosfääri osoonikihi olemasolule sai võimalikuks elu Maa pinnal, sest tugeva lühilainelise ultraviolettkiirituse toime all ei oleks saanud nukleiinhapped ega elusrakud üldse kujuneda.

Osoonikiht on hõre ja kui see taandada normaal-atmosfääri-rõhule ja -temperatuurile Maa pinnal, oleks see olenevalt aastaajast ja geograafilisest laiusest ainult 2…5 mm paks (sügisel õhem, kevadel paksem, ekvaatoril õhem, poolustel paksem). Osoonikihi sellist tinglikku paksust mõõdetakse *Dobsoni ühikutes (DU)*, kusjuures 1 DU = 0,01 mm. Seega on osoonikihi tinglik paksus normaalsetes (kahjustamata) oludes 200…500 DU.

Ühik on saanud oma nime inglise meteoroloogi Gordon Miller Bourne Dobsoni (1889–1976) järgi, kes alates aastast 1925 mõõtis endaehitatud erispektrograafi abil osoonikihi omadusi.

Aastal 1929 sünteesiti USA firmas *General Motors* ***klorofluoroalkaanid*** – süsivesinikud, mille molekulides osa vesiniku aatomitest asendati kloori ja/või fluori aatomitega. Kui nt etaani C_2H_6 molekulis kõik vesinikuaatomid sel viisil asendada, võidakse saada nt ühend $C_2F_3Cl_3$. Neid aineid hakati nimetama ***freoonideks*** ja oma madala keemistäpi ja muude sobivate omaduste tõttu osutusid need suurepärasteks soojuskandjateks külmikutes ja soojuspumpades. Hiljem leiti neile ka teisi rakendusi (lahustid, aerosoolpakendite survegaas, vahtplastmasside

täitegaas jm) ja aastal 1989 toodeti neid maailmas ligikaudu 1,1 miljonit tonni.

Klorofluoroalkaanide kasutamisviis oli ülisageli selline, et nad pärast kasutamist vältimatult sattusid atmosfääri, kus nad oma keemilise stabiilsuse tõttu võivad püsida kaua ja tugevdada kasvuhoonenähtust (vt jaotis **7.2**). Atmosfääri õhuringlusega kanduvad nad aga ka Maa osoonikihini, kus ultraviolettkiirguse toimel tekib keerukas ja mitmeastmeline lagunemisprotsess. Selle alguses tekivad klooriühendid HOCl, $ClNO_2$ ja Cl_2, seejärel aga keemiliselt äärmiselt aktiivne atomaarne kloor. Nii näiteks võib tekkida reaktsioonide ahel [7.8]

$$HOCl \rightarrow Cl + OH,$$
$$ClNO_2 \rightarrow Cl + NO_2,$$
$$Cl_2 \rightarrow Cl + Cl.$$

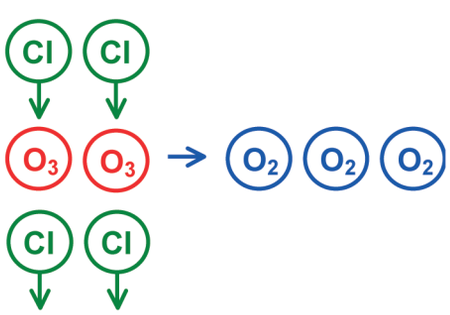
Atomaarne kloor reageerib osooniga:

$$2Cl + 2O_3 \rightarrow Cl_2O_2 + 2O_2$$

ja tekkiv klooroksiid laguneb päikesekiirguse toimel uuesti, vabastades aktiivse atomaarse kloori:

$$Cl_2O_2 \rightarrow Cl + ClO_2,$$
$$ClO_2 \rightarrow Cl + O_2.$$

Vaba kloor reageerib uue osoonimolekuliga ja protsess võib korduda tuhandeid kordi. Kokkuvõtlikult ning äärmiselt lihtsustatult on selle protsessi tagajärg kujutatud joonisel **7.3.3**.



Joonis 7.3.3. Kloori ja osooni reageerimise ahelreaktsioon, mille tagajärjel osoon laguneb hapnikuks

Veel intensiivsemalt reageerib osooniga **broom**, mis võeti kasutusele broom-süsivesinikes (*haloonides*) eeskätt tulekustutite valmistamisel. Haloone kasutatakse ka sõjalennukite kütuselisandina, et aeglustada selle põlemist. Tihti lendavad need lennukid kõrgusel 15…20 km, mistõttu haloonid paiskuvad osoonikihti otse, ilma troposfääri vahenduseta.

Sellise protsessi võimalikkust kirjeldasid esimestena aastal 1974 California ülikooli (USA) keemiaprofessor Frank Sherwood Rowland (*1927) ja füüsikalise keemia dotsent Mario José Molina (*1943). 1. aprillil 1975 hoiatasid nad oma uuringute põhjal, et aerosoolpakendites ja mujal kasutatavad klorofluoroalkaanid võivad stratosfääri jõudes hävitada Maa osoonikihi. Alates aastast 1977 täheldasid inglise meteoroloogid Antarktises osoonikihi tegelikku hõrenemist igal Antarktise kevadel (augustis) ja aastal 1984 oli hõrenemine nii suur, et hakati rääkima ***osooniaugust***. Nähtuse põhjus oli selles, et ülalkirjeldatud reaktsioonid kloori ja osooni vahel said aset leida jääkristallidel, mis tekkisid stratosfääris Antarktise talve ajal. Osoonikihi hõrenemine tõi kaasa ultraviolettkiirguse tugevnemise lõunapoolkeral (Austraalias ja Uus-Meremaal) koos inimnaha erüteemi ja nahavähi sagenemisega. Esimese maana maailmas reageeris Maa osoonikihi hõrenemise ohule Rootsi, kus juba jaanuaris 1978 keelati freoonide kasutamine aerosoolpakendites. Aastal 1987 kutsus ÜRO Montrealis kokku osoonikihi kaitse konverentsi, millel otsustati täielikult keelata klorofluoroalkaanide tootmine ja kasutamine. Konverentsi lõppdokument, *Montreali protokoll*, mis kirjutati alla 189 riigi esindajate poolt, jõustus 1. jaanuaril 1989. Mais 1989 otsustas Maa osoonikihi kaitse alane 79 riigi konverents Helsingis lõpetada klorofluoroalkaanide tootmine hiljemalt aastal 2000. Kohe algaski nende tootmise kiire vähenemine ja aastaks 2000 oli see jõudnud 1,2 miljonilt tonnilt peaaegu nullini. Osoonikihi täielikku taastumist prognoositakse aga mitte varem kui aastal 2030.

Montreali protokoll on üks vähestest ÜRO dokumentidest, mille nõuded on leidnud kohest ja üleüldist täitmist kogu maailmas. Selle protokolli allakirjutamispäeva, 16. septembrit, tähistatakse osoonikihi kaitse päevana.

Maa osoonikihti kahjustavad ka muud ained, nt raketikütuste põlemissaadused, lennukite heitgaasid, mõned lämmastikuühendid jm. Seega ei ole oht osoonikihile veel möödas, kuigi see tänu klorofluoroalkaanide keelustamisele on tugevasti vähenenud.

7.4 KESKKONNA SAASTAMINE HEITAINETEGA

Keskkonnale kahjulikud heitained tekivad põhiliselt

- kütuste põletamisel,
- keemiliste reaktsioonidega seotud tootmisprotsessides,
- mürgiste ja muul viisil kahjulike ainete teadlikul kasutamisel ja nende jäätmete ebaõigel käitlemisel,
- tehnoloogiliste seadmete riketel, tulekahjudel ja õnnetustel.

Süsinikul ja vesinikul põhinevate kütuste põletamisel tekib peale loomulike põlemissaaduste (CO_2, H_2O) ka kütuses sisalduvate või põlemisprotsessis osalevate muude ainete oksiide (eeskätt SO_2 ja NO_x), lendtuhka ning ebatäielikust põlemisest tingitud süsinikoksiidi CO ja nõge. Varem, kuni umbes aastani 1990, tekkis autode heitgaasides tetraetüülpliid sisaldava bensiini põletamisel hulgaliselt mitmesuguseid mürgiseid pliiühendeid (vt jaotis **2.5**).

Süsinikdioksiidi kui kasvuhoonegaasi toimet Maa kliimale on vaadeldud jaotises **7.2**. Kütuse ebatäielikust põlemisest tingitud **süsinikoksiid** CO (*vingugaas*) on iseloomulik eeskätt sisepõlemismootoritele, mistõttu linnades ja muudes elava autoliiklusega piirkondades võib selle gaasi suhteline kogus õhus osutuda inimeste tervise seisukohast ohtlikult suureks.

Väävel- ja lämmastikoksiidid reageerivad õhku sattudes enamasti kohe õhuniiskusega, tekitades väävel- ja lämmastikhappeid. Maalähedasel tekkel (nt autoliikluses) imenduvad need happed suurelt osalt pinnasesse, muutes selle happeliseks ja kahjustades taimede juurestikku. Eriti tundlikud on nendele hapetele okaspuud, mistõttu nt Kesk-Euroopas on suurem osa okaspuumetsi haiged. Oksiidide hajumisel korstnate kaudu (nt elektrijaamades) satuvad neist tekkivad happed pilvedesse ja sajavad alla happeliste vihmadena nii maapinnale kui ka veekogudesse. Suures ohus olid 1970ndail aastail näiteks Rootsi järved, mille kohale lõuna- ja idatuultega kandus Kesk-Euroopast happelisi vihmapilvi, ja USA ja Kanada piiril olev Suur järvistu, kus vee hapendumise tõttu oli elu peaaegu lõppenud. Mõlemal juhul algas veekogude tervenemine pärast tõhusamate filtrite paigaldamist elektrijaamade katelagregaatidele. Käesoleval ajal nõuavad selliseid filtreid juba kõigi maade sellekohased tehnilised standardid.

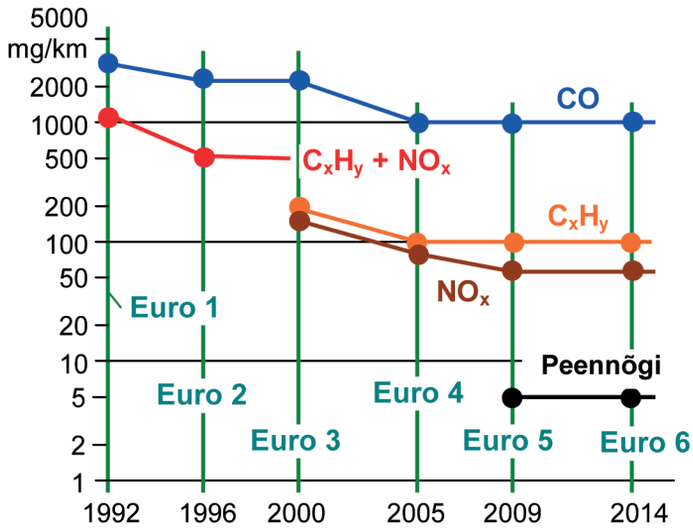
Happelist vihmasadu täheldati esmakordselt aastal 1852 Manchesteris, kuid laiemaulatuslikud looduskahjustused hakkasid Euroopas ja Põhja-Ameerikas ilmnema 1960ndail aastail. Riikide piire ületavate happeliste pilvevoogude piiramiseks võtsid Euroopa riigid aastal 1979 vastu sellekohase konventsiooni (*Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution on the Reduction of Sulphur Emissions or Their Transboundary Fluxes at Least 30 %*), milles nähti ette vääveldioksiidi emissiooni ja selle piireületava edastumise piiramine aastaks 1993 vähemalt 30 % võrra. Konventsioonil põhinev protokoll, millele kirjutas alla ka Eesti, jõustus 2. septembril 1987. Aastal 1994 koostati uus protokoll vääveldioksiidi emissiooni ja leviku piiramise edasiste meetmete kohta, mis jõustus 5. augustil 1998 ja mis ratifitseeriti Euroopa Liidu kõigi selleaegsete liikmesriikide poolt. Esimesena Euroopas kohustasid Saksamaa liiduvalitsus ja parlament (*Bundestag*) sellekohase seadusega aastal 1983 kõiki soojuselektrijaamade ja suurkatlamajade valdajaid kasutama tõhusaid meetmeid vääveldioksiidi ja lämmastikoksiidide vähendamiseks suitsugaasis.

Autode heitgaas on läinud puhtamaks pärast seda, kui tulid kasutusele

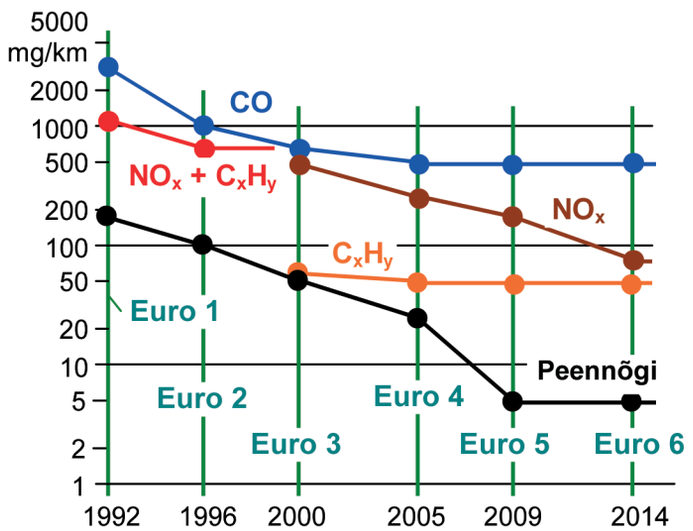
- väävlivaba bensiin,
- süsivesinikke (C_xH_y), süsinikoksiidi (CO) ja lämmastikoksiide (NO_x) süsinikdioksiidiks (CO_2), veeks (H_2O) ja lämmastikuks (N_2) muundavad katalüsaatorid,
- diislinõge (mis koosneb peamiselt süsinikust terasuurusega 20…200 nm, kuid sisaldab ka süsivesinikke) kinnipidavad filtrid, milles süsinik enamasti filtri automaatse perioodilise regenereerimise teel põletatakse süsinikdioksiidiks.

Sellekohased Euroopa ja Ameerika standardid ja seadusandlus on läinud järjest rangemaks ja nende edasine täiustamine jätkub eesmärgiga, et autode heitgaas, mis puhastamata kujul on väga mitmesuguste gaaside segu, oleks ohtlikest saasteainetest täiesti vaba.

Eriti tähtsaks peetakse ülipeeneteralise (tera läbimõõduga kuni 10 μm) diislinõe kinnipidamist sellekohastes filtrites, kuna selline peen nõgi tungib sügavale kopsu ning võib sattuda isegi verre. Diislinõgi kutsub esile või raskendab kopsuhaigusi ning kuulub kopsuvähi tekitajate hulka.



Joonis 7.4.1. Bensiinimootoriga sõiduautode heitgaasi enimalt lubatav süsinikoksiidi (CO), süsivesinike (tingliku tähisega C_xH_y), lämmastikoksiidide (NO_x) ja peennõe sisaldus sõidukilomeetri kohta aastail 1992–2005 kehtestatud ja aastail 2009–2014 kehtima hakkavate Euroopa standardite järgi



Joonis 7.4.2. Diiselmootoriga sõiduautode heitgaasi enimalt lubatav süsinikoksiidi (CO), lämmastikoksiidide (NO_x), süsivesinike (tingliku tähisega C_xH_y) ja peennõe sisaldus sõidukilomeetri kohta aastail 1992–2005 kehtestatud ja aastail 2009–2014 kehtima hakkavate Euroopa standardite järgi

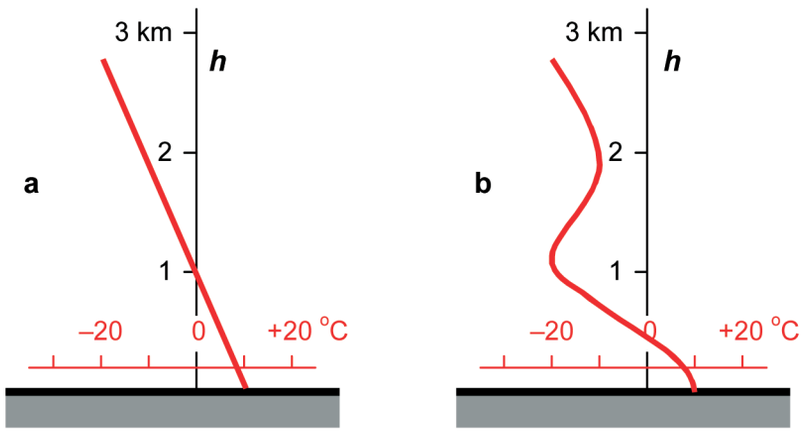
Ülipeeneteralise nõe ja tolmu rahvusvahelise lühitähisena on hakatud kasutama tähtnumberühendit **PM 10** (*particulate matter 10 µm or less*). Kuna diislinõe osakesed on enamasti väiksemad, on nende iseloomustamiseks kasutusel ka tähised PM 2,5, PM 1 ja PM 0,1.

Euroopa nõuete karmistumist sõiduautode heitgaasi lubatavale kogusele (milligrammides sõidukilomeetri kohta) iseloomustab bensiinimootoriga autode suhtes joonis **7.4.1**, diiselmootoriga autode suhtes aga joonis **7.4.2**. Nende nõuete täitmiseks varustatakse kõik toodetavad autod katalüsaatoritega, diiselmootoriga autod peale selle aga ka filtritega.

Katalüsaatorid tulid mõnede autotootjate initsiatiivil, esialgu seadustega regulaarimatult kasutusele aastal 1974 USAs. Esimese riigina Euroopas hakkas kõigi uute autode seadistamist katalüsaatoritega aastal 1986 nõudma Šveits ja aastast 1993 kehtib see nõue Euroopa ja USA kõigi autotootjate kohta. Kuna katalüsaator sisaldab väärismetalle (plaatinat, roodiumi ja/või pallaadiumi), kogutakse äratöötanud katalüsaatorid kokku ja väärismetallid võetakse taaskasutusse.

Diislinõefiltrite kasutamine algas 1970ndail aastail kaevandustes ja siseruumides talitlevatel diiselmootoreil. Esimese filtriga varustatud diiselauto valmistas aastal 1985 firma *Mercedes-Benz*, kuid filtri lühikese ea tõttu lõpetati selle tootmine aastal 1988. Alles aastal 1999 tulid kasutusele töökindlamad ja pikemaealised filtrid ja alates aastast 2005 nõutakse, olenevalt riigist, kas kõigi autode varustamist filtritega või maksusoodustusi filtritega varustatud autode tootmisel ja kasutamisel. Saksamaal kehtib alates aastast 2006 määrus, mille kohaselt autodel peab olema kahjulike ainete emissioonitaseme tähis, linnad ja asulad võivad aga kehtestada liikluskeelu sellise tähiseta või mitterahuldava emissioonitasemega autodele.

Analoogilised, mõnevõrra teistsuguste sätestatud väärtustega standardid on kehtestatud ka veoautodele, autobussidele, mootorratastele ja mootorjalgratastele. Eri riikides on kehtestatud ka erisugused tähtajad olemasolevate autode vastavusseviimiseks uutele rangematele standarditele. Heitgaasi vähendamist ja nt filtrite paigaldamist olemasolevatele



Joonis 7.4.3. Temperatuuri kõrgusinversioon. *a* õhutemperatuuri tavaline jaotus, *b* temperatuurijaotus inversiooni korral (näide). *h* kõrgus maapinnast

autodele stimuleeritakse seejuures uutele standarditele mittevastavate autode lisamaksustamise teel.

Automootorite heitgaasis sisalduv peennõgi moodustab siiski ainult 50 % kogu ohtlikust peentolmust (tera läbimõõduga kuni 10 μm). Ligikaudu 25 % sellisest tolmust tekkis aastal 2003 autopidurite, rehvide ja teekatte kulumisel ja teist samapalju (25 %) katlakütuste (sealhulgas isegi puidu) põletamisel, mõnedes tööstusprotsessides ja põllumajanduses. 2005. aastal lõpetatud uurimuse kohaselt suri Euroopa Liidus 21. sajandi alguses peentolmu sissehingamisest tingitud haigustesse kuni 370 000 inimest aastas. Seetõttu kehtestas Euroopa Liit alates 1. jaanuarist 2005 direktiivi, mille kohaselt peentolmu sisaldus suurlinnade õhus ei tohi olla üle 50 μg/m^3, kusjuures selle piiri tohib ületada enimalt 35 päeval aastas. Aastal 2006 ületati see piir paljudes Kesk-Euroopa suurlinnades siiski veel mõnevõrra sagedamini.

Peale peentolmu normitakse ka muude heitgaasikomponentide sisaldust õhus. Enamasti loetakse õhu puhtus veel rahuldavaks, kui selles ei sisaldu

- süsinikoksiidi CO enam kui 5 mg/m^3.
- lämmastikdioksiidi NO_2 enam kui 140 μg/m^3,
- osooni O_3 enam kui 130 μg/m^3,
- vääveldioksiidi SO_2 enam kui 120 μg/m^3,

Suurlinnade liikluses ja tööstuses tekkivad heitgaasid hajuvad tuule ja tõusvate õhuvoolude toimel enamasti laiemale maa-alale, mistõttu nende suhteline sisaldus õhus jääb enamasti lubatavatesse piiridesse. Mõnikord võivad aga tekkida sellised ilmaolud, et saasteaineid hajutavad õhuvoolud lakkavad ja õhusaaste hakkab kiiresti suurenema. Selline ebasoodne olukord võib tekkida näiteks kõrgrõhkkonna korral, mil atmosfääri ülemiste kihtide vajumine toob kaasa 1…2 km kõrgusel oleva õhukihi tihenemise ning soojenemise, mistõttu selle temperatuur kujuneb kõrgemaks kui maapinnale lähema õhukihi oma (vt joonis **7.4.3**). Sellist nähtust nimetatakse temperatuuri ***inversiooniks*** (täpsemalt – *kõrgusinversiooniks*) ja selle tekkimisel ei saa maapinnalähedane soe õhk tõusta kõrgemale ja seal hajuda.

Inversiooni ja suhtelise tuulevaikuse toime korral võib saasteainete kontsentratsioon õhus ohtlikult suureneda. Kui õhk peale selle on udune, tekib suitsugaasi ja õhu segu, mida nimetatakse ***suduks***. Sel juhul ollakse enamasti sunnitud peatama linna autoliiklus, tööstusettevõtete tegevus ja katlamajade kütmine kuni ilma paranemiseni.

Suurimaks sudukatastroofiks võib pidada Londonis 5. kuni 9. detsembrini 1952 valitsenud sudu, mis oli tingitud ulatusliku kõrgrõhkkonna ajal tekkinud inversioonist. Sudu teket mõjutas hoonete intensiivne kütmine, elav autoliiklus ja ka see, et hiljuti olid linna trammid asendatud diiselautobussidega. Sudu oli nii tihe, et nähtavus oli kohati ainult 30 cm. Kino- ja teatrietendused tuli ära jätta, sest saalist ei olnud ekraani ega lava näha. Sudu tagajärjel suri eri hinnagutel 4000 kuni 12 000 inimest, enamasti väikelapsed, vanurid ja kopsuhaiged. Aastal 1956 kehtestati Suurbritannias *puhta õhu seadus* (*Clean Air Act*), milles nähti ette meetmed taoliste õnnetuste vältimiseks.

Ka mõned energeetika- ja elektrotehnikaseadmete **normaaltalitluseks vajalikud ained** võivad olla seadmete normaalkäidus ohutud, kuid võivad muutuda ohtlikuks nende sattumisel keskkonda näiteks jäätmetena või jäätmete ebaõigel käitlemisel. Nende ainete hulka kuuluvad eeskätt

- elavhõbe (lahenduslampides),
- plii (akudes),
- kaadmium (primaarelementides ja akudes).

Elavhõbeda kogus on elavhõbe-lahenduslampides (vt jaotis **6.6**) õnnestunud viia teoreetilise

miinimumini (mõni milligramm lambi kohta). Peale selle nõutakse kasutuselt kõrvaldatud elavhõbelampide tingimatut andmist jäätmekäitlustehastesse, kus elavhõbe, luminofoor, metallosad ja klaas eraldatakse ja suunatakse taaskasutusse. Primaarelementides ja akudes on elavhõbeda kasutamine Euroopas aastast 2000 keelatud.

Plii eraldatakse akudest täielikult jäätmekäitlustehastes ja suunatakse taaskasutusse. Mujal kui akudes on plii kasutamine sellekohase Euroopa direktiivi alusel peaaegu täielikult keelatud. Eriti puudutab see jootesulameid, mis kaua aega põhinesid tinal ja pliil, kuid alates aastast 2000 tohib kasutada üksnes pliivabu, nt tina-hõbe-, tina-vask- ja tina-tsinksulameid.

Kaadmiumi kasutamine akudes, galvaanilistes pinnakatetes jm on eelnimetatud direktiivi järgi aastast 2000 keelatud.

Soojusisolatsioonis, ehitustarindeis ja mõnedes elektriaparaatides oli pikka aega kasutusel **asbest**. Puhtal kujul kasutati seda nt kuumavee- ja aurutorude mähkimiseks, asbestkrohvina terastarindite katmiseks nende tulekindluse suurendamise eesmärgil, asbesttsemendina aga katuse- ja seinaplaatides, kaablipaigaldus- ja kanalisatsioonitorudes ning elektriaparaatide kaarekustutuskambrites ja alusplaatides. Asbestplaadid ja -riie leidsid kasutamist kuumus- ja tuletõkkevarjetena ka keevitustöödel. Kõigi asbesti sisaldavate materjalide kasutamisel ja töötlemisel tekib aga enamasti vältimatult asbesti peen (silmaga nähtamatu) kiudtolm, mis kopsu sattumisel jääb sinna püsima ja kutsub esile ravimatut kopsuhaigust – *asbetoosi*. Eriti ohtlikud on asbestikiud pikkusega üle 5 μm ja läbimõõduga alla 3 μm, kui nende pikkuse ja läbimõõdu suhe on suurem kui 3:1. Ühtlasi põhjustab asbestitolm kopsu-, vahelihase- ja kõrisõlmevähi teket. Haiguse kulg on väga aeglane ja võib kesta pärast asbestitolmuga kokkupuutumist 10…20 aastat ja enamgi.

Asbestist tingitud vähkhaiguste tagajärjel sureb maailmas sadu tuhandeid inimesi aastas, mis on 2…3 korda enam kui tööõnnetustel surmasaanute arv. Nii näiteks on Suurbritannia kutsehaigus- ja tööõnnetusstatistika andmeil asbestist tingitud surmajuhtumeid sellel maal igal aastal keskmiselt 3500 [7.9].

Asbest oli tuntud juba antiikajal, kuid selle lai kasutamine algas 19. sajandi lõpus. Aastal 1900 patenteeris Austria asbestivabrikant Ludwig Hatschek asbesttsement-laineplaatidest katusekattematerjali, mille ta nimetas eterniidiks. Seejärel tulid kasutusele ka muud asbesttsementtooted, mis kujunesid asbesti põhiliseks kasutusalaks. Aastal 1975 toodeti maailmas asbesti enam kui 5 Mt, kusjuures suurimad tootjad olid Venemaa, Hiina ja Kasahstan. Asbesti tervistkahjustav toime sai selgeks 20. sajandi alguses ja aastast 1970 loetakse asbestkiud ametlikult vähkitekitavaks aineks. Asbesti keelustamine algas aastal 1979, mil mitmel Euroopa maal keelati asbestkrohvi kasutamine. Täielikult keelati asbesti kasutamine aastal 1990 Austrias, aastal 1993 Saksamaal ja aastal 2005 kogu Euroopa Liidus. On aga päris palju maid (SRÜ riigid, Hiina, India, USA, Lõuna-Ameerika riigid jt), kus asbesti kasutamine jätkub ja aastal 2005 oli maailma asbestitoodang ikka veel ligikaudu 2,5 Mt. Seetõttu kutsus Rahvusvaheline Sotsiaalturvalisuse Liit (*International Social Security Association, ISSA*) 16. septembril 2004 oma peakonverentsil Pekingis kõiki maid üles asbesti tootmisest ja kasutamisest võimalikult kiiresti loobuma ja andis aastal 2006 välja põhjaliku ülevaate asbesti ohtudest [7.9].

Asbesti ja asbesttarindeid on hakatud kõrvaldama ka olemasolevatest hoonetest ja rajatistest. Paljudel juhtudel on tulnud asbesttarindeid sisaldavate hoonete kasutamine lõpetada ja, kui asbesti kõrvaldamine nõuab liiga suuri kulusid, hooned lammutada.

Klassikalise näitena võib nimetada Ida-Berliinis asuvat endise Saksa DV parlamendihoonet *Palast der Republik*, mille saneerimine asbesti suure koguse tõttu (eeskätt asbestkrohvina) osutus võimatuks ja mille lammutamine peaks lõppema aastal 2008.

Vedelatest elektrotehnikas varem kasutatud isoleermaterjalidest kujutavad suurimat ohtu keskkonnale **polüklorodifenüülid** $(C_{12}H_{10-x}Cl_x)_n$ (n = 1…9), mida on maailmas turustatud alates aastast 1929 nimetuste all *arokloor* ja *püranool* (USAs), *askareel* (Euroopas) *sovool* ja *sovtool* (mõlemaid NSV Liidus). Neid vedelikke kasutati trafo- ja kondensaatoriõli asemel kui mittepõlevaid, heade dielektriliste omadustega ja keemiliselt stabiilseid aineid. Kahjuks on nad aga mürgised, mistõttu nende kasutamisel tulï järgida rangeid ohutusnõudeid ja neid sisaldavate seadmete käidust kõrvaldamisel tuli need tingimata saata probleemjäätmete käitlemise tehastesse. Tulekahju korral lagunevad polüklorodifenüülid osaliselt hapnikuga ühinedes väga mitmesugusteks ühenditeks, mille hulgas on ülimürgised *dioksiin* ja

furaan. Seetõttu on nende ainete kasutamine alates aastast 1989 kogu maailmas keelatud. Peale elektrotehnika on neid aga kasutatud nt värvide tootmisel, kusjuures ebatäiuslikest tootmisseadmeist on neid pääsenud pinnasesse ja veekogudesse, sealhulgas Läänemerre. Nende lagunemine ohutumateks ühenditeks kestab looduses ligikaudu 30 aastat.

Ainete hulka, mis normaaltalitlusel probleeme ei tekita, kuid võivad osutuda ohtlikeks tulekahjude korral, kuuluvad halogeene sisaldavad elektrilised isoleermaterjalid, eeskätt **polüvinüülkloriid** $(C_2H_3Cl)_n$ ja **polütetrafluoroeteen** ehk *teflon* $(C_2F_4)_n$. Tulekahju korral tekivad nende materjalide põlemissaadustena soolhape HCl või fluorhape HF, mis nõrgestavad ehitustarindeid ja kiirendavad nende kokkuvarisemist, peale selle aga kujutavad endast äärmiselt ohtlikke kopsumürke. Seetõttu on juhtmete ja kaablite tootjad hakanud järjest enam kasutama *halogeenivabu* isoleermaterjale ja mõnedes Euroopa maades (nt Taanis) on polüvinüülkloriidisolatsiooniga juhtmete ja kaablite kasutamine keelatud.

Ka selline levinud ja suhteliselt ohutu isoleervedelik nagu **trafoõli** võib seadmete lekete korral tekitada õlireostust. Et seda ei juhtuks, on elektripaigaldistes kõigi õli sisaldavate seadmete (trafode, õlilülitite jm) all õlikogumisvannid, kust õli võib torude kaudu valguda ka suuremahulistesse *õlikoguritesse*.

Ulatuslikke õlireostusi võib tekkida, nagu juba kirjeldatud jaotises **3.2**, naftasaaduste transpordil, eriti tankerite õnnetustel ja toruliinide kahjustumisel.

Naftareostusi on tekitatud ka tahtlikult. Suurim neist leidis aset Iraagi agressiooni ajal Kuveidi vastu, mil veebruaris 1991 pumbati diktaator Saddam Husseini käsul Pärsia lahte ligi 500 Mt toornaftat, pärast seda pandi aga põlema kõik Kuveidi naftaväljad.

Käidust kõrvaldatud elektri- ja elektroonikaseadmed võivad sisaldada ohtlikke aineid, kuid võivad osutuda ka hinnaliseks sekundaartoormeks. Seetõttu kehtestati aastal 2004 Euroopa Liidus direktiiv, mille kohaselt kogu elektri- ja elektroonikaromu tuleb suunata jäätmekäitlustehastesse. Vastavalt sellele peavad kõik kauplused elanikelt olmeelektriseadmeid vastu võtma ja sellistesse tehastesse edasi suunama.

Keskkonnaohtlikku saastet võib tekkida ka kütuste kaevandamisel. Söekaevandustest suunatakse ventilatsiooniseadmete kaudu atmosfääri näiteks kaevandusgaas (metaan), mis kuulub kasvuhoonegaaside hulka (vt jaotis **7.2**). Maagaas eraldub ka nafta puuraukudest ja, kuna naftatootjad enamasti ei taha endale võtta lisakulutusi maagaasi salvestamiseks ja edastamiseks, on seda seni kohapeal nn *tõrvikutes* põletatud, sest põletamisel tekkiv süsinikdioksiid on nõrgema kasvuhoonenähtust tekitava toimega kui maagaasis sisalduv metaan. Järjest enam püütakse aga kohustada naftatootjaid maagaasi naftaleiukohtades mitte põletama, vaid hinnalise kõrvalsaadusena koguma ja turustama.

Üli-keskkonnaohtlikke kemikaale kasutatakse sageli keemiatehastes. Tehnoloogiliste seadmete ja kemikaalimahutite rikete korral võib tekkida õhu, pinnase ja veekogude väga ulatuslik mürgitamine. Suurim taoline õnnetus leidis aset detsembris 1984 Bhopalis (India), kus kontsernile *Union Carbide* kuuluvas pestitsiiditehases toimunud lekke tõttu pääses keskkonda 40 tonni ülimürgist metüülisotsüanaati. Tehase ümbruses sai surma ligi 3000 inimest ja vähemalt 15 000 inimest suri hiljem mürgistusest saadud haiguste tagajärjel.

Ohtlik saaste võib tekkida ka teadmatusest. Nii näiteks kasteti USA väikelinna Times Beachi (Missouri osariigis) tänavaid aastail 1972–1976 kohaliku keemiatehase jääkõlidega, mis sisaldasid ülimalt mürgist dioksiini. USA Keskkonnakaitseagentuuril (*Environmental Protection Agency*) tuli kogu linn 32 mln dollari eest ära osta ja seejärel lammutada, mürgitatud pinnas aga ära vedada.

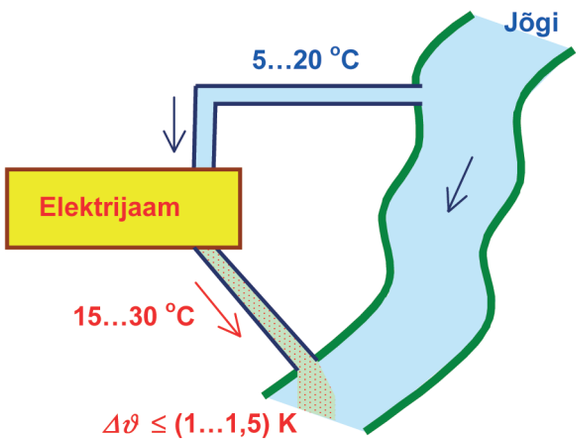
Saaste võib olla ka **radioaktiivne**. Maailma suurimat radioaktiivse saaste katastroofi (Tšornobili 4. reaktori plahvatust) vaadeldi jaotises **2.8**. Radioaktiivsed preparaadid ja kiirituse teel radioaktiivseks muutunud materjalid ja esemed võivad aga sattuda keskkonda ka lohakusest. Eriti käib see ehitustöödel kasutatavate radioaktiivsete läbivalgustusseadiste kohta, mis vaatamata rangele arvestusele aeg-ajalt prügilatesse satuvad.

Suurimad terveid maailmajagusid ja mõnikord kogu maakera haaravad keskkonnakahjustused tekivad vulkaanipursetel. Nii näiteks algas juunis 1783 Islandi vulkaanisüsteemi *Lakagigar* 130 kraatri purse, mis kestis vaheaegadega kuni veebruarini 1784. Õhku, kuni 15 km kõrgusele paiskus 122 Mt vääveldioksiidi, mis levis Lääne- ja Kesk-Euroopani. Islandil suri 1/3 elanikest ja hukkus üle 50 % koduloomadest, Inglismaal suri 1783. aasta sügisel 23 000 inimest. Prantsusmaal hävis mitmel aastal põllusaak, algasid näljahädad ja aastal 1789 puhkes nende tagajärjel Suur Prantsuse Revolutsioon [7.10].

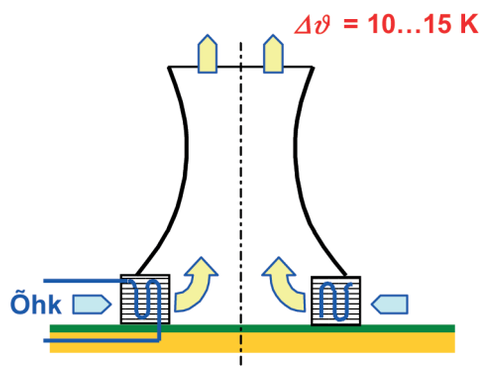
7.5 SOOJUSLIK TOIME KESKKONNALE

Auruturbiinelektrijaamades tuleb teatavasti suur kogus soojust ära viia kondensaatorite jahutusveega (sageli enam kui pool kütuses sisalduvast energiast). Kui jahutusvett võetakse veekogudest ja juhitakse tagasi samuti veekogudesse, võib see vee temperatuuri vee-elustiku seisukohast ohtlikult kõrgendada (joonis **7.5.1**). Et seda ei juhtuks, on vee temperatuuri tõusule kehtestatud sellekohased piirangud. Enamasti lubatakse vee temperatuuri kohalikku tõusu mitte enam kui 1…1,5 K võrra.

Kui kondensaatorite jahutusvett jahutatakse jahutustornides, võib tekkida õhu kohaliku soojenemise ja temperatuuri inversiooni oht (joonis **7.5.2**), mis võib tugevdada muudel põhjustel tekkinud inversiooni (vt jaotis **7.4**).



Joonis 7.5.1. Temperatuuri tõus veekogus vee kasutamisel auruturbiinide kondensaatorite jahutamiseks



Joonis 7.5.2. Õhu kuumenemine jahutustornis

7.6 TOIME MAAKASUTUSELE JA MAASTIKULE

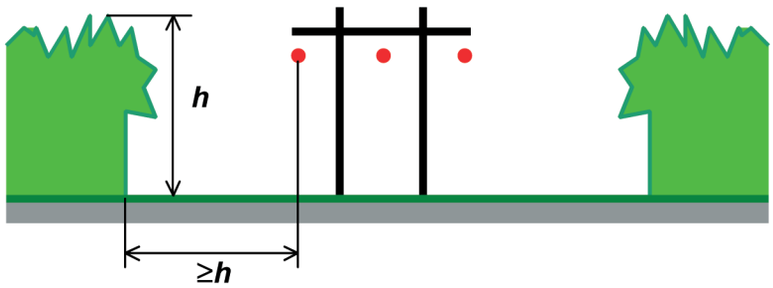
Energiapaigaldised võivad mitmel viisil ebasoodsalt mõjutada maakasutust, loodusmaastikke ja ökoloogilisi süsteeme. Nende viiside hulgas võib esmajärjekorras nimetada

- maa võtmist kütuse- ja maagikarjääride alla,
- maa võtmist nafta- ja gaasipuurväljade alla,
- kütuse või maagi aheraine puistanguid,
- tuhapuistanguid ja tuhajärvi,
- nõrgalt radioaktiivsete tuumkütuse tootmisjääkide puistanguid,
- maa vajumist ammendatud kaevanduste kohal,
- maa võõrandamist elektrijaamade, elektri- ja toruliinide, raud- ja maanteede, konveierliinide jms rajamiseks,
- maa põllumajandusliku vm kasutuse ebasoodsat muutumist energiapaigaldiste läheduses,
- turbarabade ammendumist,
- metsade raiet,
- paisjärvede ja veehoidlate rajamist,
- põhjaveetaseme muutumist,
- veekogude elustiku muutumist.

Paljud nendest muutustest on energiarajatiste ehitamisel ja laiendamisel möödapääsmatud. Siiski püütakse nt võõrandatava maa pindala vähendada

- väiksemamõõtmeliste energiaseadmete kasutamise teel,
- elektri- ja toruliinide kaitsevööndi kitsendamise teel,
- kaabelliinide kasutamise teel õhuliinide asemel,
- energiarajatiste paigutamisega asustamata või maaharimiseks vähekõlbulikesse piirkondadesse.

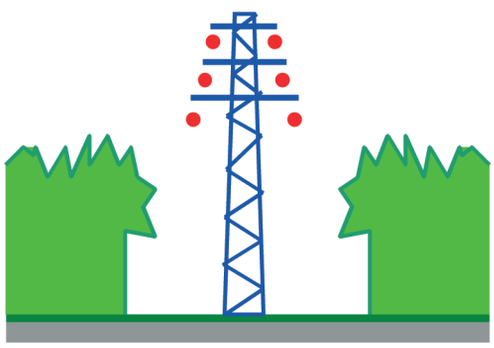
Lähemalt käsitletakse neid probleeme elektrivarustuse kursuses. Alljärgnevalt on näitena esitatud



Joonis 7.6.1. Sihi laius metsas õhuliini juhtmete tavalise (vähimalt nõutava) kõrguse korral

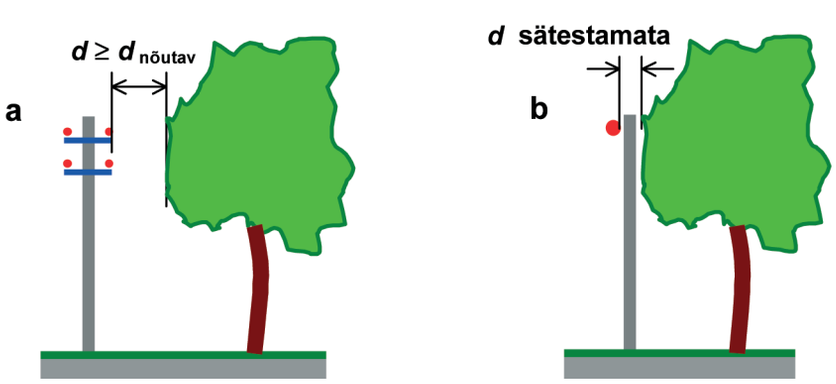
ainult üks viisidest, kuidas vähendada kõrgepinge-õhuliini jaoks vajaliku sihi laiust metsas õhuliini mastide kõrguse suurendamise teel. Nimelt nõutakse õhuliini töökindluse tagamiseks, et nt tormi ajal langevad puud ei saaks kahjustada õhuliini juhtmeid. Selleks peab mastide tavalise kõrguse korral puude kaugus õhuliini äärmisest juhtmest võrduma ligikaudu puude kõrgusega (joonis **7.6.1**), mis nõuab suhteliselt laia sihi rajamist. Kui aga kasutada nii kõrgeid maste, et juhtmed paiknevad puude latvadest kõrgemal, võib siht olla tunduvalt kitsam (joonis **7.6.2**), mis teeb metsa ühtlasi tormikindlamaks ja vähendab pinnase võimalikku erosiooni.

Madal- ja keskpingeliinide rajamisel saab puude mahavõtmist vältida õhukaablite kasutamise teel paljasjuhtmete asemel. Paljasjuhtmete korral tuleb sageli ette näha sihte nagu kõrgepingeliinides (joonis **7.6.1**) või järgida teatavaid vähimalt nõutavaid kaugusi puude võradest (joonis **7.6.3,a**). Kui kasutada õhukaableid, võivad need kulgeda ükskõik kui lähedal puudele ja ehitistele (joonis **7.6.3,b**), mõnikord isegi läbi puude võrade.



Joonis 7.6.2. Sihi laius metsas õhuliini juhtmete kõrge paigutuse korral

Metsade kaitsele tuli hakata tähelepanu pöörama juba 27. sajandil eKr. Nimelt raiusid sumerlased maha praeguses Lõuna-Iraagis laiunud seedrimetsad, mille tagajärjel tekkis pinnase erosioon ja hävis mitte üksi viljakandev pinnas, vaid lõpuks kogu Sumeri tsivilisatsioon. Urartu riigis kehtestati seejärel (tõenäoliselt esimestena maailmas) seadused allesjäänud metsade kaitseks.,



Joonis 7.6.3. Madalpinge-õhuliini kaugus puudest paljasjuhtmete (a) ja õhukaabli (b) kasutamisel

7.7 ELEKTROMAGNETVÄLJAD

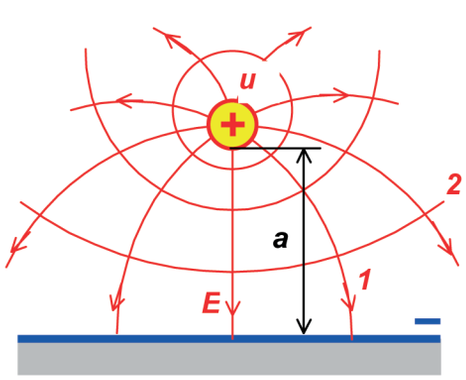
Elektriseadmed põhinevad elektromagnetväljade tekitamisel ja kasutamisel. Sageli võivad aga need väljad ulatuda väljapoole elektriseadmeid ja esile kutsuda

- häireid muude elektriseadmete talitluses,
- ebasoodsaid toimeid inimesele ja muudele elusolenditele.

Mingi seadme poolt tekitatavat soovimatut, muudele seadmetele kahjulikult toimida võivat elektromagnetvälja nimetatakse ***häiringuks***, sellise välja teket aga ***emissiooniks***. Vastupidavust häiringu toimele nimetatakse ***häiringukindluseks***. Kui mingis ühes seadmes tekkiva häiringu suhtes on mingi teine seade piisavalt häiringukindel, nimetatakse neid seadmeid ***elektromagnetiliselt ühilduvateks***. Elektromagnetilise ühilduvuse tagamine on elektriseadmete projekteerimisel, valikul ja kasutamisel äärmiselt oluline ja seda käsitletakse põhjalikult õppeaines *Elektrivarustus*. Käesolevas raamatus vaadeldakse lühidalt üksnes elektromagnetväljade toimet inimesele.

Alalisvoolul ja suhteliselt madalsageduslikul vahelduvvoolul (kuni mõnisada hertsi) saab eraldi käsitleda *elektrivälja* ja *magnetvälja* toimet. Vastavalt sellele on välja töötatud ka rahvusvahelisi tervishoiunõudeid nende väljade enimalt lubatava tugevuse kohta.

Elektrivälja jaotuse näide mingis ruumiosas on kujutatud joonisel **7.8.1**. Selle ligikaudseks iseloomustamiseks kasutatakse enamasti keskmist väljatugevust elektriliselt pingestatud keha (nt kõrgepingeliini juhtme) ja maa vahel



Joonis 7.8.1.
Elektriväli pingestatud osa ja maa vahel (näide).
***1* välijoon, *2* samapotentsiaalijoon**

$$E_{keskm} = \frac{u}{a}$$

E_{keskm} keskmine väljatugevus V/m
u pingestatud osa pinge V
a kaugus pingestatud osa ja maa vahel m

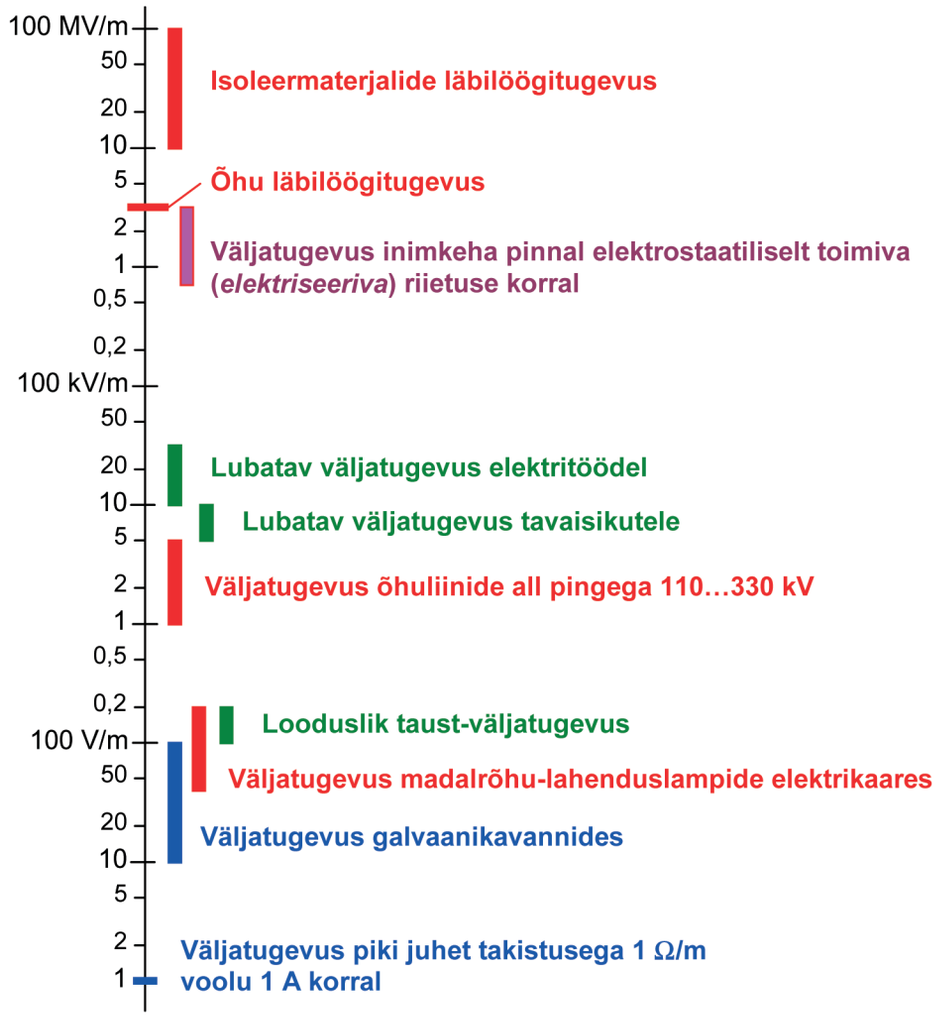
Elektrivälja tugevus kahe eri potentsiaaliga osa või pinna vahel on enamasti väga ebaühtlane. Seetõttu määratakse selle täpsemad väärtused (nt inimeste võimalikus asukohas) mõõtmiste teel.

Loodusliku alalis-elektrivälja tugevus Maa pinnal on 100…200 V/m. Ka tugevam alalis-elektriväli ei kutsu enamasti esile mingisuguseid tervisele kahjulikke nähtusi. Nii näiteks võib inimese keha pinnal sünteetilisest materjalist riietuse kandmisel või isoleerpõrandal käies tekkida elektrostaatiline pinge kuni 20 kV ja elektrivälja tugevus kuni 3 MV/m. Suuremaks väljatugevus tavaliselt tõusta ei saa, sest enamasti tekib nimetatud väärtusel elektrostaatiline sädelahendus. Inimkeha elektrostaatilisel laengul arvatakse olevat koguni raviv toime (räägitakse näiteks tervistavast sünteetilisest pesust). **Vahelduv elektriväli** võib aga esile kutsuda elektrivoolu inimkeha kudedes ja koerakkude talitluse mõningaid häireid, mistõttu Rahvusvaheline Kiirguskaitse Liit (*International Radiation Protection Association, IRPA*) on kehtestanud väljatugevuse enimalt lubatavaks väärtuseks tavaisikutele välja kestval toimel (24 h kestel) 5 kV/m ja lühiajalisel toimel 10 kV/m. Elektritöödel lubab sama organisatsioon väljatugevust kestvalt (8 h jooksul) 10 kV/m, lühiajaliselt aga kuni 30 kV/m. Joonisel **7.8.2** on esitatud mõned näited elektripaigaldistes esinevate väljatugevuse väärtuste kohta. Nagu näitab joonis, ei ole inimeste sattumine lubamatu tugevusega vahelduv-elektrivälja toime alla kuigi tõenäoline.

Magnetväli ümbritseb kõiki voolust läbitud juhte. Lihtsaimal juhtumil – sirge ning lõpmata väikese ristlõikega juhi korral (joonis **7.8.3**) – avaldub magnetvälja induktsioon teatavasti valemiga

$$B = 2 \cdot 10^{-7} \frac{i}{r}$$

B magnetvälja induktsioon T
i vool juhis A
r kaugus juhist m

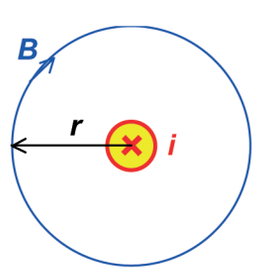


Joonis 7.8.2. Elektrivälja tugevuse näiteid

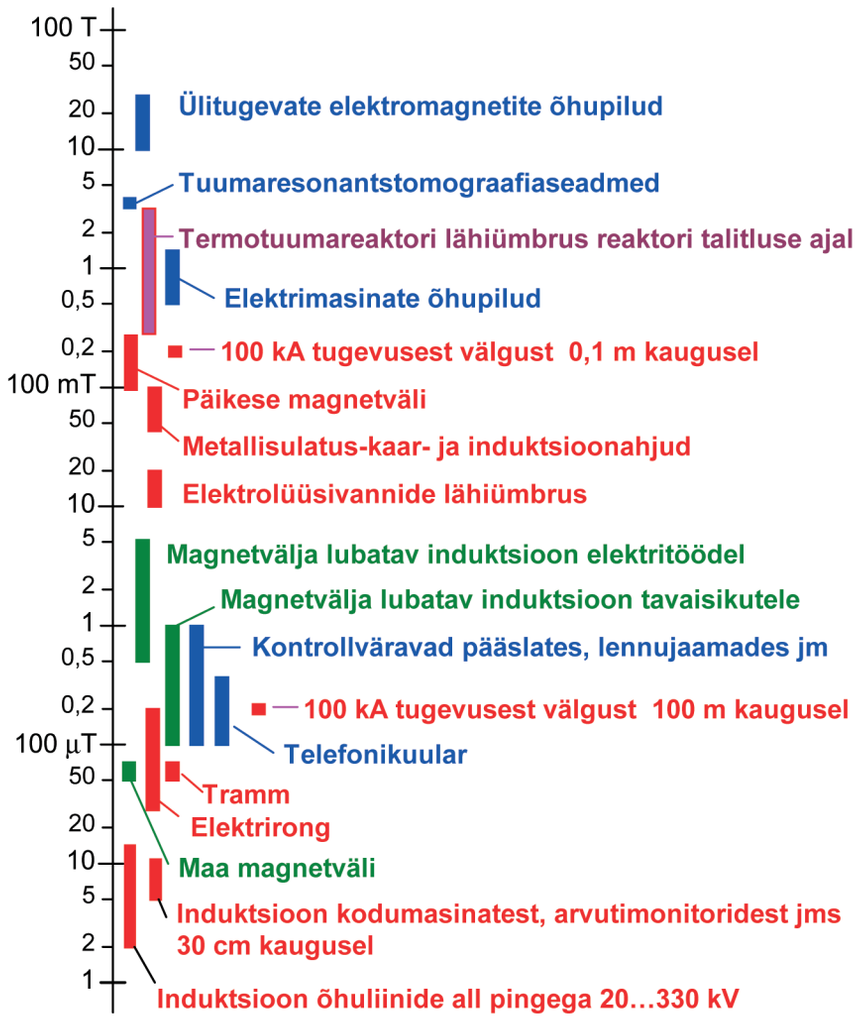
Alalis-magnetväli võib indutseerida inimkehas voolu üksnes siis, kui inimene magnetväljas liigub. Vahelduv magnetväli indutseerib voolu aga ka siis, kui inimene on magnetvälja suhtes liikumatu. Madalal sagedusel (kuni mõnisada hertsi) võib indutseeritud vool esile kutsuda närvi- jm rakkude talitlushäireid, kõrgemal sagedusel muutub magnetvälja energia põhiliselt soojuseks. Mida kõrgem on sagedus, seda väiksemale sügavusele elektromagnetväli inimese kehasse tungib ja raadiosagedusel (nt mobiiltelefoni kasutamisel) jääb sissetungimissügavus mõne millimeetri piiridesse.

Planeet Maa kujutab endast teatavasti püsimagnetit, mille magnetvälja induktsiooni püstkomponent on 46 μT, rõhtkomponent aga 15 μT. Rahvusvaheline Kiirguskaitse Liit (*IRPA*) on kehtestanud magnetvälja induktsiooni enimalt lubatavaks väärtuseks tavaisikutele välja kestval toimel (24 h kestel) 100 μT ja lühiajalisel toimel 1000 μT. Elektritöödel lubatakse magnetvälja induktsiooni kestvalt (8 h jooksul) 500 μT, lühiajaliselt aga kuni 5000 μT. Joonisel **7.8.4** on esitatud mõned näited elektripaigaldistes esinevate magnetvälja induktsiooni väärtuste kohta.

Joonisel esitatud näidetest võib teha järelduse, et inimese sattumine lubamatult tugeva magnetvälja toime alla on võimalik üksnes tööstusettevõtetes, väga suure talitlusvooluga seadmete läheduses.



Joonis 7.8.3. Magnetväli sirge juhi ümber (näide). Märk × tähendab, et voolu suund on tahapoole



Joonis 7.8.4. Magnetvälja induktsiooni näiteid

7.8 MÜRA JA VALGUSSAASTE

Keskkonnasaasteks saab nimetada ka energeetikaseadmetes tekkivat vibratsiooni ja müra. Seda võivad põhjustada

- pöörlevate või muude liikuvate osade ebatäpne tasakaalustus,
- pöörlevate osade pinna ebatasasustest tingitud õhuvõnkumine,
- vahelduvvooluseadmete juhtidevahelised ja magnetsüsteemi lehtedevahelised vahelduvad elektrodünaamilised jõud, mille sagedus on 2 korda suurem kui voolu sagedus,
- ferromagnetiliste materjalide magnetostriktsioon, mille sagedus on samuti 2 korda suurem kui voolu sagedus,
- juhtmete või muude osade tuulest tingitud vibratsioon,
- ventilaatorite abil puhutava õhu turbulentne liikumine,
- hõõrdumisest (nt elektrimasinate harjadel) tekkivad helinähtused.

Enamasti ei ületa energiaseadmete müra vastavate tervishoiunormidega sätestatud piire, kuid oma kestva iseloomu tõttu võib see olla häiriv (*diskomfortne*). Seetõttu püütakse müra ja vibratsiooni tekkepõhjusi vältida juba energiaseadmete projekteerimisel ja valmistamisel. Suurt tähelepanu osutatakse nt pöörlevate osade tasakaalustamisele (*balansseerimisele*), pöörlevate ja hõõrduvate osade pinnasiledusele ja ventilatsioonisüsteemide optimaalsele aerodünaamilisele kujundamisele. Magnetsüsteemide rauapakid pressitakse või liimitakse kokku selliselt, et lehtede elektromagnetilistest jõududest tingitud võnkumine ei oleks võimalik. Magnetostriktsioonvõnkumisi püütakse vähendada ferromagnetiliste materjalide sobiva valikuga. Heli ja vibratsiooni leviku tõkestamiseks kasutatakse ümbriseid ja vibratsioonisummutavaid kinnitustarindeid. Lähemalt vaadeldakse kõiki neid võtteid õppeaines *Elektrimasinad*.

Müra ja vibratsiooni saab sageli ära hoida ka elektriseadmete vastava valikuga. Nii näiteks võidakse mõnikord kasutada vahelduvvooluseadmete asemel alalisvooluseadmeid, lahenduslampide liiteseadistes aga sagedusmuundureid väljundsagedusega üle 20 kHz (vt jaotis **6.6**). Seadmete paigaldamisel nähakse ette vibratsioonisummutavad alused ja vundamendid, tugevat müra tekitavad seadmed võidakse aga varustada heli levikut tõkestavate ümbristega või paigutada omaette, hoone muudest osadest piisavalt hästi eraldatud ruumidesse. Välispaigaldiste korral on müra tekitavate seadmete (nt võimsate elektrimasinate ja trafode) nõutavad paigutuskaugused hoonetest sätestatud sellekohaste standarditega, mida elektripaigaldiste projekteerimisel hoolikalt järgitakse.

Valgussaaste tekib enamasti välisvalgustuse ebasobival kujundamisel ja seisneb näiteks valguse levikus kas mittevajalikes suundades (üles või valgustust mittenõudvatele aladele) või hoonete akendesse. Valgussaaste võib häirida mitte üksnes inimesi, vaid ka looma- ja taimeriiki ja sellega kaasneb alati elektrienergia liigkulu. Valgustuspaigaldiste projekteerimisel ja ehitamisel püütakse seda nähtust seetõttu igati vältida. Lähemalt vaadeldakse vastavaid võimalusi õppeaines *Elektervalgustus*.

8 Energeetika arengusuunad

8.1 Üldmõisted 238

8.2 Kütusekriis 239

8.3 Hüdro- ja tuuleenergeetika arengusuunad 242

8.4 Tuumaenergeetika arengusuunad 244

8.5 Alternatiivsd energiaallikad 249

8.6 Vesinikuenergeetika 253

8.7 Energia kokkuhoiupõhimõtted 255

8.8 Eesti energeetika tulevikuväljavaateid 258

8 ENERGEETIKA ARENGUSUUNAD

8.1 ÜLDMÕISTED

Energeetika, mis 1970ndate aastateni arenes suhteliselt ühtlase kiirusega ja ilma nähtavate raskusteta, on nüüdisajal sattunud vastuoludesse, mille ületamine on raske ja mõnikord isegi võimatu. Ühelt poolt tarbib arvuliselt kasvav inimkond järjest rohkem energiat, teiselt poolt on aga selgeks saanud energiavarude piiratus ja, nagu näidati peatükis **7**, praeguste energiatootmisviiside kahjulik toime elukeskkonnale. USA Energiadepartemangu (*Department of Energy, DOE*) 2005. aasta prognoosi järgi on oodatav energiatarbimise kasv aastani 2025

- arenenud turumajandusmaades 1,1 %/a,
- üleminekumaades (mille hulka loetakse kuuluvat ka Eesti) 1,6 %/a,
- madalama majandustasemega maades 3,2 %/a,
- maailmas tervikuna 2,0 %/a.

Võrreldes aastaga 2002 suureneb maailma kaubalise energia tarbimine selle prognoosi kohaselt 57 % võrra. Seejuures eeldatakse, et energia kasutamine muutub tänu tehnika arengule tõhusamaks, mistõttu sisemajanduse kogutoodang kasvab kiiremini kui energiatarbimine ja nimelt

- arenenud turumajandusmaades 2,5 %/a,
- üleminekumaades 4,4 %/a,
- madalama majandustasemega maades 5,1 %/a,
- maailmas tervikuna 3,9 %/a.

Energiatarbimise kasv tähendab energeetika- ja tööstusrajatiste ning transpordivahendite toime suurenemist keskkonnale. Seni on õnnestunud peatada vaid ühe kahjuliku nähtuse – Maa osoonikihi hõrenemise – edasine areng (vt jaotis **7.3**). Maa kliima soojenemist põhjustava kasvuhoonenähtuse tugevnemist ei saa aga veel ilmselt peatada, kuid seda saab siiski aeglustada

- energiatarbimise vähendamise teel,
- süsinikkütuste asendamise teel süsinik-vesinikkütustega või (ideaaljuhul) vesinikuga,
- fossiilkütuste asendamise teel taastuvate kütustega,
- põlevkütuste asendamise teel tuumaenergiaga,
- põlevkütus- ja tuumaelektrijaamade asendamise teel hüdro-, tuule-, geotermaal- ja päikeseelektrijaamadega,
- päikesekiirguse laialdase kasutamisega hoonete küttes ja soojaveevarustuses,
- soojuspumpade rakendamisega hoonete küttesüsteemides.

Energiatarbimist saab põhimõtteliselt vähendada eeskätt järgmiste võtetega:

- tootmisprotsesside energiamahukuse vähendamisega,
- energiamuundurite kasuteguri suurendamisega,
- energiaedastuskadude vähendamisega,
- energiamuundusseadmete omavahelise kombineerimisga lähteenergia täielikuma kasutamise eesmärgil,
- energia säästliku kasutamisega ja energiakadude vähendamisega energia tarbimisel.

Elukeskkonna saastamist püütakse piirata

- mürgiste ja muude keskkonnakahjulike ainete kasutusest kõrvaldamise teel,
- heitgaaside ja heitvee parema puhastamise teel,
- toodete koostismaterjalide parema taaskasutamise teel,
- mittetaaskasutatavate põlevate jäätmete põletamise teel.

Enamikku nendest meetmetest rakendatakse riikliku seadusandluse ja rahvusvaheliste konventsioonide kaudu. Kuna vaatamata senistele meetmetele on energiaseadmetest tingitud oht elukeskkonnale suurenenud, on oodata nii sellekohase seadusandluse kui ka rahvusvaheliste kokkulepete muutumist tunduvalt rangemaks.

Euroopa Liidu energeetika arengu üldstrateegia on formuleeritud Euroopa Komisjoni poolt 2006. aastal koostatud *Rohelises Raamatus* [8.1] ja selles nähakse ette kuus esmajärgulist arengusuunda:

- Euroopa vaba elektri- ja gaasi-siseturu arengu lõpuleviimine,
- kindla energiavarustuse tagamine liikmesriikide omavahelise solidaarsuse kaudu,

- jätkusuutliku, tõhusa ja mitmekülgsema energiakandjate kombinatsiooni saavutamine,
- tõhusate kliimakaitsemeetmete rakendamine, nähes muuhulgas ette, et kasvuhoonegaaside emissiooni maksimum jääb aastasse 2005, pärast seda aga tuleb seda võrreldes 1990. aastaga 15 % või isegi 50 % võrra vähendada,
- innovatiivsete energiatehniliste lahenduste rakendamine,
- ühtse energiaalase välispoliitika rakendamine.

8.2 KÜTUSEKRIIS

Nagu juba jaotises **1.3** kirjeldatud, on Maa fossiilkütuste varud lõplikud, mistõttu need lähemas või kaugemas tulevikus ammenduvad. Peale selle on need jaotunud maailmajagude ja riikide vahel väga ebaühtlaselt, mistõttu riigid või riikide rühmad võivad oma huvides dikteerida mõnede kütuste hindu ja viia kütust ostvaid riike kriisiolukordadesse. Üks selline kriisiolukord tekkis Euroopa ja Ameerika riikides 17. oktoobril 1973, kui Naftat Eksportivate Riikide Organisatsioon (*Organization of Petroleum Exporting Countries, OPEC*), mis asutati aastal 1960 ja kuhu kuuluvad Alžeeria, Araabia Ühendemiraadid, Ecuador, Gabon, Indoneesia, Iraak, Iraan, Katar, Kuveit, Liibüa, Nigeeria, Saudi Araabia ja Venezuela, teatas oma erakorralisel, Araabia–Iisraeli sõja puhkemise puhul kokkukutsutud konverentsil oma naftatoodangu vähendamisest igas kuus 5 % võrra, 28. oktoobril aga tõstis nafta hinna neljakordseks ning lõpetas nafta ekspordi USAsse ja Hollandisse. Tekkis olukord, mis muundunud kujul kestab seniajani ja mida nimetatakse *ülemaailmseks kütusekriisiks*. Kriisi teeb teravamaks asjaolu, et maailma naftavarude ammendumist võib prognoosida, nagu näitab allolev tabel **8.2.1**, juba enne 21. sajandi lõppu.

Tabelis **8.2.1** esitatud tinglik ammendumisaeg on saadud nafta kindlakstehtud varude jagamise teel aastatoodanguga aastal 2003. Kuna varud on alates aastast 2002 vähe, kuid siiski selgelt vähenenud, tarbimine maailmas aga arvatakse kasvavat aastaks 2025 vähemalt 50 % võrra, võivad naftavarud, kui ei avastata uusi suuri naftamaardlaid, lõppeda varem.

Veidi kauem saab maailmas toota maagaasi (tabel **8.2.2**), veel kauem aga kivisütt (tabel **8.2.3**). Piltlikult on nafta-, maagaasi- ja kivisöevarude jaotus maailmas kujutatud joonistel **8.2.1**, **8.2.2** ja **8.2.3**.

Kütusevarude kohta võib eri allikatest leida ka teistsuguseid andmeid, mille erinevus üksteisest on enamasti piirides ±15 %.

Fossiilkütustest kasutatakse maailmas peale nafta, maagaasi ja kivisöe ulatuslikult ka pruunsütt, põlevkivi ja turvast (viimast loetakse tavaliselt

Tabel 8.2.1. Maailma naftavarude ja -toodangu jaotus aastal 2003

	Kindlaks-tehtud varu Gt	Toodang Mt/a	Tinglik ammendumis-aeg a		Kindlaks-tehtud varu Gt	Toodang Mt/a	Tinglik ammendumis-aeg a
Saudi Araabia	35,7	497	72	Mehhiko	6,6	188	35
Iraak	15,1	63	240	Hiina	5,3	169	31
Iraan	14,7	182	81	Liibüa	3,9	71	55
Kuveit	13,3	104	128	USA	3,8	349	11
Araabia Ühendemiraadid	12,9	123	105	11 suurimate varudega riiki	128,1	2284	56
Venezuela	10,1	138	73	Muud riigid	20,4	1348	15
Venemaa	6,7	400	17	**Maailm**	**148,5**	**3632**	**41**

Tabel 8.2.2. Maailma maagaasivarude ja -toodangu jaotus aastal 2003

	Kindlaks-tehtud varu 10^{12} m³	Toodang 10^9 m³/a	Tinglik ammendumis-aeg a		Kindlaks-tehtud varu 10^{12} m³	Toodang 10^9 m³/a	Tinglik ammendumis-aeg a
Venemaa	44,8	590	76	Alžeeria	3,7	81	46
Iraan	23,2	63	370	Nigeeria	3,5	15	230
Katar	9,0	33	270	Iraak	3,4	4	850
Araabia Ühendemiraadid	6,6	48	138	10 suurimate varudega riiki	108,9	1475	74
Saudi Araabia	5,3	58	91	Muud riigid	45,1	1083	42
USA	5,2	550	9	**Maailm**	**154,0**	**2558**	**60**
Venezuela	4,2	33	127				

Tabel 8.2.3. Maailma kivisöevarude ja -toodangu jaotus aastal 2003

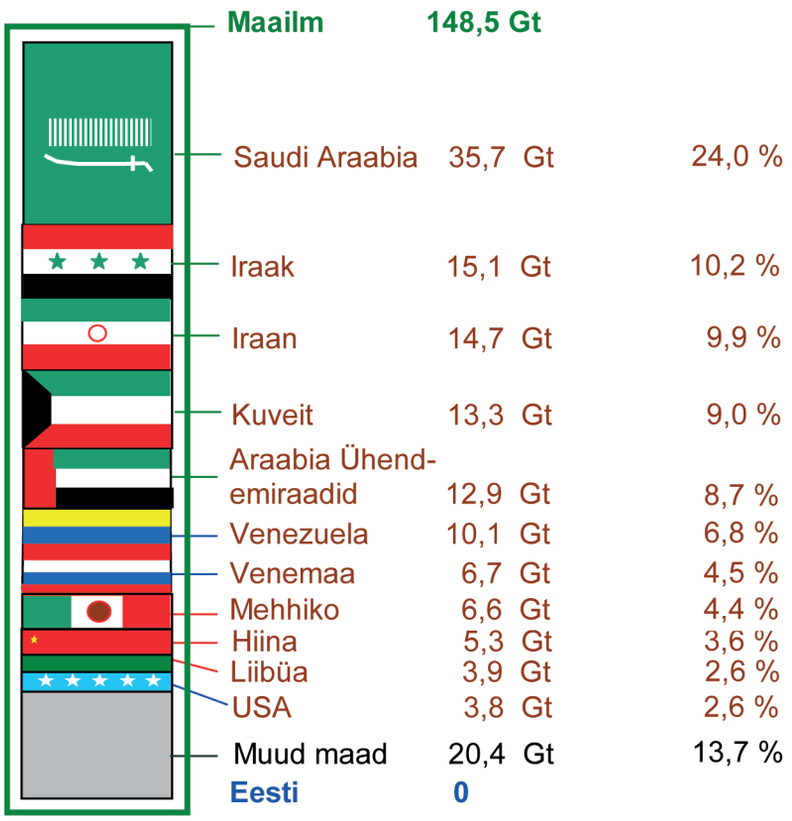
	Kindlaks-tehtud varu Gt	Toodang Mt/a	Tinglik ammendumis-aeg a		Kindlaks-tehtud varu Gt	Toodang Mt/a	Tinglik ammendumis-aeg a
USA	246	896	270	Venemaa	76	184	410
India	197	348	560	Saksamaa	67	29	2300
Suurbritannia	150	28	5300	Poola	60	102	590
Lõuna-Aafrika Vabariik	128	238	540	9 suurimate varudega riiki	1128	3409	330
Hiina	114	1315	87	Muud riigid	84	474	180
Austraalia	90	269	330	**Maailm**	**1212**	**3883**	**310**

samuti ammenduvaks kütuseks). Eesti energeetika põhineb **põlevkivi** kasutamisel, mida praegu toodetakse ligikaudu 16 Mt aastas, kusjuures majanduslikult kasutuskõlblikke varusid arvatakse olevat ligikaudu 5 Gt.

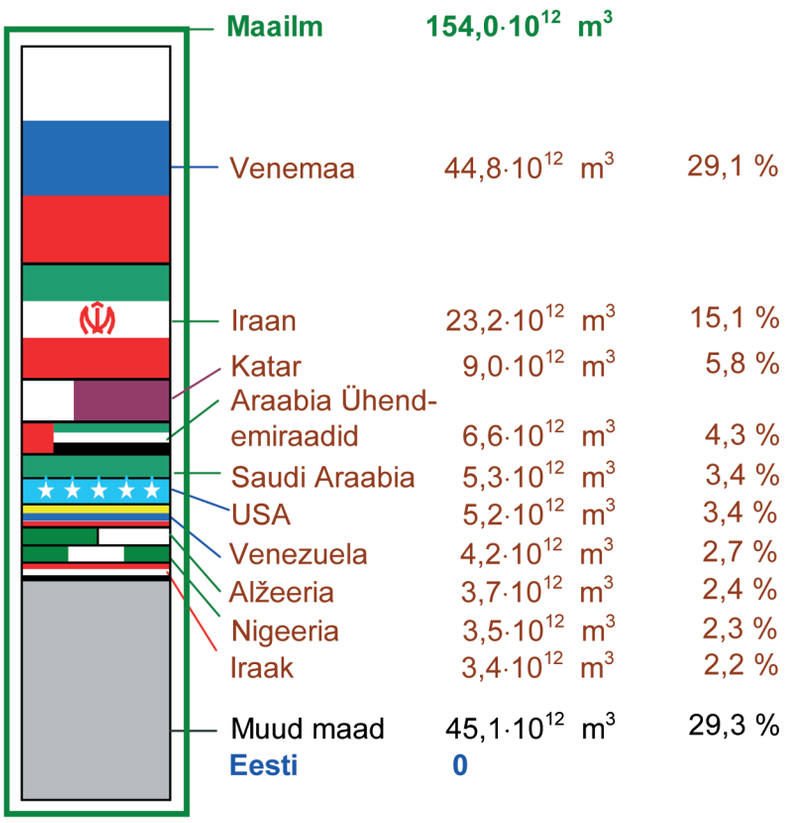
Tabelid **8.2.1**, **8.2.2** ja **8.2.3** võimaldavad järeldada, et kivisöe osatähtsus, mis alates 1960ndaist aastaist on pidevalt vähenenud, võib 2020ndail aastail hakata nafta ja maagaasi nappuse ja kallinemise tõttu uuesti suurenema. Ühtlasi võidakse kivisütt uuesti hakata kasutama gaasi tootmiseks.

Nafta kui kõige kiiremini ammenduva fossiilkütuse tähtsaimate rafineerimissaduste – bensiini ja diislikütuse – asemel on juba praegu kasutusele tulnud etanool ja biodiislikütus (vt jaotis **8.5**). On riike, mis on kehtestanud 10…20 aastaks koostatud kavasid naftast ja naftasaadustest loobumiseks. Esimesena koostas sellise kava aastal 2003 Island ja aastal 2005 võeti ligikaudu samasugune kava vastu Rootsis. USAs kehtestati aastal 2006 seadus, mille kohaselt tuleb aastaks 2015 vähendada Araabia maadest imporditava nafta kogust 75 % võrra. Seega on naftat ja naftasaadusi importivate maade energeetika arendamise tulevikukavades juba hakatud arvestama nafta eelseisvat nappust ja kallinemist. Eestis tuleb kõne alla põlevkiviõli senisest laiaulatuslikum kasutamine katlakütusena, bensiini tootmine põlevkivist ja diislikütuse tootmine taimeõlist (nt rapsiõlist).

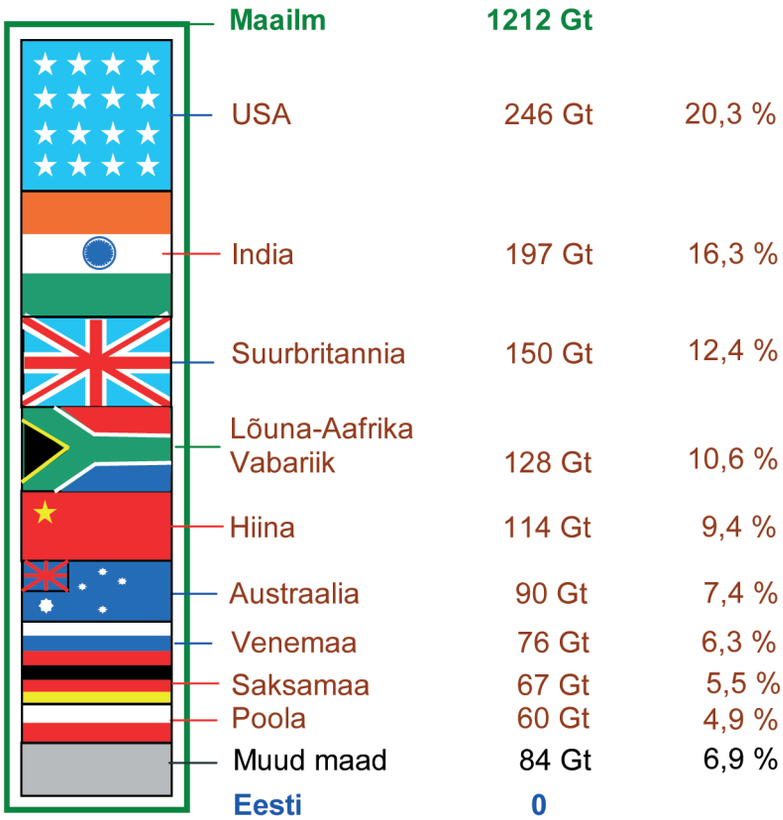
Põlevkivi loetakse ka mujal naftavarude oluliseks täienduseks, sest selle maailmavaru on ligikaudu 11,5 Tt.



Joonis 8.2.1.
Maailma naftavarude jaotus aastal 2003 [1.7]



Joonis 8.2.2.
Maailma maagaasivarude jaotus aastal 2003 [1.7]



Joonis 8.2.3. Maailma kivisöevarude jaotus aastal 2003 [1.7]

Põlevkiviõli tootmine algas Eestis 1924. aastal, mil valmis Kohtla-Järve õlivabrik. Aktsiaseltsi *Eesti Kiviõli* suurem õlivabrik, mis alustas tegevust aastal 1931, võis toota 2500 t põlevkiviõli ja 300 t bensiini kuus. Aastal 1935 andsid Eesti põlevkivikeemiatehased juba 47 kt põlevkiviõli ja 6,3 kt bensiini [8.2]. Eriti tähtsaks pidasid bensiini tootmist Eesti põlevkivist Saksamaa sõjaväevõimud 2. maailmasõja ajal aastail 1941…1944. Pärast II mailmasõda arenes Eesti põlevkivikeemiatööstus edasi ja nt aastal 2005 toodeti Eestis 345 kt põlevkiviõli, millest 222 kt läks ekspordiks, ning 23 kt kerget kütteõli; bensiini enam ei toodeta [6.6].

8.3 HÜDRO- JA TUULEENERGEETIKA ARENGUSUUNAD

Hüdro- ega tuuleelektrijaamades ei teki süsinikdioksiidi ega muid keskkonnakahjulikke aineid. Samal ajal tuleb aga koos hüdroelektrijaamaga rajada ka paisjärv, mis võib üle ujutada põllumajandusmaid, metsi, asulaid, arheoloogilisi ja kultuurimälestisi. Seetõttu püütakse ehitada hüdroelektrijaamu väheasustatud piirkondadesse ja jõgedele, mille säng on kitsas ning sügav, langus aga võimalikult suur. Sellised jõed on maailmas peaaegu kõik juba kasutatud, kuid veel saab ehitada võimsaid hüdroelektrijaamu näiteks

- Jangtse kesk- ja ülemjooksule Lääne-Hiinas üldvõimsusega ligikaudu 60 GW,
- Yalong Jiangi jõele Lääne-Hiinas üldvõimsusega ligikaudu 30 GW,
- Kongo jõele Aafrikas üldvõimsusega ligikaudu 40 GW,
- Jenissei kesk- ja ülemjooksule Venemaal üldvõimsusega ligikaudu 18 GW.

Nende jõgede evitamine ongi kavandatud aastaile 2010…2030 või hiljem. Paljudele jõgedele, eriti Lõuna-Ameerikas ja Kesk-Aasias, saab aga rajada ka väiksemaid hüdroelektrijaamu, võimsusega 1…3 GW, mille ehitamine kas juba käib või on kavandatud lähemale 5…15 aastale.

Teine võimalus hüdroelektrijaamade elektrienergia toodangu suurendamiseks on jaamade laiendamine lisaagregaatide paigaldamise teel. Nii näiteks lõppes mais 2007 kahe lisaagregaadi à 700 MW paigaldamine maailma suurimas, Itaipú

hüdroelektrijaamas Paraná jõel. Sel viisil saab laiendada ka nt Grand Coulee ja Churchill Fallsi hüdroelektrijaama (vt joonis **5.1.4**), Angara kaskaadil aga Ust-Ilimski hüdroelektrijaama. Jaama võimsust saab suurendada ka agregaatide uuendamise (nt turbiini konstruktsiooni moderniseerimise, generaatori ümbermähkimise jms) teel; enamasti saab agregaadi võimsust sellisel viisil suurendada 5…15 % võrra.

Daugava kaskaadil on kavas Pļaviņase hüdroelektrijaama agregaatide uuendamine, kusjuures senise 85 MW asemel on uute generaatorite nimivõimsus 90 MW.

Peale suurte hüdroelektrijaamade rajatakse hulgaliselt ka keskmise võimsusega (100…1000 MW), väike- (5…100 MW), mini- (0,5…5 MW) ja mikro- (alla 0,5 MW) hüdrojaamu. Eesti jõgedele saab selle liigituse järgi ehitada üksnes mikro- ja minihüdrojaamu, mida saab aga täielikult automatiseerida ja milles elektrienergia omahind on tunduvalt väiksem kui suurtes põletuskütuselektrijaamades. Ka ei tekita selliste väikeste jaamade paisjärved enamasti erilisi keskkonnakaitseprobleeme ja võivad maastikku koguni kaunistada.

Aastail 2010…2015 on oodata ka loodete- ja lainehüdroelektrijaamade laiema kasutamise algust.

Tarbimiskeskustest kaugel asuvates hüdroelektrijaamades võidakse toodetavat elektrienergiat kasutada ka kohapeal nt vesiniku tootmiseks, sest vesiniku edastamine võib kujuneda tunduvalt odavamaks kui elektrienergia edastamine (vt jaotised **3.2** ja **8.6**).

Tuuleenergeetika on viimase 10 aasta jooksul arenenud tunduvalt kiiremini kui muud energeetikaharud, mis on tingitud tuuleagregaatide odavnemisest, nende üksikvõimsuse suurenemisest, töökindluse tõusust ja, mis sageli väga tähtis, võimalusest rajada suuri tuuleparke lühikese ajaga (nt 1…2 aastaga). Nii näiteks kasvas maailma tuuleelektrijaamade võimsus aastal 2006 Ülemaailmse Tuuleenergianõukogu (*Global Wind Energy Council, GWEC*) andmeil (ümardatult) 15 GW ehk 25 % võrra ja oli 2007. aasta alguses üle 74 GW, mis võimaldab toota enam kui 1 % maailma kogu elektrienergiast. Suurim absoluutne kasv oli USAs (2454 MW), järgnesid Saksamaa (2233 MW) ja Hispaania (1587 MW). Tuuleelektrijaamade koguvõimsuse järgi (vt joonis **5.5.7**) on maailmas esikohal Saksamaa (20 621 MW). Tuuleolude poolest on soodsamas olukorras mereäärsed riigid, sest mandri sisealadel on tuule keskmine kiirus tuuleelektrijaamade jaoks enamasti ebapiisav. Kuna veel soodsamad on tuuleolud merel, on alanud võimsate tuuleelektrijaamade (võimsusega 500…1500 MW) rajamine rannikulähedasse merre, eeskätt mandrilava madalikele. Selliste jaamade jaoks on kasutusel või väljatöötamisel elektrituulikud nimivõimsusega 3…10 MW. Aastaks 2010 ennustatakse, et maailma tuuleelektrijaamade koguvõimsus võib tõusta väärtuseni 160 GW. Enamik Euroopa soodsate tuuleoludega riike kavandab tuuleelektrijaamadest saadava energia osatähtsuse suurendamist elektrienergia kogutoodangus väärtuseni ligikaudu 20 %.

Tuuleelektrijaamade võimsuse kasv, tuuleolude ajaline muutlikkus ja nende elektrijaamade automaatjuhtimise omapärasused võivad raskendada energiasüsteemide talitlust ja eriti nende juhtimist erandlikes koormusolukordades. Nii näiteks lagunes Euroopa Elektriedastusliitu (*UCTE*, vt jaotis **5.9**) kuuluvate energiasüsteemide ühendus 4. novembril 2006 kolmeks omaette osaks ja jättis 15 minutiks toiteta ligi 15 miljonit kodu suurelt osalt tuuleelektrijaamade ettenägematu sisse- ja väljalülitumise tõttu [8.3].

Et tuuleelektrijaamade negatiivset toimet energiasüsteemidele vähendada, tuleks need varustada elektrienergiasalvestitega. Kahjuks on aga selleks otstarbeks sobivad akumulaatorpatareid sedavõrd kallid, et nende kasutamine ei ole majanduslikult otstarbekohane. Teise energiasalvestusvõimalusena tuleks kõne alla vesiniku tootmine elektrolüüsi teel, kuid ka see salvestusviis on veel suhteliselt kallis. Kõige lihtsamaks energia akumuleerimise võimaluseks peetakse olemasolevate pumpelektrijaamade kasutamist (vt jaotis **4.3**) või uute taoliste jaamade rajamist, kui tuuleelektrijaamade asukoha geoloogilised olud seda võimaldavad.

Kuna suurel maa-alal paiknevate tuuleelektrijaamade võimsuskõikumised ei ole samaaegsed, võivad need vastastikku kompenseeruda. Kui luua nt piisavalt suur üksnes tuuleelektrijaamadest koosnev süsteem, võib selle summaarne võimsus kujuneda ajaliselt küllaltki ühtlaseks ja sellise süsteemi ühendamine soojus- ja hüdroelektrijaamadest koosnevate süsteemidega võib kujuneda probleemivabaks. Aastal 2005 esitasid Iirimaa tuuleenergeetikafirma *Airtricity* ja energeetikaseadmeid tootev rahvusvaheline kontsern *ABB* idee ühendada Suurbritannia, Saksamaa ja Hollandi mandrilavale kavandatavad

võimsad tuuleelektrijaamad kokku süsteemiks *Supergrid* võimsusega 10 GW, kasutades kujunevas võrgus kõrgepingelisi alalis- ja vahelduvvooluliine [8.4]. Ühtlasi alustati sellekohaseid tehnilisi ja majanduslikke uurimusi. Arvatakse, et süsteemi realiseerimine võib alata aastal 2010.

Tuuleelektrijaamade summaarne koormus ühtlustub ka siis, kui need on ühendatud ühelsamal pingel olemasoleva elektrisüsteemi võrku. Sel juhul peab aga võrgu liinide läbilaskevõime olema piisavalt suur, mis väga sageli tähendab seda, et olemasolevate võrkude läbilaskevõimet tuleb suurendada.

8.4 TUUMAENERGEETIKA ARENGUSUUNAD

Tuumaenergeetika senine areng on inimühiskonnas esile kutsunud vastuolulisi arvamusi. Ühelt poolt on selge, et elektrienergia tootmine tuumaelektrijaamades toimub ilma süsinikdioksiidi ja muude keskkonnakahjulike ainete emissioonita ning et tuumkütuse vedu oma väikese koguse tõttu ei koorma mingil olulisel määral olemasolevat raudteevõrku, teiselt poolt aga kardetakse

- tuumaelektrijaamade võimalikke rikkeid, mis võivad endaga kaasa tuua keskkonna radioaktiivse saastumise ohu,
- tuumareaktorites tekkivate radioaktiivsete jäätmete lõppladude mittepiisavat töökindlust,
- võimalust, et tuumareaktoritest saadakse muude jääkainete hulgas tuumarelva valmistamiseks sobivat plutooniumi,
- võimalust, et uraani rikastamistehastes hakatakse tootma peale reaktorite jaoks sobiva rikastusastmega uraani (^{235}U suhtelise kogusega 2…5 %) tuumarelva valmistamiseks vajalikku kõrgrikastatud uraani (^{235}U suhtelise kogusega ligikaudu 95 %), mis võib sattuda vastutustundetute sõjaväediktatuuride või terroristirühmituste kätte,
- radioaktiivsete ainete leket nende veol,
- väga suuri kulutusi lõplikult seismapandud tuumareaktorite lammutamisel.

Tuumaelektrijaamad on võimsusühiku kohta tavaliselt mitu korda kallimad kui kütustpõletavad elektrijaamad, kuid elektrienergia omahind on mõlemal jaamaliigil ligikaudu ühesugune. Kui aga 1970ndail ja 1980ndail aastail tahked kütused odavnesid, odavnes vastavalt ka kütustpõletavatest elektrijaamadest saadav elektrienergia ja kui see samal ajal tuumaelektrijaamades mõnevõrra kallines, lõpetati mitmes riigis (näiteks USAs aastal 1976) tuumaelektrijaamade ehitamine ning kavandati olemasolevate tuumajaamade sulgemist (nt Rootsis ja Saksamaal). Aastal 2006 sai siiski selgeks, et kütuste hankimine elektrijaamade jaoks impordi teel võib kaasa tuua küllaltki olulisi poliitilis-majanduslikke riske, mistõttu on hakatatud kavandama mitte üksnes olemasolevate tuumaelektrijaamade talitluse jätkamist, vaid ka uute jaamade rajamist. Nii näiteks kavatsetakse USAs alustada uuesti tuumaelektrijaamade projekteerimist, Hiina on teatanud vähemalt 32 uue tuumareaktori ehitamisest elektrilise võimsusega à 1000 MW, Soomes algas ülitöökindla kolmanda põlvkonna survevesireaktori *EPR* (*European Pressurized Water Reactor*) paigaldamine. See reaktor elektrilise võimsusega 1600 MW tagab toodetava elektrienergia 10 % võrra madalama omahinna ja tarbib tuumkütuse parema ärakasutamise tõttu 15 % võrra vähem uraani. Sama tüüpi reaktoreid kavatsetakse hakata kasutama ka teistes uutes tuumaelektrijaamades.

Eelnimetatud survevesireaktor ei ole ainus uus reaktoritüüp. Jaapanis on paigaldatud juba kolm firmade *Toshiba*, *Hitachi*, *General Electric* ja *ABB* koostöös toodetud keevvesireaktorit *ABWR* (*Advanced Boiling Water Reactor*), mille elektriline võimsus on 1356 MW. Uuritakse ka teiste reaktorisüsteemide (nt tooriumil talitleva kõrgetemperatuurilise reaktori) rakendamisvõimalusi ja aastal 2001 alustati USAs uurimusi neljanda põlvkonna reaktorite – looduslikku uraani kasutavate uute töökindlate paljundusreaktorite väljatöötamiseks. Viimaseid loodetakse kasutusele võtta aastail 2020–2025 [8.5]

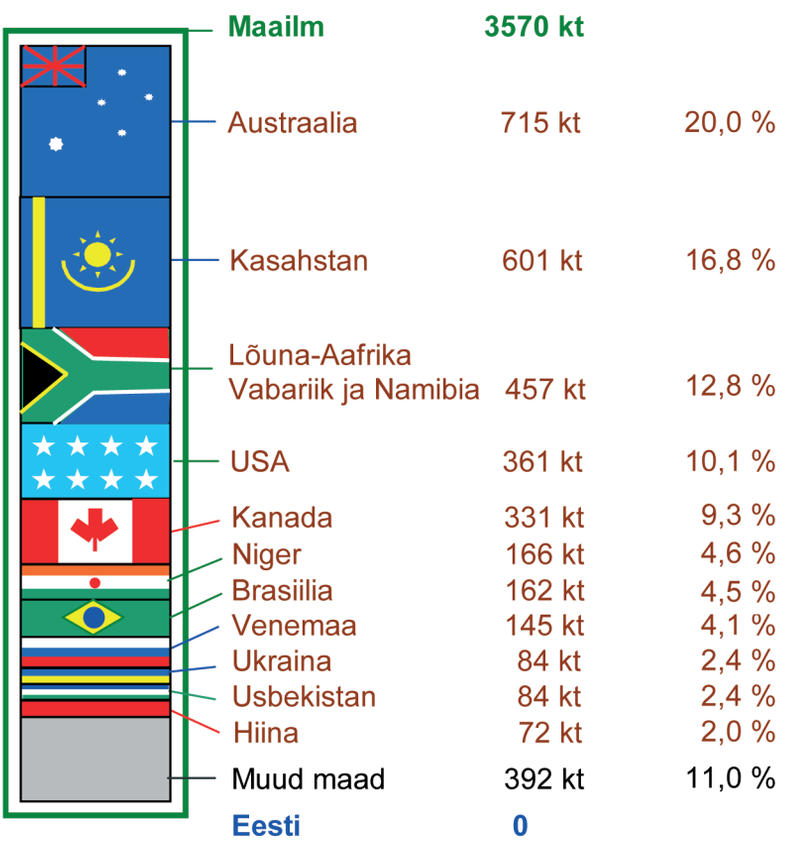
Uraanil põhineva tuumaenergeetika arengut mõjutavad uraani varud ja selle toodang maailma eri riikides (tabel **8.4.1**). Piltlikult on samad andmed kujutatud joonisel **8.4.1**.

Tabel 8.4.1. Maailma uraanivarude ja -toodangu jaotus aastal 2003

	Kaevandamis-kõlbulikuks loetav varu kt	Toodang kt/a	Tinglik ammendumis-aeg a		Kaevandamis-kõlbulikuks loetav varu kt	Toodang kt/a	Tinglik ammendumis-aeg a
Austraalia	715	9,54	75	Venemaa	145	3,70	39
Kasahstan	601	3,20	188	Ukraina	84	0,98	86
Lõuna-Aafrika Vabariik ja Namibia	457	1,05 3,30	105	Usbekistan	84	2,20	38
USA	361	1,00	361	Hiina	72	0,88	82
Kanada	331	10,29	32	12 suurimate varudega riiki	3178	39,60	80
Niger	166	3,40	49	Muud riigid	392	1,83	214
Brasiilia	162	0,06	2700	**Maailm**	**3570**	**41,43**	**86**

Tabel ja joonis näitavad, et kaevandamiseks kõige paremini sobivad uraanivarud võivad ammenduda, nagu nafta- ja maagaasivarudki, 21. sajandi jooksul, misjärel tuleb kasutusele võtta majanduslikult vähem soodsad leiukohad. Uraani tootmine on viimase 10 aasta jooksul olnud pidevalt suurem kui tegelik tarbimine, mistõttu pakkumine on ületanud nõudluse, ja tuumkütuse hind on suhteliselt madal.

Aastal 2003 oli maailma tuumkütuse ladudes rikastatud uraanoksiidi UO_2 ligikaudu 4 aasta vajadusele vastav kogus. Peale selle on USAs ja Venemaal kogunenud tuumarelvade likvideerimisel saadud maharikastatud uraani, mis samuti sobib kasutamiseks tuumareaktorites. Kõik see võimaldab tuumaenergeetika arengut vähemalt lähema 10…20 aasta jooksul probleemivabalt kiirendada.



Joonis 8.4.1. Maailma uraanivarude jaotus aastal 2003 [1.7]

2006. aasta veebruaris käivitas USA Energiadepartemang ülemaailmse tuumaenergiapartnerluse plaani (*Global Nuclear Energy Partnership, GNEP*), mis näeb ette

- uue põlvkonna tuumaelektrijaamade rajamise USAs,
- kasutatud tuumkütuse taaskasutamise uute tehniliste võtete arendamise ja juurutamise,
- tuumkütuse tõhusa käsitlemise ja ladustamise USAs,
- taastoodetud tuumkütuse kasutamisel põhinevate täiustatud reaktorite loomise,
- tuumkütuse kättesaadavaks tegemise arengumaadele, tagades seejuures tuumkütuse välistamise sõjaliseks kasutamiseks,
- väikese võimsusega reaktorite väljatöötamise arengumaade tarbeks,
- tuumaohutuse tagamise ja tuumamaterjalide väärkasutamise välistamise tuumaenergeetika arengul.

Tuumaenergeetika arendamise tähtsaim eesmärk on **termotuumareaktori** loomine. Selline reaktor põhineb vesinikuaatomite ühinemisel heeliumiaatomiks, kusjuures osa ühinevate aatomituumade massist muutub energiaks. Et ühinemine oleks võimalik, peab vesinikutuumade soojusliikumise kineetiline energia olema nii suur, et ületataks tuumadevaheline tõukejõud; selleks on vaja temperatuuri ligikaudu 10^8 K. Peale selle peab vesiniku tihedus olema reaktsiooni tekkimiseks piisavalt suur ja reageeriv aine peab koos püsima piisavalt kaua, et see jõuaks reaktsioonis osaleda.

Energia eraldumist sellisel tuumareaktsioonil oletas esimesena aastal 1920 inglise füüsik Francis William Aston (1877–1945). Samal aastal avaldas inglise astronoom Arthur Stanley Eddington (1882–1944) arvamust, et Päikeses tekkiv energia põhineb vesiniku muundumisel heeliumiks. Aastal 1926 arvutas ta välja, et temperatuur Päikese keskosas peab olema 15…20 MK ja et ülitugeva gravitatsioonivälja tõttu on vesinikutuumad seal üksteisele sedavõrd lähedal ja põrkuvad sedavõrd tihti, et tekib kestev energiat eraldav termotuumareaktsioon. Aastal 1929 tõestas USA astronoom Henry Norris Russell (1877–1957), et Päike koosnebki peaasjalikult vesinikust. Aastal 1938 töötasid USA füüsik Hans Albrecht Bethe (1906–2005) ja saksa füüsik Carl Friedrich von Weizsäcker (1912–2007) teineteisest sõltumatult välja Päikeses ja tähtedes asetleidva termotuumareaktsiooni (*Bethe–Weizsäckeri tsükli*) teooria, mille kohaselt neli vesinikutuuma ühinevad üheks heeliumituumaks, andes ära kaks elektroni. Päikeses muundub sellisel viisil 650 Mt vesinikku sekundis, kusjuures energiaks muunduv mass on 4,6 Mt. Aastal 1951 püüdis inglise füüsik Alan Alfred Ware esimesena luua termotuumareaktsiooniks sobivat plasmat, kasutades plasma kooshoidmiseks magnetvälja (*magnetpudelit*) ja samal aastal algasid sellesuunalised uuringud ka USAs ja Venemaal. Kõige edukamaks osutus plasma kooshoidmine magnetvälja abil toroidikujulises kanalis (*tokamakis*), mille leiutasid NSV Liidu Tuumaenergia Laboratooriumi füüsikateadlased Igor Tamm (1895–1971) ja Andrei Sahharov (1921–1989) ja mis avalikustati aastal 1956. Vahepeal oli USAs Edward Telleri (1908–2003) juhtimisel aastal 1952 loodud *vesinikupomm*, milles kõrgetemperatuuriline vesinikuplasma tekitatakse ja hoitakse lühikese aja vältel koos uraani tuumaplahvatuse abil.

Kõigist võimalikest reaktsioonivariantidest on osutunud kõige realiseerimiskõlbulikumaks raske ja üliraske vesiniku (deuteeriumi ja triitiumi) muundamine heeliumiks reaktsioonil

$$D + T \rightarrow He + n,$$

milles vabaneb energiat 94 MWh/g.

Deuteeriumi on looduslikus vesinikus 0,016 % ja selle eraldamine nt mereveest on tugevasti lihtsam kui uraani isotoobi ^{235}U eraldamine looduslikust uraanist. Triitium on aga vesiniku radioaktiivne isotoop, mille poolestusaeg on 12 aastat. Looduses triitiumi seetõttu ei ole ja termotuumareaktoris saadakse see tekkiva neutroni reageerimisel liitiumi ^{6}Li aatomiga reaktsioonil

$$Li + n \rightarrow He + T$$

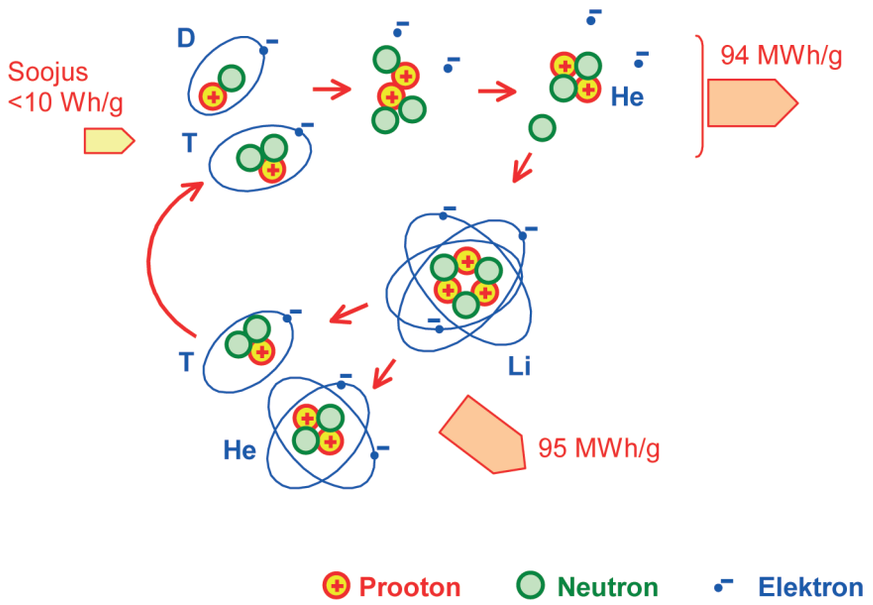
mille juures eraldub energiat 95 MWh/g.

Mõlemad ülalkirjeldatud reaktsioonid on piltlikult kujutatud joonisel **8.4.2**. Et joonisel kujutatud ühinemisprotsess toimuda saaks, on vaja

- piisavalt kõrget temperatuuri (vähemalt 50 MK),
- ioonide piisavat tihedust,
- plasma piisavat kooshoidekestust.

Viimaseid kaht nõuet saab asendada nõudega, et ioonide tiheduse n ja plasma kooshoidekestuse τ_E korrutis oleks suurem kui teatav temperatuurist olenev vähimväärtus. Kõige väiksem (ligikaudu 10^{20} s/m^3) on see temperatuuril 300 MK.

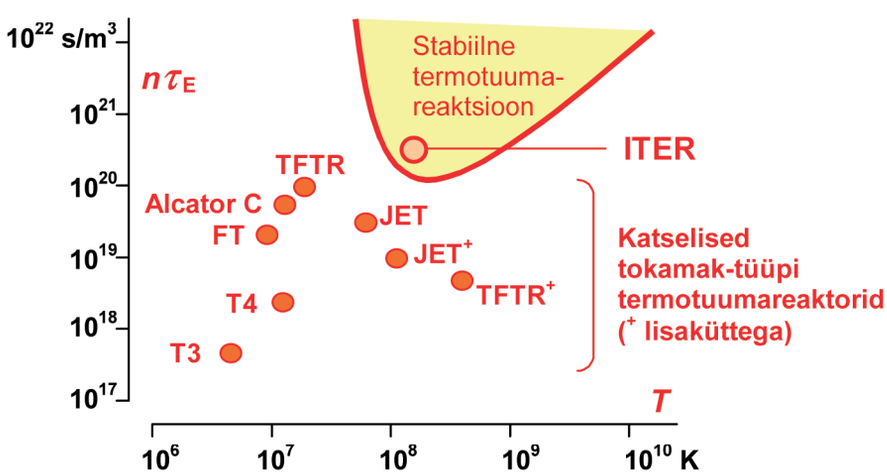
Korrutist $n\tau_E$ nimetatakse *Lawsoni kriteeriumiks*, kuna selle formuleeris aastal 1955 ja avalikustas aastal 1957 Harwelli tuumauuringuinstituudi (Suurbritannia) insener John David Lawson.



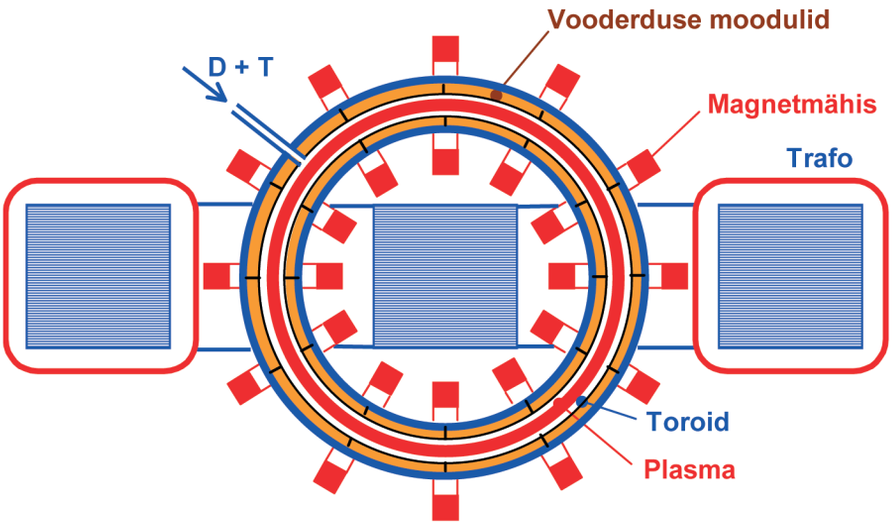
Joonis 8.4.2. Termotuumaprotsessi põhimõte

Temperatuuri ja korrutise $n\tau_E$ vahekord, mille puhul stabiilne termotuuma-sünteesireaktsioon on võimalik, on kujutatud joonisel **8.4.3**. Senistel katseseadmetel seda saavutada veel ei ole õnnestunud. Kõige lähemale on jõutud ringkanaliga (*tokamak*-tüüpi) katseseadmeil, millest mõnede andmed on samal joonisel esitatud. Esmakordselt loodetakse Lawsoni kriteeriumi täitmist saavutada rahvusvahelises katselises reaktoris *ITER*, mis peaks valmima aastal 2011.

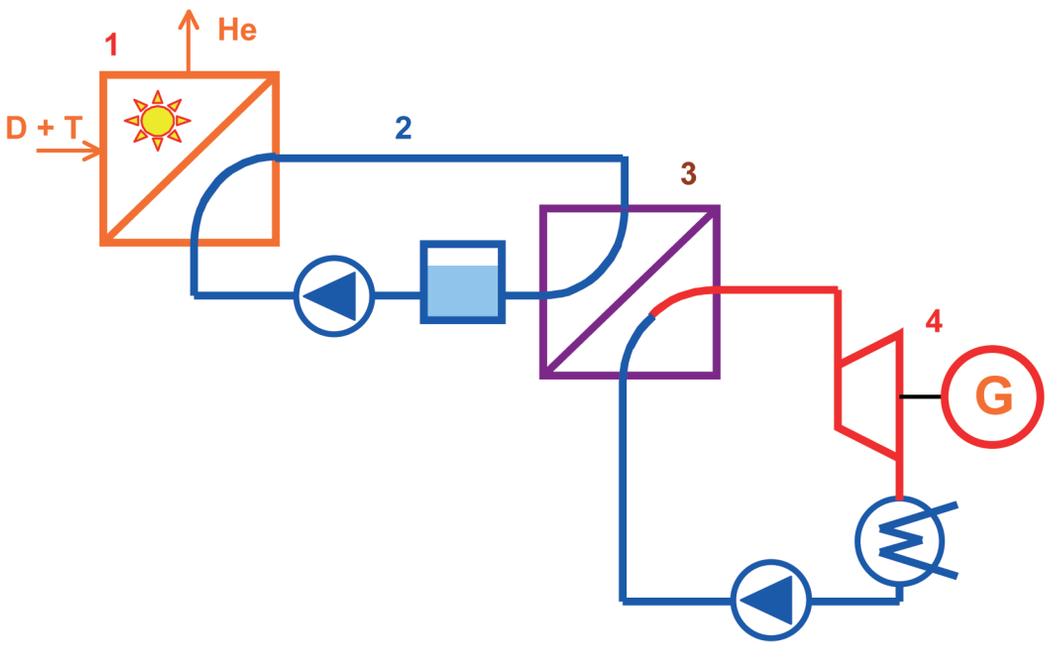
Tokamak-tüüpi reaktori ehituspõhimõte on kujutatud joonisel **8.4.4**. Reaktori toroidkanalis moodustuv kõrgetemperatuuriline plasma kujutab endast võimsa trafo ühestainsast keerust koosnevat sekundaarmähist, milles indutseeritakse vool kuni 7 MA. Plasma hoitakse kanali teljel ülijuhtivate magnetpoolide abil (sellest ka nimetus – **to**roidne **ka**nal **ma**gnetpoolidega). Plasmasse suunatakse deuteerium ja triitium, mis seal ühinevad heeliumiks. Neutronid neelduvad kanali mitmekihilises, mõnekümnest kuni mõnesajast moodulist koosnevas vooderduses (ingl *blanket*, 'tekk'), milles salvestub ka tekkiv soojus. Soojus viiakse mooduleist ära vesi- või heelium-soojuskandja abil (joonis **8.4.5**).



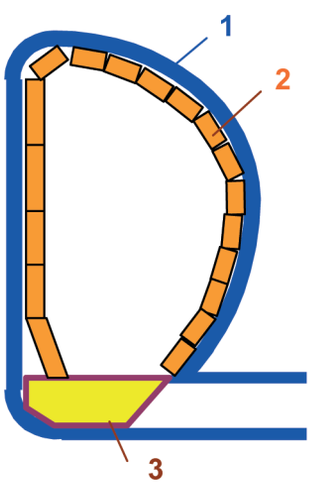
Joonis 8.4.3. Deuteerium-triitium-termotuumaprotsessi stabiilsustingimused ja mõnede seniste katseliste tokamak-tüüpi reaktorite andmed. Alcator – Massachusettsi Tehnikainstituudi tokamak, JET – *Joint European Torus* (Culham, Suurbritannia), T3 ja T4 – Venemaa tokamakid, TFTR – *Toroidal Fusion Test Reactor* (Princeton, USA). ITER – ehitatav rahvusvaheline katseline reaktor



Joonis 8.4.4. Tokamak-tüüpi termotuumareaktori ehituspõhimõte (tugevasti lihtsustatult)



Joonis 8.4.5. Termotuumaelektrijaama üks võimalikest põhimõtteskeemidest. *1* reaktor, *2* vesi- vm soojuskandja, *3* aurugeneraator, *4* turbiin-generaator-agregaat



Joonis 8.4.6. Termotuumareaktori toroidkanali ristlõige (tugevasti lihtsustatult). *1* väliskest, *2* vooderduse moodulid, *3* reaktsioonijäätmete eraldamise seadis (diverter)

Osa moodulitest on ette nähtud triitiumi saamiseks ja sisaldavad triitiumikollektorit. Mooduli plasmapoolne *esimene sein* peab olema kuumuskindlast ning neutroneid mitteneelavast materjalist, nt berülliumist või vanaadiumist, mis tavaliselt on kantud õhukese kihina vask-alusplaadile. Viimase paksus, et vältida liigkuumenemist või sulamist, ei ole enamasti üle 3 mm. Ringkanali ristlõige on enamasti D-kujuline ja selle alumises osas nähakse ette seadmestik reaktsioonijäätmete kõrvaldamiseks (joonis **8.4.6**).

Reaktoris vajaliku liitiumi varusid arvatakse olevat Maa mandritel, kaevandamiseks ja käitlemiseks sobivates maakides ligikaudu 2,2 Mt. Liitiumisoolasid sisaldab ka ookeanivesi, millest nende eraldamine ei tekita erilisi probleeme.

Seniste katseliste reaktoritega on saavutatud võimsusi kuni 30 MW ja reaktsiooni kestust kuni 1 s. Saadud kogemuste põhjal leppisid Euroopa Liit, USA ja Jaapan aastal 1985 kokku ehitada tokamaktüüpi tööstusliku reaktori katseline prototüüp *ITER* (*International Thermonuclear Experimental Reactor*). Hiljem liitusid selle programmiga Venemaa, Hiina ja Korea Vabariik ja aastal 2005 otsustati ehitada selline reaktor Cadarache'is (Lõuna-Prantsusmaal) elektrilise võimsusega 500 MW ja tuumareaktsiooni kestusega kuni 500 s, kusjuures plasma üleskuumutamiseks vajalik võimsus on 50 MW. Toroidi läbimõõt on ligikaudu 10 m ja kanali efektiivläbimõõt ligikaudu 3 m. Reaktori ehitus läheb maksma ligikaudu 10 mrd eurot ja see peaks valmima aastal 2011. Pärast seda tuleb kõne alla tööstuslike reaktorite projekteerimine võimsusega 1…10 GW ja tuumareaktsiooni kestusega kuni 90 min.

Tuumasünteesil põhinevate reaktorite põhieelis on tuumareaktsioonis osaleva aine äärmiselt väike kogus ja see, et reaktsioonis ei teki radioaktiivseid jäätmeid. Langeb ära ka selline tuumalõhestamisel põhinevate reaktorite iseloomulik ohufaktor nagu aktiivtsooni ülessulamise võimalus. Need asjaolud teevad reaktori ohutumaks ja turvameetmed lihtsamaks. Elektrienergia omahind arvatakse tulevat vahemikus 5 kuni 10 c/kWh.

On katsetatud ka teisi tuumasünteesimeetodeid, mis aga on osutunud vähem tõhusateks ja raskemini realiseeritavateks.

Aastal 1975 uuriti USAs võimalust toota elektrienergiat termotuumapommide abil, lõhates neid maa all ligikaudu 2 km sügavusel (projekt *Pacer*) . Tekkivasse kaverni (läbimõõduga 200…400 m) saaks pumbata vett, mis aurustumisel tekitaks kõrgrõhulise ülekuumendatud auru. Aurutoru(de) kaudu tõuseks aur maapinnale nagu geotermaalelektrijaamas ja selle võiks suunata auruturbiini. Elektrijaama võimsuse iga 1 GW kohta tuleks iga päev lõhata üks termotuumapomm trotüülekvivalendiga 50 kt. Pinnase radioaktiivse saastumise ja vastuvõtmatu sõjalis-poliitilise riski tõttu jäi see projekt realiseerimata.

8.5 ALTERNATIIVSED ENERGIAALLIKAD

Alternatiivsus tähendab mingite teiste võimaluste olemasolu. Energia tootmisel mõeldakse selle all enamasti muid võimalusi peale fossiilkütuste põletamise ja tuumaenergia kasutamise. Nende võimaluste hulka kuuluvad

- hüdroenergia kasutamine (vt jaotised **2.9**, **5.4** ja **8.3**),
- tuuleenergia kasutamine (vt jaotised **2.10**, **5.6** ja **8.3**),
- geotermaalenergia kasutamine (vt jaotis **5.5**),
- päikese kiirgusenergia kasutamine (vt jaotised **2.11** ja **5.7**),
- põlevate tööstusjäätmete, olmeprügi, puidu- ja muude taimsete jäätmete, küttepuidu ja biogaasi kasutamine elektrienergia ja soojuse saamiseks,
- soojuspumpade rakendamine (vt jaotis **2.14**).

Peale nende uuritakse ka ookeanivee temperatuurierinevuste kasutamisvõimalusi elektrienergia ja soojuse saamiseks.

Alternatiivsete energiaallikate ühisomadus seisneb süsinikdioksiidi emissiooni puudumises, mistõttu neist saadavat energiat nimetatakse ka *roheliseks energiaks*. Nende allikate kasutamise suurendamist näevad ette mitte üksnes eri riikide energeetika

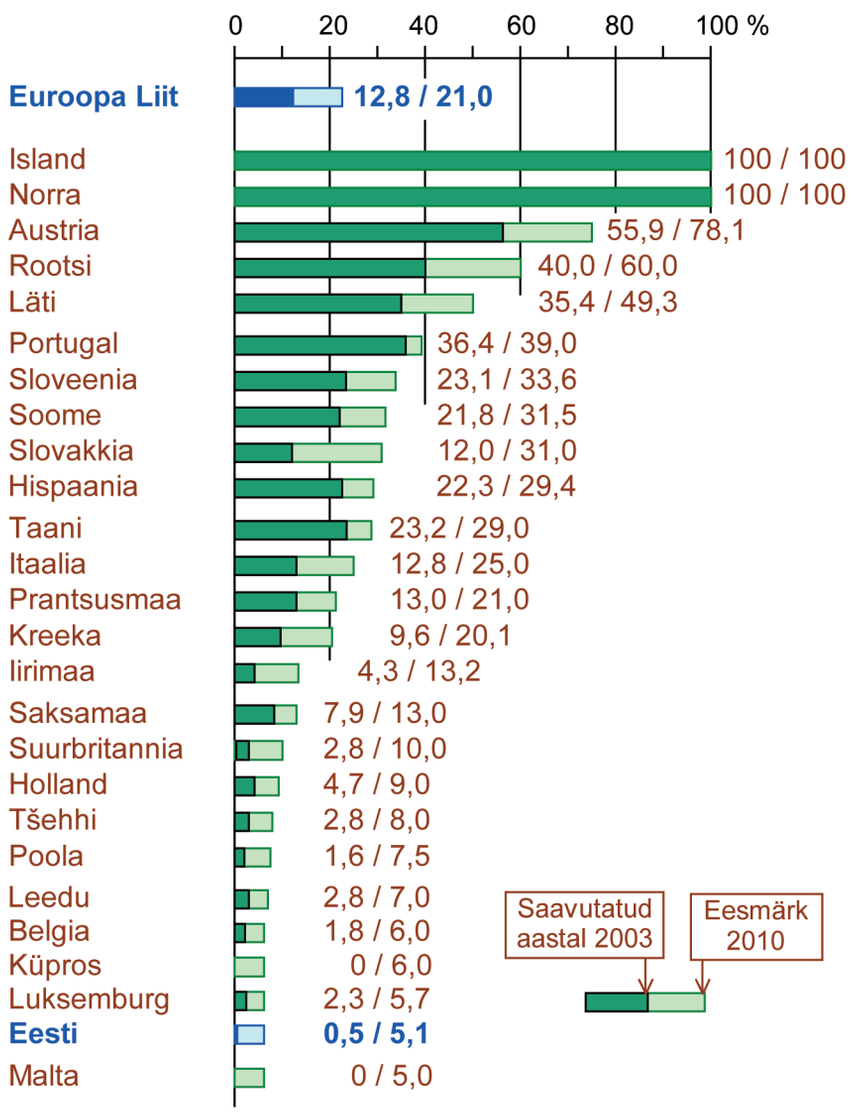
arengukavad, vaid ka rahvusvahelised kokkulepped. Nende hulgas on Euroopa Parlamendi otsus 29. septembrist 2005, mille kohaselt peab Euroopa Liidus aastal 2010 taastuvatest allikatest saadava energia osa energia kogutarbimises olema 11,4 %, aastal 2020 aga 20 % (elektrienergia tarbimises 33 %). Taastuvate energialiikide vahel peaks need aastaks 2020 ette nähtud 20 % jaotuma järgmiselt:

- biomass 13,0 %
- tuuleenergia 2,4 %
- hüdroenergia 2,1 %
- päikeseenergia soojuslik muundamine 1,5 %
- geotermaalenergia 0,8 %
- päikeseenergia elektriline muundamine 0,2 %

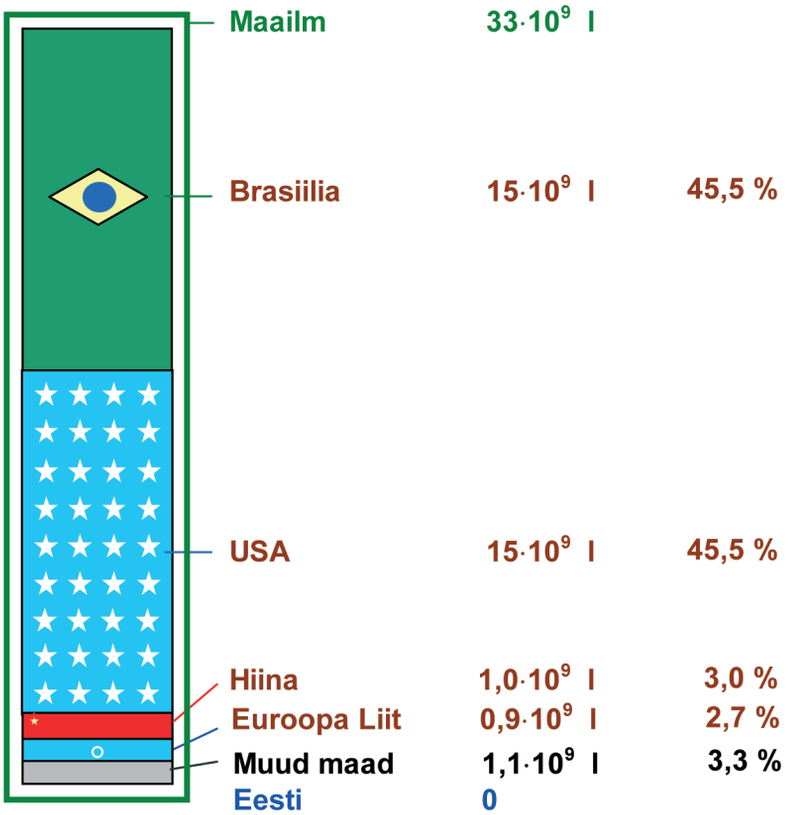
Taastuvatest energiavarudest saadava elektrienergia osatähtsus elektrienergia tootmisel peab Euroopa Liidus aastal 2010 olema 21 %. Mõnede Euroopa maade eesmärgid aastaks 2010 ja tegelik saavutatud tase aastal 2003 on kujutatud joonisel **8.5.1**.

Joonis näitab, et aastaks 2010 seatud eesmärgi saavutamine peaks olema Euroopa Liidus ainuüksi tuule- ja päikeseenergeetika kavandatud arengut arvestades täiesti võimalik.

Aastal 2005 toodeti Eestis 10,21 TWh elektrienergiat, sellest tuuleelektrijaamades 54 GWh, hüdroelektrijaamades 22 GWh ja taastuvaid kütuseid põletavates elektrijaamades 33 GWh [6.6]. Elektrienergia tarbimine (koos elektrijaamade omatarbega) oli 8,60 TWh. Eeldades, et kogu taastuvatest allikatest saadud elektrienergia tarbiti Eestis, oli taastuvate energiavarude kasutamise osatähtsus elektrienergia tarbimises sel aastal ligi 1,3 %.



Joonis 8.5.1. Taastuvatest energiavarudest saadava elektrienergia osatähtsus elektrienergia tootmisel Euroopas aastal 2003 ja eesmärk aastaks 2010



Joonis 8.5.2. Maailma suurimad mootorikütus-etanooli tootjad aastal 2005 [6.2]

Nii Euroopas kui ka Ameerikas seatakse eesmärgiks vähendada taastuvate energiavarude rakendamise teel eriti naftasaaduste tarbimist. Kuna suur osa naftasaadustest kujutab endast mootorikütuseid, tuleb alternatiivina kõne alla

- bensiini asendamist etanooliga,
- naftast saadava diislikütuse asendamist biodiislikütusega.

Etanool ehk etüülalkohol ehk piiritus (C_2H_5OH) on süsivesinike kääritamisel või eteeni (C_2H_4) hüdratiseerimisel saadav vedelik tihedusega 0,769 t/m^3 ja kütteväärtusega 26,8 MJ/kg. Kuna bensiini kütteväärtus on kõrgem (tavaliselt 42,7 MJ/kg) ja ka muud põlemisomadused on teistsugused, ei saa etanooli kasutada neis ottomootoreis, mis on ette nähtud bensiinile; on aga võimalik

- bensiinimootorite ümberseadistamine etanoolile,
- etanoolile ettenähtud mootorite valmistamine,
- mootorite valmistamine, milles saab kasutada nii bensiini kui ka etanooli.

Etanooli saab kasutada niihästi puhtalt kui ka segatuna bensiiniga (mida on sel juhul tavaliselt 15 %) ja bensiinilisandina (tavaliselt 10 %). Tema põhieelised bensiini ees seisnevad

- väiksemas maksumuses,
- süsinikoksiidi, süsinikdioksiidi ja osooni väiksemas emissioonis.

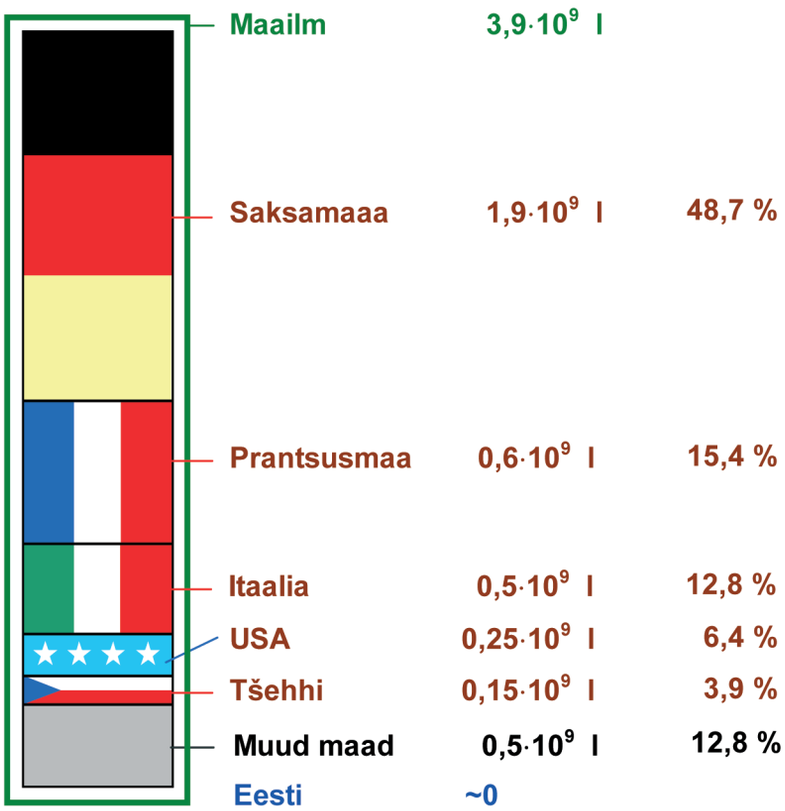
Etanooli puudusteks loetakse suurt energiakulu selle tootmisel, mis võib olla isegi suurem kui etanoolis sisalduv energia, mõnevõrra suuremat süsivesinike kogust mootorite heitgaasis ja, tulenevalt väiksemast kütteväärtusest, väiksemat sõidukaugust kütusepaagi sama mahu korral.

Odavaimat etanooli saab suhkruroost, mis kasutatakse etanoolitehastes ära täielikult, sest tootmisjäätmed põletatakse elektrienergia ja soojuse koostootmisjaamas. Sellisel viisil toodetakse etanooli nt Brasiilias. USAs saadakse etanooli maisist, on aga võimalik selle tootmine ka puidutselluloosist.

Esimesena alustas etanooli tootmist mootorikütusena pärast 1973. aasta kütusekriisi puhkemist Brasiilia. 1990ndail aastail, kui nafta ja naftasaaduste hinnad langesid, tootmine peaaegu lõppes, kuid hakkas seoses nafta hinna olulise tõusuga uuesti kiiresti suurenema aastal 2003. Aastal 2005 oli Brasiilias ligikaudu ühepalju etanooli- ja bensiiniautosid, mõlemat kütust võis aga saada igast tanklast.

2005. aastal toodeti maailmas mootorikütus-etanooli 33 · 10^9 liitrit ehk 26 Mt (kasv eelmise aasta suhtes 8 %), kusjuures esikohal olid Brasiilia ja USA (vt joonis **8.5.2**).

Biodiislikütus on taimeõlist metanooliga töötlemisel saadav hele- kuni tumekollane rasvhappemetüülester. Seni on seda toodetud peaasjali-



Joonis 8.5.3. Maailma suurimad biodiislikütuse tootjad aastal 2005 [6.2]

kult rapsiõlist, kuid on kasutatud ka soja- ja teisi taimeõlisid ja taimeõlijäätmeid. Biodiislikütuse tihedus on tavaliselt 0,90…0,93 Mt/m^3 ja küttevä ärtus 37 MJ/kg. Enamasti lisatakse seda naftast saadavale diislikütusele vahekorras kuni 1:1, kuid seda saab kasutada ka puhtalt, kusjuures see ei nõua mootori ümberseadistamist. Selle kütuse põhieelised on

- ligikaudu 10 % võrra madalam hind kui tavalisel diislikütusel,
- süsinikoksiidi, süsinikdioksiidi ja diislinõe väiksem kogus mootorite heitgaasis,
- väävli puudumine kütuses,
- paremad määrdeomadused,
- keskkonnasõbralikkus, mis seisneb muuhulgas selles, et see laguneb pinnasesse sattumisel kiiresti ning ilma kahjulike laguainete tekkimiseta.

Biodiislikütuse lähteaine – taimeõli – tootmiseks on aga vaja suhteliselt palju põllupinda; nii näiteks saab rapsi puhul 1 hektarilt lõpptulemusena 1000…1300 liitrit diislikütust. Nagu etanooli, nii ka biodiislikütuse tootmisel on energiakulu põllutöödel, väetamisel (koos väetiste tootmisega), õli tootmisel ja töötlemisel üldkokkuvõttes suhteliselt suur – ligikaudu 80…90 % saadava kütuse küttevä ärtusest. Kuna aga biodiislikütus aitab vähendada sõltuvust naftasaaduste impordist, algas naftat importivates maades aastail 2005–2006 selle tootmise kiire tõus. Aastal 2005 oli maailma biodiislikütuse toodang 3,9 · 10^9 liitrit ehk 3,5 Mt ehk 85 % võrra suurem kui eelmisel aastal [6.2]. Suurem osa biodiislikütusest tarbitakse Euroopas, eeskätt Saksamaal, Prantsusmaal ja Itaalias (joonis **8.5.3**).

Rasvhappe metüülestreid õpiti sünteesima juba enne diiselmootori leiutamist – aastal 1853. Seetõttu nägi Rudolf Diesel oma mootori võimalike kütuste hulgas kohe ette ka biodiislikütuse. Esimene selle kütuse tehas (toodangumahuga 10 000 m^3/a) käivitus siiski alles aastal 1991 Austrias ja 1990ndail aastail lisandus selliseid tehaseid Saksamaal, Prantsusmaal, Rootsis ja Tšehhis. Aastal 1998 toodeti biodiislikütust juba 21 riigis. Selle kütuse tootmise vastu tuntakse huvi ka Eestis.

Biokütuste (etanooli ja biodiislikütuse) tootmine tähendab sisuliselt päikeseenergia salvestamist taimedes toimuvate keemiliste reaktsioonide ja taimse toote hilisema töötlemise kaudu. Nende põletamisel eraldub atmosfääri ligikaudu sama palju süsinikdioksiidi nagu taimed seda atmosfäärist võtnud on ja atmosfääri süsinikdioksiidisisaldus järelikult ei muutu. Naftasaaduste asendamine biokütustega nõrgendab seega jaotises **7.2** vaadeldud kasvuhoonenähtust.

Vedelate biokütuste hulka kuulub ka **metanool** (metüülalkohol CH_3OH ehk – kui seda toota tselluloosist – *puupiiritus*). Seda kütust kasutatakse peamiselt mõnedes kütuseelementides (vt jaotis **2.6**).

Gaasilistest biokütustest kasutatakse peamiselt prügilates ja sõnnikust eralduvat **biogaasi**, mis koosneb põhiliselt metaanist. Seda kasutatakse peamiselt katlakütusena soojuse ja/või elektrienergia saamiseks.

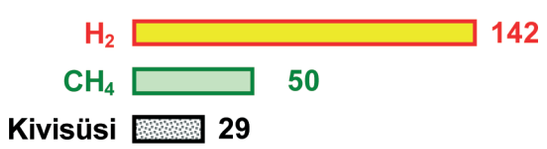
Tahke biokütusena kasutatakse nii soojuse kui ka elektrienergia saamiseks peamiselt **puitu** kas halgudena või puiduhakkena, -briketina ja -graanulitena. Puitu võidakse seejuures saada kiirestikasvavatest puuliikidest, eeskätt pajust (niinimetatud *energiavõsast*).

Eestis on taastuvatest energialiikidest esikohal puit (sealhulgas puidujäätmed, -hake ja -graanulid), teisel kohal tuuleenergia ja kolmandal hüdroenergia. Rakendatakse ka biogaasi (elektrienergia ja soojuse koostootmisjaamades) ja on alustatud biodiislikütuse tootmist. Geotermaalenergia ja päikesekiirguse kasutamine ei ole meil aga kaugeltki sel määral võimalik nagu Kesk- ja Lõuna-Euroopas.

8.6 VESINIKUENERGEETIKA

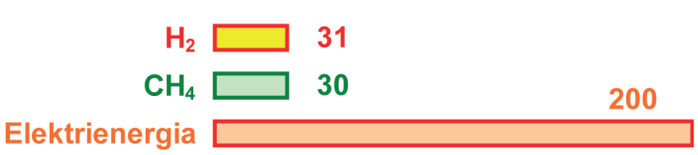
Vesinikuenergeetika all mõeldakse tulevikus kavandatavat energia salvestamist ja edastamist vesiniku kujul. Selle juures lähtutakse vesiniku kõrgest kütteväärtusest (joonis **8.6.1**), väikesest tihedusest (joonis **8.6.2**) ja, sellest johtuvalt, väikestest edastamiskuludest energiaühiku kohta (joonis **8.6.3**).

Käesoleval ajal tarbitakse maailmas vesinikku ligikaudu 50 Mt aastas, kusjuures tarbimine kasvab ligikaudu 10 % võrra aastas. Ligikaudu pool kogu vesinikust kulutatakse ammoniaagi tootmiseks, teine pool aga nafta töötlemisel (*hüdrokrakkimisel*) kergemate mootorikütuste saamiseks. Vesinikku toodetakse seniajani peaasjalikult teistest kütustest – 48 % maagaasist, 30 % naftast ja 18 % söe reageerimisel veega. Vee elektrolüüsi osatähtsus vesiniku tootmisel on ainult 4 %. Vesiniku hind maailmaturul on suhteliselt kallis – 2,70 dollarit kilogrammi kohta (joonis **8.6.4**), kuid hinnalt energiaühiku kohta on see siiski juba võistlusvõimeline mõnede teiste kütustega (joonis **8.6.5**).

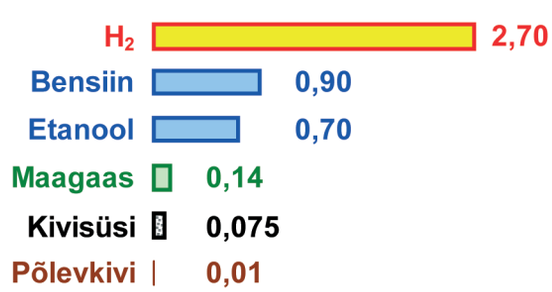


Joonis 8.6.1. Vesiniku kütteväärtuse võrdlus metaani ja kivisöega (MJ/kg)

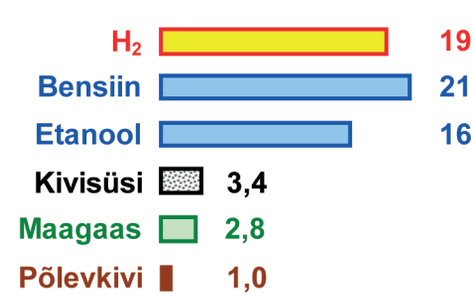
Joonis 8.6.2. Vesiniku tiheduse võrdlus metaani ja õhuga (kg/m³)



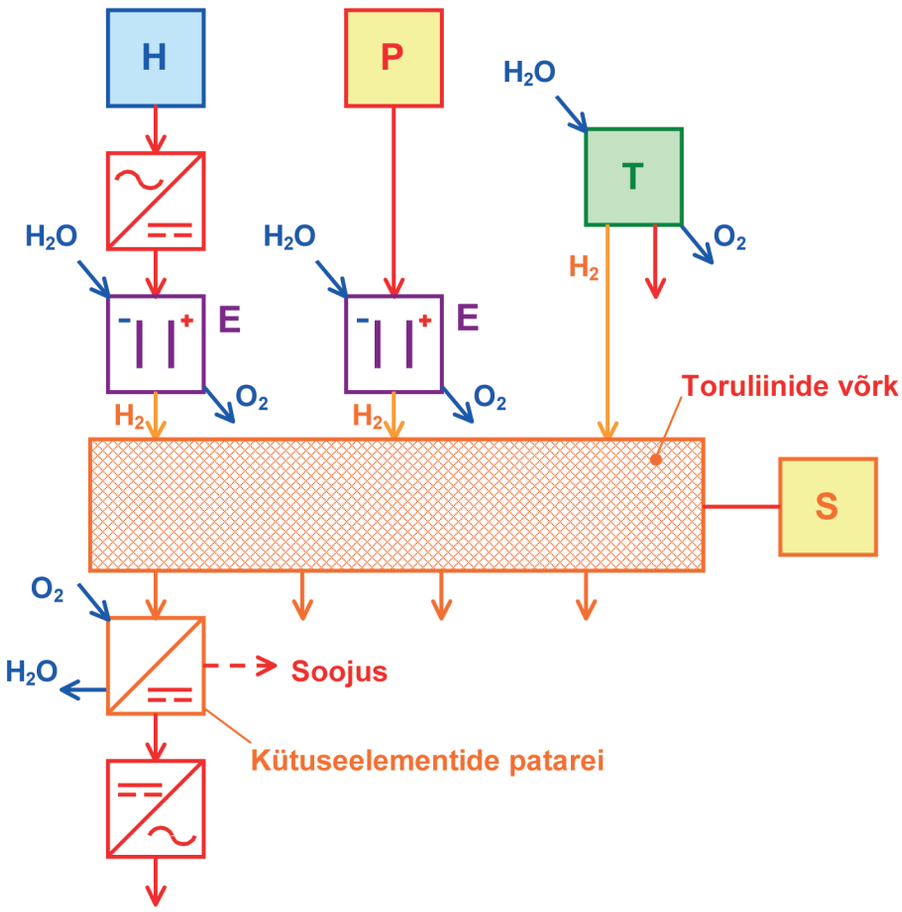
Joonis 8.6.3. Vesiniku edastuskulude ligikaudne võrdlus metaani ja elektrienergiaga edastamisel 100 km kaugusele (EUR / MJ)



Joonis 8.6.4. Vesiniku hinna võrdlus muude kütustega massi järgi ($/kg)



Joonis 8.6.5. Vesiniku hinna võrdlus muude kütustega kütteväärtuse järgi ($/GJ)



Joonis 8.6.6.
Vesiniku-energiavõrgu põhimõte.
***E* elektrolüüsiseade,**
***H* hüdro-, *P* päikese-,**
***T* tuumaelektrijaam,**
***S* vesinikusalvesti**

Et vesinikku saaks energeetikas laiemalt rakendada, tuleb leida selle tõhusamaid tootmisviise. Nendeks võivad tulevikus olla vee kuum elektrolüüs ja termoelektrolüüs kõrgetemperatuurilistes tuumareaktorites (temperatuuril 850…1000 °C). Nendel menetlustel loodetakse vesiniku hinda vähendada ligikaudu kahekordselt. Uuritakse ka katalüütilist fotoelektrolüüsi, mis võimaldaks vesiniku tootmisel rakendada päikesekiirgust. Kui sellised tootmismenetlused õnnestub realiseerida, tuleb kõne alla vesiniku tootmine

- tarbimiskeskustest kaugel paiknevates hüdro- ja päikeseelektrijaamades,
- tuuleelektrijaamades energia ühe võimaliku salvestamisviisina,
- eriehitusega tuumareaktorites, mida saab kasutada nii elektrienergia kui ka vesiniku tootmiseks (nt võiks taoline tuumajaam toota päeval elektrienergiat, öösel aga vesinikku).

Kuna vesiniku edastamine suurtes kogustes võib kujuneda tunduvalt odavamaks kui elektrienergia edastamine, võivad tulevikus tekkida vesiniku-toruliinidel põhinevad energiavõrgud (joonis **8.6.6**).

Vesiniku elektrolüüsiks on tavaliselt vaja energiat ligikaudu 200 MJ/kg. Kuna saadava vesiniku kütteväärtus on 142 MJ/kg, võib elektrolüüsi kasuteguriks lugeda ligikaudu 70 %. Kui vesinikku kasutatakse kütuseelementides kasuteguriga näiteks 60 %, on elektrienergia muundamise ja tagasimuundamise resulteeruv kasutegur umbes 40 %, mida võib enamasti lugeda vastuvõetavaks.

Vesiniku salvestamiseks võib kasutada

- komprimeerimist rõhu all 5…10 MPa,
- veeldamist temperatuuril ligikaudu –250 °C,
- metallihüdriide (nt MgH_2), millest vesinik kergesti eraldub kuumutamisel.

Kõige lihtsam on salvestamine surugaasina, kõige vähem ruumi nõuab veeldamine, kõige ohutum (kuid ka enamasti kõige kallim) on salvestamine metallihüdriididena.

Aastal 2004 esitas Freibergi (Saksamaa) mäeakadeemia uurimisrühm Gert Wolfi juhtimisel vesiniku salvestamiseks uue keemilise meetodi – booratsaani BNH_6 kasutamise. See ühend laguneb kuumutamisel üle 100 °C, kusjuures vabaneb kaks molekuli H_2 ning eralduv soojus tagab reaktsiooni pidevuse. Teised laguproduktid ei ole keskkonnaohtlikud. Esialgsete hinnangute järgi võiks elektriauto sõita 40…50 kg booratsaaniga umbes 500 km, mis on täiesti võrreldav tavaliste autodega.

8.7 ENERGIA KOKKUHOIUPÕHIMÕTTED

Energiatarbijad püüavad tarbitavat energiat kokku hoida peamiselt selleks, et vähendada energia tarbimisest tingitud kulusid. Mida kallim on üks või teine energialiik ja mida suuremad on energiatarbimisega seotud muud, mitte üksnes rahalised, vaid ka aja-, tööjõu- ja muud kaudsed kulutused, seda enam on tarbija huvitatud selle kokkuhoiust.

Energia säästlik tarbimine on tähtis aga ka kogu ühiskonnale, sest see

- aeglustab energia intensiivsest tarbimisest tingitud kliimamuutusi (eeskätt süsinikdioksiidi ja teiste kasvuhoonegaaside emissiooni vähendamise teel),
- pikendab taastumatute energiavarude kasutamise kestust ja suurendab seega niihästi konkreetsete riikide kui ka kogu maailma energeetilist jätkusuutlikkust,
- suurendab riikides, mille energiamajandus mingil määral põhineb kütuste ja muude energialiikide impordil, energiapoliitilist sõltumatust importtarnetest,
- võimaldab edasi lükata kulutusi uute kütusekaevanduste, nafta- ja maagaasipuurtornikomplekside, elektrijaamade jms rajamiseks,
- vähendab energia edastamisega seotud kulutusi ja energiaedastuskadusid,
- pikendab energia salvestusseadmete kasutuskestust ja/või annab võimaluse vähendada salvestusseadmete energiamahutavust ning maksumust,
- vähendab energiakulutusi tootmistegevuses (tööstuses, põllumajanduses ja mujal), vähendades seega ühtlasi toodete omahinda ja suurendades nende konkurentsivõimet.

Mõnikord ollakse sunnitud energiat kokku hoidma energiadefitsiidi tõttu; nii näiteks võidakse energiatarbimist sõja ajal ja muudes kriisiolukordades seadusandlikus korras limiteerida.

Energia tõhusat ja säästlikku kasutamist propageerivad nii üldpõhimõtteliste kui ka konkreetsete soovituste teel Ülemaailmne Energeetikanõukogu (*World Energy Council, WEC*) [8.6] ja muud rahvusvahelised energeetikaorganisatsioonid, seadusandlikult sätestavad seda aga nt Euroopa Liit oma sellekohaste direktiividega (nt ehitiste energiatõhususe direktiiviga [8.7]) kui ka iga riik eraldi. Energiat sunnib säästma ka nii primaarenergia kui ka elektrienergia pidev kallinemine.

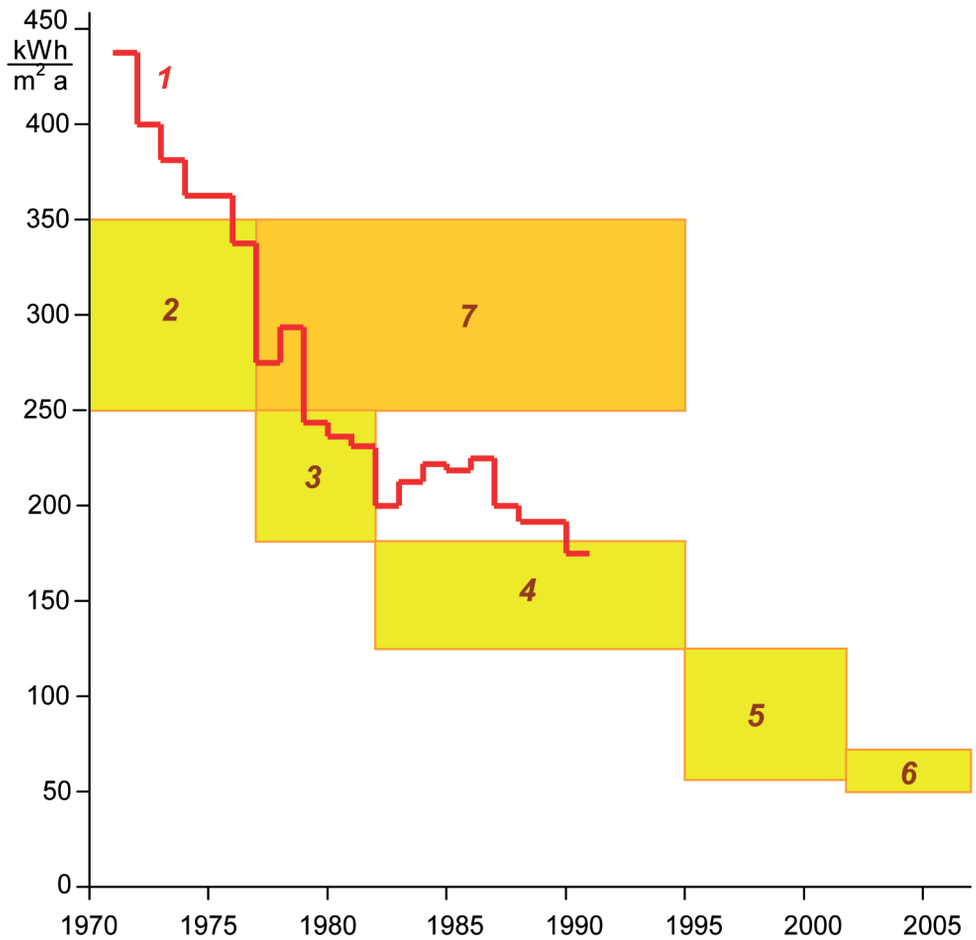
Energiatehnika areng on suunatud kõigi energiamuundusseadmete kasuteguri suurendamisele, energia edastuskadude vähendamisele ja tõhusamate energiatarvitite väljatöötamisele. Nii näiteks on soojuselektrijaamade keskmine kasutegur suurenenud aastail 1970…2000 väärtuselt 30 % väärtuseni 40 % [8.6], hoonete soojusvajadust on aga nt Kesk-Euroopas õnnestunud vähendada sama ajavahemiku jooksul keskmiselt väärtuselt 400 kWh/(m^2 a) programmi *Madala energiatarbega maja* järgi väärtuseni 50 kWh/(m^2 a) [8.8].

Energia säästuvõimalused algavad kütuste kaevandamisest ja nendes sisalduva energia muundamisest elektrienergiaks ja soojuseks. Nende võimaluste hulgas tõstetakse esile enamasti järgmisi:

- naftaleiukohtades koos naftaga maapõuest tuleva, peamiselt metaanist koosneva kõrvalgaasi töötlemist kaubaliseks kütuseks senise põletamise asemel,
- energeetiliselt tõhusamate kütusekaevandamismasinate ja transpordiviiside kasutamist,
- kütustpõletavates elektrijaamades – tahk- ja vedelkütuste asendamist võimaluse korral maagaasiga,
- kõrgemate (sealhulgas ülekriitiliste) auruparameetritega aurukatelde ja -turbiinide kasutamist soojuselektrijaamades,
- elektrienergia ja soojuse koostootmise laiendamist,
- gaasi- ja auruturbiinide kombinatsioonil põhinevate soojuselektrijaamade (*kombijaamade*) laiemat kasutamist,
- soojussalvestite kasutamist elektrienergia ja soojuse koostootmisjaamades
- põlevate tootmisjääkide kasutamist soojuse ja/või elektrienergia saamiseks.

Energia edastamisel seisnevad kokkuhoiuvõimalused peaasjalikult

- optimaalse edastusviisi (toruliinide, raudtee- ja laevavedude jms) valikus,
- energiakadude vähendamises (nt soojusisolatsiooni tugevdamise teel soojuse edastamisel kaugkütte-soojusvõrkudes),
- elektrienergia edastamisel – optimaalse edastuspinge ja vooluliigi valikus ning reaktiivenergia edastamise minimiseerimises.



Joonis 8.7.1. Näiteid elamute kütteks tarbitavast soojusest. *1* soojuskulu Saksamaa uusehitistes aastail 1971…1991, 2 Saksamaa soojustarbimisstandard DIN 4108, 3, *4* ja *5* Saksamaa 1., 2. ja 3. soojustarbimismäärus, 6 Saksamaa energiasäästumäärus, *7* soojuskulu Eesti uusehitistes aastail 1960…1995

Kõige suuremal määral ja kõige tõhusamalt saab aga energiat kokku hoida selle tarbimisel. Siinjuures peetakse enamasti silmas

- optimaalse energialiigi valikut,
- energiatarvitite kasuteguri suurendamist,
- energia muundusastmete arvu vähendamist,
- sisepõlemismootorite optimaalreguleerimist (enamasti mikroprotsessorsüsteemide abil), et tagada suurim võimalik kasutegur igal võimalikul pöörlemiskiirusel ja koormusel;
- sagedusmuundureil põhinevate elektriajamite kasutamist,
- soojuse kokkuhoidu kütteseadmeis ja tootmisprotsessides sellekohaste automaatreguleerimissüsteemide abil,
- hoonete soojusisolatsiooni parendamist,
- päikeseenergia aktiivset ja passiivset kasutamist,
- tootmisprotsessides ja ventilatsioonisüsteemides tekkiva heitsoojuse kasutamist,
- energia kohalikku salvestamist energiavarustussüsteemide minimaalkoormuse ajal,
- kõrge valgusviljakusega valgusallikate kasutamist ja valgustustaseme automaatreguleerimist.

Energiat hoiab kokku ka

- metallide ja muude materjalide korduvkasutamise organiseerimine riikliku või rahvusvahelise seadusandluse kaudu,
- side- ja kommunikatsioonitehnika arendamine.

Enamikku nendest võtetest on üksikasjalisemalt vaadeldud käesoleva kursuse teistes peatükkides. 21. sajandi esimestel aastatel rakendatud meetmete hulgas väärivad esmajärjekorras mainimist

- trammi- ja trollibussiliikluse taastamine Euroopa suurlinnades,
- raudtee- ja laevaveonduse arendamine koos autoveonduse piiramisega,
- päikese kiirgusenergia laialdane rakendamine soojaveevarustuses ja hoonete küttesüsteemides,
- jäätmetes sisalduvate ainete mitmekülgne taaskasutamine,

- väikesevõimsuseliste hajutatud energiaallikate kasutamine energia edastuskadude vähendamise eesmärgil.

Hoonete energiatarbimises on esimesel kohal **küte**. Kesk- ja Põhja-Euroopa maades on selle osatähtsus energia tarbimises nt 50…75 %. Seetõttu seisnevad ka energia kokkuhoiu suurimaid võimalused kütteks tarbitava energiakoguse vähendamises ja seda eeskätt hoonete soojusisolatsiooni tugevdamise teel. Paljudes maades toimub see seadusandluse kaudu, nähes ette hoonete projekteerimisel lubatava kütteenergia koguse hoone pinnaühiku kohta aastas. Sellise seadusandluse tulemuslikkust näitab nt küttevajaduse vähenemine Saksamaa uusehitistes alates 1970ndaist aastaist [8.8] ja eriti selle kõrvutamine Eestis samal ajal valminud ehitistega (joonis **8.7.1**).

Elamute soojustarbimise järgi eristatakse Kesk-Euroopas muuhulgas

- madala soojustarbimisega hooneid tarbimisega mitte üle 70 kWh/(m²a),
- passivhooneid soojustarbimisega mitte üle 15 kWh/(m²a),
- nullenergiahooneid aasta resulteeruva soojustarbimisega 0,
- plussenergiahooneid, mis võivad anda ülejäävat (nt päikesekiirguse kasutamise teel saadavat) energiat väljapoole hoonet.

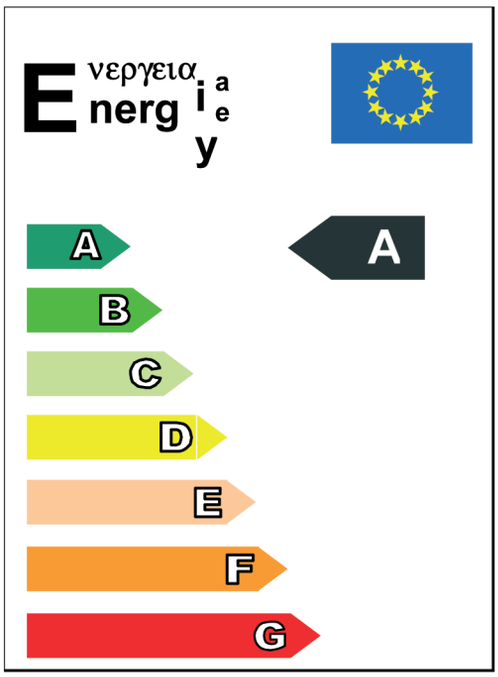
Elektriajamid tarbivad ligikaudu 2/3 kogu maailmas toodetavast elektrienergiast. Seetõttu pööratakse erilist tähelepanu uute energiatõhusate ajamisüsteemide väljatöötamisele ja energiakadude vähendamise elektriajamite reguleerimisel. Suurimat kokkuhoidu annavad tavaliselt

- sagedusmuundur-vahelduvvooluajamid,
- pooljuht-reguleerimisseadmetega alalisvooluajamid.

Nagu juba mainitud (vt jaotis **6.3**), võib nende ajamite rakendamisel vananenud ajamisüsteemide asemel saavutada energiasäästu tihti kuni 50 %.

Kuigi **valgustuse** osatähtsus elektrienergia tarbimises on maailmas ainult ligikaudu 10 %, peetakse tähtsaks ka sellel energiakasutusalal rakendada kõiki võimalusi energia kokkuhoiuks. Põhilisteks sellekohasteks meetmeteks võib lugeda

- hõõglampide asendamist lahenduslampidega ja valgusdioodidega,
- lahenduslampide drossel-liiteseadiste asendamist sagedusmuunduritega (vt jaotis **6.6**).



Joonis 8.7.2. Euroopa energiatarbivusmärgistus (*energy label*). Joonisel kujutatud näide käib toote kohta, mis kuulub energiatarbivusklassi A. Märgistussildile kantavaid lisaandmeid ja tingmärke ei ole näidatud

Kodumajapidamises kulutavad valgustus, elektrilised majapidamisseadmed, ajaviiteelektroonika ja arvutid hoonete energiavajadusest umbes kolmandiku. Kõige enam kulub elektrienergiat toidu külmsäilitusele ja valgustusele, kuid ka olmeelektroonika ja arvutite osakaal kasvab pidevalt. Et tarbijad eelistaks energiatõhusamaid kodumajapidamisseadmeid ja et tootjad neid valmistaks, tuleb Euroopa Liidu sellekohase direktiivi kohaselt kõik taolised seadmed varustada energiatõhusust iseloomustava märgistusega (joonis **8.7.2**).

Käesoleval ajal on selline märgistus kasutusel

- külmikuil, sügavkülmikuil ja nende kombinatsioonidel,
- pesumasinail, trummel-pesukuivatitel ja nende kombinatsioonidel,
- nõudepesumasinail,
- elektrilistel valgusallikatel (lampidel),
- elekterküttekehadel,
- õhukonditsioneeridel.

Energiatarbivust väljendatakse nimetatud märgistusel skaalaga, mille astmeid tähistatakse tähtedega **A** kuni **G**, kusjuures tähis **A** omistatakse antud seadmeliigis kõige vähem ja tähis **G** kõige enam energiat tarbivale seadmele. Aste **D** vastab ligikaudu antud seadmeliigi Euroopa keskmisele energiatarbivusele. Tavaliselt esitatakse märgistusel

ka mitmesuguseid lisaandmeid seadme kasutustõhususe (nt pesumasinatel pesutulemuse), vee ja olmekemikaalide kulu ja muude tehniliste näitajate (mahu, täitekoguse, müratasemе vms) kohta.

Mõnikord on elektritarvitite energiatõhusus läinud sedavõrd heaks, et seda ei saa enam väljendada ülaltoodud skaalaga. Nii näiteks toodetakse külmikuid tähistusega A+ ja A++, mille energiatarve on 25…40 % võrra madalam kui A-klassi seadmeil.

8.8 EESTI ENERGEETIKA TULEVIKUVÄLJAVAATEID

Eesti energiamajanduse omapärasuseks on, nagu juba eelpool mainitud,

- energiatarbe katmine ligikaudu 2/3 ulatuses oma energiavarudest – põlevkivist, puidust ja turbast ning vähemal määral tuule- ja hüdroenergiast, vedelatest ja gaasilistest biokütustest,
- elektrienergia saamine peaaegu 90-protsendiliselt kohaliku fossiilkütuse – põlevkivi – põletamise teel,
- paljude moraalselt ja füüsiliselt vananenud seadmete kasutuselolek elektrijaamades, alajaamades ja võrkudes,
- sõltuvus maagaasi ja vedelkütuste impordist,
- vedelkütuste transiitveosed Venemaalt Eesti sadamaisse.

Eesti energiamajanduse arengut sätestab selle riiklik arengukava [8.9], milles käsitletakse

- taastuvate energiaallikate rakendamist,
- elektrikaubandust,
- elektri tootmist ja hinnakujundust,
- elektritarbimise prognoose,
- elektrivõrkude arendamist,
- elektriturgu ja rahvusvahelist koostööd,
- elektrienergia tootmise keskkonnamõjusid,
- vajalikke investeeringuid,
- maksupoliitikat.

Energia kokkuhoiu kohta on koostatud energiasäästu sihtprogramm aastaiks 2007 kuni 2013.

Nimetatud juhisdokumentide ja käesolevas kursuses eelpool vaadeldud võimaluste alusel võib Eesti energeetikaolulisimateks arengusuundadeks lugeda

- põlevkivi tõhusamat kasutamist põlevkivielektrijaamade katelagregaatide uuendamise (ülekriitiliste auruparameetrite ja keevkiht-põletustehnika kasutamise) teel,
- põlevkiviõli tootmise laiendamist,
- põlevkivielektrijaamades tekkiva tuha tehnilist ärakasutamist,
- taastuvate energiavarude rakendamist vastavalt Euroopa Liidus kehtestatud eesmärkidele (vt joonis **8.5.1**) nii tuule- ja hüdroelektrijaamade juurdeehitamise teel kui ka küttepuidu kasutamisega elektrienergia tootmiseks,
- bio-mootorikütuste (etanooli ja biodiislikütuse) tootmise alustamist ja laiendamist,
- osalust uue tuumaelektrijaama rajamisel Leedusse ning tuumaenergia rakendamise kaugemate kavade uurimist,
- elektrienergia vahetuse arendamist Skandinaavia energialiiduga (esialgu Soome kaudu),
- kaugemas tulevikus – liitumist Euroopa Energiaedastusliiduga (koos Läti ja Leeduga),
- madal- ja kõrgepingevõrkude ning alajaamade uuendamist,
- päikeseenergia kasutamisvõimaluste uurimist,
- vähese energiamahukusega (nt teaduspõhiste) tööstusharude arendamist,
- hoonete soojusisolatsiooni parendamist küttekulude vähendamise eesmärgil,
- raudteetranspordi arendamist ja liitumist Euroopa kiirraudteevõrguga (nt kiirraudteeliinide Tallinn–Berliin ja Tallinn–Viin rajamisega),
- energia tõhusama kasutamise majanduslikku (sealhulgas riiklikku) stimuleerimist.

Väga tähtsaks tuleb nimetatud suundade hulgas lugeda Eesti elektrisüsteemi ühendumist Lääne-Euroopa ja Põhjamaade energialiitudega, mis peaks tagama kõrgtöökindla elektrivarustuse ja võimaldama osalemist Euroopa elektriturul ning elektrienergia hinna optimaalset kujundamist.

KASUTATUD KIRJANDUS

1 osa

1.1 Aristoteles. Philosophische Werke / Band I: Über die Dichtkunst. – Metaphysik. – Leipzig: Verlag von Felix Meiner, 1921. – 438 S.

1.2 Einstein, A. Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig? // Annalen der Physik. Vierte Folge **18** (1905), Heft 13. S. 639…641.

1.3 ISO 1000. SI-units and recommendations for the use of their multiples and of certain other units.

1.4 www.sizes.com/units/horsepower.htm

1.5 Schaefer, H.; Philippi, K. Der Energiehaushalt der Erde // Brennstoff, Wärme, Kraft **25** (1973), Nr. 9, S. 361…365.

1.6 Araki, T. jt. Experimental investigation of geologically produced antineutrinos with KamLAND // *Nature* **436** (2005), No. 7050 (28.7.2005), p. 409…503.

1.7 2003 Energy Statistics Yearbook. – New York: United Nations, 2006. – 584 p.

1.8 Häfele, W.; Nakicenovic, N.; Rogner, H.-H. Nutzbare regenerative Energiequellen in der Welt // Brennstoff, Wärme, Kraft **33** (1981), Nr. 5, S. 203…207.

1.9 Kleemann, M.; Meliß, M. Regenerative Energiequellen. – Berlin: Springer-Verlag, 1988. – 266 S.

1.10 Chronik der Menschheit. – Gütersloh/München: Chronik Verlag, 1997. – 1148 S.

1.11 Goren-Inbar, N.; Alperson, N.; Kislev, M. E.; Simchoni, O.; Melamed, Y.; Ben-Nun, A. Evidence of hominin control of fire at Gesher Benot Ya'agov, Israel // Science **304** (2004) No. 5671 (30.4.2004), pp. 725…727.

1.12 Knecht, S. Partnerschaft Mensch und Baum // Technische Rundschau **64** (1972), Nr. 23, S. 1.

1.13 Сассин В. Грани перемен // Курьер ЮНЕСКО 34 (1981), № 8, с. 9...12.

1.14 Ewe, T. Durch Mutation in die Moderne // Bild der Wissenschaft 2002, Nr. 7, S. 22…28.

1.15 Paturi, F. R. Chronik der Technik. – Gütersloh/München: Chronik Verlag, 1997. – 640 S.

1.16 Kramer, S. N. History begins at Sumer. – Chicago, 1959.

1.17 Juske, A. Vesiveskid. – Tallinn: Valgus, 1993. – 224 lk.

1.18 Mida jutustab Jägala juga // Waba Maa 27.10.1931, lk. 7.

1.19 Der Fischer Weltalmanach 2006. – Frankfurt am Main: Fischer Taschenbuch Verlag, 2005. – 800 S.

2 osa

2.1 EVS-EN 60617-2:2000. Skeemide tingmärgid. Osa 2: Märgielemendid, omadusmärgid ja muud üldkasutatavad märgid. – 34 lk.

2.2 EN 60027-1:2006. Letter symbols to be used in electrical technology. – General. – 116 p.

2.3 Kull, A.; Mikk, I.; Ots, A. Soojustehnika. – Tallinn: Valgus, 1974. – 551 lk.

2.4 Ots, A. Formation of Air-Polluting Compounds While Burning Oil Shale. – In: Energy and Environment. 1991 International Symposium on Energy and Environment. August 25–28, 1991, Espoo, Finland. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.– Pp. 284…290.

2.5 Ots, A. Põlevkivi põletustehnika. – Tallinn: Eesti Energia, 2004. – 768 lk.

2.6 The Pneumatics of Hero of Alexandria. From the original Greek translated for and edited by Bennet Woodcroft. – London: Taylor Walton and Maberly, 1851. – 111 p.

2.7 Feldhaus, F. M. Die Technik der Vorzeit, der geschichtlichen Zeit und der Naturvölker. – München: H. Moos, 1965. – 734 S.

2.8 Lilley, S. Inimesed, masinad ja ajalugu. – Tallinn: Valgus, 1973. – 340 lk.

2.9 Carnegie, A. James Watt. – New York: Doubleday, Page & Co., 1905. – 242 p.

2.10 Blueprints for Success. 125 years Babcock & Wilcox. – Alliance (Ohio): Babcock & Wilcox, a McDermott company, 1992. – 30 p.

2.11 Jäger, K. Lexikon der Elektrotechniker. – Berlin: VDE-Verlag, 1996. – 478 S.

2.12 List. F. Mehr Saft über den Wolken // Bild der Wissenschaft 2006, Nr. 2, S. 100…106.

2.13 Johnson, D. Zur Geschichte der Gasturbine // VGB Kraftwerkstechnik **52** (1972) Nr. 2, S. 93…98.

2.14 Kitman, J. L. The Secret History of Lead // The Nation, 20.03.2000.

2.15 Cogeneration system will power Reichstag // Modern Power Systems **18** (1998) Nr. 8, p. 7.

2.16 Uudiseid maailmast // Elektriala 8 (2006), nr. 1, lk. 17…18.

2.17 Solar thermal power: 500 MW take-off in US // Renewable Energy World **8** (2005) No. 5, pp. 16…17.

2.18 Prohaska, D. The Birth of the Fuel Cell – But Who is the Father? // European Fuel Cell Forum 2001. Press Release 13.08.2001. – 4 p.

2.19 Медведев Г. У. Ядерный загар. – Москва: Издательство «Книжная палата», 1990. – 416 с.

2.20 Rohstoffgehalt in Spaltprodukten ausgedienter Brennstoffelemente // Brennstoff, Wärme, Kraft **33** (1981) Nr. 10, S. 391.
2.21 Mägi, V. Nägus ja kebja. – Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, 2001. – 252 lk.
2.22 Sparsame Schiffe dank Supraleitung. Pressebericht 15.08.2005 // www.siemens.com
2.23 Risthein, E. Elektriajamitehnika alusepanija Moritz Hermann Jacobi // Elektriala **3** (2001), 4, lk. 23…26.
2.24 Kloss, A. Auf den Spuren der Leistungselektronik. – Berlin / Offenbach: VDE-Verlag, 1990. – 372 S.

3. osa

3.1 Eesti statistika aastaraamat 2006. – Tallinn: Statistikaamet, 2006. – 480 lk.
3.2 Ingermann, K. Soojusvarustussüsteemid. – Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2003. – 71 lk.
3.3 Risthein, E. Madalpingevõrkude juhistikusüsteemid. – Tallinn: EETEL-EKSPERT, 2001. – 48 lk.
3.4 Abrahamsson, B. Submarine Baltic exchange // power Engineering International **15** (2007), Issue 2, pp. 26…28.

4. osa

4.1 Gespeicherte Energie. Geschichte der elektrochemischen Energiespeicher. – Berlin & Offenbach: VDE-Verlag, 1994. – 244 S.

5. osa

5.1 Strange, B. Early electricity supply in Britain: Chesterfield and Godalming // Proceedings of the IEE **126** (1979) No. 9, pp. 863…868.
5.2 Wind Force 12. – European Wind Energy Association; Greenpeace. – 2003. – 50 p.
5.3 Global wind energy markets continue to boom – 2006 another record year // Global Wind Energy Council, 2007. – 7 p.
5.4 Record growth for global wind power in 2002 // www.ewea.org
5.5 Bertani, R. World Geothermal Power Generation 2001–2005 // GRC Bulletin 2006, May/June, 89…111.

6. osa

6.1 Solarwärme von Sunset. – Erlangen: Sunset Solar, 2003. – 12 S.
6.2 Renewables Global Status Report / 2006 Update. – Paris: Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, 2006. – 35 p.
6.3 Eesti esimene päikesepatarei // Postimees 08.05.1995, lk. 2.
6.4 Trombe, F.; Le Phat Vinh, A. Charactéristiques et performances énérgetiques du four solaire de 1000 kW du Centre National de la recherche scientifique // Comptes rendues de la Academie des sciences **272** (1971), 19, c. B1104…B1107.
6.5 IEC 60479-1:1994. Effects of current on human beings and livestock. Part 1: General aspects.
6.6 Risthein, E. Kaitseviisid elektriohutuse tagamisel. – Tallinn: EETEL-Ekspert, 2002. – 96 lk.
6.7 Energiabilanss 2005. – Tallinn: Statistikaamet, 2006. – 40 lk.

7. osa

7.1 Nicholas Stern. Stern Review executive Summary. – London: New Economic Foundation, 2006. – 27 p.
7.2 Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. – New York: United Nations, 1997. – 23 p.
7.3 Climat Change 2007: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers. – Paris: Intergovernmental Panel of Climat Change, 2007. – 18 p.
7.4 Carson, R. L. Silent Spring. – New York: Houghton Mifflin Printing, 1962. – 304 p.
7.5 Wikipedia, artikkel *Keeling curve*.
7.6 So können Autofahrer den CO2-Ausstoß verringern // Spiegel online 2.2.2007.
7.7 Wieland, P.; Kehlhofer, R. Die Versorgungslücke, Versorgungssicherheit versus Klimaschutz? // Bulletin SEV/VSE **98** (2007) 2, S. 39…40.
7.8 Vockenhuber, H. Zeitbombe Ozon. – München: Humboldt-Taschenbuchverlag, 1994. – 192 S.
7.9 Asbest: Auf dem Weg zu einem weltweitem Verbot. – Genf: Internationale Vereinigung für Soziale Sicherheit, 2006. – 36 S.
7.10 Vasold, M. Freiheitskampf und Frankenstein // bild der wissenschaft 2006, 9, lk. 52…53

8. osa

8.1 Grünbuch. Eine Europäische Strategie für nachhaltige, wettbewerbsfähige und sichere Energie. – Brüssel: Kommission der Europäischen Gemeinschaften, 2006. – 23 S.
8.2 Eesti arvudes 1920–1935. – Tallinn: Riigi Statistika Keskbüroo, 1937. – 348 lk.
8.3 Pajo, R. Viimase 50 aasta raskeim elektriavarii Lääne-Euroopas // Elektriala **8** (2007), nr. 1, lk. 20…21.
8.4 Airtricity unveils European Offshore Supergrid // Airtricity Press Release 8.5.2006, 3 p.
8.5 Mönninger, M. Die Wiederkehr des Atoms // Die Zeit 23.10.2003.
8.6 Energy Efficiencies: Pipe-dream or reality? WEC Statement 2006. – London: World Energy Council, 2006. – 10 p.
1.7 Euroopa Liidu ehitiste energiatõhususe poliitika // TTÜ Eesti Energeetika Instituudi Energiamajanduse Laboratooriumi Infoleht. November 2003, lk. 1…3.
8.8 Winter, C.-J. Sonnenenergie nutzen – Technik, Wirtschaft, Umwelt, Klima. – Berlin & Offenbach: VDE-Verlag, 1997. – 172 S.
8.9 Eesti elektrimajanduse arengukava 2005–2015. – 35 lk.