

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 kasutamistarbele 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.

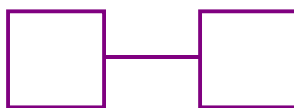
Energia pidev muundumine, nagu näitab jaotises 1.2 esitatud joonis 1.2.1 (Maa energiabilanss) toimub ka looduses – Maale langev päikesekiirgus muundub osalt soojuseks, osalt tuule- ja osalt hüdroenergiaks, osalt aga salvestub keemilise energiana; Kuu tiirlemisenergia muundub osalt Maa merede tõusu- ja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



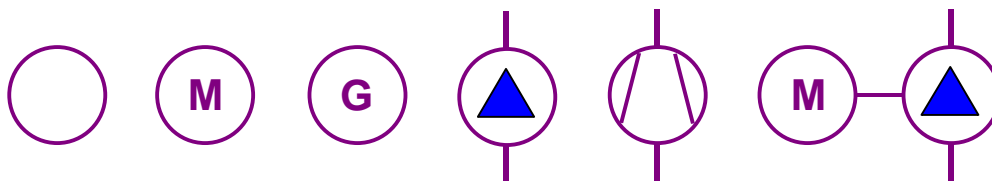
Joonis 2.1.1. Üldtingmärke: vasakul täpsemalt määratlemata tehniline seade, keskel vahelduvvooluseade, paremal tingmärgi värvilise esitusviisi näide

Seadmete omavahelist sidestamist tähistatakse enamasti sirgjoontega (joonis 2.1.2).



Joonis 2.1.2. Kaks omavahel sidestatud seadet

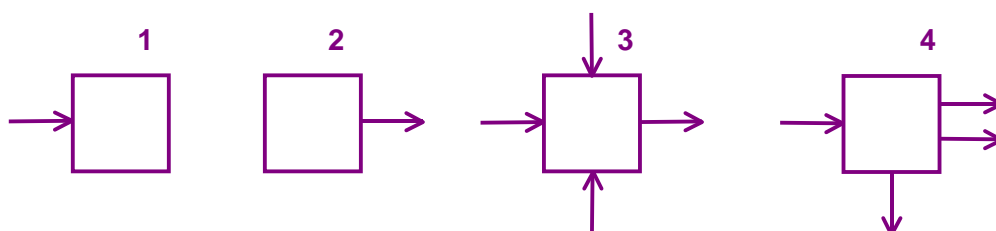
Pöörlevaid masinaid tähistatakse ringikujulise tingmärgiga (joonis 2.1.3).



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

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 2.1.4. 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).



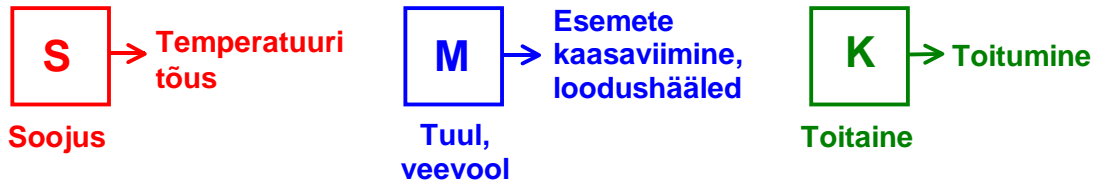
Joonis 2.1.5. Muunduri tähistamise näiteid mustvalgetel (vasakul) ja värvilistel (paremal) skeemidel

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

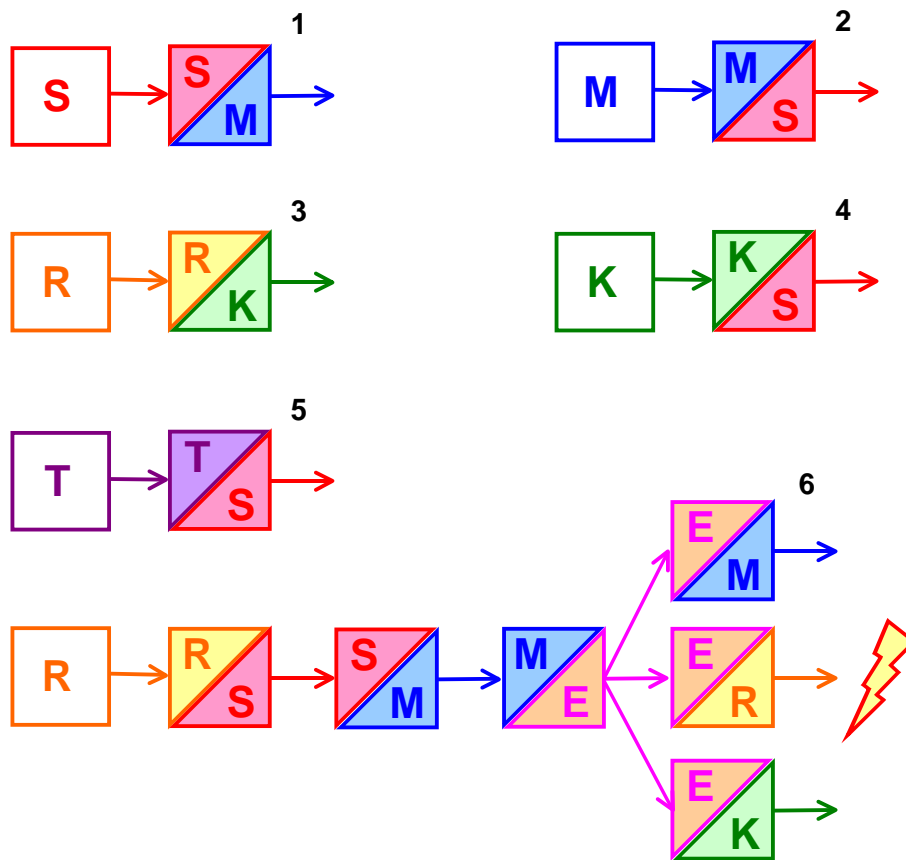
- E** – elektrienergia,
- K** – keemiline energia,
- M** – mehaaniline energia
- R** – kiirgusenergia,

S – soojus,
T – tuumaenergia).

Ülaltoodud tingimärke 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

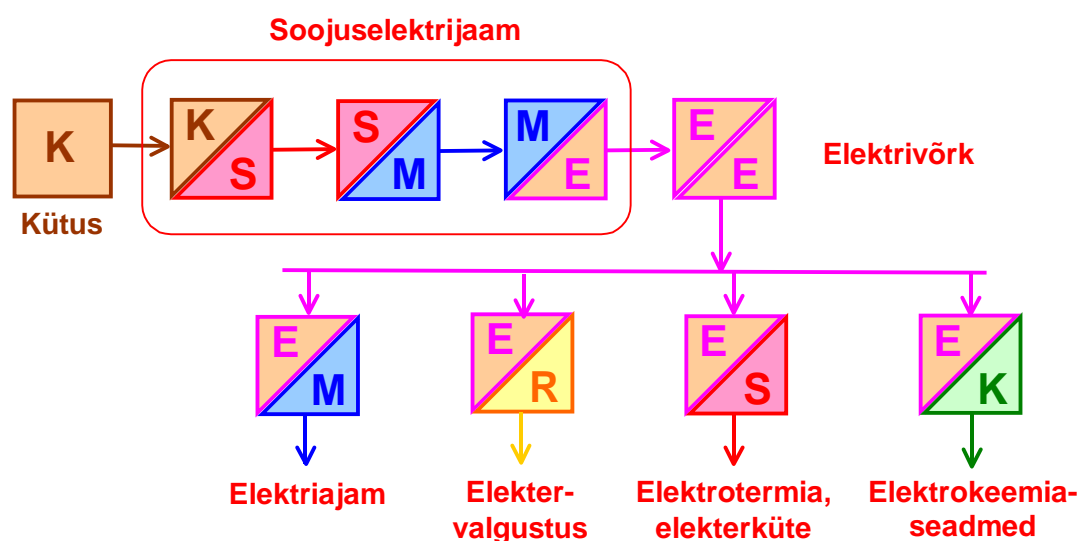


Joonis 2.1.7. Energia muundumise näiteid looduses. 1 soojuse muundumine õhu või vee liikumise mehaaniliseks energiaks, 2 mehaanilise (nt hõõrdumis-) energia muundumine soojuseks, 3 Päikese kiirgusenergia muundumine fotosünteesi teel keemiliseks energiaks, 4 keemilise energia muundumine nt orgaanilise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

Inimtegevuses kasutatakse väga mitmesuguseid energiamuundamisviise. Muundamise eesmärk võib seisneda

- 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.



Joonis 2.1.8. Energiamuundamisahel elektrienergia tootmisel ja kasutamisel (näide)

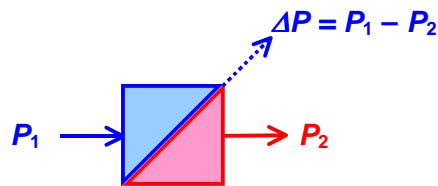
Energiamuunduri tähtsaimad tunnussuurused on **sisend-** ja **väljundvõimsus**, mida tähistatakse enamasti vastavalt tähtedega P_1 ja P_2 [2.2]. Väljundvõimsuse teatavat projekteerimisel etteantud, enamasti kestval talitlusel lubatavat väärtust nimetatakse muunduri **nimivõimsuseks**.

Sisendvõimsuse P_1 ja väljundvõimsuse P_2 vahe on muundurisisene *kaovõimsus*

$$\Delta P = P_1 - P_2$$

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

$$\eta = P_2 / P_1 .$$



Joonis 2.1.9. Muunduri sisend-, väljund- ja kaovõimsus

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

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 P_n / m ,
- nimivõimsust ruumalaühiku kohta P_n / V ,
- maksumust nimivõimsuse ühiku kohta C / P_n

ja muid taolisi.

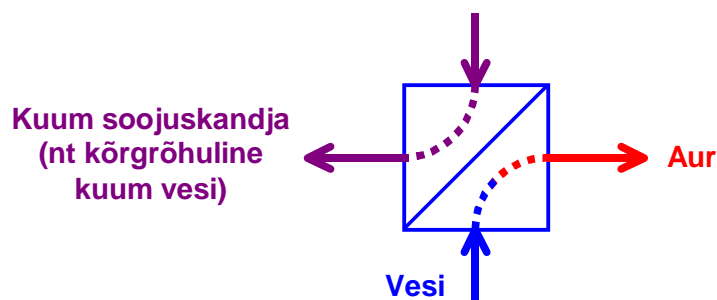
Energia muundamisviiside valikul arvestatakse alati ka nende *majanduslikkust*. Teiste sõnadega, muundamine peab olema *tasuv*.

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

2.2 AURUGENERAATORID (AURUKATLAD)

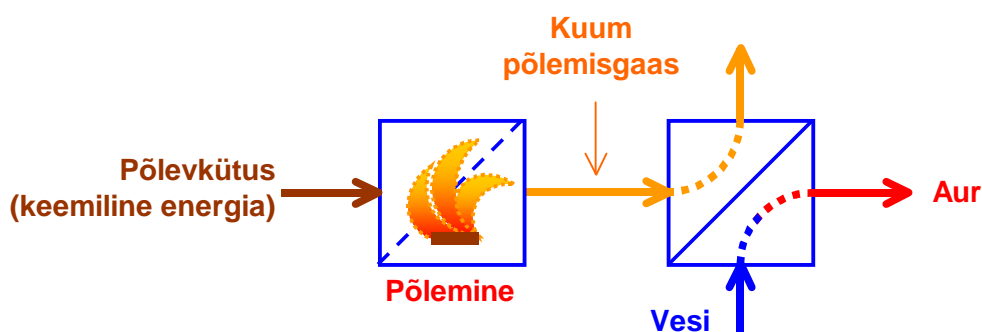
Aurugeneraator ehk **aurukatel** on energiamuundur, milles keemilist, soojus-, kiirus- vm energiat kasutatakse atmosfäärirõhust kõrgema rõhuga auru (enamasti **veeauru**) tootmiseks [2.3]. Kui aurugeneraator põhineb mingi kütuse põletamisel või sarnaneb sellisega, nimetatakse seda **aurukatlaks**. Saadava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

Lihtsaimas aurugeneraatoris saadakse soojust läbikulgevast 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**.



Joonis 2.2.1. Lihtsaima aurugeneraatori põhimõtteskeem

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

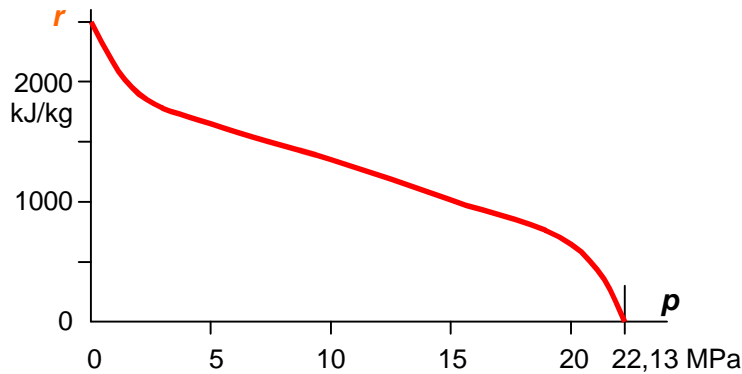


Joonis 2.2.2. Kütuse põletamisel põhineva aurugeneraatori (aurukatla) põhimõtteskeem

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.

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



Joonis 2.2.3. Vee aurustumissoojuse r olenevus rõhust p

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.

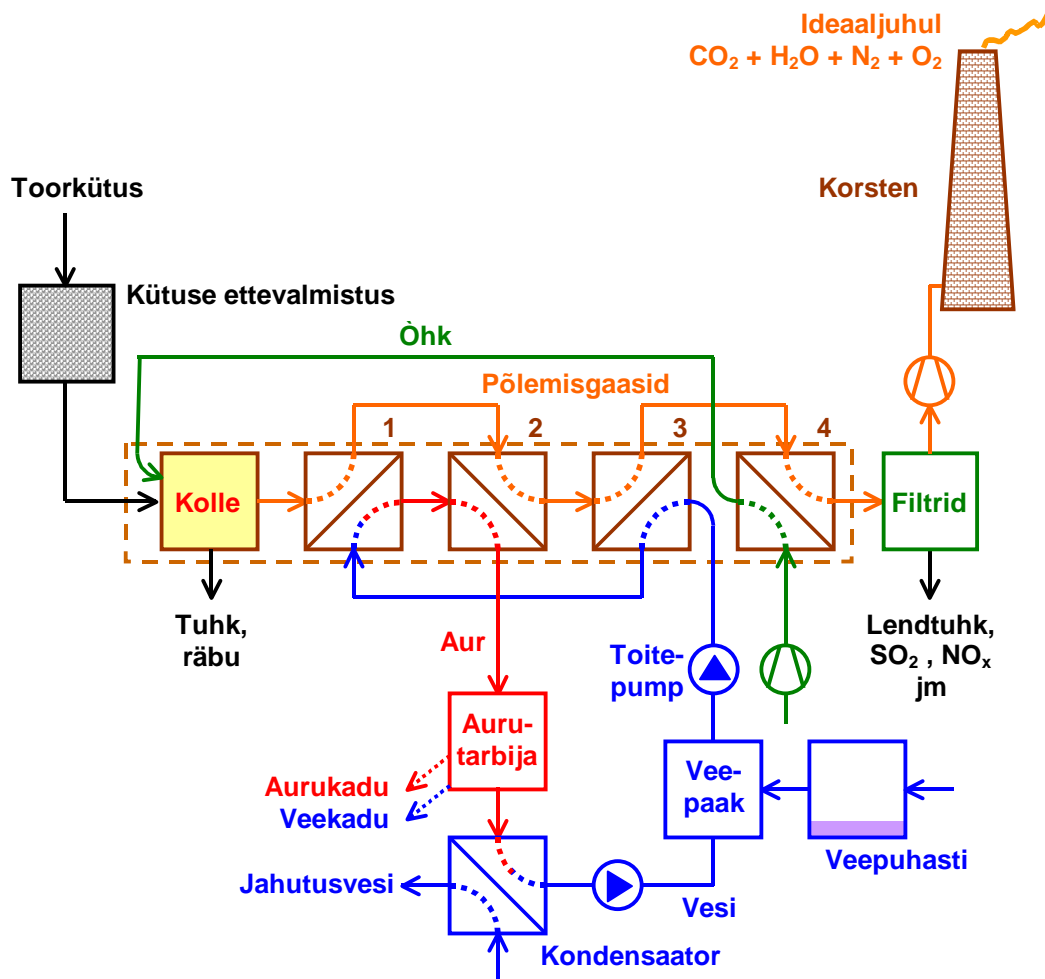


Joonis 2.2.4. Soojuse kulu ülekuumendatud alakriitilise auru tootmisel aurugeneraatoris

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

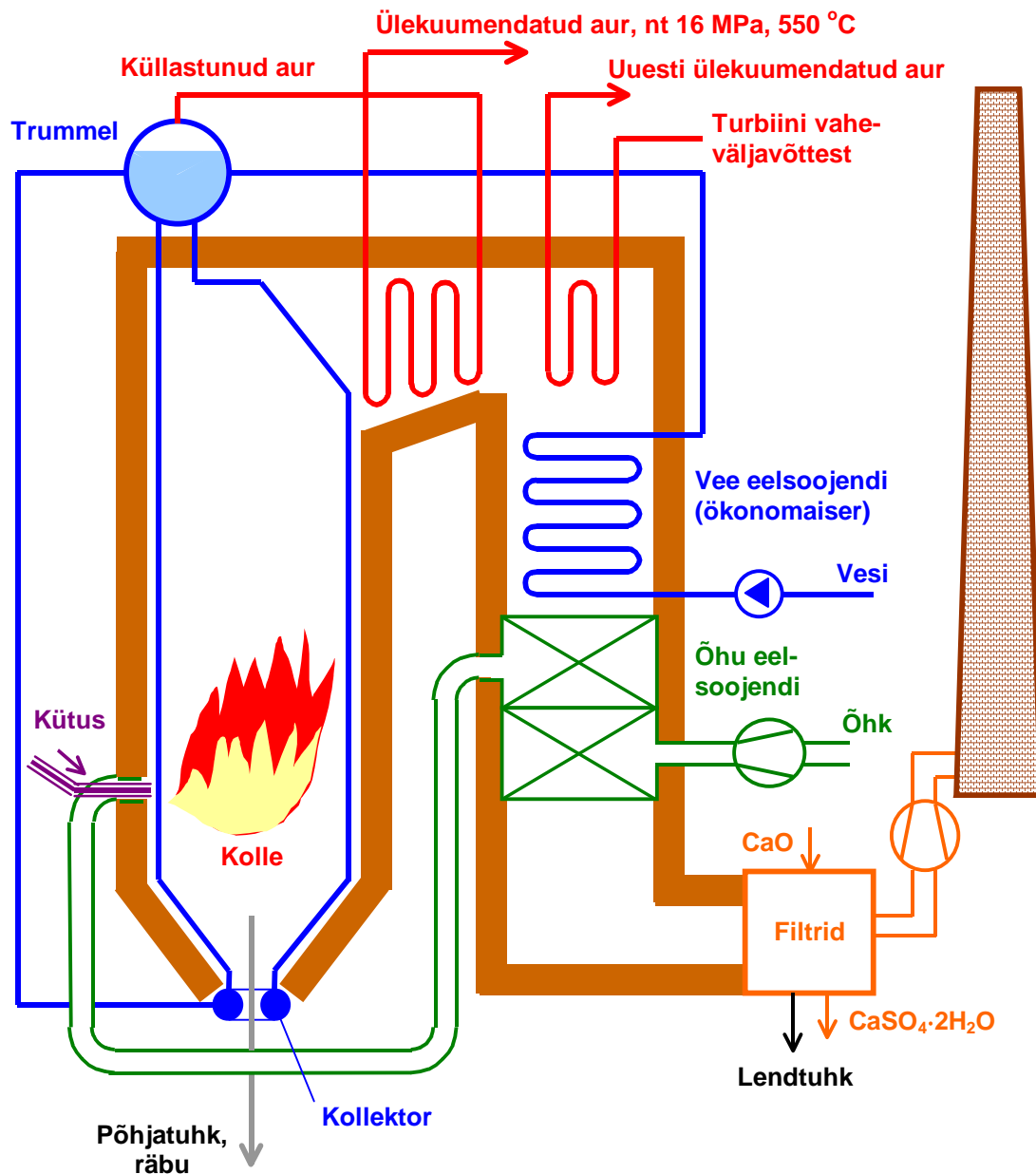
- kolle ja gaasikäigud, milles paiknevad vee- ja aurutorudest moodustatud **küttepinnad**,
- vee eelsoojendi ehk *ökonomaiser* (ingl *economizer*, 'kokkuhoidu andev seadis') milles kasutatakse põlemisgaaside soojust katla toitevee ettesoojendamiseks,
- õhu eelsoojendi, milles kasutatakse põlemisgaaside 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 ärastamisseadmed,
- toiteveepump, õhu- ja tõmbeventilaator,
- kütuse ettevalmistusseadmed (nt tahke kütuse veskid),
- küttepindade puhastamisseadmed,
- automaatreguleerimis-, mõõte- ja signalisatsiooniseadmed,

- kaitseseadmed,
- mitmesugused muud abiseadmed.



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

Loomuliku tsirkulatsiooniga, alakriitiliste auruparameetritega 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 *trumliste*, mis on seadistatud *auruseparaatoriga*. Kuna ühel läbikäigul muutub torus auruks ainult 5...12 % veest, on trumli ja kollektori vahel 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.

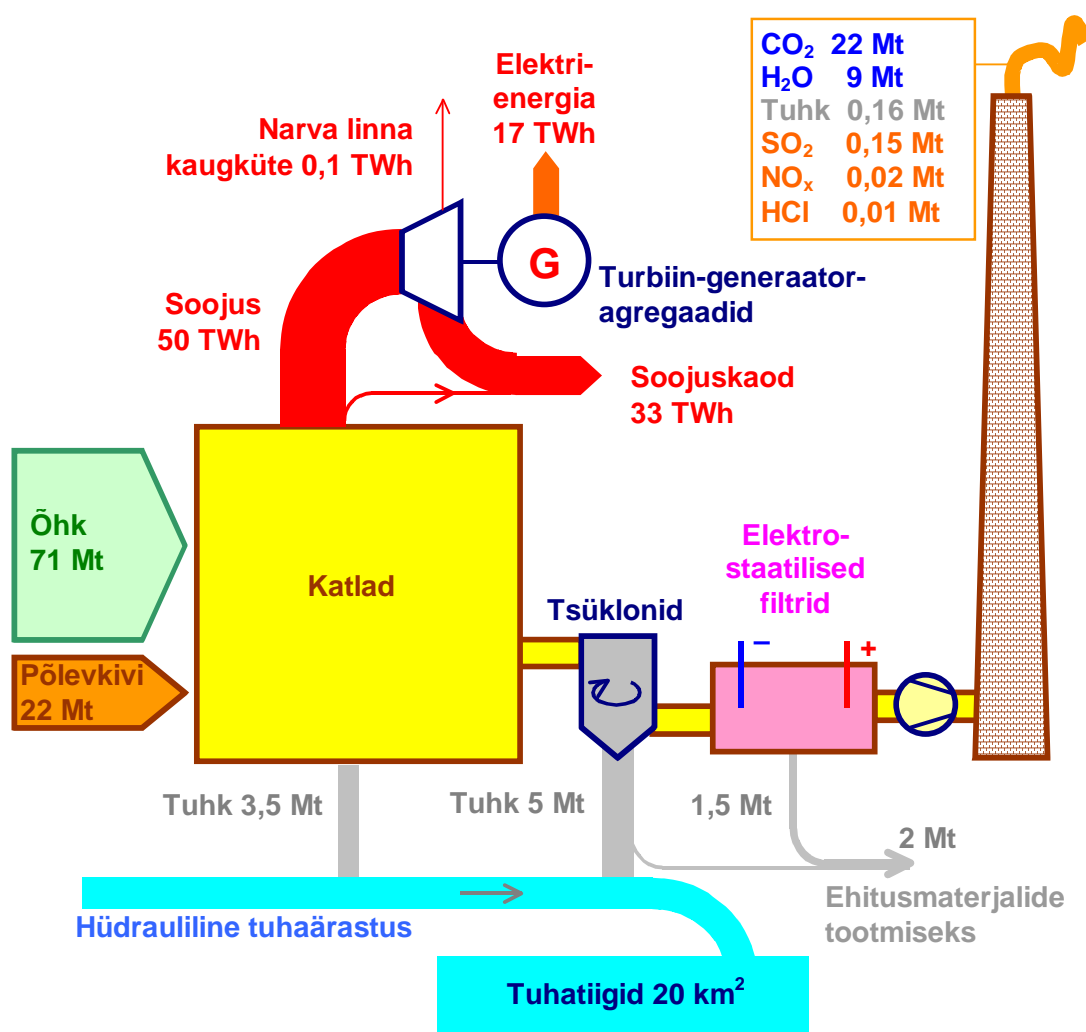


Joonis 2.2.6. Loomuliku tsirkulatsiooniga trummel-aurukatla ehituspõhimõte

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 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. On aga teisigi võimalusi, sealhulgas kaubalise väävelhappe H_2SO_4 ja väetisena kasutatava ammoniumsulfaadi $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ tootmine. Lendtuhk, mida eriti palju tekib pruunsöe ja põlvkivi 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 üksnes lendtuhk [2.4]. Selle aja omapärasus seisnes veel ka selles, et filtritest saadavat peent tuhka kasutati tuhktsementplokkide ja muude ehitusmaterjalide valmistamiseks.

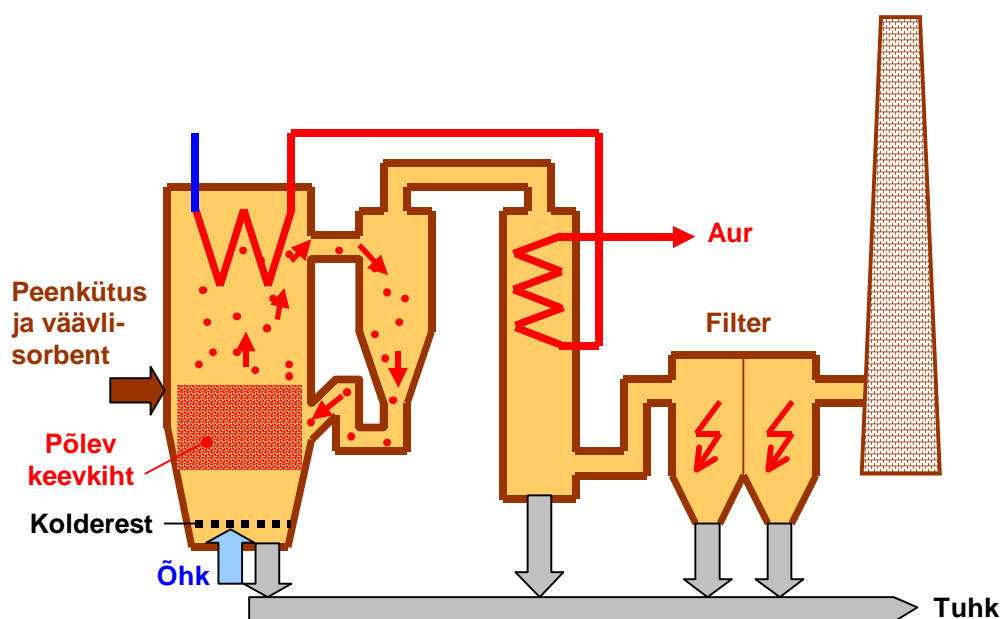


Joonis 2.2.7. Eesti põlevkivielektrijaamade aastane kütuse-, heitme- ja energiabilanss aastal 1990

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 kaugküttekattlamajade aurukateldes kasutatakse madalamaid aurutemperatuure ja -rõhkusid, soojuslik võimsus jääb neil aga enamasti 100 MW piiridesse.

Trummelkatel ei ole ainus aurukatla liik. Nii näiteks kasutatakse ülekritiliste 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.

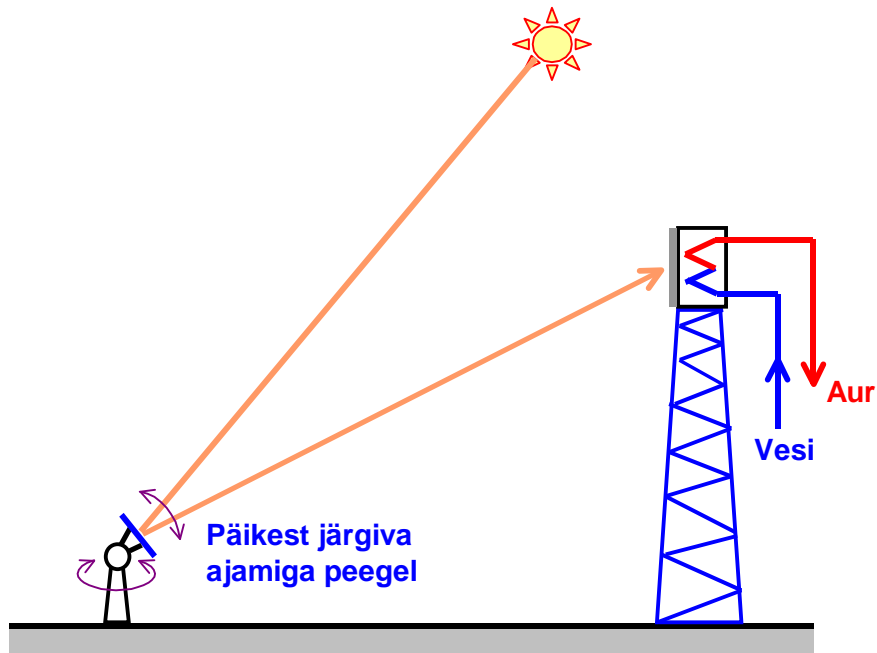
Keevkihtkoldes saavutatakse alltuleva, kolderesti abil ühtlaselt jaotatud õhuga hõljuv tahkest peenkütusest (põlevkivi puhul nt osakeste keskmise läbimõõduga ligikaudu 5 mm ja suurima läbimõõduga 40 mm), tuhast ja põlemisgaasist, mõnikord ka liivast koosnev kiht, mis mingil määral sarnaneb keeva vedelikuga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



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

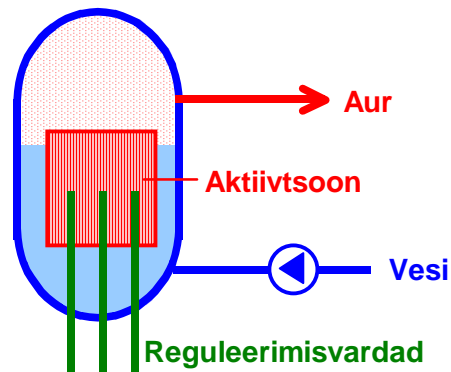
Keevkihis ühineb kütuses sisalduv väävel täielikult kütusele lisatava väävlisorbendiga või (nt põlevkivi puhul) samas kütuses sisalduva kaltsiumiga kaltsiumsulfaadiks, mistõttu ei ole vaja spetsiaalset filtrit vääveldioksiidi eraldamiseks suitsugaasist. Aastal 2004 valmisid Eesti ja Balti elektrijaamas 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.

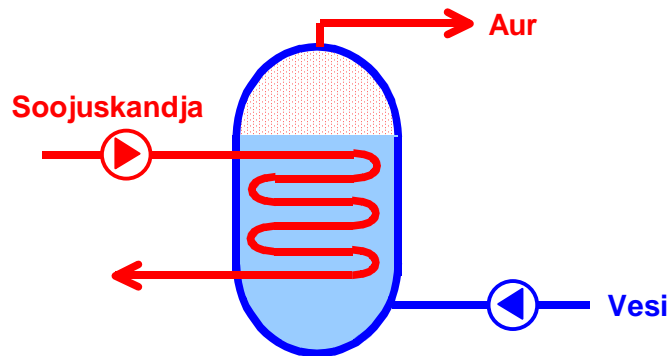


Joonis 2.2.9. Aurugeneraatori kasutamine torn-päikeseelektrijaamas

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

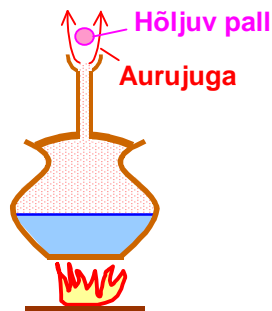


Joonis 2.2.10. Keevvesi-tuumareaktori ehituspõhimõte

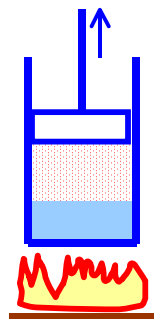


Joonis 2.2.11. Tuuma- ja päikeseelektrijaamades kasutatava aurugeneraatori ehituspõhimõte

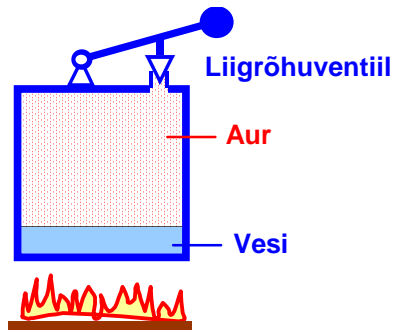
Esimeseks aurugeneraatoriks võib lugeda umbes aastal 100 kreeka teadlase Heroni poolt Aleksandrias leiutatud aurujoageneraatorit, mis koosnes kaanetatud veekatlust ja selle kaanest püstiselt väljuvast torust [2.6]. Toru lõppes poolsfäärilise kausiga, milles paiknes kerge pall. Aurujoa tekkel tõusis pall 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*.



Joonis 2.2.12. Heroni aurujoakatel

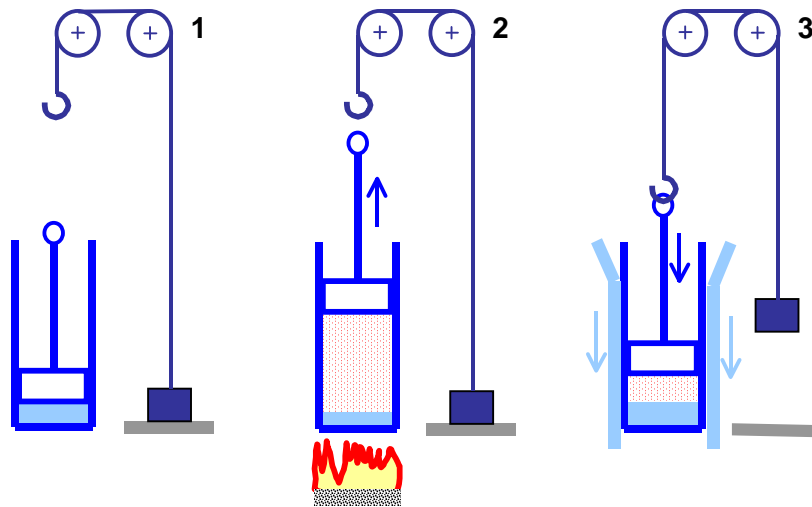


Joonis 2.2.13. Leonardo da Vinci kolbtõstemasin

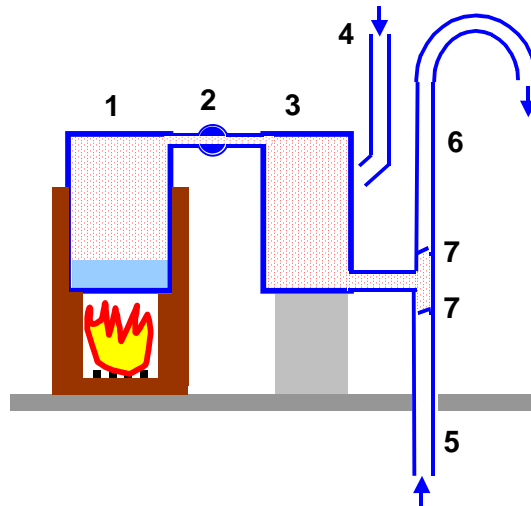


Joonis 2.2.14. Denis Papini kaitseventiiliga varustatud kinnine aurukatel

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 aurukatlat ja Papini väljastjahutataval silindril põhineva pumba (joonis 2.2.16), mis tegi ühe tõste minutis ja mille kasutegur oli alla 1 %, kuid mille kasutamismadused olid siiski paremad kui senistel hobuajamitel [2.8].

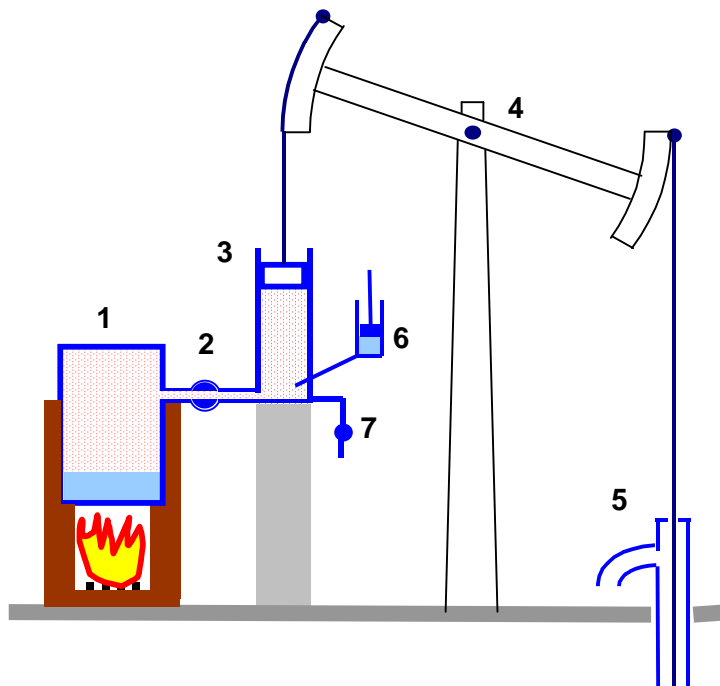


Joonis 2.2.15. Papini atmosfääri-aurumasina põhimõte. 1 algasend, 2 kolvi tõstmine aururõhuga ja kolvivarda haakimine tõstemehhanismiga, 3 silindri jahutamine külma veega, kolvi allasurumine õhurõhu toimel ja koorma tõstmine



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

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 m³/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 kaevandusepumba (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

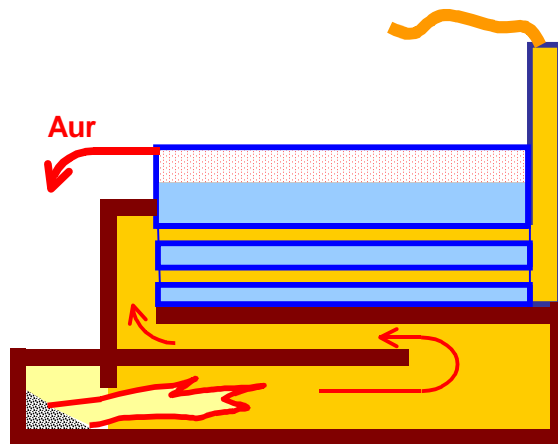
Algelisi atmosfääri-aurumasinaid leiutati ka mujal. Nii näiteks valmistas Altai metallurgiatehase mehaanik Ivan Polzunov (1728–1766) aastal 1766 kahesilindrilise, Venemaa esimese aurumasina, milles auru kondenseerimine toimus, nagu ka Newcomenil, vee sissepritsimise teel. Masinat kasutati ligikaudu ühe aasta jooksul kõrgahju lõõtsasüsteemi ajamina ja jäi pärast rikkumist, 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 **soojustisolatsiooni** [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 aurumasinate 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 toimus kolvile vaheldumisi mõlemalt poolt. Aastaks 1788 oli välja kujunenud **universaalne aurumasin** planetaarülekanedega, 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.



James Watt

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 **veektorukatlaid**, 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.

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 ülekiirilistel auruparameetritel. Kütuste põletamise keevkihttehnoloogia tuli kasutusele 1960ndail aastail USAs.