

# TEADUSTÖÖ KORRALDUS JA MEETODID

## IRT8860 Loengukonspekt 1-10 Heldur Haak

### 1. ÜLEVAADE TEADUSFILOSOOFIAST

#### 1.1 Teadus ja teadusuuringud

Vist kõige lühema teaduse määratluse on andnud Herbert Spencer (inglise filosoof, positivist, 1820-1903): teadus on organiseeritud teadmised.

Eestikeelsetest autoritest on A. Kõverjalg defineerinud teadust kui teaduslike teadmiste süsteemi, mis on esitatud faktide, mõistete, seaduste ja teooriatena (Kõverjalg 1993). Sama töö järgi teaduslikud teadmised on sellised teadmised, mille õigsust on põhjendatud teoreetiliselt või kinnitatud praktiliste kogemustega.

Teaduslikuks teadmiseks võib olla näiteks väide, et planeedid liiguvad ümber oma päikese elliptilistel orbiitidel. Seda võib tõestada teoreetiliselt gravitatsiooni- ja mehaanikaseaduste põhjal (eeldusel, et tegemist on ainult kahe taevakeha vastastikuse mõjuga) ja kinnitada ka vaatlustega (täpsed vaatlused näitavad ka kolmandate taevakehade poolt tekitatavaid häiringuid.).

Teaduslikud teadmised on sageli tekkinud üldistustena vaatlusotsustustest. Kui ülaltoodud näites pidada silmas ainult meie päikesesüsteemi, on võimalik üldistusi katseliselt kontrollida. Kui aga üldistada väidet kogu universumile, muutub üldistatud väite kontrollimine kõigil juhtudel praktiliselt võimatuks. Sellist üldistatud seaduse tuletamist nimetatakse induktsionismiks ja sellest tuleb veel juttu edaspidi.

A. Aarma on teadust määratlenud järgmiselt: teadus on tegevusala, mille eesmärk on uurimuslikul teel uute teadmiste saamine ja nende esmasrakendamine (Aarma 2008, lk 8). Vihjest teadmiste esmasrakendamisele järeldub, et teaduste alla ei kuulu mitte ainult fundamentaalteadused (näiteks matemaatika, füüsika, keemia, bioloogia), vaid ka rakendusteadused, mille eesmärgiks on fundamentaalteaduste saavutuste rakendamine. Näiteks raadio- ja sidetehnika on rakendusteadus, mis fundamentaalteadustest on kõige tihedamalt seotud füüsikaga, sealhulgas eriti elektromagnetismi käsitleva osaga. Rakendusteaduse tulemuste praktiliseks kasutamiseks on vajalik veel arendustöö, mis on rakendusuurimustega tihedalt seotud.

Viimases määratluses on juttu uurimuslikul teel teadmiste saamisest. Siit tuleneb teadusuuringu mõiste, mis seisneb sihipärasel teadmiste kogumises ja nende omavahelises seostamises.

Mingil määral võib teadmisi koguda ka igapäevases elus tehtavate tähelepanekute kaudu, kuid reeglina tähendab teadusuuring spetsiaalsete vaatluste ja katsete korraldamist ning saadud tulemuste teoreetilist analüüsi.

Andmete kogumine ilma nende analüüsita ei ole teadusuuring. Otstarbekas on andmete hulka laiendada sihipäraselt lähtudes seni kogutud andmete läbitöötamisest.

Uurimine peab sisaldama ka saadud tulemuste kontrolli, eelkõige uurija enda poolt. Peale selle uurijad reeglina publitseerivad oma olulised uurimistulemused, mis annab ka teistele uurijatele võimaluse neid tulemusi kontrollida.

Teadus on kumulatiivne, s.t. kasvav andmete kogum. Pideva kumulatiivsuse on kahtluse alla seadnud Thomas Kuhn. Kuhni järgi teadusrevolutsioonide käigus heidetakse kõrvale seni kehtinud mõisteid ja teooriaid ja asendatakse need uutega (Kuhn 2003). Vaatamata sellistele (suhteliselt lühiajalistele) teadmiste süsteemi korrastamise etappidele üldine teadmiste maht siiski aja jooksul kasvab.

Teadlane kasutab oma uurimistöös mingit mõistete, seaduste ja teooriate süsteemi, mis lähtub tema poolt omaks võetud teadusfilosoofiast. Sellise süsteemi kohta on T. Kuhni järgi võetud kasutusele paradigma mõiste.

## 1.2 Teadusfilosoofilised paradigmad

Tänapäeval loetakse teadusuuringute kolmeks põhiliseks paradigmaks positivismi, postpositivismi ja interpretivismi (Pickard 2007).

Positivismi (ld. *positivus* - tõeline, tegelikkusel põhinev) rajas prantsuse filosoof August Comte (1798 – 1857). A. Comte eesmärgiks oli rajada empiiriline, s.t. kogemusel põhinev filosoofia inimühiskonnas toimivate nähtuste kirjeldamiseks, vastandina tol ajal valitsenud teoloogilisele ja metafüüsilisele mõtteviisile. Ta püüdis kasutada sama metoodikat, mida kasutati tol ajal suurt edu saavutanud loodusteaduste (füüsika, keemia, astronoomia) puhul ja selle abil ühiskonda paremaks muuta, kuid tema tulemused jäid suures osas retooriliseks (Pickard 2007, lk 6-8).

Teiseks etapiks positivismi arengus oli loogiline positivism. Esmajoones tuleb siin nimetada Bertrand Arthur William Russell (1872-1970). B. Russell pärines aristokraatlikust suguvõsast, tema vanaisa lord John Russell oli 1840-ndail aastail olnud Suurbritannia peaminister. B. Russell õppis Cambridge'i Ülikoolis matemaatikat ja filosoofiat. Koos A. N. Whiteheadiga kirjutas ta 1910-1913 kolmeköitelise suurteose „Principia Mathematica“, mille põhieesmärgiks oli matemaatika taandamine loogikale (Russell WWW). Päriselt see siiski ei õnnestunud ja hiljem tõestas Kurt Gödel, et ükski mittevastuoluline loogikasüsteem ei saa tõestada kõiki matemaatika tõdesid. Eesti keeles on ilmunud B. Russell teos „Uurimus tähendusest ja tõest“ (Russell 1995).

Möödunud sajandi 20-ndail aastail tekkis Viini ülikooli juurde nn. Viini ring, mille algatajaks oli prof. Moritz Schlick (1882-1936). Teistest ringi liikmetest oli tuntuim Rudolf Carnap. Viini ringi liikmed eelistasid oma vaadetele nimetust loogiline empirism, et rõhutada oma eristumist A. Comte positivismist. Loogilised empiristid tunnistasid teaduslikeks ainult selliseid väiteid, mida on füüsilise kogemuse põhjal võimalik kas tõestada või ümber lükata. Suurt tähelepanu pöörasid nad ka keele kui filosoofia tööriista semantilisele analüüsile. Tänapäeval kasutatakse sageli loogilist empirismi ja loogilist positivismi sünonüümidenä.

Lõppenud sajandi keskpaigaks välja arendatud nn standardne positivism oli baasiks järgnevale postpositivistlikule paradigmat, mis võttis arvesse sama sajandi alguses toimunud revolutsioonilisi uuendusi füüsikas (relatiivsusteooria, kvantmehaanika).

**Positivistlikul paradigmat** põhinevad N. Wallimani raamatus (Walliman 2005, 12-13) toodud teadusliku uurimismeetodi põhiseisukohad. Need seisukohad (veidi muudetud sõnastuses) on järgmised.

**1. Maailmas valitseb determinism ja kord**, millest me suudame aru saada. Sündmustel on põhjused ja on võimalik leida seosed põhjuste ja tagajärgede vahel. See võimaldab sündmusi ennustada, näiteks gravitatsioon on põhjuseks, miks õun maha kukub ja samuti kukuvad õunad ka homme ja ülehomm. Tuleb siiski arvestada, et näiteks ilmaennustused (eriti pikemaajalised) täituvad ainult teatud tõenäosusega, sest ei meie kasutatavad lähteandmed ega ka mudelid ei ole täiuslikud.

**2. Maailm ja selles esinevad nähtused kujutavad endast välist ehk objektiivset reaalsust**, mida kõik inimesed tunnetavad ühtmoodi. Teaduslikke teooriaid on võimalik reaalsuse vaatlemise teel kas kinnitada või ümber lükata. Sellise reaalsuse olemasolu või tema tunnetamise võimalust on paljud filosoofid pidanud vaieldavaks.

**3. Inimese tajud ja intellekt on maailma nähtustest aru saamiseks piisavalt usaldatavad.** Kuigi meie meelegaorganite võimalused on piiratud, on inimene loonud hulgaliselt teadusaparatuuri nähtuste täpsemaks jälgimiseks. Oluline on ka mälu ja loogika kasutamine andmete analüüsil ja järelduste tegemisel.

**4. Teadlaste eesmärgiks on saavutada tulemuste esitamisel ülimat lihtsust.** A. Einstein on öelnud: kõik tuleb teha nii lihtsaks kui võimalik, aga mitte veelgi lihtsamaks.

**5. On võimalik üldistada uurija poolt vaadeldavaid üksikjuhte kogu maailmas kehtivateks üldisteks reegliteks.** Üldiste reeglite olemasolu võimaldab nende kasutamise teel erijuhtudel ka nähtusi ennustada. See on kõigist esitatud seisukohtadest kõige problemaatilisem ja on paremini

kasutatav loodusteadustes (keemia, füüsika), kuid halvemini kasutatav näiteks sotsioloogias. Sellist üldistamist nimetatakse ka induktsiooniks, kuid see ei ühti matemaatilise induktsiooni mõistega.

**Postpositivistlikus paradigmas** on (lähtudes kaasaegse füüsika seisukohtadest) nõrgenenud range determinismi nõue, teatud juhtudel aktsepteeritakse juhuslikkust. Raadioelektronikas me näiteks aktsepteerime soojusmürale vastava signaali juhuslikku hetkväärtust, kuid loeme täpselt määratuks tema statistilisi omadusi (ruutkeskmine väärtus, spektraalne koostis).

Säilinud on seos põhjuse ja tagajärje vahel, kuid alati ei ole võimalik neid seoseid absoluutse täpsusega välja selgitada. Kõik suurused ei ole alati täpselt mõõdetavad (füüsikas väljendab seda ka Heisenbergi ebatäpsuse relatsioon).

Positivistlik objektiivne reaalsus nõuab, et uuringu tulemus peab olema uurijast täiesti sõltumatu. Postpositivism aktsepteerib uuringut kui uurija poolt antavat interpretatsiooni, kuid objektiivsus peab olema uurija eesmärgiks.

Postpositivismis säilib üldistamise idee, kuid oluliselt on muutunud üldistatud looduseaduste väljaselgitamiseks kasutatav meetodika. Seni valitsenud induktivismi asemel loeb postpositivism põhiliseks meetodiks falsifikatsioonismi. Ka falsifikatsioonismil on mitmeid eri vorme, millest lähemalt edaspidi.

Alternatiiviks positivistlikule mõtteviisile on **interpretivism**, mis on paljude filosoofiliste seisukohtade ühisnimetuseks. Vastavad teooriad tegelevad põhiliselt inimese ja ühiskonna uurimisega (psühholoogia, sotsioloogia) ja nende üheks põhiideeks on, et inimese mõtteid ja käitumist ei saa uurida füüsikaliselt koetavate põhjuste ja tagajärgede näol. Üldise objektiivse reaalsuse asemel on iga indiviidi oma, isiklik reaalsus. Uurija ja uuritav objekt ei ole sõltumatud, sest igasuguse uurimistulemuse me saame uurija ja uuritava vahelise vastastikuse suhtlemise tulemusena (vestlused, intervjuud, ka vaatlused). Kui positivism uurib nähtuste kvantitatiivseid seoseid, kasutades füüsikaliselt mõõdetavaid suurusi ja muutujaid, mille puhul saab põhjuse-tagajärje seoseid esitada valemitena, siis interpretivismi paradigmale vastav kvalitatiivne uurimisviis tegeleb põhiliselt kvalitatiivsete mõistetega, mis ei ole täpselt mõõdetavad (Laherand 2008).

Kuna käesolevas õppeaines käsitletavad uurimismeetodid puudutavad põhiliselt Maa-teadustega seotud mõõdetavaid mõisteid (temperatuurid, kivimite vanus), siis on meie juhul õigustatud (post)positivistliku paradigma kasutamine. Mitmetel juhtudel pole välistatud ka kvalitatiivse ja kvantitatiivse uurimisviisi ühendamine.

### 1.3 Induktivism ja selle kriitika

Nagu oli juba öeldud p.1.1, tuletatakse üldistatud seadused vaatlusotsustustest. Tekib küsimus : kuidas jõuda vaatlusest tulenevate üksikotsustuste juurest teaduslikku teadmist moodustavate üldiste seaduspärasusteni?

Induktivistlik seisukoht on järgmine: üldistatud seaduse saab tuletada lõplikult hulgast üksikotsustustest, kui on täidetud järgmised tingimused:

- vaatlusotsustuste hulk peab olema suur,
- vaatlusi tuleb korrata väga mitmesugustes tingimustes,
- ükski vaatlusotsustus ei tohi sattuda vastuollu tuletatud üldise seadusega (Chalmers, 1998, lk 27).

Olles näiteks katseliselt leidnud, et paljud metallid paisuvad kuumutamisel, teeb induktivist üldistuse: kõik metallid paisuvad kuumutamisel. Täielikuks kontrolliks tuleks aga katsetada kõiki metalle ja seda kõikvõimalikes tingimustes, sealhulgas temperatuuri absoluutsest nullist kuni sulamistemperatuurini. See pole tehniliselt sugugi lihtne (vajalikud väga madalad ja väga kõrged temperatuurid, mõned metallid on väga agressiivsed). Kui aga piirduda ainult mingi valitud hulga metallidega, jääb alati võimalus, et tehtud üldistus on ekslik. Kui mingi katse näitab väite ekslikkust, nimetatakse seda väite falsifitseerimiseks.



## 1.4 Kas on olemas objektiivne reaalsus?

See on tavaline vaidlusküsimus materialismi ja idealismi vahel. Materialistlik positivist vastab kindlasti jaatavalt, idealismile tuginev interpretivist aga tõenäoliselt eitavalt.

Vaatleme näitena Chalmersi raamatus toodud trepikujulist joonist (Chalmers 1998, lk.51). Selle vaatamisel võib tekkida kaks erinevat ruumilise taju varianti (ka samal vaatlejal): kas trepp, millel nähakse astmete pealispinda või astmestik, mida võib näha trepikojas üles vaadates. Chalmers teeb järelduse, et tajukogemust ei määra ainult vaatlusel tekkiv kujutis silma võrkkestal, vaid ka vaatleja eelnevad kogemused. Selliselt esitatud järeldus on täiesti õige. Näidet aga ei saa interpreteerida selliselt, et kaks vaatlejat võivad sama reaalsust (s.t. joonist) tõlgendada erinevalt, kusjuures mõlemad arvamused on õiged. Tegelikult ei sisalda joonis mingit ruumilist informatsiooni ja kõige täpsemal teaduslikul seisukohal just need Aafrika hõimude esindajad, kes näevad joonisel ainult tasapinnale paigutatud jooni. Juba joonise tõlgendamine ruumilise trepina tuleneb vaatleja varasematest kogemustest ( ta on sageli näinud treppi ja on tuttav tehniliste joonistega) ja seda võib nimetada ka vaatleja poolt antud tõlgenduseks ehk vaatleja fantaasiaks. Veelgi enam kuulub fantaasia valdkonda vaatleja kujutletav ruumiline asetus trepi suhtes (vaade alt üles või ülalt alla). Probleem on toodud näite puhul selles, et kuna nähtava pildi ruumitaju tekib inimese peaaugus alateadlikult, siis on väga raske eristada selles tajus segunenud objektiivset reaalsust ja vaatleja fantaasiat.

Toodud näitest järeldub, et vaatleja tajukogemus sõltub ka varem omandatud kogemustest (teooriast), kuid nähtu kirjeldamisel teadlane ei tohi lisada vaatlustulemustele omapoolset fantaasiat. Chalmersi suhtumine antud näitest tulenevatesse erinevatesse tajukogemustesse pole väljendatud päris selgelt, kuid vastava punkti lõpus ta tunnustab objektiivse reaalsuse olemasolu : “olen täiesti nõus ja see on mu eeldus läbi kogu raamatu, et üks ja ainus, ainulaadne füüsikaline maailm eksisteerib sõltumata vaatlejatest” (Chalmers 1998, lk 55).

## 1.5 Karl Popper ja falsifikatsioonism

1902.a. Viinis sündinud Karl Popper õppis Viini ülikoolis, kus ta omandas 1928.a. filosoofiadoktori kraadi. 1946.a. kutsuti ta õpetama Londoni majandusülikooli, kus temast sai loogika ja teadusliku metodoloogia professor. 1972 a löödi ta rüütliks ja 1982 a võeti vastu Inglise Aukaaslaste Ordu. Karl Popper suri 1994.a ( Popper 2000, lk 3).

K. Popper suhtles ja diskuteeris Viini ringi filosoofidega, kuid jäi radikaalse positivismi suhtes kriitiliseks, kirjutades : “positivistlik radikalism hävitab koos metafüüsikaga ka loodusteadused : ka loodusseadused ei ole loogiliselt taandatavad elementaarsetele kogemuslausetele” (Popper 1971, lk 11). Tema loodud falsifikatsioonism on saanud üheks postpositivismi meetodiks.

### 1.5.1 Falsifikatsioonistlik teoriakäsitus

Nagu oli juba öeldud, eelneb falsifikatsioonisti jaoks teooria vaatlusele.

Oletame, et me tahame kontrollida teooriat, mille järgi on elektri ahelat läbiva voolu tugevus võrdeline ahelale rakendatud pingega ja pöördvõrdeline ahela takistusega (Ohmi seadust).

Teooria täielikuks tõestamiseks tuleks meil korraldada lõpmatu hulk katseid kõikvõimalike pingete ja kõikvõimalike ahelasse ühendatud komponentide puhul. Iga sooritatud katse jaoks me võime sõnastada otsustuslause, millest järeldub, kas mõõdetud tulemus vastab teooriale või mitte.

Nimetame sellist lauset baaslauseteks. Ka baaslausete hulk on lõpmatu ja me võime selle jagada kaheks alamhulgaks vastavalt sellele, kas tulemus vastab teooriale või mitte. Teooria on falsifitseeritav, kui teooriale mittevastavate baaslausete hulk ei ole tühi. Pange tähele, et teooria falsifitseeritavuse hindamisel pole veel juttu katsete tegelikust teostamisest, vaid ainult võimaluse olemasolust falsifitseerivat katset teostada.

Katsetamisel selgub, et paljude katsetatavate komponentide puhul teooria kehtib, kuid mõnede komponentide, näiteks pooljuhtdiodi puhul ei ole vool ja pinge võrdelised (VA-karakteristik ei ole

lineaarne). Sellega on teooria falsifitseeritud.

Formuleerime uue, kitsama teooria. Välistame pooljuhtseadised, elektrovaakuumseadised ja veel mitmed seadiste tüübid. Oletame, et tegemist on ainult metalltraadist keritud või mingist takistussegust valmistatud resistoridega.

Oletame, et me oleme jälle teinud hulga katseid. Enamus tulemusi vastab teooriale, kuid mõnede resistoride ja suurema pingega tehtud katsete puhul ilmneb anomaalia: voolu tugevus on arvatust erinev (enamasti väiksem). Sellega on jälle teooria falsifitseeritud.

Tähelepanelik vaatleja aga märkab, et ülalnimetatud katsete puhul on katsetatavad resistorid tugevasti kuumenenud. Ta varustab need radiaatoritega, mis viib kuumenemise palju väiksemaks. Korduskatsetel vastavad tulemused teooriale mõõtevea piirides. Nüüd formuleerime teooria täpsustatud variandi, mis väidab lineaarsuse kehtimist ainult kindla katsetustemperatuuri hoidmisel. Teooriale võib lisada ka takistuse temperatuuriteguri arvessevõtmise.

Seejärel otsustab induksionist, et uus teooria kehtib ja rohkem pole mõtet katsetada.

Falsifikatsioonist on ettevaatlikum. Ta ütleb, et teooria on parem kui eelmine ja seda võib teatud komponentide puhul üldreeglina kasutada, kuid teooria kontrollimist peaks ka edaspidi jätkama.

### **1.5.2 Väidete ja hüpoteeside falsifitseeritavus**

Mitte kõik väited ei ole falsifitseeritavad. Falsifitseeritav on näiteks väide: kõik ained paisuvad kuumutamisel. Teatavasti on vee tihedus suurim 4°C juures. Järelikult vee ruumala soojendamisel vahemikus 0°C kuni 4°C väheneb ja väide on falsifitseeritud.

Falsifikatsioonism loeb teaduslikuks ainult falsifitseeritavaid teooriaid.

Falsifitseeritav ei ole näiteks väide: ringjoone pikkus on  $\pi$ -kordne ringi läbimõõt, sest selle väite õigsus tuleneb otseselt konstandi  $\pi$  definitsioonist .

Ka väide: “universumis esineb teisigi planeete peale Maa, millel elavad mõistusega olendid” ei ole falsifitseeritav ja falsifikatsioonist ei loe seda teaduslikuks, sest selle väite ümberlukkamiseks tuleks läbi kontrollida kõik universumis olemasolevad planeedid, mis on võimatu.

Kehtib järgmine reegel: kui üldine väide ei ole induktiivselt tõestatatav, siis tema eitus ei ole falsifitseeritav (Popper 1971, lk 39-40).

### **1.5.3 Falsifitseeritavuse aste**

Erinevate teooriate falsifitseeritavuse astet on võimalik omavahel võrrelda. Vaatame järgnevaid näiteid:

- a) Marss tiirleb elliptilisel trajektooriga ümber Päikese;
- b) kõik planeedid tiirlevad elliptilistel trajektooriga ümber oma päikese.

On selge, et teooria b teaduslik väärtus on kõrgem kui a-l, sest ta haarab ühe erijuhuna ka a. Kui Marsi vaatlustest selguks, et a on väär, siis see falsifitseeriks erijuhuna ka b, vastupidine aga ei kehti. Siit võib järeldada, et seadus, mis on kergemini falsifitseeritav, väidab enam ja on teaduses olulisem seadus.

Falsifikatsioonistide väitel edeneb teadus katse ja eksituste varal. Teadus algab probleemidest.

Probleemi lahenduseks esitavad teadlased falsifitseeritavaid hüpoteese. Need vaadatakse kriitiliselt läbi ja testitakse. Mõned heidetakse kohe kõrvale. Ülejäänuid vajaduse korral parandatakse ja testitakse uuesti. Lõpuks jääb alles teooria, mis on testimisele kõige paremini vastu pidanud. Kunagi ei saa öelda, et teooria on täielikult tõene, kuid saab öelda, et ta ületab oma eelkäijaid.

### **1.5.4 Falsifikatsioonismi piiridest**

Ka falsifitseerimismeetod ei suuda vältida vaatlustel tehtavaid vigu ja ebatäpsusi. Selle tulemusel on võimalik nii tõeste teooriate ekslik falsifitseerimine kui ka vigaste teooriate kinnitamine. Osaliseks lahenduseks on vaatluste kordamine erinevate uurijate poolt ja hoolikas võimalike vaatlusvigade analüüs.

Sagedased on ka juhtumid, kus mingi falsifitseeritava teooria päästmiseks luuakse mingi uus lisateooria või -hüpotees. Need on nn *ad hoc* (selleks, et) hüpoteesid.

Kuni 18. saj. lõpuni valitses keemikute seas seisukoht, et kõik põlevad ained sisaldavad kergesti lenduvat tuleainet ehk flogistoni. Kui puud põlevad, siis flogiston lendub ja jääb järele tuhk. 18. saj.

lõpus aga prantsuse keemik Antoine Lavoisier tõestas mõnede ainete põletamisega klaaskolvis, et põlemisjäägid kaaluvad rohkem, kui aine enne põletamist. Sellele reageerisid flogistoni pooldajad *ad hoc*-teooriaga, mis väitis, et flogistoni kaal on negatiivne. Loodi teisigi flogistoniteooria versioone, kuid need osutusid üha raskemini mõistetavaks ja vähehaaval hakkas flogistoniteooria oma senist seisundit kaotama (Kuhn 2003, lk. 95-98).

Falsifikatsioonismi kriitika juurde pöördume tagasi punktis 1.7 koos Imre Lakatos'i seisukohtade esitamisega.

## 1.6 Paradigmad ja teadusrevolutsioonid

Ameerika teadusfilosoof Thomas Samuel Kuhn (1922-1996) õppis algul füüsikat ja tegi doktoritöö teoreetilises füüsikas. Doktorandina Harvardi ülikoolis hakkas huvi tundma ka teadusajaloo vastu (Kuhn WWW). Raamatu "Teadusrevolutsioonide struktuur" esitrükk ilmus 1962.a., eestikeelne tõlge 2003.a. (Kuhn 2003).

### 1.6.1 Paradigmad ja normaalteadus

T. Kuhni järgi võib teaduse arengut esitada järgmise skeemiga:

Eelteadus → normaalteadus → kriis → revolutsioon → uus normaalteadus → uus kriis j.n.e.

Eelteadus on organiseerimata tegutsemine. Normaalteadus tähendab mingil ajal ja mingis teadusvaldkonnas valitsevat ja üldtunnustatud teadmiste ja teooriate süsteemi, mida esitatakse vastava aja teadusõpikutes või teadusklassikute teostes. Sellist süsteemi on T. Kuhn hakanud nimetama paradigmaks ja see termin on muutunud üldkasutatavaks. Teadlaste tegevus normaalteaduse raames kujutab endast viimistlustööd, mille eesmärgiks on paradigmat paremini loodusega vastavusse viia. T. Kuhn näeb normaalteadust kui mõistatuste lahendamist, mis on allutatud paradigma reeglitele. Mõistatust, millele ei suudeta lahendust leida, peetakse pigem anomaaliaks kui paradigma falsifikatsiooniks. Anomaaliatele leitakse mitmesuguseid põhjendusi, näiteks arvutustes tehtud lihtsustused või vaatlusandmete ebatäpsus. Newtoni mehaanikaga mitte põhjendatav Merkuuri periheeli nihe oli teada kümneid aastaid enne Einsteini erirelatiivsusteooria tekkimist, kuid mitte see ei viinud Newtoni mehaanikat kriisini.

### 1.6.2 Kriis ja revolutsioon

Normaalteadlane on kindel, et paradigma poolt antavad meetodid on piisavad teaduses tekkivatele probleemidele lahenduse leidmiseks. Ka anomaalia olemasolu ei loo veel kriisi. Kriis tekib siis, kui anomaalia peab kindlalt vastu normaalteadlaskonna katsetele teda kõrvaldada ja see probleem muutub teaduse jaoks oluliseks. Seejuures tihti tekib mitmesuguseid senise paradigma päästmiseks loodud *ad hoc*-modifikatsioone (vt. näiteks p.1.5.4), millest ükski üldist tunnustust ei leia. Selline paljude vaieldavate teooriate ilmumine ongi teaduskriisi tunnuseks.

Analoogiline olukord tekkis 19. saj. lõpul seoses valguse leviku kiirusega ja selle sõltuvusega vaateleja või valgusallika liikumisest. Tol ajal peeti valguse levikut tagavaks keskkonnaks maailmaeetrit, järelikult peaks olema võimalik kindlaks teha ka vaateleja või Maa triivi läbi eetri. Selle avastamiseks korraldati korduvaid katseid (1881-1887, Michelson ja Morley), triivi aga ei õnnestunud avastada. Ühe seletusena tekkis hüpotees, et liikuvad kehad viivad osa eetrist endaga kaasa. See aga ei sobinud kuidagi kokku Maxwelli elektromagnetismi teooriaga. Oli tekkinud teaduskriis, millele lahenduse andis A. Einsteini relatiivsusteooria.

Revolutsioon tähendab paradigmade vahetust. Uus paradigma erineb vanast oluliselt ja teda eelnevaga sobitada ei saa. Tekivad uued mõisted või kasutatakse vanu mõisted uues tähenduses. Einsteini teooria heitis kõrvale senise kujutluse maailmaeetrist. Mass Einsteini teoorias (mass võib muutuda ka energiaks) on erinev massist Newtoni mõistes. Sellest lähtudes ei saa Kuhni arvates relativistlikku mehaanikat käsitleda Newtoni mehaanika edasiarendusena, milles Newtoni mehaanika säilib ühe erijuhuna (väikeste kiiruste jaoks), vaid täiesti uue teorianana (Kuhn 2003, lk

129-133).

### 1.6.3 Kas T. Kuhni vaated on relativistlikud?

T. Kuhn kirjutab paradigmade valiku kohta: nagu poliitilistes revolutsioonides, nii ei ole ka paradigma valikul kõrgemat standardit kui asjaomase kogukonna heakskiit. Et avastada, kuidas teadusrevolutsioonid teostuvad, ei pea me seetõttu uurima ainult looduse ja loogika mõju, vaid ka veenva argumentatsiooni võtteid, mis toimivad tõhusalt üpris spetsiaalsetes rühmades, kes moodustavad teadlaste kogukonna (Kuhn 2003, lk 124). Selline formuleering annab alust mitmetel kriitikutel, sealhulgas ka Chalmersil, süüdistada Kuhni relativismis (Chalmers 1998, lk 156-160). Relativism on vastandiks ratsionalismile. Ratsionalist arvab, et on olemas üks ja ainus ajatu universaalne kriteerium, mille suhtes peab hindama võistlevate teooriate suhtelisi väärtusi. Induktivistliku ratsionalisti jaoks on kriteeriumiks teooria toetus tunnustatud faktide poolt, falsifikatsioonisti jaoks aga (seni) falsifitseerimata teooriate falsifitseeritavusvõimaluste aste. Ratsionalist näeb selget vahet teaduse ja ebateaduse (pseudoteaduse) vahel. Induktivistlik ratsionalist otsustab, et astroloogia pole teadus sellepärast, et teda pole võimalik vaatluse teel kogutud faktidest induktiivselt tuletada.

Relativist eitab kõikehaarava mitteajaloolise ratsionalistliku normi olemasolu, mille alusel üht teooriat teisest paremaks pidada. Relativisti jaoks sõltuvad teooria väärtuste üle otsustamise alused sellega tegeleva isiku või rühma väärtushinnangutest või huvidest (Chalmers 1998, lk 148-151). See tähendab, et erinevate teooriate kaitsjad lähtuvad erinevatest seisukohtadest, kusjuures mõnes mõttes võib mõlemal rühmal olla õigus.

Kuhn ise ei olnud nõus sellega, et tema vaated on relativistlikud. Ta oli seisukohal, et teaduse areng on nagu bioloogiline evolutsiooni ühesuunaline ja pöördumatu protsess. Hilisemad teooriad on paremad kui varasemad ja on võimalik koostada kriteeriumide loetelu, mis võimaldab erapooletul vaatlejal iga kord eristada varasemat teooriat hilisemast. See ei ole relativistlik seisukoht ja see näitab, mis mõttes Kuhn usub veendunult teaduse progressi (Kuhn 2003, lk 252-253).

Kuhni vaateid on kritiseerinud Ungari päritolu teadusfilosoof Imre Lakatos, kelle seisukohtadega tutvume järgmises punktis.

## 1.7 Imre Lakatos ja uurimisprogrammid

### 1.7.1 Falsifikatsioonism I. Lakatos'i käsitluses

Imre Lakatos (1922-1974) oli K. Popperi kriitilise ratsionalismi suuna kaitsja ja edasiarendaja. (Lakatos, I. WWW).

I. Lakatos kirjutab, et on olemas kolm Popperit:  $Popper_0$ ,  $Popper_1$  ja  $Popper_2$ .  $Popper_0$  tähendab dogmaatilist falsifikatsioonisti,  $Popper_1$  naiivset metodoloogilist ja  $Popper_2$  komplitseeritud (*sophisticated*) metodoloogilist falsifikatsioonisti (Lakatos 2001, lk. 93).

**Dogmaatilise falsifikatsioonismi** tunnuseks on seisukoht, et kõik teooriad on oletuslikud. Teadus ei suuda ühtegi teooriat tõestada, ta suudab ainult katseliselt tõestada teooriate ekslikkust.

Tõmmatakse terav eraldusjoon teoreetikute ja katsetajate vahele. Teoreetikud teevad oletusi, katsetajad aga Looduse esindajatena kontrollivad neid. Teadus kasvab koos ümberlükatud teooriate arvu kasvuga. Dogmaatilised falsifikatsioonistid loevad teaduslikeks ainult neid teooriaid, mis on falsifitseeritavad, s.t. millel on olemas empiiriline baas (Lakatos 2001, lk.12 -14).

I. Lakatos loeb dogmaatilist falsifikatsioonismi ekslikuks. Selle puuduseks on eksperimendi psühholoogiline eelistamine teooriale: teooria võib olla alati ekslik, eksperimendile seevastu on antud otsustava kohtumõistja roll. Teaduse ajaloos aga on olnud hulgaliselt olukordi, kus teooriatele vastuväitena esitatud eksperimendi tulemused on ise osutunud ekslikeks.

Lakatos'i väitel pole Popper kunagi avaldanud ühtegi tööd, milles ta esineks dogmaatilise falsifikatsioonistina, kuigi mitmed kriitikud on Popperit kritiseerinud just kui dogmaatilist falsifikatsioonisti.

**Metodoloogiline falsifikatsioonism** on üks konventsionalismi haru. Konservatiivne



konventsionalism põhineb teadlaste järgmisel metodoloogilisel otsusel: kui mingi teooria on pikema aja jooksul olnud edukas ja vastanud kogemuslikele faktidele, siis teda ei lubata falsifitseerida. Anomaaliate korral kasutatakse teooria kaitseks näiteks *ad hoc*-hüpoteese. Sellise teooria tüüpiliseks näiteks on Newtoni mehaanika. Kui Uraani vaadeldav trajektoor erines Newtoni mehaanika alusel arvatust, siis ei kaheldud Newtoni mehaanikas, vaid loodi *ad hoc*-hüpotees, et selle põhjustab tundmatu planeet. Arvutati välja ka planeedi oletatav asukoht ja just seal leidiski J.G. Galle 1846. a uue planeedi, mis sai nimeks Neptuun. Sellega sai Newtoni teooria uue hiilgava tõestuse.

Eelkirjeldatud, nn. naiivne metodoloogiline falsifikatsioonist on tõsistes raskustes, kui seni usaldatavana tundunud teooria on seatud kahtluse alla järjest suureneva hulga temaga vastuolus olevate faktide toimetel. Ta peab tegema julge otsuse ja valima kahest halvast väiksema, kusjuures on kerge eksida. See muudab kaheldavaks teaduse progressi. Olukorra lahendamiseks on Popper<sub>2</sub> loonud metodoloogilise falsifikatsioonismi täiustatud ehk komplitseeritud versiooni, mida I. Lakatos on edasi arendanud.

### **1.7.2 Komplitseeritud falsifikatsioonism ja Lakatos'i uurimisprogrammid**

Komplitseeritud falsifikatsioonisti jaoks on teooria T falsifitseeritud siis ja ainult siis, kui selle asemele on loodud uus teooria T1, mis vastab järgmistele nõuetele: 1) T1 ennustab uusi fakte, mida T ei suutnud, 2) T1 selgitab endise teooria senist edu, s.t sisaldab selle osa endisest teooriast, mida ta ei uuenda ja 3) mingi osa T1 poolt ennustatavatest uutest faktidest on katseliselt kontrollitud (Lakatos 2001, lk.32). Mingi katsetulemus ei saa senist teooriat falsifitseerida seni, kuni selle asemele pole loodud uut, paremat teooriat.

Töö käigus võib uuele teooriale lisada veel täiendusi ja abihüpoteese. Nii tekib teooriate jada T1, T2, T3,..., kusjuures iga uus teooria on oma sisu mahult suurem kui eelmise teooria falsifitseerimata jäänud osa. Kuna selline jada võib tekkida mingi probleemi sihikindlal uurimisel ja sellest võib tuletada juhtnõore edasiseks uurimiseks, nimetas Lakatos sellist teooriate jada uurimisprogrammiks. Kui teooriate poolt ennustatavad uued faktid leiavad katselist kinnitust, tekib progressiivne probleeminihe, s.t ka vastav uurimisprogramm on progressiivne. Kui mingi uurimisprogramm uusi fakte ennustada ei suuda, vaid ainult püüab ennast kaitsta *ad hoc*-hüpoteesidega teiste teooriate poolt avastatud uute faktide suhtes, siis on tegemist degenerereeruva uurimisprogrammiga. Aja jooksul järjest enam teadlasi loobub degenerereeruvast uurimisprogrammist ja asub tööle progressiivsema uurimisprogrammi alusel.

Iga uurimisprogrammi iseloomustab nn kõva tuum, s.t teatud hulk põhilisi seadusi, mida ei lubata falsifitseerida ja mille muutmine tähendaks uut uurimisprogrammi. Kõva tuuma ümbritseb nn kaitsevöö abihüpoteesidest, mis võimaldavad teooria kasutamist konkreetsete ülesannete puhul. Abihüpoteese võib falsifitseerida ja parandada, nii saadaksegi teooriate täiustatud versioonid. Uurimisprogrammi tüüpiliseks näiteks on Newtoni taevamehaanika, mille kõvaks tuumaks on kolm mehaanika põhiseadust ja gravitatsiooniseadus. Algul vaatles Newton Päikest ja üht planeeti punktmassidena, seejärel teatud läbimõõduga keradena ja uuris mitme planeedi koosmõju. Uurides planeetide pöörlemist, jõudis ta järeldusele, et planeedid ei ole kerad, vaid veidi lapikud. Seejuures üleminekut eelmiselt teoorialt järgnevale ei põhjendanud üldiselt mitte eelneva variandi falsifitseerimine, vaid uurimisprogrammi teoreetiline ideoloogia. Põhiliseks raskuseks uute teooriate loomisel oli nende matemaatiline keerukus.

Lakatosi käsitlus ei anna teadlasele otseseid juhendeid uurimisprogrammi valikuks. On võimalik, et juba degenerereeruvaks peetud programm mingi kaitsevöös tehtud täienduse tõttu muutub uuesti progressiivseks. Ka Lakatos ise on tunnistanud, et uurimisprogrammide väärtuse üle saab otsustada alles „tagantjärele tarkusest“.

### **1.7.3 Kuhn Lakatosist ja vastupidi**

Kuhn avaldas oma seisukohad enne Lakatosi töid. Seejärel, lugedes Lakatosi, avastas ta paralleele oma kontseptsiooniga. Kuhni paradigma vastab uurimisprogrammi mõistele, normaalteadus vastab kaitsevöö ehitamisele, kriis vastab degenerereeruvale probleeminihkele ja revolutsioon tähendab ühe

uurimisprogrammi asendumist teisega (Teaduse metodoloogia, R. Vihalemm, 1979, lk 38-39). Lakatosi hinnangul on Kuhni „kriis“ psühholoogiline mõiste, nakkav paanika. Erinevad paradigmad on ühismõõduta, nad kasutavad erinevaid mõisteid, puuduvad paradigmadevahelised standardid. Järelikult on võimatu paradigmasid mingi ratsionalistliku kriteeriumi alusel võrrelda, Kuhni „teadusrevolutsioon“ on irratsionaalne massipsühhoos. Sellega on Lakatosi väitel Kuhn taandanud teaduse filosoofia teaduse psühholoogiale (Lakatos 2001, lk 90-91).

Lakatos kirjutab: see, mida Kuhn nimetab „normaalteaduseks“, pole midagi muud, kui monopoolsuse saavutanud uurimisprogramm. Aga tegelikult saavutavad uurimisprogrammid täieliku monopoolsuse harva ja ainult suhteliselt lühikeseks ajaks [- -]. Teaduse ajalugu on olnud ja peaks olema võistlevate uurimisprogrammide (või, kui soovite, „paradigmade“) ajalugu, aga ta ei ole olnud ja ei pea olema normaalteadusele vastavate perioodide järgnevus: mida varem algab võistlus, seda parem on see progressi jaoks (Lakatos 2001, lk 69).

A. Chalmers lõpetab ratsionalismi ja relativismi vastandlikkust selgitava peatüki märkusega: Lakatosi eesmärk oli esitada teaduse ratsionalistlik käsitlus, mis tal aga ei õnnestunud. Kuhn aga väitis, et relativistlik käsitlus tema eesmärgiks polnud – ometi esitas ta ühe võimaliku (Chalmers 1998, lk 160).

## **1.8 A. Chalmersi ja P. Feyerabendi seisukohad**

### **1.8.1 A. Chalmersi pakutav viljakusastme mõiste**

A. Chalmersi eesmärgiks oli anda füüsika teooriavahetustele objektivistlik käsitlus. Tema pakutav modifikatsioon Lakatosi uurimisprogrammide metodoloogiale sisaldab viljakusastme mõiste. Programmi viljakusaste näitab, millises ulatuses programm endas objektiivseid tegutsemisvõimalusi sisaldab või mis ulatuses ta avab tee uutele uurimissuundadele (Chalmers 1998, lk 177).

Chalmersi kriitikud on juhtinud tähelepanu sellele, et pakutud kontseptsioon on liiga ebamäärane mõõtmaks kvantitatiivselt programmi viljakusastet. Samuti ei aita viljakusaste seletada teaduse kasvu, sest programmi viljakusastet saab adekvaatselt analüüsida ja hinnata ainult tagantjärele. Kuigi Chalmers püüab oma kontseptsiooni kaitsta, tundub, et tema kriitikutel on suures osas õigus.

### **1.8.2 Feyerabendi anarhistlik tunnetusteooria**

Paul Karl Feyerabend (1924-1994) oli Austrias sündinud teadusfilosoof. Sai Saksa armees teenides 1945.a haavata, kuul jäi pidama selgroogu, tekitades ajutise halvatus. Pärast sõda õppis füüsikat ja ajalugu, sai tuttavaks K. Popperiga, vaimustus falsifikatsioonismist ja sai (mõneks ajaks) Popperi toetajaks. 1959.a võttis vastu alalise ametikoha Berkeley ülikoolis ja temast sai USA kodanik (Feyerabend, P. WWW).

1975. a ilmus tema raamat „Meetodi vastu“, milles ta püüab tõestada, et ükski seni kasutatud teadusmetodoloogiast ei saa olla edukas. Feyerabendi väitel üksikjuhtumite vaatlused räägivad ükskõik millise reegli universaalse kehtivuse vastu. Iga metodoloogia on omal viisil piiratud ja ainukesena jääb püsima reegel „kõik on lubatud“ (ehk inglise keeles: *anything goes*).

Feyerabend ei tunnista reeglit: loobu teooriast, mis pole kooskõlas üldtunnustatud faktidega, sest see pole kooskõlas paljude episoodidega teaduse arengus. Teadlane peab olema oma otsustustes täiesti vaba ja mingid metodoloogia reeglid ei tohi teda piirata. Selles mõttes ongi „kõik lubatud“.

Feyerabendi järgi ei saa loogika alusel erinevaid teooriaid omavahel võrrelda, sest nad kasutavad erinevaid mõisteid, teisiti öeldes, on ühismõõdud. Siin on midagi ühist Kuhni teooriaga (vt p 1.6.2). Feyerabendi järgi on valik ühismõõduta teooriate vahel lõppkokkuvõttes subjektiivne.

Ühismõõdutu on ka teadus võrrelduna teiste võimalike teadmismvormidega, näiteks religiooni või nõiakunstiga, seetõttu ei saa ka väita, et teadus oleks nende suhtes mingis mõttes kõrgemal positsioonil. Feyerabend leiab, et iga indiviid peab olema täiesti vaba ja ameeriklane võib nõuda, et tema lapsele õpetataks koolis nõiakunsti, aga mitte teadust. Kriitikute poolt on seda võrreldud ettepanekuga, et inimesed peaksid elama koobastes, mitte aga mugavustega korterites.

Ka Chalmers suhtub „Meetodi vastu“ põhiseisukohtadesse kriitiliselt, kirjutades: “Feyerabendi

edasine jutt indiviidi vabadusest ei suuda pöörata piisavat tähelepanu ühiskonnas toimivatele piirangutele“ (Chalmers 1998, lk 200) ja „Nii vaadates ei ole Feyerabend utoopilisest vaba ühiskonna ideaalist mingit abi (samam, lk 201). Chalmers jätkab oma raamatu viimasel leheküljel: „Tuleb vastu seista „kõik on lubatud“-poliitikale, sest see on interpreteeritav laiemalt, kui Feyerabend vahest ette nägi“.(Chalmers 1998, lk 233).

Ühes oma hilisemas raamatus täpsustab Feyerabend: „Kõik on lubatud“ pole mitte minu poolt soovitatava metodoloogia ainuke „põhimõte“. Ma ei soovita mingit „metodoloogiat“, vastupidi, ma rõhutan, et metodoloogiliste reeglite ja kriteeriumide avastamine, kontrollimine ja rakendamine on konkreetse teadusliku uurimise, mitte aga filosoofilise unistamise probleem ( Feyerabend 1980, lk 97).

Selline tõlgendus on juba vastuvõetav ja on lähedane eelmise sajandi lõpul ilmunud uuele tendentsile teadusfilosoofias, mida võiks lühidalt nimetada „teadusfilosoofia ilma filosoofiata“ (Vihalemm, 1993). Eriteadused on iseseisvunud koos oma sisemise filosoofiaga ja ei pea enam tuginema mingile üldisele „teaduste teadusele“.

Kooskõlas selle seisukohaga vaatleme ka käesolevas õppeaines edaspidi teadustöö meetodeid mitte abstraktselt, vaid seotuna nende konkreetsete rakendustega Maa-teaduste valdkonnas.

## **Kasutatud allikad**

**Aarma, A.**(2008). Teadustöö alused. TTÜ, Tallinn.

**Chalmers, A.F.**(1998) Mis asi see on, mida nimetatakse teaduseks? Ilmamaa.

**Feyerabend, P.** (1980) Erkenntnis für freie Menschen. Veränderte Ausgabe. Suhrkamp Verlag, Frankfurt am Main.

**Feyerabend, P.** [WWW] [http://et.wikipedia.org/wiki/Paul\\_Feyerabend](http://et.wikipedia.org/wiki/Paul_Feyerabend) (26.01.2010)

**Kuhn, T. S.**(2003). Teadusrevolutsioonide struktuur. Ilmamaa, Tartu.

**Kuhn, T. S** [WWW]. [http://en.wikipedia.org/wiki/Thomas\\_Samuel\\_Kuhn](http://en.wikipedia.org/wiki/Thomas_Samuel_Kuhn) (18.11.2009).

**Kõverjalg, A.**(1993). Teadustöö metoodika alused I. Eesti Riigikaitse Akadeemia, Tallinn.

**Laherand, M.-L.**(2008) Kvalitatiivne uurimisviis. Tallinn.

**Lakatos, I.** (2001) The methodology of scientific research programmes. Philosophical Papers, Volume 1. Ed. By John Worrall and Gregory Currie. Cambridge University Press 2001 ( First published 1978).

**Lakatos, I.** [WWW]. [http://en.wikipedia.org/wiki/Imre\\_Lakatos](http://en.wikipedia.org/wiki/Imre_Lakatos) (18.11.2009).

**Pickard, A. J.**(2007). Research Methods in Information. Facet Publishing.

**Popper, K.**(1971). Logik der Forschung. Vierte, verbesserte Auflage. J. C. B. Mohr (Paul Siebeck) Tübingen.

**Popper, K.**(2000). Historistsismi viletsus. Olion, Tallinn.

**Russell, B.** (1995). Uurimus tähendusest ja tõest. Hortus Litterarum.

**Russell, B.** [WWW].[http://et.wikipedia.org/wiki/Bertrand\\_Russell](http://et.wikipedia.org/wiki/Bertrand_Russell) (18.11.2009).

**Teaduse metodoloogia** (1979)/ koost. R. Vihalemm, Eesti Raamat, Tallinn.

**Vihalemm, R.** (1993). Teadusfilosoofia ilma filosoofiata? Akadeemia, nr 9, lk 1800-1817.

**Walliman, N.** (2005). Your Research Project. SAGE Publications 2-nd Ed.

# TEADUSTÖÖ KORRALDUS JA MEETODID

## IRT8860, loengukonspekt 2-10 Heldur Haak

### 2 TEADUS JA ENNUSTAMINE

#### 2.1 Ennustamisest ajaloos ja füüsikas

Nagu eelpool öeldud, iseloomustab teadust suutlikkus seletada ja ennustada (vt p 1.3). Erinevatel teadusaladel on see suutlikkus erinev. Igapäevaselt me puutume kokku näiteks ilmaennustustega. Tekib küsimus, mida teadus suudab ennustada ja mida mitte.

Raamatus "Historitsismi viletsus" eitab K. Popper ennustamise võimalust ajaloos, täpsemalt öeldes historitsismis (Popper 2000). Historitsismi all peab Popper silmas säärast sotsiaalteaduste käsitlust, mis peab nende põhieesmärgiks ajaloo ennustamist ning mis eeldab, et taoline eesmärk on saavutatav, kui leida üles ajaloolise arengu põhjaks olevad „rütmid“ või „mudelid“, „seaduspärasused“ või „suundumused“ (Popper 2000, lk.16). Raamatu sisu algkujul ilmus väljaandes *Economica* aastatel 1944-1945. Hiljem on töö ilmunud raamatuna paljudes keeltes. Usku neile sobiva ajaloolise ettemääratuse vankumatutesse seadustesse on püüdnud sisendada mitmed diktatuurid.

Popper toob ära historitsismi vääramise peajooned, mis seisnevad järgmistes viies väites.

1. Inimajaloo kulgu mõjutab tugevasti inimteadmiste kasv. (- - -).
2. Meie ei saa teaduslike või ratsionaalsete meetodite varal ennustada oma teadusalase tarkuse kasvu. (- - -).
3. Järelikult me ei saa ennustada ajaloo tulevast kulgu.
4. See tähendab, et meil tuleb hüljata teoreetilise ajaloo ehk sellise ajaloolise sotsiaalteaduse võimalikkus, mis oleks samaväärne teoreetilise füüsikaga. Ei ole olemas ajaloolise arengu teaduslikku teooriat, mille alusel saaks teha ajaloosalaseid ennustusi.
5. Historitsistlike meetodite põhiline taotlus on seepärast väär ning historitsism variseb kokku (Popper 2000, lk10-11).

Kõige olulisem on Popperi hinnangul otsustus 2: kui on olemas säärane asi, nagu kasvavad inimteadmised, siis ei saa me ette näha seda, mida me saame teada alles homme.

See otsustus ei ole kuidagi piiratud ainult ajaloo, see on rakendatav kogu teaduse suhtes.

Kui nii, siis pole ka põhjust süüdistada Lakatosi selles, et tema uurimisprogrammide progressiivsuse üle saab otsustada alles tagantjärele.

Väites 4 eristatakse siiski füüsikat ja ajalugu. Võib tekkida küsimus: kui astronoomias on võimalik ennustada päikesevarjutusi, miks siis ei peaks sotsioloogias olema võimalik ennustada revolutsioone? (Popper 2000, lk 52).

Milles siis seisneb ikkagi erinevus astronoomia ja sotsioloogia vahel?

Alustame veidi kaugemalt. 17. sajandil koos diferentsiaal- ja integraalarvutuse tekkimisega tekkis ka uus maailmavaade – mehhanitsism, mis püüdis kõiki nähtusi taandada mehaanilisele liikumisele (Lepik, 1997, lk 5). Koostades diferentsiaalvõrrandid kõigi protsesside jaoks ja neid integreerides saame ennustada maailma arengut kõigis detailides. Umbes selline mõtteviis oli ka (standard)positivismis sisalduva range determinismi aluseks.

Siiski, võrrandite täpselt lahendamiseks tuleb absoluutse täpsusega määrata ka protsessi algandmed. Nende määramisel peame aga kõigepealt arvestama, et igasugune mõõtmine mõjutab mõõdetavat suurust.

Näiteks elektrimõõtmistel igal ampermeetril on mingi takistus ja voltmeeter koormab mõõdetavat pingeallikat. Ka väga tundlike riistade puhul peab ikkagi mingi teatud arv energiakvante mõjutama indikaatorit ja see energia tuleb võtta mõõdetavast protsessist. Postpositivistlik paradigma aktsepteerib teataval määral määramatust ja juhuslikkust.

Looduses mitmetes protsessides ilmnenuid määramatust selgitab lõppenud sajandi 60-ndatel aastatel

Edward Lorenz'i loodud kaosteororia. Kaos tähendab, et isegi juhul, kui meil on täpselt teada protsessi kirjeldavad võrrandid, võivad väga väikesed erinevused algtingimustes viia pikema aja jooksul protsessi täiesti erinevate lahenditeni (eeldusel, et võrrandisüsteem on mittelineaarne) (Lepik 1997). Tõenäoliselt võib selles olla ka põhjus, miks pikemaks kui kaheks-kolmeks nädalaks antud ilmaennustused on suhteliselt vähe usaldatavad.

Täiendavad probleemid tekivad siis, kui ennustatavat protsessi võib oluliselt mõjutada inimene (või inimkond). Sel juhul võib öelda, et ennustamine mõjutab ennustatavat protsessi.

Siia kuulub ka Popperi näide: oletame, et ennustatakse, et aktsiahinnad tõusevad kolm päeva ja siis langevad. On selge, et kõik, kes börsiga seotud, katsuvad müüa kolmandal päeval, põhjustades aktsiahindade languse ja tehes ennustuse valeks (Popper 2000, lk 27).

Analoogiline on lugu globaalse soojenemise ennustamisel. Kui küllalt paljude riikide valitsused teadlaste antud hoiatavat ennustust tõsiselt võtavad ja suudavad kasvuhoonegaaside tekitamist piirata, siis on ka tegelik soojenemine väiksem. Seega saab ennustada erinevaid stsenaariume sõltuvalt inimkonna käitumisest.

Pöördudes tagasi päikesearjutuse ja revolutsiooni ennustuste võrdlemise juurde, tuleb märkida, et päikesevarjutuse ennustamine on ka palju lihtsam revolutsiooni ennustamisest. Meil on olemas täpsed taevamehaanika seadused, sama täpset teooriat revolutsioonide tekkimise kohta ei ole.

Vajalikke algandmeid päikesevarjutuse ennustamiseks on suhteliselt vähe, inimühiskonna täpne kirjeldamine on võrreldamatult keerulisem.

Popper loeb võimalikuks tehnoloogilisi ennustusi, mis on insenerikunsti aluseks. Tüüpilised eksperimentaalteadused suudavad teha tehnoloogilisi ennustusi. Kuigi tehnoloogilised ennustused on enamasti lühiajalised, leidub ka seda liiki (suhteliselt) pikaajalisi ennustusi, nagu näiteks mootori tõenäoline eluiga (Popper 2000, lk 59 – 62). Ettevaatlikum tuleks olla selliste pikaajaliste ennustustega, mis sõltuvad tehnika ja ühiskonna arengust tulevikus.

## **2.2 Uuest teadusrevolutsioonist füüsikas**

Kuhni järgi toimub teaduse areng revolutsiooniliste paradigmapuhetuste kaudu. Lõppenud sajandil on füüsika palju edasi arenenud ja tehtud olulisi avastusi, kuid pärast relatiivsusteooria ja kvantmehaanika avastamist pole olnud sellist teadusrevolutsiooni, mis oleks meid sundinud ümber hindama füüsika põhimõisteid (mass, ruum, aeg). Võib-olla me oleme juba Looduse absoluutsele tõe lähedale jõudnud, et mingit olulist revolutsioonilist muutust füüsikas enam tulla ei saagi? Üldreeglina teadlased siiski niimoodi ei arva. Akadeemik Endel Lippmaa on öelnud, et lähiaastatel on CERN-ist (s.t Euroopa Tuumauuringute Keskusest) tulemas täiesti uus füüsika.

Kui see on nii, siis Kuhni teooriakäsitluse järgi peaks füüsikas juba praegu olema kui mitte just kriis, siis vähemalt leiduma olulisi anomaaliaid.

### **2.2.1 Tumeaine mõistatus**

Akadeemik Jaan Einasto loeb tumeaine avastamist paradigmapuhetuseks kosmoloogias. Ettekujutus sellest, et me tunneme põhilist ainet, asendus pildiga, kus tavaline aine moodustab vaid tühise osa ja peamine massikandja on mingi tundmatu päritoluga tume aine (Einasto 2006, lk 123).

Tumeaine ei tähenda, et see aine näiteks teleskoobis paistaks tumedana. Tumedaks nimetatakse ainet, mis pole üldse nähtav ja mis on vaatlustele kättesaadav ainult tema poolt tekitatava gravitatsiooni kaudu.

Esimesed tumeaine teemalised artiklid ilmusid 1974. a, üks neist Eesti autoritelt (Einasto, Kaasik, Saar). 1975.a. toimus Tallinnas esimene täielikult tumeainele pühendatud teaduskonverents kogu maailmas (Einasto 2006, lk 124). 2007.a. anti J. Einasto juhitud teaduskollektiivile, kuhu kuulusid veel Maret Einasto, Enn Saar ja Erik Tago, Eesti Vabariigi Teaduspreemia teadusharu paradigmat ja maailmapilti mõjutava väljapaistva avastuse eest teemal: "Tumeaine avastamine galaktikate ümbruses ning universumi kärgstruktuur".

Planeetide liikumine Päikesesüsteemis vastab Kepleri seadustele. See tähendab, et gravitatsiooniline

tõmbejõud peab olem tasakaalustatud planeedi orbiidil liikumisest tekkiva kesktõukejõuga. Kaugemate planeetide puhul on tõmbejõud väiksem ja seega on väiksem ka planeedi statsionaarsele orbiidile vastav joonkiirus (Einasto 2006, lk 439).

Tähed tiirlevad ümber galaktika keskme peaaegu samuti nagu planeedid ümber Päikese. Erinevus seisneb selles, et nüüd pole liikumist määrav mass koondunud tsentrisse. Seetõttu galaktika pöörlemiskiirus algul kasvab koos kauguse suurenemisega galaktika tsentrist (täheorbiidi sisse jääb järjest rohkem ainet), saavutab maksimumi ning peaks servale lähenedes hakkama uuesti kahanema. Vaatlused aga näitasid, et pöörlemiskõverad ei hakka galaktikate äärtel langema, vaid jäävad enam-vähem konstantseks. Vaadeldavate pöörlemiskõverate erinevust teoreetilistest saab seletada galaktikaid ümbritseva massiivse krooni või haloga. Selliste kroonide kogumass on 10-30 korda suurem galaktikate nähtava osa massist (Einasto 2006, lk 440 – 442).

Tegelikult põhineb tumeaine kontseptsioon suurel osal induktsioonil, s.t Newtoni dünaamika induktiivsel üldistusel kogu universumile. On loodud teooria, mis kannab nime MOND (modifitseeritud Newtoni dünaamika), samuti ka selle dünaamika relativistlik variant. See teooria ennustab, et nõrkade gravitatsiooniväljade puhul, mis on galaktikate välisosades, Newtoni gravitatsiooniseadus enam ei kehti. See teooria suudab seletada galaktikate pöörlemiskiirusi ilma tumeaine olemasoluta.

Siiski on tekkinud ka teisi argumente tumeaine kasuks, mida on raske ümber lükata. Üheks neist on reliktkiirguse (universumi varasest noorusest pärineva, praeguseks tublisti jahtunud soojuskiirguse) ja selle virvenduse uurimine. Vastava teooria järgi ei oleks galaktikad ilma tumeaineta üldse saanud tekkida.

Ühe võimalusena on tumeaine kandjaks pakutud neutriinot. Neutriinode suure kiiruse tõttu on vastavat tumeainet nimetatud „kuumaks”. Siiski on neutriinode mass väga väike (või isegi puudub). Seepärast ei vasta sellise aine baasil loodud universumi mudel oma struktuuri poolest tegelikult vaadeldavale, ja praegu on valitsev „külma” tumeaine kontseptsioon. Hoolimata nüüdseks juba paarikümneaastasest otsimisest pole osakesi, mis võiksid olla tumeaine kandjad, veel avastatud (Einasto 2006, lk 319 – 320).

### **2.2.2 Tumeenergia**

1929.a avastas Ameerika astronoom Edwin Hubble tähtede spektri punanihke seaduse, mille järgi universum pidevalt paisub. Praegu valitseva seisukoha järgi sai universum alguse Suure Pauguga umbes 14 miljardit aastat tagasi.

Kuna gravitatsioon peaks universumi paisumist takistama, siis võiks oletada, et paisumise kiirus aja jooksul väheneb. Vähenemise kiirus peaks sõltuma aine tihedusest universumis. Väikese tiheduse juures on gravitatsiooni mõju nõrk ja paisumine peaks jätkuma lõpmatult, küllalt suure tiheduse juures peaks aga paisumine teatud aja pärast peatuma ja universum hakkama seejärel uuesti kokku tõmbuma. Nende olukordade vaheliseks piiriks olevat väärtust nimetatakse kriitiliseks tiheduseks (Einasto 2006, lk 355 - 358).

Teades galaktikate masse ja nende arvu mingis ruumalas, võib hinnata aine keskmist tihedust maailmaruumis. Selgub, et nähtava aine tihedus on ainult 4% kriitilisest tihedusest ja nähtav aine koos tumeainega moodustab 27% kriitilisest tihedusest. Kuna tihedus on alla kolmandiku kriitilisest, peaks universum lõpmatult paisuma. Siiski peaks gravitatsiooni toimeel see paisumiskiirus aja jooksul vähenema. Viimased kaugete galaktikate vaatlused aga näitavad vastupidist: universumi paisumine kiireneb. Nn inflatsiooniteooria järgi peaks universumi kogutihedus, kui arvesse võtta nii aine kui energia, võrduma kriitilisega. Puuduva kaks kolmandikku tihedusest kataks mingi senitundmatu ühtlane foon, mis toimib antigravitatsioonina ja mida on hakatud kutsuma tumeenergiaks (Einasto 2000, lk 325 – 328; Young 2004, lk 1700).

### **2.2.3 Uute osakeste otsingul**

Elementaarosakeste füüsika Standardmudel loodi 1970. aastate alguses ja on osutunud vägagi edukaks. Standardmudeli järgi on olemas kolm osakeste perekonda:

- 1) 6 leptonit, millel ei ole tugevat vastastikmõju. Nende hulka kuuluvad ka elektron ja

neutriino;

- 2) 6 kvarki, millest on tehtud kõik hadronid. Hadronid on osakesed, mis alluvad tugevale vastastikmõjule, nende hulka kuuluvad ka prootonid ja neutronid;
- 3) osakesed, mis vahendavad erinevaid vastastikmõjusid. Nendeks on gluonid kvarkide tugeva vastastikmõju jaoks, fotonid elektromagnetilise vastastikmõju jaoks, W- ja Z-bosonid nõrga vastastikmõju jaoks ja gravitonid gravitatsioonilise vastastikmõju jaoks.

1979. a said Sheldon Glashow, Abdus Salam ja Steven Weinberg Nobeli preemia nn elektronõrga vastastikmõju teooria loomise eest. Selle teooria järgi ühinevad energial üle 100 GeV elektromagnetiline ja nõrk mõju ühtseks elektronõrgaks vastastikmõjuks. Standardmudel ennustas seda mõju vahendavate Z- ja W-bosonite olemasolu. Ennustus leidis CERN-is ( Euroopa Tuumauuringute Keskuses) 1983. a katselise kinnituse.

Standardmudel ennustab veel ühe olulise osakese – Higgsi bosoni olemasolu. Higgsi osake on ainus, mis suudab vastasmõjus olla ka vaakuumiga ja seeläbi anda kogu mateeriale massi. See Higgsi mehhanism on ainus viis mateeriale seisumassi andmiseks. Vastasel juhul koosneks universum ainult valguse kiirusega liikuvate massita osakeste kiirgusest. Higgsi osakesed on ka ainsad, mis suudavad tekitada universumi varjatud (tumeda) energia. Higgsi boson on suure massiga, seega on tema tekitamiseks vaja väga suurt energiat ja siiani teda veel leitud pole. Tema avastamine on üks CERN-is käivitatava kiirendi LHC (*Large Hadron Collider*) põhiülesandeid (Hektor WWW, 2007a ja 2007b).

Nagu näeme, muudab Higgsi boson oluliselt meie ettekujutust massi olemusest.

LHC-s loodetakse leida ka tumeda aine osakesi kokkupõrgetes kaotsiläinud energia kaudu.

Võimalikke kandidaate on palju, näiteks rasked neutriinosarnased osakesed (Hektor, 2007a).

#### **2.2.4 Suur hadronite põrguti LHC**

Suur hadronite põrguti LHC (*Large Hadron Collider*) CERN-is (Euroopa Tuumauuringute Keskuses) Genfi lähisel Prantsusmaa ja Šveitsi piiril on valminud ja on alanud selle käivitamise katsetused. Põhikiirendi ümbermõõt on 27 km ja see asub umbes 150 meetri sügavuses tunnelis maa all. LHC on mõeldud prootonite ja raskete aatomituumade kiirendamiseks. Projekti maksumuseks hinnati algul umbes kolm miljardit eurot, kuid see on läinud üle kahe korra kallimaks.

Tegelikult on ühes torus kaks kiirendit, milles osakesi kiirendatakse vastassuunaliselt. On neli erinevat pörkepunkti, milles on võimalik osakeste kimbud kokku suunata ja kuhu on paigutatud neli erinevat suurt detektorit pörgetel tekkivate osakeste avastamiseks.

LHC kiirendab prootoneid energiani 7 TeV. Kahe vastassuunalise prootoni põrgatamisel on pörkeenergia 14 TeV. Prootonid energiaga 7 TeV liiguvad kiirusega, mis on 99,9999991 % valguse kiirusest. Prootonid koondatakse kimpudesse, mille pikkus on paar sentimeetrit ja läbimõõt umbes millimeeter. Pörkepunktides kimbud fokuseeritakse läbimõõduni alla sajandikmillimeetri. Kiirendi torus on vaakum ja osakesed hoitakse toru seintest eemal kombineeritud elektri- ja magnetväljadega. Tugeva magnetvälja saamiseks kasutatakse ülijuhtivaid magneteid ja selleks jahutatakse magneti mähis temperatuurini 1,9 K (-271 °C). LHC vajab tööperioodil võimsust 130 MW, see on umbes kümnendik Eesti elektri jaama keskmisest võimsusest.

LHC tekitab sekundis 600 miljonit pörget, kusjuures iga pörge võib tekitada tuhandeid sekundaarseid osakesi, mille peavad registreerima detektorid. Pärast eeltöötlemist, mille käigus vähem oluline info välja visatakse, jääb igal aastal alles umbes 10 000 terabaiti infot (see täidaks rohkem kui 100 000 DVD-d). Sealt peavad teadlased hakkama otsima neid huvitavaid protsesse, näiteks Higgsi bosonit. Selleks on loomisel hajusinfotehnoloogiline vahend *Grid* ehk Võre. LHC Võre on tehnoloogia, kus palju võimsaid arvuteid (ligi 80 000) ja andmehoidlaid ühendatakse omavahel üle interneti ja andmed muudetakse lõppkasutajale (osakestefüüsikule) mugavalt kättesaadavaks. Võret võib pidada WWW edasiarenduseks. Andmehoidlatesse peab mahtumavähemalt ühe aasta jagu LHC detektorite poolt salvestatud andmeid. LHC arvutite vahelised internetiühendused peavad suutma vajaliku koguse andmeid läbi lasta ( Hektor 2007b).

#### **2.2.5 Ennustamine on alati raske**

LHC esimene käivituskatse 2008 a septembris ei õnnestunud. Toimus lühis elektrisüsteemis, purunes vedelat heeliumi kandev jahutustoru ja riknes rida ülijuhtivaid magneteid. Põhjuseks oli halb keevitus kaht ülijuhtivat magnetit ühendavas juhtmes. Parandatud seade on uuesti käivitatud 2009 a novembris, esialgu kuni poole energiaga (3,5 TEV kummagi kiire jaoks) (Hand 2009a). LHC projekteerimist alustati üle 20 aasta tagasi. Vahepeal on kosmoloogias juba tumeainega seotud paradigma üldiselt omaks võetud ja võiks öelda, et teadusrevolutsioon on alanud, kuigi seda ainet kandvate osakeste suhtes pole veel katselist kinnitust. Tumeaine lagunemise jälgi on püütud leida ka kosmilistest kiirtest. On leitud, et kui mõõdetud kosmilised kiired on tõesti tekitatud tumeaine poolt, siis on see aine seni oodatust tunduvalt erinev. Osakese energiaks võiks olla umbes 1 TEV, mis on umbes 5 korda suurem kui Standardmudeli järgi ennustatav (Hektor 2009). Ligikaudu sarnane on olukord ka tumeenergiaga. Hüpootees pakuti välja 1998 a ja seda on kinnitatud mitmete mõõtmistega, mis kinnitavad universumi kiirenevat paisumist. Üheks meetodiks on galaktikate kauguse määramine supernoovade heleduse järgi. See meetod aga eeldab, et ka varases Universumis toimunud supernoovade plahvatused olid ligikaudu sama heledusega kui praegu, mida on võimalik ka vaidlustada. Teiseks kasutatavaks meetodiks on gravitatsiooniliste läätsede meetod, mis arvestab valguse paindumist gravitatsioonivälja mõjul (Massey, 2009). Kuna Maa atmosfäär segab täpseid mõõtmisi, oleks probleemi lahendamiseks vaja välja saata spetsiaalne satelliit. Vastavat projekti on arutanud USA (NASA ja DOE- *Department of Energy*) koos Euroopa Kosmoseagentuuriga, kuid probleemiks on projekti maksumus (oletatavalt umbes 3 miljardit dollarit) (Hand 2009b). Eeltoodust järeldub, et tänapäeval on teadusprobleemid muutunud nii keeruliseks, et olulisemate teooriate katseline kontrollimine nõuab rahvusvahelist koostööd ja võib sellest hoolimata kesta aastakümneid.

#### **Kasutatud allikad:**

- Einasto, J.** (2006). Tumeda aine lugu. Ilmamaa, Tartu.
- Hand, E.** (2009a). CERN announces cautious start for repaired hadron collider. *Nature*, vol 460, 13 August, p 784-785.
- Hand, E.** (2009b) Dark energy rips cosmos and agencies. *Nature*, vol 461, 29 Oct.
- Hektor, A., Kannike K., Raidal, M.** Elementaarosakeste füüsika Eestis: teooriast infotehnoloogiani. [WWW] [www.fyysika.ee/doc/akad\\_5\\_elementaar.pdf](http://www.fyysika.ee/doc/akad_5_elementaar.pdf) (26.01.2010)
- Hektor, A., Kannike K.** (2007a). Suur jaht Higgsi bosonile. *Horisont*, nr3, lk 12-17
- Hektor, A., Kannike K.** (2007b). Maailma suurim teadusaparaat. *Horisont*, nr 4, lk 28-31
- Hektor, A.** (2009) Tants tumeaine ümber. *Horisont*, nr 2, lk 34-35
- Lepik, Ü.** (1997). Kaos ja kord. Tartu Ülikooli Kirjastus.
- Massey, R.** (2009). Dark is the new black. *Nature*, vol 461, 8 Oct., p 740-741.
- Popper, K.** (2000). *Historitsismi viletsus*. Tallinn, Olion.
- Young, H. D., Freedman, R. A.** (2004). *Sears and Zemansky's University Physics with Modern Physics*. 11-th Ed. Pearson, Addison Wesley.



### **3. RAHVUSVAHELISED JA RIIKLIKUD UURIMISPROGRAMMID**

#### **3.1 CERN-i leping**

Euroopa Tuumauuringute Keskuse (CERN-i) asutamislepingule kirjutasid 1954. a alla 12 asutajaliiget: Lääne-Saksamaa, Belgia, Taani, Prantsusmaa, Kreeka, Itaalia, Norra, Holland, Suurbritannia, Rootsi, Šveits ja Jugoslaavia. Seega on CERN vanem kui Euroopa Liit (mis algselt oli Euroopa Majandusühendus ja asutati 1957). Praeguseks on CERN-i liikmete arv tõusnud kahekümneni. CERN-i esimene osakeste kiirendi alustas tööd 1957. a ja teine kiirendi, mis töötab tänapäevani, 1959.a.

LHC projekti rahastamisleping liikmesriikide ja CERN-i vahel sõlmiti 1994. a. Projektiga on liitunud ka paljud püsiliikme staatust mitteomavad riigid, nende hulgas Ameerika Ühendriigid, Venemaa, Hiina ja Jaapan.

Eesti riigi ja CERN-i vahel on kahepoolne koostööleping, mis võimaldab Eesti teadlastel töötada CERN-is. Eesti füüsikute tegevust CERN-i juures koordineerib Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituut (KBFI) Tallinnas. Uuritakse Higgsi teooria variante ja otsitakse vastavaid signaale ühes LHC detektoris. Samuti nõuab palju tööd KBFI ühendamine LHC võresüsteemiga. KBFI-s asub Eesti suurim andmehoidla (20 terabaiti) (Hektor WWW, 2007b).

#### **3.2 Euroopa Liidu teadusuuringute ning tehnoloogia arendamise raamprogrammid**

##### **3.2.1 Teadus- ja arendustöö**

Euroopa Liidu raamprogrammid hõlmavad peale teadustöö ka arendustööd. Need on vajalikud juhul, kui teadusprojekt ei lõpe artiklis või aruandes avaldatavate uute teoreetiliste tulemustega, vaid peab jõudma praktilise tulemuseni kas mingi uue toote või tehnoloogia kujul. Arendustööde hulka kuuluvad seadme või süsteemi katseeksplari valmistamine ja selle katsetamine. Katsetamisel tuleb kontrollida toote vastavust kõigile ohutustehnilistele, looduskaitsele ja muudele tingimustele. Peale selle kuulub arendustööde hulka tootmiseks vajaliku tehnoloogilise ja kontrollaparatuuri väljatöötamine ja valmistamine, samuti ka toote disain ja vajaliku dokumentatsiooni koostamine. Arendustööde maksumus ületab tavaliselt paljukordselt toote idee aluseks olnud teadusuuringute maksumuse. Kui aga õnnestub muuta hea teadustulemus kaubaks, siis saadav tulu ületab paljukordselt toote loomiseks tehtud kulutused. Näitena võiks tuua mobiiltelefonide tootmise.

Vähesel määral osalesid Eesti teadlased alates 1993. a EL 3. ja 4. raamprogrammi projektides, mis võimaldasid vastava teadusliku potentsiaali olemasolul kaasata partnereid Kesk- ja Ida-Euroopa riikidest.

##### **3.2.2 Eesti osavõtt Euroopa Liidu viiendast raamprogrammist**

Eesti liitus Euroopa Liidu teadusuuringute ning tehnoloogia arendamise viienda raamprogrammiga (5RP) 1999.a, tasudes ka vastava osalusmaksu. Eesti tegutses 5RP-s edukalt, tuues konkursi edukalt läbinud projektide kaudu Eestisse finantseerimise, mis tunduvat ületas osalusmaksu. Euroopa Liidu raamprogrammides osalemise koordineerimise on Haridus- ja Teadusministeerium ülesandeks teinud sihtasutusele Archimedes, mille allüksuseks on Teaduskoostöö keskus (<http://www.irc.ee>). Kogu EL 5RP (1998-2002) eelarve oli umbes 15 miljardit eurot ja see on umbes 5% EL s teadus- ja arendustegevusele kulutatavast summast. Kuna raamprogrammide osavõtu tingimuseks on Euroopa komisjoni finantseeringuga ligilähedaselt võrdne omafinantseerimine, haarab RP umbes 10% kogu Euroopa teadus- ja arendustegevusest.

Ressursside paremaks kasutamiseks on 5RP-s valitud piiratud arv teemasid. 5RP sisaldas 4 temaatilist programmi (millel olid veel alamprogrammid). Temaatilised programmid olid:

1. Elukvaliteet ja ressursside korraldus ( QoL ).
2. Kasutajasõbralik infoühiskond ( IST ).

3. Konkurentsivõimeline ja säästev majanduskasv ( GROWTH ).

4. Energia, keskkond ja keskkonnasäästlik areng ( EESD ).

EESD programmi kuulusid veel järgmised alamprogrammid:

...4.1 Säästev veevarude haldamine ja vee kvaliteet;

4.2 Globaalsed muutused, kliima ja bioloogiline mitmekesisus;

4.3 Säästvad mereökosüsteemid;

4.4 Tulevikulinn ja kultuuripärand;

4.5 Puhtamad energiasüsteemis, sh taastuvad energiad;

4.6 Ökonoomne ja efektiivne energia konkurentsivõimelisele Euroopale.

Peale selle oli veel 3 nn horisontaalset programmi, mis kujutasid endast kõikide temaatiliste programmide ühiseid tugiprogramme. Nendeks on:

1. Euroopa teadustegevuse rahvusvahelise positsiooni kindlustamine;

2. Innovatsioon ja väikese ja keskmise suurusega ettevõtete (VKE) kaasamine;

3. Inimpotentsiaali arendamine ja sotsiaalmajanduslik uurimistöö (IHP).

EL poolne finantseerimine teaduslik-tehnoloogilistele arendusprojektidele (*RTD projects*) moodustab kuni 50% projektiga seotud kuludest.

Peale selle sisaldab 5RP toetavaid meetmeid ja stipendiume:

1. Koostöövõrgud (temaatilised uurimisvõrgud);

2. Koordineeritud tegevuse projektid (projektide omavaheline info ja kogemuste vahetamine);

3. Noorteadlaste koolitusvõrgud;

4. Marie Curie koolitusstipendiumid;

5. Kaasnevad meetmed (programmide juurutamine, informatsiooni levitamine);

6. Tehnoloogia koostööprojektid (CRAFT) on mõeldud väikeste ja keskmise suurusega ettevõtete toetamiseks. EL poolne toetus kannab poole kuludest.

7. Ettevalmistavad projektid.

Raamprogrammis osalemiseks korraldatakse kaht tüüpi konkursse. Suurtele teadus- ja arendusprojektidele kuulutatakse tavaliselt kaks korda aastas välja avalikud projektikonkursid.

Toetavate tegevuste ja väiksemate projektide jaoks on konkurss avatud pidevalt. Projektidele annavad hinnangu eksperdid, seejärel asub Euroopa Komisjon taotlusi hindama.

Projekti koostamise käigus tuleb määratleda iga lepinguosalise õigused ja kohustused.

1. Peamine lepinguosaline (*Principal contractor*) kirjutab alla lepingule Euroopa Komisjoniga ning on juriidiliselt vastutav projekti kui terviku eduka täitmise eest. Tal on suured õigused projekti käigus loodud intellektuaalsele omandile, samuti eelisjuurdepääs projekti tulemustele.

2. Projekti koordinaator (*Project coordinator*) kindlustab projekti teadusliku juhtimise, esitab nõutavad aruanded, vastutab lepingu rahalise ja administratiivse külje täitmise eest.

3. Abistav lepinguosaline (*Assistant contractor*) allkirjastab samuti lepingu Euroopa Komisjoniga, tal on osaline juriidiline vastutus ja ta töötab ühe peamise lepinguosalise heaks. Talle kuuluvad intellektuaalse omandi õigused oma uurimistulemustele.

4. All-lepinguosalisel (*Subcontractors*) ja Teadus-arendustöö täitjad (*RTD performers*). Neil ei ole projekti tulemuste suhtes omandiõigusi.

### **3.2.3 Eesti osalemine EL kuuendas raamprogrammis**

Eesti liitus EL kuuenda raamprogrammiga täieõigusliku liikmena. 6RP, (2002-2006)

põhieesmärgiks oli kaasa aidata Euroopa killustunud teadusmaastiku kujunemisele ühtseks Euroopa teadusruumiks. Programmi kogueelarveks oli planeeritud 17,5 miljardit eurot. 6RP kaitses Euroopa suurprojektide kontseptsiooni, mille tulemusena pidid rohkearvuliste innovatsioonialgatuste asemel sündima üksikud kriitilist massi omavad projektikonsortsiumid. Umbes 70% kogu eelarvest suunati mitmekümne partneriga suurprojektidele. See muutis Eesti teadusgruppide osalemise oluliselt raskemaks. Projektidesse saadi eeskätt läbi projektikoordinaatori kutse (Eesti osalemine 6. RP-s WWW 2007).

6RP tegevused kuulusid kolme põhilisse suunda:

1. Euroopa teadustegevuse fokuseerimine ja integreerimine;
2. Euroopa teadusruumi struktureerimine;
3. Euroopa teadusruumi aluste tugevdamine.

Nendele suundadele lisandus veel tuumauuringute eriprogramm, millega Eesti liitunud ei olnud. Esimesse tegevussuunda kuulusid 7 prioriteetset valdkonda, neist kuuendaks oli : säästev areng, globaalsed muutused ja ökosüsteemid (energia, transport, keskkond).

6RP raames sõlmis Euroopa komisjon umbes 8900 projekti rahastamise lepingut, neist 332 Eesti organisatsioonidega. 6RP lepingud tõid Eestisse ligikaudu 529 mln krooni teadustegevuse lisaraha, 5RP-st saime umbes 300 mln krooni. Raamprogrammidest saadud vahendid moodustasid üle poole T&A välisrahadest. 2005. ja 2006.a ületas T&A finantseerimine välismaa allikatest sihtfinantseerimise (Eesti osalemine 6. RP-s WWW 2007, Must, Ü. 2008).

Keskkonnaga seotud prioriteedi valdkond jagunes järgmisteks teemadeks:

- kasvuhoonegaaside emissiooni ja atmosfääri saasteainete mõju kliimale, osoonikihi tekkimisele ja süsiniku sidumisele;
- veeringe, sh maapinnaga seotud aspektid;
- bioloogiline mitmekesisus ja ökosüsteemid;
- kõrbestumise ja looduskatastroofide mehhanismid;
- strateegiad rannikualade, põllumajanduslike maade ja metsade säästvaks haldamiseks;
- kasutamiskõlblikud prognoosimis- ja modelleerimissüsteemid, sh globaalsete kliimamuutuste seiresüsteemid.

Teemad jagunesid omakorda kokku 120 alamteemaks (Eesti osalemine 6. RP-s WWW 2007).

2006.a lõpu seisuga on TTÜ teadlased osalenud 29-s 6RP projektis. (Teadus- ja arendustegevus 2006 WWW):

### **3.2.4 Eesti osalemine EL seitsmendas raamprogrammis**

7RP on varasematest suurem ja ulatuslikum. Programm kestab 7 aastat ja programmi eelarveks on 53,2 miljardit eurot (<http://www.irc.ee>)

.7RP koostöö eriprogramm sisaldab 10 prioriteetset valdkonda :

1. Tervishoid
2. Toiduained, põllumajandus ja biotehnoloogia
3. Info- ja sidetehnoloogia
4. Nanoteadused, nanotehnoloogiad, materjalid
5. Energeetika
6. Keskkond (sh kliimamuutused)
7. Transport (sh lennundus)
8. Sotsiaalmajandus- ja humanitaarteadused
9. Kosmoseuuringud
10. Julgeolek

Keskkonna valdkond, mille eelarve on 1,8 miljardit eurot, jaguneb neljaks teemaks:

- 1) kliimamuutus, reostus ja ohud;
- 2) loodusvarade säästev haldamine;
- 3) keskkonnatehnoloogiad;
- 4) maapinna kaugseire ja hindamise vahendid.

Teemad jagunevad omakorda alamteemadeks, mille alt saab valida projektiideeks sobiva konkreetse tegevuse.

### **3.2.5 EL raamprogrammide kriitikast**

On teadlasi, kes suhtuvad EL raamprogrammidesse kriitiliselt. Võimalikud vastuväited on järgmised (Lippmaa 2007).

Sunnitud korras on moodustunud suured kollaboratsioonid. Ent ükski teadlane ei lähe oma tõeliselt

hea uue ideega kollaboratsiooni, kus kõik peab olema üksteise ees avalik – ta kaotab ju autorluse. Tehes Brüsseli reeglite järgi teadust, me tegelikult ruineerime Eesti teadust. - - - Kuna reeglid on sellised, et tuleb kasutada tuntud tehnika paremaid mudeleid. Teisiti ei ole võimalik kirjutada neile reeglitele vastavat põhjendust. - - - Teadus areneb küll Euroopas, kuid mitte Brüsseli programmide järgi. - - - Teadust ja tehnikat tuleb finantseerida oma riigi eelarvest.

On ka vastupidiseid seisukohti. R. Vaikmäe kirjutab: omalt poolt võin jälle ette lugeda pika nimekirja minu uurimisvaldkonna maailmanimesid, kes aastaid on muude koostöövormide kõrval suure huvi ja eduga raamprogrammi projektides osalenud ning kui keegi otsib raamprogrammides osalemise reklaamijaks müügimeest, siis võite minu poole pöörduda (Vaikmäe 2007).

Tänapäeva teadus on kollektiivne tegevus ja suurtes projektides ei ole võimalik igal osalejal hoida oma tulemusi saladuses. Ka CERN ei aktsepteeri oma projektides osalejate poolt loodud seadmete patentimist, patent aga on tugevaim autorlust kinnitav dokument. Arvestades väikeriigi vahendite piiratust on paljude teadusteamade puhul siiski mõistlik kasutada ka rahvusvahelisi programme. Raamprogrammides osalejate õigustest projekti käigus loodud intellektuaalsele omandile oli juttu punktis 3.2.2. Muidugi võib real juhtudel osutada otstarbekaks ka vabariikliku finantseerimisega teadusprojekti valik.

### 3.3 Koostööprogramm COST

COST on Euroopa teaduse ja tehnika alane koostöövõrk, mis asutati 1971.a. Praegu on sellega ühinenud enamuse Euroopa riike, nende hulgas ka Eesti.

Iga teadlane mistahes COST liikmesriigist võib konkursile esitada uue projekti. Heakskiidu saanud projektidega on võimalik ühineda aasta jooksul. Tingimuseks on kompetentsus projekti teemal, kodumaise rahastamise olemasolu ja tahtmine ning võimalus osaleda projektis järgneva 4 aasta jooksul. Projekti koordineerimine (nõupidamised, konverentsid, reisid) on rahastatav EL 7RP vahenditest.

Programmi COST koordineerimisega Eestis tegeleb sihtasutuse Archimedes koosseisu kuuluv Teaduskoostöö keskus (<http://www.irc.ee>).

### 3.4 Teadus- ja arendustegevuse finantseerimine riigieelarvest

Põhilised riiklikud abinõud teadus- ja arendustegevuse finantseerimiseks on alljärgnevad.

**Sihtfinantseerimine** toimub teadusteamade alusel vastavalt haridus- ja teadusministri määrusele. Seda taotlevad asutused peavad olema kantud teadus- ja arendusasutuste registrisse. Varem avatud sihtfinantseerimise jätkamise aluseks on Teaduskompetentsi Nõukogu hinnang tehtud töö tulemustele. Uue teema avamise otstarbekuse otsustab Teaduskompetentsi Nõukogu, arvestades taotlevas asutuses selle teema täitmiseks loodud eeldusi ning selle teema aktuaalsust. Teemad kuuluvad hindamisele igal aastal (<https://www.etis.ee>).

2007. a eraldati TTÜ teadusteamade sihtfinantseerimiseks kokku 71,65 mln. kr. (Eestis tervikuna 299,7 mln. kr. Seega TTÜ osa kogu vabariigi vahenditest moodustas 23,9 % (võrdluseks Tartu Ülikoolil 47,1 %) (Teadus- ja arendustegevus 2007 WWW).

**Baasfinantseerimine** on ette nähtud teadus- ja arendusasutuste strateegiliste arengueesmärkide realiseerimiseks, eelkõige välis- ja riigisiseste projektide kaasfinantseerimiseks ja uute uurimissuundade avamiseks. Vahendite eraldamisel arvestatakse taotleva asutuse viimase kolme aasta teadus- ja arendustegevuse tulemusi (artiklid, teadusmonograafiad, patendid) (<https://www.etis.ee>).

TTÜ baasfinantseerimine 2007 a moodustas 20,68 mln. kr. (Eestis tervikuna 97,3 mln. kr.) (Teadus- ja arendustegevus 2007 WWW).

**Grantfinantseerimine** sihtasutuse Eesti Teadusfond kaudu. TTÜ-s esitati 2007. a 66 uut granditaotlust, millest rahuldati 23 (s.o. 34,8 %). Uute grantide toetuseks eraldati 3,23 mln. kr.

(grantidele lisandus üldkululõiv 20 %). Jätkuvalt rahastati 70 granti, mis olid alustatud 2004 – 2006. Kokku kujunes 2007. a TTÜ teaduskondadele eraldatud grantide kogumaksumuseks 12,48 mln. kr. (koos üldkululõivuga).

Peale selle finantseeritakse riigieelarvest veel mitmeid programme, sealhulgas:

- 1) Teadus- ja arendusasutuste infrastruktuuri arendamise programm;
- 2) Teaduse tippkeskuste programm;
- 3) Tehnoloogia arenduskeskuste programm;
- 4) Teadusraamatukogude teavikute soetamine.

### 3.5 Teadus- ja arendustegevuse kulude statistika

Eesti teadus- ja arendustegevuse kulutused mõnedel aastatel on alltoodud tabelis (Eesti Teadus-ja arendustegevuse ning innovatsiooni strateegia 2007 – 2013 WWW). Kuigi teadus- ja arendustegevuse kulutuste osa kogu SKP-st on viimastel aastatel kasvanud (oli 2007. a 1,14 %, aastal 2000 oli see 0,61 %), on see ikkagi vähem kui paljudes EL riikides. Haridus- ja Teadusministeeriumi strateegia „Teaduspõhine Eesti 2007-2013“ näeb ette T&A kulutuste suurendamise 3%-ni SKP-st aastaks 2014.

Aasta	SKP miljardit kr.	T&A kulud mln. kr.	T&A kulud (% SKP-st)
2000	95,5	579	0,61
2002	121,4	871	0,72
2004	151,0	1294	0,86
2006	205,0	2363	1,15
2007	238,9	2717	1,14

#### Kasutatud allikad:

Eesti osalemine 6. raamprogrammis. /Toim. M. Lehis, M. Miljan. SA Archimedes. [WWW]. [http://www.archimedes.ee/File/6RP\\_raport\\_2007.pdf](http://www.archimedes.ee/File/6RP_raport_2007.pdf) (26.01.2010).

Eesti teadus- ja arendustegevuse ning innovatsiooni strateegia 2007 – 2013 „Teadmistepõhine Eesti“. Aruanne strateegia eesmärkide ja rakendusplaani täitmisest 2008 aastal. [WWW] [http://www.valitsus.ee/failid/TAI\\_2008.\\_a\\_aruanne.pdf](http://www.valitsus.ee/failid/TAI_2008._a_aruanne.pdf). (26.01.2010).

Hektor, A., Kannike K., Raidal, M. Elementaarosakeste füüsika Eestis: teooriast infotehnoloogiani. [WWW] [www.fyysika.ee/doc/akad\\_5\\_elementaar.pdf](http://www.fyysika.ee/doc/akad_5_elementaar.pdf) (26.01.2010).

Hektor, A., Kannike K. (2007b). Maailma suurim teadusaparaat. Horisont, nr 4, lk 28-31.

Lippmaa, E. Mõelge, kui öeldakse „Ei“, veel rohkem aga siis, kui öeldakse „Jah!“ (intervjuu R. Veskimäele) Horisont Nr.1, 2007.

Must, Ü. 7. raamprogramm – ikka tõusujoones. Innovaatika, infoleht 118, dets. 2008, lk 2 – 4. Sihtasutus Archimedes [WWW]. <http://www.archimedes.ee/teadus> (26.01.2010).

Teaduskoostöö keskus [WWW]. <http://www.irc.ee> (26.01.2010).

Teadus- ja arendustegevus 2006 [WWW].

[http://www.teadus.ttu.ee/failid/TEADUSPORTAALILE\\_2006.doc](http://www.teadus.ttu.ee/failid/TEADUSPORTAALILE_2006.doc) (26.01.2010).

Teadus- ja arendustegevus 2007 [WWW].

[http://www.teadus.ttu.ee/failid/TEADUSPORTAALILE\\_2007.doc](http://www.teadus.ttu.ee/failid/TEADUSPORTAALILE_2007.doc) (26.01.2010).

Teadus- ja arendustegevuse ülevaade 2006 a ning eelseisva perioodi teadus- ja arenduspoliitilised eesmärgid. [http://www.valitsus.ee/failid/TAI\\_2008.\\_a\\_aruanne.pdf](http://www.valitsus.ee/failid/TAI_2008._a_aruanne.pdf) (26.01.2010).

Vaikmäe, R. Raamprogrammide kiituseks. Innovaatika, infoleht 71-72, august- september 2007, lk 104-105.

# TEADUSTÖÖ KORRALDUS JA MEETODID

## IRT8860, loengukonspekt 3-10 Heldur Haak

### 4 TEADUSTÖÖ ETAPID

#### 4.1 Magistri- ja doktoritöö

Üldjuhul teadustöö kirjalik vormistamine algab uurimis- (või katse-)päeviku pidamisest. Hiljem võib järgneda töö tulemuste vormistamine aruandena, dissertatsioonina, teadusartikli või raamatuna. Käesolevas peatükis peame edaspidi teadustööna silmas põhiliselt magistriväitekirja (*master's theses*). Tegelikult struktuuri ja etappide poolest ei ole teadusmagistri- ja teadusdoktorikraadi taotlemiseks tehtavate väitekirjade (dissertatsioonide) vahel olulist erinevust. Doktoritöö on mahult suurem (TTÜ-s kuni 100lk, lisaks töö põhiseisukohti esitavad publikatsioonid), ja ka kasutatava meetodika poolest keerukam. Magistritöö maht on kuni 80 lk, publikatsioonid üldreeglina ei ole nõutavad, kuid nende olemasolul võib väitekirja olla lühem (kuni 24 lk.).

Magistritöök loetakse teadusuurimust või arendustööd, mis näitab magistrandi võimet teadus- või arendustöö metodoloogia iseseisvaks rakendamiseks antud valdkonna oluliste ülesannete lahendamisel (Rajangu 1999, lk 18).

Magistritöö koosneb:

- tiitellehest koos autorideklaratsiooniga;
- kokkuvõttest;
- töö sisukorrast;
- töö tekstist (sissejuhatus, sisupeatükid ja kokkuvõte);
- kirjandusviidete loetelust;
- lisadest (vajaduse korral).

Abimaterjalist (Rajangu 1999) võib leida ka rea üldisi vormistuslikke juhendeid, sealhulgas tiitellehe ja autorideklaratsiooni vormid.

Magistritööl on mitu eesmärki ja adressaati (Glatthorn 1998).

1. Te kirjutate iseendale. Kirjutamine on üks õppimise meetod. On öeldud: maei tea, mida ma tean, kuni ma pole proovinud seda kirja panna. Pärast töö lõpetamist te peaksite tundma rahulolu tehtud tööst.
2. Te kirjutate kaitsmiskomisjonile. Kaitsmine on akadeemiline traditsioon ja just komisjoni liikmed on need, kes teie tööd kõige põhjalikumalt uurivad.
3. Te kirjutate oma teaduskonnale ja ülikoolile. Ülikool omistab teile teaduskraadi ja teil tuleb jälgida kõiki kehtestatud reegleid, isegi kui need tunduvad formaalsustena. Iga magistri- või doktoritöö esindab teatud määral ülikooli, mille juures see töö on kaitstud. Ühtseid, üleriigilisi magistri- ja doktorikraade Eestis ei ole.
4. Te kirjutate teadlaskonnale. Kuigi magistritöodes on harva põrutavaid uusi avastusi, lisab iga hea töö teadusesse ikkagi midagi uut ja neid tulemusi loevad nii vastava ala teadlased kui ka üliõpilased.

Järgnevalt vaatleme teadustöö etappe ja teadustööle esitatavaid nõudeid.

#### 4.2 Teadustöö etapid

Erinevad autorid jagavad teadustöö viieks kuni kümneks etapiks (Aarma 2008, Glatthorn 1998, Kõverjalg 1993). Toome allpool kompromissina koostatud variandi kaheksa etapiga.

1. Teema valik.
2. Probleemiga tutvumine kirjanduse abil.
3. Töö esialgse kava koostamine.
4. Hüpooteesi formuleerimine.

5. Metoodika valik.
6. Materjali kogumine.
7. Kogutud materjali läbitöötamine ja analüüs.
8. Töö vormistamine.

Võimalik on (korduv) tagasipöördumine eelmiste etappide juurde. Töö tulemuste analüüsil võib küllalt sageli selguda, et kogutud materjal pole veel piisav. Mõnikord planeeritakse täiendav materjali kogumine juba töö algul omaette etapina. Ka võib töö käigus osutuda vajalikuks hüpoteesi või töö kava korrigeerimine. Teadustöö ei ole alati täpselt ennustatav. Sellegipoolest me peame oma tööd ajaliselt planeerima.

### 4.3 Teema valik

Teema valik tähendab uuritava probleemi formuleerimist. Oskus näha teaduslikku probleemi eeldab uurimisvaldkonna head tundmist. Probleemiks on kas lünk, seletamata nähtus või vastuolu olemasolevates teaduslikes teadmistes. Siia võib kuuluda ka mingitele nähtustele erinevate teadlaste poolt antud vastuoluliste seletuste analüüs.

On mitu võimalust magistr töö teema valikuks.

1. Mõnikord on võimalik jätkata teemaatikaga, mida käsitleti juba bakalaureusetöös. Sel juhul võib samaks jääda ka juhendaja. Siiski tuleb sel juhul hoolega kontrollida, kas teematika pole vahepeal kaotanud oma aktuaalsust. Mitte kõik teemad pole arendatavad magistr tööks.
2. Kui magistrand töötab või tal on varasem töökogemus, on kasulik magistr töö teema vähemalt osaliselt ühendada töökohal tekkivate probleemidega.
3. Mõnikord pakuvad ülikooli erialainstituudid välja magistri- ja doktoritööde teemasid nende poolt täidetavate uurimisprojektide raames, kusjuures tööle on juba olemas ka juhendaja.
4. Võimalik on alustada mitte teema, vaid juhendaja valikust. Seejärel võib teema valikul lähtuda juhendaja nõuannetest.
5. Huvipakkuva teadusprobleemi võib leida teaduskirjanduse põhjal, näiteks juhul, kui mingis küsimuses on avaldatud erinevaid seisukohti või ei ole mingile probleemile leitud rahuldavat lahendust. Sellise probleemi valikul aga peab magistrandil olema kindlasti ka idee lahenduse leidmiseks.
6. Kasulik on tutvuda hiljuti kaitstud magistri- ja doktoritöödega. Nende tööde kokkuvõtetes väga sageli loetletakse töös lahendatud probleemide kõrval ka täiendavat uurimist vajavaid probleeme.

Hea teema peab olema autorile huvitav ja vastama tema poolt läbitud õppekavale. Teema põhjendamiseks ei jätku väitest, et antud teemat on vähe uuritud. Teema peab olema aktuaalne, s.t teaduslikult oluline. Tuleb silmas pidada ka tööks vajalikke majanduslikke ressursse, eksperimentaalse osa puhul selleks vajalike seadmete ja materjalide olemasolu. Vältida tuleb liiga üldisi ja laialivalguvaid teemasid.

### 4.4 Probleemiga tutvumine kirjanduse abil

See etapp sisaldab neli alametappi (Pickard 2007, lk 26):

- 1) informatsiooni otsimine
- 2) informatsiooni hindamine
- 3) kriitiline analüüs
- 4) uurimuslik süntees

Tutvumine teemat käsitleva kirjandusega algab vastava valdkonna uurimisega õpikutest või käsiraamatutest. Kasulik oleks leida mõni teemale vastav monograafia, siin oskab kindlasti soovitusi anda juhendaja. Vaja oleks ka välja selgitada vastavat ala käsitlevad olulisemad ajakirjad ja tutvuda nende uuemate aastakäikudega.

#### 4.4.1 Informatsiooni otsimine

Kirjanduse otsinguks Eesti raamatukogudest on olemas elektronkataloog ESTER, mis jaguneb Tallinna (<http://ester.nlib.ee>) ja Tartu kataloogiks. Väga suuri võimalusi (andmebaasid, e-ajakirjad, raamatud, dissertatsioonid) pakub TTÜ e-raamatukogu (<http://www.lib.ttu.ee/erk/>).

Erialaste teadusartiklite leidmiseks tuleb kasutada andmebaase, mis võivad olla tasulised või vabalt kasutatavad. Andmebaasid jagunevad bibliograafiaandmebaasideks, referaatandmebaasideks ja täistekstiandmebaasideks. Toome mõned näited.

**GeoBase** on multidistsiplinaarne, peamiselt eelretsenseeritud teadusajakirjade referaate sisaldav andmebaas, mis hõlmab ka konverentsimaterjale ja raamatute ülevaateid. Juurdepääs *Engineering Village 2* platvormilt. Ainevaldkonnad: Maa-teadused, geoloogia, füüsikaline geograafia, keskkonnauuringud, okeanograafia jt.

Artiklite täistekstid avatakse ainult neist ajakirjadest, mis sisalduvad TTÜ raamatukokku ostetud täistekstiandmebaasides (SpringerLink, Science Direct, Wiley jt).

**GeoRef** (<http://georef.cos.com>) on American Geological Institute'i poolt 1966. aastal rajatud geoteaduste alane bibliograafiline andmebaas. Teemavaldkonnad: geoloogia, geokeemia, geofüüsika, hüdroloogia, paleontoloogia, stratigraafia jt.

**ScienceDirect** (<http://www.sciencedirect.com>) sisaldab kirjastuse Elsevier enam kui 1 800 eelretsenseeritud teadusajakirja teaduse, tehnika ja meditsiini alalt. Mitmete kirjastuste (Academic Press jt) artiklitest on kättesaadavad ainult referaadid.

**SpringerLINK** (<http://link.springer.de>) on sidusandmebaas, mis võimaldab juurdepääsu kirjastuste *Springer, Kluwer, Steinkopff, Birkhäuser* jt teaduse, tehnika ja meditsiinialastele teadusajakirjadele ning raamatutele.

Materjalide otsinguks **märksõnade** järgi tuleb kasutada otsiroboteid, millest tuntuim on Google (<http://www.google.com/>). On ka teisi roboteid, kuid Google'1 on suurim andmekogu, ta on kiireim ja populaarseim. Oluline on ka järjestus, milles esitatakse leitud sobivad veebilehed. Erinevalt teistest otsirobotitest on Google võtnud aluseks leitud veebisaitidele viitamise populaarsuse, mis on osutunud väga otstarbekaks.

Vajaduse korral võib edukast otsingust internetis lähemalt lugeda raamatust (Pihlau, 2003).

Üldjuhul on nii raamatukogust kui ka internetist leitud info maht tohutult suur. Oma aja kokkuhoiduks tuleb otsingut piiritleda. Esimesel tutvumisel võib piirduda ainult ühe allikmaterjalide keelega, ajalisel küllalt värske materjalidega või artiklitega ainult teatud ajakirjadest. Seda ei maksa tõlgendada nii, et kogu magistritöö on tehtav näiteks ainult eestikeelsete materjalide baasil. Inglise keele kasutamine teaduskeelena on vältimatu.

Kasulik on lugemisel teha märkmeid ja välja kirjutada olulisi tsitaate. Raamatu puhul on kasulik tsitaadi kohta märkida ka lehekülje number, siis on seda hiljem lihtne leida. Neid märkmeid saab kasutada hiljem töö sisu kirjutamisel ja ka kirjanduse loetelu koostamisel. Neid võib teha nii otse arvutisse kui ka paberile. Märkmeid paberil võib koostada päevikuna või kanda iga loetud allika sisu omaette kaardile.

#### 4.4.2 Informatsiooni hindamine

Tuleb arvestada, et leitud info ei ole alati usaldusväärne. Tuntud ja omal alal juhtivate kirjastuste ja ajakirjade artiklid ja raamatud on reeglina retsenseeritud ja usaldatavad. Vältige vananenud materjalide kasutamist. Olge ettevaatlik, kui pole näidatud (interneti)allika autorit. Kui autor on antud, on võimalik kontrollida tema positsiooni oma teadusalal, otsides tema teisi töid ja vaadates, kus need on avaldatud. Kasutada võib ka tsiteeritavuse indeksit. Artikkel on seda väärtuslikum, mida rohkem on teised autorid sellele viidanud. Viiteotsing võimaldab kindlaks teha, millistele autoritele või publikatsioonidele ning kui mitu korda on viidatud. TTÜ arvutivõrgust on avatud juurdepääs **Web of Science** (<http://isiknowledge.com/>) viiteandmebaasidele. See andmebaas sisaldab bibliograafilist informatsiooni umbes 8 500 ingliskeelse teadusajakirja kohta.

#### 4.4.3 Kriitiline analüüs

Kriitiline analüüs tähendab leitud allika lugemist, püüdes sellest välja tuua kõike seda, mis on



seotud teie oma töös püstitatud probleemi ja selle võimalike lahendustega. Kui te leiате, et artikkel on teie jaoks oluline, tehke sellest koopia ja võite teha sellele lugemisel märkusi. Olulised kohad võite alla kriipsutada. Leidke ja märkige ära töö olulised järeldused. Kontrollige järelduste loogilisust, samuti kasutatud meetodika usaldatavust. Hea artikli puhul peavad autori poolt esitatavad tulemused olema põhjendatud ja täpsed, nende tõestus peab olema kontrollitav ja veenev.

#### 4.4.4 Uurimuslik süntees

Iga teie jaoks oluliseks osutunud ja läbi uuritud allikas (artikkel) avab mingi lõigu teid huvitava teemaga seotud valdkonnast. Kui selliseid allikaid on piisavalt, peaks nende loogilisel ühendamisel uuritavast probleemist tekkima mosaiigitaoline terviklik pilt, milles võib küll veel olla tühikuid. Järgnev töö tulebki suunata nende tühikute täitmisele, samuti probleemi lahenduseks tekkinud ideede formuleerimisele hüpoteesina.

### 4.5 Töö esialgse kava koostamine

Töö esialgse kava koostamine tähendab sisulise tegevusprogrammi loomist, mis peaks viima teema püstitamisel silmas peetud probleemi lahendamiseni. See tähendab, et esimeses lähenduses peaks töö olema juba lõpuni läbi mõeldud. Kava tähendab edaspidise töö nii sisulist kui ajalist planeerimist, sealhulgas katselise osa jaoks vajaliku tegevuse planeerimist. Kava tuleb kooskõlastada juhendajaga. Selline kava peaks tähtaegade poolest olema kooskõlas ametlikult esitatava lõputöö tegemise ajakavaga, mis koostatakse vastavalt kehtivale magistri- ja doktoriõppe kavandamise ja arvestamise juhendile.

### 4.6 Hüpoteesi formuleerimine

Hüpotees on uurija oletatav lahendus teema püstitamise aluseks olnud probleemile. Järgnev uuring peaks seda oletust kinnitama. Hüpotees peab olema kontrollitav (Walliman 2005, lk 211 – 217). Kui meie auto hommikul ei käivitu, siis see on probleem. Me võime teha hüpoteesi, et bensiin on otsas. Selle kontrollimiseks tuleks teha vastav uuring (vaadata näidikut). Hüpotees võib muidugi olla ka ekslik.

Hüpoteesi kontrollimine võib olla teoreetiline või katseline. Meie näites teoreetiline kontroll võiks tähendada arvutust, milles sisaldub auto läbisõit pärast viimast tankimist ja auto keskmine bensiinikulu. Hüpoteesi formuleerimine kui probleemile tõenäolise lahenduse leidmine on teadustöö raskemaid, aga ka loomingulisemaid etappe.

Asudes sõnastama hüpoteesi oleme me tegelikult juba teinud esialgse paradigma ja metodoloogia valiku. Hüpoteesi sõnastamine on omane kvantitatiivsele uurimusele, mis vastab (post-) positivistlikule paradigmale (vt. p. 1.2). Nagu juba p.1.2 oli märgitud, kuuluvad loodusteadused, nende hulgas Maa-teadused üldreeglina kvantitatiivsete uurimuste valdkonda. Kvantitatiivsed uuringud tegelevad muutujatega, mida on võimalik mõõta, nende vahel kehtivad põhjuse-tagajärje seosed, mida saab esitada valemite seaduste ja teooriatega.

Hüpotees on väidetav seos mingite uuritavate muutujate vahel. Klassikalise loogika järgi saab hüpotees olla ainult kas õige või vale. Statistiliste uurimismeetodite korral esitatakse korraga hüpoteeside paar: väidet esitav sisukas hüpotees ja seda eitav nullhüpotees ning uuritakse nende õigsuse tõenäosusi (lähemalt ptk 7).

Hüpotees peab olema kontrollitav analoogiliselt p 1.3 toodud skeemile, milles näidati, kuidas seadustest ja teooriatest deduktsiooni teel tuletatakse ennustused ja seletused. Analoogiliselt teooriale on ka hüpoteesi lihtsam falsifitseerida kui tõestada. Siiski on hüpoteesid üldiselt vähem abstraktsed ja väiksema üldistusastmega kui teooriad, mis muudab nende kontrollimise lihtsamaks.

**Näide.** Oletame, et me oleme uurinud CO<sub>2</sub> muutusi sõltuvalt jääaegade vaheldumisest (Vaikmäe 2010, joon 6). Pärast jääaegade lõppemist kasvab CO<sub>2</sub> kontsentratsioon ligikaudu veerandi võrra (60...80 ppm). Meil tekib idee, et nende muutuste põhjuseks võib olla vulkaaniline tegevus. Me

püstitame hüpoteesi: vulkaanilise tegevuse aktiivsus jäävaheaegadel on suurem kui jääaegadel, kusjuures aktiivsus kasvab just mannerjääst vabanevatel aladel. Oma hüpoteesi kontrollimiseks me peame läbi uurima mahuka statistilise materjali. Me peame uurima vulkaanilist aktiivsust piisavalt kauges minevikus (vähemalt viimase 40 tuhande aasta jooksul) ja seda kogu Maa ulatuses. Me peame võrdlema vulkaanide aktiivsust piirkondades, mis jääaegadel olid kaetud mannerjäaga ja võrdlema seda vulkaanide aktiivsusega ülejäänud piirkondades.

Kahjuks oleme oma ideega hiljaks jäänud. Vastav uurimus on juba tehtud ja publitseeritud (Huybers, Langmuir 2009). On leitud, et maapealsete vulkaanide aktiivsus on viimase jääaja lõpuperioodil (7 kuni 12 tuhat aastat tagasi) ületanud keskmise 2 kuni 6 korda. Suurenenud vulkanism on olnud omane mannerjääst vabanenud piirkondadele. Vulkaanipursete tulemusena võib CO<sub>2</sub> kontsentratsioon atmosfääris olla kasvanud 20 kuni 80 miljondiku osa võrra.

On teadusi, mille puhul kasutatakse nii kvalitatiivset kui kvantitatiivset meetodit ja ka mõlemat korraga. Siia kuuluvad näiteks mitmed ühiskonnateadused, nagu ajalugu ja filosoofia. Nende puhul on mõnikord raske formuleerida hüpoteesi ja see on otstarbekam asendada ühe või mitme küsimusega, millele uurimus peaks andma vastuse (Walliman 2005, lk 217 - 219 ).

#### 4.7 Metoodika valik

Metoodika valik on väga keerukas ja vastutusrikas etapp. Õigesti valitud metoodikast sõltub kogu uurimuse edukus. On hea, kui on olemas juhendaja, kes on enne analoogilisi uurimusi teinud või juhendanud. Asjaolu, et valitud probleemi pole seni lahendatud, võib suures osas olla tingitud sellest, et pole leitud selleks sobivat metoodikat.

Üldteaduslikud meetodid jagunevad empiiriliseks teoreetilisteks ja puhtteoreetilisteks meetoditeks. Empiiriliseks teoreetilisteks meetodite hulka kuuluvad vaatlus, katse, mõõtmine ja kirjeldamine. Puhtteoreetilisteks meetodite hulka kuuluvad võrdlemine, analüüs ja süntees (Aarma 2008, lk 35).

Akadeemik Anto Raukas on geoloogia põhiliseks meetodiks nimetanud **vaatlust**. Mitmetes loodusteadustes kõige usaldatavam meetod – **katse** – ei ole geoloogias ulatuslikumat rakendamist leidnud, sest maakoort muutvad geoloogilised protsessid ilmnevad niivõrd ulatuslikus mastaabis ja toimuvad sedavõrd aeglaselt, et neid ei ole mõeldav korraldada laboratoorsetes tingimustes.

Üheks peamiseks vaatlusmeetodiks maakoore pindmise osa uurimisel on geoloogiline kaardistamine. Vaatlus on oluliseks meetodiks ka okeanograafia ja meteoroloogia puhul.

Mõned uurimismeetodid võivad ühendada katselist ja teoreetilist osa, nagu näiteks p 5.2 kirjeldatud rannikuprotsside füüsikaline modelleerimine.

Vaatlus ei tähenda tingimata otsest töötamist looduses. Vaatlusandmete kaudsete allikatena võib kasutada ka mitmesuguseid dokumente (aruanded, vaatluspäevikud).

Muidugi ei piirdu Maa-teaduste uurimismeetod ainult vaatlusega. Geoloogia kasutab maakoort moodustava aine ehituse, muutumise ja liikumise seaduspärasuste uurimisel teiste teaduste, eelkõige füüsika ja keemia uurimismeetodeid. Geoloogia jaguneb enam kui sajaks harudistsipliiniks, millest igapähele on oma spetsiifilised uurimismeetodid (Raukas 2003).

Kvantitatiivne uurimus eeldab uuritavate muutujate **mõõtmist**. Meteoroloogias on oluline ilmastikuga seotud muutujate mõõtmine küllaldase sagedusega ja laialdasel alal paiknevates mõõtmispunktides. Mõõtmine on ka kivimiproovide vanuse määramine, mille jaoks on välja töötatud rida erinevaid meetodeid (Raukas 2003, lk 157 – 160). Mõõtmismeetodi valikul on oluline silmas pidada kasutatavate mõõtemetodite võimalikku mõõteviga.

Omaette meetodina võib käsitleda kogutud vaatlus- ja mõõtmisandmete **kirjeldamist** (Aarma 2008, lk 41). Kirjeldamise olemuseks on vaatluse ja mõõtmise teel saadud andmete süstematiseeritud esitus, näiteks tabelite, diagrammide või joonistena. Kirjeldamise eesmärgiks on välja tuua vaadeldavate suuruste vahelisi sõltuvusi ja põhjuslikke seoseid. Tabelite loomiseks vajalike arvutuste tegemisel, samuti ka tulemuste esitamisel diagrammide või joonistena on suureks abiks

tabeltöötlusprogramm Excel.

Analoogilise nähtuste **võrdlemine** seisneb nendevaheliste sarnasuste ja erinevuste leidmises. Siiski ei saa mingite andmehulkade võrdlemist esitada uurimuse põhiprobleemina. Võrdlemine peab jääma abistavaks meetodiks töös püstitatud hüpoteesi lahendamisel.

**Analüüs** on meetod, mis tähendab uuritava nähtuse mõttelist osadeks jagamist, seejärel on võimalik uurida iga osa eraldi. **Süntees** on vastupidine meetod, mille käigus osadest koostatakse jälle ühtne tervik.

Järgmises peatükis vaadeldavas modelleerimise meetodis sisaldub analüüsi ja sünteesi meetodite süsteemne ühendamine. Algul jagatakse uuritav süsteem (näit kliimasüsteem) üksikuteks protsessideks ja uuritakse eraldi protsesse kirjeldavaid muutujaid (temperatuur, õhurõhk, sademed). Tehakse kindlaks muutujate vahelised vastastikused seosed ja siis ühendatakse kõik muutujad üheks terviklikuks mudeliks, mis sisestatakse kliimamudelina arvutisse. Selline mudel on vaadeldav raamprogrammina, millesse ühendatakse üksikuid protsesse kirjeldavad moodulid.

Edaspidi kirjeldatavad spektraalsed ja statistilised meetodid on empiirilise- teoreetilised meetodid, mis võimaldavad eksperimentaalsete andmete töötlemisega esile tuua nende omadusi, mis tavalise (näit ajalise) esituse puhul ei pruugi olla märgatavad.

#### 4.8 Materjali kogumine

Selle etapi sisu oleneb oluliselt probleemi iseloomust ja valitud metoodikast.

Eksperimentaalse uurimuse puhul võib see tähendada välitöid looduses või varem kogutud (kivimi-) proovide laboratoorset analüüsi.

Empiirilise- teoreetilise uurimuse puhul tähendab see etapp varasemaid katselisi andmeid sisaldavate dokumentide (aruanded, vaatluspäevikud jne) uurimist ja nendest leitavate vajalike lähteandmete kogumist. Tähelepanu tuleb pöörata andmete täpsusele ja usaldatavusele.

Teoreetilise uurimuse puhul võib andmete kogumine tähendada täiendavat kirjanduse läbitöötamist analoogiliselt p.4.4 toodule. Töö sisuks võib sel juhul olla teadaolevate lähteandmete uudne tõlgendus, näiteks uus metoodika mingi olemasoleva vaieldava probleemi lahendamiseks.

#### 4.9 Kogutud materjali läbitöötamine ja analüüs

Kogutud materjali läbitöötamisel tuleb jõuda järeldusele, kas tulemused kinnitavad töö alguses püstitatud hüpoteesi või mitte. Esimesel juhul võib asuda töö lõplikule vormistamisele.

Kui tulemused ei võimalda hüpoteesi ei kinnitada ega ümber lükata, tuleb materjali kogumise etapp kriitiliselt läbi vaadata. Ilmselt on midagi olulist jäänud tähele panemata. Tuleb välja selgitada hüpoteesi kontrollimise suhtes olulised katsetused või lähteandmed ja eelmise etapi juurde tagasi pöörduda.

Kui aga kogutud eksperimentaalne materjal on hüpoteesiga vastuolus, tuleb hüpotees ise kriitiliselt üle vaadata. On hea, kui kogutud materjali läbitöötamise põhjal on võimalik formuleerida uus hüpotees, mille kinnituseks sobib juba tehtud eksperimentaalne töö. Halvem on juhtum, kui hüpoteesi muutmine tähendab ka uut eksperimentaalset osa planeerimist. Siiski tuleb vältida sellise kunstliku kohendatud *ad-hoc*- hüpoteesi püstitamist, mis ei ole lahenduseks töö alguses püstitatud probleemile. Siit järeldub ka, et töö tulemusi käsitleva osa kirjutamise juurde on otstarbekas asuda alles siis, kui nende tulemuste suhtes on jõutud täielikule selgusele.

Analüüs tähendab ka töös lahendatud probleemi teoreetilise ja praktilise tähtsuse hinnangut.

#### 4.10 Teadustööle esitatavad nõuded

Enne töö tegeliku vormistamise juurde asumist on kasulik tutvuda teadustöödele esitatavate üldiste nõuetega. Allpooltoodud põhipunktid on esitatud kokkuvõtlikult, lähemaks tutvumiseks võib

kasutada järgnevaid allikaid: (Aarma 2008, lk 65 – 87, Hirsjärvi 2005, lk 23 – 28, Walliman 2005, lk 334 – 367).

**4.10.1 Originaalsus** tähendab tulemuste esmakordsust, mis on üks teaduslikkuse põhitunnuseid. Et osata vahet teha uue ja juba teadaoleva vahel, on vaja hästi kursis olla vastava ala teadusliku kirjandusega. Kõik teistelt autoritelt võetud tsitaadid ja seisukohad tulevad varustada viidetega. Teiste autorite materjalide kasutamine ilma tegelikule autorile viitamata on plagiaat ehk kirjanduslik vargus. Teiste autorite tööde suuremate osade kasutamisel (näiteks terviklikud tabelid või joonised) tuleb selleks küsida autori kirjalik luba. Mõnikord esineb tahtmatut plagiaati, mis tähendab et töö autor on unustanud mingi idee või seisukoha algse päritolu. Selle vältimiseks on kirjanduse lugemisel kasulik teha märkmeid.

**4.10.2 Objektiivsus** loodusteadustes tähendab vaatlus- ja katsetulemuste täpset esitust ja töötlemist sõltumatult kellegi subjektiivsest eelarvamusest. Sotsioloogias näiteks võib see tähendada töös esitatud uurimistulemuste vastavust tegelikkusele ka siis, kui see tegelikkus kellelegi (sealhulgas uurimuse tellijale) ei meeldi. Tulemusi ei mõelda välja ega ilustata. Samuti tähendab objektiivsus korrektset suhtumist teiste teadlaste töödesse, vaatamata konkreetsetele isiklikele suhetele või vastuoludele erinevate koolkondade vahel. Siia kuulub ka **tolerantsuse** mõiste, mis tähendab eelarvamusteta suhtumist võõrastesse teooriatesse ja hüpoteesidesse.

**4.10.3 Tõestatavus ja kontrollitavus** on loodusteadustes põhiliselt tagatud katsete või vaatluste korratavusega. Selleks tuleb tehtud katseid ja vaatlusi ning kasutatud meetodikat piisavalt täpselt kirjeldada. Ka loogilised arutlused ja matemaatilised arvutused tuleb esitada nii üksikasjaliselt, et neid oleks võimalik kontrollida.

**4.10.4 Täpsuse** mõistet kasutatakse teadustöö puhul kvalitatiivses ja kvantitatiivses tähenduses. Kvalitatiivne täpsus tähendab mõistete täpset eristamist ehk terminoloogilist täpsust. Eri teadusalade teadlased võivad kasutada samu termineid erinevas tähenduses, seega on erialase kirjanduse lugemine oluline ka vastava terminoloogia omandamiseks.

Kvantitatiivne täpsus tähendab arvutuste ja mõõtmiste täpsust, geoloogias näiteks proovide vanuse määramise täpsust.

**4.10.5 Kriitilisus** jaguneb kriitilisuseks teiste ja iseenda suhtes. Kriitilisuses teiste suhtes tuleb meeles pidada juba nimetatud objektiivsust ja tolerantsust. See ei tähenda, et teiste autorite vigadele ei peaks tähelepanu pöörama. Kui nende tulemused on teie seisukohtadega vastuolus, siis kontrollige veel kord üle oma argumentatsioon ja esitage kriitika täpselt ja põhjendatult.

Oma vigu on üldreeglina küllalt raske näha. Andke oma töö või selle üksikud osad lugemiseks oma juhendajale või kolleegidele ja suhtuge tähelepanelikult tehtud märkustesse.

**4.10.6 Lihtsus** kui teadlaste eesmärk oli mainitud juba p. 1.2.4. Mõnele autorile tundub, et tema töö on targem ja teaduslikum, kui ta kasutab hästi pikki ja keerulisi lauseid, kus on palju võõrsõnu. Teadus on selletagi keeruline, aga meie eesmärk peab olema luua süsteem, mis võimaldaks ka keerukaid nähtusi esitada võimalikult lihtsalt.

## 4.11 Töö tegelik kirjutamine

Magistritöö vormistamise kohta on mitmed TTÜ teaduskonnad välja andnud vastavad juhendid (Aarma 2008, Rajangu 1999). Mõnevõrra võivad nõuded eri teaduskondades varieeruda, kuid üldreeglina koosneb magistritöö järgmistest osadest:

- 1) tiitelleht koos autorideklaratsiooniga,
- 2) sisukord,
- 3) sissejuhatus,
- 4) sisulised osad,
- 5) kokkuvõte,
- 6) võõrkeelne laiendatud kokkuvõte,
- 7) viidatud kirjanduse loetelu,

8) lisad.

**4.11.1 Sissejuhatuses** peaks sisalduma (Aarma 2008, lk 89 -90, Rajangu 1999, lk 22-23):

- 1) teema valiku põhjendus koos teema aktuaalsuse, ja uudsuse selgitusega,
- 2) probleemi püstitus, töö eesmärk (vajalikkus) ja uurimisobjekt,
- 3) hüpoteesi esitus ja hüpoteesi tõestamiseks kasutatavad meetodid.

Sageli kirjeldatakse sissejuhatuses ka järgnevate peatükkide sisu, kuid ei tooda tulemusi ega järeldusi. Vajadusel võib selgitada mõningaid termineid, mis ei ole vastava ala spetsialistidele üldtuntud. Mahult peaks sissejuhatus piirduma 2 - 3 leheküljega.

**4.11.2 Sisulised osad** peavad andma ammendava ülevaate tehtud tööst kuni tulemuste ja järelduste esitamiseni. Tüüpiliselt koosneb sisuline osa kolmest peatükist (Aarma 2008, lk 91 – 92)..

Esimeses neist peaks sisalduma probleemi käsitus kirjanduse põhjal. Selle ülesandeks on selgitada lugejale seda baasi või stardiplatvormi, millelt te oma uurimust alustasite. Kasutage allikaid, mida lugesite juba töö alguses, kuid need on kasulik uuesti üle lugeda. Täiendage peatükki kõige viimaste selles valdkonnas ilmunud töödega.

Teine sisuline peatükk peaks käsitlema töös kasutatava metodoloogia valikut ja põhjendust.

Kirjeldatakse uurimisobjekti, uurimisvahendeid ja uurimuse kulgu etappidena. Mõningaid näiteid Maa-teadustes kasutatavatest meetoditest vaatleme järgmistes peatükkides.

Viimases sisulise osa peatükis esitatakse töös saadud tulemused.

Tulemuste esitamisel tuleb kõigepealt teha valik, mida panna lisadesse ja mida esitada tulemuste peatükis. Tulemuste peatükis peaks olema selline materjal, mis suudab lugejat veenda teie poolt kokkuvõttes toodavate lõppjärelduste õigsuses. Töötlemata ja mahukad algandmed (näiteks suurte tabelite kujul) on soovitatav panna lisadesse. Tulemusi on otstarbekas esitada graafikute, jooniste ja diagrammidena. Joonised peaksid teksti täiendama, kuid mitte dubleerima. Hea joonis suudab anda lugejale rohkem infot kui pikk seletus.

**4.11.3 Kokkuvõte** sisaldab olulisemaid järeldusi ja ettepanekuid. Arvestage, et paljud lugejad loevad teie tööst ainult kokkuvõtet või alustavad lugemist kokkuvõttest. Sellepärast peaks kokkuvõttes lühidalt sisalduma kõik teie töö eelnevad osad: sissejuhatus, probleemi püstitus, ülevaade metodoloogiast, kokkuvõtte tulemustest ja järeldused ning soovitusel. Kokkuvõttes peaks sisalduma ka arutelu selle kohta, kas püstitatud ülesanne on lahendatud ja mida uut on teie uurimus andnud teadusele. Soovitusel tähendavad ettepanekuid edasisteks uurimisteks, sealhulgas näiteks teie töö tulemuste rakendamiseks või uuringute jätkamise suhtes.

**4.11.4 Võõrkeelne laiendatud kokkuvõte** ei ole eestikeelse kokkuvõtte tõlkevariant. Võõrkeelse kokkuvõtte ülesandeks on anda eesti keelt mitteoskajale ülevaade magistriltööst. Seega peaks see kokkuvõtte olema süntees töö sissejuhatusest ja eestikeelsest kokkuvõttest. Võõrkeelne kokkuvõtte tuleks varustada ka töö pealkirja tõlkega ja koostaja ees- ning perekonnanimega. Võõrkeelse töö korral peaks eestikeelse kokkuvõtte ülesehitus vastama samadele nõuetele, millele eestikeelse töö korral vastab võõrkeelne kokkuvõtte (Rajangu 1999).

Sellist laiendatud kokkuvõtet võib nimetada ka referaadiks (*Abstract*). Referaadi maht on tavaliselt kuni 300 sõna. Väitekirjade referaadid võidakse publitseerida referatiivsetes andmebaasides (Allison 2004, lk 21 - 23).

**4.11.5 Viidatud kirjanduse loetelu** tuleb koostada vastavalt juhendile: Viitekirjete koostamine [WWW] <http://www.lib.ttu.ee/pdfs/viitekirjetekoostamine.pdf> . Viimasel ajal on levinud nummerdamata viitamine töö autori perekonnanime ja töö ilmumisaasta järgi. Kui samalt autorilt on aastas ilmunud mitu tööd, siis lisatakse aastanumbrile veel täht, näit 2009a, 2009b jne. Numbrilise viitamise puhul on loetelu järjestatud kas tähestikuliselt või tekstis viitamise järjekorras. Viimast moodust ei soovitata.

Veebidokumentidele viitamisel lisatakse kasutamise kuupäev ümarsulgudes.

Viidatud kirjanduse loetellu ei panda selliseid allikaid, mida on töö tegemisel küll kasutatud, kuid millele tekstis puuduvad viited.

## Viidatud kirjandus

**Aarma, A.** (2008) Teadustöö alused. TTÜ, Tallinn.

**Allison, B., P. Race** (2004) The Student's Guide to Preparing Dissertations and Thesis. 2<sup>nd</sup> Edition RoutledgeFalmer, London and New York.

**Glatthorn, A.** (1998) Writing the Winning Dissertation. A Step-by Step Guide. California, Corwin Press, Inc. Thousand Oaks..

**Hirsjärvi, S., P. Remes, P. Sajavaara** (2005) Uuri ja kirjuta. Medicina, Tallinn.

**Huybers, P., C. Langmuir** (2009) Feedback between glaciation, volcanism and atmospheric CO<sub>2</sub>. Earth and Planetary Science Letters, 286 (2009) 479 – 491.

**Kõverjalg, A.** (1993) Teadustöö metoodika alused I. Eesti Riigikaitse Akadeemia, Tallinn.

**Pickard, A. J.** (2007) Research Methods in Information. Facet Publishing, London.

**Pihlau, J.** (2003) Edukas otsing Internetis ehk kuidas leida nõela heinakuhjast. Külim.

**Rajangu, V.** (1999) Abiks magistri- ja doktoritöö koostajale. TTÜ Humanitaarteaduskond, Haridusuuringute keskus, Tallinn.

**Raukas, A.** (2003) Geoloogia ja geofüüsika alused. Tallinn, Eesti Mereakadeemia.

**Vaikmäe, R.** (2010) Globaalne vandenõuteooria või looduse ja inimese koostöö. Horisont, nr 1 lk 8 – 13.

**Viitekirjete koostamine** [WWW] <http://www.lib.ttu.ee/pdfs/viitekirjetekoostamine.pdf>  
(25.01.2010)

**Walliman, N.** (2005) Your Research Project. SAGE Publications 2-nd Ed. .

# TEADUSTÖÖ KORRALDUS JA MEETODID

## IRT8860, loengukonspekt 4-10 Heldur Haak

### 5. MUDELITEST MAA-TEADUSTES

#### 5.1 Sissejuhatus

Olles teinud mingi esialgse valiku võimaliku magistritöö teema ja lahendatava probleemi suhtes tekib järgmisena küsimus meetodika valikust, mis võimaldaks uuritavat probleemi lahendada. Ka hüpoteesi formuleerimine ja selle kontrollimine on seotud uurimismeetodi valikuga.

Maa-teaduste rakenduslik väärtus sisaldub suures osas nende võimes loodusnähtusi seletada ja ennustada. Vaadeldavas valdkonnas tähendab see ilmaennustusi ja pikemaajalisi kliima muutuste ennustamist. Kliima puhul pakub huvi ka kaugemas minevikus toimunud kliimanähtuste selgitamine.

Vaatleme algul põhilisi kliima uurimiseks kasutatavaid meetodeid. Vanim viis on analüüsida üle maailma kogutud näitajaid statistiliste meetoditega. Teine levinud meetod on sünoptiline klimatoloogia ja kolmas põhineb mudelite kasutamisel. See viimane meetod kliima uurimisel on viimase paarikümne aasta jooksul olnud laialdaselt kasutatav (Männik 2005, Tomingas 2005). Lähemalt käsitletakse nii modelleerimist kui teisi eelnimetatud meetodeid vastavates eriainetes. Järgnev lühiülevaade on mõeldud esialgse ettekujutuse andmiseks modelleerimisest kui uurimismeetodist sel määral, mis võimaldab planeerida meetodika valikut etapina oma magistritöö tegevuskavas.

Mudel on tegelikkuse lihtsustatud esitus. Real juhtudel võib mudeliks olla ka füüsikaline seade või ese, nagu näiteks lennukimudel või ehituse makett. Järgmises punktis tuleb juttu rannikuprotsesside füüsikalisest modelleerimisest. Seoses arvutustehnika arenguga on praegusel ajal laialdaselt kasutusel arvutis realiseeritavad numbrilised matemaatilised mudelid.

Ilmastikunähtuste aluseks on suur hulk omavahel keerukalt seotud füüsikalisi, keemilisi ja bioloogilisi protsesse. Kogu süsteemi terviklikuks modelleerimiseks tuleks kõigepealt teostada analüüs, see tähendab vaadelda eraldi iga üksikut protsessi (näiteks soojuskiirguse neelamine ja peegeldumine maapinnal, soojusvahetus naaberpiirkondadega jne) ja leida seda protsessi kirjeldavad matemaatilised avaldised. Seejärel tuleb teostada süntees, s.t teha kindlaks seosed erinevate protsesside vahel ja nende kaudu ühendada kõik protsessid ühtseks tervikuks. Saadud tulemused tuleb sisestada programmi kujul arvutisse. Keerukate mudelite puhul on sellise programmi koostamine väga suur töö. Andes nüüd mudelis esinevatele muutujatele vajalikud algväärtused, saame käivitada modelleerimise (mudelit „jooksutada“).

Kõigi võimalike süsteemi kirjeldavate detailide arvessevõtmine on üldjuhul liiga keeruline ja käib üle jõu ka kõige võimsamale arvutile. Me peame endale püstitama kindla eesmärgi, mida me modelleerimisega tahame saavutada ja vastavalt sellele jätma mudelist välja kõik nähtused ja seosed, mis ei ole meie ülesande seisukohalt olulised.

Kliima kujutab endast mingit pikaajalist keskmist ilmade režiimi, mille on kujundanud päikesekiirgus, Maa aluspinna iseärasused ja nendest sõltuv atmosfääri üldtsirkulatsioon. Me võime esialgu võtta vaatluse alla ainult ühe muutuja, näiteks keskmise temperatuuri üle kogu Maa pinna. Sellele vastab globaalne energiabalansi mudel, mida vaatleme punktis 5.4.

#### 5.2 Rannikuprotsesside füüsikaline modelleerimine

Füüsikalisi mudeleid on edukalt kasutatud rannikuprotsesside uurimisel.

Ühe näitena võib tuua Oregoni Ülikoolis 1991. a suvel teostatud katsetused. Nende jaoks kasutati basseini, mis oli 104 m pikk, 3,7 m lai ja 4,6 m sügav. Basseini ühes otsas oli hüdraulilise süsteemiga liigutatav laba, mis võis tekitada kas kindla või juhusliku lainepikkusega lainetust, aga

samuti ka absorbeerida peegeldunud laineid. Kunstlik liivarand tehti basseini teise otsa 76 m pikkuselt ja selleks toodi Oregoni rannalt 1700 tonni liiva. Basseini olid paigutatud andurid ja videokaamerad (Dean, 2002, lk. 301).

Üldreeglina majanduslikud põhjused nõuavad vähendatud mõõtmetega mudelite kasutamist. Siiski tekitab mastaabi muutmine tõsiseid probleeme mudeli ja tegelikkuse vastavuse osas. Vähendades mudeli mõõtmeid tuleb vähendada ka lainete lainepikkust, seega tõsta nende sagedust. Väga lühikeste lainete puhul mudelis aga hakkab lainetust tunduvalt rohkem mõjutama vedeliku pindpinevus.

Mõnikord osutub vajalikuks kasutada erinevaid mastaape vertikaal- ja horisontaalsuunas. Cheesepeake'i lahe (USA idarannikul) mudeli puhul kasutati horisontaalmastaapi 1:1000 ja vertikaal (sügavuse) mastaapi 1:100. Mudel asus hoones pinnaga 56 700 ruutmeetrit.

Sügavusmastaabi 1: 1000 puhul oleks vee sügavus mudelis olnud väiksem kui 4 cm, mille puhul oleks tunduvalt tugevnenud pindpinevuse mõju ning oluliselt muutunud vee ja mudeli põhja vaheline hõõrdumine (Dean, 2002, lk. 307).

Veelgi keerulisem on olukord siis, kui mudeli põhja kuju ei ole kindel, vaid modelleerimise käigus toimub põhjamaterjali (liiva) ülekande ühest mudeli osast teise. Selline modelleerimise vajadus tekib, kui on vaja uurida lainetuse mõju sadamalähedase mere põhjaprofiili muutustele. Kui me kasutame siin geomeetrilist mastaapi 1:100, siis peaks ka liivaosakeste asemel (läbimõõduga tüüpiliselt 0,4 mm) kasutama materjali, mille osakeste läbimõõt on 0,004 mm (savi või muda). Sellistele osakestele aga on omane tunduvalt suurem kleepuvus kui liival (Dean, 2002, lk. 308). Modelleerija üheks tähtsamaks ülesandeks on mudeli kontrollimine. Selleks on vaja korraldada eksperimente, mille tulemusi on võimalik võrrelda tegelikkusega looduses.

On öeldud, et hea füüsikaline modelleerimine on loominguline kunst, mis nõuab suuri kogemusi. Muidugi on rannikuprotsesside uurimisel kasutatav ka matemaatiline modelleerimine. See aga nõuab uuritavate protsesside piisavalt täpset analüütilist kirjeldamist, mis pole samuti lihtne.

### 5.3 Kliimamudelite klassifikatsioon

Kliima uurimisel füüsikalisi mudeleid ei kasutata. Põhjuseks on kliimaga seotud protsesside keerukus ja asjaolu, et kliimamudelite puhul vajalik aja mastaap on oluliselt erinev reaalselt füüsikaliste protsesside aja mastaabist. On aga loodud suur hulk matemaatilisi mudeleid.

Kliimamudeleid võib klassifitseerida mitmete tunnuste alusel.

Esiteks klassifitseeritakse kliimamudeleid protsesside alusel, mida antud mudel arvesse võtab. Olulisemad on neli protsesside klassi (McGuffie 1997).

1. Kiirgusenergia. Uuritakse Maa poolt absorbeeritavat päikeseenergiat ja Maa infrapunast soojuskiirgust.
2. Dünaamika. Uuritakse soojuse liikumist tuule ja ookeanihoovuste toimel, sealhulgas ka vertikaalsuunalist liikumist.
3. Pinnaprotsessid. Uuritakse manner- ja merejää, lume ja taimestiku mõju albeedo muutumisele, maapinna ja atmosfääri vahelist energia- ja niiskusvahetust.
4. Keemilised protsessid. Uuritakse keemiliste protsesside mõju atmosfääris ja maapinnal, sealhulgas näiteks süsiniku ringkäiku looduses.

Teiseks võib mudeleid klassifitseerida mudelis kasutatava mõõtmete arvu (dimensioonilisuse) järgi. Energiamodelite puhul on võimalik ka nulldimensiooniline mudel, mille puhul arvutatakse kogu Maa jaoks ainult üht keskmist temperatuuri. Ühedimensiooniliste mudelite puhul vaadeldakse uuritavat muutujat (näiteks temperatuuri) sõltuvana kas koha geograafilisest laiusest või siis uuritava õhukihi kõrgusest vertikaalsuunas. Pinnaprotsesside kirjeldamiseks on vajalik vähemalt kahemõõtmeline mudel.

Klassifitseerimise aluseks võib olla ka mudeli ruumilise ja ajalise sammu pikkus. Modelleerimisel numbrilisel arvutil jagatakse Maa pind kindla sammupikkusega elementideks, samuti ka



vertikaalsuunas atmosfäär ja ookean teatud paksusega kihtideks. Modelleerimine toimub ka ajaliste sammude kaupa. Mida väiksemad on ajaliste ja ruumiliste sammude pikkused, seda täpsem on modelleerimine, kuid seda kõrgemad on ka nõuded arvutile ja seda pikem on modelleerimise kestvus.

## 5.4 Energiabilansil põhinevad kliimamudelid

### 5.4.1 Nulldimensioniline energiabalansi mudel (EBM)

Nulldimensioniline antud juhul tähendab, et me ei vaatle mingit konkreetset piirkonda Maa pinnal. Me vaatleme Maad kosmosest kui taevakeha, millele langeb Päikese kiirgus ja mis omakorda kiirgab energiat maailmaruumi. Oletame, et süsteemis kujuneb välja balanss ehk tasakaal, mis tähendab seda, et süsteemi poolt neelatav ja kiirratav energia on võrdne. Energiate võrdsuse saame esitada kujul:

$$\pi R^2 S(1 - A) = 4\pi R^2 \sigma T_e^4 \quad (5.1)$$

Siin  $\pi R^2$  on Päikese valgusega risti olev pindala, millele langeb päikeseenergia ( $R$  on Maa raadius),  $S$  on päikesekonstant ( $1365 \text{ W / m}^2$ ),  $A$  on Maa kui planeedi albeedo (maapinna, pilvede ja atmosfääri keskmine albeedo),  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W / (m}^2 \text{ K}^4)$  on Stefan-Boltzmanni konstant ja  $T_e$  on Maa efektiivne temperatuur.  $4\pi R^2$  on Maakera pindala. Lihtsustamiseks võime valemi mõlemad pooled  $\pi R^2$ -ga läbi jagada.

Albeedo on suhe peegeldunud kiirguse ja mingile pinnale langeva kiirguse vahel. Albeedo sõltub maapinna iseloomust ja taimkattest, aga ka pilvede olemasolust. (Jürissaar 1998, lk 51).

Valemist (5.1) saab arvutada Maa efektiivse temperatuuri  $T_e$ . Kui võtta  $A = 0,3$ , saame  $T_e = 255 \text{ K}$ . See ei ole siiski veel maapinna keskmine temperatuur. Kasvuhooneefekti tõttu kujuneb Maa pinna temperatuur kõrgemaks paranduse  $\Delta T = 33 \text{ K}$  võrra (McGuffie 1997). Seega saame Maa pinna keskmiseks temperatuuriks  $288 \text{ K}$  ehk  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ , mis vastab tegelikule.

Mõõtmised näitavad, et eriti viimastel aastakümnetel on Maa kliima märgatavalt soojenenud.

Aastate 1906 - 2005 keskmisena on maapinna keskmine temperatuur tõusnud  $0,74^\circ\text{C}$  võrra, kuigi mõnel lühemal perioodil (neljakümne aastad) on temperatuur ka langenud. Lõppenud sajandi viimastel aastakümnetel on temperatuuri kasvu kiirus märgatavalt tõusnud (Solomon jt, lk 36 – 37, Vaikmäe 2010, joon 3).

Kliima muutumisel võib olla mitu põhjust. Esiteks võib olla suurenenud Päikese aktiivsus, seega ka päikesekonstant ja energiabilanss on muutunud positiivseks. Sellega kaasneks efektiivse temperatuuri tõus, kuni tekib uuesti tasakaal.

Tegelikult lähiminekis Päikese aktiivsuse olulist muutumist mõõdetud ei ole. Esineb väiksemaid kõikumisi, sealhulgas päikeseplekkide toimel (Solomon jt, lk 30 -31). Seega ka soojusbilanss on jäänud tasakaalu. Kliima soojenemine on toimunud kasvuhooneefekti tõttu (suureneb  $\Delta T$ ).

Kaugemas minevikus aga on kliimamuutuste põhjuseks olnud ka päikesekonstandi muutus Maa orbiidi parameetrite muutumise tõttu (Milankovič'i tsükliid).

Võrdluseks võib üldtoodud energiabalansi mudelit kasutada ka Veenuse puhul. Veenuse puhul on solaarkonstant umbes kaks korda suurem, kuid üle kahe korra suurem on ka albeedo, sest kogu Veenuse pind on pilvedega kaetud. Selle tulemusena on Veenuse efektiivne temperatuur  $242 \text{ K}$ , seega väiksem kui Maa oma. Siiski on Veenuse pinnatemperatuur väga kõrge (kosmoseaparaatide poolt mõõdetuna umbes  $470^\circ\text{C}$ ). Veenuse pilvkate on tihe ja ühtlane ning sisaldab umbes 75% väävelhapet ning 25% veeauru. Atmosfääri põhiliseks koostisosaks on süsihappegaas (95%), mis tekitabki tugeva kasvuhooneefekti (Jõeveer 2005).

### 5.4.2 Ühemõõtmeline energiabilansi mudel

Uuritakse energiabilanssi sõltuvalt modelleeritava vööndi geograafilisest laiusest. Selle mudeli järgi jagatakse Maa pind rõngakujulisteks vöönditeks, kusjuures iga vöönd asub mingis laiuskraadide

vahemikus. Iga  $i$ -nda vööndi kohta koostatakse jälle energiabilanss ja arvutatakse iga vööndi jaoks temale vastav keskmine efektiivne temperatuur  $T_i$  :

$$B(T_i) = S_i(1 - A_i(T_i)) - E(T_i) - V(T_i) \quad (5.2)$$

Esimene komponent bilansi paremal poolel väljendab Päikeselt saadavat energiat.  $S_i$  tähendab päikesekonstanti, mille leidmisel on arvestatud päikesekiirte keskmist langemisnurka vastava vööndi jaoks, seega  $S_i$  väärtus on maksimaalne ekvaatoril ja väheneb pooluste suunas. Albeedo  $A$  sõltub temperatuurist ja ka vööndist. Madalal temperatuuril võivad tekkida lumi ja jää, mis suurendavad oluliselt  $A$  väärtust. Lihtsamates mudelites loetakse  $A$  otseselt sõltuvaks temperatuurist, näiteks:  $A_i = 0,3$ , kui  $T_i \geq T_c$  ja  $A_i = 0,6$ , kui  $T_i < T_c$ .  $T_c$  on negatiivne temperatuur, tavaliselt vahemikus  $0^\circ\text{C}$  kuni  $-10^\circ\text{C}$ . Negatiivne on see piirtemperatuur sellepärast, et nõrga külmaga ookeani pind veel ei jäätu. Teine komponent  $E(T_i)$  tähendab energia kiirguskadu maapinnalt ja  $V(T_i)$  tähendab soojusvahetuse bilanssi naabervöönditega (vahet kõrgema temperatuuriga naabervööndist saabuva soojusvoo ja madalama temperatuuriga naabervööndisse väljuva soojusvoo vahel).

Üldjuhul ei pruugi vööndi soojusbilanss olla tasakaalus. Kui  $B(T_i)$  on positiivne, tähendab see energia ülejääki, negatiivne bilanss tähendab puudujääki. Positiivne bilanss tekitab vööndi temperatuuri tõusu, kusjuures tõusu kiirus on pöördvõrdeline vööndi pinnase ja ookeani ülemise kihi keskmise soojusmahtuvusega. Sellega seoses tuleb mudelisse sisse ka aeg. Keerukamates mudelites tuuakse sõltuvus ajast sisse ka albeedo muutumisse. Kui vööndi temperatuur tõuseb, siis kasvab ka soojusvoog naabervöönditesse, mis viib aja jooksul soojusliku tasakaaluni.

Numbrilisel modelleerimisel valitakse arvutuste ajaline samm vastavalt sellele, kui kiireid nähtusi tahetakse modelleerida. Kuna ülaltoodud kujul EBM käsitleb keskmisi suurusi mingi geograafilise laiusega kliimavööndi jaoks, saab seda kasutada suhteliselt aeglaste ja globaalse iseloomuga kliimanähtuste, näiteks jääaegade tekkimispõhjuste uurimiseks.

### 5.4.3 Milankovič'i tsüklid

Serbia insener ja matemaatik Milutin Milankovič esitas oma jääaegade tekkimise teooria aastal 1920. Selle teooria järgi kliima muutumise põhjuseks on Maa orbiidi parameetrite pikaajalised muutused. ([http://en.wikipedia.org/wiki/Milankovitch\\_cycles](http://en.wikipedia.org/wiki/Milankovitch_cycles)).

Tegelikult ei olnud Milankovič esimene jääaegade astronoomiliste põhjuste teooria looja. Šotlane James Scroll oli sellise teooria esitanud oma raamatus juba 1875. a. Kuid Scrolli töös oli ka olulisi vigu. Ta pidas jääaegu põhja- ja lõunapoolkeral ajaliselt vahelduvaks (tegelikult on need sünkroonsed). Viimase jääaja lõpuks hindas ta aega umbes 80 000 a tagasi (praegune hinnang 10 000 ... 14 000 a). Sellised vead tekitasid mõneks ajaks umbusu kogu teooria suhtes.

Maa orbiidi parameetrid on täpselt arvutatavad mineviku jaoks miljoneid aastaid tagasi ja ennustatavad miljoneid aastaid ette.

Sellisteks parameetriteks on esiteks Maa orbiidi elliptilisuse muutus, milles esinevad 95 tuhande, 125 tuhande ja 413 tuhande aastase perioodiga komponendid. Kaks esimest komponenti sageli ühendatakse üheks ligikaudu 100 tuhande aastase perioodiga tsüklis. Need muutused on tingitud teiste planeetide, eelkõige Saturni ja Jupiteri mõjust Maa orbiidile. Ekstsentrilisus muutub vahemikus 0,005 kuni 0,058, praegu on ekstsentrilisus suhteliselt väike (0,017). Ka praegusest ekstsentrilisusest põhjustatud Päikese energiavoo muutus on suhteliselt väike (6,8 %). Teiseks mõjutab kliimat Maa pöörlemistelje kalde muutus, milles esineb umbes 41 tuhande aastane periood. Kaldenurk muutub vahemikus  $22,4^\circ$  kuni  $24,5^\circ$ , praegune kaldenurk on  $23,4^\circ$  ja väheneb. See kalde muutus ei mõjuta küll üldist Päikeselt saadava energia hulka, kuid muudab selle jaotust aastaegade kaupa. Kliimanähtuste mittelineaarsuse tõttu on sellel muutusel siiski oluline mõju kliimale. Kaugemas minevikus (1 kuni 3 miljonit aastat tagasi) esinenud jääaegade puhul eksisteeris tõesti Maa telje kaldenurgaga määratud 41 000 aastane tsükkel (Paillard 2006).

Kolmandaks kliimat mõjutavaks teguriks on Maa telje pretsessioon. See on pöörlemistelje

ringikujuline liikumine keskasendi ümber, mida võib näha ka vurri pöörlemisel. Pretsessiooni iseloomustavad perioodid 24 000, 22 000 ja 19 000 aastat. Pretsessioon kujutab endast võnkumist, mille amplituud on moduleeritud Maa orbiidi ekstsentrilisusega. Maa orbiidi parameetrite muutused viimase miljoni aasta jooksul ja nende mõju Maa kliimale (jäätumise astmele) on näidatud graafikuna „Horisondi“ artiklis (Vaikmäe 2010, joon 5).

Siiski on jääaegade perioodilisuses probleeme, mis ei ole Milankovič'i teooriaga seletatavad. Alates ajast umbes 800 000 aastat tagasi on jääajad ja jäävaheajad vaheldunud keskmiselt 100 000 aastase perioodiga, mis korreleerub Maa ekstsentrilisuse muutusega (Kalm 2009). Siiski ei saa seda veel pidada põhjuse ja tagajärje seoseks. Esiteks on ekstsentrilisuse mõju liiga väike sellise kliimamuutuse põhjustamiseks. Teiseks ei ole suudetud seletada, miks asendus kaldenurga muutustest põhjustatud periood (41 000 a) ekstsentrilisuse perioodiga (100 000 a). See probleem on saanud nimetuseks 100 tuhande aasta probleem ja selle juurde pöördume veel edaspidi.

## 5.5 Ühemõõtmeline kiirgus-konvektsiooni kliimamudel

Kiirgus- konvektsiooni kliimamudel (*Radiative-Convective Model, RC Model*) on samuti lihtsamaid kliimamudeleid. Seda võiks nimetada ka kihtmudeliks, sest siin jagatakse atmosfäär paljudeks erineva kõrgusega kihtideks ja vaadeldakse energiaülekannet kihtide vahel. Iga kihi näitajaid käsitletakse vastava kõrgusega kihi ülemaailmse keskmisena. Kihid üldreeglina ei ole sama paksusega.

Selline mudel sobib näiteks kasvuhooneefekti uurimiseks. Kasvuhooneefekti põhjuseks on asjaolu, et atmosfäär on maapinnalt kiirguva infrapunase soojuskiirguse suhtes palju läbipaistmatum kui Päikeselt saabuva väiksema lainepikkusega kiirguse suhtes. Pilved küll peegeldavad tagasi maailmaruumi mingi osa Maa atmosfäärile langevast päikesekiirgusest, kuid see energia on väiksem kui soojusenergia, mida Maa pilvitu taeva korral kiirgaks maailmaruumi.

Põhiliseks kasvuhooneefekti tekitajaks on õhus olev veeaur ja veel mõned gaasid, nende hulgas süsinikdioksiid  $\text{CO}_2$ . Sellepärast sobib antud mudel näiteks  $\text{CO}_2$  mõju uurimiseks energiabilansile. Antud mudeli puhul pööratakse tähelepanu kiirguse ja konvektsiooni täpsele modelleerimisele. Mõned mudelid modelleerivad ka pilvede tekkimist.

Mudeli kõige alumiseks kihiks on kas Maa pinnakiht või ookean. Ka ookean jagatakse mitmeks (lihtsamates mudelites kaheks või kolmeks) kihiks. Ookeani ülakihi paksuseks võetakse tavaliselt 70 -100 m ja see on kiht, milles lainetuse mõjul toimub suhteliselt intensiivne vee segunemine.

## 5.6 Tagasiside kliimamudelites

### 5.6.1 Temperatuuri- albeedo tagasiside

Kliima on keerukas süsteem, mida kirjeldavad parameetrid on sageli omavahel vastastikuselt seotud. Esimese näitena võib tuua temperatuuri – albeedo tagasiside.

Oletame, et mingil põhjusel Maa mingis võõndis temperatuur langeb. Selle tõttu suureneb pind, mis on kaetud lume ja jääga. Lumi ja jää peegeldavad rohkem saabuvat kiirgusenergiat tagasi maailmaruumi (suureneb albeedo). Väheneb Maale jääva energia hulk, mis viib veelgi suuremale temperatuuri langusele. See on temperatuuri languse positiivne tagasiside. Samuti aga toimib positiivne tagasiside ka temperatuuri tõusul, kui albeedo väheneb. Maapinna albeedo tagasiside kaudu saab seletada jääaegade ja jäävaheaegade tekkimist.

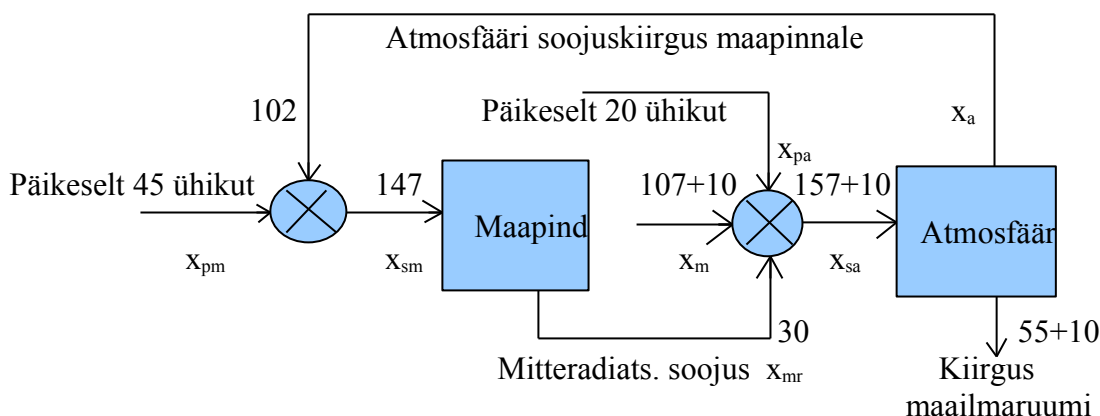
### 5.6.2 Kasvuhooneefekti olemus

Teine näide on seotud kasvuhooneefektiga, millest oli juba juttu p. 5.5. Oletame, et süsihappegaasi ( $\text{CO}_2$ ) sisaldus atmosfääris suureneb (näiteks inimtegevuse tõttu). Suureneb Maa soojuskiirguse neeldumine atmosfääris, atmosfäär soojeneb, osa energiast kiirgub tagasi maapinnale. Maa pind soojeneb, tugevneb aurumine Maa pinnalt ja ookeanidest, veeauru juurdekasv atmosfääris tugevdab veelgi Maa soojuskiirguse neeldumist atmosfääris.

Katsume koostada kasvuhooneefekti kirjeldava mudeli. Kasutame selleks süsteemi „Maapind + atmosfäär“ soojusbilanssi (Jürissaar, 1998, lk 54-55). Mudeli esitame plokkiskeemina, mille plokkideks on maapind ja atmosfäär. Ringid plokkidest vasakul on liitmissõlmed, milles liidetakse kokku plokkidele mõjuvad sisendsuurused.

Maapind saab soojust kahest allikast: Päikeselt 45 ühikut (kokku nii otsese kui hajuskiirgusena) ja tagasisidena atmosfäärist 102 ühikut. Ühik on üks protsent Päikese energiast, mis langeb Maa ristlõike suurusele kiirgusega ristuvale pinnale.

Atmosfääri saabub soojusenergiat kolmest allikast. Esiteks otse Päikeselt (20 ühikut). Maapinnalt kiirgub soojuskiirgusena 117 ühikut, sellest 107 neeldub atmosfääris ja 10 kiirgub edasi maailmaruumi. 30 ühikut mitteradiatsioonilist soojust tähendab soojusülekanne õhu ja veeauru liikumise kaudu. Atmosfäärist kiirgub maailmaruumi 65 ühikut.



Joon. 5.1 Süsteemi “maapind – atmosfäär” bilansi järgi koostatud plokkiskeem

Jooniselt on näha, et atmosfäärist tagasisidena saabuv soojusvoog ületab rohkem kui kahekordselt Päikeselt saabuva soojusvoo.

### 5.6.3 Kliima tundlikkus CO<sub>2</sub> hulga muutumisele

Süsihappegaasi mõju arvuliseks hindamiseks kasutatakse kliima tundlikkuse (*Climate Sensitivity*) mõistet. Kliima tundlikkuse all mõistetakse Maa keskmise temperatuuri muutust CO<sub>2</sub> hulga kahekordistumisel atmosfääris (pärast stabiilse temperatuuri väljakujunemist). CO<sub>2</sub> kontsentratsiooni algväärtuseks võetakse tööstuse-eelse ajastu väärtus 280 ppm (*parts per million - miljondikku osa*). Aastal 2005 oli CO<sub>2</sub> hulk atmosfääris 379 ppm (Solomon et al. 2007 lk 25). Kui võtta aluseks ainult CO<sub>2</sub> mõju (ilma tagasisideteta), siis oleks mudelite põhjal saadud kliima tundlikkus umbes 1,2°C. Veeauru tagasiside tõttu see number vähemalt kahekordistub (Randall jt 2007 lk 631).

### 5.6.4 Pilvede albeedo tagasiside

Kolmandaks oluliseks ja ka vastuoluliseks maapinna kiirgusbilanssi mõjutavaks teguriks on pilvede mõju. Ühelt poolt pilved vähendavad Maa üldist albeedot, peegeldades tagasi Päikese kiirgust ja jahutades sellega maapinda. Teiselt poolt tugevdab pilvedes sisalduv veeaur kasvahooneefekti, soojendades maapinda. Üldiselt on ülekaalus albeedo mõju, kuid palju sõltub pilvede liigist ja kõrgusest. Pilvede ja nende moodustumise modelleerimine on väga keeruline ja just erinevad pilvede mudelid ongi kliimamudelitega saadud tulemuste erinevuse üheks suuremaks põhjuseks.

### 5.6.5 Kõrvalepõige tagasiside teooriasse

Joonisel 5.1 näidatud süsteemis toimib positiivne tagasiside: kui maapind soojeneb, kiirgub suurem osa energiast atmosfääri, kust omakorda suurem osa energiast kiirgub maapinnale tagasi, põhjustades veelgi suuremat maapinna temperatuuri tõusu.

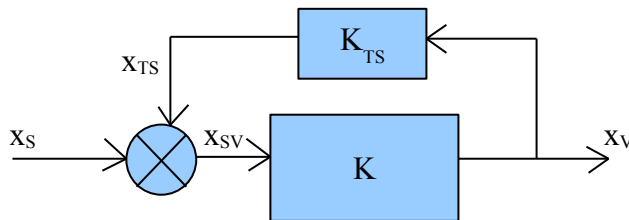
Vaatleme üldjuhul mingi ploki, (näiteks võimendi) tagasisidestamist (joon. 5.2).

Süsteemi kirjeldavad järgmised võrrandid:  $x_V = K x_{SV}$ ;  $x_{TS} = K_{TS} x_V$ ;  $x_{SV} = x_S + x_{TS}$ .  
Avaldame siit tagasisidestatud võimendi võimenduse  $K_{Vts}$ :

$$K_{Vts} = x_V / x_S = K x_{SV} / x_S = K (x_S + x_{TS}) / x_S = K (x_S + K_{TS} x_V) / x_S = K + K K_{TS} K_{Vts}$$

Siit  $K_{Vts} - K K_{TS} K_{Vts} = K$  ja

$$K_{Vts} = K / (1 - K K_{TS}) \quad (6.2)$$



Joon. 5.2 Tagasisidestatud võimendi

Toodud valemites  $x_S$  ja  $x_{TS}$  on sama märgiga, s.t tagasiside on positiivne. Korrutis  $K K_{TS}$  tähendab tagasisidega haaratud kinnise kontuuri võimendust ja see määrab ka tagasisidestatud võimendi võimendusteguri. Selle korrutise lähenemisel 1-le tagasisidestatud võimendi võimendus  $K_{Vts}$  kasvab kuni lõpmatuseni. Lõpmatu võimendus tähendab, et süsteem on kaotanud stabiilsuse (muutunud generaatoriks). Väljund võib hakata võnkuma toitepingetega määratud äärmiste väärtuste vahel. Kui tagasisideahelas muutub signaali märk (muutuse suund – sisendsignaali suurenemisel tagasisidesignaali väheneb), siis on tegemist negatiivse tagasisidega. Sel juhul võib (6.2) esitada kujul:

$$K_{Vts} = K / (1 + K K_{TS}) \quad (6.3)$$

Juhul, kui  $K K_{TS} \gg 1$ , siis valem lihtsustub:

$$K_{Vts} = 1 / K_{TS} \quad (6.4)$$

Selline negatiivse tagasiside variant on kogu automaatreguleerimise aluseks. Väljundsuurus on kontrollitav tagasisideahela ülekande  $K_{TS}$  kaudu. Päriahelas oleva võimendi võimendus  $K$  pole eriti oluline, ta peab vaid olema piisavalt suur.

## 5.7 Üldtsirkulatsiooni mudelid

Üldtsirkulatsiooni mudelid (*General Circulation Models, GCM*) peavad kirjeldama atmosfääri ja ookeani kihte kõigis kolmes mõõtmes. Kui mudel on koostatud ainult atmosfääriliste nähtuste jaoks, kasutatakse lühendit AGCM, aga ainult ookeaniga seotud nähtuste jaoks kasutatakse lühendit OGCM. Ühendmudelitel puhul lisatakse termin *coupled*, saades lühendi kuju CGCM, kasutatakse ka lühendit AOGCM. Vaatleme algul atmosfäärilisi mudeleid.

### 5.7.1 Atmosfäärilised üldtsirkulatsiooni mudelid

Põhilised füüsikaseadused, millele sellised mudelid peavad vastama, on liikumishulga (impulsi), massi ja energia jäävuse seadused, samuti ka ideaalgaasi seadus. Põhilisteks muutujateks mudelis on õhurõhk, tuulekiiruse komponendid, temperatuur ja niiskus.

Modelleerimise käigus tuleb lahendada rida võrrandeid, mis peavad määrama massi liikumise (tuuled, niiskus) kuni järgmise ajalise arvutussammuni, aga samuti ka pilvede, lume või merejää tekkimise ning soojuse liikumise. Arvutusteks jagatakse p.5.5 kirjeldatud

vertikaalsuunalised kihid nelinurkseteks osadeks. Iga sellise osa jaoks tuleb lahendada kõik võrrandid, seega maapinna jaotusvõrgu sammu vähendamine kaks korda tähendab vajaliku arvutusvõimsuse kasvu neli korda. Tüüpiliselt on mudelis kõrguse suunas umbes 20 kihti ja horisontaalsuunas globaalsetel mudelitel pinnaelemendi mõõtudeks umbes 100...200 km ehk ligikaudu 0,5 kuni 2 pikkus-või laiuskraadi)(Randall jt 2007, lk 597 - 599).

Kuna selliste ruumielementide arv on väga suur, tuleb otsida võimalusi arvutuste lihtsustamiseks. Üheks võimaluseks on spektraalsete mudelite kasutamine.

**Spektraalse mudeli** puhul esitatakse mingi kõrguskihhi muutujad (näiteks geograafilise pikkuse ja laiuse suunalised temperatuurid) pidevate funktsioonidena ja arvutatakse nende funktsioonide spektrid. Fourier' teisenduse abil saab iga perioodilise funktsiooni esitada erinevate sagedustega siinus- ja koosinuslainete summana. Arvutuste lihtsustamiseks piirduakse mingi kindla arvu lainekomponentidega. Horisontaalsuunalise võrgusammu suurus kujuneb sõltuvana komponentide arvust. Üheks tüüpiliseks komponentide arvuks on 63, millele vastab võrgu samm  $1,9^\circ$ . Kuigi sellistes mudelites toimuvad igal arvutussammul teisendused muutujate spektraalse ja ruumilise esituse vahel, võimaldab spektrite kasutamine oluliselt arvutusi lihtsustada ja sellega tõsta mudeli töökiirust.

Kiirgusbilansi käsitlemine AGCM-des on lähedane eeltoodud lihtsamatele mudelitele. Pilvede ja sademete tekkimine, aga samuti ka lume- ja jääkatte tekkimisest ja sulamisest tingitud albeedo muutused on suhteliselt keerukad nähtused ja erinevates mudelites on nende käsitus erinev.

### **5.7.2 Regionaalsed atmosfäärilised mudelid**

Ülaltoodud arvutusvõrgu samm on liiga suur regionaalsete mudelite koostamiseks.

Modelleerimistulemused (õhutemperatuurid, sademete jaotus) ei pruugi vastata tegelikele oludele eriti siis, kui piirkond on mägine, liigestatud rannajoonega või vahelduva taimkattega.

Lahenduse pakkus 1980. aastate lõpus Itaalia teadlane Filippo Giorgi, kelle tööd panid aluse tänapäevastele regionaalse kliima mudelitele. Ta otsustas kasutada kõrglahutusega piiratud ala mudeleid, mida juba aastaid oli kasutatud ilmaennustustes. F. Giorgi kohendas kasutatavate füüsikaseaduste kirjeldust ja laskis mudelitel käia mitu kuud. Regionaalne mudel koosneb sel juhul piiratud ala mudelist, mis on asetatud globaalse kliimamudeli sisse (pesastamise meetod). Globaalne mudel annab ette algsed ilmaolud ja „toidab“ regionaalset mudelit ajast sõltuvate servanäitajatega. Pesastamise meetod õigustas ennast hästi ka pikaaegsete eksperimentide puhul

Praeguseks on regionaalseid kliimamudeleid mitmesugustel eesmärkidel edukalt kasutatud juba viisteist aastat.

Ka regionaalsetel mudelitel on omad probleemid. Mitte kõigi nähtuste kohta ei ole meil piisavalt teavet. Enne kui asuda ennustama tuleviku kliimat, tuleb mudeli võimekust põhjalikult kontrollida. Tavaliselt tehakse seda mineviku teadaoleva kliimaolukorra modelleerimisega (Tomingas 2005).

### **5.7.3 Ookeani tsirkulatsiooni mudelid**

Kõige lihtsamates ookeani mudelites vaadeldakse ookeani ülemist kihti ainult kui soojusmahutit, mis võib soojust salvestada või välja anda, kuid ei vaadelda veekihtide dünaamikat. Mõnikord liidetakse selline lihtne mudel atmosfäärimudelile alumise kihina.

Täiuslikumad ookeani mudelid käsitlevad veemasside liikumist kolmes mõõtmes, võimaldades modelleerida ka hoovusi. Just hoovused kannavad suure hulga soojust ekvatoriaallaiustelt pooluste suunas, mõjutades sellega oluliselt kliimat. Sellist hoovuste süsteemi nimetatakse termohaliinseks tsirkulatsiooniks, mis tuleneb kreekakeelsetest sõnadest *thermos* – soojus ja *halos* – soolsus.

Modelleeritavateks muutujateks on peale kiiruste veel vee temperatuur, soolsus ja hapnikusisaldus. Selleks, et piisavalt täpselt kirjeldada hoovusi, keeriseid ja ka põhjareljeefi on vajalik väiksem arvutusvõrgu samm, kui see oli atmosfääri mudelitel.

### **5.7.4 Atmosfääri ja ookeani tsirkulatsioonimudelite ühendamine**

Mõlemat keskkonda kirjeldavad dünaamikavõrrandid on sarnased. Põhiliseks erinevuseks on ookeani tunduvalt suurem inertsus. See tähendab, et tasakaaluolekuni jõudmiseks kulub ookeanil tunduvalt rohkem aega ja tavaliselt võetakse ookeani mudelites ajaline samm pikem.

Arvutusaja kokkuhoiduks kasutatakse mõnikord meetodit, kus perioodiliselt mudelid eraldatakse ja lastakse kummalgi teatud aeg omaette (asünkroonselt) töötada. Siis ühendatakse mudelid jälle kokku, et ühtlustada omavahelisi servatingimusi.

Teine kasutatav võte on nn „moonutatud füüsika“ meetod. Et uurida pikaajalisi muutusi ookeni süvakihtides (mis võivad toimuda aastatuhandete jooksul), vähendatakse süvakihtide soojusmahtuvust näiteks 10 korda (samasugune moonutus viiakse ka soolsuse muutmise kiiruse). Nii viiakse kiiremini pinnakihtis tekkivad muutused süvakihtidesse. Pärast seda tuleb moonutus välja lülitada ja lasta mudelil mingi aeg töötada normaalsetes tingimustes (McGuffie 1997).

#### **5.7.5 Mudelite parameetrite valik ja „häälestamine“**

Rea keerukate protsesside jaoks kas ei ole piisavalt täpset füüsikalist kirjeldust. või on see kirjeldus väga keeruline ja nõuaks modelleerimiseks liigselt arvutusressurssi. Sel juhul lisatakse mudelile katseliselt määratud funktsioone või parameetreid. Mõnikord on mudelit vaja „häälestada“, mis tähendab, et parameetreid muudetakse selliselt, et mudeli abil saadavad tulemused vastaksid paremini tegelikkusele.

Selline tegevus on põhjustanud kriitikat. Väidetakse, et modelleerijad sisestavad suvalisi konstante, et saada selliseid tulemusi, nagu nad ise tahavad.

Päris nii see siiski ei ole. Esiteks ei tohi sisestata parameetrid väljuda katseliselt määratud vahemikust. Peale selle, kui mudeli mingi väljundi soovitava suuruse saavutamiseks on kasutatud häälestamist, siis selle suuruse täpsust ei loeta antud mudeli usaldatavuse näitajaks tema võrdlemisel teiste mudelitega.

### **5.8 Kliimamudelite klassifitseerimine nende keerukuse järgi**

#### **5.8.1 Lihtsad mudelid**

Siia kuuluvad eelkõige p 5.4 ja 5.5 kirjeldatud ühemõõtmelised mudelid. Selliste mudelite eeliseks on modelleerimise kiirus, tavaliselt on mudelid kasutatavad lihtsatel personaalarvutitel. Sageli kasutatakse mudeli häälestamist (p 5.7.5), püüdes saavutada olulisemate näitajate jaoks mudeli samasugust käitumist nagu keerukamate AOGCM mudelite puhul. Mudelite abil võib uurida põhjuse-tagajärje seoseid, nad sobivad õppeotstarbeks.

Lihtsa kliimamudeli näiteks on illustratiivsel eesmärgil loodud Java kliimamudel JCM (Java kliimamudel JCM WWW). Mudel võimaldab jälgida kliima muutumist erinevate CO<sub>2</sub> emissioonide korral.

#### **5.8.2 Keskmise keerukusega mudelid**

Selle mudelite klassi ingliskeelseks lühendiks on EMIC (*Earth System Models of Intermediate Complexity*).

Mudelite keerukuse hindamisel tuleb arvestada mudelis omavahel seotud komponentide ja protsesside arvu ning nende kirjeldamise detailsust. Täpset piiri klasside vahel ei saa anda, sest see aja jooksul muutub sõltuvalt arvutite kiirusest. Keerukamad keskklassi mudelid ei erine palju AOGCM-dest, mõned nendest ongi loodud AOGCM-de lihtsustamise tulemusena. Keskklassi mudelid arvestavad ka mandrite ja ookeanide geograafilist kuju, kuigi väiksema eraldusvõimega kui keerukad mudelid. Tüüpiliseks võrguelemendi suuruseks on 5... 10 laius- või pikkuskraadi. Eesmärgiks on saavutada mudeli suurem töökiirus, mis on oluline pikaajaliste protsesside uurimisel (sajad või tuhanded aastad), samuti aga ka juhul, kui protsessi uurimiseks on vajalik selle paljukordne „jooksutamine“.

Keskklassi mudelite tabeli on koostanud M. Claussen (Table of EMICs 2005). Kaheksa EMIC põhiaandmed on toodud ka tabelis (Randall jt 2007, lk 646-647). Toome lühiaandmed paari mudeli kohta nendest tabelitest.

**C-Goldstein** (Edwards & Marsch, 2005). Mudel sisaldab 2D (2-dimensionaalse) energia ja niiskuse balansi atmosfäärimudeli võrgusammuga 5° x 10° ning 3D sama võrgusammuga FG ookeani mudeli. FG (*frictional geostrophic*) tähendab vee liikumise mudelit, mis arvestab rõhu gradienti,

Coriolise jõudu ja hõõrdumist. Mudel sisaldab ka merejää mooduli. See on suhteliselt kiire mudel: ühe päeva jooksul on personaalarvutil võimalik modelleerida kuni 20 000 aastast ajavahemikku.

**GENIE** (*Grid Enabled Integrated Earth System Model*)

Selle projekti eesmärgiks on luua Maa kliimasüsteemi mudeli suhteliselt lihtsad ja kiiretoimelised komponendid ning luua ka võretehnoloogial baseeruv arvutivõrk (*Grid-based Computing Framework*), mis suudab paindlikult ühendada valitud komponendid ühtseks Maa-süsteemi mudeliks, aga samuti võimaldada modelleerijate virtuaalset juurdepääsu sellele süsteemile. Mudel sobib kliima pikaajaliste muutuste, sealhulgas paleokliima ja mineviku jääaegade uurimiseks, aga samuti ka Maa-süsteemi muutuste uurimiseks tulevikus. Süsteemi lähema kirjeldusega võib tutvuda aadressil [www.genie.ac.uk](http://www.genie.ac.uk).

### 5.8.3 Keerukad mudelid

Siia klassi kuuluvad kõrge ruumilise eraldusvõimega atmosfääri ja ookeani ühendatud mudelid (AOGCM, p 5.7.4). IPCC aruandes (Randall jt 2007, lk 597 – 599) on toodud 23 sellesse klassi kuuluva mudeli põhiantmed. Nendest mudelitest 14 on spektraalsed. Kõige kõrgema ruumilise eraldusvõimega on Jaapanis loodud (spektraalne) mudel MIROC3.2(hires), eraldusvõimega ligikaudu  $1,1^\circ \times 1,1^\circ$ . Atmosfäär on kõrguse suunas jagatud 56 kihiks, maksimaalse kõrgusega 40 km. Ookeani jaoks on eraldusvõime veelgi suurem,  $0,2^\circ \times 0,3^\circ$  ja mudelis on 47 sügavuskihti. Keerukate mudelite puuduseks on suhteliselt aeglane modelleerimine (kuigi kasutatakse ülikiireid superarvuteid) ja sellest tulenevalt ka modelleerimise kõrge hind.

## 5.9 Ilmastiku mudelid. Ilmaennustusprojekt HIRLAM

Ilmastiku ja kliima mudelite vahel ei ole põhimõttelist erinevust, sest füüsikalised protsessid on samad. Ilmaennustusteks kasutatavad mudelid erinevad kliimamudelitest eelkõige vaadeldava ajavahemiku pikkuse poolest. Kui kliimamuutustest saab rääkida alles vähemalt kolmekümne aasta keskmiste näitajate põhjal, siis ilmaennustuse maksimaalne aeg on umbes kaks nädalat. Teisest küljest ei ole globaalsete kliimamudelite ruumiline eraldusvõime ilma ennustamiseks piisav. Eraldusvõime suurendamiseks kasutatakse regionaalmodelleid (p 5.7.2). Kehtib rusikareegel: mida väiksem ala, seda lühem ennustus (Männik 2005, lk 197).

HIRLAM on rahvusvaheline teadusrakendusprojekt (*High Resolution Limited Area Model*).

Varasem baasmudel tugines lihtsustatud hüdrostaatilistel dünaamikavõrranditel. Tartu Ülikooli keskkonnanäitajate instituut (TÜ FKKE) on koostöös Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituudiga ja Soome Meteoroloogiainstituudiga välja töötanud selle mudeli mittehüdrostaatiline laienduse, mille eesmärgiks on täpsemad prognoosid kõrgematel lahtustel. Vastav ilmaennustusmudel töötab kahes piirkonnas. Laiem piirkond (ETA) haarab ka Läti, Leedu ja osa Soomest, Rootsist ja Venemaast. Sellel alal rakendatakse hüdrostaatilist mudelit võrgulahutusel 11 km. Kitsam ala (ETB) haarab ainult väikese osa naaberriikidest väljaspool Eesti alasid ja selles osas on kasutusel HIRLAMi mittehüdrostaatiline laiendus lahutusega 3,3 km. Arvutatakse kuni 36h ennustusi 2 korda päevas. Oluliseks töösuunaks on ka HIRLAMi rakendamine koos lokaalsete meremudelitega (Elken, Männik, Rõõm WWW).

## 5.10 Mereprognooside mudelsüsteem HIROMB

HIROMB (*High-Resolution Operational Model of the Baltic Sea*) on Läänemere operatiivne prognoosimudelite süsteem, mida konsortsiumilepingu alusel käitavad ja arendavad Rootsi, Saksa, Soome ja Taani instituudid ja riigiasutused. 2005. a võeti ka TTÜ meresüsteemide instituut konsortsiumi liikmeks. 2007. a lisandusid veel Läti ja Venemaa asutused (Elken jt. WWW, 2008). HIROMB mudelsüsteem tugineb järgmistele komponentidele:

- 3D barokliinne hüdrodünaamika mudel. Barokliinsus on gaasi või vedeliku tiheduse sõltuvus kahest muutujast. Merevee tihedus on temperatuuri ja soolsuse funktsioon.



- turbulentsi mudel;
- jää dünaamika ja termodünaamika mudel;
- lainetuse mudel.

HIROMB on kasutusel kolme versioonina: BSH, SMHI ja DMI. HIROMB-SMHI versioon 3.1 on igapäevases operatiivses kasutuses alates 15. novembrist 2005.a.

Arvutusvõrkude võrgusammud on 1 miil (1,852 km, versioon BS01), 3 miili (versioon NB03) ja 12 miili (versioon NS12). Versioon BS01 katab Läänemere.

Vertikaalsete kihtide astmestikus on kokku 16 kihti kuni sügavuseni 230 m. Kolm ülemist kihti on paksusega 4 m, kõige alumiste kihtide paksused on 30 m ja 40 m. 1-miilisel võrgul on juba eristatavad ka Eesti rannikumere lahed. Mudeleid käivitatakse 22-miilise lahutusega ilmaprognoosidega mudelist HIRLAM. Mudeli prognoositavad ja mõõtmisandmetega võrreldavad punktid on Pärnu, Sõru ja Tallinn. Prognoosi vigade analüüs näitab, et meretaseme prognoosi viga on suurima ohtliku meretõusuga piirkonnas – Pärnus – 98% juhtudest väiksem kui  $\pm 20$  cm. Rannajoone täpseks kirjeldamiseks, samuti mitmete nähtuste (keeriste) lahendamiseks siiski 1-miilise võrgusammust veel ei piisa. On ette valmistatud ja katseliselt tööle rakendatud Eesti merealade kõrgema lahutusvõimega (0,5 miili) prognoosimudel HIROMB-EST. Selle rakendamisele on oodata prognoositäpsuse märkimisväärset kasvu (Elken jt. WWW, 2008).

## Viited kirjandusele

**Dean, R. G., Dalrymple, R. A.** (2002) Coastal Processes with Engineering Applications. Cambridge University Press.

**Edwards, N.R., R. J. Marsh** (2005) Uncertainties due to transport-parameter sensitivity in an efficient 3-D ocean-climate model. *Climate Dynamics*, vol.24, Nr 4, p 415-433.

**Elken, J., A. Männik, R. Rõõm** (WWW) Atmosfääri ja mere dünaamika. [www.fysika.ee/teadus/teadusmote](http://www.fysika.ee/teadus/teadusmote). (27.01.2010).

**Elken, J., T. Kõuts, J. Laanemets, U. Lips, I. Lips, U. Raudsepp, V. Alari, J. Karjane, V. Kikas, P. Lagemaa, T. Liblik, M. Nõmm, O. Pärn, K. Süsmalainen, R. Uiboupin, K. Vahter, G. Väli** (WWW, 2008) Mereprognooside süsteemi HIROMB arendamine. SA KIK Veekaitseprogrammi projekt nr. 36, lõpparuanne. [http://www.msi.ttu.ee/~elken/HIROMB\\_2008\\_Lopparuanne\\_sisuline.pdf](http://www.msi.ttu.ee/~elken/HIROMB_2008_Lopparuanne_sisuline.pdf) (27.01.2010).

**Java Kliimamudel JCM** (WWW) Tartu Ülikool Füüsika Instituut, Atmosfääri- ja Keskkonnafüüsika laborid

[http://meteo.physic.ut.ee/kkfi/index\\_files/huvilisele/kliima/kliima\\_mudel.html](http://meteo.physic.ut.ee/kkfi/index_files/huvilisele/kliima/kliima_mudel.html). (27.01.2010).

**Jõeveer, M.** (2005) Päikesesüsteemi teiste planeetide atmosfäärid. Kogumikus: *Universum valguses ja viimas*, lk. 82-96. Tallinn, OÜ Reves Grupp.

**Jürissaar, M.** (1998) Meteoroloogia. Tartu Lennukolledž.

**Kalm, V.** (2009) Kliimamuutused eri ajaskaalades. *Horisont* nr 2, 2009, lk 38 – 41.

**McGuffie, K., Henderson-Sellers, A.** (1997) *A Climate Modelling Primer*. 2nd Edition. John Wiley & Sons, Chichester.

**Merilain M.** (2005) Ilmaennustamine – teadus või looming. Kogumikus: *Universum valguses ja viimas*, lk. 187-193. Tallinn, OÜ Reves Grupp.

**Männik, A.** (2005) Ilma ennustavad arvutid. Kogumikus: *Universum valguses ja viimas*, lk. 194-199. Tallinn, OÜ Reves Grupp.

**Paillard, D.** (2006) What Drives the Ice Age Cycle? *Science*, vol 313, 28 July, p 455 – 456.

**Randall, D.A., R.A. Wood, S. Bony, R. Colman, T. Fichefet, J. Fife, V. Kattsov, A. Pitman, J. Shukla, J. Srinivasan, R.J. Stouffer, A. Sumi, K.E. Taylor** (2007). *Climate Models and their Evaluation*. In: *Climate change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* /eds S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller,

Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA, 996 pp.

**Solomon, S.,** D. Qin, M. Manning, R. B. Alley, T. Berntsen, N.L. Bindoff, Z. Chen, A. Chidthaisong, J.M. Gregory, G.C.Hegeri, M.Heimann, B. Hewitson, B.J. Hoskins, F. Joos, J. Jouzel, V. Kattsov, U. Lohmann, T. Matsuno, M. Molina, N. Nicholls, J. Overpeck, G. Raga, V. Ramaswamy, J. Ren, M. Rusticucci, R. Somerville, T.F. Stocker, P. Whetton, R.A. Wood, D. Wratt (2007). In: Climate change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change /eds S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA, 996 pp.

**Table of EMICs** (2005) /ed. M. Claussen, Potsdam Institute for Climate Impact Research [WWW] [http://www.pik-potsdam.de/emics/toe\\_05-06-07.pdf](http://www.pik-potsdam.de/emics/toe_05-06-07.pdf)

**Tomingas, O.** (2005) Regionaalse kliima modelleerimine – kas ainult rikaste riikide lõbu? Eesti Loodus, Nr 2, lk18 – 21.

**Vaikmäe, R.** (2010) Globaalne vandenõuteooria või looduse ja inimese koostöö. Horisont, nr 1, lk 8 – 13.

# TEADUSTÖÖ KORRALDUS JA MEETODID

## IRT8860, loengukonspekt 5-10 Heldur Haak

### 5.11 Ilmastiku ja kliima mudelite võrdlemine ja kontrollimine

Ilmaennustusi on lihtsam kontrollida, sest neid antakse lühema aja peale. Käeoleval ajal on mudelite abil saadavad ilmakaardid sünoptiku jaoks ainult abimaterjaliks. Seepärast ülaltoodud HIRLAMi mudeli väljundit ei tohi interpreteerida kui ametlikku ilmaennustust. See tähendab, et vähemalt tänapäeval on kogemustega sünoptiku seisukohad usaldatavamad kui mudeli abil saadavad (Merilain 2005). Vaatamata raskustele areneb numbriline ilmaennustus kiiresti edasi. Ka on numbriliste mudelite kasutusala ilmaennustusest palju laiem. Mudelid aitavad mõista keeruliste dünaamikaprotsesside (äikesepilved, orkaanid) olemust ja tekkepõhjuseid (Männik, 2005). Tekib küsimus: kui ilmaennustused pikemaks ajaks kui kaks nädalat muutuvad ebakindlaks, kuidas siis üldse on võimalik kliimat ennustada? Vastuseks on kasutatud järgmist võrdlust. Me ei suuda ennustada iga üksiku inimese saatust ega tema eluiga, kuid me võime arvutada mingi inimeste hulga keskmise eluea. Ka kliimat iseloomustavad pikaajalised keskmised näitajad.

Kliimamudelite kontrollimiseks on kaks põhilist meetodit. Üks võimalus on sisestada mudelile algandmetena mingi olukord minevikust ja jälgida, kas mudeli käitumine vastab looduses tegelikult toimunule. Teine meetod on sisestada mingile mudelite grupile sama algseis ja võrrelda nende käitumist omavahel.

#### **Projekt CMIP (*Coupled Model Intercomparison Project*)**

Ülemaailmse kliima uurimise programmi raames tegutsev WGCM töögrupp (*Working Group of Coupled Modeling*) on käivitanud CMIP projekti AOGCM väljundite standardiseeritud eksperimentaalseks uurimiseks (<http://cmip-pcmdi.llnl.gov/>). CMIP üheks koostisosaks on ka AMIP projekt.

**Projekt AMIP** Üheks varasemaks erinevate kliimamudelite võrdlemise projektiks on atmosfäärimudelite võrdlemise projekt AMIP (*Atmospheric Model Intercomparison Project*), mida alustati 1989.a ja jätkati teise etapina 1996.a. Ette anti kindlad algtingimused (ookeani pinnatemperatuur, merejää hulk, päikesekonstant, CO<sub>2</sub> sisaldus jt). Modelleerimise ajaks oli esimese etapi puhul 10 aastat alates 01.01.1979 ja teisel etapil 17 aastat alates 01.12.1978. Võrreldi umbes 30 mudelit. Mitmete parameetrite osas (õhurõhk, maapinna temperatuur) oli erinevus tegelike vaatlustega saadud tulemuste suhtes küllalt väike, teiste parameetrite osas (pilvitus, ookeani pinna soojuskiirgus) aga küllaltki suur.

Enamik mudelitest annavad tavaliselt lähedasi tulemusi, on üksikud mudelid, mis annavad teistest oluliselt erinevaid tulemusi. Kui need üksikud tulemused kõrvale jätta, siis ülejäänud tulemuste keskmised vastavad tegelikkusele paremini kui mistahes üksiku mudeli abil saadavad tulemused (McGuffie 1997, lk 180 – 191).

**PCMDI programmi** (*The Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison*) sisuks oli kliimamudelite väljundite kogumine mineviku, oleviku ja tuleviku olukordade modelleerimisel aastatel 2005 ja 2006 ning andmete arhiveerimine. Selle programmi täitmine moodustas CMIP kolmanda faasi **CMIP3**. CMIP3 raames kogutud andmeid kasutasid kliimateadlased IPCC aruande AR4 (*Fourth Assessment Report*) koostamisel, millele oleme ka oma konspektis korduvalt viidanud. Kliimat modelleerivate töögruppide nõusolekul on WGCM kuulutanud CMIP3 arhiivis olevad andmed vabalt kasutatavaks mittekommertsiaalsetel eesmärkidel. Juuliks 2009 oli andmeid alla laadinud rohkem kui 2500 kasutajat.

IPCC järgmine aruanne (AR5) peaks valmis saama aastal 2013. CMIP viienda faasi **CMIP5** ülesandeks on koordineerida selle aruande jaoks vajalike mudeleksperimentide teostamist.

### 5.12 EMIC mudelite võrdlemine Põhja- Atlandi ookeanikonveieri uurimisel

On teada, et umbes 8200 aastat tagasi toimus Põhja-Euroopas märgatav kliima jahenemine, mille kestvus oli mõnisada aastat. Seda näitavad nii Gröönimaa jääkilbi isotoopkoostise uurimine kui ka õietolmu koostise uurimine Rõuge Tõugjärve setetes ( Veski, 2005).

Nähtust seletatakse Põhja- Atlandi ookeanikonveieri ajutise peatumisega. See konveier on osa ülemaailmsest ookeanikonveierist ja avaldub Põhja-Atlandi ookeani pinnakihtides Golfi hoovusena, mis kannab sooja soolast vett põhja poole. Soojendades õhku vesi jahtub, muutub raskemaks ja vajub umbes Labradori mere juures sügavamale. Ookeani sügavuses liigub see veemass lõuna poole tagasi.

Umbes 8400 aastat tagasi oli jääaeg lõppenud ja jääliustikud sulasid. Põhja- Kanadas oli tekkinud jääliustiku sulaveest suur Agassise jääpaisjärv, mis oli suurem kui Kaspia meri. Liustiku sulades murdsid paisjärve veed endale tee ookeani, kusjuures voolu kiirus ulatus kuni miljoni kuupmeetri sekundis. Vooluhulk miljon kuupmeetrit sekundis on võetud ookeanihoovuste puhul ühikuks nimega Sverdrup ( Sv ).

Atlandi termohaliinne tsirkulatsioon põhineb vee erikaalu muutumisel sõltuvalt temperatuurist ja soolsusest. Seejuures tekib positiivne tagasiside: kui hoovus kannab rohkem soolast vett põhja suunas, siis jahtudes vajub see põhja ja sügaval põhja lähedal lõuna suunas tagasi, tugevdades veelgi tsirkulatsiooni. Kui aga suur hulk magevett voolab ookeani ja jääb oma väiksema erikaalu tõttu pinnale, siis surub see magevesi sooja soolase pinnavee tagasi lõuna suunas ja konveier võib peatuda.

Atlandi konveierit on uuritud modelleerimise abil ( Rahmstorf, S. jt, 2005). Materiaalsetel kaalutlustel tulid arvesse ainult EMIC mudelid. Uurimuses kasutati võrdlevalt 11 erinevat mudelit. Mudelite ülesandeks oli arvutada hoovuse vooluhulk sõltuvalt lisanduvast magevee hulgast.

Kõik mudelid, vaatamata nende suurtele erinevustele, andsid tulemuseks hüstereesiga sõltuvuse: magevee vooluhulga kasvamisel üle teatava kriitilise väärtuse konveier peatub. Selleks kriitiliseks väärtuseks andsid erinevad mudelid 0,1 Sv kuni 0,5 Sv. Konveieri töö taastub alles pärast seda, kui magevee sissevool on oluliselt vähenenud.

Tänapäeva probleemidega seob tehtud modelleerimiskatset asjaolu, et Gröönimaa jääkilbi sulamine 1000 aasta jooksul tähendaks magevee teket kuni 0,1 Sv. Täpsem modelleerimine peaks näitama, kas selline vooluhulk võib häirida ookeanikonveierit.

## 5.13 Modelleerimistulemused ja kliima soojenemine

**5.13.1 Soojenemise senine käik.** Mis puutub juba toimunud temperatuurimuutusi, siis tänapäeval ei kahtle vist enam keegi, et kliima on lõppenud sajandi jooksul märgatavalt soojenenud. Nagu oli juba viidatud p 5.4.1, on viimase 100 aasta jooksul keskmine temperatuur tõusnud 0,74°C. Siiski on skeptikuid, kes väidavad, et IPCC andmed on liialdatud. Üheks skeptikute argumendiks kuni 2005 aastani oli vastuolu temperatuuri maapealsete mõõtmiste ja satelliitmõõtmiste vahel (Kärner, 2005). Satelliitmõõtmised näitasid maalähedases troposfääris mitmekordselt väiksemat temperatuuri tõusu kui maapealsed mõõtmised. See probleem oli tõesti sajandivahetusel tõsiseks klimatoloogia pähkliks.

2004. a ilmus Q. Fu, C.M. Johanson, S. G. Warreni ja D. J. Seideli artikkel, milles anti probleemi lahendus ( Fu et al., 2004).

Umbes 85% mikrolainekiirgusest, mida võtab vastu satelliidi temperatuuriandur, tuleb maapinna lähedalt, troposfäärist, mille temperatuuri tahetaksegi mõõta. Ülejäänud kiirgus tuleb aga kõrgemalt, stratosfäärist. Kliimamudelite järgi on troposfääri temperatuuri muutused lähedased maapinna temperatuuri muutustele, täpsemalt sellest veidi suuremad. Stratosfääri temperatuur aga on viimastel aastakümnetel oluliselt langenud. Põhjuseks on osoonikihi nõrgenemine, aga just see kiht neelab päikeseenergiat, soojendades stratosfääri. Temperatuuri languse kiirus stratosfääris ületab umbes viiekordselt temperatuuri tõusukiiruse troposfääris. Seega suurem osa temperatuuri tõusu tõttu troposfääris tekkivast lisakiirgusest kulub stratosfääri kiirguse puudujäägi kompenseerimiseks

ja summaarselt saadakse väga väike näiva temperatuuri tõus. Kui ülaltoodu alusel satelliitide mõõteandmeid korrigeerida, siis ühtivad tulemused küllalt hästi maapealsete mõõtmistega. Seega on maapealsed mõõtmised õiged ja maapinna keskmine temperatuur on viimastel aastakümnetel märgatavalt tõusnud.

Mõnikord öeldakse, et praegune globaalne soojenemine ei saa lõpmatult kesta, sest Maal ei jätku selleks energiat. Lõpmatult küll mitte, aga kuna soojenemine toimub kasvuhuoneefekti tõttu, siis selleks polegi täiendavat energiat vaja. Lihtsalt olemasolevat energiat lastakse vähem hajuda maailmaruumi, umbes nii nagu majade soojustamisel.

### **5.13.2 Kas kliima soojenemine on inimese põhjustatud?**

Skeptikute väitel näitavat jaatav vastus inimese suurusehullustust.

Vastus on väga suure tõenäosusega jaa, kuid suurusehullustusega pole siin mingit pistmist. Tuleb lihtsalt jälgida fakte, sealhulgas süsiniku bilanssi.

Kuni aastani 1860 põletati Maal aastas fossiilseid kütuseid koguses, millest sattus CO<sub>2</sub> koostises atmosfääri vähem kui 0,1 gigatonni (Gt) süsinikku. Umbes aastaks 1920 kasvas see hulk 1 Gt-ni. 1980-ndatel aastatel põletati aastas fossiilseid kütuseid koguses, milles sisaldus CO<sub>2</sub> koostises keskmiselt 5,4 Gt süsinikku, 1990-ndatel 6,4 Gt ja aastatel 2000...2005 7,2 Gt. (Horel 1997, lk 84-92, Denman 2007, lk 511 – 516).

CO<sub>2</sub> sisaldust atmosfääris mõõdetakse miljondike osadega (ppm). Praegu on see 379 ppm, kuid aastal 1800 oli veel 285 ppm. Miljondikud osad võib siduda ka gigatonnidega. Nimelt on vaja umbes 2,1 Gt süsinikku, et selle abil tõsta kogu maailma atmosfääri CO<sub>2</sub> sisaldust 1 ppm võrra. Mingi osa igal aastal lisanduvast CO<sub>2</sub> kogusest neelab ka maapealne taimestik ja ookean, kuid siiski lisandub igal aastal atmosfääri 4,1 Gt süsinikku, mis vastab atmosfääri CO<sub>2</sub> sisalduse kasvule umbes 2 ppm võrra.

Skeptikud püüavad väita, et kuigi CO<sub>2</sub> sisaldus atmosfääris kasvab, on tegemist loodusliku kasvuga. Väga tõenäoliselt ei ole. Esiteks, kuigi ka kauges minevikus on toimunud suuri CO<sub>2</sub> sisalduse muutusi, pole need kunagi toimunud nii lühikese ajaga. Teiseks näitab praegu õhus oleva CO<sub>2</sub> isotoopanalüüs, et teatud osa sellest on tekkinud fossiilkütuste põletamisest. Koos CO<sub>2</sub> sisalduse kasvuga on mõõdetud ka hapniku sisalduse vähenemist atmosfääris. See hapnik on kulunud süsiniku põletamiseks.

Loomulikult ei piirdu kliimamudelid ainult CO<sub>2</sub> mõju analüüsiga. Analüüsitakse ka teiste kasvuhuonegaaside mõju (metaan, halogeene sisaldavad gaasid, lämmastikoksüüd, troposfääriline osoon). Arvesse võetakse ka tööstuse poolt õhku paisatavate aerosoolide mõju, mis soodustavad pilvede teket ja pilvede albeedo kaudu mingil määral vähendavad globaalse soojenemist.

**5.13.3 Tulevikustsenaariumid.** Kuigi kliimamuutuste ennustamine on keeruline, on see teatud tõenäosusega siiski võimalik. Täiesti võimatu on aga ennustada inimkonna käitumist tulevikus. Ainus võimalus on välja pakkuda rida tüüpstsenaariume ja vaadelda kliimamuutusi seotult võimalike stsenaariumidega.

**Stsenaarium A1** vastab kiire majandusliku kasvuga ühiskonnale, kus kiiresti võetakse kasutusele uusi ja efektiivseid tehnoloogiaid. Maailma elanikkond kasvab sajandi keskpaigani ja siis hakkab langema. Vähenevad regionaalsed erinevused elanike sissetulekutes. A1 stsenaarium jaguneb kolmeks variandiks: intensiivselt fossiilkütuseid kasutav variant A1FI, mittefossiilse energia variant A1T või eelmiste vahepealne balansseeritud (mitmesuguse) energia variant A1B.

**Variandi A1FI** jaoks ennustatakse järgmiseks sajandivahetuseks umbes 4°C keskmise temperatuuri tõusu võrreldes lõppenud sajandi vahetusega. Ookeani taseme tõus jääb tõenäoliselt vahemikku 29 kuni 59 cm.

**Stsenaariumi B1** järgi on maailma elanikkonna juurdekasv analoogiline stsenaariumile A1. Eeldatakse ökonoomset majandust, mis suudab kiiresti kasutusele võtta puhtaid ja ressursisäästlikke tehnoloogiaid. Sellise stsenaariumi puhul ennustatakse tõenäolist temperatuuri tõusu 1,8°C ja ookeani veetaseme tõusu vahemikus 18 kuni 38 cm (IPCC, 2007, lk 13 – 18).

Nagu näeme, on erinevused ennustatavas temperatuuri tõusus rohkem kui kahekordsed ja

stsenaariumi valik on inimkonna otsustada. Kahjuks kliimakonverentsil Kopenhaagenis 2009 ei õnnestunud saavutada valitsuste vahel piisavat üksmeelt.

## 6 SPEKTRAALSED MEETODID

### 6.1 Sissejuhatus

Eelnevalt (p 5.7.1) oli juba juttu spektraalsetest kliimamudelitest. Muutujate spektraalne esitus aga võib osutuda otstarbekaks ka paljudel muudel juhtudel, sealhulgas näiteks tehnikas. Raadiotehnikas kasutatavate signaalide spektraalteisendust on käsitletud töös „Signaalide analoogtöötlus“ (Heinrichsen, 1996).

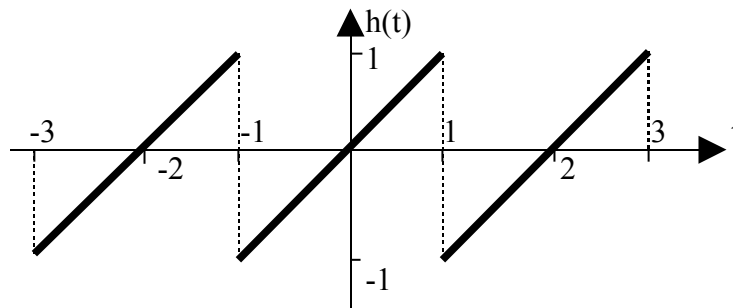
Spektraalsed meetodid osutuvad kasulikeks kaugel mineviku kliima (paleokliima) uurimisel. Seda sellepärast, et pikaajaliselt kliimat mõjutavad astronoomilised mõjutused on täpselt määratava perioodilise iseloomuga (Milankovič'i tsüklid, vt p 5.4.3). Paleokliima uurimine aitab meil mõista jääaegade tekkimise ja lõppemise seaduspärasusi, sealhulgas teha otsustusi järgmise jääaja võimaliku alguse suhtes. Ka aitab mineviku kliima tundmine meil kontrollida kliimamudeleid pikema ajavahemiku modelleerimisel ja praegusest oluliselt erinevate kliimatingimuste puhul. Jääaegade tekkimise ja lõppemise astronoomilisi põhjusi on spektraalsete meetodite abil uurinud R. A. Muller ja G. J. Mac Donald (Muller, MacDonald 2002).

Vaatleme algul üldiselt olulisemaid muutujate spektraalteisenduse omadusi.

### 6.2 Signaalide ja andmeridade spektraalteisendus

#### 6.2.1 Näide. Perioodilise signaali spekter

Olgu meil uuritav signaal määratud valemiga  $h(t) = t$  vahemikus  $-1 < t < 1$ , väljaspool seda vahemikku kordub sama signaal perioodiliselt (joon. 6.1).



Joon. 6.1 Perioodiline funktsioon  $h(t) = t$ .

Perioodilisel signaalil on joonspekter. Selline signaal üldjuhul on esitatav Fourier' rea abil tema alaliskomponendi ja harmooniliste summana:

$$h(t) = a_0/2 + \sum a_k \cos kt + b_k \sin kt \quad (6.1)$$

Summeerimine toimub üle  $k$  väärtuste 1 kuni  $\infty$ , summeeritakse mõlemad liidetavad (sin ja cos). Meie näite puhul alaliskomponenti ei ole ( $a_0 = 0$ ). Kuna tegemist on paaritu funktsiooniga, siis on ka kõik koosinusliikmete kordajad  $a_k$  nullid. (Kivinukk, Pallas, lk 11-12) järgi saame  $h(t)$  esitada lõpmatu rea summana (eeldusel, et see rida koondub):

$$h(t) = (2/\pi) [\sin \pi t - (\sin 2\pi t / 2) + (\sin 3\pi t / 3) - \dots + (-1)^{k+1} (\sin k\pi t / k) + \dots] \quad (6.2)$$

Kuna signaali põhiharmoonilise perioodiks on 2 ajaühikut (sekundit), siis on põhiharmoonilise sagedus 0,5 Hz. Kõrgemate harmooniliste sagedused on põhiharmoonilise sageduse täisarv kordsed, seega 1 Hz, 1,5 Hz, 2 Hz jne. Nende harmooniliste amplituudid on pöördvõrdelised harmoonilise järjekorranumbriaga. Seega funktsiooni ligikaudseks esitamiseks piisab lõpliku arvu komponentide arvestamisest, jättes ära rea lõpus olevad suhteliselt väikese amplituudiga komponendid.

### 6.2.2 Lõpmatu kestusega signaali spekter

Vaatame veel kord joon. 6.1 näidatud signaali ja oletame, et perioodilise signaali kestus on nüüd mitte 2, vaid 4 sekundit. Nüüd on põhiharmoonilise sagedus 0,25 Hz ja järgmiste spektrijoonte sagedused on selle kordsed, seega 0,5 Hz, 0,75 Hz, 1 Hz, 1,25 Hz jne. Spektrijoonte tihedus on kaks korda suurem kui eelmisel juhul. Naaberkomponentide vaheline sageduste intervall on  $\Delta f = 1 / T = 0,25$  Hz.

Kui signaali pikkus (periood) jätkuvalt kasvab kuni lõpmatuseni, siis intervall  $\Delta f$  läheneb nullile ja joonspekter muutub pidevaks spektriks. Seejuures aga lähenevad nullile ka spektri komponentide amplituudid ja nende iseloomustamiseks tuleb kasutada suhte piirväärtust amplituudi ja sagedusintervalli vahel, mida nim spektraaltiheduseks (Heinrichsen 1996, lk 32).

Üleminekul pidevale spektrile tuleb ka summeerimine (6.1) järgi asendada integreerimisega. Valemite lihtsustamiseks asendatakse sageli ka trigonomeetriline esitus (6.1) kompleksse eksponentfunktsiooniga. Nii saadakse Fourier` integraal.

Ajaliselt lõpmatu pideva signaali  $h(t)$  me võime Fourier` integraalteisendusega muuta sageduslikuks muutujaks  $H(f)$  ja vastupidi, kusjuures mõlemad esitused sisaldavad sama informatsiooni, kuigi erineval kujul. Signaali sageduslik kuju leitakse otsese Fourier` teisenduse abil:

$$H_T(f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) e^{2\pi i f t} dt \quad (6.3)$$

Siin indeks T sagedusliku muutuja  $H_T(f)$  juures tähendab täpset teoreetilist väärtust, mis eeldab, et meil on teada  $h(t)$  väärtus kogu integreerimisvahemikus. Tegelikult sageli reaalsete muutujate puhul me ei tea nende väärtusi lõpmatuseni ulatuvas minevikus ega kauges tulevikus, sel juhul saab arvutada ainult  $H_T(f)$  ligikaudse hinnangu.

Sagedusliku esituse põhjal on võimalik arvutada ajaline signaal Fourier` pöördteisenduse abil, mis on oma kujult eelmisele üsna sarnane:

$$h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} H_T(f) e^{-2\pi i f t} df \quad (6.4)$$

Juhul, kui meid ei huvita (6.3) järgi arvutatava spektraaltiheduse faasispekter, vaid ainult teatavate sageduspiirkondade signaalide võimsuste suhteline väärtus, võime kasutusele võtta spektraalvõimsuse mõiste:

$$P_T(f) = |H_T(f)|^2 \quad (6.5)$$

$P_T(f)$  on reaalne (mitte kompleksne) muutuja.

### 6.2.3 Aegreana esitatava signaali spekter

Sageli on vaatlus- või mõõtmistulemused esitatud aegridadena. Olgu sellises reas esitatud N tulemust. Sellist rida võib vaadelda vektorina N-mõõtmelises ruumis. Vektoritega töötamiseks sobib hästi arvutuspakett MATLAB. Rida näitlikke MATLAB-i programme töötamiseks kliimamudelitega on toodud monograafias (Muller, MacDonald 2002).

Lõpliku mõõtmiste arvuga aegread vastavad raadiotehnikas diskreetsignaali mõistele (Heinrichsen 1996, lk 6 - 8). Kui aegrea liikmete arv on  $N$ , siis omab see rida ka  $N$  spektrikomponenti, kusjuures Fourier` teisenduses on integreerimine asendunud summade arvutamiseks. Seejuures need on kompleksed spektrikomponendid, s.t esitatakse kas amplituudi ja faasi või reaali- ja imaginaarosa kaudu. Kui meid huvitab ainult võimsuse spektraaltihedus, siis meid huvitavad ainult amplituudid, kuid mitte faasid. Seega me saame  $N$  liikmega aegrea baasil  $N/2$  spektraalvõimsuse väärtust (eeldades lihtsuse mõttes, et  $N$  on paarisarv).

Oletame, et meile on antud näiteks temperatuuri väärtuste rida, kusjuures mõõtmised on tehtud võrdsete ajavahemike  $\Delta t$  järel. Nyquisti sageduseks nimetatakse sagedust  $f_{Nq} = 1/2 \Delta t$ . See on kõrgeim sagedus, mida antud aegreaga saab esitada. Võrdlusena võib vaadelda digitaalset helisalvestust. Kui me mõõdame helisignaali iga 0,1 ms järel, siis on heli taastamisel võimalik kõrgeim taastatav sagedus  $f_{max} = 1/2 \cdot 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ s} = 5 \text{ kHz}$ . See on piisav sagedusriba kõnesignaali salvestamiseks, kuid ei taga muusika kvaliteetset taastamist. Seepärast kõrgekvaliteedilisel helisalvestusel (CD-dele) tuleb vähendada ajalise diskreetsuse sammu kuni  $\Delta t = (1/44) \text{ ms}$ , mis vastab maksimaalsele taastatavale sagedusele 22 kHz.

Lõplik aegrida toob sisse ka teatud sageduse määramise ebatäpsuse. Kui aegreaga esitatava signaali kogupikkus on  $T$ , siis on sageduse ebatäpsus  $\Delta f \approx 1/T$  (Muller, MacDonald 2002, lk 53 - 55). Sellest tuleneb esiteks, et suhteliselt lühike aegrida ei suuda esitada väga madalaid sagedusi (väiksemaid kui  $1/T$ ). Teiseks võib suurust  $\Delta f$  tõlgendada kui kitsa spektrijoone asukoha määramise ebatäpsust sagedusteljel (teravad spektrijooned „määritakse“ laiemaks). Täpsuse suurendamiseks on vaja suurendada vaadeldavat ajavahemikku  $T$ .

#### 6.2.4 Kiire Fourier` teisendus

Diskreetsignaali Fourier` teisendusel arvutustöö maht kasvab võrdeliselt suurusega  $N^2$ . Väga suure  $N$  puhul see muutub probleemiks. On välja töötatud ratsionaalsem arvutusmeetod, mille puhul tehete maht kasvab võrdeliselt suurusega  $N \log_2 N$ , mis on oluliselt väiksem. See on kiire Fourier` teisendus ehk FFT (*Fast Fourier Transform*).

FFT puhul on vajalik, et andmed oleksid esitatud võrdsete ajavahemike järel. FFT arvutab  $N$  andmepunkti jaoks kompleksamplituudid  $N/2$  sagedusel, millest madalaim on  $1/T$  ja kõik teised on selle sageduse täisarv kordsed.

Kui  $N$  on suhteliselt väike ja spektrijooned on kitsad, siis ei pruugi spektrijoon jääda ühegi arvutatava sageduse lähedusse, mis võib spektris tekitada olulisi moonutusi, näiteks võivad lähedalolevad spektrijooned kokku sulada. Selle vältimiseks kasutatakse meetodit, mida nimetatakse nullidega täitmiseks. Olles eelnevalt andmetest lahutanud keskväertuse (alaliskomponendi), lisatakse andmerea lõppu rida nulle, soovitatav kuni lähima kahe astmeni. Näiteks lisades  $N$  andmepunktile veel  $2N$  nulli, saame kolm korda tihedama sageduste skaala.

### 6.3 Mineviku kliima ja kaudsed mõõtmised

Otseste mõõtmistena on meil enam-vähem usaldatavaid mõõtmisandmeid kasutada ainult viimase saja-kahesaja aasta jooksul, mis on kliima seisukohalt üsna lühike aeg.

Siiski on teatud määral võimalik teostada mõõtmisi ka kaugema mineviku kliimaga seotud näitajate suhtes. Näiteks Antarktika ja Gröönimaa jääliustike puurimisel saadavad puursüdamikud sisaldavad õhumulle, mille järgi saab määrata vastava aja õhu koostist, sealhulgas ka hapniku isotoopkoostist ja kasvuhoonegaaside sisaldust.

Teiseks kaudseks meetodiks on ookeani põhjasetete uurimine. Suur osa põhjasetest on moodustunud foraminifeeride ehk kambriliste peamiselt lubiainest koosnevatest kodadest. Pinnal elanud liikide arvukuse järgi põhjasetetes saab otsustada vee pinnakihi temperatuuri üle. Olulist infot annab põhjas elanud liikide jäänustes sisalduva hapniku isotoopse koostise uurimine.

Isotoopse koostise uurimiseks kasutatakse mass-spektromeetria meetodit.

Veel üheks kliima indikaatoriks on ka liiva või tolmu sisaldus meresetetes, mis on sinna kandunud



tuulega mandrilt. Suhteliselt suurt liiva hulka võib põhjustada vähese taimestikuga kõrbeline maapind.

### 6.3.1 Mass-spektromeetria meetod

Mass-spektromeetria on meetod ainest tekitatud ioonide massi ja laengu suhte ( $m/z$ ) mõõtmiseks.

Mass-spektromeetri tööprotsess on järgmine:

- 1) uuritav aine aurustatakse;
- 2) aur ioniseeritakse (näiteks elektroni kiire toimel);
- 3) tekkinud ioonid kiirendatakse elektrivälja abil;
- 4) ioonide kimp juhitakse läbi ristsuunalise magnetvälja. Mida raskem on osake, seda vähem kaldub ta magnetväljas kõrvale;
- 5) detektor mõõdab osakeste hulka sõltuvalt nende kõrvalekaldest.

Kuigi hapniku isotoopi  $^{18}\text{O}$  esineb looduses mitte eriti palju (ligikaudu 0,2 % kogu hapnikust), on see hulk mass-spektromeetri abil täpselt mõõdetav. Isotoopi  $^{18}\text{O}$  sisaldav vesi aurustub raskemini kui tavaline  $^{16}\text{O}$  baasil tekkinud vesi. Seepärast on sademetes ja ka sademeist tekkivais jääliustikes rohkem kergem  $^{16}\text{O}$  vett. Jääaja saabumisel salvestub suur hulk kergem vett mandrijää liustikesse ja  $^{18}\text{O}$  suhteline osa ookeanides kasvab. Jääajal võib ookeani pind langeda kuni 100 m võrra. Seega on  $^{18}\text{O}$  suhteline hulk jää hulga indikaatoriks ja selle kaudu teatud määral ka temperatuuri indikaatoriks.

Teiseks kaudseks temperatuuri indikaatoriks on deuteeriumi suhteline hulk mandrijää või meresetete puursüdamikes. Vee aurustumisel sisaldub aurus umbes 8% vähem deuteeriumi kui vees. Vastav fraktsioneerumise tegur (1,08) sõltub temperatuurist. Seega saab D suhtelise hulga mõõtmist (mõnikord koos  $^{18}\text{O}$  mõõtmisega) kasutada temperatuuri kaudseks mõõtmiseks.

### 6.3.2 Ajaskaala loomine spektraalseteks uurimusteks

Selleks, et uurida mineviku kliimamuutuste perioodilisust, on meil vaja võimalikult täpselt määrata ka puurimisel saadud sette- või jääkihtide proovide vanust.

Kõige lihtsam oleks vanus siduda kihi sügavusega: mida sügavam kiht, seda vanem.

Üldiselt see muidugi niimoodi on, kuid ei setete ega mandrijää moodustumine ei pea sugugi alati toimuma ühtlase kiirusega.

Võttes aluseks jääaegade tekkimise astronoomilise teooria (Milankovič'i tsüklid, p 5.4.3), on võimalik kliimat iseloomustavad hapniku isotoobi  $^{18}\text{O}$  perioodilised muutused viia vastavusse Milankovič'i tsüklitega määratud astronoomiliste perioodidega. Selline kokkusobitamine oli projekti **SPECMAP** (SPECTral Mapping Project) sisuks. Projekt käivitati 1980-ndail aastail. Kasutati viie erinevatelt laiuskraadidelt saadud ookeanipõhja puursüdamikute analüüsi tulemusi. Hapniku isotoobi  $^{18}\text{O}$  muutuste graafikud ühtlustati ja filtreeriti, eraldades neist Maa kaldenurga muutuse ja pretsessiooni sagedustega komponendid. Need komponendid viidi kooskõlla Milankovič'i tsüklitest tuletatud astronoomiliste võnkumistega. Saadi ajaskaala hilise pleistotseeni jaoks (kuni 780 tuhat aastat tagasi) võimaliku veega mitte üle 5 tuhande aasta.

Skaala loomisel kasutati ühe ajalise tugipunktina Maa magnetvälja suuna muutumist vastupidiseks (*Brunhes- Matuyama magnetic reversal*). K – Ar mõõtmiste põhjal toimus see sündmus 730 tuhat aastat tagasi. See tugipunkt aga ei sobinud hästi kokku  $^{18}\text{O}$  graafikutega. Mõni aasta hiljem leiti  $^{40}\text{Ar} / ^{39}\text{Ar}$  analüüsi põhjal, et täpsem magnetilise reversi aeg oli 780 tuhat aastat tagasi, mistõttu tuli ka SPECMAC ajaskaala vanemat osa korrigeerida. Aineproovide vanuse määramise meetodist radioaktiivsete isotoopide suhte analüüsi põhjal tuleb veel juttu edaspidi.

## 6.4 Spektraalmeetodi kasutamisest kliima uurimisel

### 6.4.1 Insolatsioon kliimat mõjutava tegurina

Milankoviči järgi on kliimamuutuste põhjuseks peetud Maa orbiidi iseärasustest tingitud insolatsiooni muutusi (insolatsioon tähendab päikesekiirguse voogu horisontaalpinnale, kusjuures ei arvestata atmosfääri mõju).

Insolatsioon sõltub koha geograafilisest laiusel ja ka aastaajast. Insolatsiooni kohta saab teha järgmised üldistused (Berger, 2009, lk 54, Muller ja Mac Donald, 2002 lk 191 - 195) :

- 1) Põhilised insolatsiooni spektri komponendid vastavad Maa telje kaldenurga muutusele ekliptika tasapinna suhtes (*obliquity*) (perioodiga 41 000 a) ja Maa telje kaldenurga pretsessioonile (perioodid 24 000, 22 000 ja 19 000 a).
- 2) Ekstsentrilisus on spektris niivõrd nõrk, et ta peaaegu puudub. Vastavad perioodid oleksid 413 000, 125 000 ja 95 000 a.
- 3) Maa telje kaldenurk on olulisem suurematel laiuskraadidel, eriti talvisel poolaastal.
- 4) Kevadisel ja sügisel pööripäeval on insolatsioon kõigil laiustel sõltuv ainult pretsessioonist.
- 5) Suvisel ja talvisel pööripäeval mõjutavad insolatsiooni nii pretsessioon kui telje kaldenurk, kuigi enamikul laiustel domineerib pretsessioon.

Sageli esitatavaks insolatsiooni näiteks on insolatsioon põhjalaiusel 65N juunis (Berger 2009, lk 54). Kliimat iseloomustavate muutujate (temperatuur, mandrijää hulk, vt p 6.3) spektrite uurimine näitab, et nende spektris esinevad pretsessiooni ja Maa kaldenurka iseloomustavad spektrijooned. See näitab, et insolatsioon on üheks, kuid siiski mitte ainsaks Maa kliimat mõjutavaks teguriks. Kliimanäitajate spektris on veel terav 100 tuhande a perioodile vastav spektrijoon, mille tekkimist spektraalsete meetodite abil ei ole suudetud seletada.

#### **6.4.2 Jäaaegade 100 tuhande aastase perioodilisuse probleem**

Seda perioodi on püütud seostada Maa orbiidi ekstsentrilisusega. Tegelikult aga on ekstsentrilisusest tingitud spektrikomponendid  $^{18}\text{O}$  võimsusspektris tühiselt nõrgad (Näiteks juulis 65N põhjalaiusel 600 korda väiksemad kui Maa telje pretsessioonisageduse komponent) (Muller, Mac Donald 2002, lk.232).

Üheks pakutud lahenduseks on mittelineaarse jäätumise mudel (A. Berger). See põhineb asjaolul, et pretsessioonist tekitatud komponent on moduleeritud ekstsentrilisuse perioodiga. Maa telje kaldenurga pretsessioon ei muuda keskmist Päikeselt saadavat energiat, vaid ainult selle jaotust aastaegade vahel. Mudel eeldab, et jää kogunemine liustikes ja selle sulamine toimub erineva kiirusega, mis tekitab mittelineaarsuse. Muller ja Mac Donald loevad pakutud mudelit matemaatiliseks konstruktsiooniks, mis on füüsikaliselt ebareaalne (Muller, Mac Donald 2002, lk. 211 - 213).

Mulleri ja Mac Donaldi poolt pakutud hüpotees seob 100 000 a tsükli planeetidevahelise tolmuaga. Maa orbiidi tasapind (tähtede suhtes) võngub samuti 100 tuhande aastase perioodiga (orbitaalne inklinatsioon). Selline orbiidi muutus ei mõjuta Maa kaugust Päikesest, kuid põhimõtteliselt on võimalik, et mingis orbiidi asendis Maa läbib kosmilise tolmu vööndit.

Tõepoolest, Maa pinnale langeb igal aastal umbes 40 000 tonni maavälisest ainet. Siiski ei jaga teised teadlased seda Mulleri ja Mac Donaldi hüpoteesi. Ühes 2006.a avaldatud uurimuses on mõõdetud kosmilise tolmu sadestumise kiirust Antarktikas (Winckler ja Fischer 2006). Programmi EPICA (*European Project for Ice Coring in Antarctica*) raames on uuritud jää puursüdamikke vanusega kuni 29 tuhat aastat tagasi. Kosmiline tolmu sisaldab suhteliselt palju kosmosest kaasavõetud heeliumi isotoopi  $^3\text{He}$ , mis on Maa peal haruldane. Suhe  $^4\text{He} / ^3\text{He}$  on maavälise tolmu jaoks umbes 4200 ja maise päritoluga tolmu jaoks umbes  $2,5 \times 10^7$ , seega peaaegu kogu jääs sisalduv  $^3\text{He}$  on maavälise päritoluga. Winckler ja Fischer on leidnud, et maavälise tolmu sadestumise kiirus on olnud samasugune nii viimasesse jääaega kuuluvate proovide jaoks (mis on vanemad kui 13 tuhat aastat) kui ka hilisemate proovide jaoks. Seega ei saa kosmist tolmu lugeda jääaegade põhjuseks.

#### **6.4.3 Etappide 1 ja 11 probleem**

Etappide nummerdus esitab nii jääaegu kui jäävaheaegu kaasajast mineviku suunas. Etapp 1 tähendab praegust jäävaheaega kuni väljumiseni viimasest jääajast umbes 11 000 a tagasi. Paarisnumbritega on märgitud külmad perioodid (jääajad). Etapp 11 tähendab jäävaheaega umbes 400 000 a tagasi. Probleem on selles, et etapi 11 alguses oli insolatsiooni muutus suhteliselt väike, kuid samal ajal on toimunud kiire kliima soojenemine. See seab kahtluse alla insolatsiooni kui

kliimamuutuse põhjuse.

### 6.4 3 Põhjuslikkuse probleem

Ajaliselt täpselt kontrollitud aegrida veega täidetud Devils Hole koopas Nevadas (USA) näitab kiiret temperatuuri tõusu, mis lõppes 135 000 a tagasi (üleminek eelmisele jäävaheajale).

Temperatuuri hinnati  $^{18}\text{O}$  muutuste järgi koopa seintel olevas kaltsiidis, aeg määrati U ja Th isotoopide järgi (sellest meetodist lähemalt edaspidi). Temperatuuri tõusu jooksul insolatsioon oluliselt ei tõusnud; insolatsiooni kasv järgneb temperatuuri tõusule umbes 10 000...15 000 a hilinemisega, seega ei saanud insolatsioon olla temperatuuri tõusu põhjuseks.

Toodud probleemid näitavad, et kõigi jääaegade seotud küsimuste lahendamiseks ainult spektraalsete meetoditega pole jõutud. Pöördume nende probleemide juurde veel tagasi järgmises peatükis.

### 6.5 Kas ja millal algab järgmine jääaeg?

Veel lõppenud sajandi 70-ndatel aastatel oli levinud arvamus, et käesolev jäävaheaeg on sarnane kahele eelnenule, mille kestus oli ligikaudu 10 tuhat aastat, seega on oodata ka käesoleva jäävaheaja peatselt lõppu.

Praegu ollakse seisukohal, et praegune jäävaheaeg on analoogiline 400 tuhat aastat tagasi toimunud (etapp 11, vt p 6.4.3), mis oli tunduvalt pikem. Analoogia aluseks on Maa orbiidi ekstsentrilisuse kõige aeglasem komponent (perioodiga 413 tuhat a, p 5.4.3). Mõlemat etappi (1 ja 11) iseloomustab väike ekstsentrilisus, mille tõttu on väike pretsessiooni amplituud ja suhteliselt väikesed on ka insolatsiooni muutused.

Modelleerimise näitab, et uue jääaja saabumine sõltub oluliselt ka  $\text{CO}_2$  kontsentratsioonist atmosfääris. Arvestades reaalselt  $\text{CO}_2$  kontsentratsiooni praegu ja lähitulevikus, annavad mudelarvutused praeguse jäävaheaja tõenäoliseks kestuseks veel umbes 50 tuhat aastat. Varasem jääaja saabumine on võimalik ainult väga madala  $\text{CO}_2$  kontsentratsiooni puhul (Berger ja Loutre 2002). Seega antud seisukohast on  $\text{CO}_2$  õhkupaiskamine isegi kasulik.

### Viited kirjandusele

**Berger, A., M. F. Loutre** (2002) An Exceptionally Long Interglacial Ahead? *Science*, vol 297, 23 August, p 1287 – 1288.

**Berger, A.** (2009) Astronomical Theory of Climate Change. *Encyclopedia of Paleoclimatology and Ancient Environments*. Ed.V. Gornitz. p 51 – 56. Springer.

**Denman K. L., G. Brasseur, A. Chidhaisong, P. Ciais, P. M. Cox, R. E. Dickinson, D. Hauglustaine, C. Heinze, E. Holland, D. Jacob, U. Lohmann, S. Ramachandran, P. L. da Silva Dias, S. C. Wofsy and X. Zhang,** 2007: Couplings Between Changes in the Climate System and Biogeochemistry. In: *Climate change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* /eds S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA, 996 pp.

**IPCC** (2007) Summary for Policymakers. In: *Climate change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* /eds S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA, 996 pp.

**Fu, Q., C. M. Johanson, S. G. Warren, D. J. Seidel.** (2004) Contribution to Stratospheric Cooling to Satellite-inferred Tropospheric Temperature Trends. *Nature*, vol 429, 6 May, p. 55 – 58.

**Heinrichsen, V.**(1996) Signaalide analoogtöötlus. TTÜ Raadio- ja sidetehnika instituut. Tallinn.

**Kivinukk, A, L. Pallas.** Harmooniline analüüs ja funktsioonide lähendamine. TTÜ Matemaatikainstituut, TTÜ Kirjastus.

- Kärner, O.**(2005) Millest räägivad õhutemperatuuri aegread. Kogumikus: Universum valguses ja viimas, lk. 270-279. Tallinn, OÜ Reves Grupp.
- McGuffie, K., Henderson-Sellers, A.** (1997) A Climate Modelling Primer. 2nd Edition. John Wiley & Sons, Chichester.
- Merilain M.** (2005) Ilmaennustamine – teadus või looming. Kogumikus: Universum valguses ja viimas, lk. 187-193. Tallinn, OÜ Reves Grupp.
- Muller R.A., G. J. MacDonald.** (2002) Ice Ages and Astronomical Causes. Data, Spectral Analysis and Mechanisms. Springer, Praxis Publishing. Chichester, UK.
- Männik, A.** (2005) Ilma ennustavad arvutid. Kogumikus: Universum valguses ja viimas, lk. 194-199. Tallinn, OÜ Reves Grupp.
- Rahmstorf, S., jt** (2005) Thermohaline circulation hysteresis: A model intercomparison, Geophys. Res. Lett., 32, L23605, doi: 10.1029/2005GL023655.
- Velbri, K.**(WWW, 2008) Globaalne soojenemine ja kliimamuutused. Uurimus, Tallinn.  
<http://www.kristjanvelbri.com/eesti/wp-content/uploads/2009/02/globaalne-soojenemine-ja-kliimamuutused-kristjan-velbri.pdf> (28.01.2010).
- Veski, S.**(2005) Soojenev kliima võib põhjustada kliimajahenemist. Eesti Loodus, nr. 1, lk 20 - 24.
- Winckler, G., H. Fischer** (2006) 30 000 Years of Cosmic Dust in Antarctic Ice. Science , vol 313, 28 July, p 491.

# TEADUSTÖÖ KORRALDUS JA MEETODID

## IRT8860, loengukonspekt 6-10 Heldur Haak

### 7. STATISTILISED MEETODID

#### 7.1 Juhuslikud sündmused ja juhuslikud suurused

Põhiline osa seni vaadeldud loodusseadustest on olnud determineeritud, s.t kirjeldatavad kindlate seaduspärasuste kaudu. Selline on näiteks planeetide liikumine kindlatel trajektooridel ümber Päikese.

Eelmises loengus vaadeldud spektraalsete meetodite eesmärgiks oli leida seoseid kliima muutuste ja astronoomiliste perioodiliste nähtuste vahel. See oleks võimaldanud neid seoseid vaadelda kui põhjuse ja tagajärje seoseid ja tuua välja ka vastavad seaduspärasused. Siiski selgus, et mitte kõiki kliimanähtusi ei saa põhjendada astronoomiliste perioodidega.

Nähtusi, mida me veel täpselt ei tunne, on sageli otstarbekas vaadelda juhuslikena. Matemaatikas on loodud hulk meetodeid juhuslike muutujatega kirjeldatavate nähtuste analüüsiks.

Statistiliste meetodite aluseks on tõenäosusteooria. Põhimõisteteks tõenäosusteoorias on sündmuse ja katse mõisted. Sündmuseks me võime nimetada iga loodusnähtust, mida me püüame uurida.

Katse mõiste on statistikas mõnevõrra üldisem, kui oli kirjeldatud p 4.7. Katse statistikas ei pea olema inimese poolt korraldatav aktiivne tegevus, selleks võib olla ka passiivne andmete registreerimine ehk vaatlus (Jõgi 2000, lk 9).

Oletame, et sündmuste täissüsteemi kuulub  $n$  sündmust ( $n$  on positiivne täisarv). Üksiksündmusi hulgast  $1 \dots n$  nimetame juhtudeks. Juhtu nimetame sündmuse  $A$  toimumiseks soodsaks, kui selle juhu realiseerumisel toimub sündmus  $A$ . Kui soodsate juhtude arv on  $m$ , siis on sündmuse  $A$  tõenäosus:  $p(A) = m / n$ .

Juhuslik suurus on suurus, mis katse (või vaatluse) käigus toimuva elementaarsündmuse tulemusena omandab mingi varem mitte teadaoleva väärtuse selle suuruse võimalikest väärtuste hulgast.

Juhuslikeks suurusteks on näiteks täringuviskel saadavate silmade arv või temperatuur mingis vaatluspunktis. Juhuslikud suurused võivad olla diskreetsed (näiteks täisarvud nagu täringu silmade arv) või pidevad (temperatuur).

Juhuslike suurusi iseloomustatakse jaotusseadustega. Jaotusseaduse määramiseks on vaja teada juhuslike suuruste võimalike väärtuste hulka ja eeskirja, mille abil on võimalik määrata tõenäosus, et juhusliku suuruse väärtus on mingis piirkonnas (Jõgi 2000, lk 62).

#### 7.2 Diskreetse juhusliku suuruse jaotusseadused. Binoomjaotus

Olgu meil diskreetne juhuslik suurus  $X$  võimalike väärtustega  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . Tähistame tõenäosused

$$P(X = x_k) = p_k, (k = 1, 2, \dots, n)$$

Need tõenäosused moodustavad diskreetse juhusliku suuruse  $X$  tõenäosusfunktsiooni.  $X$  ja  $P$  vastavad väärtused võib esitada tabelina:

X	$x_1$	$x_2$	...	$x_n$
P	$p_1$	$p_2$		$p_n$

Selles tabelis  $p_1 + p_2 + \dots + p_n = 1$ , s.t summaarne ühikuline tõenäosus on jagatud tabeli veergude vahel. Seepärast nimetatakse seda tabelit juhusliku suuruse jaotustabeliks.

Lihtsaim jaotus on ühtlane jaotus. Näiteks täringuviske puhul on kõik kuus võimalikku tulemust

võrdse tõenäosusega  $1/6$ .

Binoomjaotuseks ehk Bernoulli jaotuseks nimetatakse jaotust, mis vastab järgmistele tingimustele (Jõgi 2000, lk 123 – 129, Davis 2002 lk 14) :

- 1) katsel ehk elementaarsündmusel on ainult kaks võimalikku tulemust;
- 2) kõik katsed on omavahel sõltumatud;
- 3) katsetulemuste tõenäosused ei muutu kogu tsükli jooksul;
- 4) katseid teostatakse kindel arv kordi.

Binoomjaotust võib kasutada selleks, et hinnata maavarade otsingul (näit. nafta või gaasi otsingul) teostatavate puurimistöde tõenäolist edukust (Davis 2002, lk 14 - 22). Oletame, et otsingute programmis on ette nähtud puurida kindel arv ( $n$ ) puurauke. Ühe puurangu puurimisel eduka tulemuse (nafta leidmise) tõenäosuse tähistame tähega  $p$ , siis on ebaõnnestumise tõenäosus  $q = 1 - p$ . Katsete sõltumatus tähendab seda, et me oleme puurimiskohtade plaani koostanud otsingu alguses ja ei muuda seda sõltuvalt esimeste puurimiste tulemustest.

Tõenäosus, et ükski katse pole edukas, on:  $P(X = 0) = q^n$ .

Tõenäosus, et kõik katsed on edukad, on:  $P(X = n) = p^n$ .

Tõenäosus mingi ühe puurangu jaoks, et eelmised katsed ei ole olnud edukad, kuid viimane katse on edukas, on:  $P_1(X = 1) = q^{n-1} p$ .

Kuna selline olukord on võimalik iga puurangu puhul, siis:  $P(X = 1) = nq^{n-1} p$ .

Avaldades tõenäosust kahe eduka puurangu jaoks kogu seerias tuleb tegurina sisse tuua kombinatsioonide arv  $n$  elemendist kahekaupa ( $C_n^2$ ), mis näitab võimaluste arvu sellise olukorra tekkimiseks. Analoogiliselt arvutatakse tõenäosused ka kolme ja enama eduka puurangu jaoks.

Oletame, et maavarade otsinguprogramm sisaldab kuue puurangu puurimise, kusjuures eelnevatest uuringutest on teada, et edu saavutamise tõenäosus ühe puurangu jaoks  $p = 0,1$ . Arvutame tõenäosuse jaotustabeli (Tabel 7.1). Esimene väärtus  $P(X = 0) = (0,9)^6$ . Järgmiste tabeli väärtuste arvutamisel on mugav kasutada (Jõgi 2000), lk 124 toodud valemit:

$$P(X = k + 1) = (p/q)[(n - k)/(k + 1)] P(X = k)$$

Tabel 7.1.

X	0	1	2	3	4	5	6
P	0,531	0,354	0,0984	0,0146	0,00122	0,000054	$10^{-6}$

Näeme, et tõenäosusega 53 % lõpevad otsingud tulemusteta. Tõenäosus teostada üks edukas puurimine on 35 %, kahe eduka puurimise tõenäosus alla 10 %.

### 7.3 Poisson`i jaotus

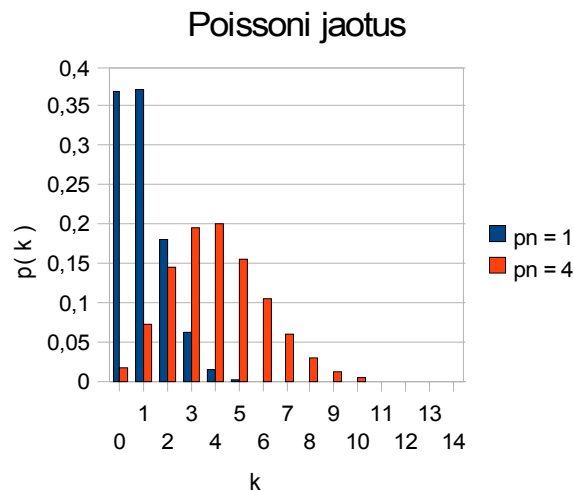
Kui binoomjaotuse puhul katsete arv  $n$  läheb väga suureks, siis vastavad tõenäosused vähenevad (tabeli kõigi veergude tõenäosuste summa peab olema 1) ning tõenäosuste arvutamine muutub tülikamaks. Sageli on siiski korrutisel  $np$  kindel piirväärtus:  $\lim np = \lambda$ , kui  $n \rightarrow \infty$  ja  $p \rightarrow 0$ .

Sellisel tekkinud jaotust nim. Poissoni jaotuseks (Jõgi 2000 lk 129 - 138, Davis 2002 lk 184 - 185, Tiit jt 1977 lk 70 -71, Parring jt 1997 lk 28 - 32) :

$$P(X = k) = e^{-\lambda} (\lambda^k / k!) \quad (k = 0, 1, \dots) \quad (7.1)$$

Sellist jaotust iseloomustab üksainus parameeter  $\lambda$  ja jaotust on võimalik esitada tabelitena sõltuvalt  $\lambda$  väärtusest (Tiit jt 1977 lk 456 - 459). Seejuures  $\lambda$  esitab ühekorraga nii Poissoni jaotuse keskvärtust kui ka dispersiooni. Argumentide hulgaks  $k$  on null ja positiivsed täisarvud. Poissoni jaotus tulpdiagrammina kahe  $\lambda$  väärtuse jaoks on toodud joon. 7.1. Tulpdiagramm on mittesümmeetriline, mis avaldub tugevamini väiksemate  $\lambda$  väärtuste puhul. Suurema  $\lambda$  puhul nihkub

diagramm paremale ja muutub madalamaks, sest kõikide tulpade väärtuste summa peab olema 1.



Joon.7.1 Poissoni jaotus lim  $p_n = \lambda$  kahe väärtuse jaoks

Kui suuremate  $\lambda$  väärtuste puhul ühendada diagrammi tulpade tipud mähisjoonega, saame jaotuse, mis läheneb pideva juhusliku muutuja Gaussi jaotusele.

Poissoni jaotusega saab kirjeldada sündmusi, mille esinemise tõenäosus on väike ( maavärinad, vulkaanipursked, keeristormid).

Siiski on Poissoni jaotuse rakendusala tunduvalt laiem kui ülalnimetatud harvaesinevad sündmused. Poissoni jaotusega saab modelleerida radioaktiivsete ainete lagunemist, kusjuures sekundis võib laguneda tuhandeid osakesi, samuti telefonikeskjaama saabuvaid kõnealustamise väljakutseid, paljudest komponentidest koosnevate seadmete töökindlust või supermarketite kassajärjekordi. Kõigil neil juhtudel summeerub sündmuste voog paljudest allikatest. Näiteks ühelt numbrilt saabub kõnealustussignaali telefonikeskjaama võib-olla ainult paar korda päevas, kuid selliseid kliente on tuhandeid. Summaarne signaalide voog omab samuti Poissoni jaotust. Sündmuste voog on statsionaarne, kui sündmuste keskmine arv ajaühikus on konstantne. Telefonikeskjaama näite puhul on signaalide voog statsionaarne keskmises aja mastaabis (kuni mõni tund). Ööpäeva jooksul toimub voo intensiivsuse oluline muutus (öösel tunduvalt väiksem), millega seoses muutub ka jaotust iseloomustav parameeter  $\lambda$ .

Telefonikeskjaamaga analoogiline on olukord ka mingis muus (näiteks meteoroloogilise) info kogumise süsteemis, kus ühele keskarvutileile saadetakse vaatlusandmeid juhuslikult suurest hulgast vaatlusjaamadest. Ka siin võib tekkida olukord, kus lühikeses ajavahemikus pöörduvad keskarvuti poole paljud jaamad ja tekib järjekord. Selliseid probleeme uurib teenindusteooria.

## 7.4 Pidevad jaotused

Pideva juhusliku suuruse jaoks defineeritakse jaotusfunktsioon  $F(x)$ . Kui jaotusfunktsioonil on tuletis, siis nimetatakse seda tõenäosustiheduseks ehk tihedusfunktsiooniks  $f(x)$ .

Tõenäosus, et pidev juhuslik suurus  $X$  omandab väärtuse mingist vahemikust  $(a \dots b)$  avaldub integraalina (Jõgi 2000 lk 72) :

$$P(a < X < b) = \int_a^b f(x) dx$$

Siin juhuslik muutuja  $X$  võib üldjuhul omandada väärtusi vahemikus  $-\infty$  kuni  $+\infty$ . Tõenäosuse jaotustihedus  $f(x)$  peab olema positiivne. Seejuures integraali väärtus üle kogu  $f(x)$  määramispiirkonna peab olema võrdne ühega kui muutuja  $X$  summaarne tõenäosus.

Jaotustihedus  $f(x)$  võib näiteks olla ühtlaselt jaotunud vahemikus  $a$ -st kuni  $b$ -ni. Sel juhul omab  $f(x)$  selles vahemikus väärtuse  $1/(b-a)$ .

Praktikas kõige sagedamini esinev pideva juhusliku muutuja jaotusseadus on normaaljaotus ehk Gaussi jaotus. Prantsuse matemaatik P. S. de Laplace pidas normaaljaotuse seadust ülemaailmse gravitatsiooniseaduse kõrval teiseks tähtsamaks looduseaduseks (Jõgi 2000 lk 156).

## 7.5 Normaaljaotus

Normaaljaotuse jaotustihedus avaldub valemiga (Jõgi 2000 lk 150):

$$f(x) = (1/\sigma\sqrt{2\pi}) \exp[-(x-a)^2/2\sigma^2], \quad (7.2)$$

kus  $a$  on juhusliku suuruse  $X$  keskvärtus ja positiivne suurus  $\sigma$  on jaotuse standardhälve.

Standardhälbe ruut on dispersioon.

Keskvärtus  $a$  vastab jaotustiheduse  $f(x)$  maksimumile ja  $f(x)$  graafik on sümmeetriline sirge  $x = a$  suhtes. Kui standardhälve  $\sigma$  kasvab, siis vähenevad  $f(x)$  maksimumilähedased väärtused ja graafik venitatakse laiemaks. Väikese  $\sigma$  korral on graafik kitsam ja teravam. Parameetri  $a$  muutus tähendab graafiku nihutamist  $x$ -telje suunas.

Graafiku nihke ja telgede mastaabi muutmisega on võimalik kõik normaaljaotuse graafikud taandada ühele ja samale kujule, mida nim. standardseks normaaljaotuseks ja mille puhul  $a = 0$  ja  $\sigma = 1$ . Sisuliselt see tähendab senise muutuja  $X$  asendamist uue standardse normaaljaotusega muutujaga  $Z$ , mis avaldub kujul:

$$Z = (X - a) / \sigma \quad (7.3)$$

Sellist teisendust nim. normaliseerivaks teisenduseks.

Normaaljaotusega juhuslik suurus mahub vahemikku, mis erineb keskvärtusest mitte rohkem, kui  $\pm \sigma$  tõenäosusega 0,6827 ja vahemikku alla  $\pm 3\sigma$  tõenäosusega 0,9973 ehk 99,73 %. Seega tõenäoliselt ainult kolmel juhul tuhandest ületab normaaljaotusega juhusliku suuruse hälbe absoluutväärtus kolmekordse standardhälbe.

Praktikas kasutatakse sageli 95% ja 99% kriteeriume. Nendele vastavad vahemiku laiused oleksid  $\pm 1,96\sigma$  ja  $\pm 2,81\sigma$ .

Jaotuse  $\alpha$ -kvantiiliks nimetatakse arvu  $q_\alpha$ , millest väiksema väärtuse saamise tõenäosus on  $\alpha$ , s.t :

$$P(X < q_\alpha) = \alpha$$

Jaotuse  $\alpha$ -täiendkvantiiliks nimetatakse arvu  $q'_\alpha$ , millest suurema või võrdse väärtuse saamise tõenäosus on  $\alpha$ , s.t :

$$P(q'_\alpha \leq X) = \alpha$$

Standardse normaaljaotuse  $\alpha$ -kvantiili tähistame  $z_\alpha$ . Standardse normaaljaotuse sümmeetrilisuse tõttu kehtib võrdus (Paarring jt 1997, lk 68):

$$z'_\alpha = -z_\alpha. \quad (7.4)$$

Sageli kasutatav 95% kriteerium tähendab, et juhuslik suurus jääb vähemalt 95% tõenäosusega vahemikku  $\pm 1,96\sigma$ . Sümmeetria tõttu jääb juhuslik suurus sellest vahemikust väiksemate väärtuste piirkonda tõenäosusega alla 2,5 % ehk kriteeriumile vastav  $\alpha = 0,025$  ja  $z_{0,025} = -1,96$ . (7.4) põhjal  $z'_{0,025} = 1,96$ .



Normaaljaotus tekib siis, kui juhuslikku suurust mõjutab väga suur hulk sõltumatuid tegureid, millest igaühe mõju üksikult võttes on väga väike. Sellele lähedane on ka olukord, kus juhuslik suurus moodustub rea teiste juhuslike suuruste summana.

Normaaljaotusega on näiteks mingi mõõdetava suuruse mõõtmistulemused. Mida täpsem on mõõteriist, seda väiksemad on nii tegeliku väärtuse kõrvalekalle mõõtmistulemuste keskvaärtusest (süsteemaatiline viga) kui ka mõõtmistulemuste hajumine (standardhälve  $\sigma$  ja dispersioon). Normaaljaotusele lähenevad ka mitmed teised jaotused mingis piirsituatsioonis. Üks näide oli toodud p 7.3 Poissoni jaotuse vaatlemisel.

## 7.5 Üldkogumi parameetrite hindamine

Üldjuhul mingi juhusliku suuruse väärtuste hulk (üldkogum) võib olla lõpmatult suur. Mõõtmisel me saame sellest kogumist mingi lõpliku valimi. Me ei tea üldkogumi parameetreid, kuid me püüame selle valimi kaudu anda hinnangut uuritava suuruse parameetritele: tema keskvaärtusele ja standardhälbele. Samast suurusest võib aga saada erinevaid valimeid, mis annavad ka erinevad keskvaärtuse hinnangud. Katsume leida nende hinnangute usaldusväarsust.

Kehtib järgmine valimi keskvaärtuse piirteoreem (Parring jt 1997 lk 71) : kui  $X_1, X_2, X_3, \dots$  on sõltumatud juhuslikud suurused keskvaärtusega  $a$  ja standardhällbega  $\sigma$ , siis läheneb standardiseeritud keskvaärtuse

$$\frac{1}{\sigma} \sqrt{n} \left( \bar{X} - a \right)$$

jaotus liidetavate arvu piiramatul kasvamisel piiramatult standardsele normaaljaotusele.

Kui meie käsutuses on väike valim ( $n < 60$ ), siis me jõuame normaaljaotusest veidi erineva t-jaotuse ehk Studenti jaotuse juurde. Selle jaotuse võttis kasutusele inglise matemaatik W. S. Gosset oma 1908 a Studenti varjunime all ilmunud töös (Parring jt 1997 lk 73). Studenti jaotus sõltub ka vabadusastmete arvust, mis tähendab valimi suuruse ja selle valimi alusel määratavate parameetrite arvu vahet (Davis 2002, lk 69).

Oletame, et meil on tegemist suure valimiga, näiteks oleme mõõtnud mingis punktis 100 temperatuuri väärtust. Meid huvitab, kui palju selle valimi põhjal arvatud keskvaärtus võib erineda tegelikust keskvaärtusest. Vahemikku, mis ette antud tõenäosusega (usaldusnivooga, näiteks 0,9) sisaldab tõelist parameetrit (keskvaärtust) nimetatakse usaldusintervalliks.

Suure valimi puhul usaldusintervalli laius  $\Delta a$  on võrdeline valimi standardhällbega  $s$  ja pöördvõrdeline ruutjuurega valimisse kuuluvate katsete (mõõtmiste) arvust  $n$  (Parring jt 1997, lk 82):

$$\Delta a = 2 z_{\alpha/2} \left( s / \sqrt{n} \right) \quad (7.5)$$

Siin  $z_{\alpha/2}$  on usaldusnivooga määratud täiendkvantiil. Kui näiteks usaldusnivoo  $1 - \alpha = 0,9$ , siis  $\alpha / 2 = 0,05$  ja  $z_{0,05} = 1,64$ .

Selleks, et suurendada valimi järgi arvatava keskvaärtuse usaldatavust, peame tegema rohkem ja täpsemaid mõõtmisi.

## 7.6 Statistilised hüpoteesid

Üldkogumi kohta tehtud oletust nim. statistiliseks hüpoteesiks. Otstarbekas on korruga esitada statistiliste hüpoteeside paar. Need hüpoteesid peavad üksteist välistama (Tiit jt 1977 lk 298, Parring jt 1997 lk 95 - 97, Freund, Wilson 1993 lk 110 - 112).

Hüpoteesid on väited juhuslike muutujate ühe või mitme parameetri kohta. Nullhüpotees väljendab tavaliselt status quo-d, s.t mingi nähtuse või efekti puudumist. See hüpotees loetakse valeks ainult siis, kui valim näitab veenvalt selle ekslikkust. Nullhüpotees võiks olla näiteks väide, et maapinna

keskmise temperatuur pole viimase 50 aasta jooksul oluliselt muutunud. Olgu meil kasutada mingi valim viimase 10 aasta maapinna temperatuuride kohta, mille keskvärtus on  $a_1$  ja teine valim analoogiliste mõõtmiste kohta ajavahemikus 50...60 aastat tagasi keskvärtusega  $a_0$ . Nullhüpoteesi võib siis esitada kujul:  $H_0 : a_1 = a_0$ .

Hüpoteeside paari teine hüpotees on nn. sisukas hüpotees, mida uurija soovib tõestada. Tema sisuks on tüüpiliselt kas mingi uue nähtuse olemasolu või senikehtinud seisukohtade ümberlükkamine.

Meie näite puhul võib sisuka hüpoteesi esitada kas kahepoolsena: keskmine temperatuur viimase 50 aasta jooksul on muutunud ( $H_1 : a_1 \neq a_0$ ) või ühepoolsena: keskmine temperatuur viimase 50 aasta jooksul on tõusnud ( $H_1 : a_1 > a_0$ ).

Otsus hüpoteeside kohta langetatakse valimite põhjal. Meie näite puhul oleks sisuka hüpoteesi tõestuseks vaja, et keskvärtused  $a_1$  ja  $a_0$  asetseksid teineteisest küllalt kaugel. Vastasel juhul võib väita, et tegemist on erinevate valimitega samast kogumist ja jääb kehtima nullhüpotees.

On vaja täpsustada, mis tähendab „küllalt kaugel“. Selleks tuleb kõigepealt anda hinnang vigadele, mis võivad tekkida seoses vale otsusega. Esitame hüpoteesid ja võimalikud otsused tabelina.

Tabel 7.2

Hüpotees ↓   Tegelikkus →	Kliima ei soojene	Kliima soojeneb
Kliima ei soojene: $H_0 : a_1 = a_0$	Õige otsus	2. liiki viga, $\beta$
Kliima soojeneb: $H_1 : a_1 > a_0$	1. liiki viga, $\alpha$	Õige otsus

Esimest liiki vea tegemise suurimat lubatavat tõenäosust nimetatakse olulisuse nivooks  $\alpha$ , mis antakse ette sõltuvalt konkreetsest ülesandest. Esimest liiki viga (sisukas hüpotees ei vasta tegelikkusele, kuid me loeme ta õigeks) loetakse raskeks veaks, seepärast ei võeta tavaliselt  $\alpha$  väärtuseks rohkem kui 0,05, mis tähendab, et me aktsepteerime 5% riski 1. liiki vea tekkimiseks. Kui näiteks silla kandevõime analüüsil on sisukaks hüpoteesiks  $H_1$  väide, et sild vastab nõuetele, siis on selge, et me ei tohi lubada suurt riski 1. liiki vea tegemisel. Sel juhul valitakse  $\alpha$  väärtus veel tunduvalt väiksem kui 0,05. Sisukas hüpotees loetakse tõestatuks ainult siis, kui piisavalt suure tõenäosusega on ümber lükatud nullhüpotees.

Teist liiki viga on kergem viga, mis enamasti tähendab, et sisuka hüpoteesi tõestamiseks tuleb veel mõõtmisandmeid juurde koguda.

Sisuka hüpoteesi tõestamise ebaõnnestumine ei tähenda veel nullhüpoteesi tõestamist.

Nullhüpoteesi ei saa tõestada. Kui me eelpooltoodud kliima näites tahame tõestada, et kliima ei soojene, peame selle väite formuleerima sisuka hüpoteesina ja kontrollima samuti piisavalt väikese riski tasemel.

Otsuse langetamise eeskirja nimetatakse testiks (ka kriteeriumiks). Valimi põhjal arvutatavat suurust, mille põhjal otsus langetatakse, nim. statistikuks (või teststatistikuks). Testi valik üldjuhul sõltub ülesandest.

Üldreeglina eeldatakse, et nullhüpoteesile vastava juhusliku suuruse parameetrid on teada. Meie keskmise temperatuuri näite puhul on mõlemale hüpoteesile vastavad temperatuurid antud valimite kaudu. Sel juhul saab kasutada valimite keskvärtuste võrdluse meetodikat (Parring jt, 1997, lk.122 – 125), kusjuures tulemus on analoogiline usaldusintervalli arvutamisele valemi (7.5) järgi.

Vähimat olulisuse nivood, mille korral saab konkreetse valimi korral sisukat hüpoteesi tõestada, nim. olulisuse tõenäosuseks ehk p-väärtuseks. Olulisuse tõenäosus p on väikseim risk, mida kasutades saaksime oma valimi korral sisuka hüpoteesi tõestada (Freund, Wilson 1993, lk 124 - 126, Kiviste 1999 lk 53).

Kokkuvõttena võib hüpoteeside testimise jaotada viieks etapiks.

- 1) Sõnastatakse hüpoteesid  $H_0$  ja  $H_1$  ning vastuvõetav  $\alpha$  väärtus.
- 2) Määratakse valimil põhinev teststatistik ja nullhüpoteesi tagasilükkamise tingimused.
- 3) Mõõdetakse (kogutakse) valimi väärtused ja arvutatakse teststatistik.
- 4) Otsustatakse, kas hüpotees  $H_0$  lükatakse tagasi või loetakse tagasilükkamine

ebaõnnestunuks. (NB! Tagasilükkamise ebaõnnestumine ei ole  $H_0$  tõestus!). Otsusega kaasneb tavaliselt soovitus mingiks tegevuseks.

5) Antakse tulemuste tõlgendus vastavalt konkreetsele probleemile.

## 7.7 Statistilise hüpoteesi testimise näide

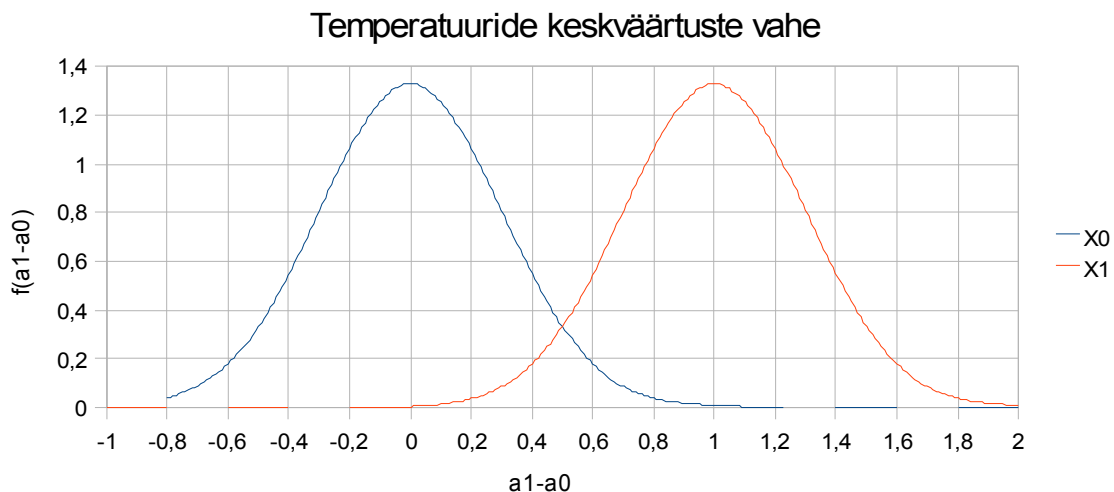
Vaatleme lähemalt Tabelis 7.2 toodud kliima soojenemise hüpoteesi, omistades mõõtmisvalimitele mingid (suvaliselt valitud) statistilised parameetrid. Testime seda hüpoteesi vastavalt p.7.6 toodud etappidele.

**Etapp 1.** Hüpoteeside paar on :  $H_0 : a_1 = a_0$  (kliima ei soojene);  $H_1 : a_1 > a_0$  (kliima soojeneb). Siin  $a_1$  ja  $a_0$  on vastavalt viimase 10 aasta ja 50 aasta võrra varasema perioodi keskmised temperatuurid. Loeme 1. liiki vea suurimaks lubatavaks tõenäosuseks 5 %, seega  $\alpha = 0,05$ .

**Etapp 2.** Oletame, et nii  $a_1$  kui ka  $a_0$  on suurte valimite keskväärtused, s. t nii  $n_1 > 60$  kui ka  $n_0 > 60$ . Lihtsuse mõttes võtame  $n_1 = n_0 = n$ . Suurte valimite korral kirjeldab nende keskväärtuste vahet normaaljaotus (Parring jt 1997, lk 123). Selle normaaljaotuse standardhälbe võib lugeda võrdseks valimite põhjal määratud hinnanguga. Kui eeldada, et mõlema valimi standardhälbed on võrdsed :  $s_1 = s_0 = s$ , siis avaldub keskväärtuste vahe standardhälve  $s^*$  (lihtsustusena Parring jt 1997 lk 123 toodud valemist) kujul:

$$s^* = s \sqrt{2/n} \quad (7.6)$$

Oletame näiteks, et  $s = 8,5$  °C ja  $n = 1600$ , siis  $s^* = 0,3$  °C. Jaotustihedused on näidatud joon. 7.2.



Joon. 7.2. Nullhüpoteesile ja sisukale hüpoteesile vastavad valimite keskväärtuste vahe tõenäosuste jaotustihedused.

Vasakpoolne graafik  $X_0$  vastab nullhüpoteesile, mille järgi mõlema valimi keskväärtused on võrdsed ja vahe  $a_1 - a_0$  keskväärtus on null. Sisukas hüpotees on antud võrratusena :  $a_1 > a_0$ , mis tähendab, et vahe on positiivne, kuid ei määra selle vahe suurust. See tähendab, et parempoolne graafik võib nihkuda vasakule või paremale ja joonisel näidatud graafik  $X_1$  on üks võimalik erijuhus. Põhiline nõue sisuka hüpoteesi tõestamiseks on, et graafik  $X_1$  peab mingi kriteeriumi järgi küllalt selgelt eristuma graafikust  $X_0$ .

Hüpoteeside tõestamine statistikas on vastuväiteline: selleks, et tõestada sisukat hüpoteesi  $H_1$ , me kõigepealt tõestame, et suure tõenäosusega ei kehti nullhüpotees  $H_0$ .

Valime kriteeriumiks Z-statistiku, mis kujutab endast valimite standardiseeritud keskväärtuste vahet :

$$Z = (a_1 - a_0) / s^* \quad (7.7)$$

Kuna oleme valinud  $\alpha = 0,05$  ja ühepoolse jaotuse, siis on  $Z$  kriitiline väärtus (standardiseeritud normaaljaotuse täiendkvantiil)  $z_{0,05} = 1,64$ . Kui valimite järgi arvatud tegelik statistik on sellest väärtusest suurem, tuleb nullhüpotees tagasi lükata.

**Etapp 3.** Oletame, et valimite keskväärtuste vahe  $a_1 - a_0 = 1$  °C (graafik X1 joonisel 7.2). Siis  $z = 1 / 0,3 = 3,33$ .

**Etapp 4.** Kuna  $3,33 > 1,64$ , siis tuleb nullhüpotees tagasi lükata.

**Etapp 5.** Tõenäosusega vähemalt 95 % võib väita, et kliima soojenemine on toimunud.

Kordame etappe 3...5 teistsuguste keskväärtuste vahede puhul.

a) Olgu  $a_1 - a_0 = 0,5$  °C. Siis  $z = 0,5 / 0,3 = 1,67$ . Ikkagi  $1,67 > 1,64$  ja nullhüpotees lükatakse tagasi. Kliima (vähemalt 95 % tõenäosusega) soojeneb.

b) Olgu  $a_1 - a_0 = 0,45$  °C. Siis  $z = 0,45 / 0,3 = 1,5$ . Nüüd  $1,5 < 1,64$  ja nullhüpoteesi ei saa ümber lükata. Temperatuuride vahe on liiga väike selleks, et 95 % tõenäosusega saaks väita, et mõlemad valimid ei kuulu ühte ja samasse üldkogumisse.

Et tagada sisuka hüpoteesi tõestamine ka väiksemate temperatuuri keskväärtuste vahede puhul valimites, peaksime kas tõstma mõõtmiste arvu valimites või vähendama valimite standardhälbeid (s.t tegema rohkem või täpsemaid mõõtmisi).

Ülaltoodud viiest etapist koosneva hüpoteeside kontrollimise protseduuri puhul me juba esimesel etapil andsime ette lubatava vea tõenäosuse. Nägime, et kui valimite keskväärtuste vahe oli suurem kui 1 °C, siis arvatud statistik ületas suure varuga kriitilise väärtuse, nii et sisukas hüpotees oleks olnud õige ka palju väiksema 1. liiki vea lubatud tõenäosuse  $\alpha$  puhul. Teiselt poolt, kui lubada mõnevõrra suuremat 1. liiki vea tõenäosust, oleks saanud lugeda sisuka hüpoteesi õigeks ka keskväärtuste vahe  $a_1 - a_0 = 0,45$  °C puhul.

Ülesande võib aga püstitada ka teisiti. Loobume algul kindla vea tõenäosuse etteandmisest ja arvutame vea tõenäosuse juhu jaoks, kui valimi järgi arvatud statistik vastab kriitilisele väärtusele. See ongi  $p$ -väärtus ehk olulisuse tõenäosus.

Variandi  $a_1 - a_0 = 1$  °C jaoks tuleb meil leida, millisele tõenäosusele vastab täiendkvantiil  $z_p = 3,33$ . Selleks tuleb otsida mõnest statistika käsiraamatu (Parring jt. 1997, lk 382, Freund, Wilson 1993, Tabel A.1) normaaljaotuse jaotusfunktsiooni  $N(0,1)$  tabelist  $z = 3,33$  jaoks vastav väärtus  $P(Z < z)$ . (Freund, Wilsoni tabeli kasutamisel peame muutma argumendi  $Z$  märki). Saame  $P = 0,9996$  ehk nullhüpoteesi võib tagasi lükata 99,96 % tõenäosusega, mis ongi olulisuse tõenäosus.

Variandi  $a_1 - a_0 = 0,5$  °C jaoks võime leida  $P(Z < z) = 0,9525$ . Seega võib sisuka hüpoteesi lugeda õigeks ja nullhüpoteesi tagasi lükata 95,25 % tõenäosusega. See vastab 1. liiki vea tõenäosusele  $\alpha = 4,75$  %.

Juhul, kui  $a_1 - a_0 = 0,45$  °C ja  $z = 1,5$ , siis analoogiliselt leiame  $z = 1,5$  jaoks  $P(Z < z) = 0,933$ .

Nullhüpoteesi võime tagasi lükata 93,3 % tõenäosusega. See on vähem, kui algul eesmärgiks seatud 95 %, kuid nüüd oleneb uurijast, kas ta loeb seda tõenäosust otsuse tegemiseks piisavaks või mitte.

## 7.8 Teist liiki viga ja testi võimsus

Teist liiki viga  $\beta$  tähendab olukorda, kus me oleme õigeks tunnistanud nullhüpoteesi, kuid see osutub ekslikuks (oleme teinud otsustuse, et kliima ei soojene, kuid tegelikult kliima soojeneb).

Vea  $\beta$  tõenäosus oleneb keskväärtuste vahe suurusest ehk joon. 7.2 järgi graafiku X1 asukohast.

Ühe piirväärtusena võib graafik X1 nihkuda vasakule kuni vahe  $a_1 - a_0 \rightarrow 0$  ehk ehk graafik X1 peaaegu ühtib graafikuga X0.

Kui mõlemad graafikud ühtivad, siis vastab graafiku X0 aluse pindala osa, mis jääb teststatistiku  $z$  kriitilisest väärtusest paremale, 1. liiki vea tõenäosusele  $\alpha$  ja vasakule jääva osa pindala 2. liiki vea tõenäosusele  $\beta$ , s.t  $\beta = 1 - \alpha$ .

Meie joon. 7.2 toodud näites 1. liiki vea tõenäosus  $\alpha = 0,05$  vastab graafiku X0 aluse pindala osale,

mis jääb  $a_1 - a_0 = s^* \hat{z}_{0,05} = 0,3 \cdot 1,64 = 0,49$  määratud püstjoonest paremale. See pind moodustab 5 % kogu graafiku X0 alusest pindalast. Teist liiki vea tõenäosus vastab ülejäänud X0 graafiku alusele pindalale ehk  $\beta = 0,95$ . Vea  $\alpha$  vähendamisel viga  $\beta$  suureneb. Seos  $\beta = 1 - \alpha$  aga kehtib ainult niikaua, kuni  $a_1 - a_0 = 0$ . Teist liiki vea tõenäosus on väga suur, sest kui graafikud ühtivad, siis tõenäoliselt mingit soojenemist ei ole.

Kui vahe  $a_1 - a_0$  suureneb, siis graafik X1 nihkub paremale, kuid vea  $\beta$  tõenäosus jääb ikkagi määratuks püstjoonest  $a_1 - a_0 = 0,49$  vasakule jääva graafiku X1 aluse pinnaga. See pind hakkab vahe  $a_1 - a_0$  kasvades vähenema ja vastavalt väheneb ka  $\beta$ . Meie ülaltoodud näite puhul, kui  $\alpha = 0,05$ , siis  $a_1 - a_0 = 0,49$  jaoks  $\beta = 0,5$  ja kui  $a_1 - a_0 = 0,98$ , siis  $\beta = 0,05$ .

Vea tõenäosuse  $\beta$  asemel on sageli otstarbekam kasutada suurust  $1 - \beta$ , mis näitab tõenäosust, et me oleme õigesti tunnistanud ekslikuks nullhüpoteesi, mis ka tegelikult on vale. Suurust  $1 - \beta$  nim. testi võimsuseks.

Kuna me testi alguses anname ette küllalt väikese vea  $\alpha$ , siis selle tõttu tekib väikese keskväärtuste vahe  $a_1 - a_0$  juures suur viga  $\beta$  ja väike testi võimsus. Uurija eesmärgiks on saavutada, et vahe  $a_1 - a_0$  kasvades testi võimsus võimalikult kiiresti tõuseks (viga  $\beta$  väheneks). Võimalikeks abinõudeks on vähendada mõõtmiste standardhälvet ja suurendada vaatluste arvu.

## 7.9 Jääaegade kordumise statistiline analüüs

Hilises pleistotseenis on toimunud 7 glatsiaaltsüklit, mille periood on umbes 100 000 aastat. Ajaliselt kõige täpsemini on määratav tsüklite lõpp, mille jooksul toimub jää kiire sulamine. Statistilisel analüüsil on püstitatud nullhüpotees  $H_0$ , mille järgi tsüklite lõpp on sõltumatu Maa orbiidi kaldenurga (*obliquity*) muutustest. Alternatiiviks on sisukas hüpotees  $H_1$ , mis väidab, et tsüklite lõpud toimuvad samas faasis kaldenurga muutustega. Analüüs näitab, et nullhüpoteesi võib tagasi lükata 5% olulisuse nivool. Analoogilisi nullhüpoteese, mis väidavad, et glatsiaaltsüklid ei sõltu Maa orbiidi ekstsentrilisusest ja pretsessioonist, samal 5% nivool tagasi lükata ei õnnestu (Huybers, Wunsch 2005).

100 tuhande aasta probleemi statistiline lahendus seisab selles, et tegelikult jäätumistsüklid lõpevad võrdse tõenäosusega kas 80 000 või 120 000 aasta järel (2- või 3-kordne Maa orbiidi kaldenurga muutuse periood), mis annab keskmiseks perioodiks 100 000 aastat.

Edasine uurimine peaks täpsemalt selgitama takteerimise olemust. Selleks on pakutud mittelineaarse faasiluku mehhanismi, kusjuures on näidatud, et takteerivaks signaaliks sobib hästi 65N solarisatsioon (Tziperman jt 2006).

Teiseks on glatsiaaltsükleid vaadeldud kaootilise süsteemina analoogiliselt kaoseteooriast tuntud Rössleri süsteemile. Ka siin tekib teatud tingimustel sisendmõju perioodi 2- või 3-kordistumine (Huybers 2009).

## Viited kirjandusele

**Davis J. C.** (2002) *Statistics and Data Analysis in Geology*. 3<sup>rd</sup> Ed. John Wiley & Sons . New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore.

**Freund F. J., W. J. Wilson** (1993) *Statistical Methods*. Academic Press Inc. Harcourt Brace Jovanovich, Publishers. Boston, San Diego, ..., Toronto.

**Huybers, P.** (2009) Pleistocene glacial variability as a chaotic response to obliquity forcing. *Clim. Past Discuss.*, 5, 237 – 250. [www.clim-past-discuss.net/5/237/2009](http://www.clim-past-discuss.net/5/237/2009).

**Huybers, P. C. Wunsch** (2005) Obliquity pacing of the late Pleistocene glacial terminations. *Nature*, vol 434, 24 March, 491 – 494.

**Jõgi, A.** (2000) Tõenäosusteooria 1. osa. TTÜ Matemaatikainstituut. TTÜ Kirjastus, Tallinn.

**Kiviste A.** (1999) Matemaatiline statistika MS Excel keskkonnas. GT Tarkvara OÜ, Tallinn.

**Parring, A.-M., M. Vähi, E. Käärrik** (1997) Statistilise andmetöötuse algõpetus. Tartu Ülikooli

Kirjastus, Tartu.

**Tiit, E., A. Parring, T. Möls** (1977) Tõenäosusteooria ja matemaatiline statistika. Valgus, Tallinn.

**Tziperman, E, M. E. Raymo, P. Huybers, C. Wunsch** (2006) Consequences of pacing the Pleistocene 100 kyr ice ages by nonlinear phase locking to Milankovitch forcing.

Paleoceanography, vol 21 PA4206, doi: 10.1029/2005PA001241.

# TEADUSTÖÖ KORRALDUS JA MEETODID

## IRT8860, loengukonspekt 7-10 Heldur Haak

### 8 GEOFÜÜSIKA MEETODEID

#### 8.1 Geokronoloogia meetodid

Vaatleme lühidalt meetodeid kivimite, aga samuti ka Maa vanuse hindamiseks.

Saksa teadlane H. L. F. von Helmholtz lähtus sellest, et Maa ei saa olla vanem kui Päike ja Päikese energia tekib aine gravitatsioonilisel kokkutõmbumisel vabaneva potentsiaalse energia arvel. Tema arvutused (1856 a) andsid Päikese vanuseks 19 miljonit aastat.

William Thomson (lord Kelvin) lähtus (1862 a) Maa jahtumise kiirusest, oletades, et tekkimisel oli Maa hõõgukuum (umbes 3800 °C). Tema arvutused andsid tulemuseks umbes 100 miljonit aastat. On püütud arvutada aega, mis kulub jõgedel sellise soolahulga kandmiseks ookeanidesse, mis vastaks nende praegusele soolsusele, saades tulemuseks samuti kuni 100 miljonit aastat. Ka see hüpotees on praeguseks ümber lükatud. Ookeanide soolsus on saavutanud tasakaalu ja enam oluliselt ei muutu (Lowrie 2006, lk 166 - 169).

Kaasaegne geokronoloogia meetod põhineb radioaktiivsusel, mille avastas 1896 a Antoine Henri Becquerel (prantsuse füüsik, 1852-1908), kes sai selle eest 1903 Nobeli preemia.

Radioaktiivse aine aatomi lagunemine on välistingimustest sõltumatu juhuslik sündmus. Kõigil sama tüüpi isotoopidel on sama lagunemise tõenäosus, mida iseloomustab radioaktiivlagunemise konstant  $\lambda$ .

Olgu vaadeldavas ainehulgas  $N$  aatomit, siis mingi ajalõigu  $\Delta t$  jooksul laguneb  $\Delta N$  aatomit, kusjuures  $\Delta N = -\lambda N \Delta t$ . Minnes üle piirile  $\Delta t \rightarrow 0$ , saame:  $dN / dt = -\lambda N$ .

Integreerides ja tähistades aatomite arvu alghetkel ( $t = 0$ )  $N_0$ , saame (Lowrie 2006, lk 170):

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (8.1)$$

See valem meenutab mõnevõrra Poissoni jaotust, kuid aatomite väga suure arvu tõttu vaadeldakse nende arvu  $N$  pideva muutujana. Samuti ei ole lagunevate aatomite voog statsionaarne, vaid ajas pidevalt vähenev.

Aega, mille jooksul algne aatomite arv  $N_0$  on vähenenud kaks korda, nim. pooleaks (kasutatakse ka terminit poolestusaeg). Paigutades suuruse  $N_0 / 2$  võrrandi (8.1) vasakule poolele, saame avaldada seose poolea  $T_{1/2}$  ja konstandi  $\lambda$  vahel:

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda = 0,693 / \lambda$$

Oletame, et radioaktiivse lähteatomi lagunemisel tekib stabiilne tütaratom. Siis mingi aja  $t$  pärast on tekkinud  $D$  tütaratomeid:

$$N_0 - D = N_0 e^{-\lambda t}, \quad \text{siit} \quad D = N_0 (1 - e^{-\lambda t})$$

Kuna me ei saa määrata suurust  $N_0$ , vaid ainult suurust  $N$ , asendame siia  $N_0$  väärtuse valemist (8.1)

$$D = N (e^{\lambda t} - 1) \quad (8.2)$$

Võttes (8.2) mõlemast poolest logaritmi, saab avaldada  $t$ :

$$t = (1 / \lambda) \ln (1 + D / N) \quad (8.3)$$

Praktikas suhet  $D / N$  mõõdetakse mass-spektromeetriga (vt p 6.3.1). Mõõtmistäpsuse huvides oleks soovitatav, et  $D$  ja  $N$  oleksid samas suurusjärgus, ehk teisiti öeldes, et analüüsitava kivimiproovi

tõenäoline vanus oleks samas suurusjärgus uuritava radioaktiivse aine pooleaga.

Praktikas on siiski mitmeid tegureid, mis mõjutavad (8.3) järgi arvutatava aja täpsust. Uuritavas proovis võib algselt olla mingi hulk tütaratomeid, mis ei ole radioaktiivse lagunemise produktiks. Teiseks ei toimu lagunemine alati suletud süsteemis. Näiteks on  $^{40}\text{K}$  lagunemise üks lõpp-produkt  $^{40}\text{Ar}$  gaasiline ja osa temast imbub kivimist välja. See imbumine sõltub oluliselt temperatuurist, täpsemalt öeldes algab mingist kriitilisest kõrgemal temperatuuril. See kriitiline temperatuur on erinevatel kivimitel erinev (tüüpiliselt  $300\text{ }^{\circ}\text{C} \dots 550\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Seega K-Ar meetodil määratud kivimi vanus näitab vanust alates jahtumisest alla kriitilise temperatuuri.  $^{40}\text{K}$  lagunemise teine võimalik lõpp-produkt on  $^{40}\text{Ca}$ , kuid seda muutust üldiselt ei mõõdetata (algset Ca on liiga palju).  $^{40}\text{K}$  lagunemise keskmine pooliga on 1,25 miljardit aastat.

Uraani või tooriumi muutumine stabiilseks pliiks toimub läbi mitmete lagunemiste ahela. Siiski on kõige pikema pooleaga just esimene lagunemine, mis määrab praktiliselt ka lagunemisprotsessi kiiruse.  $\text{U}^{238}$  pooliga on 4,47 miljardit aastat ja  $\text{U}^{235}$  pooliga 704 miljonit aastat.

Uraani lagunemisel tekkinud plii isotoopide suhte analüüsi tulemusena on määratud Maa vanimate kivimite vanuseks 3,8 Ga kuni 4,3 Ga (miljardit aastat). Maa ise on ilmselt veel vanem, kuid maapealsetes tingimustes ei pruugi uraani lagunemine olla suletud süsteem. Analoogiliselt on määratud meteoriitide vanus, mis annab tulemuseks 4,5...4,6 Ga. Väga tõenäoliselt on ka Maa vanus sama. Meteoriidid on asteroidide (väikeplaneetide) või komeetide tükid. Vanemate Kuu kivimite vanuseks on määratud samuti 4,5 Ga (Lowrie 2006, lk 177 - 178).

## 8.2 Radioaktiivse süsiniku meetod

Ka see meetod põhineb isotoopide radioaktiivse lagunemise mõõtmisel. Meetodit iseloomustab suhteliselt lühike pooliga. Meetodit on eelkirjeldatutega võrreldes kõige rohkem uuritud ja see on tekitanud ka kõige rohkem vaidlusi.

Radioaktiivse süsiniku meetodi esitas 1946. a ameerika teadlane W. F. Libby, kes sai selle eest 1960. a Nobeli preemia. Radioaktiivse süsiniku  $^{14}\text{C}$  aatomid tekivad atmosfääris lämmastiku aatomeist kosmilise kiirguse voos sisalduvate neutronite toimel. Õhuhapniku toimel oksüdeeruvad  $^{14}\text{C}$  aatomid süsihappegaasiks ( $\text{CO}_2$ ) ja taimed omastavad neid koos mitteradioaktiivse süsiniku aatomitega  $^{12}\text{C}$  ja  $^{13}\text{C}$ . Taimedest satub  $^{14}\text{C}$  ka loomsete organismide koostisse.

Aja jooksul kujuneb atmosfääris välja  $^{14}\text{C}$  tasakaal, mille puhul tekkivate ja lagunevate aatomite hulgad on võrdsed. Samuti tekib tasakaal taimedes ja loomades, mis kestab seni, kuni jätkub  $^{14}\text{C}$  juurdevool fotosünteesi või toitumise kaudu. Kui aga organismi elutegevus lõpeb, jätkub ainult ühesuunaline  $^{14}\text{C}$  lagunemise protsess pooleaga 5730 aastat.

Juba varsti pärast radiosüsiniku meetodi kasutuselevõttu ilmnes, et saadud dateeringud paljudel juhtudel ei ühti arheoloogide hinnangutega. Rea selliseid juhtumeid on esile toonud oma pikemas artiklis arheoloog L. Klein, kelle artikkel lühendatult ilmus ka „Eesti Looduses“ (Klein 1969).

Artiklis jõutakse järeldusele, et radiosüsiniku meetod vajab veel täiustamist.

Selline täiustamine mingil määral ongi toimunud. Kuid selleks, et radiosüsiniku meetodi järgi mõõdetud ajaskaala oleks kokkuviidav tavalise kalendriaastate skaalaga, peavad olema täidetud mõned tingimused (Punning 2005), millest kõige problemaatilisemad on:

- 1)  $^{14}\text{C}$  aktiivsus atmosfääris peab olema kogu meetodi vanuselise kasutusala piires teada ja muutumatu;
- 2) atmosfääris tekkinud  $^{14}\text{C}$  aatomite vahetus biosfääri ja hüdrofääriga peab olema täielik ja kiire;
- 3) dateeritav objekt peab pärast ainevahetuse lõppu asuma suletud süsteemis.

Kuigi astronoomide väitel ei ole viimase 50 000 aasta jooksul (see on ka radiosüsiniku meetodi kasutamise reaalne ajavahemik) eriti märgatavaid kosmilise kiirguse muutusi toimunud, on  $^{14}\text{C}$  teke siiski vähesel määral olnud ajaliselt muutuv. Oluliselt on  $^{14}\text{C}$  hulka atmosfääris mõjutanud inimtegevus. Fossiilkütuste kasutamine vähendab  $^{14}\text{C}$  hulka; seevastu tuumakatsetused on  $^{14}\text{C}$  hulga



atmosfääris kahekordistanud. Seepärast kasutatakse tänapäeva standardina varem raiutud kindla vanusega puitu (Punning jt 1969).

Uurijad pakuvad atmosfääri, biosfääri ja hüdrofääri vahelise tasakaalu püstitumise kestuseks kuni 30 aastat.

Tuleb ka arvestada, et taimed ei omasta süsinikku ainult atmosfäärist, vaid omastavad ka pinnasest „vanemat“ süsinikku. On ka selgunud, et organismid omastavad süsiniku isotoope selektiivselt. Et seda korrigeerida, määratakse peale  $^{14}\text{C}$  hulga ka püsivate isotoopide  $^{13}\text{C}$  ja  $^{12}\text{C}$  suhe, mida väljendatakse suhtarvuga  $\delta^{13}\text{C}$ .

Pärast 1980-ndaid aastaid hakati radiosüsiniku analüüsil kasutama mass-spektromeetrist tehnikat (vt p 6.3.1). See meetod võimaldab määrata ka suhtarvu  $\delta^{13}\text{C}$ , mida varasemad lihtsamad meetodid ei võimaldanud.

Vaatamata saavutatud täpsuse tõusule on radiosüsiniku meetodil määratud vanuse  $^{14}\text{C}$  aastate teisendamine kalendriaastateks ikkagi jäänud probleemiks (Punning 2005, Raukas, Kaup 2003).

Probleemi lahendusena on puude aastarõngaste loendamise teel määratud mitmeid kalibreerimiskõveraid, mis on rakendatavad kuni proovide vanuseni 10 000...12 000 a. Seejuures kalibreerimine üldreeglina ei vähenda võimalikku vanuseintervalli aastates, vaid vastupidi, arvestab kalibreerimiskõvera mittelineaarsuse tõttu tekkivat võimalikku lisaviga. Nii on see näiteks ka Pulli asula orgaanilise materjali vanuse määramisega, mis (ilma  $\delta^{13}\text{C}$  määramiseta) oli  $9600 \pm 120$  süsinikaastat. Vastav kalibreeritud vanusehinnang kalendriaastates tõenäosusega 95,4 % oleks ajavahemikus 9360 kuni 8569 eKr (Punning 2006).

Vaidlusi on tekitanud Kaali meteoriidikraatrite vanuse määramine. Kõrvalkraatritest leitud söestunud puidu analüüsid andsid proovide vanuseks  $2530 \pm 130$   $^{14}\text{C}$  aastat,  $2660 \pm 200$   $^{14}\text{C}$  aastat ja  $2920 \pm 240$   $^{14}\text{C}$  aastat. Peakraatri põhjasetete õietolmuanalüüs andis kraatri vanuseks umbes 3500  $^{14}\text{C}$  aastat. S. Veski, A. Heinsalu ja K. Kirsimäe seostavad Kaali sündmuse kraatriväljast 6 km kaugusel asuvast Piila rabast leitud iriidiumirikka söestunud turba kihiga, mille vanus kuulub ajavahemikku 800 – 400 a eKr. Plaatina grupi elemendi iriidiumi sisaldus maakoos on mitmeid suurusjärke väiksem kui raudmeteoriitides (Veski jt. 2002). A. Raukas seevastu on seisukohal, et eelnimetatud söeproovidele vastav puit võis sattuda kraatritesse ka hiljem ning ka iriidiumirikas turbakiht võis tekkida muudel põhjustel. Tema hinnangul on Kaali kraater vähemalt 4000-aastane.

## 9. LOOGIKA PROBLEEME JA MEETODEID

### 9.1 Induktsioon ja deduktsioon loogikas

Lühidalt öeldes uurib loogika mõtlemise kõige põhilisemaid aspekte. Nende hulka kuuluvad üldistamine ja järelduste tegemine (Tamme jt 2002).

Kui me paneme tähele, et mingid nähtused esinevad sageli koos, üldistame me selle kokkusattumuse sageli reegliks. Laps seostab leegi puudutamise valuaistinguga ja moodustab reegli: leegi puudutamine teeb haiget. Ka kõnelema õppimine nõuab üldistamist: näiteks ei tähenda sõna „tool“ mitte üht konkreetset mööblieset, vaid on kasutatav kõigi taolise kujuga esemete puhul. Siiski on selliste üldistuste tegemine ehk induktsioon oma olemuselt statistiline: asjaolust, et mingid nähtused esinevad sageli koos, ei saa kindlalt järeldada, et nad peavad alati koos esinema. Paljudel reeglitel võib olla erandeid. Selle tõttu loobuti ka teadusfilosoofias induktsioonist tõestusmeetodina. Statistilise iseloomuga nähtused, mille puhul me saime hinnata vasturääkivate hüpoteeside tõenäosusi, ei kuulu formaalloogika uurimisvaldkonda. Klassikalises kahevalentse loogikas kehtib välistatud kolmanda reegel, mille sõnastas juba Aristoteles: iga lause on kas tõene või väär, kolmandat võimalust ei ole.

Nii kahevalentne loogika kui tõenäosuslikud statistilised hüpoteesid on mõlemad matemaatilised abstraktsioonid ja uurija peab tegema otsuse, milline mudel vastab paremini uuritavate nähtuste kirjeldamiseks.

Erinevalt sõna „induktsioon“ üldisest tähendusest on „matemaatiline induktsioon“ täpne matemaatiline termin. Näiteks naturaalarvude hulk on selle mõiste abil defineeritav kahe lausega:

- 1) 0 on naturaalarv,
- 2) kui  $n$  on naturaalarv, siis ka  $n + 1$  on naturaalarv.

Faktidest või väidetest järelduste tegemine ehk deduktsioon on üks loogika põhiülesandeid.

Loogika garanteerib õigete reeglite rakendamise korral õigetele faktidele ka õige tulemuse. Sageli tähendab deduktsioon üleminekut üldistelt reeglilt üksikjuhtumitele. Oluline osa loogikast on ka õigete reeglite otsimine.

Antiikloogika silmapaistvaim esindaja oli Aristoteles (384-322 e.m.a.). Aristoteles pidas loogikat tööriistaks kõigi teiste teaduste jaoks. Veel võiks nimetada geomeeter Eukleidest, kelle õpilased Diodorus Cronus ja Philon (4. saj. e.m.a.) väidetavalt avastasid nn. valetaja paradoksi: „Ma ütlen, et ma praegu valetan. Kas minu väide on õige või vale?“ (Tamme jt 2002).

## 9.2 Loogika ja matemaatika aluste areng 19 – 20 sajandil

Inglise matemaatik George Boole avaldas kaks loogika-alast tööd: „Loogika matemaatiline analüüs“ (1847) ja „Mõtlemise reeglid“ (1854). Nendes ta esitas loogika algebralise süsteemina (Boole'i algebra). Edaspidine matemaatilise loogika areng oli suurel määral seotud tema rakendamisega matemaatika, eelkõige aritmeetika aluste uurimisel.

20. saj. keskpaiku hakati Boole'i algebrat laialdaselt kasutama releeautomaatika süsteemide analüüsil, veidi hiljem ka arvutustehnika süsteemide analüüsil.

Rea töödega (alates 1872.a) pani Saksa matemaatik Georg Cantor (1845 – 1918) aluse hulgateooriale. Alguses suhtusid paljud matemaatikud (sh L. Kronecker) uude teoriasse vaenulikult. Sajandi lõpuks oli hulgateooria siiski võitnud üldise tunnustuse ja hiljem muutus see teooria peaaegu kogu matemaatika baasiks. Aga ka juba G. Cantor ise leidis, et teatud juhtudel (nt kõikide hulkade hulga moodustamisel) viib hulgateooria vasturääkivuste ehk paradoksideni. Tekkinud olukord andis tugeva tõuke aktiivseks matemaatika aluste uurimiseks 20. saj. alguses. Seejuures kujunes välja kolm põhilist arengusuunda (Tamme jt 2002, Jürimäe 1965).

**9.2.1 Logistlik suund.** Selle suuna tuntuimaks esindajaks oli ( juba p. 1.2 nimetatud) inglise filosoof ja loogik Bertrand Russell, kes avaldas koos A. N. Whitehead'iga (1861 – 1947) kolmeosalise suurteose „Principia Mathematica“ (1910 – 1913). Logistliku suuna põhieesmärgiks oli tuletada kogu matemaatika otse loogikast. Russell ja Whitehead näitasid, et hulgateooria paradoksid tekivad nõiarangi põhimõttel. Tuntud on Russelli habemeajaja paradoks, mida võib vaadelda valetaja paradoksi modifikatsioonina: küla habemeajaja ajab habet kõigil neil küla meestel, kes ise endal habet ei aja. Kas habemeajaja iseendal peab habet ajama? Ülalnimetatud töös sisaldub ka Russelli tüüpide teooria, mille järgi jagatakse kõik vaadeldavad objektid klassidesse. Nii tekib tüüpide hierarhia. Selliselt välditakse nn. eneseleviitavaid definitsioone hulkade moodustamisel ja seega ka nõiarangi tekkimist.

Siiski tekitavad sellised piirangud ka probleeme. Keelates eneseleviitava definitsiooni, näiteks: „kõige vanem mees külas“ keelatakse ka mõisted, nagu: „maksimaalne (minimaalne) element“, mis on matemaatilisel analüüsil vajalikud ja mis ei tekita mingeid vastuolusid.

Mis puutub logistide ideed taandada kogu matemaatika loogikale, siis ka see osutus ebaõigeks.

1931.a tõestas austria matemaatik ja loogik Kurt Gödel (1906 - 1978), et isegi aritmeetikat ei saa taandada loogikale.

**9.2.2 Formalistlik suund.** Selle suuna juhiks oli saksa matemaatik D. Hilbert (1862 – 1943). Ideeks oli uurida matemaatika aluseid aksiomaatilise meetodi abil, tõestades vastava aksiomaatilise süsteemi mittevasturääkivust. Formalistid ei tunnistanud lõpmatuse mõistet, väites, et reaalne mõte on vaid lõplikel hulkadel. K. Gödeli tõestatud teoreemid näitasid, et nii logistide kui ka formalistide programm on põhimõtteliselt teostumatu. Need Gödeli teoreemid (populaarsel kujul) on järgmised (Jürimäe 1965):

- 1) Iga aksiomatiseeritud lõpmatu süsteemi  $S$  puhul võib selle süsteemi vahenditega püstitada loogilise väite  $t$ , mille õigsust või ebaõigsust ei saa kontrollida süsteemi  $S$  vahenditega.
- 2) Selliseks lahendamatuks probleemiks osutub selle süsteemi  $S$  kui terviku vasturääkimatus.

Nendest teoreemidest järeldub, et lõpliku aksiomaatika abil ei saa aksiomatiseerida ühtegi lõpmatust sisaldavat piisavalt keerukat süsteemi. Siiski on suured alamhulgad matemaatikast ja matemaatikavälistest süsteemidest lõplikult aksiomatiseeritavad. Seetõttu ei kaota loogika ja formaalne aksiomaatika oma tähtsust, ei saa ainult loota, et mingi lõplik hulk aksioome suudaks kirjeldada absoluutselt kõike (Tamme jt 2002).

**9.2.3 Intuitsionistlik suund.** Selle suuna esindajateks olid Hollandi matemaatikud L.E.J. Brouwer (1881 - 1966) ja A. Heyting (1898 – 1980). Intuitsionistid ei tunnista olemasoloteoreemide tõestusi, kus ei konstrueerita vastavat objekti. Tõeliseks otsuseks on näiteks „2 on paarisarv“, mitte aga „eksisteerib paarisarv“. Ka lõpmatust käsitletakse ainult potentsiaalse lõpmatusena, kus on täpselt näidatud, millise protsessi tulemusena lõpmatus tekib. Loogikas induksionistid ei tunnista välistatud kolmanda reeglit ja ei räägi lausete õigsusest, vaid tõestatavusest. Lause „A või B“ tõestamiseks peavad kas A või B (või mõlemad) olema tõestatavad ja me peame teadma, kumb neist on tõestatav.

Intuitsionismi väärtuseks on, et mingi objekti olemasolu intuitsionistlik tõestus annab algoritmi selle objekti tegelikult konstrueerimiseks. Seetõttu saab intuitsionistlikku loogikat kasutada arvutiprogrammide automaatseks sünteesimiseks (Tamme jt 2002).

## 9.3 Hägusloogika meetod

### 9.3.1 Sissejuhatus

Hägusloogika (*Fuzzy Logic*) on üheks näiteks mitteklassikalisest loogikast. Meetodi alused töötas välja Iraagi päritolu California ülikooli professor Lotfi A. Zadeh lõppenud sajandi 60-ndatel aastatel.

Kui me peaksime näiteks otsustama inimese vanuse üle, siis vastavalt klassikalise loogika reeglitele me saame teha ainult kaks teineteist välistavat otsust: kas noor või vana. Kui seada piiriks näiteks vanus 35 a, siis inimene muutub sellise loogika järgi ühe päevaga noorest vanaks, kuigi tegelikult selle ühe päevaga temas mingit märgatavat muutust ei toimu.

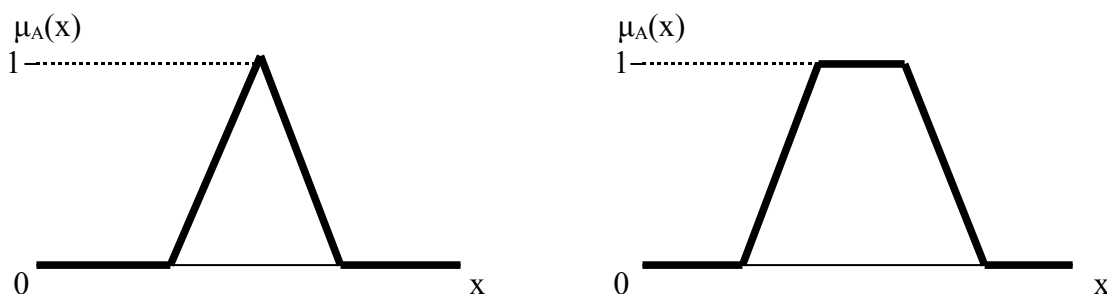
Hägusloogikas võetakse kasutusele predikaadi tõesusaste vahemikus 0...1 (predikaat väljendab objekti omadust või objektidevahelist seost). Omadusele „noor inimene“ omistame näiteks kuni vanuseni 25 a tõesusastme 1, siis hakkab tõesusaste vähenema ja jõuab nt 45 a juures nulli. Me võime veel sisse tuua vahepealse astme: keskealine inimene. Sellisele omadusele võime omistada tõesusastme 1 just vanuses 35 a ja lasta tal väheneda nullini nii 25 a vanuses kui 45 a vanuses. Hägusloogika on sobiv ülesande kirjeldamiseks juhul, kui lähteandmed ei ole täpselt mõõdetavad või on see mõõtmise tülikas. Hägusloogika võib kasutada sõnaliselt väljendatud hinnanguid (keskealine inimene, jämedateraline liiv, külm ja vihmane ilm).

Väga keerukate ja oluliselt mittelineaarsete süsteemide puhul võib nende matemaatilisel täpne kirjeldamine osutuda väga raskeks ja sel juhul võib hägusloogikal põhinev mudel osutuda peaaegu ainsaks võimaluseks.

1973. a püüdis prof. E. H. Mamdani Londoni Ülikoolis koos ühe üliõpilasega stabiliseerida üliõpilase poolt ehitatud väikese aurumasina kiirust. Masina karakteristikud olid mittelineaarsed ja klassikaliste regulaatorite häälestamine osutus keerukaks. Need olid kas aeglased või tekitasid pika võnkumise siirdeprotsessi. Tutvunud L. A. Zadeh teooriaga, ehitas prof. Mamdani koos üliõpilasega maailma esimese hägusloogika baasil töötava regulaatori, mis oli senistest kiirem ja töökindlam. Hägusloogikat kasutatakse töökindlate robotite ja kodumasinate juhtimisel, samuti ka mitmete tootmisprotsesside modelleerimiseks ja juhtimiseks. Praeguseks on hägusloogika hakanud jõudma ka loodusteadustesse.

### 9.3.2 Hägusad hulgad

Universaalhulga  $X$  mingi elemendi  $x$  kuulumist hāgusasse hulka  $A$  iseloomustab liikmesfunktsioon  $\mu_A(x)$ . Hāgusate hulkade puhul  $\mu_A(x)$  vōib omada mistahes vārtuse vahemikus  $0 \dots 1$ . Kui  $\mu_A(x)=1$ , siis  $x$  kuulub hulka  $A$  ja kui  $\mu_A(x)=0$ , siis  $x$  ei kuulu hulka  $A$ . Klassikaliste hulkade puhul  $\mu_A(x)$  vōib omada vaid vārtusi  $1$  vōi  $0$ . Seega vōib hāgusat hulgateooriat pidada klassikalise hulgateooria ũldistuseks. Liikmesfunktsioonide nāiteid on toodud joon. 9.1. Liikmesfunktsioon vōib omada ka normaaljaotusele iseloomulikku kellukataolist kuju. Sageli lihtsuse saavutamiseks piirduakse sirgjoonelistest lōikudest moodustatud liikmesfunktsioonidega. Hāgusat hulka  $A$  nim. normaalhulgaks, kui tema universaalhulgas  $X$  leidub vāhemalt ũks element  $x_0$ , mille puhul hulga liikmesfunktsioon omab vārtust  $1$ .



Joon. 9.1 Liikmesfunktsioonide nāiteid

Hāgusate hulkadega on teostatavad mitmed tehted, millel ei ole analoogi klassikalises hulgateoorias. Kolme kōige kasutatavama tehte puhul on analoogia siiski olemas.

1. Hāgusa hulga  $A$  **tāiend** on hāgus hulk  $\bar{A}$ , mille liikmesfunktsioon avaldub kujul:

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$$

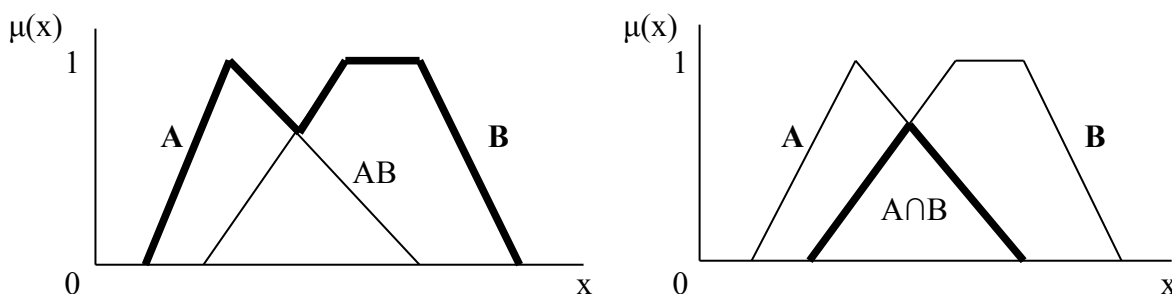
2. Kahe hāgusa hulga  $A$  ja  $B$  **ũhendi** mēärab kahest liikmesfunktsioonist suurem:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max [\mu_A(x), \mu_B(x)]$$

3. Kahe hāgusa hulga  $A$  ja  $B$  **ũhisosa** mēärab kahest liikmesfunktsioonist vāiksem:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min [\mu_A(x), \mu_B(x)]$$

Hāgusate hulkade ũhendi ja ũhisosa moodustamist illustreerib joon. 9.2.



Joon. 9.2 Hāgusate hulkade  $A$  ja  $B$  ũhend  $AB$  ja ũhisosa  $A \cap B$ .

### 9.3.3 Hāgusloogika

Et siduda hāgusloogikat hāgusate hulkade teooriaga, loetakse hāgusloogika lausete tōevārtused

võrdseks nende lausete sisule vastavate hädusate hulkade liikmesfunktsioonidega. Selle tõttu vastab hädusloogikas teostatav konjunktsioon ( JA, AND ) selle tehtega ühendatavate hulkade (lausete) ühisosale, disjunktsioon ( VÕI, OR ) nende hulkade (lausete) ühendile ja lause eitus vastava hädusa hulga täiendile.

Iga loogika kõige olulisem osa on tuletamisreeglite süsteem. See süsteem näitab, kuidas olemasolevatest lausetest saab tuletada uusi lauseid ja milline on nende tõeväärtus.

### 9.3.4 Hädusast tuletamisest

Klassikalises loogikas kehtib juba Vana-Kreekas tuntud tuletusreegel *modus ponens* : kui lausest p järeldub lause q ja kui p on tõene, siis ka q on tõene.

Sellist järeldumist väljendab klassikalises loogikas implikatsioon  $p \rightarrow q$ , mille tõeväärtustabel on järgmine:

p	q	$p \rightarrow q$
1	1	1
1	0	0
0	1	1
0	0	1

Tabelis on tõene lause tähistatud sümboliga 1 ja väär lause sümboliga 0.

Implikatsioon on väär ainult siis, kui tema eeldus on tõene ja järeldus on väär. Kui eeldus on väär, on implikatsioon alati tõene. Teisiti öeldes, vales eeldusest võib teha mistahes järeldusi.

Kui me läheme üle hädusatele loogikalausetele, mille tõeväärtused võivad kuuluda vahemikku 0...1, siis sellele vastav hädus järeldamine on tunduvalt keerulisem. Seda võib teha mitmel viisil.

Esiteks, me võime säilitada klassikalise ranguse ja lubada järeldumist ainult tõeväärtuste 0 või 1 puhul vastavalt ülaltoodud tabelile. Siis aga me vahepealsete tõeväärtuste puhul mingit otsustust teha ei saa.

Paneme tähele, et tabeli järgi implikatsioon on väär ainult siis, kui järelduse tõesusaste on väiksem eelduse tõesusastmest. Me võime säilitada range tõesusnõude sisendmuutuja suhtes ja lugeda implikatsiooni vääraks, kui väljundi tõeväärtus on ühest väiksem. Teisiti öeldes me ei luba teha tõeste eelduste põhjal (ka osaliselt) mittetõest järeldust.

Üldjuhul aga võivad sisendmuutujad omada tõeväärtusi vahemikust 0...1, seega me peame suutma teha otsustusi ka ebakindlate eelduste korral. Ka tegelikus elus tuleb sageli teha otsuseid olukorras, kus kõik lähteandmed pole täielikult usaldatavad. Hädusloogika ei anna ühest otsustusalgoritmi, kirjanduses on pakutud kümneid võimalikke variante.

Raamatus (Lin ja Lee, 1996, lk 147) on toodud tabel kümne erineva hädusa implikatsiooni reegluga. Praktikas, eriti tehnilistes rakendustes, on neist kõige enam kasutatav nn Mamdani reeglibaas, mida esitatakse tingimuslausetena. Kui meil on 2 sisendmuutujat X ja Y ning üks väljundmuutuja Z, siis on Mamdani reeglibaas väljendatav kujul:

$$\begin{aligned} & \text{KUI } X \text{ on } A_1 \text{ JA } Y \text{ on } B_1, \text{ SIIS } Z \text{ on } C_1 \\ & \text{KUI } X \text{ on } A_2 \text{ JA } Y \text{ on } B_2, \text{ SIIS } Z \text{ on } C_2 \\ & \dots \\ & \text{KUI } X \text{ on } A_n \text{ JA } Y \text{ on } B_n, \text{ SIIS } Z \text{ on } C_n, \end{aligned}$$

kus  $A_i$ ,  $B_i$  ja  $C_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$  on vastavate universaalhulkade hädusad alamhulgad.

Selle reeglibaasi kasutamist selgitame edaspidi näite varal.

Reeglitesse kuuluvad laused võivad olla sõnastatud tavakeeles, kaasa arvatud ligikaudsed hinnangud, nagu näiteks: üsna külm, kerge pilvitus, vähemalt 20 %, mõned päevad tagasi.

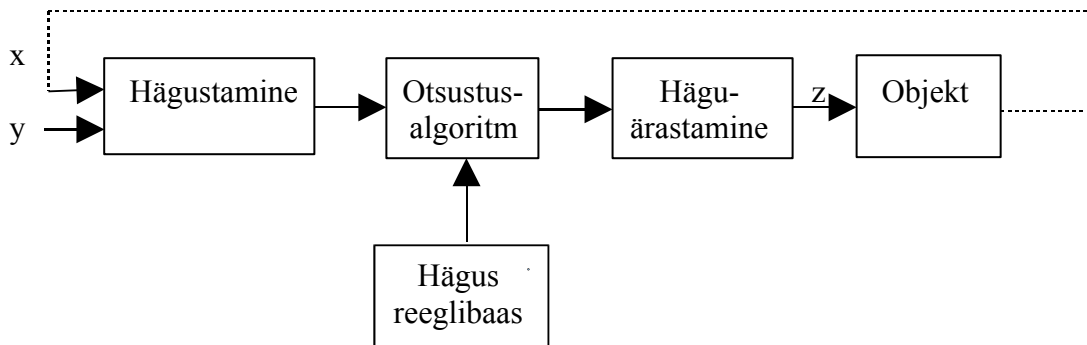
### 9.3.5 Hädusad mudelid ja kontrollid

Hädusloogikal põhinevat otsustussüsteemi võib kasutada mitmete looduses toimivate protsesside modelleerimiseks. Nii on hädusa mudeli abil püütud täpsustada ilmaennustusi vastavalt kohalikele

tingimustele, kasutades reeglibaasina eksperthinnanguid, näiteks kujul: kui tõuseb tuul suunaga kagust või lõunast ja baromeeter pidevalt langeb, siis on saabumas torm läänest või loodest. Veel üks näide on toodud punktis 9.3.6.

Hägusa otsustussüsteemi struktuur on näidatud joon. 9.3.

Kui süsteemi kasutatakse mingi protsessi juhtimiseks, siis on tegemist hägusloogika kontrolleriiga. Oletame, et kontrolleri ülesandeks on ruumi temperatuuri stabiliseerimine. Siis esimene sisendmuutuja  $x$  on mõõdetav ruumi temperatuur. Teine sisend  $y$  võib olla välisõhu temperatuur. Väljundsuurus  $z$  on küttevõimsust määrav juhtsignaal. Objektiks on köetav ruum, mille temperatuur antakse tagasisidesignaalina tagasi kontrolleri sisendile. Sellist hägusat kontrolleri on kirjeldatud süsteemiteooria õppematerjalis (E. Rüstern WW).



Joon 9.3 Hägusa mudeli (kontrolleri) struktuur. Hägusa mudeli puhul kriipsjoonega näidatud tagasiside puudub.

Mudeli (või kontrolleri) väljundmuutujad on üldiselt samuti hägusad. Tavaliselt on mudeli tegelikuks kasutamiseks vaja väljundmuutujale omistada konkreetne arvuline väärtus. Seda etappi nim. häguärastamiseks ja selleks kasutatakse mitmeid keskmistamise meetodeid. Enamkasutatavad on raskuskeskme meetod ja maksimumide keskmise meetod ( kui muutuja näiteks mingis vahemikus omab väärtust 1, siis selle vahemiku keskpunkt). Iga meetod annab mõnevõrra erineva tulemuse, millest nähtub, et hägusloogika meetod ei taga üheselt täpset tulemust, vaid annab ainult ligikaudse tulemuse, sest ka eelduste tõeväärtused on üldreeglina ühest väiksemad.

### 9.3.6 Näide päikesekiirguse intensiivsuse hägusast mudelist

Hägusloogika mudelit on kasutanud M. Paulescu päikesekiirguse intensiivsuse modelleerimisel lähtudes õhutemperatuuri muutustest (Paulescu 2008). Selline modelleerimine võib osutada kasulikuks sellepärast, et õhutemperatuuri on registreeritud tunduvalt suuremas hulgas ilmavaatluspunktides kui päikesekiirguse intensiivsust. Kiirguse intensiivsuse on aga oluline näiteks päikesepaneelidel põhinevate energiasüsteemide projekteerimisel.

Vaatleme artiklil (Paulescu 2008) põhinevat, kuid lihtsustatud näidet.

Mudeli koostamisel on esimeseks etapiks sisendite hägustamine. Antud juhul on esimeseks sisendmuutujaks maksimaalne ööpäevane temperatuuri muutus  $\Delta T$  (absoluutväärtusena  $|\Delta T|$ ).

Meie näites omab see muutuja kolm lingvistilist väärtust: väike temperatuuri muutus  $\Delta T_1$ , keskmine muutus  $\Delta T_2$  ja suur muutus  $\Delta T_3$ . Sisendmuutuja  $\Delta T$  kuuluvus hägusatesse hulkadesse  $\Delta T_1$ ,  $\Delta T_2$  ja  $\Delta T_3$  on näidatud joon 9.4. Kui  $\Delta T = 13 \text{ }^\circ\text{C}$ , siis kuulub ta liikmelisusega 0,7 hägusasse hulka  $\Delta T_2$  ja liikmelisusega 0,3 hägusasse hulka  $\Delta T_3$ . Originaalartiklis (Paulescu 2008) on suurema täpsuse saavutamiseks temperatuuri muutust kirjeldavale sisendile omistatud 8 võimalikku lingvistilist väärtust.

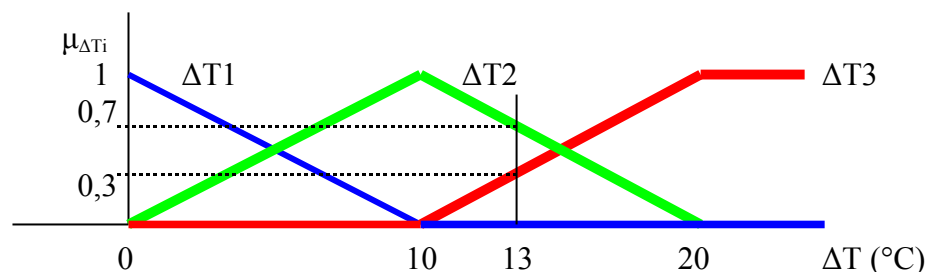
Teiseks sisendmuutujaks on aasta-aeg, mille jaoks on kaks võimalikku lingvistilist väärtust: suvi (S) või talv (T). Kevad ja sügis moodustuvad pideva üleminekuna suve ja talve vahel (joon 9.5).

Toodud graafiku alusel aasta 114 päev (24 aprill) kuulub hägusasse hulka S (suvi) liikmelisusega 0,6 ja hägusasse hulka T (talv) liikmelisusega 0,4.

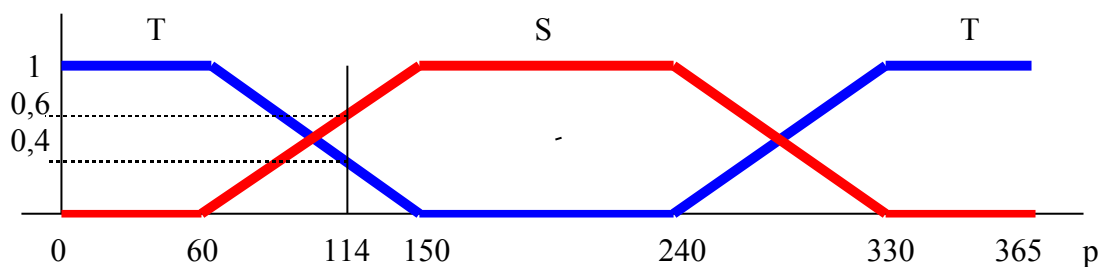
Väljundmuutujaks on selgusindeks SI (*clearness index*). See on maapinnale langeva päikeseenergia suhe maksimaalselt võimalikku (s.t kiirgusenergiasse atmosfääri ülempiiril). Modelleerimisel võib ka seda muutujat iseloomustada lingvistiliste terminitega. Olgu meie näites 3 terminit: tugev pilvitus (SI1), vahelduv pilvitus (SI2) ja selge taevas (SI3). Vastavate hägusate hulkade liikmelisused on näidatud joon 9.6. Originaalartiklis (Paulescu 2008) on väljundmuutujale omistatud 8 erinevat lingvistilist väärtust.

Mudeli aluseks on ekspertotsustused, näiteks kujul:

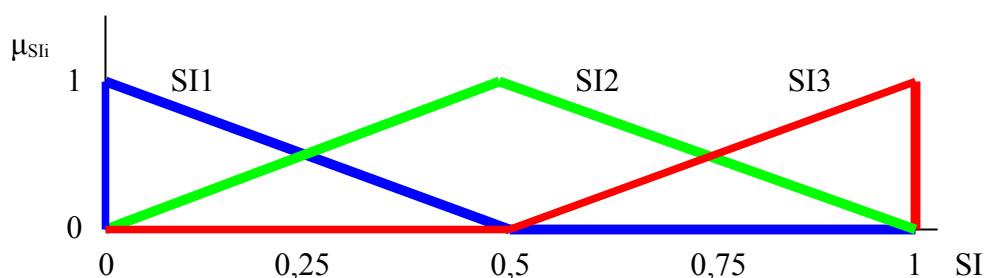
Kui ööpäevane temperatuuri muutus on suur ( $\Delta T3$ ) ja on suvi (S), siis taevas on selge SI3).



Joon 9.4 Sisendmuutuja  $\Delta T$  kuuluvus hägusatesse hulkadesse  $\Delta T1$  (väike muutus),  $\Delta T2$  (keskmine muutus) ja  $\Delta T3$  (suur muutus).



Joon 9.5 Teatud järjekorranumbriga päeva kuulumine hägusatesse hulkadesse T (talv) ja S (suvi). Tegemist on lihtaastaga. Päev järjekorranumbriga 114 on 24. aprill.



Joon 9.6 Selgusindeksi kuulumine hägusatesse hulkadesse SI1 (tugev pilvitus), SI2 (vahelduv pilvitus) ja SI3 (selge ilm).

Meie näite puhul on vajalikud 6 ekspertotsustust KUI- SIIS tingimuslausetena (kolme sisendoleku jaoks mõlema aastaaja puhul). Originaalartiklis (Paulescu 2008) toodud muutujate jaotuse puhul on vajalikud 16 ekspertotsustust. Need tuleks teha antud maakoha jaoks vaatlusandmete põhjal.

Järgnevalt arvutame hägusa mudeli põhjal selgusindeksi 24. aprilli jaoks, kui  $\Delta T = 13 \text{ }^\circ\text{C}$ . Selline temperatuuri muutus kuulub hägusatesse hulkadesse  $\Delta T2$  ja  $\Delta T3$ . 24-nda aprilliga seotud aastaeg kuulub hägusatesse hulkadesse T ja S (joon 9.5). Seega mõjutavad lõpptulemust 4 ekspertotsustust. Oletame, et need on sellised, nagu on näidatud joon 9.7.

Esimene otsustus tehakse kahe eelduse põhjal, mille tõesusastmed on vastavalt 0,7 ja 0,6. Otsustuse

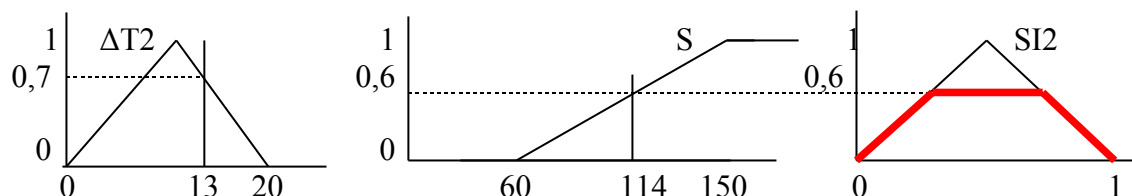
tõesusaste ei saa olla suurem, kui on kõige väiksema tõesusastmega eeldusel. Seega on otsustuseks, et selgusindeks kuulub hägusasse hulka SI2, kuid arvesse tulevad ainult need SI2 väärtused, mis on väiksema tõesusastmega kui 0,6 (punase joone alune osa).

Analoogiliselt tekib teise ekspertotsustuse tulemusena selgusindeksi hinnanguks hägusa hulga SI3 see osa, mille tõesusaste on väiksem kui 0,3.

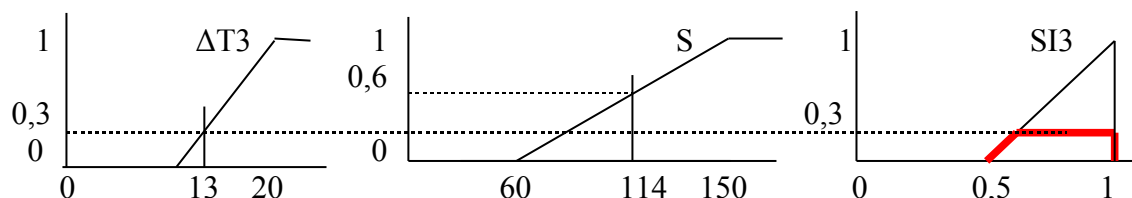
Resulteeriv selgusindeksi hinnang hägusa hulgana leitakse kui kõigi nelja otsustuse alusel leitud hägusate hulcade ühend.

Modelleerimise viimaseks etapiks on häguarastamine.

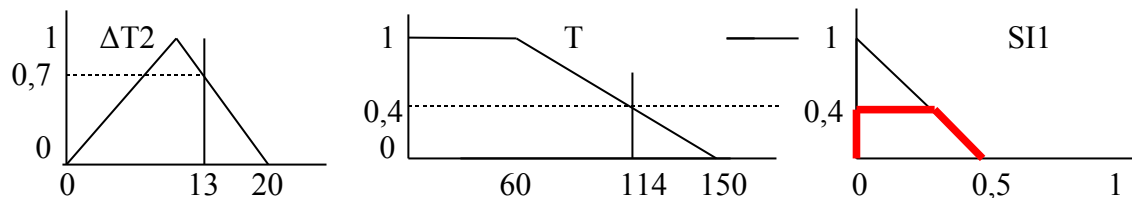
1) Kui temp. muutus on keskmine ( $\Delta T_2$ ) ja on suvi (S), siis on 24. aprillil vahelduv pilvitus(SI2).



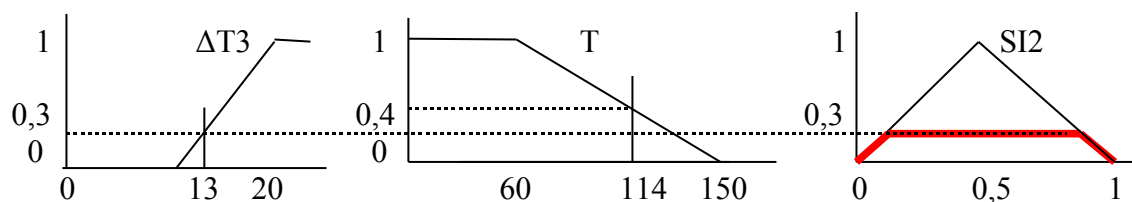
2) Kui temp. muutus on suur ( $\Delta T_3$ ) ja on suvi (S), siis on 24. aprillil ilm selge (SI3).



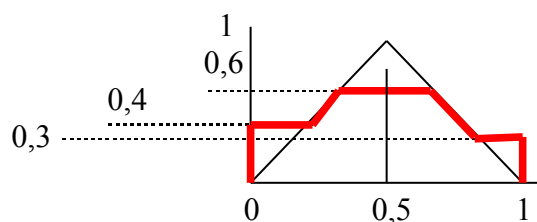
3) Kui temp. muutus on keskmine ( $\Delta T_2$ ) ja on talv (T), siis on 24. aprillil tugev pilvitus(SI1).



4) Kui temp. muutus on suur ( $\Delta T_3$ ) ja on talv (T), siis on 24. aprillil vahelduv pilvitus (SI2).



Hägus väljundmuutuja komponentide ühendina



Joon 9.7 Hägusa väljundmuutuja moodustamine üksikute tingimuslausete põhjal moodustatud komponentide ühendina



Nagu oli juba öeldud p 9.3.5, on üheks enamlevinud häguarastamise meetodiks raskuskeskme meetod. Tuleks leida joon 9.7 lõpptulemusena saadud kujundi raskuskese, mis annab selgusindeksi väärtuseks veidi alla 0,5. Kui aga arvutada väljund maksimumväärtuste keskmise järgi, saaksime tulemuseks täpselt 0,5. See tähendab, et peaaegu pool maksimaalselt võimalikust päikeseenergiast jõuab maapinnani.

See tulemus on saadud vaadeldava maakoha jaoks vaatlustest tuletatud ekspertotsustuste alusel. Hägusa mudeli saamiseks ei ole vaja uurida väljundmuutuja ja teda mõjutavate tegurite vahelisi füüsikalisi seoseid.

### 9.3.7 Teisi näiteid hägusloogika kasutamisest Maa-teadustes

Teadusesse jõudis hägusloogika meetod mõnevõrra hiljem kui hägusatesse kontrolleritesse, sest teaduse üheks eesmärgiks on tavaliselt peetud täpsust. Siiski on viimasel aastakümnel ka hägusa loogika loodusteadusalaste rakenduste hulk jõudsalt kasvanud.

R. V. Demicco on kasutanud hägusloogika meetodit stratigraafilisel modelleerimisel, sealhulgas on uuritud Kalifornias Surmaorus (*Death Valley*) maastikutüübi ja settekihtide sõltuvust sademete hulgast ja temperatuurist (Demicco 2004).

I. Bogardi jt on kasutanud hägusloogika mudelit põuaindeksi modelleerimisel, mis võimaldab ennustada sademete hulka sõltuvalt kliimatüübist (Bogardi jt 2004). Uuritud on erinevaid piirkondi: Arizona, Nebraska, Saksamaa ja Ungari.

Chongfu Huang on kasutanud hägusat loogikat maavärinate uurimisel (Huang 2004). Kuigi maavärinate ennustatavus tänapäeval on vaieldav, on mitmed uurijaid (enamasti Hiinast ja Jaapanist) täheldanud mitmeid maavärinatele eelnevaid nähtusi. Ohuteguriteks võivad olla näiteks radooni hulga muutus maapinnas või veetaseme muutus kaevudes.

Hägusloogika mudelit on kasutatud sinivetikate õitsengu põhjuste uurimiseks Läänemeres (Laanemets jt 2006).

### Viited kirjandusele

**Bogardi I., A. Bardossy, L. Duckstein, R. Pongrasz** (2004) Fuzzy Logic in Hydrology and Water Resources. Kogumikus: Fuzzy Logic in Geology, toim R. V. Demicco, G. J. Klir, Elsevier Academic Press, lk 153 – 190.

**Demicco R. V.** (2004) Applications of Fuzzy Logic to Stratigraphic Modeling. Kogumikus: Fuzzy Logic in Geology, toim R. V. Demicco, G. J. Klir, Elsevier Academic Press, lk 121 – 151.

**Huang C.** Fuzzy Logic and Earthquake Research. Kogumikus: Fuzzy Logic in Geology, toim R. V. Demicco, G. J. Klir, Elsevier Academic Press, lk 239 – 274.

**Jürimäe E.** (1965) Hulgateoreetilised paradoksid ja matemaatika aluste uurimine. Kogumikus: Matemaatika ja kaasaeg VII, lk 3 – 13, Tartu 1965.

**Klein L.** (1969) Arheoloogia ja füüsika dispuut. Eesti Loodus 1969 nr.6, lk 370 -375, Eesti Loodus 1969 nr 7, lk 425-431.

**Laanemets J., M.-J. Lilover, U. Raudsepp, R. Autio, E. Vahtera, I. Lips, U. Lips** (2006) A fuzzy logic model to describe the cyanobacteria *Nodularia spumigena* blooms in the Gulf of Finland, Baltic Sea. Hydrobiologia, Vol 554 Nr 1 Jan 2006, 31 – 45.

**Lin C.-T., C. S. G. Lee** (1996) Neural Fuzzy Systems. A Neuro-Fuzzy Synergism to Intelligent Systems. Prentice Hall P T R , Upper Saddle River.

**Lowrie W.** (2006) Fundamentals of Geophysics. Cambridge University Press, 7-th Printing.

**Paulescu M.** (2008) Solar Irradiation via Air Temperature Data. Kogumikus: Modeling Solar Radiation at the Earth Surface, toim V. Badescu, Springer Berlin Heidelberg lk 175 – 192.

**Punning J.-M.** (2005) Kuidas hinnata radiosüsiniku meetodit tänapäeval? Eesti Loodus, nr 11, lk 18 – 22.

**Punning J.-M., E. Ilves, A. Liiva** (1969) Kuidas hinnata radiosüsiniku meetodit? Eesti Loodus, nr 11, lk 667-670.

- Raukas A., E. Kaup** (2003) Aasta pole alati olnud aasta. Eesti Loodus, nr 5 lk 18 -21.
- Rüstern E.** (WWW) Süsteemiteooria  
[www.dcc.ttu.ee/Automaatika/LAS/ISS0010/2007/ISS0010-7osa.pdf](http://www.dcc.ttu.ee/Automaatika/LAS/ISS0010/2007/ISS0010-7osa.pdf) (17.02.2010).
- Tamme T., T. Tammet, R. Prank** (2002) Loogika. Mõtlemisest tõestamiseni. Tartu Ülikooli Kirjastus, 2. trükk, Tartu.
- Veski S., A. Heinsalu, K. Kirsimäe** (2002) Kaali meteoriidi vanus ja mõju looduskeskkonnale Saaremaa Piila raba turbaläbilõike uuringu põhjal. Eesti Arheoloogia Ajakiri, **6**, 2, lk 91 -108.

# TEADUSTÖÖ KORRALDUS JA MEETODID

## IRT8860, loengukonspekt 8-10 Heldur Haak

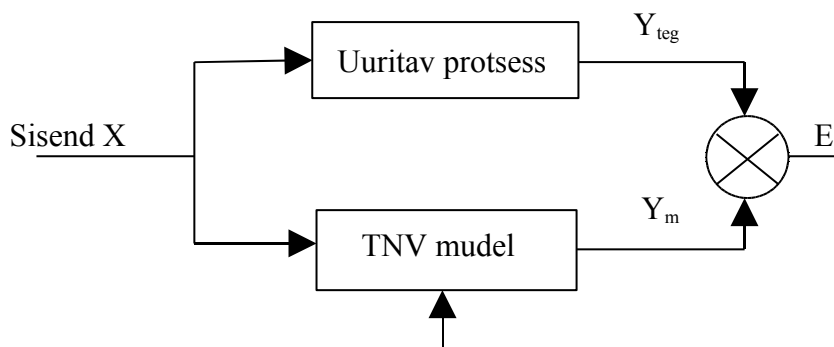
### 10. TEHISNÄRVIVÕRKUDE MEETOD

#### 10.1 Milleks tehisnärvivõrgud Maa-teadustes?

Tehisnärvivõrk (TNV) on andmetöötlussüsteem, mis koosneb suurest hulgast tehisneuronitest. Need tehisneuronid on oma funktsionaalsuse poolest lähedased bioloogilistele neuronitele.

Närvivõrkude kõige tähtsamaks omaduseks on õppimisvõime. Õppimine tähendab tehisneuronite omaduste (sisendite kaalutegurite) või nendevaheliste ühenduste muutmist selliselt, et saada soovitud TNV väljund.

TNV kasutamist keerulise (matemaatiliselt kirjeldamata) protsessi modelleerimisel selgitab joon 10.1.



Joon. 10.1 Matemaatiliselt kirjeldamata protsessi modelleerimine TNV mudeli abil

Rida sisendite väärtusi (treeningjada) antakse paralleelselt protsessi ja TNV mudeli sisendile. Parempoolne ring tähendab võrdlussõlme. Kui mudeli väljund  $Y_m$  erineb tegelikust protsessi väljundist  $Y_{teg}$ , siis tekib veasignaali  $E$ , mis muudab mingeid TNV parameetreid. Õige korrigeerimismetoodika puhul teatud arvu iteratsioonide järel viga kaob. Tänu oma üldistusvõimele toimib TNV mudel üldiselt õigesti ka uute, treeningjadas mitte sisalduvate sisendi väärtuste puhul. Ülal kirjeldatud modelleerimismetoodika on analoogiline identifitseerimisülesandele automaatikas, mida on kirjeldanud E. Petlenkov (Petlenkov 2002, lk 17 - 18).

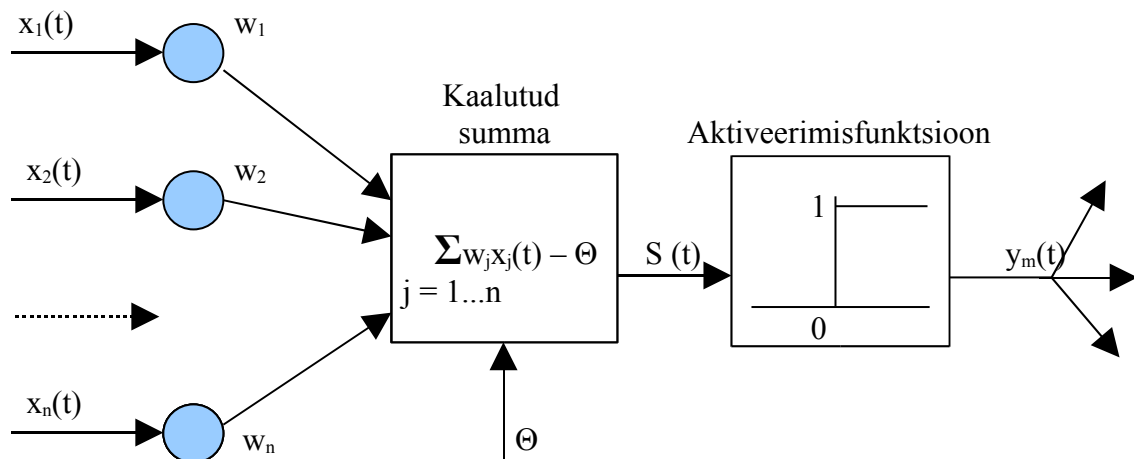
#### 10.2 Bioloogiline ja tehisneuron

Bioloogiline neuron on närvirakk, mis koosneb kolmest põhilisest osast: rakukeha ehk soma, (milles sisaldub ka rakutuum), dendriidid ja akson. Dendriidid on puukujuliselt hargnevad närvikiud, mille abil neuron saab nõrkade elektriimpulsside näol signaale teistelt neuronitelt. Akson (ehk neuriiit) on närvikiudude kimp, mis kannab neuroni väljundsignaali ja hargneb paljudeks kiududeks. Erutussignaali kantakse ühelt neuronilt teisele väikeste kolvikujuliste organite ehk sünapsite abil. Inimajus on umbes  $10^{11}$  neuronit ja iga neuroni kohta umbes 5 kuni 10 tuhat sünapsit. Tehisneuroni struktuuri pakkusid välja W. McCulloch ja W. Pitts 1943. a, seda kutsutakse ka M-P neuroniks (Lin ja Lee 1996, lk 206). Tehisneuronitest koosnevat tehisnärvivõrku nim. pertseptroniks ja selle loojaks oli F. Rosenblatt (1957 a). Lihtsaimal juhul võib pertseptron koosneda ka ühestainsast tehisneuronist.

Tehisneuronil on  $n$  sisendsignaali  $x_1 \dots x_n$  ja need summeeritakse erinevate kaaluteguritega  $w_1 \dots w_n$  (joon 10.2).

Neuroni sisendite kaalutud summat võrreldakse tuginivooga  $\Theta$ , st kontrollitakse, kas see on väiksem

või suurem kui  $\Theta$ . Kaalutud summa ja tuginivoo vahe antakse neuronil lõppastmele, mille karakteristik (aktiveerimisfunktsioon) võib üldjuhul olla mittelineaarne.



Joon 10.2 M-P tehisneuron (lihtsaim pertseptron)

Lihtsaimaks aktiveerimisfunktsiooniks on releetoimeline funktsioon:

$$y_m(t) = 1 \quad , \text{ kui } S(t) = \sum_{j=1 \dots n} w_j x_j(t) - \Theta > 0 \quad (10.1)$$

$$y_m(t) = 0 \quad \text{muudel juhtudel.} \quad (10.2)$$

Sel juhul on tehisneuronil ainult kaks väljundolekut: 1 (aktiveeritud) ja 0 (aktiveerimata). Üldjuhul võivad tehisneuronid olla ka pideva väljundiga. Üldiselt see sõltuvus on mittelineaarne, erijuhul aga võib teatud vahemikus olla ka lineaarses sõltuvuses kaalutud summa ja tuginivoo vahest  $S$ .

### 10.3 TNV õpetamise näide

Nagu oli juba nimetatud p 10.1, õppimine tähendab kaalutegurite  $w_1 \dots w_n$  (joon 10.2) muutmist selliselt, et TNV väljund langeks kokku tegeliku protsessi väljundiga. Tavaliselt omistatakse alguses kaaluteguritele kas nullväärtused või väikesed juhuslikud väärtused. Kui mingil taktil ilmneb mudeli viga, siis enne järgmist takti suurendatakse (või vähendatakse) kaalutegureid võrdeliselt teatud konstandiga, mida võib nimetada õppimiskiiruseks.

Vaatleme lihtsat näidet, kus uuritava protsessi osa täidab loogikaelement, millel on kaks binaarset sisendit ja üks väljund. Olgu see meie näites VÕI-element, kuid seda (loogilist funktsiooni) mudeli loomiseks meil pole vaja teada. TNV on realiseeritud ühel joon 10.2 näidatud pertseptronil, millel on kaks sisendit. Meie ülesandeks on panna TNV mudel käituma samuti, nagu protsess (loogikaelement), kusjuures mudeli õpetamiseks vajaliku treeningjada kestel me vaatleme loogikaelemendi tegelikku väljundit.

Õpetamise käigus parandatakse kaalutegureid järgnevalt:

$$w_j(t+1) = w_j(t) + \alpha [y_{\text{teg}}(t) - y_m(t)] x_j(t) \quad (10.3)$$

kus  $\alpha$  on õppimise kiirus. Valime  $\alpha = 0,2$ . Mudeli väljund  $y_m$  arvutatakse (10.1) ja (10.2) järgi, kusjuures lävenivooks  $\Theta$  valime 0,5. Mõlema sisendi kaalutegurite algväärtusteks valime nullid. Sisenditele anname korduvalt neljakaupa kõik võimalikud kahe kahendmuutuja väärtuste paarid. Viga E avaldub kujul:

$$E(t) = y_{\text{teg}}(t) - y_m(t) \quad (10.4)$$

Viga E võib omandada väärtused -1, 0 ja 1. Vastavalt vea märgile kaalutegureid kas vähendatakse või suurendatakse. Tulemused esitame tabelis 10.1.

**Tabel 10.1**

Takt	Sisendid		Väljund $y_{\text{teg}}$	Kaalud		Summa $x_1 w_1 + x_2 w_2$	Mudeli välj. $y_m (S > 0,5)$	Viga E $y_{\text{teg}} - y_m$
	$x_1$	$x_2$		$w_1$	$w_2$			
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	1	1	0	0	0	0	1
3	1	0	1	0	0,2	0,2	0	1
4	1	1	1	0,2	0,2	0,4	0	1
5	0	0	0	0,4	0,4	0	0	0
6	0	1	1	0,4	0,4	0,4	0	1
7	1	0	1	0,4	0,6	0,4	0	1
8	1	1	1	0,6	0,6	1,2	1	0
9	0	0	0	0,6	0,6	0	0	0
10	0	1	1	0,6	0,6	0,6	1	0
11	1	0	1	0,6	0,6	0,6	1	0
12	1	1	1	0,6	0,6	1,2	1	0

Viimase 4 takti jooksul( milles sisalduvad kõik võimalikud sisendmuutujate paarid) on viga 0, st mudeli väljund vastab tegeliku protsessi väljundile. Sellepärast pole nendel taktidel ka enam vajadust muuta kaalutegureid. Treeningjada võib lugeda lõppenuks ja edaspidi ennustab mudel täpselt tegeliku protsessi väljundit. Seejuures mudeli häälestamiseks (õpetamiseks) polnud meil vaja teada uuritava protsessi füüsikalist või matemaatilist kirjeldust. Oli vaid vaja jälgida protsessi tegelikku väljundit ja selle alusel korrigeerida kaalutegureid.

Siiski mitte alati ei toimu mudeli õpetamine nii edukalt. Kui ülalkirjeldatud süsteemis asendada modelleeritav VÕI-lüli välistava VÕI-ga (*Exclusive OR, XOR*), mille puhul sisendite paarile 1,1 vastab väljund 0, siis me ei jõua stabiilsete kaaluteguriteni, vaid satume lõpmatusse tsükklisse, mille kestel viga pole alati nullis. Soovitame lugejal seda iseseisvalt järele proovida. Edasi püüame lähemalt uurida, milliste ülesannete puhul on võimalik mudeli loomine joonisel 10.2 näidatud lihtsa pertseptroni baasil.

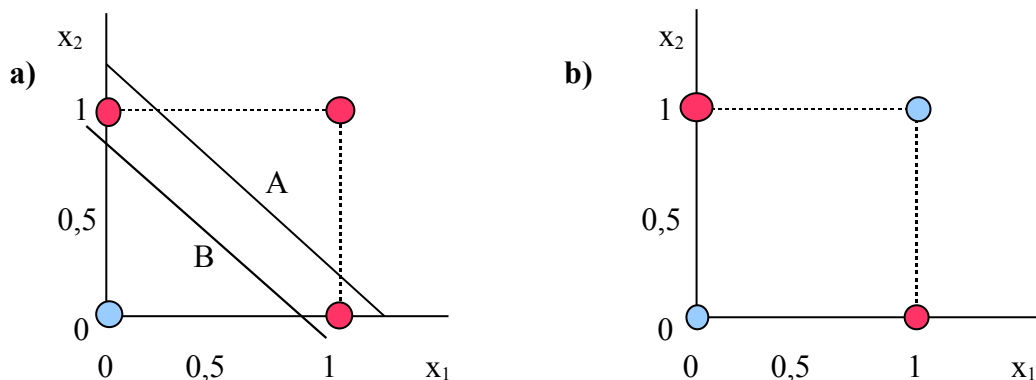
#### 10.4 Lihtsa pertseptroni õpetamise edukusest

Eelmises punktis toodud näites oli kaks sisendmuutujat:  $x_1$  ja  $x_2$ . Mudeli väljundi väärtus sõltus sellest, kas kaalutud summa  $S = x_1 w_1 + x_2 w_2$  oli suurem või väiksem kui 0,5. Kriitiline piir kahe otsustuse vahel vastab võrrandile  $x_1 w_1 + x_2 w_2 = 0,5$ . Kui  $w_1$  ja  $w_2$  on mingid konstandid, siis on see sirge võrrand  $x_1 - x_2$  tasapinnal. Joonisel 10.3a on näidatud selle sirge asend kaalutegurite kahe variandi jaoks:  $w_1 = w_2 = 0,4$  ja  $w_1 = w_2 = 0,6$ .

Kuna sisendmuutujad on binaarsed, siis on kõik 4 võimalikku sisendi olekut näidatud punktadena joonisel 10.3a. Kolme (punase) punkti puhul on väljund  $y_{\text{teg}} = 1$ ,  $x_1 = x_2 = 0$  puhul (sinine punkt) aga  $y_{\text{teg}} = 0$ .

Sisendmuutujate võimalikke olekuid esitav tasapind on lineaarselt eraldatav, kui on võimalik see

tasapind sirgjoone abil jaotada kaheks osaks nii, et joonest ühel pool on  $y_{\text{teg}} = 1$ , teisel pool aga  $y_{\text{teg}} = 0$ . Antud näites kaaluteguritele  $w_1 = w_2 = 0,6$  vastav joon  $0,6 x_1 + 0,6 x_2 = 0,5$  sellise jaotamise teostab. Kui sisendmuutujate ruum (tasapind) on lineaarselt eraldatav, siis on TNV edukas õpetamine lihtsa pertseptroni puhul võimalik. Ülesannet võib vaadelda klassifitseerimisülesandena  $y_{\text{teg}}$  väärtuste järgi.



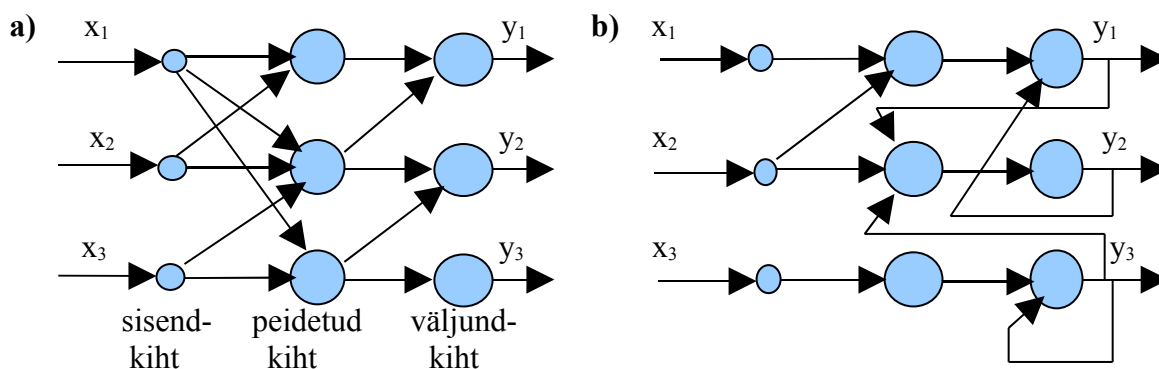
Joon 10.3 a) Sisendmuutujate paari võimalikke olekuid esitava tasapinna lineaarne jaotamine kaheks pooltasapinnaks kahe erineva kaalutegurite paari korral. Sirge A vastab kaaluteguritele  $w_1 = w_2 = 0,4$  ja sirge B kaaluteguritele  $w_1 = w_2 = 0,6$ . Väljundile  $y_{\text{teg}} = 1$  vastavad sisendite väärtused on tähistatud punase ringiga ja väljundile  $y_{\text{teg}} = 0$  vastavad väärtused sinise ringiga. Sirge B tagab  $y_{\text{teg}}$  väärtuste lineaarse eraldamise.

b) Välistava VÕI funktsiooni puhul ei ole  $y_{\text{teg}}$  väärtuste lineaarne eraldamine võimalik.

## 10.5 Mitmekihiline pertseptron

Keerukamad närvivõrgud võimaldavad edukalt lahendada tunduvalt suuremat hulka klassifitseerimis- ja modelleerimisülesandeid kui eelpool vaadeldud lihtne pertseptron.

Keerukad TNV struktuurid moodustatakse paljudest tehisneuronitest, mis on jaotatud kihtidesse (joon 10.4a)



Joon 10.4 a) Kahekihiline otsesuunatud pertseptron, b) Kahekihiline rekurrentne (tagasisidestatud) pertseptron.

Sisendkihis ei toimu informatsiooni töötlust, sisendkihi neuronid on puhvriteks, mis jaotavad sisendsignaale esimese peidetud kihi neuronite vahel. Sellepärast kihtide loendamisel sisendkihti ei arvestata ja joon 10.4 näidatud pertseptronid on kahekihilised.

Peidetud kihi sisendid ja väljundid ei ole otseselt seotud väliskeskkonnaga. Joonisel 10.4 on näidatud üks peidetud kiht, üldiselt neid võib olla ka rohkem.

TNV väljundite arv on määratud neuronite arvuga väljundkihis. Üldiselt TNV väljundite arv ei pea olema võrdne sisendite arvuga.

TNV on täielikult ühendatud, kui iga eelmise kihi igalt väljundilt on olemas ühendused kõigi järgmise kihi neuronite kõigile sisenditele. Joon 10.4 toodud näited ei ole täielikult ühendatud. Üldiselt on õppimise käigus võimalik ka uute ühenduste tekkimine.

TNV on otsesuunatud, kui informatsioon võrgus liigub ainult ühes suunas: sisendite poolt väljundite poole (joon 10.4 a). Kui informatsioon võib liikuda ka tagasi sisendite suunas, on tegemist tagasisidestatud ehk rekurrentse võrguga.

## 10.6 Näiteid TNV rakendustest Maa-teadustes

Punktis 9.3.6 oli toodud näide hägusloogika kasutamisest päikesekiirguse intensiivsuse modelleerimisel temperatuurimõõtmiste põhjal. Sama ülesande lahendamiseks võib edukalt kasutada ka TNV mudelit (Tymvios jt, 2008). Autor on katsetanud seitset erineva struktuuriga TNV varianti, mis sisaldasid 46 kuni 77 neuronit ja 1 või 2 peidetud kihti. Tulemuste ruutkeskmine viga oli vahemikus 5% kuni 10%. Seejuures treeningperiood (õppimisfaas) peab olema küllalt pikk (mitu aastat). Mudel sõltub katsetuste geograafilisest kohast, tulemuste ülekandmisel ühest kohast teise tuleb olla ettevaatlik. Ei ole vaja põhjendamatult suurendada mudeli keerukust. Peidetud kihtide arvu liigne suurendamine ei paranda tulemuste täpsust, kuid muudab aeglasemaks õppimisprotsessi. Rohkem kui kahe peidetud kihiga mudelid töötavad hästi õppimisfaasis esinenud sisendite väärtuste korral, kuid tunduvalt halvemini sisendite mingite teistsuguste kombinatsioonide puhul. Erinevate meetodite kasutamist päikesekiirguse intensiivsuse modelleerimisel on uuritud töös (Santamouris jt 1999). Võrreldud on atmosfäärimudelil põhinevat determineeritud meetodit ning katseandmetel põhinevaid TNV ja hägusloogika mudeleid. On leitud, et TNV ja hägusloogika mudeleid võib edukalt kasutada suveperioodil, kuid talveperioodil annab atmosfäärimudel paremaid tulemusi.

## 10.7 Hägusloogika ja TNV meetodite ühendamise

Hägusloogika ja TNV meetodite ühendamisega püütakse saavutada süsteemi, milles oleksid ühendatud mõlema meetodi tugevad küljed, eelkõige tavakeele mõistete käsitlemine hägusate hulkadena, „KUI...SIIS“- tuletamise reeglibaas ja TNV õppimisvõime. Selline ühendamine on võimalik kolmel viisil (Lin ja Lee, 1996), lk 478 – 702.

1. **Närvivõrkudel põhinevad hägusad süsteemid.** Need on hägusad süsteemid, millesse kuuluvate komponentide realiseerimiseks on kasutatud tehisnärvivõrke (pertseptone). Närvivõrkude õppimisvõime lubab selliseid süsteeme muuta adaptiivseks, st optimeerida treeningperioodi jooksul närvivõrkude parameetreid.
2. **Hägusloogikal põhinevad närvivõrgu mudelid.** Need on närvivõrgud, millesse hägususe sissetoomine on võimalik nii neuroni tasemel (hägusad neuronid) kui ka struktuuri tasemel (hägusad pertseptonid). Hägus neuron võib olla mittehägusate sisenditega, kuid tema kaalutegurid on asendatud liikmesfunktsioonidega.
3. **Närvivõrgu-hägusloogika hübriidsüsteemid.** Need on süsteemid, milles on kaks iseseisvat alamsüsteemi. Reeglina anduritelt saadava sisendinformatsiooni töötlemine toimub TNV alamsüsteemis, kuid otsustus- ja juhtimissignaali formeerimine toimub hägusloogika alamsüsteemis.

On olemas tarkvaralised vahendid hägusate mudelite, sealhulgas adaptiivsete neurohägusate mudelite loomiseks ( Fuzzy Logic Toolbox, <http://www.mathworks.com/products/fuzzylogic/> ).

## 10.8 Hägusus kui paradigma muutus

Sajandeid on teaduse eesmärkideks olnud täpsus ja loogiline vasturääkimatus. Seda nii loodusnähtuste kirjeldamiseks vajaminevate mõõtmiste täpsuse suhtes kui ka neid nähtusi kirjeldavates loogilistes arutlustes.

Lõppenud 20. sajandil tekkisid siin olulised probleemid. Kvantmehaanikas selgus, et teatud muutujate paaride (näiteks koordinaadi ja impulsi) üheaegne täpne määramine pole võimalik. Üldiselt mistahes reaalne mõõtmine on seotud mõõtevigadega, mida võib küll vähendada, kuid mitte täielikult kaotada. Punktis 9.2.2 nimetatud Gödeli teoreemid ning hulgateoreetilised paradoksid näitasid, et mingi süsteemi vasturääkimatuse tõestamine võib olla lahendamatuks probleemiks.

Tõenäosusteooria on edukalt kasutatav statistilisel mõõtmiste ebatäpsuse analüüsil. Kauga arvati, et tõenäosusteooria suudab haarata kõiki ebatäpsusega seotud probleeme.

Siiski on L. Zadeh loodud hägusate hulkade teooria (1965) loonud ka uue ebatäpsuse ja ebakindluse käsitluse, mis on üldisem statistilisest tõenäosusest.

Hägusloogika võimaldab kasutada teadmisi, mida väljendatakse tavakeeles kasutatavate ebatäpsete terminite abil. Seejuures sageli ebatäpsus ei tulene informatsioonipuudusest, vaid just terminite endi ebatäpsusest.

Hägusloogikat ja TNV meetodeid võib ka käsitleda kompromissina täpsuse ja lihtsuse vahel. Me peame leppima asjaoluga, et hägusloogika reeglite järgi tehtud otsustused ei ole alati täpsed, kuid probleemi täpne lahendamine oleks olnud palju töömahukam ja aeglasem. R. V. Demicco ja G.J. Klir loevad hägusloogika aktsepteerimist paradigmanihkeks teaduses (Demicco, Klir 2004).

## **11. PUBLITSEERIMINE JA AUTORIÕIGUS**

### **11.1 Publitseerimine: kas, millal, miks ja kus?**

Magistritöö eksperimentaalse osa täitmisel on soovitatav pidada katse- või vaatluspäevikut. Ka juhul, kui töö sisuks on mingite varem kogutud andmete analüüs (näiteks statistiline), on kasulik päevikuna fikseerida, mida on tehtud ja kus (millistes failides) on lähteandmed, arvutused ja tulemused. Kui uurimust tehakse mingi teadusprojekti raames, on nimetatud päevikud aluseks teadusprojekti aruande vormistamisel. Selline aruanne (selle puudumisel päevik) on ka lähtematerjaliks dissertatsiooni vastavate osade kirjutamisel.

Publitseerimine tähendab avalikustamist. Öeldakse, et teadusuuring lõpeb töö tulemuste avalikustamisega. Avalikustamine on ka dissertatsiooni kaitsmine, kuigi suhteliselt kitsale kuulajate ringile. See ring laieneb tunduvalt, kui raamatukogule antakse dissertatsiooni elektroonne variant.

Kui magistritöös on olulisi ja uudseid tulemusi, võib pidada otstarbekaks ka nende tulemuste avaldamist trükis teadusartiklina. Teadusartiklit iseloomustab oskus esitada materjali lakooniliselt, kuid ometi selgelt ja täpselt. Ka see oskus nõuab harjutamist. Mitmed ülikoolid, sealhulgas Tartu Ülikool loevad magistritöö tulemuste publitseerimist soovitavaks (Bachmann 2004, lk 310).

Siiski tuleb töö tulemuste avalikustamisel (nii väitekirja kui artiklina) olla tähelepanelik.

Esiteks ei tohi kiirustades avaldada kontrollimata tulemusi. Samuti peab autor olema kindel, et saadud tulemused on uudsed. Soovitatav on töö tulemused algselt läbi arutada vastava uurimisprojektiga seotud töögrupis või instituudis. Kriitilistesse märkustesse tuleb suhtuda tähelepanelikult ka siis, kui need tunduvad ebaõiglasel. Muidugi võivad ka kritiseerijad eksida, lõppotsuse võtab vastu ikkagi autor. Kindlasti tasub nõu pidada juhendajaga.

Teiseks peab avaldaja olema kindel, et ta on töö täieõiguslik autor. Autoriõigustest tuleb veel juttu edaspidi. Kui autor on aga kasutanud kellelki teiselt isikult saadud andmeid või vahendeid, siis tekib ka sellel teisel isikul õigus tulemuste avaldamise suhtes oma tingimusi esitada.

Kui töö on seotud tehniliste seadmete või meetoditega (tehnilistel erialadel), siis tuleb arvestada, et pärast publikatsioonis kirjeldamist loetakse need seadmed või meetodid tuntuks ja ka publikatsiooni



autor ise ei saa nendele hiljem taotleda patenti või registreerimist kasuliku mudelina. Magistritöö tulemuste trükk avaldamine on otstarbekas ka juhul, kui magistrand on otsustanud jätkata teadustegevust samas valdkonnas ka pärast magistrakraadi kaitsmist, sest publikatsioonid on üheks kõige olulisemaks teadlase produktiivsust iseloomustavaks näitajaks.

Kui on tehtud otsus publitseerimise kasuks, järgneb artikli liigi ja väljaande valik.

Eestikeelsete teadusväljaannete valik on piiratud ja sõltub ainevaldkonnast. Lihtsaim variant oleks kas mingi oma ülikooli või mõne muu vabariikliku teadusasutuse poolt väljaantav artiklite või konverentsi materjalide kogumik, kuigi konkreetse eriala jaoks sobiva temaatikaga konverentsi ei toimu ja kogumikke ei ilmu mitte kuigi sageli.

Vaevarikkam, kuid ka hinnatum variant on publikatsioon mõnes rahvusvaheliselt tuntud kirjastuse poolt väljaantavas teadusajakirjas. Siiski tuleb arvestada, et on suur tõenäosus oma artikkel negatiivse hinnanguga tagasi saada. Teadlane peab siiski õppima kriitikaga harjuma. Tuntud teadusajakirjad saadavad tagasi rohkem kui pooled nendele saadetud artiklitest. Nagu märgib T.

Bachmann, on ka mõned tippteadlased kogunud mõne oma käsikirja korduvat tagasisaatmist (Bachmann 2004, lk 183). Isegi kui artikkel ilmub, on uurimusliku teadusartikli ilmumise viivitus, mis sisaldab materjali korduva parandamise, tavaliselt 1 -2 aastat (Bachmann 2004, lk 143).

Kogu maailmas ilmuvate professionaalsete teadusajakirjade arvu hinnatakse olevat vahemikus 200 000... 300 000, mis tähendab ligikaudu 4 000 000 uut teadusartiklit aastas (Ebel jt 2004, lk 130).

## 10.2 Nõuded teadusartiklile

Iga ajakiri esitab (kas koduleheküljel või ajakirja lehekülgedel) lühemad või üksikasjalisemad nõuded autoritele. Neid tuleb täpselt järgida, sest nende nõuete mittetäitmine oleks esimeseks tagasilükkamise põhjuseks. Nõuded on erinevad, kuid mõned põhilised punktid on järgmised.

1. Autor kinnitab, et tal on kõik õigused esitatud käsikirja avaldamiseks.
2. Autor kinnitab, et käsikirja esitatud kujul pole seni täielikult ega osaliselt avaldatud. Käsikirja pole ka teistele ajakirjadele esitamiseks saadetud ja, juhul kui artikkel võetakse vastu avaldamiseks, siis seda ka edaspidi teistele ajakirjadele ei saadeta.
3. Mitmed kirjastused nõuavad õigust ka artikli korduvaks väljaandmiseks ja tõlkimiseks.

Kuigi nõuded detailides on erinevad, on välja kujunenud teadusartikli üldine struktuur järgmine. Artikkel algab lühikese kokkuvõttega (summary), milles tuuakse esile töö eesmärk, antakse kasutatud meetodika lühike iseloomustus, esitatakse kokkuvõtlikult põhilised uurimistulemused ja neist tuletatud järeldused. Kokkuvõtte lõpus tuuakse sageli võtmesõnad (key words). Sellise kokkuvõtte põhjal saab lugeja kiiresti otsustada, kas antud artikkel teda huvitab.

Järgnevad sissejuhatus, sisulised osad, kokkuvõte ja viidatud kirjanduse loetelu. Nende osade sisu on sarnane magistratöö vastavatele osadele ( vt p 4.11 Töö tegelik kirjutamine), kuid silmas tuleb pidada esituse lakoonilisust. Magistratöö tulemuste vormistamine artiklina tähendab materjali selekteerimist, sellest kõige olulisema väljatoomist ja selle materjali olulisust tuleb ka artiklis põhjendada.

Väga oluline on erialaliselt täpne ajakirja valik. Ebasobiva ajakirja valik on üks tavalisemaid artikli tagasilükkamise põhjuseid. Teiseks levinud põhjuseks on, et artiklist ei selgu tema oluline panus teadusesse (Bachmann 2004, lk 211). Mõnikord võivad tagasisaatmist põhjustada ka keelelised ebatäpsused, sh teadusterminoloogia ebatäpsused.

Tuntumad teadusajakirjade ja teadusraamatute kirjastused on näiteks Elsevier Science, Springer Verlag ja John Wiley & Sons. Mida tuntum on kirjastus, seda suurem on autorite huvi oma töö just selle kirjastuse ajakirjas või kogumikus esitada ja seda rangemad on toimetajad. Nagu soovib T. Bachmann, tuleks avaldada nii mainekas ajakirjas kui vähegi võimalik, samas aga jäädes realistiks oma töö taseme ja panuse suhtes (Bachmann 2004, lk 224). On teadlasi, kes kritiseerivad eelretsenseerimisega ajakirjade süsteemi ja soovivad üle minna vabale online-publitseerimisele. Eelretsenseerimisega süsteemi puuduseks on peale suure avaldamise viivituse ka võimalik

retsensentide tendentslikkus ja halvustav suhtumine konkurentidesse.

Siiski on eelretsenseerimisega ajakirjad jäänud teaduskirjanduses juhtpositsioonile, sest neil on ka olulisi eeliseid. Mitmekordse parandamise käigus vastavalt toimetajate ja retsensentide märkustele muutub artikkel üldjuhul paremaks. Ka lugeja jaoks on eelretsenseerimine garantiiks, et antud ajakiri ei sisalda küsitava väärtusega või vigaseid artikleid.

### 10.3 Lühidalt autoriõigusest

Autoriõigus (edaspidi AÕ) käsitleb autori õigusi seoses kirjandus- kunsti- ja teadusteostega. AÕ on üheks intellektuaalse omandi liigiks (teiseks liigiks on tööstusomand).

Eesti autoriõiguse seadus (edaspidi : AÕS) on avaldatud Elektroonilises Riigi Teatajas (Autoriõiguse seadus WWW) ja ka õigusaktide kogumikus (Pisuke 2007).

Autoriõigusega on kaitstud teaduslikud ja populaarteaduslikud kirjutised (artiklid, aruanded), aga samuti ka arvutiprogrammid, mida kaitstakse nagu kirjandusteoseid. Kaitstud on ka suulised loengud ja ettekanded (AÕS §4).

Ei kaitsta ideid, teooriaid, meetodeid ega leiutisi, mida teoses on selgitatud või kirjeldatud (AÕS §5). Seega AÕS kaitseb vormi, väljendusi, mitte aga nende kaudu esitatud sisu. Ei keelata näiteks artiklis kirjeldatud meetodi kasutamist, küll aga selle artikli teksti paljundamist või väljaandmist oma nime all.

AÕ teosele tekib teose loomisega, st ei nõuta registreerimist ega muid formaalsusi (AÕS §7). AÕ tekib nii avalikustatud kui avalikustamata teostele.

AÕ sisu moodustavad autori isiklikud õigused ja autori varalised õigused. Isiklikud õigused on autori isikust lahutamatud ja ei ole üleantavad. Varalised õigusi võib üle anda kas tasuta eest või tasuta (AÕS §11).

Olulisemad isiklikud õigused on (lühendatult AÕS §12 järgi):

- õigus esineda avalikkuse ees teose loojana,
- õigus autorinime või varjunime (pseudonüümi) kasutamiseks,
- teha ise või lubada teistel teha teoses endas ja tema pealkirjas muudatusi,
- lubada oma teosele lisada teiste autorite tehtud illustratsioone, ees- ja järelsõnu, selgitusi või kommentaare,
- vaidlustada kooskõlastamata tehtud moonutusi.

Olulisemad varalised õigused on ( lühendatult AÕS §13 järgi):

- õigus lubada või keelata reprodutseerida oma teost mis tahes viisil,
- levitada oma teost või selle koopiaid,
- tõlkida oma teos,
- teost avalikult esitada.

Autor saab varaliste õiguste üleandmiseks anda loa ehk litsentsi (liht- või ainulitsentsi). Lihtlitsents tähendab, et autor jätab ka endale samad õigused, mis ta üle andis. Ainulitsents tähendab litsentsi omaniku ainuõigust teosele.

Autori nõusolekuta ja autoritasu maksmata on lubatud õiguspäraselt avaldatud teose refereerimine ja tsiteerimine motiveeritud mahus. Seejuures tuleb jälgida tsiteeritava (refereeritava) teose mõtte õige edasiandmise kohustust. Tsitaadi või refereeringu juures tuleb ära näidata teose autor ja pealkiri ning avaldamisallikas (AÕS §18, 19).

Samuti on lubatud õppe- ja teaduslikel eesmärkidel kopeerida artiklit ajakirjast või mingit katkendit õpikust või monograafiast. Kopeerimine ei tohi omada ärilisi eesmärgi. Ei ole lubatud kopeerida arvutiprogramme või andmebaase (siin on siiski mõned erandid).

Teose autoriks on üldjuhul füüsiline isik (isikud), kes on selle teose loonud, teatud juhtudel ka tööandja, juriidiline isik või riik. Autoriõigus läheb üle autori pärijatele ja kehtib kuni 70 a pärast autori surma (AÕS §28, 38).

Kui teos on loodud ühise loomingulise tegevusega, kuulub ka autorsus autoritele ühiselt. Suhted

autorite vahel, sh autoritasu jagamises, määratakse kindlaks autorite vahelise kokkuleppega. Autorite konsulteerimine (ka üliõpilastööde juhendamine) ja tehnilise abi osutamine autoritele ei ole aluseks ühise autorsuse tekkimisele (AÕS §30).

Kui autor töötab töölepingu alusel ja teos on loodud töökohustuste täitmise korras, siis kuulub talle autoriõigus sellele teosele, kuid autori varalised õigused teose kasutamiseks tööülesannetega ette nähtud eesmärgil ja piirides lähevad üle tööandjale, kui lepingus ei ole ette nähtud teisiti (AÕS §32). Üliõpilaseks olemine ei tähenda töötamist töölepingu alusel, seda võib aga tähendada osalemine ülikooli teadusprojektides. TTÜ töötajate jaoks täpsustab autoriõiguse alaseid suhteid Tallinna Tehnikaülikooli autoriõiguse haldamise kord.

#### **10.4 Leiutised, patendid, kasulikud mudelid**

Leiutised ja nendega seotud kaitsedokumendid kuuluvad tööstusomandi valdkonda.

Loodusteadused ei ole küll otseselt tööstusomandiga seotud, kaudselt aga siiski. Maavarade uurimine on seotud nende võimaliku tööstusliku kaevandamisega. Tööstuse surve keskkonnale muutub üha tugevamaks ja sellega seoses muutub üha olulisemaks uurida kasutatavaid tootmismeetodeid (näiteks energia tootmisel) keskkonnasõbralikkuse seisukohalt. Samuti võib osutada vajalikuks uurida loodusteadustes kasutatavat aparatuuri ja mõõteriistu. Selliste probleemide puhul võib väärtuslikku informatsiooni leida patendikirjeldustest.

Leiutiste õiguskaitse süsteem on igas riigis mõnevõrra erinev. Eestis käsitlevad leiutiste õiguskaitset patendiseadus (Patendiseadus WWW) ja kasuliku mudeli seadus (Kasuliku mudeli seadus WWW). Patendiseaduse järgi võib leiutise objektiks olla seade, meetod, aine või nende kombinatsioon. Leiutis on patentne, kui see on uus, omab leiutustaset ja on tööstuslikult kasutatav. Leiutis on uus, kui see erineb seni teadaolevast tehnika tasemest. Leiutis ei tohi vastava ala asjatundja jaoks olla senisest tehnika tasemest endastmõistetavalt tuletatav.

Patent on riigi poolt leiutajale või sellele, kellele leiutaja on oma õigused üle andnud, omistatud õigus keelata teistel patendi kehtivusaja jooksul professionaalsel tasemel valmistada, importida või pakkuda müügiks leiutatud toodet või rakendada leiutatud meetodit (Kivi-Koskinen 2002).

Patendisüsteemi põhimõtteks on , et teatud aja jooksul (reeglina kuni 20 aastat ) võiks leiutaja saada oma leiutise eest õiglase tasu (vastavalt leiutise väärtusele), tavaliselt litsentside müügi teel, ja hiljem on leiutis kõigile vabalt kasutatav.

Kasuliku mudeli, mida nim. ka väikepatendiks, rakendusala ja kaitse sisu on samad, mis patendil.

Kasulikult mudelilt nõutav leiutustase on madalam. Kui patendiga kaitstav leiutis peab oluliselt erinema seni tuntud tehnika tasemest, siis patent peab sellest vaid selgelt erinema. Kasulikule mudelile ei tehta patendiameti poolt uudsuse ekspertiisi, vaid ainult kontrollitakse registreerimiseks vajalike vormistuslike nõuete täitmist.

Patendi kehtivusaeg lõpeb üldiselt hiljemalt 20 aastat pärast patendi väljaandmist. Patendi taotlemisel tuleb maksta taotluslõivu ja hiljem jõushoidmislõivu, kusjuures viimane lõiv aja jooksul kasvab. Kasuliku mudeli registreering kehtib algul neli aastat alates registreerimise kuupäevast, seda on võimalik pikendada kuni 10 aastani. Vastavad riigilõivud on toodud patendiameti koduleheküljel [www.epa.ee](http://www.epa.ee).

Euroopa Patendikonventsioon (*EPC; European Patent Convention*) ühendab liikmesmaade patentide taotlus- ja väljaandmismenetluse selliselt, et taotleja võib otsustada, millistes EPC-maades ta soovib saada Euroopa Patendiameti poolt väljaantavat patenti (Kivi-Koskinen 2002).

#### **10.5 Patendiotsing internetis**

Leiutiste kirjeldusi saab otsida ülemaailmsest andmebaasist <http://ee.espacenet.com>. Selles andmebaasis on vähemalt 60 riigi dokumendid, enamasti alates aastast 1920. Võimalik on otsingut teostada ka rahvuslikes andmebaasides.

Otsingut saab teostada märksõnade järgi, kusjuures süsteem on lähedane Google-le. Võimalik on otsing ka leiutaja või taotleja nime, dokumendi numbriga ja patendiklassifikatsiooni numbrite alusel. Otsime näiteks patente, mis on seotud ilmaennustusega. Valime laiendatud otsingu ja sisestame märksõnaks leiutise nimetuses ja lühikirjelduses väljendi „*weather forecasting*“. Ülejäänud otsingutunnuste lahtrid jätame tühjaks.

Vastete hulgas on näiteks USA patent US2007256716 „*Weather forecasting umbrella*“, leiutaja Resner Benjamin I. Leiutise sisuks on vihmavarju käepideme sisse ehitatud indikaator, mis näitab raadio teel edastatavat ilmaennustust.

Vastete hulgas on ka mitmeid ilmaennustuse süsteeme ja meetodeid, mis sageli käsitlevad mingeid andmetöötluse üksikasju.

## 10.6 Tarkvara õiguskaitse

Nagu oli öeldud p. 10.3, kehtib autoriõigus ka arvuti tarkvara suhtes.

Kuna AÕ kaitseb ainult vormi (keelab koodi kopeerimise), kuid ei takista sama ülesande jaoks mingit erineva koodiga programmi kirjutamast, siis see kaitse ei ole piisav ja tarkvarafirmad otsivad täiendavaid võimalusi tarkvara kaitsmiseks.

Kuigi patendiseadus üldreeglina arvutiprogrammide patentimist ei võimalda, on seda paljudel juhtudel siiski tegelikult tehtud. Pöördepunktiks sai USA Ülemkohtu otsus, mis tunnistas arvutiga juhitava kummi tootmise protsessi patentseks. Seoses selle kohtuprotsessiga muutis ka USA Patendiamet oma poliitikat programmeerimise patentse kohta ja selle üle otsustamiseks töötati välja vastav juhised. See otsus sai aluseks ka Euroopa Patendiameti korraldusele (1985. a) ekspertiisi eeskirjade muutmise kohta [Intellektuaalse omandi õiguskaitse küsimused WWW].

Ekspertid väidavad, et praeguseks on Euroopa Patendiamet väljastanud üle 30 000 patendi, mis rohkemal või vähemal määral patenteerivad leiutise ühe osana ka tarkvara [Miljan, Semevsky 2005].

2002. a esitas Euroopa Komisjon Euroopa Parlamendile ja Euroopa Liidu Nõukogule menetlemiseks arvutiga rakendatavate leiutiste patenteerimise direktiivi eelnõu. Direktiivi järgi pidanuksid EL liikmesriigid oma seadusi sellele vastavalt kohandama [Miljan, Semevsky 2005]. Tookord lükati eelnõu siiski tagasi. Eelnõu vastu olid aktiivselt väikefirmad ja vabavara pooldajad. Tarkvara jõuavad patenteerida vaid suured firmad [Põldmaa 2005].

Peale patentide võivad tarkvara tootjad kasutada veel lepinguõigust, mille puhul tingimused õiguste kaitseks fikseeritakse üleandelepingus ning lipiklitsentsi, mis sätestab, et tarkvara omandanud isik peab nõustuma kõigis litsentsilepingus toodud tingimustega [Intellektuaalse omandi õiguskaitse küsimused WWW].

## Viited kirjandusele

**Autoriõiguse seadus.**[WWW] Elektrooniline Riigi Teataja. <https://www.riigiteataja.ee/ert/act.jsp?id=12957346> (01.05.2008).

**Bachmann T.** (2004) Teaduspraktika tahud ja tõed. Tartu Ülikooli Kirjastus, Tartu.

**Demicco R. V.** (2004) Applications of Fuzzy Logic to Stratigraphic Modeling. Kogumikus: Fuzzy Logic in Geology, toim R. V. Demicco, G. J. Klir, Elsevier Academic Press, lk 121 – 151.

**Demicco R. V., G. J. Klir** (2004) Introduction. Kogumikus: Fuzzy Logic in Geology, toim R. V. Demicco, G. J. Klir, Elsevier Academic Press, lk 1 – 9.

**Ebel H. F., C. Bliefert, W.E. Russey** (2004) The Art of Scientific Writing. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.

**Intellektuaalse omandi õiguskaitse küsimused.**[WWW]

[http://study2.risk.ee/tty/files/intom\\_konspekt.pdf](http://study2.risk.ee/tty/files/intom_konspekt.pdf) (06.05.2008).

**Kasuliku mudeli seadus.** [WWW] Elektrooniline Riigi Teataja.

<http://www.riigiteataja.ee/ert/act.jsp?id=12791349> (05.05.2008)

**Kivi-Koskinen T.** (2002) Tööstusomandi õiguskaitse väikeste ja keskmiste ettevõtete konkurentsivõime teenistuses. Kirjastus Juura, Tallinn.

**Lin C.-T., C. S. G. Lee** (1996) Neural Fuzzy Systems. A Neuro-Fuzzy Synergism to Intelligent Systems. Prentice Hall P T R , Upper Saddle River.

**Miljan M., T. Semevsky.** Tarkvara õiguskaitse problemaatika. „Novaator“ nr 14, sept. 2005.  
<http://tuit.novaator.ee/?op=article&ID=89> (06.05.2008)

**Patendiseadus.** [WWW] Elektrooniline Riigi Teataja. <http://www.riigiteataja.ee/ert/act.jsp?id=12791328> (05.05.2008)

**Petlenkov E.** [WWW 2002] Tehisnärvivõrkude ülesehitus ja kasutamine. Loengukonspekt, Tallinn  
[www.dcc.ttu.ee/automaatika/LAS/LAS5721/nn.pdf](http://www.dcc.ttu.ee/automaatika/LAS/LAS5721/nn.pdf)

**Pisuke H.** (koostaja, 2007) Autoriõigus ja autoriõigusega kaasnevad õigused. Õigusaktide kogumik. Tartu Ülikooli Kirjastus.

**Põldmaa H.** (2005) Tarkvara jõuavad patenteerida vaid suured firmad. Äripäev, 17. veebr. 2005.a.

**Santamouris M., G. Mihalakakou, B. Psiloglou, G. Eftaxias, D. N. Asimakopoulos** (1999). Modeling the Global Solar Radiation on the Earth`s Surface Using Atmospheric Deterministic and Intelligent Data-Driven Techniques. Journal of Climate, Vol 12 lk 3105 – 3116.

**Tymvios, F. S., S. C. Michaelides, C. S. Skouteli** (2008) Estimation of Surface Solar Radiation with Artificial Neural Networks, kogumikus Modeling Solar Radiation at the Earth Surface, ed. V. Badescu, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, lk 221 – 256.