

Tartu Ülikool
Loodus- ja täppisteaduste valdkond
Füüsika instituut
Kliimauuringute keskus

Bakalaureusetöö keskkonnatehnoloogias (12 EAP)

Laevajälgede tuvastamine ja analüüs satelliitandmetel: erinevate sensorite potentsiaal ja rakendused

Ingel Elisabet Erm

Juhendajad: Margit Aun, Velle Toll

Tartu 2026

Laevajälgede tuvastamine ja analüüs satelliitandmetel: erinevate sensorite potentsiaal ja rakendused

Töö eesmärk oli hinnata erinevate satelliitsensorite potentsiaali laevajälgede tuvastamisel ja analüüsimisel, keskendudes peamiselt MODIS-ile ja sellega sarnastele satelliitsensoritele. Laevajäljed on joonjad pilvestruktuurid, mis võimaldavad uurida aerosoolide mõju pilvede mikrofüüsikale ja kliima jahutamise võimele. Töös võrreldakse sensorite ajalist, ruumilist ja spektraalset lahutust ning pilve- ja aerosooliproduktide olemasolu. Satelliitandmetest on kaasatud MODIS, VIIRS, EarthCARE (ATLID, CPR, MSI), 3MI, FCI ja SEVIRI-l põhinev CM SAF CLAAS-3 andmed. Tulemused näitlikustavad, kuidas polaarorbiidi sensorid pakuvad detailset ruumilist infot, geostatsionaarsed võimaldavad jälgida laevajälgede kiiret arengut ning EarthCARE lisab vertikaalse mõõtmise. Sensorite kombineerimine annab kõige terviklikuma ülevaate laevajälgedest ja inimtekkeliste aerosoolide kliimamõjust.

Märksõnad: aerosoolid, pilved, laevajäljed, MODIS, satelliitsensorid

CERCS kood: P500 Geofüüsika, füüsikaline okeanograafia, meteoroloogia

Detection and analysis of ship tracks from satellite data: the potential and applications of different sensors

The aim of this thesis was to evaluate the potential of different satellite sensors for detecting and analysing ship tracks, with the main focus on MODIS and similar remote sensing sensors. Ship tracks are linear cloud features that provide a valuable opportunity to study aerosol effects on cloud microphysics and climate cooling. The thesis compares the temporal, spatial and spectral resolutions of the sensors, as well as the availability of cloud and aerosol products. The analysed data includes MODIS, VIIRS, EarthCARE (ATLID, CPR, MSI), 3MI, FCI and the SEVIRI-based CM SAF CLAAS-3 datasets. The results illustrate how polar-orbiting sensors provide detailed spatial information, geostationary sensors enable monitoring the rapid evolution of ship tracks, and EarthCARE adds vertical profiling capability. Combining these sensors offers the most comprehensive understanding of the ship tracks and climate impacts of anthropogenic aerosols.

Keywords: aerosols, clouds, ship tracks, MODIS, satellite sensors

CERCS code: P500 Geophysics, physical oceanography, meteorology

SISUKORD

KASUTATUD LÜHENDID	4
1. SISSEJUHATUS	6
1.1 Globaalsed kliimamuutused.....	6
1.2 Aerosoolide roll pilvede moodustumisel.....	6
1.3 Laevajäljed kui uurimisobjektid.....	7
1.3.1 Laevade jälgede vähenemine.....	8
1.4 Satelliitandmed.....	8
1.5 Töö eesmärk.....	10
2. METOODIKA JA ANDMED	11
2.1 Töös võrreldavad sensorid.....	11
2.1.1 MODIS.....	12
2.1.2 VIIRS.....	13
2.1.3 EarthCARE.....	13
2.1.4 3MI.....	15
2.1.5 FCI.....	15
2.1.6 CM SAF CLAAS-3.....	15
2.2 Andmete töötlemine.....	16
3. TULEMUSED JA ARUTELU	18
3.1 Sensorite võrdlus.....	18
3.2.1 Ajaline lahutus ja vaateala laius.....	19
3.2.2 Ruumiline lahutus.....	20
3.2.3 Spektraalne lahutus.....	23
3.2.4 Aerosoolide ja pilvede produktid.....	25
JÄRELDUS	31
KOKKUVÕTE	33
SUMMARY	34
TÄNUAVALDUSED	36
KASUTATUD ALLIKAD	37
LISAD	45

KASUTATUD LÜHENDID

3MI – Mitmevaateline, mitmekanaliline ja mitmepolarisatsiooniline kujutikaamera (Multi-viewing Multi-channel Multi-polarisation Imager)

ATLID – Atmosfääri lidar (Atmospheric Lidar)

AVHRR – Täiustatud väga kõrge ruumilise lahutusega radiomeeter (Advanced Very High Resolution Radiometer)

BBR – Laia-spektriline radiomeeter (Broadband Radiometer)

CLAAS ed. 3.0 – SEVIRI andmetel põhinev pilve omaduste andmestik, 3. väljaanne (CLOUD property dataset using SEVIRI, edition 3)

CM SAF – Kliimaseire Satelliidirakenduse Teenus (Satellite Application Facility on Climate Monitoring)

CO₂ – Süsinikdioksiid (Carbon Dioxide)

CPR – Pilveprofiilide radar (Cloud Profiling Radar)

EarthCARE – Pilvede, aerosoolide ja kiirguse uurimise satelliitmissioon (Earth Cloud Aerosol and Radiation Explorer)

EOS – Maa-vaatlusprogramm (Earth Observing System)

ESA – Euroopa Kosmoseagentuur (European Space Agency)

EUMETSAT – Euroopa Meteoroloogiasatelliitide Kasutamise Organisatsioon (European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites)

FCI – Paindlik kombineeritud kujutisandur (Flexible Combined Imager)

IMO – Rahvusvaheline Mereorganisatsioon (International Maritime Organization)

JAXA – Jaapani kosmoseagentuur (Japan Aerospace Exploration Agency)

JPSS – Ühine polaarorbiidi satelliidisüsteem (Joint Polar Satellite System)

METEOSAT – Euroopa meteoroloogiasatelliitide kasutamise organisatsioon (European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites)

MLST – Kohalik keskmine päikeseaeg (Mean Local Solar Time)

MODIS – Mõõduka lahutusega kujutav spektroradiomeeter (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)

MSI – Multispektraalkaamera (Multi-Spectral Imager)

NASA – Riiklik Aeronautika- ja Kosmosevalitsus (National Aeronautics and Space Administration)

NIR – Lähiinfrapuna (Near Infrared)

SEVIRI – Pöörlev täiustatud nähtava ja infrapuna kujutisandur (Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager)

SO₂ – Vääveldioksiid (Sulfur Dioxide)

SWIR – Lühilaine infrapuna (Shortwave Infrared)

TIR – Termiline infrapuna (Thermal Infrared)

VIIRS – Nähtava ja infrapuna kujutav radiomeetrikomplekt (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite)

VIS – Nähtav valgus (Visible)

1. SISSEJUHATUS

1.1 Globaalsed kliimamuutused

Alates 18. sajandi teisest poolest, kui algas tööstusrevolutsioon, on keskmine globaalne õhutemperatuur märkimisväärselt kiiresti tõusnud (Thompson jt, 2009; Xie jt, 2010). Seda soojenemist põhjustab tugevnenud kasvuhooneefekt, mille korral atmosfääri lisandunud kasvuhoonegaasid püüavad osa maapinnalt kiirguvast soojusest kinni ja takistavad sellel kosmosesse hajumast (IPCC, 2021; Keating, 2025). Inimtegevuse tõttu kasvav CO₂ kontsentratsioon atmosfääris on juba tõstnud Maa keskmist temperatuuri ligikaudu 1,3 °C võrra ning prognooside järgi soojenemine jätkub 21. sajandil (IPCC, 2021).

Kuigi inimtegevus paiskab atmosfääri kasvuhoonegaase, mis soojendavad kliimat, jõuavad fossiilkütuste põletamisest õhku ka aerosoolid ehk õhusaaste osakesed, mis avaldavad hoopis vastupidist ehk jahutavat mõju Maa kliimale (IPCC, 2021; Toll jt, 2019). Õhusaaste all mõistetakse atmosfääri jõudvaid looduslikke ja inimtekkelisi osakesi ja gaase, mis suures koguses võivad olla kahjulikud nii elusorganismidele kui ka keskkonnale (Kabir jt, 2023). Õhusaaste võib olla gaasiline, aga ka tahked kui ka vedelad osakesed ning liigselt hulgal atmosfääri sattudes ei suuda looduslikud protsessid neid tõhusalt hajutada või lagundada (The Editors of Encyclopaedia Britannica, 2024). Toll jt toovad uuringus (2019) välja, et vaatamata õhusaaste terviseohtudele võivad kaasnevad aerosoolid aidata kaasa atmosfääri soojenemise piiramisele, mõjutades pilvede mikrofüüsikat ja pidurdades sademete teket. See pilvede eluea pikendamise efekt on tuntud kui Albrechti efekt, kus aerosoolid põhjustavad suuremat kondensatsioonituumade arvu, mis muudab pilved püsivamaks ja vähendab sademeid (Nandan ja Ratnam, 2015). Õhusaaste osakesed põhjustavad rohkemate veepiiskadega pilvede moodustumist, mis omakorda tähendab, et need pilved peegeldavad rohkem päikeseenergiat tagasi kosmosesse. Nii aitab õhusaaste jahutada Maa kliimat ning saaste vähendamine võib hoopis kiirendada globaalset soojenemist (Toll jt, 2019).

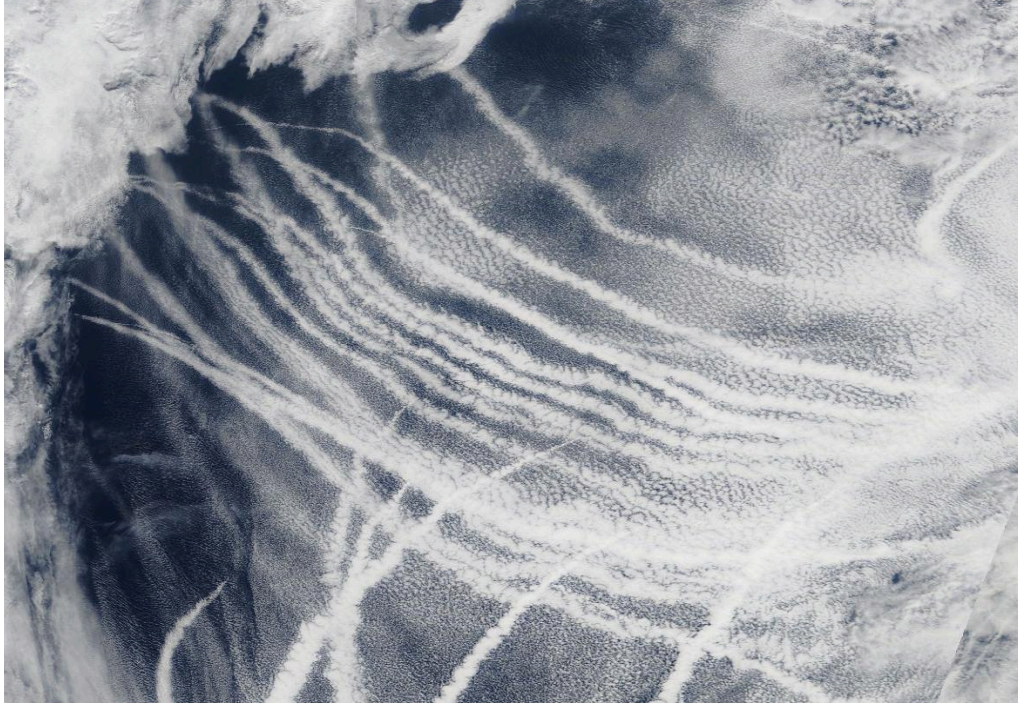
1.2 Aerosoolide roll pilvede moodustumisel

Pisikesed saasteosakesed toimivad kui kondensatsioonituumad, kuhu ümber koguneb veeaur, millest moodustuvad pilvepiisad ja pilvepiiskade kasvamisest vihmapiisad (Hansen jt, 2025);

Voiland, 2010). Aerosooliosakesed võivad olla looduslikku päritolu, näiteks meresool, tolm, orgaanilised ühendid, või inimtekkelised osakesed, mis pärinevad näiteks transpordist ja tööstusest (Chen jt, i.a; Toll jt, 2019; Voiland, 2010). Pilvede mikrofüüsika sõltub otseselt sellest, kui palju ja millised osakesi atmosfääris leidub, sest mida rohkem on kondendatsioonituumasid, seda rohkem tekib pilvepiiskasid (Toll jt, 2019). Väiksemad ja arvukamad tilgad muudavad pilve heledamaks, kuna summaarne pilvepiiskade pindala kasvab. Seetõttu avaldavad aerosoolid jahutavat mõju Maa kliimale ja see on tuntud kui Twomey efekt teadlase järgi, kes efekti esimesena matemaatiliselt kirjeldas (Quaas jt, 2020).

1.3 Laevajäljed kui uurimisobjektid

Laevajäljed (Joonis 1) on laevade poolt emiteeritud aerosoolide tekitatud joonjad pilvestruktuurid, mis võimaldavad uurida aerosoolide mõju pilvedele (Toll jt, 2019). Laevajäljed on sobilikud, et uurida aerosoolide rolli kliimamuutuses, kuna laevad liiguvad enamasti avaookeanil, eraldi muudest inimtekkelistest mõjudest. Laevade jälgede nähtavus satelliitpildidel on tingitud pilvede interaktsioonist laevade õhusaasteosakestega, kuna saastunud pilved koosnevad rohkematest väikestest piiskadest, mis hajutavad rohkem päikesevalgust (Patel ja Shand, 2020). Peamine reostusallikas on vääveldioksiid (SO_2), millest tekivad sulfaadid ja mistõttu paistavad laevajäljed satelliidipildidel ümbritsevast pilvest heledamad. Heledad pilved blokeerivad päikesevalgusel Maapinnale jõudmist, mis töötab kui vari ja aitab Maal püsida jahedamana (Hansen jt, 2025). Kuna laevad kui õhusaaste allikad esinevad lokaalselt, siis on oluline märkida, et erinevalt kasvuhoonegaasidest on aerosoolide jaotus Maal varieeruv ning kliimat jahutava efekti mõju on kõige tugevamalt tunda piirkondlikul tasandil.



Joonis 1. NASA Worldview-st ekraanipilt laevajälgedest Vaiksel ookeanil Alaskast lõunas 4. märtsil 2009 (NASA Worldview, i.a).

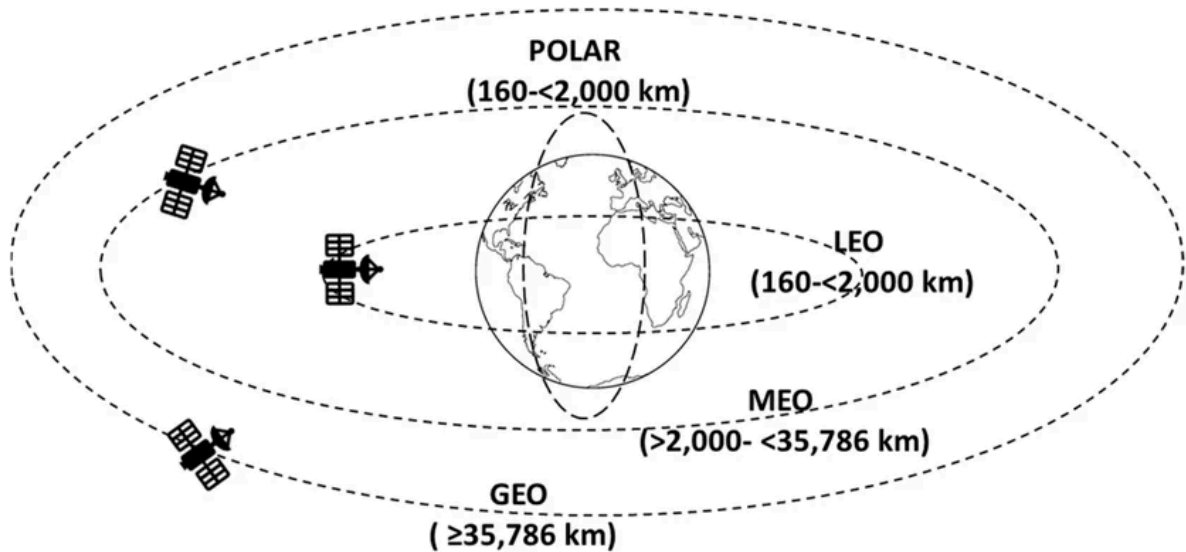
1.3.1 Laevade jälgede vähenemine

Rahvusvaheline mereorganisatsioon (IMO) jõustas 2020. aastal uue piirnormi, mis piiras laevadel kasutatava kütteõli väävlisisalduse 0,5 massiprotsendini, mis varem võis olla kuni 3,5% (European Union, 2016; Skeie jt, 2024). Muutus vähendas väävliheidet maailmameres kuni 80% (Yoshioka, 2024). Kuigi eesmärk oli parandada õhukvaliteeti ja kaitsta inimeste tervist, prognoositakse, et muudatus võib kaasa tuua ka globaalse keskmise temperatuuri suurema tõusu, kui see oleks toimunud piirangu puudumisel (Yoshioka, 2024).

1.4 Satelliitandmed

Kaugseire abil saab tuvastada laevajälgi, mille läbi uurida aerosoolide mõju kliima jahutamisele. Laevajäljed on oma dünaamika ja keskkonna tõttu keerukas nähtus, mida on peaaegu võimatu kliimamudelitel jäljendada, mistõttu kasutame analüüsis satelliitandmeid, et

saada parem arusaam pilvede mikrofüüsikast (Patel ja Shand, 2022). Kuid ka satelliidiandmetest on kohati keeruline laevajälgi tuvasta, kuna nende nähtavus ja püsivus sõltuvad suuresti atmosfääritingimustest (Patel ja Shand, 2022). Satelliidid ise toimivad kui platvormid, millel paikneb üks või mitu sensorit. Sensor on instrument mõõtmiste tegemiseks distantsilt ning andmete kogumiseks. Siinkohal on oluline teada, mis võimed ja rakendused on erinevatel satelliitide sensoritel. Sensorite võimekuse määravad ajaline, ruumiline, spektraalne lahutus, tuletatavad produktid ja vaateala laius. Ka satelliidi paiknevus mõjutab sensori mõõtetulemusi. Satelliitidel on tinglikult kolm kõrgust, millel on võimalik paikneda (Joonis 2): madal orbiit (160 - 2000 km), keskmine orbiit (2000 - 35 786 km) ja kõrge orbiit (35 786 km) (NASA Earthdata, 2026a). On olemas polaarorbiidi satelliidid, mis tiirlevad madalal orbiidil ümber Maa ning ületavad iga tiiru jooksul ekvaatori kord lõunast põhja suunas tõustes ja kord põhjast lõunasse laskudes. Kõrgel orbiidil asuvad geostatsionaarseid satelliidid (OSPO, i.a), mis on ekvaatori kohal paiksed ning koguvad andmeid ühe piirkonna kohta. Kuna geostatsionaarsed satelliidid paiknevad kõrgemal, siis katavad nad suuri alasid korraga, nagu näiteks SEVIRI satelliitinstrument, mille vaateala on üle Euroopa, Aafrika ja Atlandi ookeani. Nii polaarorbiidi kui ka geostatsionaarsetel satelliitidel saab pardal olla aktiivseid või passiivseid sensoreid. Passiivsed sensorid mõõdavad looduslikku kiirgust, enamasti päikesevalgust ja soojuskiirgust, mida maapind ja atmosfäär kiirgavad ja peegeldavad. Aktiivsed sensorid nagu radarid ja lidarid saadavad seevastu ise välja energiat ja mõõdavad tagasi hajunud signaali (Manning, 2012).



Joonis 2. Madala (LEO), keskmise (MEO) ja kõrge (GEO) orbiit. Polaaroriidi satelliidid liiguvad polaaralasiid ületavat (POLAR) trajektoori mööda, minnes üle ekvaatori. Geostatsionaarsed satelliidid liiguvad orbiidil, mis asub ekvaatori kohal (Ledesma, 2024).

1.5 Töö eesmärk

Käesoleva töö eesmärk on hinnata erinevate satelliitsensorite sobivust laevajälgede tuvastamiseks ja analüüsimiseks, keskendudes peamiselt MODIS-ile ning sellele sarnastele passiivkaugseire sensoritele. MODIS on võetud võrdluse aluseks, kuna see on olnud kaks aastakümnet peamine laevajälgede uurimisel kasutatav sensor (Toll jt, 2019), aga selle operatiivne eluiga on lõppemas. Analüüs hõlmab nii polaaroriidil kui ka geostatsionaarsel orbiidil paiknevate satelliitide andmeid ning käsitleb nii passiivsete kui ka aktiivsete sensorite potentsiaali. Fookuses on erinevate sensorite mõõtmistest tuletatavad produktid, spektraalsed ja ruumilised omadused ning võimekus tuvastada laevade poolt põhjustatud muutusi pilvede mikrofüüsikas. Töö sisaldab võrdlevat analüüsi MODIS-ega ning hindab alternatiivsete andmestike rakendatavust. Töö vastab järgnevatele uurimisküsimustele: 1) Missugune on erinevate satelliitide sensorite potentsiaal ja rakendused pilvede omaduste muutuse tuvastamisel? 2) Missugused satelliitide sensorid ja kuidas täiendavad MODIS-elaadseid kaugseire sensoreid laevajälgede uurimisel?

2. METOODIKA JA ANDMED

Kaugseire valdkonnas ning eelkõige laevajälgede uurimises on MODIS-t peetud aastakümneid globaalse seire kullastandardiks. Samas on viimase 20 aasta jooksul orbiidile jõudnud mitmeid uusi sensoreid, mis pakuvad täiendavaid võimalusi pilvede ja aerosoolide uurimiseks. Käesoleva töö võrdleb erinevate satelliitide pardal olevaid sensoreid, et hinnata nende potentsiaali laevajälgede tuvastamisel. Võrdlusele on valitud kaheksa polaarorbiidil liikuvat sensorit, kaks geostatsionaarset ning ühe kliimaseire satelliidirakenduse teenuse, mille andmebaas põhineb geostatsionaarse satelliidi sensori andmetel (Tabel 1). Töö eesmärgist tulenevalt on sensorid valitud nende võimekuse alusel hinnata pilvede ja aerosoolide omadusi, mis on laevajälgede tuvastamiseks kriitilise tähtsusega. Järgnevad alapeatükid tutvustavad töös võrreldavaid sensoreid põhjalikumalt.

2.1 Töös võrreldavad sensorid

Tabel 1. Töös võrreldavad sensorid (Allikad vt Lisa 1).

SENSOR	SATELLIIT	ORBIIDIL	EKVAATORI ÜLETUSAEG MLST (laskuv/tõusev orbiit)
MODIS	Aqua	2002 - ...	13:30 (tõusev)
MODIS	Terra	1999 - ...	10:30 (laskuv)
VIIRS	Suomi NPP	2011 - ...	13:30 (tõusev) 01:30 (laskuv)
VIIRS	NOAA-21	2022 - ...	13:30 (tõusev) 01:30 (laskuv)

VIIRS	NOAA-20	2017 - ...	13:30 (tõusev) 01:30 (laskuv)
ATLID	EarthCARE	2024 - ...	14.00 (laskuv)
CPR	EarthCARE	2024 - ...	14:00 (laskuv)
MSI	EarthCARE	2024 - ...	14:00 (laskuv)
3MI	MetOp-SG-A1	2025 - ...	9:30 (laskuv)
FCI	Metosat Third Gen, Meteosat-12	2024 - ...	Ei kohaldu (geostatsionaarne)
CM SAF CLAAS ed. 3.0			
SEVIRI	Meteosat Second Generation (MSG-1...MSG-4)	2004 - ...	Ei kohaldu (geostatsionaarne)

2.1.1 MODIS

NASA-l on pikaajaline Maa-vaatlusprogramm Earth Observing System (EOS), mis käivitati 1990. aastate lõpus ning hõlmab satelliite, sensoreid ja andmesüsteeme Maa kliima, atmosfääri, maismaa ja ookeanide jälgimiseks. EOS programmi esimesed satelliidid olid Terra, Aqua ja Aura, mis saadeti orbiidile 1999-2004 aastate vahemikus (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine Chapter 2, 2015). Käesolev töö keskendub edaspidi suuresti satelliitidele Terra ja Aqua, kuna need on ainsad NASA satelliidid, millel pardal

töötav passiivne sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), mis on mõlemal satelliidil ka põhiinstrument.

Satelliitide nimed Aqua ja Terra tulevad ladinakeelsetest sõnadest tähendades vett ja maad, mis viitavad nende missioonide fookusele, kuid mõlema peamine eesmärk on Maa süsteemide terviklik jälgimine. Pardal oleva põhisensori MODIS-e unikaalsus peitub selle multifunktsionaalsuses, sest on optimeeritud nii ookeanide, maismaa kui ka atmosfääri uuringuteks. MODIS disainiti 1995. aastal. Satelliidid Terra ja Aqua saadeti orbiidile vastavalt aastatel 1999 ja 2002, kus nad 2026. aasta seisuga siiani töötavad. Algselt ennustati, et MODIS-e eluaeg on umbes 6 aastat, kuid nüüdseks on see töötanud rohkem kui kolm korda pikemalt planeeritud ajast. MODIS-e ekvaatori ületusaeg on nihkunud ning eeldatakse tema tööaja lõppu lähiajal ("MODIS To VIIRS ...", i.a).

2.1.2 VIIRS

Visible Infrared Imaging Radiometer Suite, lühendiga VIIRS, on passiivne polaarorbiidil tiirlev sensor, mis kogub andmeid Maa atmosfääri, ookeanide ja maismaa kohta. See on peamine instrument NOAA ja NASA Joint Polar Satellite System (JPSS) missiooni satelliitidel Suomi NPP, NOAA-20 ja NOAA-21, pakkudes globaalset katvust ja olulist teavet ilmaennustuseks, keskkonnaseireks ja öiste tulede kaardistamiseks. VIIRS on välja töötatud nii, et see jätkaks ja laiendaks varasemate sensorite, eelkõige MODIS-e ja AVHRR-i kogutud vaatlusi ("MODIS To VIIRS ...", i.a). VIIRS-i lume ja merejää algoritmid on spetsiaalselt kujundatud MODIS-e vastavate andmetega ühilduvaks, mis tagab andmete järjepidevuse kahe sensori vahel. Selline ühtne lähenemine võimaldab võrrelda lume ja merejää muutusi kogu MODIS-e ja VIIRS-i tööea jooksul ning toetab pikaajalisi kliimaseire andmestike loomist ("Visible Infrared ...", i.a). VIIRS saab tulevikus olema ka kahel JPSS uuel satelliidil JPSS-3 ja JPSS-4 (Angal jt, 2025).

2.1.3 EarthCARE

EarthCARE (Earth Cloud, Aerosol, and Radiation Explorer) on Euroopa Kosmoseagentuuri (ESA) ja Jaapani kosmoseagentuur (JAXA) ühine missioon, mille eesmärk on uurida pilvede

ja aerosoolide mõju Maa kiirgusbilansile. Missioon annab väärtuslikku informatsiooni kliimamuutuse prognoosiks, kliimamudelite täiendamiseks ja sademete ning pilvede modelleerimiseks. Kliimamudelite koostamisel on üks suurim ebakindlus seni olnud pilvede ja aerosoolide kiirgusliku mõju tuvastamine (Carslaw jt, 2013; IPCC, 2021; Patel ja Shand, 2020; Wehr jt, 2023), kuid ESA ja JAXA rahvusvahelise koostööprojekt aitab vastata küsimustele nagu kuidas on pilved, aerosoolid ja kiirgus seotud (ESA, 2024). EarthCARE on eriline, kuna on maailma esimene satelliit, mis mõõdab samaaegselt pilvede, aerosoolide ja sademete vertikaalseid profiile ning nendega seotud kiirgusvooge (Wehr jt, 2023). Tehes mõõtmisi erinevatel atmosfääri kõrgustel kuni maapinnani saame täieliku 3D pildi pilvedest ja aerosoolidest (Born To Engineer, 2024). Missioonis on kasutusel üks satelliit, mis kannab missiooniga sama nime ehk EarthCARE. Selle pardal on kaks aktiivset instrumenti, Atmospheric Lidar (ATLID) ja Profiling Radar (CPR), ning kaks passiivset instrumenti, Multi-Spectral Imager (MSI) ja Broadband Radiometer (BBR). ATLID annab pilve ülaosast teavet ning profiile õhukestest pilvedest ja aerosoolidest, CPR annab teavet vertikaalse struktuuri ja sisemise dünaamika kohta ning MSI annab laiaulatusliku ülevaate mitmel lainepikkusel (ESA, 2024). BBR mõõdab peegeldunud päikesekiirgust (ESA, 2024), kuid kuna käesolevas töös ei ole võrdluse fookuses kiirgust mõõtvad instrumendid, siis ei ole BBR edaspidi kajastatud. Satelliit oma nelja instrumendiga tiirleb ümber Maa orbiidi umbes 393 km kõrgusel maapinnast ehk ta trajektoor on Maa madalal orbiidil (NASA Earthdata, 2026a), et maksimeerida aktiivsete instrumentide töövõimet (Wehr jt, 2023). EarthCARE missioon on kavandatud spetsiaalselt selleks, et mõõta pilvede ja aerosoolide rolli Maa kiirgusbilansis ning hinnata nende panust nii atmosfääri soojenemisel kui ka jahutamisel. Sellest tulenevalt on satelliidile integreeritud mõõtesüsteemid erakordselt sobivad ka laevajälgede tuvastamiseks ja analüüsimiseks. EarthCARE mõõdab üheaegselt (1) pilvede, aerosoolide ja sademete vertikaalseid profiile satelliidi nadiiris, (2) pilve-aerosooli kolmemõõtmelisi jaotusi üle kogu vaatevälja ning (3) samas kohas mõõdetud laiaribalisi päikese- ja soojuskiirguse vooge (Wehr jt, 2023). Selline erinevate instrumentide samaaegne kasutamine võimaldab hinnata, kuidas laevade emissioonidest pärinevad aerosoolid muudavad pilvede optilist paksust, pilvepiiskade arvu ja pilvede albeedot ning milline on nende muutuste otsene mõju Maa kiirgusbilansile (ESA, 2024).

2.1.4 3MI

Multi-viewing Multi-channel Multi-polarisation Imager ehk 3MI on Euroopa Kosmoseagentuuri (ESA) ja Euroopa Meteoroloogiasatelliitide Kasutamise Organisatsiooni (EUMETSAT) koostöös välja töötatud sensor (EUMETSAT, 2025a). See asub Metop teise põlvkonna plaarorbiitsatelliidi Metop-SG A1 pardal, mis saadeti orbiidile 2025. aasta augustis (ESA, 2025). 3MI on tehnoloogiliselt eriline passiivne sensor, kuna mõõdab peegeldunud kiirgust mitme vaatenurga alt, mitmel lainepikkusel ja erinevate polarisatsioonidega, mis võimaldab aerosoolide omadusi tavapärasest täpsemalt hinnata (Marbach jt, 2013). Sensori peamine kasutusala on aerosoolide seire ja nende kliimamõju uurimine, mistõttu on 3MI kaasatud ka käesolevasse töösse (ESA, 2025).

2.1.5 FCI

Flexible Combined Imager (FCI) on paindlik kombineeritud kujutisandur, mis on üks sensoritest Meteosat kolmanda põlvkonna geostatsionaarsetel satelliitidel ja osa samanimelisest missioonist (Martin jt, 2021). Missioon ja esimene satelliit MTG-I1 saadeti orbiidile 2022. aasta detsembris. FCI disainiti olema uuendatud versioon SEVIRI sensorist (Peatükk 2.1.6), mis on töös olnud aastast 2002 (Coste jt, 2004; Torrisi jt, 2026) ning pakub täiendatud andmeid, tänu millele saame paremat informatsiooni ilma ja atmosfääri kohta, mille hulka kuuluvad pilved ja aerosoolid.

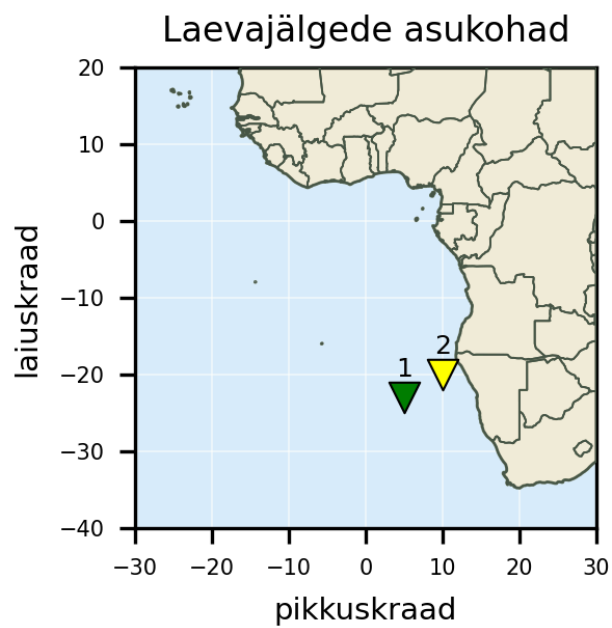
2.1.6 CM SAF CLAAS-3

EUMETSAT Satellite Application Facility on Climate Monitoring (CM SAF) on keskus, mis töötleb ja arendab kvaliteetseid satelliitandmeid, et pakkuda usaldusväärseid kliimaprodukte Maa kiirgusbilansi ja veeringluse jälgimiseks, et toetada Maa kliima mõistmist (CM SAF, 2020; Benas jt, 2023). CLAAS-3 (Cloud property dAtAset using SEVIRI) on kolmas versioon CM SAF pilveandmete kogudest, mille andmed pärinevad METEOSAT Second Generation (MSG) pardal olevalt SEVIRI sensorilt (Benas jt, 2023; CM SAF, i.a). SEVIRI sensor paikneb Meteosat-8, 9, 10 ja 11 satelliitide peal, mida kõiki opereerib EUMETSAT (Benas jt, 2023). CM SAF CLAAS-3-st saadud andmed on kõige vähem töödeldud

lähteandmete põhjal kokku pandud, mis tähendab, et väljundandmed on töödeldud ja üldistatud.

2.2 Andmete töötlemine

Töös on autor visualiseerinud pilve efektiivset raadiust (ingl *Cloud Effective Radius*) kasutades MODIS-e ja VIIRS-i andmeid ning vedelas faasis pilvevee vertikaalselt integreeritud hulka (ingl *Cloud Liquid Water Path*) kasutades SEVIRI andmetel põhinevat CM SAF CLAAS-3 andmestikku. Autor võrdles neid parameetreid visualiseeritud laevajälgede puhul. Analüüsi jaoks valiti mõlemal joonisel jälje sees ja väljas kolm 10–40 pikslit katvat riskülikukujulist ala. Iga ala kohta arvutati parameetri keskmise ning kasutati seejärel kolme ala keskmist, et hinnata jälje ja ümbritseva pilve erinevusi. Antud sensorid valis autor andmete kättesaadavuse järgi. Seetõttu ei ole näiteks EarthCARE ega 3MI produkte töös visualiseeritud, kuna nende missioonid on hiljuti käivitunud ning avalikult kättesaadavaid andmeid on praegu veel väga piiratud mahus. Joonistel visualiseeritud laevajäljed asuvad Aafrika mandrist läänepool lõunapoolkeral (Joonis 3). Piirkonna valik oli tingitud geostatsionaarse satelliidi piirkonnast ning kuupäeva valik sobivate pilvede ja jälgede olemasolust, mis olenevalt ilmast ja ajast pole alati nähtavad. Valitud piirkonnas toimub mandril sadama tõttu tihe laevaliiklus, kuid rannikust eemal paiknevad pilved on vähem saastunud. Visuaalide loomiseks (Joonised 3, 4, 5, 7 ja 8) kasutas töö autor PyCharm keskkonda ning Python koodi loomise abistamiseks Microsoft Copilotit. Töös on kasutatud tehisarut Copilot programmeerimiskoodi loomiseks (Lisa 3), keerulisemate ingliskeelsete mõistete lahtimõtestamiseks, eestikeelsete teaduslike terminite leidmiseks ning redigeerimiseks. Tehisarut abi ei ole kasutatud sisu ega põhiteksti loomiseks.



Joonis 3. Visualiseeritud laevajälgede asukohad. 1) 01.08.2023, 2) 03.08.2023.

3. TULEMUSED JA ARUTELU

Tulemuste peatükis on välja toodud sensorite omadused, mis määravad laevajälgede nähtavuse ja analüüsitavuse satelliitandmete abil. Võrdlus keskendub neljale tunnusele: ajaline lahutus ja vaateala laius, ruumiline lahutus, spektraalne lahutus ning pilve- ja aerosooliproduktide olemasolu. Need omadused mõjutavad otseselt, kui täpselt ja kui sageli on võimalik laevajälgi tuvastada ning millist lisainfot saab pilvede ja aerosoolide kohta tuletada. Tabelis 2 on esitatud vaid laevajälgede analüüsi seisukohalt asjakohased pilve- ja aerosooliproduktid ning sensorite laiemaid missioonipõhiseid produkte ei ole käesolevas töös käsitletud. Järgnevad alapeatükid käsitlevad iga omadust eraldi ning toovad välja sensoritevahelised erinevused.

3.1 Sensorite võrdlus

Tabel 2. Sensorite võrdlus. Allikad vt Lisa 2.

SENSOR	AJA-LINE LAHUTUS	VAATE-ALA LAIUS	RUUMI-LINE LAHUTUS	SPEKTRAALNE LAHUTUS	PRODUKTID
Polaarorbiidil					
MODIS	1-2 päeva	2230 km	250 m, 500 m, 1000 m	36 kanalit	Pilvemask, pilve optiline paksus, pilvepiiskade efektiivne raadius, aerosoolide optiline paksus, aerosoolide tüüp
VIIRS	1 päev	3000 km	350 m, 750 m	22 kanalit	Pilvemask, pilve optiline paksus, pilvepiiskade efektiivne raadius, aerosoolide optiline paksus, aerosoolide osakeste suurus ja tüüp, pilvekihid
ATLID	25 päeva	150 km	100 m (vertikaalne)	1 spektraalne lainepikkus ja 3 mõõtekanalit	Aerosooli optiline paksus, aerosooli kihi optiline paksus ja kirjeldus, aerosooli tüüp, pilve tipu kõrgus, osakese efektiivne raadius, tagasihajumise koefitsent, jääfaasis pilvevee sisaldus
CPR	25 päeva	150 km	500 m (vertikaalne),	1 kanal	Pilvemask, pilveosakese tüüp,

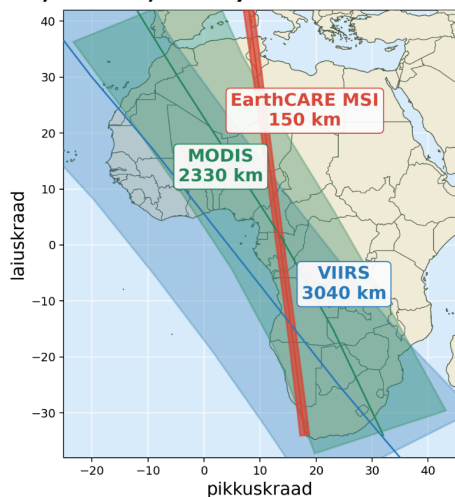
			750 m (horisontaalne)		vedela vee sisaldus, optiline paksus, vedelas faasis pilvede efektiivne raadius, vedelas ja jääfaasis pilvevee hulk
MSI	25 päeva	150 km	500 m	7 kanalit	Pilvetüüp, pilvefaas, pilve optiline paksus, pilveosakese efektiivne raadius, pilvetipu temperatuur, vedela vee hulk, aerosooli optiline paksus
3MI	1 päev	2200 km	4000 m	12 spektraalkanalit	Aerosooli optiline paksus, aerosooli efektiivne raadius, aerosooli tüüp, pilve optiline paksus, pilvetüüp, pilve ja aerosooli kõrgus, pilvetipu mikrofüsika
Geostatsionaarsed					
FCI	10 minutit	täisketas	1000 - 2000 m	16 kanalit	Pilvemask, pilvetipu temperatuur, peegeldustegur, optimaalne pilveanalüüs, atmosfääri liikumisvektorid, sademete hulk
CM SAF CLAAS ed. 3.0					
SEVIRI	15 minutit	täisketas	3000 m	12 kanalit	Pilvemask, pilvefaas, pilvkate, pilve optiline paksus, pilveosakese efektiivne raadius, pilvetipu kõrgus, pilvetipu temperatuur, pilve vedela vee hulk, jääfaasis vee hulk

3.2.1 Ajaline lahutus ja vaateala laius

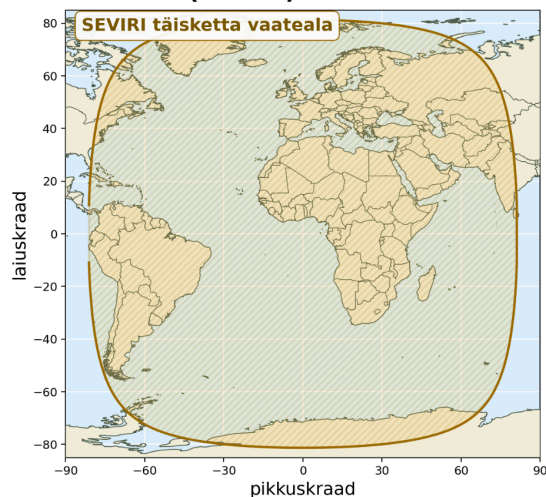
Laevajäljed on dünaamilised nähtused, seetõttu on nende tuvastamise ja jälgimise puhul äärmiselt oluline kõrge ajaline lahutus ehk kui palju aega kulub, et sensoril õnnestuks sama ala kohta mõõtmised teha. Geostatsionaarsed satelliidid on paiksed ühe ala kohal erinevalt polaarorbiidi sensoritest, mille taaskülastusaeg on enamasti 1-16 päeva. Ühe laevajälje eluiga võib kesta kuni 24h, mõndadel juhtudel isegi kauem (Patel ja Shand, 2022) ning nende kuju muutub minutitega, seega geostatsionaarsete sensorite SEVIRI ja FCI 10-15 minutiline ajaline lahutus, võimaldab analüüsida laevajälje muutusi väga kõrge täpsusega. EarthCARE-i näitel on näha, et globaalse katvuse saavutamise kiirus oleneb ka vaateala laiuusest (Joonis 4). Kuna EarthCARE satelliit skaneerib vaid kitsast vaateala korraga (150 km) läheb sensoritel

25 päeva aega, et saada täielik pilt Maast. MODIS, VIIRS ja 3MI on polaarorbiidi sensoritest suurepäraste ajaliste lahutustega saavutades globaalne katvus 1-2 päevaga ning nende vaatala laius on ka 2000-3000 km. Polaarorbiidi sensorid on head jälgede tuvastamiseks, kuid aerosoolide ja pilvede lühiajalise arengu analüüsimiseks on parem kasutada geostatsionaarsete satelliitide andmeid.

Polaarorbiidi satelliitide sensorite (MSI, MODIS, VIIRS) vaatealad üle Aafrika



Geostatsionaarse satelliidi (SEVIRI) vaateala



Joonis 4. Illustratiivne joonis erinevate satelliitide sensorite (EarthCARE MSI, MODIS, VIIRS, SEVIRI) katvusalaadest. Joonis kujutab erinevate satelliitsensorite tüüpilisi katvusalasid, mitte nende täpseid orbiite.

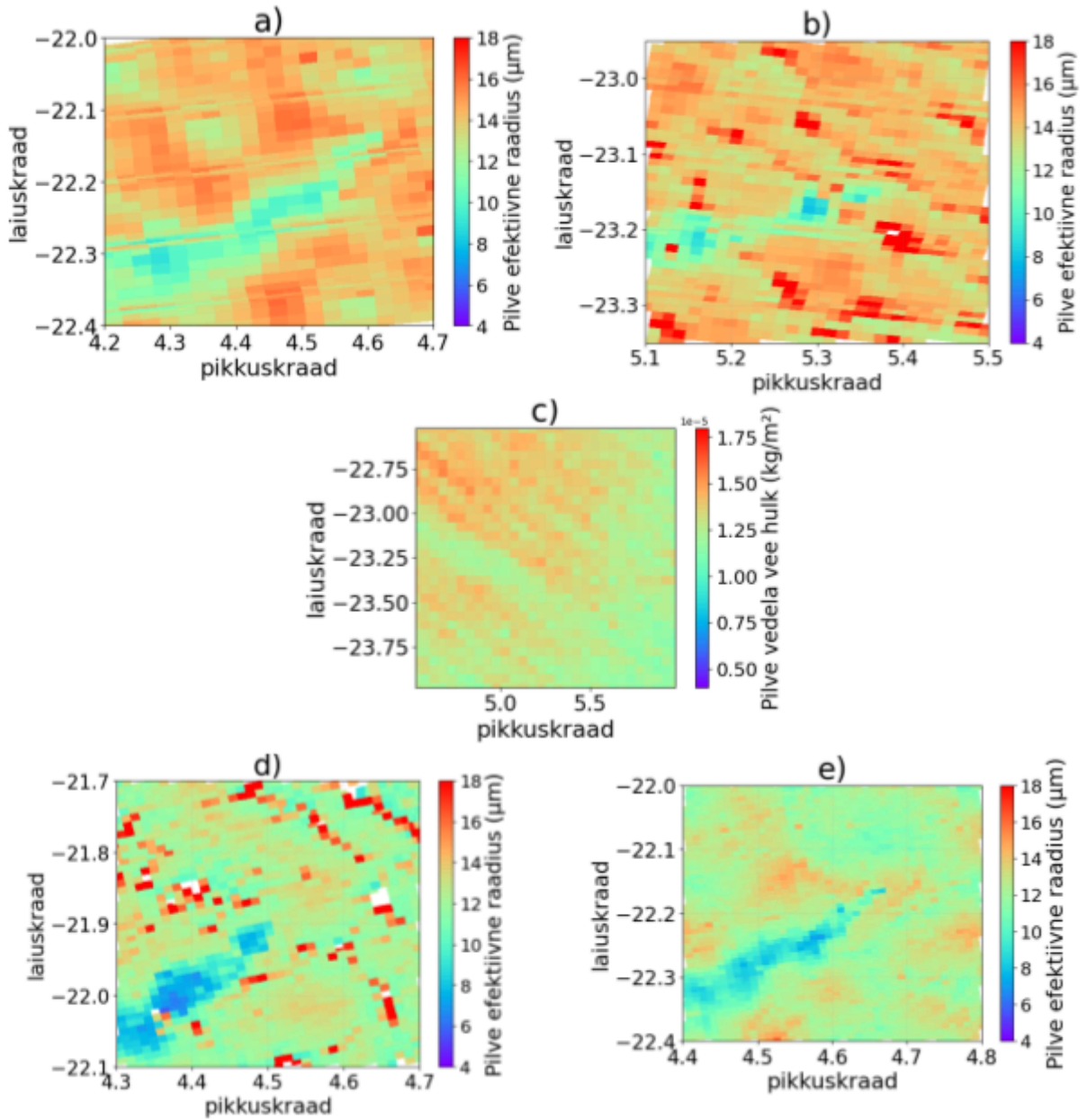
3.2.2 Ruumiline lahutus

Kuigi geostatsionaarsed satelliidid on suurepärase ajalise lahutusega, on nende suur puudus ruumiline lahutus, mis on palju madalam võrreldes polaarorbiidi sensoritega. Ruumiline lahutus määrab piksli suuruse ehk kui täpselt on võimalik näha vaateala (Joonis 5). Laevajäljed on enamasti kitsad ja lineaarsed, seega ruumiline lahutus määrab, kas jälg on nähtav ning kui detailselt on selle kuju ja intensiivsust võimalik analüüsida. MODIS, VIIRS, MSI, 3MI, SEVIRI ja FCI kujutavad tasapinnalisi pilte, mille pealt saab tuvastada laevajälje kuju. EarthCARE-i kaks sensorit, ATLID ja CPR annavad meile vertikaalse profiili aerosoolikihist ja pilve struktuurist ehk nende ruumiline lahutus on täpne, aga väga piiratud vaatealas. ATLID on aktiivne lidar, millest tuleb laserkiir lainepikkusega 355 nm, seega tema

pikslisuurus ei ole üks-ühele võrreldav teiste sensoritega. ATLIDi tegelik ruumiline lahutus on ligikaudu 30 m horisontaalselt ja 100 m vertikaalselt. CPR on radar, mis töötab sagedusel 96 GHz ning selle vertikaalne ruumiline lahutus on 500 m ning horisontaalne lahutus 750 m. Tänu kõrgele ruumilisele lahutusele on EarthCARE väga sobilik üksikute juhtumite detailseks uurimiseks, kuid mitte laevajälgede tuvastamiseks globaalsel tasemel.

MODIS pakub andmeid ruumilise resolutsiooniga vahemikus 250 m kuni 1 km: kahes kanalis 250 m, viies kanalis 500 m ja kahekümne üheksas kanalis 1000 m ruumiline lahutus (World Meteorological Organization, i.a). Kuna MODISel on 36 erineva spektraalkanali detektorid, siis varieeruvad ka sensori ruumilised lahutused. VIIRSil on viis kanalit 375 m ruumilise lahutusega ja kuusteist 750 m lahutusega. Pilve ja aerosooli andmed on peamiselt saadaval 750 m ruumilise lahutuse juures (“VIIRS Spectral ...”, 2026c). VIIRSi mõõtmiste abil luuakse produkte ka 500 m ja 1000 m ruumilise lahutusega (“Visible Infrared ...”, i.a), kuid aerosooli- ja pilveproduktid on saadaval eelmainitud täpsema 750 m lahutusega. Sarnase ruumilise lahutusega on veel EarthCARE pardal MSI sensor, mis 150 km vaatealas tagab 500 m ruumilise lahutusega andmed.

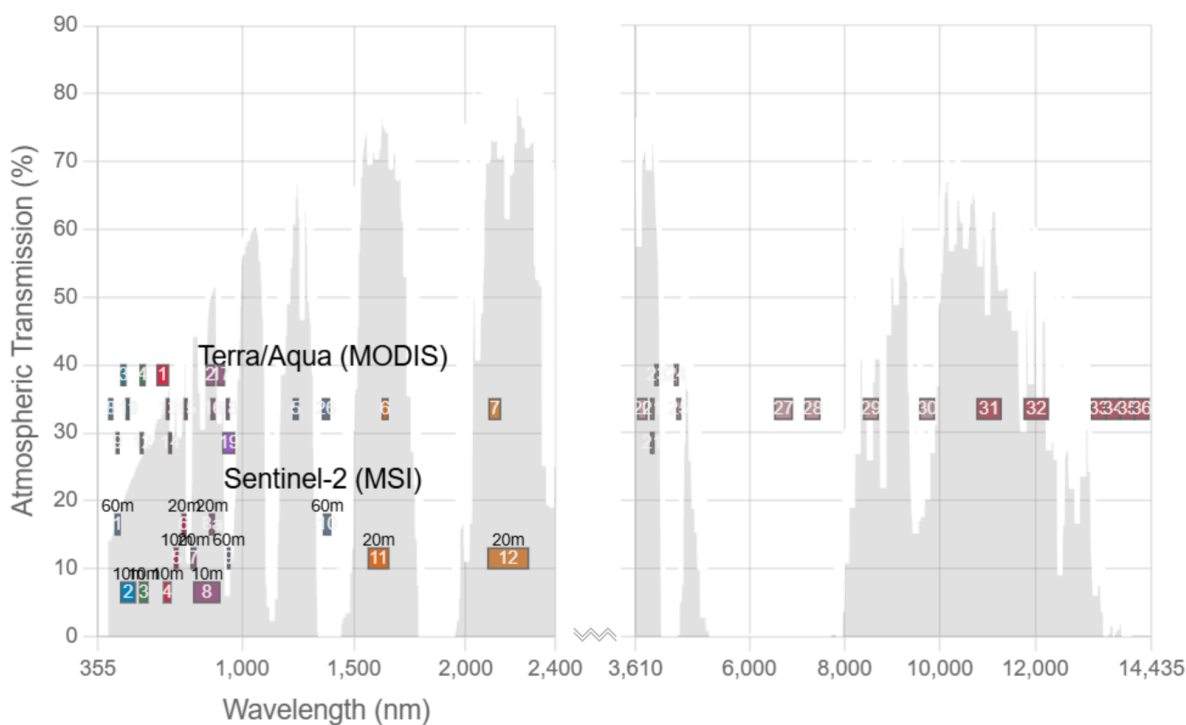
SEVIRI ja FCI ruumilised lahutused on oluliselt madalamad. SEVIRI puhul 11 kanali ruumiline lahutus on 3000 m ja ühel kanalil on 1000 m (EUMETSAT User Portal, 2025) ning FCI-l 1000-2000 m erinevate kanalite jaoks. Võrdluses olevatest sensoritest on kõige kehvema lahutusega (4000 m) sensor 3MI. Selliste ruumiliste lahutustega võib üks piksel sialdada korraga nii pilve kui ka allolevat merd, mistõttu sõltub pildil laevajälje ja ümbritseva ala kontrast mitte ainult pilvepiiskade omadustest, vaid ka sellest, kui suur osa pikslis on pilv või veepind (Putsay jt, 2021). Madalama ruumilise lahutuse tõttu kaob SEVIRI, FCI ja 3MI pildidel ära laeva jälgedele iseloomulik peenem pilvestruktuur (Joonis 5), kuid SEVIRI ja FCI madalat ruumilist lahutust kompenseerib nende kõrge ajaline lahutus. Seega saame kasutada geostatsionaarseid satelliidide, et tuvastada laevajälje olemasolu ning jälgida selle muutusi ajas ning täpsemate analüüside tegemiseks tasub kasutada parema ruumilise lahutusega polaarorbiidi sensoreid.



Joonis 5. Laevajälgede algusosad suurendatult, 1. august 2023. a) MODIS (Aqua) b) MODIS (Terra), c) SEVIRI (CM SAF CLAAS ed. 3.0), d) VIIRS (NOAA-20), e) VIIRS (Suomi NPP).

3.2.3 Spektraalne lahutus

Sensori spektraalne lahutus väljendab kanalite arvu, mis mõõdavad erinevaid lainepikkuste vahemikke, tänu millele saame informatsiooni ja andmeid atmosfääri, ookeanide ja maapinna seisundi kohta. Spektraalse lahutuse puhul on oluline ka kui laia spektri osa iga kanal katab (Joonis 6). Käesolevas töös on käsitluse all multispektraalsed ja aktiivsed sensorid, millele on omapärane paar kuni parkümmend spektraalset kanalit, mis on piisav laevajälgede uurimise seisukohalt. Käesolevas töös ei keskenduta kanalite ribalaiuste detailsele analüüsile, kuna olulisem on spektraalne katvus ja kanalite paiknemine VIS-NIR-SWIR-TIR piirkonnas, mitte üksikute ridade täpne laius.



Joonis 6. Kanalite laiused spektri ulatuses MODIS-e ja MSI näitel. X- teljel on lainepikkus (nm) ja y-teljel atmosfääri läbilaskvus (%). (“Spectral Bands ...”, 2025)

Laevajäljed on hästi nähtavad lähiinfrapuna kanalites väiksemate pilvepiiskade tõttu. Nagu varem arutatud (Peatükk 1.2), toimivad laevade poolt atmosfääri paisatud aerosoolid kondensatsioonituumadena ning esineb Twomey efekt. MODIS-e ja VIIRS-i kanalitel on

väga lai spektraalne katvus hõlmates nähtava valguse (VIS), lähiinfrapuna (NIR), lühilaine-infrapuna (SWIR) ja soojuskiirgust (TIR) ("MODIS To VIIRS ...", i.a). VIIRSI spektraalne vaateväli on 0.4 μm kuni 12.5 μm , samas kui MODIS-e oma ulatub 0.4 μm kuni 14.5 μm . MODIS-el on erinevalt VIIRS-ist veel CO₂ ja veeauru infrapuna neeldumisribasid katvad kanalid, mis on temperatuuri ja niiskuse profiilide koostamisel olulised, kuid mitte niivõrd olulised aerosoolide mikrofüüsika uurimiseks ("MODIS To VIIRS ...", i.a). Kuigi VIIRS-i spektraalne lahutus on 22 kanaliga väiksem MODIS-e 36-st, siis kompenseerib selle puudujäägi parem ruumiline lahutus kogu skaneerimise ulatuses. Erinevalt MODIS-est suudab VIIRS säilitada konstantse piksli suuruse ka vaateala äärealadel, elimineerides laia vaateväljaga sensoritele omase pildi väljavenimise efekti.

Kanalite arvu poolest järgnevad geostatsionaarsete satelliitide sensorid FCI ja SEVIRI, millel on vastavalt 16 kanalit, lainepikkusvahemikuga 0.44 μm kuni 13.30 μm ja 12 kanalit, lainepikkusvahemikuga 0.6 μm kuni 13.4 μm (EUMETSAT User Portal, 2025). FCI disaniti olema uuem ja täiendatud versioon SEVIRI-st, kandes enda pardal 9 uuendatud infrapuna kanalit. Uuendatud FCI kanalid on võimekamad SEVIRI omadest pilve analüüsis ning veeauru ja pilve mikrofüüsika andmete kogumises (Torrise, 2026).

Sarnaselt SEVIRI-le on 3MI-l samuti 12 spektraalkanalit, kuid ruumiline lahutus võrreldavatest sensoritest kõige madalam. Selle spektraalkanalid katavad vahemiku 0.4 μm kuni 2.13 μm , mis on tihedamalt jaotatud VIS–NIR–SWIR piirkonnas kui MODIS-el, kuigi MODIS katab laiemat spektraalset vahemikku kuni 14.4 μm . Lai spektraalne katvus võimaldab 3MI-l tuletada teavet pilvede mikrofüüsika kohta pilvetippudes ning hinnata aerosoolide optilisi ja füüsikalisi omadusi (Marbach jt, 2013). Samas madala ruumilise lahutuse tõttu ei ole 3MI mõeldud laevajälgede visuaalseks tuvastamiseks, kuid tänu mitmekülgse sensori ehituse tõttu võimaldab see tuletada aerosoolide ja pilvede ruumilist struktuuri. Võrreldes MODIS-ega, millel pole polarimeetriat ja nii tihedalt paigaldatud VIS-NIR-SWIR kanaleid, on 3MI aerosoolide füüsika mõttes kvalitatiivselt parem, kuigi ruumiliselt kehvem.

EarthCARE sensoritest rääkides on oluline märkida, et ATLID on lidar, mis töötab ühel lainepikkusel (355 nm). Ta ei ole multispektraalne sensor ning seetõttu ei ole spektraalne lahutus tema puhul klassikalises mõttes rakendatav. ATLID mõõdab ühel laserlainepikkusel Mie hajumist, Rayleigh hajumist ja depolarisatsiooni, seega ei paku ATLID spektraalset

informatsiooni pilvede või aerosoolide kohta, vaid keskendub nende vertikaalse struktuuri ja osakeste omaduste tuletamisele. CPR on radar ning töötab 94 GHz radarsagedusel (Born to Engineer, 2024). Ka CPR radar ei paku spektraalset informatsiooni, vaid tema peamine väärtus on pilveprofiilide loomine, mõõtes pilvede ja sademete vertikaalset struktuuri ja dünaamikat. MSI on ainus multispektraalne sensor EarthCARE missioonis. MSI-l on 7 spektraalkanalit, millest 4 mõõdavad päikesevalguse peegeldust (VIS-NIR-SWIR) ja 3, mis mõõdavad soojuskiirgust (TIR) (ESA, i.a). Viimased 3 on termilise infrapuna kanalid, mis võimaldavad teha ka õiseid vaatlusi (EarthCARE, i.a). Võrreldes MODIS-e või VIIRS-iga on MSI spektraalne lahutus oluliselt kitsam, seega ei võimalda nii detailset pilvede mikrofüüsika või aerosoolide spektraalset analüüsi. See-eest täiendab ta EarthCARE-i lidar- ja radarandmeid, andes ülevaate pilvede ja aerosoolide horisontaalselt ulatusest ja laiendades vertikaalsete profiilide infot kolmemõõtmeliseks.

3.2.4 Aerosoolide ja pilvede produktid

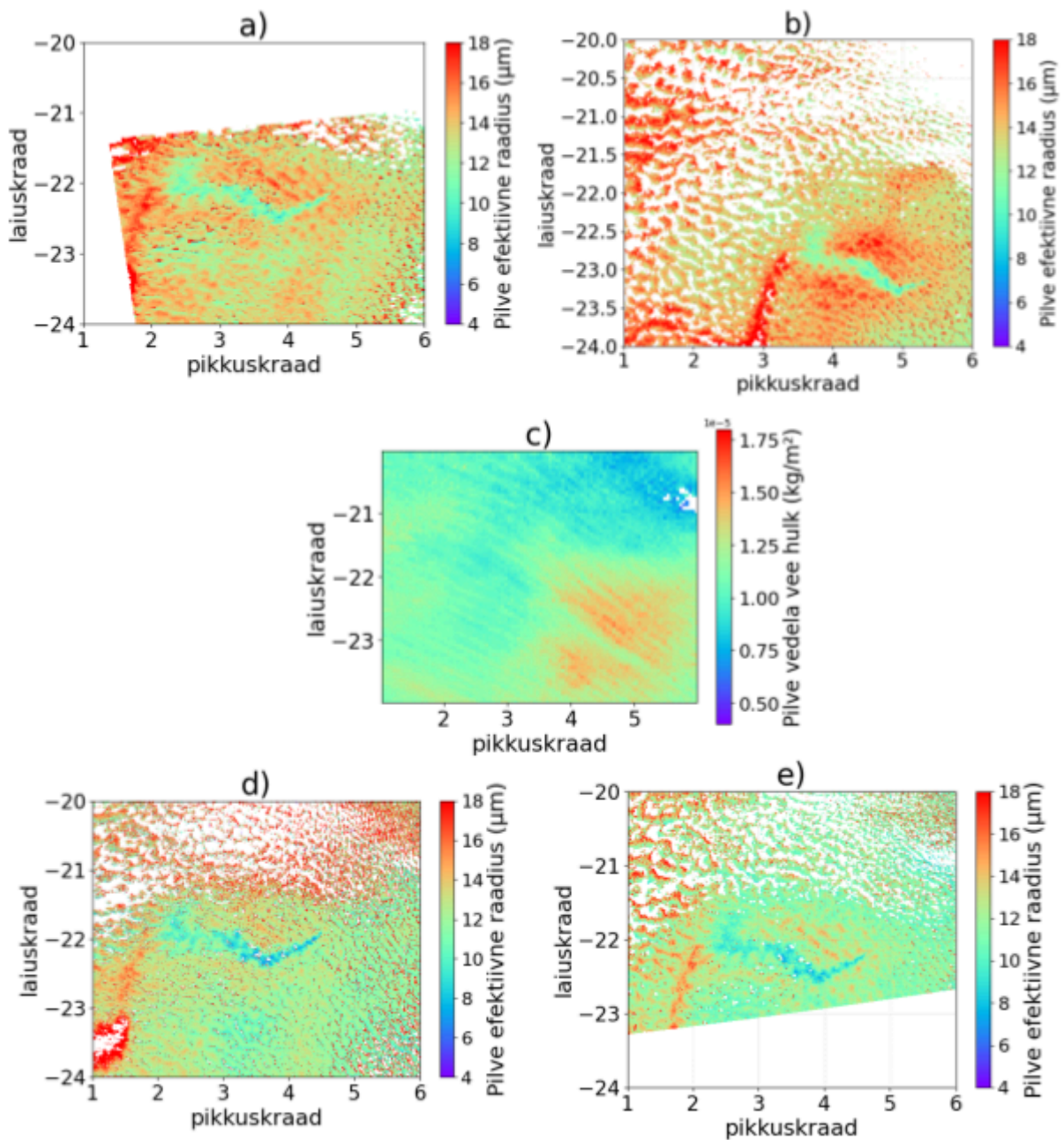
Satelliitide abil kogutakse toorandmed (kiirguse mõõtmised), mis saadetakse Maale, kus neid töödeldakse erinevateks produktideks. Saadud satelliitandmeid jagatakse töötlustasemeteks tase 0 (ingl *Level 0*) kuni tase 4 (ingl *Level 4*), mis näitavad kui palju on andmeid töödeldud enne kasutajale kättesaadavaks tegemist. Tase 2 sisaldab tavaliselt kiirgusmõõtmistest tuletatud füüsikalisi parameetreid, mistõttu on Tabelis 2 välja toodud produktid enamasti 2. taseme andmed. Satelliitide produktid sisaldavaid andmeid maapinnast kuni atmosfäärini, mistõttu laevajälgede tuvastamiseks ja uurimiseks tuleb vaadata täpsemalt aerosoolide ja pilvede produkte. Kuna sensorid mõõdavad erinevaid füüsikalisi kiirguslikke signaale, erineva geomeetriaga, erineva spektraalsete võimetega ja erinevate eesmärkidega, siis on erinevate sensorite abil saadavad erinevad produktid.

Aerosoolid laevajälgedes põhjustavad muutusi pilvede mikrofüüsikas, seega on vajalik analüüsida produkte nagu pilvepiiskade suurus, optiline paksus, vedela vee sisaldus ning aerosoolide hulk ja tüüp. Tabelis 2 on välja toodud näiteid asjakohastest produktidest, mida antud sensorid võimaldavad tuletada. Pilveproduktid on näiteks pilvemask, pilve optiline paksus, efektiivne raadius, vedela vee hulk, pilvefaas. Pilvemask esmalt tuvastab, kas piksel on pilvine ehk pilve olemasolu ning pilve optiline paksus näitab pilve läbipaistmatust.

Efektiivne raadius määrab pilvepiisa raadiuse ning kuna aerosoolirikkad saastunud pilved koosnevad väiksematest pilvepiiskadest kui ümbritsev vähem saastunud pilv, siis on tänu sellele laevajäljed nähtavad (Joonis 7 ja Joonis 8). Samade jooniste pealt on ka näha, et laevajälgede ja ümbritseva pilve saastumist on saab analüüsida ka erinevaid produkte kasutades, näiteks pilve efektiivse raadiuse või pilve vedela vee hulka vaadeldes. Vedela vee hulk näitab pilves vee integreeritud kogust atmosfäärisambas. See on sageli suurem just laevajälgedes, kuna sademete teke on pärsitud (Toll jt, 2019). Töös visualiseeritud laevajälgede (Joonis 7 ja Joonis 8) sees oli pilvepiiskade efektiivne raadius keskmiselt 4,5 μm (Tabel 3) ja 2,8 μm (Tabel 4) väiksem, võrreldes lähedal asuvate saastumata pilvede piiskadega. Pilve vedela vee hulk kahanes laevajäljes keskmiselt 2,5 kg/m^3 (Tabel 3) ja 0,44 kg/m^3 (Tabel 4), võrreldes saastumata pilvedega. Vedela vee hulga analüüs põhineb SEVIRI andmetel, mille ruumiline lahutus on kehvem, mistõttu ei ole võimalik keskmiste erinevusi sama suure täpsusega määrata kui kõrgema lahutusega sensorite puhul.

Oluline erinevus on aktiivsete ja passiivsete sensorite vahel, mis mõõdavad erinevat tüüpi ja erineva päritoluga kiirgust, mille tõttu erinevad ka nende produktid. Passiivsed multispektraalsed sensorid, nagu MODIS, VIIRS, MSI, SEVIRI ja FCI, mõõdavad päikesevalguse peegeldust ja soojuskiirgust. Seetõttu saavad nad tuletada andmeid pilvede kohta, nagu optiline paksus, efektiivne raadius ja pilvefaas, aga nad ei ole võimelised nägema pilve sisse, et näha vertikaalset profiili. Selleks on meil olemas laser- ja radarisignaali mõõtvad sensorid ATLID lidar ja CPR radar, mis on aktiivsed sensorid ja võimelised tuletama pilve vertikaalset struktuuri, aerosoolikihtide kõrgust ja pilve faasi. ATLID ja CPR ei näe horisontaalselt laia ala ja ei anna spektraalseid mikrofüüsika parameetreid, kuid nad on võimelised mõõtma pilvepiiskade suurust ja langemiskiirust. Lisaks passiivsetele multispektraalsetele sensoritele ja aktiivsetele lidar- ja radarinstrumentidele on olemas ka polarimeetrilised sensorid, mille hulka kuulub 3MI. Erinevalt eelnevatest passiivsetest sensoritest ei mõõda 3MI ainult peegeldunud kiirgust vaid ka selle polarisatsiooni ning teeb seda mitme vaatenurga jaoks. See võimaldab tuletada aerosoolide ja pilvepiiskade mikrofüüsikalisi omadusi, nagu kuju, suuruse jaotust ja valguse murdumisnäitaja, mida tavalised multispektraalsed sensorid ei suuda. 3MI ruumiline lahutus on siiski kõige madalam võrreldavatest sensoritest, seega laevajälgede tuvastamiseks ta sobivaim ei ole, kuid tal on unikaalne võime anda detailset teavet aerosoolide füüsikaliste omaduste kohta. EarthCARE vertikaalne mõõtmine ei konkureeri MODIS-ega otseselt, vaid täiendab MODIS-e andmeid.

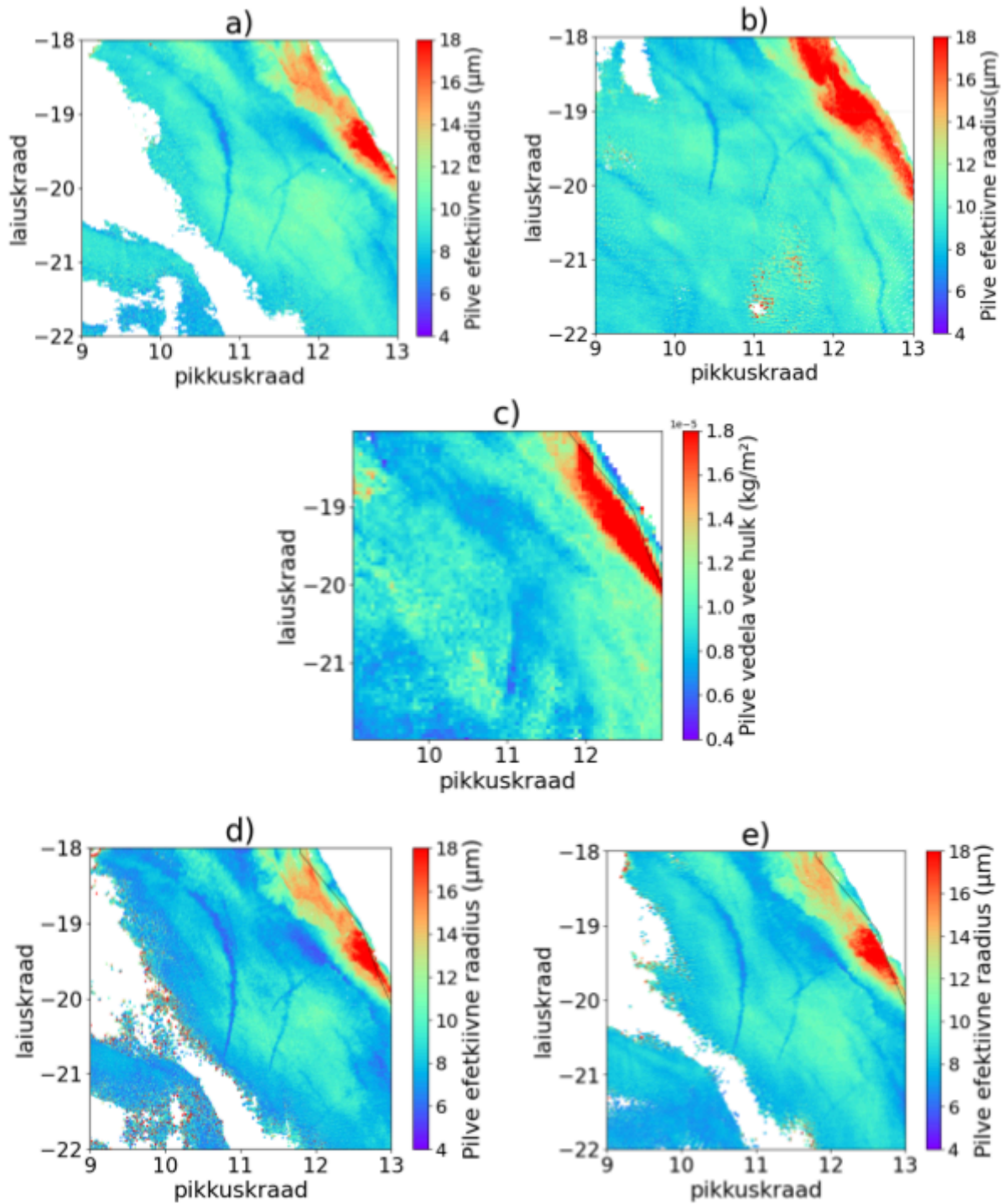
Lisaks spektraalne lahutus ka piirab, mis produkte on sensor võimeline pakkuma. MODIS-el ja VIIRS-il on mõlemal palju spektraalakanaleid, samas kui MSI-l on vaid neli, mis ei anna andmeid aerosooli tüübi ja vedela vee hulga kohta.



Joonis 7. Laevajälg 1. augustil 2023 piirkonnas 1–6° N ja 24–20° W. a) MODIS (Aqua) b) MODIS (Terra), c) SEVIRI (CM SAF CLAAS ed. 3.0), d) VIIRS (NOAA-20), e) VIIRS (Suomi NPP).

Tabel 3. Joonisel 7 visualiseeritud füüsikalised suurused ühikutega.

01.08.2023	Laevajäljes	Ümbritsevas alas	Erinevus
	Pilvepiiskade efektiivne raadius		
a) MODIS (Aqua)	10,60 μm	14,55 μm	-3,95 μm
b) MODIS (Terra)	10,86 μm	15,15 μm	-4,29 μm
d) VIIRS (NOAA-20)	8,43 μm	13,37 μm	-4,94 μm
e) VIIRS (Suomi NPP)	8,34 μm	13,01 μm	-4,67 μm
	Pilve vedela vee hulk		
c) SEVIRI (CM SAF CLAAS ed. 3.0)	1,09 kg/m^3	1,43 kg/m^3	-2,5 kg/m^3



Joonis 8. Laevajäljed 3. augustil 2023 piirkonnas 9–13° N ja 22–18° W. a) MODIS (Aqua) b) MODIS (Terra), c) SEVIRI (CM SAF CLAAS ed. 3.0), d) VIIRS (NOAA-20), e) VIIRS (Suomi NPP).

Tabel 4. Joonisel 8 visualiseeritud füüsikalised suurused ühikutega.

03.08.2023	Laevajäljes	Ümbritsevas alas	Erinevus
	Pilvepiiskade efektiivne raadius		
a) MODIS (Aqua)	7,09 μm	10,40 μm	-3,31 μm
b) MODIS (Terra)	7,49 μm	9,80 μm	-2,31 μm
d) VIIRS (NOAA-20)	6,39 μm	9,31 μm	-2,92 μm
e) VIIRS (Suomi NPP)	6,86 μm	9,44 μm	-2,58 μm
	Pilve vedela vee hulk		
c) SEVIRI (CM SAF CLAAS ed. 3.0)	0,66 kg/m^3	1,1 kg/m^3	-0,44 kg/m^3

JÄRELDUS

Käesoleva töö eesmärk oli hinnata erinevate kaugseire sensorite sobivust laevajälgede tuvastamiseks ning analüüsida, millised sensorid võimaldavad kõige täpsemalt kirjeldada laevade poolt emiteeritud aerosoolide mõju pilvede mikrofüüsikale. Tulemused näitavad, et sensorite võimekus sõltub otseselt nende ruumilisest, ajalisest ning spektraalsest lahutusest ja aerosoolide ning pilvede produktide olemasolust, mistõttu ei ole olemas üht universaalset lahendust. Erinevad sensorid täiendavad üksteist ning pakuvad koos kasutatuna kõige terviklikumat ülevaadet laevajälgede omadustest ja ajalisest arengust.

MODIS on seni teaduses olnud laevajälgede uurimises peamine sensor tänu oma suurele spektraalsele ulatusele, heale ruumilise lahutusele ja igapäevasele globaalsele katvusele. Käesolevas töös käsitletud sensorid ei asenda MODIS-e rolli, kuid pakuvad olulisi täiendusi. EarthCARE lisab laevajälgede kaugseiresse vertikaalse mõõtme, võimaldades esmakordselt analüüsida pilvede ja aerosoolide vertikaalset struktuuri ning hinnata aerosoolide mõju pilvepiiskade omadustele detailsemalt kui varasemate missioonidega. Kuigi EarthCARE ruumiline ja ajaline lahutus ei võimalda MODIS-ega samaväärset laiaulatuslikku jälgimist, on see asendamatu juhul, kui uuritakse pilvede mikrofüüsikat või aerosoolide vertikaalset jaotust.

VIIRS instrument on MODIS-ega võrreldava võimekusega laevajälgede uurimisel. VIIRS-i vaatevälja laius on suurem ning ruumiline lahutus osaliselt parem, mis võimaldab laevajälgi tuvastada suure täpsusega. Spektraalne ulatus on kitsam, kuid üldine võimekus on MODIS-ega võrreldav. Arvestades, et VIIRS on mitme satelliidi pardal ja jääb kasutusse ka tulevikus, on see realistlik järjepidev andmeallikas MODISE-järgses ajastus.

Geostatsionaarsed sensorid SEVIRI ja FCI pakuvad olulist eelist laevajälgede ajalise arengu uurimisel. Nende kõrge ajaline lahutus võimaldab jälgida laevajälgede kiiret arengut, mis polaarorbiidil olevate sensorite puhul kaduma läheb. FCI ületab SEVIRI võimekust nii ruumilise lahutuse, spektraalsete kanalite kui ka vaatevälja poolest, mistõttu on see laevajälgede analüüsides jaoks parem. Samas on FCI andmestik veel suhteliselt noor, mistõttu pikaajaliste trendide uurimiseks sobib paremini SEVIRI-l põhinev CLAAS-3 andmestik.

3MI lisab laevajälgede kaugseire maastikule unikaalse polarisatsioonivõime, mis võimaldab hinnata pilvepiiskade mikrofüüsikalisi omadusi ja aerosoolide optilisi omadusi. See muudab

3MI väärtuslikuks täienduseks juhtudel, kus uuritakse laevajälgede mõju pilvede struktuurile või aerosoolide optilisi omadusi.

Tuleb arvestada, et passiivsed sensorid annavad detailse ülevaate pilvede ja aerosoolide horisontaalsest jaotusest, kuid ei võimalda hinnata nende vertikaalset struktuuri. Aktiivsed sensorid, nagu EarthCARE lidar ja radar, pakuvad vertikaalset profiili, kuid väiksema ruumilise katvusega. Seetõttu on sensorite kombineerimine laevajälgede uurimisel vältimatu, et saada terviklik ülevaade nii pilvede mikrofüüsikast kui ka ruumilisest dünaamikast.

Teades, et MODIS-e tööiga on lõppemas, on oluline hinnata teiste sensorite potentsiaali ja rakendusvõimalusi. Tulemused näitavad, et laevajälgede uurimisel tuleb valida sensori sobivus vastavalt uurimiseesmärgist, kuid kõige terviklikuma ülevaate annab erinevate sensorite kombineerimine. Edasised uuringud võiksid keskenduda laevajälgede analüüsimisele EarthCARE ning VIIRS-i andmete abil, arvestades EarthCAREi võimekust vertikaalset infot koguda ja VIIRS-i kasvavat kasutust uute satelliitide pardal.

KOKKUVÕTE

Käesoleva töö eesmärk oli hinnata erinevate satelliitsensorite sobivust laevajälgede tuvastamiseks ja analüüsimiseks, keskendudes peamiselt MODIS-ile ja sellele sarnanevatele passivsetele sensoritele. Arvestades polaarorbiidi sensorite ja geostatsionaarsete satelliitide ning aktiivsete ja passiivsete sensorite eripärasid, võrreldi sensorite ajalist, ruumilist ja spektraalset lahutust ning nende pakutavaid pilve- ja aerosooliprodukte, hõlmates MODIS-t, VIIRS-i, EarthCARE-i sensoreid (ATLID, CPR, MSI), 3MI-d, FCI-d ja SEVIRI-l põhinevat CM SAF CLAAS-3 andmestikku.

Tulemused näitasid, et MODIS-el on mitmeid selgeid eeliseid võrreldes teiste sensoritega, mistõttu on see seni olnud kõige sagedamini kasutatav kaugseiresensor laevajälgede uurimisel. Samas ilmnes, et ka teistel sensoritel on märkimisväärne potentsiaal panustada laevajälgede analüüsimisse. Eelkõige tõusis esile VIIRS, mis oma multispektraalsete omaduste tõttu võiks tulevikus täita MODIS-ega sarnast rolli. Olulist teaduslikku lisandväärtust pakub EarthCARE missioon, mis võimaldab senisest detailsemalt uurida pilvede ja aerosoolide vertikaalset jaotust ning nende omavahelisi seoseid. Kokkuvõttes ei ole ükski sensor universaalselt parim ega suuda MODIS-t selle eluaja lõppedes täielikult asendada. Küll aga näitab analüüs, et erinevate sensorite potentsiaali ja rakendusvõimaluste kombineerimine on võtmetähtsusega, et mõista laevajälgede kujunemist ning aerosoolide mõju pilvede omadustele.

Laevajälgede uurimine on oluline meetod aerosoolide ja pilvede vastastikmõju mõistmisel, mis on omakorda hädavajalik inimtegevuse kliimamõju täpsemaks hindamiseks. Sellest tulenevalt on oluline põhjalikumalt mõista erinevate satelliitsensorite võimalusi ja piiranguid laevajälgede uurimisel, sest just sensorite potentsiaal kujundab selle, kui detailset ja mitmekülgset teavet on võimalik laevajälgede analüüsimisel ja tõlgendamisel kasutada.

Detection and analysis of ship tracks from satellite data: the potential and applications of different satellite sensors

Ingel Elisabet Erm

SUMMARY

This thesis evaluates how well different satellite sensors can detect and analyse ship tracks, which are linear cloud features formed by aerosol emissions from ships. The work mainly focuses on MODIS and other passive remote sensing sensors with similar capabilities, as MODIS has played a central role in ship-track research for more than two decades. The study examines a range of current and upcoming instruments, including VIIRS, the EarthCARE sensors (ATLID, CPR, MSI), the 3MI sensor on Metop-SG, and the geostationary sensors FCI and SEVIRI (through the CM SAF CLAAS-3 dataset).

The thesis begins by outlining the physical processes behind ship-track formation and explains why ship tracks are important for understanding aerosol–cloud interactions and human influence on the Earth’s radiation budget. Based on this scientific background, the selected sensors are compared in terms of spatial, temporal, and spectral resolution, as well as the cloud and aerosol products they provide. The comparison also considers the differences between polar-orbiting and geostationary platforms, and between active and passive remote-sensing techniques, since these characteristics strongly shape the type of information each sensor can deliver.

The methodological approach combines a structured review of sensor specifications with an assessment of their potential applications in ship-track studies. The analysis highlights how spatial resolution affects the visibility of narrow ship-track structures, how temporal resolution influences the ability to follow their temporal development, and how spectral coverage supports the retrieval of cloud and aerosol properties. Active sensors such as ATLID and CPR add valuable vertical information, while instruments like VIIRS and MSI offer continuity with MODIS-type multispectral observations. Geostationary sensors contribute frequent temporal sampling that helps capture short-term changes in ship-track properties.

The results show that no single sensor can fully replace MODIS or serve as a universally optimal instrument for ship-track research. Instead, each sensor has specific strengths and limitations that make it more suitable for specific research goals than others—whether the focus is on detection, microphysical characterisation, temporal evolution, or vertical structure of ship tracks. This underlines the importance of understanding the potential and constraints of individual sensors when planning future studies on aerosol–cloud interactions. Furthermore, the benefits of combining different instruments for ship-track research is demonstrated.

Overall, the thesis demonstrates that ship-track research remains an important way to study human influence on cloud properties and the Earth’s radiation balance. As satellite missions continue to evolve, it becomes increasingly important to understand the capabilities and applications of different sensors, since their potential shapes how deeply and broadly such atmospheric phenomena can be analysed and interpreted.

TÄNUAVALDUSED

Soovin tänada oma juhendajaid Margit Auni ja Velle Tolli nende järjepideva nõustamise, abistamise ning konstruktiivse tagasiside eest kogu tööprotsessi vältel.

KASUTATUD ALLIKAD

Angal, A., Moyer, D., Xiong, X., Link, D., Schwarting, T., McIntire, J., Ji, Q., ja Sun, C. (2025). JPSS-4 VIIRS Pre-Launch Calibration Performance and Assessment. *Remote Sensing*, 17(13), 2146. <https://doi.org/10.3390/rs17132146>

Benas, N., Solodovnik, I., Stengel, M., Hüser, I., Karlsson, K.-G., Håkansson, N., Johansson, E., Eliasson, S., Schröder, M., Hollmann, R. ja Meirink, J. F. (2023). CLAAS-3: the third edition of the CM SAF cloud data record based on SEVIRI observations. *Earth Syst. Sci. Data*, 15, 5153–5170 <https://doi.org/10.5194/essd-15-5153-2023>

Born to Engineer (2024). *EarthCARE mission: Everything you need to know about ESA's groundbreaking climate satellite*. <https://www.bornctoengineer.com/earthcare-mission-everything-you-need-to-know-about-esas-groundbreaking-climate-satellite>. Viimati vaadatud 23.04.2026

Carslaw, K. S., Lee, L. A., Reddington, C. L., Pringle, K. J., Rap, A., Forster, P. M., Mann, G. W., Spracklen, D. V., Woodhouse, M. T., Regayre, L. A. ja Pierce, J. R. (2013). Large contribution of natural aerosols to uncertainty in indirect forcing. *Nature*, 503(7474), 67–71. <https://doi.org/10.1038/nature12674>

Chen, A., Howl, B. ja Sidel, A. (i.a). *What are aerosols?* NASA Goddard Earth Sciences Division Projects. <https://earth.gsfc.nasa.gov/climate/data/deep-blue/aerosols>. Viimati vaadatud 15.03.2026

CM SAF (2020). *Overview*. https://www.cmsaf.eu/EN/Overview/Overview_node.html. Viimati vaadatud 06.02.2024

CM SAF (i.a). *Digital Object Identifier Entry information for CLAAS_V003*. https://wui.cmsaf.eu/safira/action/viewDoiDetails?acronym=CLAAS_V003. Viimati vaadatud 06.04.2026

CM SAF (i.a). Product User Manual SEVIRI cloud products CLAAS Edition 3. https://www.cmsaf.eu/SharedDocs/Literatur/document/2022/saf_cm_knmi_pum_sev_cld_3_1_final_pdf.pdf?__blob=publicationFile. Viimati vaadatud 22.04.2026

Coste, P., Pasternak, F., Faure, F., Jacquet, B., Bianchi, S., Aminou, Donny, L., Luhmann, H., Hanson, C., Pili, P. ja Fowler, G. (2004). SEVIRI, the imaging radiometer on Meteosat Second Generation: in-orbit results and first assessment. *European Space Agency (Special Publication) ESA SP. 554. 165-172.*

https://www.researchgate.net/publication/234250777_SEVIRI_the_imaging_radiometer_on_Meteosat_Second_Generation_in-orbit_results_and_first_assessment

EarthCARE (i.a). *Multi-Spectral Imager (MSI).*

https://www.eorc.jaxa.jp/EARTHCARE/about/inst_msi_e.html. Viimati vaadatud 05.05.2026

EarthCARE Product Data Handbook (i.a). *AC__CLP_2B*

https://earthcarehandbook.earth.esa.int/catalogue/ac__clp_2b. Viimati vaadatud 28.04.2026

eoPortal (2024). *EarthCARE (Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer).*

<https://www.eoportal.org/satellite-missions/earthcare#eop-quick-facts-section>

EUMETSAT (2022). Product User Manual SEVIRI cloud products CLAAS Edition 3.

EUMETSAT CM SAF Climate Monitoring. doi: 10.5676/EUM_SAF_CM/CLAAS/V003

EUMETSAT (2025a). *Groundbreaking new sensor transforms how Europe tracks pollution, smoke and cloud from space.*

<https://www.eumetsat.int/groundbreaking-new-sensor-transforms-how-europe-tracks-pollution-smoke-and-cloud-space>

EUMETSAT (2025b). *MTG FCI L2 GII data guide.*

<https://user.eumetsat.int/resources/user-guides/mtg-fci-l2-gii-data-guide>

EUMETSAT (2025c). *Metop-SG 3MI L1b and L1c data guide.*

<https://user.eumetsat.int/resources/user-guides/metop-sg-3-mi-l1b-and-l1c-data-guide>

EUMETSAT (i.a). *List of products.*

<https://wui.cmsaf.eu/safira/action/viewProduktList?dId=1&d-1342877-p=1>. Viimati vaadatud 06.05.2026

EUMETSAT (i.a). *Meteosat Third Generation Instruments*.
<https://www.eumetsat.int/meteosat-third-generation-instruments>. Viimati vaadatud
22.04.2026

EUMETSAT User Portal (2025). *MSG High Rate SEVIRI level 1.5 data guide*.
<https://user.eumetsat.int/resources/user-guides/msg-high-rate-seviri-level-1-5-data-guide>.

EUMETSAT User Portal (i.a). *CLAAS-3: CM SAF CLoud property dAtAset using SEVIRI - Edition 3*. <https://user.eumetsat.int/catalogue/EO:EUM:DAT:0820/overview>. Viimati vaadatud 24.04.2026

EUMETSAT User Portal (i.a).
<https://user.eumetsat.int/search-view?term=fci&sort=score%20desc&facets=%7B%22contentTypes%22:%5B%22Data%22%5D%7D&pages=2>. Viimati vaadatud 24.04.2026

European Union (2016). Directive (EU) 2016/802 of the European Parliament and of the Council of 11 May 2016 relating to a reduction in the sulphur content of certain liquid fuels (codification). <http://data.europa.eu/eli/dir/2016/802/oj>

ESA (2024). *Beyond cloud nine: 10 reasons to be excited about EarthCARE*.
<https://earth.esa.int/eogateway/success-story/beyond-cloud-nine-10-reasons-to-be-excited-about-earthcare>

ESA (2025). *First view of aerosols from MetOp-SG's 3MI instrument*.
https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2025/09/First_view_of_aerosols_from_MetOp-SG_s_3MI_instrument

ESA (i.a). *CPR Overview*. <https://earth.esa.int/eogateway/instruments/cpr>. Viimati vaadatud 23.04.2026

ESA (i.a). *EarthCARE's multispectral imager*.
https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/FutureEO/EarthCARE/EarthCARE_s_multispectral_imager. Viimati vaadatud 05.05.2026

ESA (i.a). *MetOp-SG facts and figures*.
https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Meteorological_missions/MetOp_Sec

[ond Generation/MetOp-SG facts and figures#:~:text=Sun%2Dsynchronous%20orbit%20in%20clined%20at%2098.7%C2%B0%20with%20a%20same%20as%20the%20MetOp%20first%20generation%20satellites.](#) Viimati vaadatud 22.04.2026

ESA (i.a). *MSI Overview*. <https://earth.esa.int/eogateway/instruments/msi>. Viimati vaadatud 23.04.2026

G-Portal (i.a). *JAXA*. <https://gportal.jaxa.jp/gpr/search?tab=1>. Viimati vaadatud 06.05.2026

Hansen, J. E., Kharecha, P., Sato, M., Tselioudis, G., Kelly, J., Bauer, S. E., Ruedy, R., Jeong, E., Jin, Q., Rignot, E., Velicogna, I., Schoeberl, M. R., Schuckmann, K., Amponsem, J., Cao, J., Keskinen, A., Li, J., ja Pokela, A. (2025). Global Warming Has Accelerated: Are the United Nations and the Public Well-Informed? *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 67(1), 6–44. <https://doi.org/10.1080/00139157.2025.2434494>

Keating, C. (2025). Global Warming. *Salem Press Encyclopedia of Science*. <https://research.ebsco.com/c/qlurcm/viewer/html/g66ftofebn?modal=cite>

Ledesma, O., Lamo, P. ja Fraire, J. (2024). Trends in LPWAN Technologies for LEO Satellite Constellations in the NewSpace Context. *Electronics*. 13. 579. doi:10.3390/electronics13030579

Manning, C. G. (2012). *What are passive and active sensors?*. NASA. <https://www.nasa.gov/general/what-are-passive-and-active-sensors/>

Marbach, T., Phillips, P., Lacan, A. ja Schluessel, P. (2013). The Multi-Viewing, -Channel, -Polarisation Imager (3MI) of the EUMETSAT Polar System - Second Generation (EPS-SG) dedicated to aerosol characterisation. *Proc SPIE*. 8889. doi:10.1117/12.2028221

Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (toim.) (2021). IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press*. doi:10.1017/9781009157896

Martin, P. P., Durand, Y., Aminou, D., Gaudin-Delrieu, C. ja Lamard, J. (2021). FCI instrument on-board MeteoSat Third Generation satellite: design and development status. doi:10.1117/12.2599152

Nandan, M. R., Ratnam, V. (2025). Combined effect of atmospheric turbulence and vertical wind on the aerosol-cloud interaction: Case studies, *Atmospheric Environment, Volume 363, 2025, 121605, ISSN 1352-2310*, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2025.121605>

NASA (2025). *Spectral Bands and Applications*. <https://science.nasa.gov/mission/landsat/spectral-bands-and-applications/>

NASA Earthdata (2026a). *Orbits*. <https://www.earthdata.nasa.gov/learn/earth-observation-data-basics/orbits>

NASA Earthdata (2026b). *VIIRS Visible Infrared Imaging Radiometer Suite*. <https://www.earthdata.nasa.gov/data/instruments/viirs>. Viimati vaadatud 13.05.2026

NASA Earthdata (2026c). *VIIRS Spectral Bands*. <https://www.earthdata.nasa.gov/data/instruments/viirs/spectral-bands>. Viimati vaadatud: 08.05.2026

NASA Earthdata (2026d). *VIIRS-Atmosphere Near Real-Time Data*. <https://www.earthdata.nasa.gov/data/instruments/viirs/atmosphere-near-real-time-data#toc-blended-aerosol-product>. Viimati vaadatud 29.04.2026

NASA LAADS DAAC (i.a). *MODIS To VIIRS Transition*. <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/learn/modis-to-viirs-transition/>. Viimati vaadatud 13.05.2026

NASA LAADS DAAC (i.a). *Products*. https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/order/1/MYD04_3K--61,MYD04_L2--61,MYD05_L2--61,MYD06_L2--61,MYD07_L2--61,MYD08_D3--61. Viimati vaadatud 20.04.2026

NASA LAADS DAAC (i.a). *Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS)*.
<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/missions-and-measurements/viirs/>. Viimati vaadatud
13.05.2026

NASA (i.a). *AIRS Earth Coverage*.
<https://airs.jpl.nasa.gov/data/about-the-data/earth-coverage/>. Viimati vaadatu 20.04.2026

NASA (i.a). *MODIS Components*. <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/components.php>.
Viimati vaadatud 22.04.2026

NASA (i.a). *MODIS Data*. <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/>. Viimati vaadatud: 20.04.2026

NASA Worldview (i.a).
<https://worldview.earthdata.nasa.gov/?v=-247.0233144013785,3.8049119140099776,-55.016024892125984,98.3084997193452&t=2009-03-04-T10%3A36%3A33Z>. Viimati vaadatud
22.05.2026

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2015). *Continuity of NASA Earth observations from space: A value framework*. National Academies Press.
<https://doi.org/10.17226/8963>

NOAA (2026). *About VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer)*.
<https://ncc.nesdis.noaa.gov/VIIRS/aboutVIIRS.php>. (Viimati vaadatud 24.04.2026)

NOAA (i.a). *NOAA-21 Transition to Operations (T2O) - Summer 2023 Update*.
[https://vlab.noaa.gov/web/towr-s/satellite-operations-updates#:~:text=The%20NOAA%2D20%2C%20NOAA%2D,southbound%20direction%20\(descending%20node](https://vlab.noaa.gov/web/towr-s/satellite-operations-updates#:~:text=The%20NOAA%2D20%2C%20NOAA%2D,southbound%20direction%20(descending%20node). Viimati vaadatud
23.04.2026

OSPO (i.a). *Geostationary Operational Environmental Satellites*.
<https://www.ospo.noaa.gov/operations/goes/>. Viimati vaadatud 14.05.2026

Patel, L. ja Shand, L. (2020). *Simulating cloud-aerosol interactions made by ship emissions*.
https://www.researchgate.net/publication/345312294_Simulating_cloud-aerosol_interactions_made_by_ship_emissions

Patel, L. ja Shand, L. (2022). Toward data assimilation of ship-induced aerosol–cloud interactions. *Environmental Data Science*, 1, e31. doi:10.1017/eds.2022.21

Putsay, M., Cséke, D. (Hungarian Meteorological Service), Mahovic, N. S., Smiljanic, I., Roesli, H., Moreira, N. (Instituto de Meteorologia, Portugal), Kerkmann, J., Thema, E., Lindsey, D. (2003-2021) Ship trails and industrial plumes. *EUMETSAT User Portal*. <https://user.eumetsat.int/resources/case-studies/ship-trails-and-industrial-plumes>. Viimati vaadatud 29.04.2026

Quaas, J., Arola, A., Cairns, B., Christensen, M., Deneke, H., Ekman, A. M. L., Feingold, G., Fridlind, A., Gryspeerdt, E., Hasekamp, O., Li, Z., Lipponen, A., Ma, P.-L., Mülmenstädt, J., Nenes, A., Penner, J. E., Rosenfeld, D., Schrödner, R., Sinclair, K., Sourdeval, O., Stier, P., Tesche, M., van Dierenhoven, B., ja Wendisch, M. (2020). Constraining the Twomey effect from satellite observations: issues and perspectives, *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 15079–15099 <https://doi.org/10.5194/acp-20-15079-2020>

Skeie, R. B., Byrom, R., Hodnebrog, Ø., Jouan, C., ja Myhre, G. (2024). Multi-model effective radiative forcing of the 2020 sulfur cap for shipping, *Atmos. Chem. Phys.*, 24, 13361–13370. <https://doi.org/10.5194/acp-24-13361-2024>

The Editors of Encyclopaedia Britannica (2024). *Air pollution*. Encyclopaedia Britannica. <https://www.britannica.com/science/air-pollution>

Thompson, D. W. J., Wallace, J. M., Jones, P. D., ja Kennedy, J. J. (2009). Identifying signatures of natural climate variability in time series of global-mean surface temperature. *Journal of Climate*, 22(22), 6120–6141. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI3089.1>

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

Torrìsi, F., Di Bella, G. S., Corradino, C., Cariello, S., Malaguti, A. B., ja Del Negro, C. (2026). From MSG-SEVIRI to MTG-FCI: Advancing Volcanic Thermal Monitoring from Geostationary Satellites. *Remote Sensing*, 18(1), 6. <https://doi.org/10.3390/rs18010006>

Voiland, A. (2010). Aerosols: Tiny Particles, Big Impact. *NASA Earth Observatory*.
<https://science.nasa.gov/earth/earth-observatory/aerosols/>

Wehr, T., Kubota, T., Tzeremes, G., Wallace, K., Nakatsuka, H., Ohno, Y., Koopman, R., Rusli, S., Kikuchi, M., Eisinger, M., Tanaka, T., Taga, M., Deghaye, P., Tomita, E. ja Bernaerts, D. (2023). The EarthCARE mission – science and system overview.
<https://doi.org/10.5194/amt-16-3581-2023>

Wong, M. (2024). From MODIS to VIIRS: Continuing the Legacy. NASA Earthdata.
<https://www.earthdata.nasa.gov/news/blog/from-modis-viirs-continuing-legacy>

World Meteorological Organization (i.a). Instrument: 3MI.
<https://space.oscar.wmo.int/instruments/view/3mi>. Viimati vaadatud 24.04.2026

World Meteorological Organization (i.a). *Satellite: Meteosat-12*.
https://space.oscar.wmo.int/satellites/view/meteosat_12. Viimati vaadatud 22.04.2026

World Meteorological Organization (i.a). *Instrument: MODIS*.
<https://space.oscar.wmo.int/instruments/view/modis>. Viimati vaadatud 05.05.2026

Xie, S., Deser, C., Vecchi, G. A., Ma, J., Teng, H., ja Wittenberg, A. T. (2010). Global Warming Pattern Formation: Sea Surface Temperature and Rainfall. *Journal of Climate*, 23(4), 966-986. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI3329.1>

Yoshioka, M., Grosvenor, D. P., Booth, B. B. B., Morice, C. P., ja Carslaw, K. S. (2024). Warming effects of reduced sulfur emissions from shipping. *Atmos. Chem. Phys.*, 24, 13681–13692. <https://doi.org/10.5194/acp-24-13681-2024>

LISAD

Lisa 1. Tabel 1. Sensorite loetelu koos vastavate kirjandusallikatega.

SENSOR	SATELLIIT	ORBIIDIL	EKVAATORI ÜLETUSAEG MLST (tõusev/laskuv orbiit)
MODIS ¹	Aqua	2002 - ...	13:30 (tõusev)
MODIS ¹²	Terra	1999 - ...	10:30 (laskuv)
VIIRS ³⁴	Suomi NPP	2011 - ...	13:30 (tõusev) 01:30 (laskuv)
VIIRS ⁴	NOAA-21	2022 - ...	13:30 (tõusev) 01:30 (laskuv)
VIIRS ⁴	NOAA-20	2017 - ...	13:30 (tõusev) 01:30 (laskuv)
ATLID ⁵	EarthCARE	2024 - ...	14.00 (laskuv)
CPR ⁵	EarthCARE	2024 - ...	14:00 (laskuv)
MSI ⁵	EarthCARE	2024 - ...	14:00 (laskuv)
3MI ⁶	MetOp-SG-A1	2025 - ...	9:30 (laskuv)

FCI ⁷	Metosat Third Gen, Meteosat-12	2024 - ...	Ei kohaldu (geostatsionaarne)
CM SAF CLAAS ed. 3.0			
SEVIRI ⁸	Meteosat Second Generation (MSG-1...MSG-4)	2004 - ...	Ei kohaldu (geostatsionaarne)

1. NASA (i.a). *MODIS Components*.
<https://modis.gsfc.nasa.gov/about/components.php>. Viimati vaadatud 22.04.2026
2. NASA (i.a). *AIRS Earth Coverage*.
<https://airs.jpl.nasa.gov/data/about-the-data/earth-coverage/>
3. NOAA (i.a). *NOAA-21 Transition to Operations (T2O) - Summer 2023 Update*.
[https://vlab.noaa.gov/web/towr-s/satellite-operations-updates#:~:text=The%20NOAA%2D20%2C%20NOAA%2D,southbound%20direction%20\(descending%20node\)](https://vlab.noaa.gov/web/towr-s/satellite-operations-updates#:~:text=The%20NOAA%2D20%2C%20NOAA%2D,southbound%20direction%20(descending%20node)).
Viimati vaadatud 23.04.2026
4. NASA (i.a). *Visible Infrared Radiometer Suite (VIIRS)*.
<https://www.earthdata.nasa.gov/data/instruments/viirs>. Viimati vaadatud 22.04.2026
5. eoPortal (2024). *EarthCARE (Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer)*.
<https://www.eoportal.org/satellite-missions/earthcare#eop-quick-facts-section>
6. ESA (i.a). *MetOp-SG facts and figures*.
https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Meteorological_missions/MetOp_Second_Generation/MetOp-SG_facts_and_figures#:~:text=Sun%2Dsynchronous%20orbit%20inclined%20at%2098.7%C2%B0%20with%20a,same%20as%20the%20MetOp%20first%20generation%20satellites. Viimati vaadatud 22.04.2026
7. World Meteorological Organization (i.a). *Satellite: Meteosat-12*.
https://space.oscar.wmo.int/satellites/view/meteosat_12. Viimati vaadatud 22.04.2026
8. CM SAF (i.a). Product User Manual SEVIRI cloud products CLAAS Edition 3.
https://www.cmsaf.eu/SharedDocs/Literatur/document/2022/saf_cm_knmi_pum_sev_cld_3_1_final_pdf?__blob=publicationFile. Viimati vaadatud 22.04.2026

Lisa 2. Tabel 2. Sensorite võrdlus koos kirjandusallikatega.

SENSOR	AJA-LINE LAHUTUS	VAATE-ALA LAIUS	RUUMI-LINE LAHUTUS	SPEKTRAALNE LAHUTUS	PRODUKTID
Polaarorbiidil					
MODIS	1-2 päeva	2230 km	250 m, 500 m, 1000 m	36 kanalit	Pilvemask, pilve optiline paksus, pilvepiiskade efektiivne raadius, aerosoolide optiline paksus, aerosoolide tüüp
VIIRS	1 päev	3000 km	350 m, 750 m	22 kanalit	Pilvemask, pilve optiline paksus, pilvepiiskade efektiivne raadius, aerosoolide optiline paksus, aerosoolide osakeste suurus ja tüüp, pilvekihid
ATLID	25 päeva	150 km	100 m (vertikaalne)	1 spektraalne lainepikkus ja 3 mõõtekanalit	Aerosooli optiline paksus, aerosooli kihi optiline paksus ja kirjeldus, aerosooli tüüp, pilve tipu kõrgus, osakese efektiivne raadius, tagasihajumise koefitsent, jääfaasis pilvevee sisaldus
CPR	25 päeva	150 km	500 m (vertikaalne), 750 m (horisontaalne)	1 kanal	Pilvemask, pilveosakese tüüp, vedela vee sisaldus, optiline paksus, vedelas faasis pilvede efektiivne raadius, vedelas ja jääfaasis pilvevee hulk
MSI	25 päeva	150 km	500 m	7 kanalit	Pilvetüüp, pilvefaas, pilve optiline paksus, pilveosakese efektiivne raadius, pilvetipu temperatuur, vedela vee hulk, aerosooli optiline paksus
3MI	1 päev	2200 km	4000 m	12 spektraalkanalit	Aerosooli optiline paksus, aerosooli efektiivne raadius, aerosooli tüüp, pilve optiline paksus, pilvetüüp, pilve ja aerosooli kõrgus, pilvetipu mikrofüüsika
Geostatsionaarsed					
FCI	10 minutit	täisketas	1000 - 2000 m	16 kanalit	Pilvemask, pilvetipu temperatuur, peegeldustegur, optimaalne pilveanalüüs, atmosfääri liikumisvektorid, sademete hulk

CM SAF CLAAS ed. 3.0					
SEVIRI	15 minutit	täisketas	3000 m	12 kanalit	Pilvemask, pilvefaas, pilvkate, pilve optiline paksus, pilveosakese efektiivne raadius, pilvetipu kõrgus, pilvetipu temperatuur, pilve vedela vee hulk, jääfaasis vee hulk

1. Wong, M. (2024). *From MODIS to VIIRS: Continuing the Legacy*. NASA Earthdata. <https://www.earthdata.nasa.gov/news/blog/from-modis-viirs-continuing-legacy>
2. NASA (i.a). *MODIS Data*. <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/>. Viimati vaadatud: 20.04.2026
3. NASA LAADS DAAC (i.a). *Products*. https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/order/1/MYD04_3K--61,MYD04_L2--61,MYD05_L2--61,MYD06_L2--61,MYD07_L2--61,MYD08_D3--61. Viimati vaadatud 20.03.2026
4. NASA Earthdata (2026b). *VIIRS Visible Infrared Imaging Radiometer Suite*. <https://www.earthdata.nasa.gov/data/instruments/viirs>. Viimati vaadatud 13.05.2026
5. NOAA (2026). *About VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer)*. <https://ncc.nesdis.noaa.gov/VIIRS/aboutVIIRS.php>. Viimati vaadatud 24.04.2026
6. NASA Earthdata (2026d). *VIIRS-Atmosphere Near Real-Time Data*. <https://www.earthdata.nasa.gov/data/instruments/viirs/atmosphere-near-real-time-data#toc-blended-aerosol-product> . (Viimati vaadatud 29.04.2026).
7. EarthCARE Product Data Handbook (i.a). *European Space Agency*. https://earthcarehandbook.earth.esa.int/catalogue/ac_clp_2b. Viimati vaadatud 28.04.2026
8. eoPortal (2024). *EarthCARE (Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer)*. <https://www.eoportal.org/satellite-missions/earthcare#eop-quick-facts-section>
9. Wehr, T., Kubota, T., Tzeremes, G., Wallace, K., Nakatsuka, H., Ohno, Y., Koopman, R., Rusli, S., Kikuchi, M., Eisinger, M., Tanaka, T., Taga, M., Deghaye, P., Tomita, E. ja Bernaerts, D. (2023). The EarthCARE mission – science and system overview. <https://doi.org/10.5194/amt-16-3581-2023>
10. ESA (i.a). *CPR Overview*. <https://earth.esa.int/eogateway/instruments/cpr>. Viimati vaadatud 23.04.2026

11. G-Portal (i.a). *JAXA*. <https://gportal.jaxa.jp/gpr/search?tab=1>. Viimati vaadatud 06.05.2026
12. ESA (i.a). *MSI Overview*. <https://earth.esa.int/eogateway/instruments/msi>. Viimati vaadatud 23.04.2026
13. World Meteorological Organization (i.a). *Instrument: 3MI*. <https://space.oscar.wmo.int/instruments/view/3mi>. Viimati vaadatud 24.04.2026
14. EUMETSAT (2025). *Metop-SG 3MI L1b and L1c data guide*. <https://user.eumetsat.int/resources/user-guides/metop-sg-3-mi-l1b-and-l1c-data-guide>
15. EUMETSAT (2025). *MTG FCI L2 GII data guide*. <https://user.eumetsat.int/resources/user-guides/mtg-fci-l2-gii-data-guide>
16. EUMETSAT User Portal (i.a). <https://user.eumetsat.int/search-view?term=fci&sort=score%20desc&facets=%7B%22contentType%22:%5B%22Data%22%5D%7D&pages=2>. Viimati vaadatud 24.04.2026
17. EUMETSAT (i.a). *Meteosat Third Generation Instruments*. <https://www.eumetsat.int/meteosat-third-generation-instruments>. Viimati vaadatud 22.04.2026
18. EUMETSAT (2022). Product User Manual SEVIRI cloud products CLAAS Edition 3. *EUMETSAT CM SAF Climate Monitoring*. doi: 10.5676/EUM_SAF_CM/CLAAS/V003
19. EUMETSAT User Portal (i.a). *CLAAS-3: CM SAF CLOUD property dAtAset using SEVIRI - Edition 3*. <https://user.eumetsat.int/catalogue/EO:EUM:DAT:0820/overview>. Viimati vaadatud 24.04.2026
20. EUMETSAT CM SAF (i.a). *List of products*. <https://wui.cmsaf.eu/safira/action/viewProduktList?dId=1&d-1342877-p=1>. (Viimati vaadatud 06.05.2026)

Lisa 3. Näide Python koodist MODIS Aqua andmefaili näitel

```
import argparse

from pathlib import Path

from typing import Tuple

import matplotlib.pyplot as plt

import numpy as np

from netCDF4 import Dataset

DEFAULT_FILE = "C:\\Users\\ingel\\Documents\\BAKATOO
ANDMED\\MOD06_L2.A2023215.0925.061.2023215203119.hdf"

def interp2_native(
    coarse: np.ndarray,
    row_coords: np.ndarray,
    col_coords: np.ndarray,
    out_shape: Tuple[int, int],
) -> np.ndarray:
    row_target = np.arange(out_shape[0], dtype=float)
    col_target = np.arange(out_shape[1], dtype=float)
    rowwise = np.array([np.interp(col_target, col_coords, row) for row in coarse], dtype=float)
    return np.array([np.interp(row_target, row_coords, rowwise[:, j]) for j in
range(rowwise.shape[1])], dtype=float).T
```

```

def load_modis_swath(file_path: Path):
    with Dataset(file_path) as ds:
        reff = ds.variables["Cloud_Effective_Radius"][:].astype(float)
        lat_coarse = ds.variables["Latitude"][:].astype(float)
        lon_coarse = ds.variables["Longitude"][:].astype(float)

        row_start, row_end, row_step = map(int,
ds.variables["Latitude"].Cell_Align_Swath_Sampling)
        col_start, col_end, col_step = map(int,
ds.variables["Latitude"].Cell_Across_Swath_Sampling)

        reff = np.ma.masked_outside(reff, 1, 50)
        row_coords = np.arange(row_start - 1, row_end, row_step, dtype=float)
        col_coords = np.arange(col_start - 1, col_end, col_step, dtype=float)

        lat = interp2_native(lat_coarse, row_coords, col_coords, reff.shape)
        lon_unwrapped = np.rad2deg(np.unwrap(np.deg2rad(lon_coarse), axis=1))
        lon = interp2_native(lon_unwrapped, row_coords, col_coords, reff.shape)
        lon = ((lon + 180) % 360) - 180

    return lon, lat, reff

def plot_modis(file_path: Path, output: Path = None, xlim=(9, 13), ylim=(-22, -18), vmin=4,
vmax=15):
    lon, lat, reff = load_modis_swath(file_path)

    inside = (lon >= xlim[0]) & (lon <= xlim[1]) & (lat >= ylim[0]) & (lat <= ylim[1])
    rows = np.where(inside.any(axis=1))[0]
    cols = np.where(inside.any(axis=0))[0]

```

```

if rows.size == 0 or cols.size == 0:
    raise ValueError("No swath pixels inside the requested extent.")

r0, r1 = rows[0], rows[-1] + 1
c0, c1 = cols[0], cols[-1] + 1

fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 6))
mesh = ax.pcolormesh(
    lon[r0:r1, c0:c1],
    lat[r0:r1, c0:c1],
    reff[r0:r1, c0:c1],
    shading="auto",
    cmap="rainbow", vmin=4, vmax=18,
)

ax.set_xlim(*xlim)
ax.set_ylim(*ylim)
ax.set_xlabel("latitude", fontsize=22)
ax.set_ylabel("longitude", fontsize=22)
ax.tick_params(axis="x", labelsize=20)
ax.tick_params(axis="y", labelsize=20)
ax.set_title("a)", fontsize=30)
cbar = plt.colorbar(mesh)
cbar.set_label("Cloud Effective Radius ( $\mu\text{m}$ )", fontsize=20) # värviriba pealkiri
cbar.ax.tick_params(labelsize=18) # värviriba numbrid

```

```
if output is not None:
```

```
    fig.savefig(output, dpi=250, bbox_inches="tight")
```

```
    print(f"Saved image to {output}")
```

```
else:
```

```
    plt.show()
```

```
def main():
```

```
    parser = argparse.ArgumentParser()
```

```
    parser.add_argument("file", nargs="?", default=str(DEFAULT_FILE))
```

```
    parser.add_argument("-o", "--output")
```

```
    args = parser.parse_args()
```

```
    plot_modis(Path(args.file), output=Path(args.output) if args.output else None)
```

```
if __name__ == "__main__":
```

```
    main
```

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Ingel Elisabet Erm,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose

Laevajälgede tuvastamine ja analüüs satelliitandmetel: erinevate sensorite potentsiaal ja rakendused,

mille juhendajad on Margit Aun ja Velle Toll,

reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada Tartu Ülikooli digitaalarhiivi kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni;

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni;

3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Ingel Elisabet Erm

25.05.2026