

## **KLIIMAMUUTUS**

## **BIBLIOTHECA SCIENTIARUM VITAE**

### **SARJA KOLLEGIUM**

Aveliina Helm (Tartu Ülikool)

Mihkel Kangur (Tallinna Ülikool)

Tiiu Koff (Tallinna Ülikool)

Tiit Maran (Tallinna Loomaaed)

Timo Maran (Tartu Ülikool)

Timo Palo (Vabariigi Presidendi Kantselei)

Ulrike Plath (Tallinna Ülikool)

Tallinna Ülikool

Stefan Rahmstorf  
Hans Joachim Schellnhuber

## **KLIIMAMUUTUS**

DIAGNOOS, PROGNOOS, TERAAPIA

Saksa keelest tõlkinud  
Katrín Kaugver

Tallinna Ülikooli Kirjastus  
Tallinn 2021



Bibliotheca SCIENTIARUM VITAE

Bibliotheca Scientiarum Vitae  
Stefan Rahmstorf, Hans Joachim Schellnhuber  
Kliimamuutus: Diagnoos, prognoos, teraapia

Tõlgitud väljaandest:  
Stefan Rahmstorf, Hans Joachim Schellnhuber  
Der Klimawandel: Diagnose, Prognose, Therapie  
9. Auflage  
München: C. H. Beck 2019

Raamatu väljaandmist on toetanud Goethe Instituut



Toimetanud Sirje Nilbe  
Kujundanud ja küljendanud Sirje Ratso  
Sarja makett: Rakett

© Verlag C. H. Beck oHG, München 2006  
Autoriõigus (tõlge): Katrin Kaugver, 2021  
Autoriõigus: Tallinna Ülikooli Kirjastus, 2021

ISSN 2806-0938  
ISBN 978-9985-58-915-1

TLÜ Kirjastus  
Narva mnt 25  
10120 Tallinn  
[www.tlupress.com](http://www.tlupress.com)

Trükk: Pakett

# SISUKORD

Sissejuhatus.....	9
<b>1. Mida on võimalik õppida kliimaajaloost.....</b>	<b>13</b>
Kliimaarhiivid.....	14
Mis määrab kliima?.....	17
Maa esiajalugu.....	19
Kliimamuutused miljonite aastate vältel.....	23
Ootamatu soojafaas.....	25
Jääajatsüklid.....	28
Järsk kliimamuutus.....	32
Holotseeni kliima.....	34
Mõned järeldused.....	37
<b>2. Globaalne soojenemine.....</b>	<b>39</b>
Pilk ajalukku.....	39
Kasvuhoonefekt.....	41
Kasvuhoonegaaside kontsentratsiooni tõus.....	43
Temperatuuri tõus.....	47
Soojenemise põhjused.....	50
Kliimatundlikkus.....	55
Tulevikuprojektsioonid.....	60
Kui tõsikindlad on teadlaste väited?.....	65
Kokkuvõte.....	68

<b>3. Kliimamuutuse tagajärjed</b> .....	70
Liustike kadumine .....	72
Jää kahanemine polaarmeres .....	75
Igikeltsa sulamine .....	76
Gröönimaa ja Antarktise jääkilp .....	77
Meretaseme tõus .....	81
Muutused merehoovustes .....	85
Äärmuslikud ilmastikunähtused .....	89
Mõjud ökosüsteemidele .....	95
Põllumajandus ja toidujulgeolek .....	98
Haiguste levik .....	100
Kokkuvõte .....	101
<b>4. Kliimamuutus avaliku arutelu all</b> .....	104
Kliimadiskussioon USA-s .....	105
Kliimaskeptikute lobitöö .....	108
Usaldusväärsed teabeallikad .....	109
Kokkuvõte .....	113
<b>5. Kliimaprobleemi lahendus</b> .....	115
Vältida, kohaneda või ignoreerida? .....	115
Kas kliimamuutus saab olla optimaalne? .....	119
Ülemaailmne eesmärgipüstitus .....	124
Tegevusruum kliimaprobleemide lahendamiseks... ..	128
Kyoto protokoll .....	128
WBGU tee kestlikkusele .....	131
Kohanemiskatsed .....	142
Vabatahtlike koalitsioon ehk <i>leading by example</i> ...	150
Pariisi kliimakokkulepe .....	154

Lõppsõna. Vaim pudelis .....	172
Allikad ja märkused .....	177
Soovitatav kirjandus .....	191
Aineloend .....	195



*Muelleri liustik Uus-Meremaa Lõunasaarel sulab nagu enamik Maa liustikke. Märkitud on selgelt äratuntav otsamoreen, milleni liustik veel sajand tagasi ulatus. (Stefan Rahmstorfi foto)*



## SISSEJUHATUS

Kliimamuutus ei ole pelk akadeemiline probleem, sellel on inimestele suur ja käegakatsutav mõju – paljude jaoks on see isegi oht nende elule ja tervisele (vt 3. ptk). Vastuabinõud nõuavad ulatuslikke investeeringuid. Seetõttu on siin olulisem kui mitmes teises teadusvaldkonnas järjepidevalt avada olemasolevate teadmiste tagamaid ja heita valgust küsimustele, mis on veel ebaselged. Küsigem niisiis, millel põhinevad klimatoloogide arusaamad.

Paljud inimesed usuvad, et ohtlik globaalne kliimamuutus on üks teoreetiline võimalus, mis on tuletatud ebakindlast mudelarvutustest. Nende umbusk mudelarvutuste suhtes on mõistetav – kliimamudel jääb ju võhikule arusaamatuks ja selle usaldusväarsuse üle on peaaegu võimatu otsustada. Nii mõnigi arvab, et kui arvutimudelid on vigased, siis polegi ehk põhjust kliimamuutuse pärast muret tunda.

Ent see ei pea siiski paika. Tähtsaimad järeldused kliimamuutuse kohta põhinevad mõõtmistulemustel ja elementaar-teadmistel füüsikast. Mudelid on olulised ja lubavad mitmeid kliimamuutuse aspekte detailselt välja arvutada. Ent isegi kui mingeid kliimamudeleid ei oleks, hoiataksid klimatoloogid antropogeense kliimamuutuse eest.

Kasvuhoonegaasi kontsentratsiooni tõus atmosfääris on mõõdetud fakt, milles ei kahtle isegi skeptikud. Ka

tõsiasi, et inimesel on selles oma osa, tuleneb otseselt andmetest – andmetest fossiilse energia kasutuse kohta – ja neist sõltumatult ka isotoopide mõõtmise tulemustest. Kui erakordne on see tõus, seda näitavad andmed Antarktise jääpuursüdamikest – vähemalt ligi miljoni aasta vältel ei ole CO<sub>2</sub> kontsentratsioon kordagi tõusnud selle kõrguse lähedalegi, kuhu ta on roninud viimase saja aastaga.

CO<sub>2</sub> soojendavat mõju kliimale aktsepteeritakse teaduses aga juba üle saja aasta. CO<sub>2</sub> kiirgusmõju on laboris mõdetud, kiirgusülekanne atmosfääris on üks füüsika hästi tuntud tahke, mida kasutatakse satelliitmõõtmistel pidevalt. 2004. aastal tõendasid Šveitsi kiirgusmõõtmiste võrgustiku (Schweizer Strahlungsmessnetz) mõõtmistulemused maakera pinnale langeva pikalainekiirguse hulga oodatava suurenemise kasvuhooonegaasi tõttu.<sup>1</sup> Seega ei saa – tahaks öelda: kahjuks – olla mingit kahtlust, et inimene põhjustab kõrvalekaldeid meie planeedi kiirgusbilansis.

Otsustavaks saab lõpuks küsimus, kui tugevalt reageerib kliimasüsteem kõrvalekalletele kiirgusbilansis. Siin on mudelitest palju abi. Ent Arrhenius näitas juba 1896. aastal, et seda saab hinnata ka ainult paberi ja pliiatsi abil<sup>2</sup> ning Antarktise jääsüdamike regressioonanalüüs võimaldab anda sõltumatu hinnangu vahetute andmete põhjal.<sup>3</sup> Nagu edaspidi näeme, osutab ka varasem kliimaajalugu CO<sub>2</sub> tugevale kliimat muutvale mõjule.

Tõsiasi, et kliima muutub juba praegu, selgub samuti otseselt mõõtmistulemustest. Maailma meteoroloogiaorganisatsiooni WMO (World Meteorological Organization,

peakorter Genfis) andmetel olid kolm globaalselt kõige soojemat aastat – alates ilmavaatluste algusest 19. sajandil – 2016., 2017. ja 2015. aasta. Liustikud kahanevad kogu maailmas (vt 3. ptk) ja kaudsete proksimeetoditega kogutud andmed [*Proxy-Daten*] näitavad, et viimasel tuhandel aastal ei ole kliima tõenäoliselt mitte kunagi olnud nii soe kui 21. sajandi esimesel kümnendil.

Detailsete kliimamudeliteta ei oleks me selles nii kindlad ega suudaks tagajärgi nii hästi hinnata – aga ka ilma mudeliteta osutaksid kõik tõsiasiad ilmselgelt sellele, et CO<sub>2</sub> ja teiste gaaside emissiooni kaudu on inimene asunud kliimat otsustavalt muutma.



# I. MIDA ON VÕIMALIK ÕPPIDA KLIIMAAJALOOST

Meie koduplaneedi kliima on korduvalt läbi teinud silmatorkavaid muutusi. Kriidialastul (140 kuni 65 miljoni aasta eest) sammusid hiidsaurused isegi arktistel laiuskraadidel läbi subtroopilise taimkatte ja CO<sub>2</sub> sisaldus atmosfääris oli mitu korda kõrgem kui praegu. Siis jahtus Maa pikka-mööda maha ning on nüüdseks juba kaks-kolm miljonit aastat korrapäraselt pendeldanud jääaegade ja jäävaheaegade vahel. Jääaegadel ulatusid hiigelsuured liustikud kaugele Saksamaa aladele ja meie esivanemad jagasid jäist steppi karvase mammutiga. Keset 10 000 aastat valitsenud holotseeni, praegust jäävaheaega, kuivas Sahara äkitselt ära ja muutus kõrbeks.

Praegust kliimamuutust võib mõista ja hinnata üksnes ulatuslike kliimamuutuste taustal, mis on aset leidnud Maa ajaloo vältel. Kas inimene on sellele muutusele oluliselt kaasa aidanud või on see osa loomulikust kliimatsüklist? Sellele küsimusele vastamiseks on meil vaja põhiteadmisi kliimajaloost. Seepärast alustame raamatut ajareisiga. Siinses peatükis arutleme selle üle, kuidas on kliima arenenud erinevatel ajaskaaladel: sadadest miljonitest aastatest kuni järskude kliimahüpeteni, mis köidavad kliimateadlaste tähelepanu viimasel ajal. Seejuures huvitab meid elukõige, millised jõud põhjustavad kliimamuutusi ja

mida on võimalik õppida kliimasüsteemi reaktsioonidest minevikus.

## Kliimaarhiivid

Mille põhjal me teame üldse midagi möödunud ajastute kliimast? Loodusmaastikel seisavad mõned varasemate kliimamuutuste tunnistajad, millest on võimatu mööda vaadata – näiteks ammu sulanud liustike otsamoreenid. Ent suurem osa Maa kliimaajalugu puudutavatest teadmistest on pingsa detektiivitöö ja pidevalt täiustuvate meetodite tulemus. Kus ka ei oleks miski pikema ajavahemiku vältel kas ladestunud või moodustunud – olgu need siis setted merepõhjas, lumekihid liustikel, stalaktiidid koobastes või korallide ja puude kasvuringid –, ikka leiavad uurijad võimalusi ja meetodeid, et hankida sealt andmeid kliima kohta. Aasta aasta järel puurivad nad massiivset Gröönimaa jääd kuni kaljupinnani välja või toovad vee alt, tuhandete meetrite sügavusest pinnale settesüdamikke, analüüsivad ülitundlike mõõteriistadega isotoopide sisaldust lumes või määravad ja loendavad kuude pikku hoolsalt mikroskoobi all tillukesi lubikodasid ja taimede õietolmu.<sup>4</sup>

Jääpuursüdamik näite najal on hea mõista põhiprintsipi. Gröönimaal ja Antarktises on moodustunud hiigelsuured liustikud, mitme tuhande meetri paksused jääkoorikud, sest seal sajab lund, aga see ei sula külma tõttu ära. Nii kasvab lumekiht üha kõrgemaks; vanem lumi allpool surutakse uue lume raskuse all kokku jääks.

Aastatuhandete vältel tekib tasakaal: jäämass ei kerki enam kõrgusesse, sest jää hakkab voolama liustiku servade poole ja sealt alla. Tasakaaluseisus moodustub aastas sama palju uut jääd kui seda servadel ära sulab. Nii toimub see mandril mäestikuliustikes, kui jää on voolanud väiksematele ja seega soojematele kõrgustele, ja tüüpiline on see ka Gröönimaa jääkilbile. Või voolab jää merre ning moodustab seal ujuva šelfliustiku, mille alumine pool sooja merevee mõjul üles sulab – nii toimub see Antarktise ümbruses.

Kui puuritakse sellist jääkilpi, siis mida sügavamale jõutakse, seda vanemat jääd leitakse. Kui mahasadanud lume kogus on küllalt suur ja aastane sademete hulk on teada (nagu Gröönimaal, kus lumesadu tekitab aastaga uue 20 sentimeetri paksuse jääkihi), siis võib lumekihte isegi üksikute aastate kaupa eristada. Nimelt ladestub vähese lumega hooaegadel jääkilbile tolmu ja tekib tumedam viirg, lumerikastel aastaegadel aga tekib heledam kiht. Neid aastaseid kihte saab loendada – see on täpseim jää dateerimise meetod.<sup>5</sup> Gröönimaa jää ajalugu ulatub ligikaudu 120 000 aasta taha. Antarktises, kus kliima on kuivem ja lumesadude sagedus seetõttu väike, toodi 2003. aastal Euroopa EPICA projekti (European Project for Ice Coring in Antarctica) raames välja isegi üle 800 000 aasta vanust jääd.<sup>6</sup>

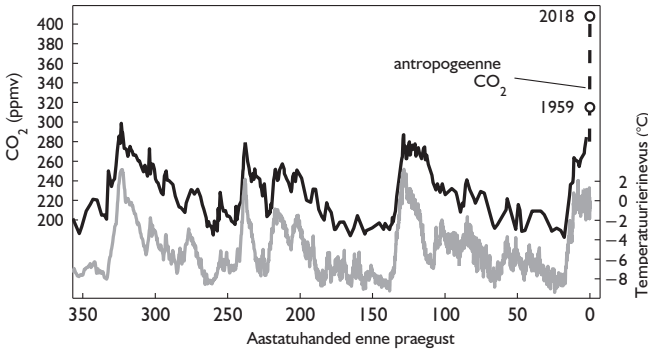
Suurt hulka jää parameetritest saab mõõta. Üks tähtsaimaid neist on hapnik-18 isotoobi (<sup>18</sup>O) sisaldus. Paljudes füüsikalistes, keemilistes ja bioloogilistes protsessides toimub nn fraksioneerimine: eri isotoopide puhul kulgevad protsessid erineva kiirusega. Nii aurustuvad „normaalse“

hapnik-16 isotoobiga ( $^{16}\text{O}$ ) veemolekulid kiiremini kui pisut raskemad hapnik-18 isotoobiga ( $^{18}\text{O}$ ) molekulid. Fraksioneerimine sõltub temperatuurist. See kehtib ka lumekristallide moodustumisel toimuva fraksioneerimise puhul, mistõttu sõltub hapnik-18 isotoobi sisaldus lumes temperatuurist. Hapnik-18 sisaldust jääpuursüdamikus võib mõõteriista vastava taatlemise järel käsitleda õhutemperatuuri ligilähedase (nn proksi-) mõõduna jää tekke ajal.

Teised tähtsad suurused, mida jää puhul saab mõõta, on tolmu- ja väikeste põiekestena jäässe suletud õhu koostis – nii saadakse proove isegi tollasest atmosfäärist. Nende põhjal saab määrata varasemat süsinikdioksiidi, metaani ja teiste gaaside sisaldust õhus. Igati põhjendatult on kuulsaks saanud kaheksakümnendatel ja üheksakümnendatel aastatel Vene-Prantsuse koostöös puuritud Vostoki jääpuursüdamik Antarktises,<sup>7</sup> tänu millele saadi esmakordselt ajalooline ülevaade temperatuuri kõikumistest ja  $\text{CO}_2$  kontsentratsioonist atmosfääris viimase 420 000 aasta jooksul (joonis 1.1).

Kliimaarhiividest saadakse mitmesuguste menetluste abil väga mitmekülgeid proksiandmeid. Mõned neist annavad teavet jääkogustest Maal, merede soolasisaldusest või sademete hulgast. Proksiandmetel on oma tugevad ja nõrgad küljed. Nii näiteks on süvameresetel põhinevate ajaliste määratluste täpsus ilmselgelt väiksem kui jääpuursüdamike puhul, ent see-eest ulatuvad need andmed märksa kaugematesse aegadesse, sadade miljonite aastateni. Mitmete proksiandmete puhul tekitab veel probleeme täpne dateerimine ja





**Joonis 1.1.** Temperatuurikõver Antarktises (hall joon, suhe tänasega) ja CO<sub>2</sub> kontsentratsioon atmosfääris (must joon) möödunud 350 000 aasta jooksul Vostoki jääpuursüdamiku andmete põhjal.<sup>7</sup> Näha on kolme jääajatsükli. Lõpus on näidatud inimese põhjustatud CO<sub>2</sub> kontsentratsiooni tõus.

ebakindlus tõlgendamisel. Seega ei tuleks üheainsa andme-rea põhjal liiga kaugeleulatuvaid järeldusi teha; alles siis, kui andmeid on kinnitanud mitmed sõltumatud andmekogud ja menetlused, võib neid pidada usaldusväärseks. Ent tervikuna annavad proksiandmed tänapäeval siiski juba üllatavalt hea ja detailse pildi kliimaajaloost.

## Mis määrab kliima?

Ülemaailmne keskmine kliima on lihtsa energiabilansi tulemus: Maalt kosmosesse kiirgav soojus peab keskmiselt tasakaalustama Maale jõudva päikesekiirguse. Kui seda ei

juhtu, siis kliima muutub. Juhul kui soojust neeldub rohkem kui tagasi kiirgab, muutub kliima aina soojemaks, kuni seeläbi kasvav soojuskiirgus tasakaalustab Päikeselt saabuva kiirguse ja energiabilansis kujuneb uuesti välja tasakaal. Niisiis toimib lihtne energia jäävuse seadus: Maale jõudev päikesekiirgus, millest on selle tagasipeegelduv osa maha arvatud, on võrdne Maalt kosmosesse voolava soojuskiirgusega. (Taimede fotosünteesiks „kõrvale läinud“ energia, Maa sisemusest voogava soojuse ja inimeste poolt kütuste põletamisel vabaneva soojuse võib siin tähelepanuta jätta.) Ookean ja atmosfäär jaotavad soojust kliimasüsteemi sees ja mängivad suurt rolli piirkondliku kliima juures.

Kliimamuutused on energiabilansis toimunud muutuste tagajärg. Põhimõtteliselt on kolm võimalust. Esiteks võib Maale jõudev päikesekiirgus ise varieeruda seoses muutustega Päikese ümber tiirleva Maa orbiidis või Päikeses endas. Teiseks võib muutuda kosmosesse tagasipeegelduva energia osakaal. See nn albeedo tänapäeva kliimas on 30%. Albeedo sõltub pilvekihist ja Maa pinna heledusest, niisiis jääkattest, maakasutusest ja kontinentide jaotusest maakeral. Ja kolmandaks mõjutavad Maalt lahkuvat soojuskiirgust atmosfääris sisalduvad absorbeerivad (sageli kasvuhoonegaasideks nimetatud) gaasid ja aerosoolid (õhus leiduvad osakesed) (vt 2. ptk). Kõik need võimalused mängivad oma osa kliima kõikumistes läbi ajaloo. Eri aegadel domineerivad erinevad tegurid – milline neist on mõjutanud vastava kliimamuutuse teket, seda tuleb iga juhtumi puhul eraldi uurida. Üldistav vastus – näiteks et

peamiselt põhjustab kliimamuutusi kas Päike või  $\text{CO}_2$  – ei ole võimalik.

Õnneks on kliimat iseloomustavate suuruste (st keskmiste väärtuste) arvutamine lihtsam kui ilmaennustamine, sest ilm on stohhastiline ja juhuslikud kõikumised mõjutavad seda tugevalt, kliimat seevastu vaevalt. Kujutlegem pada mulinal keeva veega: ilmaennustus sarnaneb katsega välja arvutada, kus kerkib pinnale järgmine mull. Kliimaennustus seevastu ütleks, et keeva vee keskmine temperatuur on normaalse rõhu korral  $100\text{ }^\circ\text{C}$ , kuid 2500 m kõrgusel mäestikus madala õhurõhu (niisiis muutunud raamtingimuste) tõttu üksnes  $90\text{ }^\circ\text{C}$ . Sel põhjusel ei ole kvantitatiivsete teadmiste hankimine mineviku kliimamuutuste kohta (või tuleviku-tsenaariumite arvutamine) sugugi lootusetu ettevõtmine ja selles vallas on viimastel aastatel tehtud suuri edusamme.

## Maa esiajalugu

4,5 miljardit aastat tagasi tekkis tähtedevahelisest udust Linnutee servas meie päikesesüsteem, kaasa arvatud Maa. Päike selle keskmes on omamoodi tuumasünteesireaktor: energia, mida see kiirgab, lähtub tuumareaktsioonist, mille käigus vesinikutuumad sulavad kokku heeliumiks. Teiste tähtede kujunemislugu ja füüsikalised teadmised selle reaktsiooniprotsessi kohta näitavad, et seejuures Päike aegamööda paisub ja kiirgab üha heledamalt. Nagu Fred Hoyle juba 1950. aastatel välja arvutas, pidi päikesekiirgus Maa ajaloo algul olema 25–30% nõrgem kui praegu.<sup>8</sup>

Eespool selgitatud energiabilansi vaatlus näitab, et nii nõrga Päikese korral pidanuks globaalne kliima, juhul kui teised tegurid (albeedo, kasvuhoonegaasid) jäänuksid samaks, olema ligikaudu 20 °C külmem ja seega selgelt alla külmumispunkti. Külmema kliima korral suureneb albeedo igal juhul märgatavalt, sest jäämassid suurenevad – niisiis peegeldub tagasi suurem hulk päikesekiirgust. Lisaks kahaneb külmemas kliimas kõige olulisema kasvuhoonegaasi, veeauru sisaldus atmosfääris. Mõlemad tegurid pidanuksid varase kliima veelgi külmemaks muutma. Arvutused näitavad, et oma arenguloo esimesel 3 miljardil aastal pidi Maa seetõttu olema täielikult jäätunud. Arvukad geoloogilised jäljed seevastu tõendavad, et valdaval osal tollest ajast oli Maal voolav vesi. See näiline vastuolu on tuntud kui *faint young Sun paradox* – nõrga noore Päikese paradoks.

Kuidas saaks seda vastuolu lahendada? Kui aktsepteerime ülaltoodud oletusi ja argumente, on vaid üks lahendus: et tasakaalustada nõrgemat päikesekiirgust, pidi kasvuhooneefekt (vt 2. ptk) Maa esiajaloo olema märgatavalt tugevam.

Millised gaasid võisid põhjustada tugevama kasvuhooneefekti? Kõne alla tulevad ennekõike süsinikdioksiid ja metaan.<sup>8</sup> Maa varases atmosfääris esines mõlemaid tõenäoliselt märksa suuremas kontsentratsioonis. Kahjuks ei ole meie käsutuses tollaseid (jääpuursüdämike andmete ulatusest välja jäävaid) õhuproove, nii et ettekujutused Maa atmosfääri varasest arengust lähtuvad suuresti kaudsetest