

SUURIM TUNDMATU INIMTEGEVUSE KLIIMAMÕJUS

Velle Toll, Hannes Keernik, Jorma Rahu, Heido Trofimov,
Piia Post ja Tanel Voormansik

*Teaduspreemia loodusteaduste valdkonnas tööde tsükli „Inimtekkelise
õhusaaste põhjustatud pilvede lumestumise avastamine“ eest*

Globaalne soojenemine kui köievedu

Globaalne soojenemine on justkui köievedu kahe vastandliku inimõju vahel (joonis 1). Fossiilkütuste põletamisest tekib nii kliimat soojendav kasvuhooneefekt kui ka õhusaasteosakeste jahutav mõju. Kui inimtekkeliste kasvuhoonegaaside kliimat soojendavat mõju on väga põhjalikult uuritud ja hästi mõistetud, siis õhusaasteosakeste mõju pilvedele on endiselt seotud väga suure määramatusega (Bellouin jt, 2020; Quaas jt, 2024). Koostamaks senisest veelgi usaldusväärsemaid tulevikukliima projektsioone, on parem arusaam inimtekkeliste õhusaasteosakeste mõjust pilvedele ja Maa kliimale võtmetähtsusega. Professor Velle Tolli juhtimisel uuritakse Tartu Ülikooli füüsika instituudi kliimauuringute keskuses inimtekkeliste õhusaasteosakeste kliimamõju tugevust.



Joonis 1. Kliima soojenemine kui köievedu: inimtekkeliste õhusaasteosakeste kliimat jahutav mõju kompenseerib teadmata osa inimtekkeliste kasvuhoonegaaside kliimat soojendavast mõjust.

Õhusaasteosakeste mõju pilvedele – suurim tundmatu inimtegevuse kliimamõjus

Inimtekkeliste õhusaasteosakeste mõju pilvedele on suurim tundmatu inimtegevuse kliimamõjus (Bellouin jt, 2020). Nimelt tasakaalustab antropogeensete õhusaasteosakeste jahutav kliimamõju teadmata ulatuses kasvuhoonegaaside põhjustatud inimtekkelist kliima soojenemist. Temperatuurid maailmas kerkisid 2023. ja 2024. aastal murettekitavatesse rekordilistesse kõrgustesse, tuues kaasa seninägematuid kuumalaineid, põudasadid ja paduvihmasid. Võimalik, et just välisõhu puhastamine saasteosakestest on viimastel aastatel kliima soojenemist märkimisväärselt kiirendanud.

Kui õhusaasteosakeste jahutav mõju kliimale on seni arvatust tugevam, siis on kliima seni arvatust tundlikum ka inimtekkeliste kasvuhoonegaaside atmosfääri lisandumisele (Andrae jt, 2005). Kiirem kliima soojenemine on võimalik, kuna inimtekkeliste kasvuhoonegaaside heitkogused endiselt kasvavad, aga õhusaasteosakeste hulka on oluliselt vähendatud, et säästa inimeste tervist ja elusid. Meie uurimisteravik kliimauuringute keskuses ongi keskendunud õhusaasteosakeste tugevalt kliimat jahutava mõju võimalikkuse väljaselgitamisele. Juba aastakümneid on teada, et õhusaasteosakesed käituvad kondensatsioonituumadena

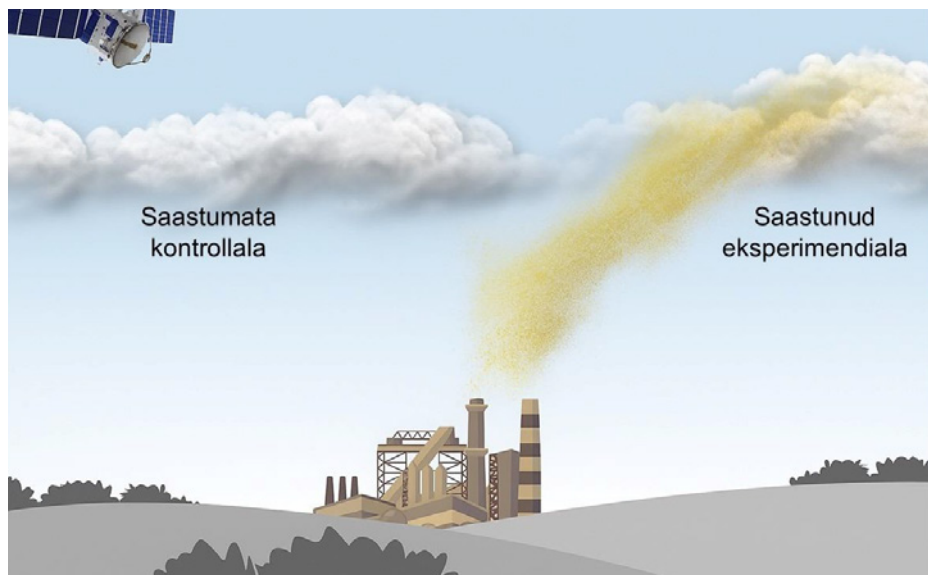


Joonis 2. Heledad jooned pilvedest tehtud satelliidipildil on laevade õhusaastest heledamaks muutunud pilved. Laevakütuse põlemisel on lisandunud saasteosakesi ja vesi on jaotunud suurema arvu pilvepiiskade vahel. Saastunud alas on pilvepiiskade kogupindala suurem võrreldes ümbritsevate saastumata pilvedega. Seetõttu hajutatakse rohkem päikesekiirgust tagasi maailmaruumi ehk saastunud pilved ongi heledamad.

vedelas faasis pilvepiiskade tekkimisel ja et inimtekkeliste õhusaasteosakeste mõjul on pilvepiisku rohkem ning pilved on seetõttu heledamad (joonis 2; Quaas jt, 2024). Kuidas mõjutavad kondensatsioonituumadena käituvad õhusaasteosakesed pilvede paksust ja hulka ning kas inimtekkelised saasteosakesed käituvad ka jäätekke tuumadena? Küsimused on seni selgete vastusteta (Bellouin jt, 2020) ja meie eesmärk ongi need leida.

Loomulikud eksperimendid

Olulisim põhjus, miks inimtegevuse mõju pilvedele on endiselt seotud suure määramatusega, on asjaolu, et atmosfäärisaaste ja pilvede mõõtmistulemuste vahelised statistilised seosed on järjepanu osutunud mittepõhjuslikeks (Christensen jt, 2022). Üldjuhul on signaal müraga võrreldes liiga nõrk. Selguse võiksid tuua laborikatsega sarnased eksperimendid Maa atmosfääris, kus pilvedesse pihustatakse kontrollitud suuruse ja keemilise koostisega saasteosakesi. Sellised eksperimendid võivad paraku olla kahjulikud elusloodusele, tõstatada hulgaliselt eetikaküsimusi ja olla kulukad. Oleme kliimauuringute keskuses probleemi leidlikult lahendanud, võttes kasutusele loomulikud eksperimendid, kus laborikatsega sarnased tingimused on tagatud ilma teadlaste sekkumiseta (Toll jt, 2017; Toll jt, 2019; Toll jt, 2024). Oleme esimesena maailmas süsteemselt uurinud üksikute suurte tehaste mõju pilvedele, võrreldes õhusaasteosakeste poolt mõjutatud pilvede omadusi vahetus läheduses asuvate saastumata pilvede omadega (Trofimov jt, 2020; Rahu jt, 2022; Trofimov jt, 2022; Toll ja Rahu, 2023).



Joonis 3. Üksiku tehase poolt saastatud pilveala kui loomulik eksperiment inimtekkelise õhusaaste mõjust pilvedele (Toll jt, 2019; Toll jt, 2024). Ilmatingimused on kõrvuti asuvatel saastunud eksperimentaalsel ja saastumata kontrollalal ühesugused ning ainus erinevus alade vahel on õhusaaste hulk.

Saastunud ja saastumata pilvede ruumiline lähedus tagab, et meteoroloogilised tingimused on mõlemas piirkonnas ühesugused. Õhusaaste hulk on ainus erinevus saastunud ja saastumata alade vahel (Toll jt, 2019). See tagabki eksperimentaalsed tingimused, mis viisid ka alljärgneva avastuseni.

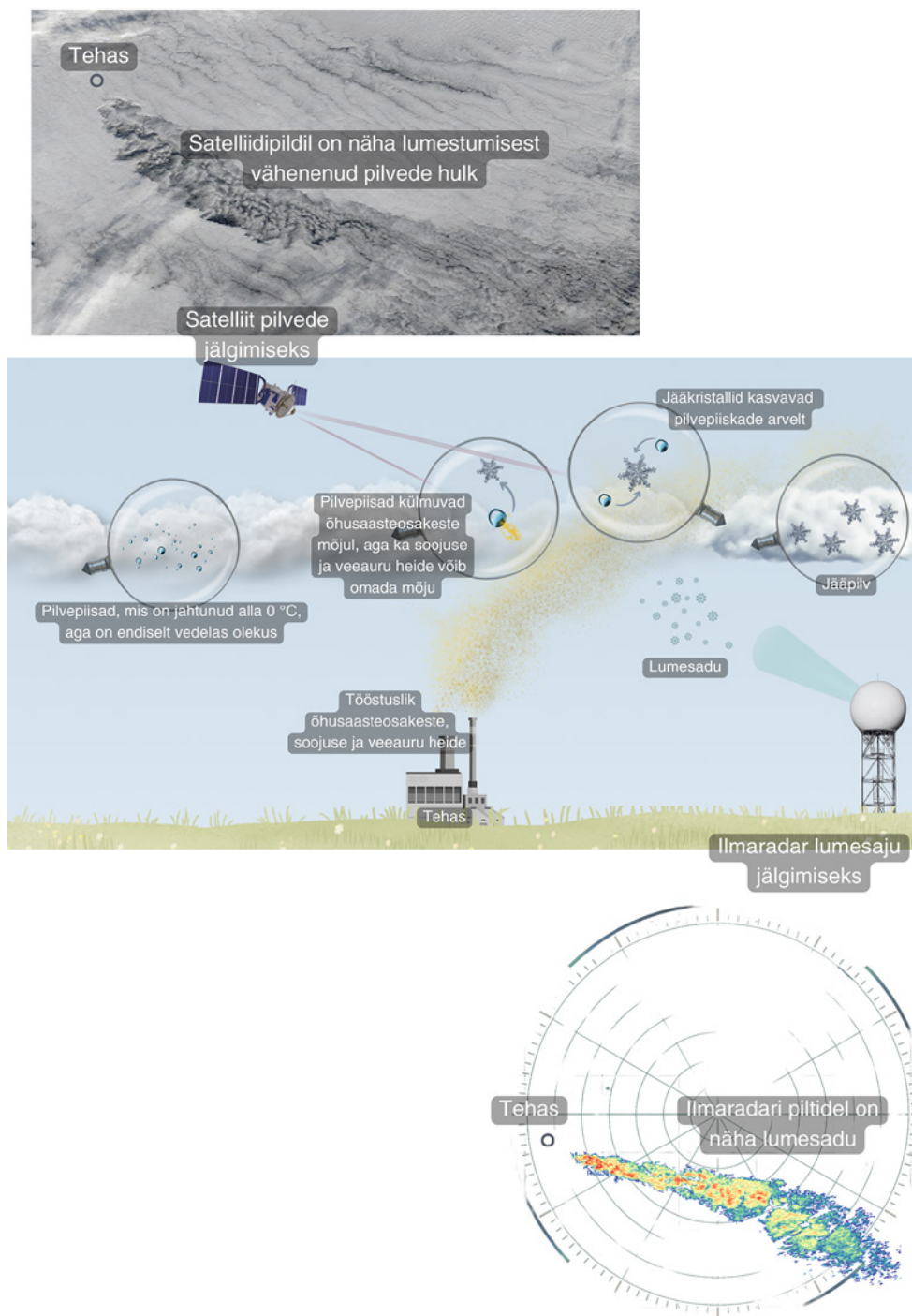
Läbimurdeline avastus: pilvede inimtekkeline lumestumine

Töörühm näitas esimesena maailmas, et inimtekkelised õhusaasteosakesed käituvad atmosfääris ka jäätেকে tuumadena, põhjustavad pilvede lumestumist ja vähendavad seeläbi pilvede hulka ning mõjutavad päikese- ja soojuskiirguse voogusid (joonis 4; Toll jt, 2024). Samas on oluline märkida, et lisaks õhusaasteosakestele võib ka tööstuslik soojuse ja veeauru heide tööstusallikate läheduses mõjutada jääpilvede teket (joonis 4). Avastus inimtekkelistest jäätেকে tuumadest laiendab paradigmat, mis kirjeldab inimtegevuse mõju pilvedele ja Maa kliimale.

Avastasime satelliidiandmetest, et tugevate tööstuslike õhusaasteallikate läheduses tekivad teatud tingimustel veepilvedest jääpilved ja pilvede hulk kahaneb (Toll jt, 2024). Lisaks avastasime maapealsete sademearadrite andmetest lumesaju alad, mis kattusid veepilvede jäätumine aladega. Satelliidi- ja radariandmeid kombineerides uuriti füüsikalisi protsesse, mis algavad jää tekkega vedelal kujul pilvepiiskadest ja lõppevad lumesaju tõttu kahanenud pilvisusega. Niimoodi panime kokku tervikliku füüsikalise arusaama inimtekkelise õhusaaste põhjustatud pilvede lumestumisest (joonis 4). Kõigepealt tekivad allajahtunud pilvepiiskadest õhusaasteosakeste mõjul jääkristallid. Seejärel kasvavad jääkristallid ümbritsevate vedelas faasis pilvepiiskade arvelt, sest samal temperatuuril on küllastav veeauru rõhk jää kohal madalam kui vee kohal. Edaspidi kasvavad jääkristallid üksteisega liitumise teel nii rasketeks, et saavad lumena maapinnale – pilved lumestuvad ja pilvede hulk kahaneb (joonis 4).

Pilved, mille temperatuur on 0 °C kuni –40 °C, sisaldavad sageli ka allajahtunud vedelaid pilvepiisku, sest puhas vesi ei jäätu alati temperatuuril 0 °C. Veepiiskade külmumiseks temperatuuridel 0 °C kuni –40 °C on vaja jäätেকে tuumasid, mis põhjustavad jääkristallide tekke, kuna lisaks faasisiirdele mõjutab vabaenergia hulka ka tekkiv piirpind tahke ja vedela faasi vahel. Teadmised jäätেকে tuumade päritolust ja täpsetest omadustest on senini väga puudulikud, kuid on teada, et jääd tekitavad õhusaasteosakesed on Maa atmosfääris ülimalt haruldased. Otsesed vaatluslikud tõendid kinnitasid, et inimtekkeline õhusaaste põhjustab allajahtunud pilvepiiskade jäätumist. Näitasime, et jäätেকে tuumadena toimivad väga erineva keemilise koostisega õhusaasteosakesed, mis pärinevad naftatöötlemisest, kivisööelektrijaamadest, metalli-, tsemendi- ja paberitööstusest ning mujaltki. Lisaks rõhutasime, et tööstused emiteerivad ka soojust ja veeauru, mis võivad samuti mõjutada jää teket vedelal kujul pilvepiiskadest.

Tulevikukliima projektsioonides pole arvesse võetud inimtekkeliste õhusaasteosakeste võimalikku mõju allajahtunud veepilvede jäätumisele, ehkki kliimateadlased on varem pikalt diskuteerinud, kas ja missugused inimtekkeli-



Joonis 4. Kontseptuaalne ülevaade Tartu Ülikooli füüsika instituudi kliimauuringute keskuse teadlaste poolt avastatud vaatluslikest tõenditest inimtekkelise õhusaaste põhjustatud pilvede lumestumise kohta ja loodud füüsikaline arusaam lumestumise nähtusest (Toll jt, 2024). Õhusaasteosakesed käituvad jäätেকে tuumadena, tekitavad pilvede lumestumise ja vähendavad seetõttu pilvisust.

sed õhusaasteosakesed soodustavad pilvedes jääkristallide moodustumist. Siin täidame suure lünga teadmistes kogutud vaatluslike tõenditega, mis näitavad, et jäätekke tuumadena toimivate inimtekkeliste õhusaasteosakeste kliimamõju tugevust tuleks täpsustada ja arvesse võtta (Toll jt, 2024).

Uue uurimissuuna tekkimine: loomulike eksperimentide kasutamine kliimauuringuteks

Kliimateadus on üks paljudest teadusharudest, kus tahtlikud laborikatsetega sarnased eksperimentid ei ole lihtsasti teostatavad ja oleks enamasti selgelt ebaeetilised (Christensen jt, 2022). Üksikute tehaste saaste mõjust pilvedele on kliimauuringute keskuses välja kasvanud süsteemne loomulike eksperimentide kasutus. Tänu meie töödele (Toll jt, 2019; Toll jt, 2024; Trofimov jt, 2020; Rahu jt, 2022; Trofimov jt, 2022) on loomulikud eksperimentid muutunud ka kliimateaduses omaette uurimissuunaks (Christensen jt, 2022), mis loodetavasti tagab tulevikus usaldusväärsed vastused mitmetele küsimustele inimtekkeliste õhusaasteosakeste mõjust pilvedele ja Maa kliimale.

VIITED

Andreae, M. O., Jones, C. D., Cox, P. M. 2005. Strong present-day aerosol cooling implies a hot future. *Nature*, 435(7046), 1187–1190, <https://doi.org/10.1038/nature03671>

Bellouin, N., Quaas, J., Gryspeerdt, E., Kinne, S., Stier, P., Watson-Parris, D., ... Stevens, B. 2020. Bounding global aerosol radiative forcing of climate change. *Reviews of Geophysics*, 58(1), e2019RG000660, <https://doi.org/10.1029/2019RG000660>

Christensen, M., Gettelman, A., Cermak, J., Dagan, G., Diamond, M., Douglas, A., ... Yuan, T. 2022. Opportunistic experiments to constrain aerosol effective radiative forcing. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2022, 22, 641–674, <https://doi.org/10.5194/acp-22-641-2022>

Quaas, J., Andrews, T., Bellouin, N., Block, K., Boucher, O., Ceppi, P., ... Wall, C. J. 2024. Adjustments to climate perturbations – mechanisms, implications, observational constraints. *AGU Advances*, 5(5), e2023AV001144, <https://doi.org/10.1029/2023AV001144>

Rahu, J., Trofimov, H., Post, P., Toll, V. 2022. Diurnal evolution of cloud water responses to aerosols. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127(10), <https://doi.org/10.1029/2021JD035091>

Toll, V., Christensen, M., Gassó, S., Bellouin, N. 2017. Volcano and ship tracks indicate excessive aerosol-induced cloud water increases in a climate

model. *Geophysical Research Letters*, 44(24), 12492–12500, <https://doi.org/10.1002/2017GL075280>

Toll, V., Christensen, M., Quaas, J., Bellouin, N. 2019. Weak average liquid-cloud-water response to anthropogenic aerosols. *Nature*, 572(7767), 51–55, <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1423-9>

Toll, V., Rahu, J. 2023. Strong anthropogenic cloud perturbations can persist for multiple days. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 128(9), <https://doi.org/10.1029/2022JD038146>

Toll, V., Rahu, J., Keernik, H., Trofimov, H., Voormansik, T., Manshausen, P., ... Bellouin, N. 2024. Glaciation of liquid clouds, snowfall, and reduced cloud cover at industrial aerosol hot spots. *Science*, 386(6723), 756–762, <https://www.science.org/doi/10.1126/science.adl0303>

Trofimov, H., Bellouin, N., Toll, V. 2020. Large-scale industrial cloud perturbations confirm bidirectional cloud water responses to anthropogenic aerosols. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(14), <https://doi.org/10.1029/2020JD032575>

Trofimov, H., Post, P., Gryspeerdt, E., Toll, V. 2022. Meteorological conditions favorable for strong anthropogenic aerosol impacts on clouds. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127(4), <https://doi.org/10.1029/2021JD035871>



Vasakult: Heido Trofimov, Jorma Rahu, Piia Post, Hannes Keernik ja Velle Toll. Foto: Erlend Štaub

Tanel Voormansik
Foto: erakogu

Velle Toll

Sündinud 14. detsembril 1987 Saaremaal

2007 Saaremaa Ühisgümnaasium (kuldmedal)

2013 Tartu Ülikool, füüsika (MSc, *cum laude*)

2016 Tartu Ülikool, füüsika (PhD)

Velle Toll töötab Tartu Ülikoolis kliimafüüsika professorina. Professor Toll on rahvusvahelistes kliimauuringutes üks loomulike eksperimentide uurimissuuna rajajatest ja tema teadusrühm on ainuke maailmas, kes on keskendunud loomulike eksperimentide kasutamisele inimtekkeliste õhusaasteosakeste kliimamõju tugevuse täpsustamiseks. Professor Toll on pannud aluse inimtegevuse kliimamõju uuringutele Eestis, rajades 2019. aastal Tartu Ülikoolis inimtegevuse kliimamõju uuriva töörühma ja juhtides mitmeid teadusprojekte. Lisaks on Velle Toll aktiivne kliimauuringute populariseerija.

Hannes Keernik

Sündinud 21. aprillil 1986 Pärnus

2005 Pärnu Koidula Gümnaasium (hõbemedal)

2011 Tartu Ülikool, keskkonnatehnoloogia (MSc, *cum laude*)

2015 Tartu Ülikool, füüsika (PhD)

Hannes Keernik töötab Tartu Ülikoolis kliimafüüsika kaasprofessorina. Ta on osalenud mitmetes rahvusvahelistes teadusprojektides, uurides atmosfääri niiskussisalduse ajalist ja ruumilist muutlikkust nii kaugseire kui kohapealsete vaatlusandmete abil. Samuti on tema varasem teadustöö keskendunud aerosoolide keemilise koostise analüüsimisele ja nende rolli mõistmisele kliimasüsteemis. Praegu arendab dr Keernik uudseid arvutuslikke vahendeid, mis võimaldavad täpsemalt hinnata inimtegevusest pärinevate aerosoolide mõju pilvede omadustele ja kliimale.

Jorma Rahu

Sündinud 27. märtsil 1992 Võrus

2011 Miina Härma Gümnaasium

2018 Tartu Ülikool, füüsika (MSc)

2025 Tartu Ülikool, füüsika (PhD)

Jorma Rahu töötab Tartu Ülikoolis kliimafüüsika spetsialistina ja Keskkonna-agentuuris radarmeteoroloogia peaspetsialistina. Dr Rahu uurib inimtekkeliste õhusaasteosakeste mõju pilvedele, ühendades mõõteandmeid nii satelliitinstrumentidelt kui ka maapealsetelt meteoroloogilistelt radaritelt. Eriilmeliste andmete kasutus on andnud uudse vaatenurga inimtekkelistest aerosoolidest põhjustatud pilvehäiringute uurimisele, andes ka laiema panuse inimtegevuse kliimamõju tugevuse hinnangutesse.

Heido Trofimov

Sündinud 22. veebruaril 1993 Viljandis

2012 Vanalinna Hariduskolleegium

2018 Tartu Ülikool, füüsika (MSc)

2022 Tartu Ülikool, füüsika (PhD)

Heido Trofimov töötab Tartu Ülikoolis kliimafüüsika teadurina ja ettevõttes KappaZeta OÜ tarkvaraarendajana satelliidipiltide töötlemise alal. Dr Trofimov uurib inimtekkeliste õhusaasteosakeste mõju pilvedele ja seeläbi kliimale, kasutades selleks satelliidiandmeid ja statistilisi meetodeid. Tema töö on aidanud täpsustada õhusaasteosakeste jahutava kliimamõju ulatust ja loonud seeläbi eeldused täpsemate kliimaprojektsioonide koostamiseks tulevikus.

Piia Post

Sündinud 10. juulil 1963 Rõuges

1981 Võru I Keskkool (kuldmedal)

1986 Tartu Ülikool, füüsik-füüsikaõpetaja (geofüüsika)

1993 Tartu Ülikool, geofüüsika (PhD)

Piia Post töötab Tartu Ülikoolis kliimateaduste professorina ja juhib kliimauuringute keskust. Tema teadustöö on aidanud paremini mõista atmosfääri tsirkulatsiooni mõju Läänemere piirkonna atmosfääri ja merekeskkonna muutustes. Ta on juhtinud mitmeid olulisi tulevikukliimaga kohanemise projekte, sealhulgas LIFE-SIP AdaptEST raames Eesti uute kliimaprojektsioonide koostamist. Professor Post on kogenud õppejõud, kes on õpetanud nii üldfüüsikat kui ka atmosfääri- ja kliimateadusi tuhandetele üliõpilastele, panustanud bakalaureuse- ja magistriõppekavade arendamisse ja koordineerinud mitmeid doktorikoole.

Tanel Voormansik

Sündinud 15. novembril 1989 Viljandis

2009 Suure-Jaani Gümnaasium (kuldmedal)

2014 Tartu Ülikool, keskkonnatehnoloogia (MSc)

2023 Tartu Ülikool, keskkonnatehnoloogia (PhD)

Tanel Voormansik töötab Tartu Ülikoolis radarkaugseire teadurina ja Keskkonna-agentuuris radarmeteoroloogia peaspetsialistina. Tema teadustöö keskendub kaksikpolarimeetriliste ilmaradarite andmetest kvantitatiivsete sajuhinnangute arvutuste parendamisele ning ekstreemsadude ja konvektiivsete tormide klimatoloogiale. Esmakordselt maailmas pikaajaliste kaksikpolarimeetriliste radariandmete kasutamine kvantitatiivseteks sajuhinnanguteks on näidanud dr Voormansiku teadustöö tulemuste olulist rolli ka kliimauuringutes.