

Tartu Ülikool  
Loodus- ja täppisteaduste valdkond  
Ökoloogia ja maateaduste instituut  
Geograafia osakond

Bakalaureusetöö geograafias (12 EAP)

**Taimkatteindeksitel põhinev põllukultuuride fenoloogiliste faaside muutuse  
tuvastamine kaugseire aegridade abil**

**Kaspar Tuulik**

Juhendaja: PhD Valentina Sagris

Tartu 2026

## **Annotatsioon**

### **Taimkatteindeksitel põhinev põllukultuuride fenoloogiliste faaside muutuse tuvastamine kaugseire aegridade abil**

Bakalaureusetöö eesmärk oli hinnata Landsati NDVI aegridade põhjal suvinisu, suviotra ja rukki fenoloogiliste faaside ajastust Järva-, Lääne-Viru ja Võru maakonnas aastatel 2020–2024 ning võrrelda tulemusi meteoroloogilise vegetatsiooniperioodi ja Aasa (2001) vaatlusandmetega. Töös kasutati Keskkonnaagentuuri temperatuuriandmeid, PRIA põldude ruumiandmeid ja GEE-s töödeldud Landsati 8-päevaseid NDVI komposiite. Tulemused näitasid, et vegetatsiooniperiood algab varem Lõuna- ja kesk-Eestis ning lõpeb hiljem Lääne-Eestis ja saartel. Rukis eristus suvikultuuridest varasema vegetatsiooni uuenemise ja pikema kasvuperioodiga; suvinisu ja suviotra fenofaasid olid varasematest vaatlustest üldiselt varasemad.

Märksõnad: põllukultuuride fenoloogia, NDVI, Landsat, kaugseire, vegetatsiooniperiood.

CERCS kood: T181 – Kaugseire

## **Abstract**

### **Detection of Changes in Crop Phenological Phases Using Remote Sensing Time Series of Vegetation Indices**

The aim of this bachelor's thesis was to assess the timing of phenological phases of spring wheat, spring barley and rye in Järva, Lääne-Viru and Võru counties during 2020–2024 using Landsat NDVI time series and to compare the results with the meteorological growing season and earlier observations by Aasa (2001). The study used air temperature data from the Estonian Environment Agency, PRIA field boundaries and 8-day Landsat NDVI composites processed in GEE. The results showed that the growing season starts earlier in southern and inland Estonia and ends later in western Estonia and on the islands. Rye differed from spring crops by earlier vegetation renewal and a longer growing period.

Keywords: crop phenology, NDVI, Landsat, remote sensing, growing season

CERCS code: T181 – Remote sensing

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| Sissejuhatus.....                                                        | 5  |
| 1. Kirjanduse ülevaade.....                                              | 6  |
| 1.1 Põllukultuuride fenoloogia.....                                      | 6  |
| 1.2 Teraviljade fenoloogilised faasid .....                              | 7  |
| 1.3 Kaugseire ja NDVI põllumajandusliku fenoloogia uurimisel.....        | 8  |
| 1.4 Fenoloogia seos Eesti ilmastikuga .....                              | 9  |
| 2. Materjal ja metoodika .....                                           | 11 |
| 2.1 Uurimisala .....                                                     | 11 |
| 2.2 Andmed .....                                                         | 12 |
| 2.3 Metoodika.....                                                       | 13 |
| 2.3.1 Meteoroloogilise vegetatsiooniperioodi võrdlus .....               | 13 |
| 2.3.2 PRIA põllumassiivide filtreerimine .....                           | 16 |
| 2.3.3 Taimkatteindeksite väärtuste leidmine .....                        | 16 |
| 2.3.4 Fenoloogiliste faaside leidmine .....                              | 17 |
| 3. Tulemused.....                                                        | 19 |
| 3.1 Meteoroloogilise vegetatsiooniperioodi ruumiline muster Eestis ..... | 19 |
| 3.2 NDVI põhjal määratud põllukultuuride fenoloogilised faasid .....     | 20 |
| 3.2.1 Suvinisu .....                                                     | 20 |
| 3.2.2 Suvioder.....                                                      | 22 |
| 3.2.3 Rukis .....                                                        | 23 |
| 4. Arutelu .....                                                         | 26 |
| 4.1 Vegetatsiooniperioodid .....                                         | 26 |
| 4.2 Põllukultuuride ja maakondade võrdlus .....                          | 28 |
| 4.3 Võrdlus varasemate fenoloogiliste andmetega.....                     | 29 |
| 4.3.1 Suvinisu .....                                                     | 29 |

|                                          |    |
|------------------------------------------|----|
| 4.3.2 Suviuder.....                      | 30 |
| 4.3.3 Rukis.....                         | 31 |
| 4.4 Uurimisküsimused ja tulemused .....  | 33 |
| 4.5 Andmete ja metoodika piirangud ..... | 33 |
| Kokkuvõte.....                           | 35 |
| Summary .....                            | 36 |
| Tänuavaldused .....                      | 38 |
| Kasutatud kirjandus .....                | 39 |
| Lisa 1.....                              | 42 |
| Lisa 2.....                              | 46 |
| Lisa 3.....                              | 48 |

## Sissejuhatus

Põllukultuuride areng sõltub aastaajalisest ilmastikust ja kasvutingimustest, mistõttu ei toimu nende tärkamine, aktiivne kasv ja valmimine igal aastal ega igas piirkonnas samal ajal. Fenoloogiliste faaside ajastus peegeldab nii kultuuri arengurütmi kui ka piirkondlikke keskkonnatingimusi ning on põllumajanduses seotud külvi, saagi kujunemise ja koristusajaga.

Eestis varieeruvad põllukultuuride fenoloogilised faasid ajaliselt ja ruumiliselt. Kevadine areng algab üldjuhul varem sisemaa- ja Lõuna-Eestis ning hiljem rannikualadel, kus mere mõju kevadist soojenemist pidurdab. Seetõttu on fenoloogia tõlgendamisel oluline arvestada meteoroloogilise vegetatsiooniperioodi alguse, lõpu ja kestusega.

Varasemad agrofenooloogilised vaatlusandmed võimaldavad hinnata tänapäevaste fenoloogiliste mustrite erinevust varasematest keskmistest. Satelliitandmetel põhinevad taimkatteindeksite aegread võimaldavad samal ajal jälgida põllukultuuride sesoonset arengut suurema ruumilise katvusega. Käesolevas töös kasutatakse Landsati normaliseeritud vegetatsiooniindeksi ehk NDVI aegridu valitud teraviljakultuuride fenoloogiliste faaside hindamiseks.

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärk on hinnata Landsati NDVI aegridade põhjal suvinisu, suviotra ja rukki fenoloogiliste faaside ajastust Järva-, Lääne-Viru- ja Võru maakonnas aastatel 2020–2024 ning võrrelda saadud tulemusi meteoroloogilise vegetatsiooniperioodi ja varasemate agrofenooloogiliste vaatlusandmetega. Eesmärgi täitmiseks püstitati järgmised uurimisküsimused:

1. Milline on meteoroloogilise vegetatsiooniperioodi alguse, lõpu ja kestuse ruumiline muster Eestis perioodil 2000–2025 ning millise tausta annab see uuritud maakondade põllukultuuride fenoloogia tõlgendamiseks?
2. Kuidas varieeruvad NDVI aegridadest määratud suvinisu, suviotra ja rukki tärkamine või vegetatsiooni uuenemine, loomine, täisküpsus ja kasvuperioodi pikkus Järva-, Lääne-Viru- ja Võru maakonnas aastatel 2020–2024?
3. Mil määral erinevad 2020–2024 NDVI-põhised fenoloogilised kuupäevad Aasa (2001) agrofenooloogilise kalendri vaatlusandmetest ning kuidas suhestub teraviljade kevadine vegetatsiooni uuenemine meteoroloogilise vegetatsiooniperioodi algusega?

# 1. Kirjanduse ülevaade

## 1.1 Põllukultuuride fenoloogia

Fenoloogia uurib looduses perioodiliselt korduvaid nähtusi ning nende ajastuse seost ilmastiku, kliima ja teiste keskkonnatingimustega (Ahas, 2001; Snevajs *et al.*, 2022; Zeng *et al.*, 2020). Taimede puhul kirjeldavad fenoloogilised faasid arenguetappe, nagu tärkamine, õitsemine, lehtede langemine ja viljade või saagi valmimine (Ahas 2001; Verhegghen *et al.*, 2014; Zeng *et al.*, 2020). Fenoloogiliste faaside jälgimine võimaldab hinnata, kuidas taimkate ja põllukultuurid reageerivad temperatuuri, niiskuse, kiirguse ning teiste keskkonnategurite muutustele (Ahas, 2001; Zeng *et al.*, 2020). Seetõttu kasutatakse fenoloogiat nii looduse aastaringi kirjeldamisel kui ka kliimamuutuse mõju hindamisel, sest faaside saabumisajad annavad infot keskkonnatingimuste ajalise muutumise kohta (Ahas, 2001; Ahas & Aasa, 2000).

Põllumajanduse kontekstis käsitleb agrofenoogia kultuurtaimede perioodiliselt korduvaid kasvu- ja arengunähtusi (Aasa, 2001). Agrofenooloogilised vaatlused on olulised, sest põllukultuuride arengufaasid seostuvad otseselt külvi, taimede aktiivse kasvu, saagi kujunemise ja koristusaja määramisega (Aasa, 2001; Zeng *et al.*, 2020). Sellised andmed annavad võimaluse kirjeldada kultuurtaimede tavapärase arengurütmi ning kasutada varasemaid keskmisi uuemate vaatluste või kaugseirepõhiste tulemuste võrdlusalusena (Aasa 2001).

Zeng *et al.* (2020) eristavad kahte peamist fenoloogia uurimise tasandit: maapinna fenoloogia (*land surface phenology*) ja liigispetsiifiline fenoloogia (*species-specific phenology*). Esimene käsitleb taimkatte üldisi muutusi maastikul ning seda mõõdetakse näiteks normaliseeritud vegetatsiooniindeksi (NDVI, *Normalized Difference Vegetation Index*) abil. Teine tasand keskendub konkreetse liigi või põllukultuuri arengule, mida saab uurida maapealsete vaatluste ja kõrge lahutusvõimega kaugseireandmete abil. Põllumajanduse kontekstis on just viimane tasand oluline, kuna fenoloogilised etapid määravad põllutööde sobivad ajad ning mõjutavad saagikust ja agrotehnilisi otsuseid (Zeng *et al.*, 2020).

## 1.2 Teraviljade fenoloogilised faasid

Teraviljade arengut saab kirjeldada mitme nähtava fenoloogilise faasi kaudu, millest käesolevas töös on keskse tähtsusega tärkamine, loomine ja täisküpsus (Aasa, 2001). Need faasid kirjeldavad kasvuperioodi eri osi: tärkamine tähistab taime maapealse arengu algust, loomine generatiivse arengu olulist etappi ning täisküpsus terade valmimise lõppjärku (Aasa 2001). Aasa (2001) agrofenoloogilises kalendris on nimetatud faasid esitatud vaatlusjaamade kaupa keskmiste saabumisaegadena, mistõttu sobivad need võrdlusaluseks NDVI-põhiselt määratud fenoloogilistele kuupäevadele. Fenoloogiliste faaside tõlgendamisel tuleb arvestada, et agrofenoloogilised vaatlused põhinevad taimede nähtavatel arengutunnustel, kaugseirepõhised hinnangud aga taimkatteindeksi aegride muutustel (Aasa, 2001; Zeng *et al.*, 2020).

Aasa (2001) käsitles tähistab teraviljade tärkamine arengujärku, mil esimesed lehetipud hakkavad vaatlusala eri osades nähtavale ilmuma. Faasi massiliseks saabumiseks loetakse olukorda, kus esimesed lehed on nähtavad juba suuremal osal vaatlusväljakust (Aasa 2001). Tärkamine on suvikultuuride, näiteks suvinisu ja suviodra puhul kasvuperioodi alguse oluline näitaja, sest nende areng algab kevadel pärast külvi (Aasa 2001). Kaugseirepõhises käsitluses ei ole üksikute lehetippude ilmumist võimalik otseselt vaadelda, mistõttu määratakse tärkamise ligikaudne ajastus taimkatteindeksi aegride kevadise tõusu põhjal (Zeng *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2022).

Loomise faas tähistab rukki, nisu ja odra puhul arengujärku, mil ligikaudu pool viljapeast on väljunud ülemise lehe tupest (Aasa 2001). Maapealsetes vaatlustes põhineb faasi määramine nähtaval arengutunnusel, samas kui kaugseireandmetes kajastub põllukultuuri areng taimkatte spektraalse signaali muutusena. NDVI aegride analüüsis seostatakse kasvumaksimumi teraviljade loomise ehk heading-faasiga (Liu *et al.*, 2022). Seetõttu tuleks NDVI-põhist loomise ajastust tõlgendada maapealse fenoloogilise faasi ligikaudse kaugseirepõhise näitajana.

Täisküpsus tähistab Aasa (2001) järgi teravilja arengujärku, mil tera on kõvastunud ning seda saab noaga vajutades või lõigates pooleks jagada. See faas seostub kasvuperioodi lõpu ja saagi valmimisega, mistõttu on see oluline näitaja teraviljade arengutsükli pikkuse hindamisel (Aasa 2001). NDVI aegrides väljendub küpsemisega kaasnev taimkatte vananemine tavaliselt

roheluse vähenemisena, sest senestsentsi käigus laguneb klorofüll ja väheneb roheline biomassi osakaal (Anderegg *et al.*, 2020). Seetõttu saab NDVI kõvera langusfaasi kasutada täisküpsuse ligikaudse ajastuse hindamiseks, kuid ka siin tuleb arvestada, et spektraalne muutus ei ole üksüheselt sama mis maapealne agronoomiline küpsusfaas.

### **1.3 Kaugseire ja NDVI põllumajandusliku fenoloogia uurimisel**

Kaugseire võimaldab põllumajanduslikku taimkatet jälgida suurel ruumilisel alal ja korduvate vaatluste kaudu (Atzberger 2013). Põllumajanduses kasutatakse kaugseiret muu hulgas põllukultuuride kaardistamiseks, taimkatte seisundi hindamiseks, saagikuse prognoosimiseks ja fenoloogilise arengu jälgimiseks (Atzberger 2013). Satelliidiandmete eelis seisneb selles, et eri piirkondi ja aastaid saab võrrelda ühtse metoodika alusel.

Põllukultuuride puhul põhineb kaugseirepõhine fenoloogia eeldusel, et taimede arenguetapid kajastuvad taimkatte spektraalses signaalis (Zeng *et al.*, 2020). Taimede kasvu alguses suureneb roheline biomass ja fotosünteesiline aktiivsus, mistõttu muutuvad ka taimkatteindeksite väärtused (Zeng *et al.*, 2020). Kasvuperioodi jooksul moodustub taimkatteindeksi kõver, millelt saab eristada tõusufaasi, hooajalist maksimumi ja langusfaasi (Sakamoto *et al.*, 2005). Sakamoto *et al.*, (2005) näitasid, et silutud taimkatteindeksi aegridade maksimum-, miinimum- ja pöördepunktide abil saab määrata põllukultuuride fenoloogilisi etappe.

Taimkatteindeksid on kaugseireandmetest tuletatud matemaatilised näitajad, mis kirjeldavad taimkatte hulka, tihedust ja fotosünteesilist aktiivsust (Huete *et al.*, 2002). Need põhinevad taimede spektraalsel peegeldusel nähtava (punase) ja lähiinfrapuna (NIR) lainepikkuse piirkonnas (Tucker, 1979). Terved ja aktiivselt fotosünteesivad taimed neelavad punast valgust klorofüllide kaudu ning peegeldavad tugevalt lähiinfrapunakiirgust, kuna lehepinna sisemine struktuur hajutab seda (Tucker, 1979; Atzberger, 2013).

Kaugseire praktikas on välja kujunenud mitmeid taimkatte ja keskkonnaseisundi hindamiseks kasutatavaid indekseid, millest üks levinumaid on NDVI (Huete *et al.*, 2002; Zeng *et al.*, 2020). Igal indeksil on oma spetsiifiline tundlikkus ja rakendusala, sõltudes uuritavast objektist ja analüüsi eesmärgist (Huete *et al.*, 2002). NDVI arvutamisel kasutatakse lähiinfrapuna (NIR) ja nähtava valguse punase piirkonna (RED) peegeldust (Tucker, 1979).



NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*)

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

NDVI on enimkasutatud indeks taimkatte üldise roheluse hindamiseks. Selle väärtused jäävad vahemikku  $-1$  kuni  $+1$ , kus madalad väärtused viitavad mullale või veele ja kõrged väärtused aktiivsele vegetatsioonile (Huang *et al.*, 2021). NDVI peegeldab fotosünteesiliselt aktiivse taimkatte tihedust, kuid küllastub kõrge biomassiga aladel (Zeng *et al.*, 2020).

Kaugseireandmete kasutamisel mõjutavad tulemusi andmete ruumiline ja ajaline lahutusvõime. Ruumiline lahutusvõime määrab, kui hästi on võimalik eristada põlde ümbritsevast maastikust. Ajaline lahutusvõime määrab, kui täpselt saab hinnata fenoloogiliste muutuste toimumisaega. Põllukultuuride puhul on ajaline lahutusvõime eriti oluline, sest arengufaasid võivad muutuda suhteliselt lühikese aja jooksul. Satelliitandmete aegridades võivad esineda müra ja lüngad, mida põhjustavad muu hulgas atmosfääritingimused ning päikese, sensori ja maapinna vaatlusgeomeetria erinevused (Hird & McDermid 2009). Hird ja McDermid (2009) märgivad, et NDVI aegridade müra võib takistada fenoloogiliste näitajate täpset määramist. Seetõttu kasutatakse enne fenoloogiliste näitajate leidmist sageli aegridade silumist või filtreerimist (Hird & McDermid, 2009). Zeng *et al.* (2020) toovad samuti välja, et fenoloogiliste näitajate leidmisele eelneb sageli aegridade korrastamine, lünkade täitmine ja silumine.

## 1.4 Fenoloogia seos Eesti ilmastikuga

Aastaaegade vaheldumist mõjutavad eelkõige päikese kiirguse aastane käik, päeva pikkus ja õhutemperatuur, kuid Eesti tingimustes on olulised ka mereliskus, mulla niiskus, mullastik, reljeef ja inimtegevus (Ahas, 2001). Fenoloogiliste faaside ajastus annab seetõttu koondinfot mitme keskkonnateguri koosmõju kohta, mitte ainult ühe ilmastikunäitaja muutuse kohta. Kevadised ja suvised faasid on eriti tugevalt seotud temperatuuri, kiirgusrežiimi ja niiskustingimustega (Jaagus & Ahas, 2000).

Meteoroloogilise vegetatsiooniperioodi käsitlemine on fenoloogilise analüüsi seisukohalt oluline, sest taimede aktiivne kasv seostub püsivalt soojema perioodi algusega (Jaagus, 2001; Aasa, 2001). Eestis seostatakse vegetatsiooniperioodi algust ööpäeva keskmise

õhutemperatuuri püsiva tõusuga üle 5 °C ning lõppu selle langusega alla sama läve (Jaagus, 2001; Aasa, 2001). Seetõttu saab meteoroloogilist vegetatsiooniperioodi kasutada taustana põllukultuuride kevadise arengu ja kasvuperioodi lõpu tõlgendamisel.

Eesti põllukultuuride fenoloogia peegeldab selgelt kliimatingimuste sesoonset muutlikkust (Jaagus & Ahas, 2000; Aasa, 2001). Kevadised ja suvised fenofaasid, nagu talirukki tärkamine ja kase lehtimine, algavad varem Kagu-Eestis ning hiljem rannikualadel, kus kevad on pikem ja jahedam (Jaagus & Ahas, 2000). Aastatel 1948–1996 on mitmed fenoloogilised faasid nihkunud 3–5 päeva võrra varasemaks, samal ajal kui sügisesed faasid on hilinenud, viidates kasvuperioodi pikenemisele (Jaagus & Ahas 2000). Sellest võib järeldada, et põllumajanduse hooajaline rütm Eestis on muutumas kooskõlas soojeneva kliimaga.

## 2. Materjal ja metoodika

### 2.1 Uurimisala

Uurimisalaks valiti Järva-, Lääne-Viru- ja Võru maakond, et võimaldada põllukultuuride fenoloogilise arengu võrdlust vastavalt Kesk-, Põhja- ja Lõuna-Eesti tingimustes. Selline maakondade valik võimaldab hinnata, kas NDVI aegridadest määratud fenoloogilistes faasides avalduvad piirkondlikud erinevused. Analüüsis keskenduti aastatele 2020–2024, sest selle perioodi kohta olid kättesaadavad nii Põllumajanduse Registrite ja Informatsiooni Ameti PRIA põlluandmed kui ka Landsati NDVI aegridade põhjal tehtavaks analüüsiks sobivad kaugseireandmed.

Uuritavate põllukultuuride valikul kasutati Statistikaameti tabeli PM0281 „Põllumajandusmaa ja -kultuurid maakonna järgi“ andmeid, et selgitada välja uuritud maakondades enim kasvatatud kultuurid. Nende andmete põhjal valiti analüüsi suvinisu, suvioder ja rukis, kuna need kuuluvad Eestis oluliste teraviljakultuuride hulka (Statistikaamet, 2026). Suvinisu ja suvioder võimaldavad võrrelda kevadel külvatavate teraviljade fenoloogilist arengut, rukki kui talivilja kaasamine aga võimaldab käsitleda ka kevadist vegetatsiooni uuenemist ning pikemat arenguperioodi.

Uurimisperioodi 2020–2024 aastad erinesid ilmastiku poolest märgatavalt, mis on fenoloogiliste tulemuste tõlgendamisel oluline taust. Keskkonnaagentuuri meteoroloogia aastaraamatute põhjal kuulusid perioodi väga soojad aastad 2020 ja 2024, normist soojem ja kuivem 2022. aasta ning 2023. aasta kevadine ja varasuvine kuivaperiood (Keskkonnaagentuur, 2021, 2022, 2023, 2024, 2025). Seetõttu tuleb aastatevahelisi fenoloogilisi erinevusi tõlgendada mitte ainult maakondliku paiknemise, vaid ka konkreetse aasta kasvutingimuste taustal.

## 2.2 Andmed

Käesolevas töös kasutati kolme andmerühma: meteoroloogilisi vaatlusandmeid (Keskkonnaagentuur, i.a.), PRIA põldude ruumiandmeid (PRIA, i.a.) ning Landsati kaugseireandmeid (GEE, i.a.). Meteoroloogilisi andmeid kasutati meteoroloogilise vegetatsiooniperioodi määramiseks, PRIA ruumiandmeid uuritavate põldude eristamiseks ning kaugseireandmeid põllukultuuride sesoonse dünaamika ja fenoloogiliste faaside hindamiseks.

Meteoroloogilise vegetatsiooniperioodi tuvastamiseks kasutati Keskkonnaagentuuri avatud andmete teenuse tabelit `f_kliima_paev` (Keskkonnaagentuur, i.a.), mis sisaldab Eesti meteoroloogiajaamade päevaseid ilmaandmeid. Uuritavaks ajavahemikuks valiti aastad 2000–2025 ning analüüsi kaasati 24 meteoroloogiajaama, et tagada piisavalt pikk aegrida ja hea ruumiline katvus. Käesolevas töös kasutati neist ööpäeva keskmist õhutemperatuuri, mille tähis andmestikus on DTA08.

Kaugseireanalüüsi ruumiliseks aluseks kasutati PRIA pindalatoetuste ajaloolise ruumiandmestiku põldude kihte aastatest 2020–2024. Analüüsi kaasati Järva-, Lääne-Viru- ja Võru maakonna põllud. Uuritavateks kultuurideks olid suvinisu, rukis ja suvioder. PRIA andmestik sisaldas põldude ruumigeomeetriat ja atribuutandmeid, mille põhjal oli võimalik eristada põlde nende asukoha, kultuuri, pindala ja identifikaatori järgi. Ruumiandmed saadi andmebaasist WFS-teenuse kaudu.

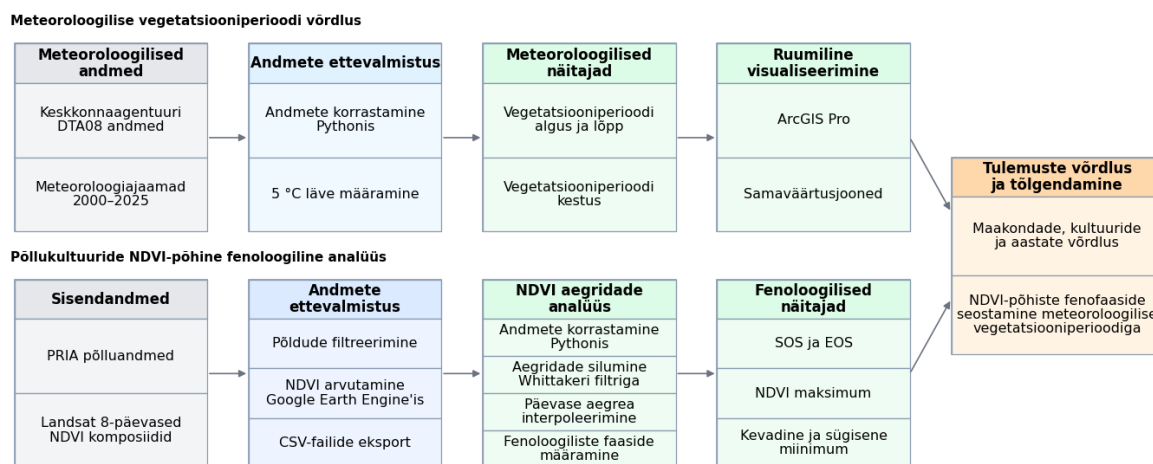
Põllukultuuride sesoonse muutlikkuse hindamiseks kasutati Google Earth Engine (GEE) keskkonnas Landsati 8-päevaseid NDVI komposiite andmekogust LANDSAT/COMPOSITES/C02/T1\_L2\_8DAY\_NDVI (GEE, i.a.). Tegemist on 30-meetrise ruumilise lahutusvõimega andmestikuga, milles NDVI väärtused on eelnevalt arvutatud. Komposiite andmekogu on juba eeltöödeldud toode (*product*), mis võtab kokku kindla ajaperioodi (8, 16 või 32-päeva) (GEE, i.a.). Käesolevas töös kasutatud 8-päevased komposiidid moodustatakse kõigist vastava 8-päevase perioodi piltidest ning komposiidi piksliväärtuseks kasutatakse selle perioodi kõige hilisemat pikslit.

Võrdlusmaterjalina kasutati Aasa (2001) koostatud Eesti agrofenooloogilise kalendri andmeid, milles on esitatud teraviljade tärkamise, loomise ja täisküpsuse keskmised kuupäevad

vaatlusjaamade kaupa. Käesolevas töös kasutati neid andmeid NDVI-põhiselt määratud fenoloogiliste kuupäevade võrdlemiseks varasemate agrofenoloogiliste vaatlustega.

## 2.3 Metoodika

Uurimisküsimustele vastamiseks rakendati kahest paralleelsest analüüsisuunast koosnevat metoodilist töövoogu (Joonis 1). Esimeses suunas määrati Keskkonnaagentuuri meteoroloogiliste vaatlusandmete põhjal meteoroloogilise vegetatsiooniperioodi algus, lõpp ja kestus, mida kasutati tulemuste tõlgendamisel võrdlusraamistikuna. Teises suunas valmistati ette PRIA põlluandmed ja Landsati NDVI komposiidid, mille põhjal arvutati GEE keskkonnas põldude keskmised NDVI väärtused 8-päevaste Landsati komposiitide põhjal. Eksporditud aegridu töödeldi edasi Pythonis, kus andmed korrastati, aegridasid siluti ning nende põhjal määrati põllukultuuride fenoloogilised näitajad. Töövoo lõppetapis võrreldi saadud tulemusi maakondade, kultuuride ja aastate lõikes.

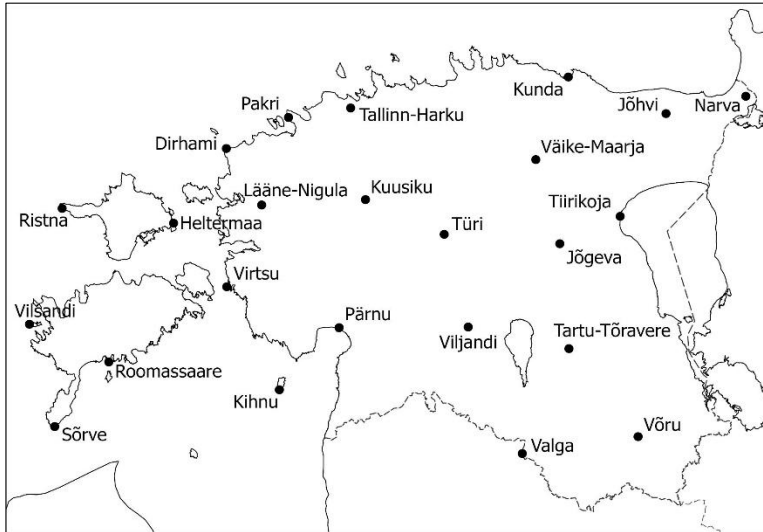


Joonis 1. Metoodika töövoog

### 2.3.1 Meteoroloogilise vegetatsiooniperioodi võrdlus

Keskkonnaagentuuri f\_kliima\_paev teenusest saadud DTA08 andmeid töödeldi Pythonis, et määrata meteoroloogilise vegetatsiooniperioodi algus, lõpp ja kestus. Töös kasutatud vaatlusjaamade paiknemine on esitatud joonisel 2. Iga jaama andmed koondati eraldi CSV-faili, milles read vastasid aastatele ja veerud kalendripäevadele. Päevaveerud olid esitatud kujul DD.MM ning nende väärtused olid binaarsed: väärtus 1 tähistas vegetatsiooniperioodi kuulumist ning väärtus 0 selle puudumist vastaval kuupäeval. Andmetöötluse käigus eemaldati

täielikult tühjad read, aastaveeru väärtused teisendati numbrilisele kujule ning analüüsiks jäeti ainult vahemikku 2000–2025 kuuluvad kirjed. Liigaastatel esinev 29. veebruar jäeti andmestikust välja, et tagada aastatevaheline võrreldavus ja ühtne 365-päevane aegrida.



Joonis 2. Töös kasutatud vaatlusjaamade asukohad. Andmed: Keskkonnaagentuur

Vegetatsiooniperioodi algus (*Start of Season*, SOS) määrati kuupäevana, mis järgnes esimesele viiepäevasele järjestikusele perioodile, mil ööpäeva keskmine õhutemperatuur oli vähemalt 5 °C. Vegetatsiooniperioodi lõpp (*End of Season*, EOS) määrati analoogselt kuupäevana, mis järgnes sügisel esimesele viiepäevasele järjestikusele perioodile, mil ööpäeva keskmine õhutemperatuur langes alla 5 °C. Valitud meetodika lähtub käsitlest, mille kohaselt algab taimede vegetatsiooniperiood ööpäeva keskmise õhutemperatuuri püsival tõusul üle 5 °C ning lõpeb selle püsival langusel alla sama läve (Jaagus, 2001). Aasa (2001) järgi väljendub vegetatsiooni katkemine päevast, mille järel püsib ööpäeva keskmine õhutemperatuur viiel järjestikusel päeval alla 5 °C. Selline viiepäevane tingimus aitab välistada ajutised temperatuurikõikumised, mis ei tähista veel kliimaatilise aastaaja tegelikku ja püsivat üleminekut.

Vegetatsiooniperioodi määramiseks koondati tulemused jaamapõhistesse tabelitesse. Selleks kasutati libiseva akna meetodit, kus aegread jagati ajas edasi liikuvateks alamhulkadeks. Iga aasta kohta määrati vegetatsiooniperioodi algus esimese päevana ja lõpp viimase päevana, mille korral binaarne tunnus sai väärtuse 1 ehk päev kuulus vegetatsiooniperioodi, ning arvutati perioodi pikkus päevades. Tulemused salvestati aastapõhistesse tabelitesse, mis võimaldasid võrrelda vegetatsiooniperioodi tunnuseid aastate ja jaamade lõikes (lisa 1).

Jaamade keskmiste näitajate arvutamiseks teisendati vegetatsiooniperioodi algus- ja lõppkuupäevad aasta päevanumbriteks (*Day of Year*, DOY). Seejuures kasutati võrdlusaastana mitteliigaastat, et kuupäevade keskmistamisel ei mõjutaks tulemusi liigaastate erinev päevade arv. Algus- ja lõppkuupäevade keskmised arvutati DOY väärtuste alusel ning seejärel teisendati need tagasi kalendripäeva kujule. Samuti arvutati iga jaama kohta vegetatsiooniperioodi keskmine pikkus päevades. Koondatud tulemused salvestati eraldi väljundfaili, mis võimaldas edasist võrdlust ja ruumilist analüüsi.

Väljundfaili kasutati seejärel ArcGIS Pro tarkvaras vegetatsiooniperioodi alguse, lõpu ja kestuse ruumilise jaotuse visualiseerimiseks. Kuna CSV-fail sisaldas lisaks jaamade keskmistele näitajatele ka meteoroloogiajaamade koordinaate, moodustati selle põhjal jaamade punktkiht. Sama töövoogu rakendati eraldi vegetatsiooniperioodi alguse, lõpu ja kestuse näitajatele, mille tulemusel loodi kolm eraldi ruumikihti. Iga näitaja puhul koostati esmalt jaamapunktide väärtuste alusel trianguleeritud ebakorrapärane pind (TIN), mis teisendati rasterpinnaks tööriistaga *TIN to Raster*. Seejärel moodustati rasterpinna põhjal samaväärtusjooned tööriistaga *Contour*: Vegetatsiooniperioodi kestuse kaardil kasutati 2-päevast ning vegetatsiooniperioodi alguse ja lõpu kaartidel 4-päevast intervalli. Erineva intervalli kasutamise eesmärk oli tagada kaartide parem loetavus ja vältida liigset visuaalset detailsust.

Saadud samaväärtusjooni siluti tööriistaga *Smooth Line*, et muuta kaartide kujutis visuaalselt ühtlasemaks ja paremini tõlgendatavaks. Kuna interpoleeritud samaväärtusjooned piirdusid jaamavõrgu ulatusega ega ulatunud kõikjal kaardi servani, pikendati neid käsitsi loogilisel viisil kaardi servani, et tagada terviklikum kaardipilt. Seejuures tuleb arvestada, et vegetatsiooniperioodi algus, lõpp ja kestus on ruumis järk-järgult muutuvad tunnused ning samaväärtusjooned esitavad nende ligikaudset ruumilist jaotust, mitte täpselt piiritletud looduslikke murdejooi.

### 2.3.2 PRIA põllumassiivide filtreerimine

PRIA andmebaas sisaldas sõltuvalt aastast keskmiselt 170 000 eri kultuuridega põllu kirjet. PRIA ruumiandmestikust valiti QGIS-is edasiseks analüüsiks Järva-, Lääne-Viru- ja Võru maakonnas paiknevad suvinisu, suviadra ja rukki põllud. Kuna andmestikus eristati allakülviga ja allakülvita põlde, kaasati analüüsi ainult allakülvita põllud, et vältida teise kultuuri samaaegse kasvu mõju taimkatteindeksi väärtustele. Lisaks rakendati vähemalt 10 ha pindalapiirangut, et vähendada serva- ja segapikslite mõju Landsati 30-meetrise ruumilise lahutusvõimega andmetes, kuid säilitada samal ajal analüüsiks piisav põldude arv.

Andmete ettevalmistamise käigus eemaldati topeltobjektid, vigased geomeetriad ning tühjad või puudulike atribuutandmetega kirjed. Tulemuseks saadi iga aasta ja kultuuri kohta eraldi ruumiandmekiht, mis sisaldas kõiki valikukriteeriumidele vastavaid põlde kolmes uuritavas maakonnas. Valmis kihid eksporditi shapefile-vormingus ning laaditi GEE keskkonda, kus neid kasutati põldude kaupa NDVI väärtuste arvutamiseks ja hilisemaks võrdlemiseks.

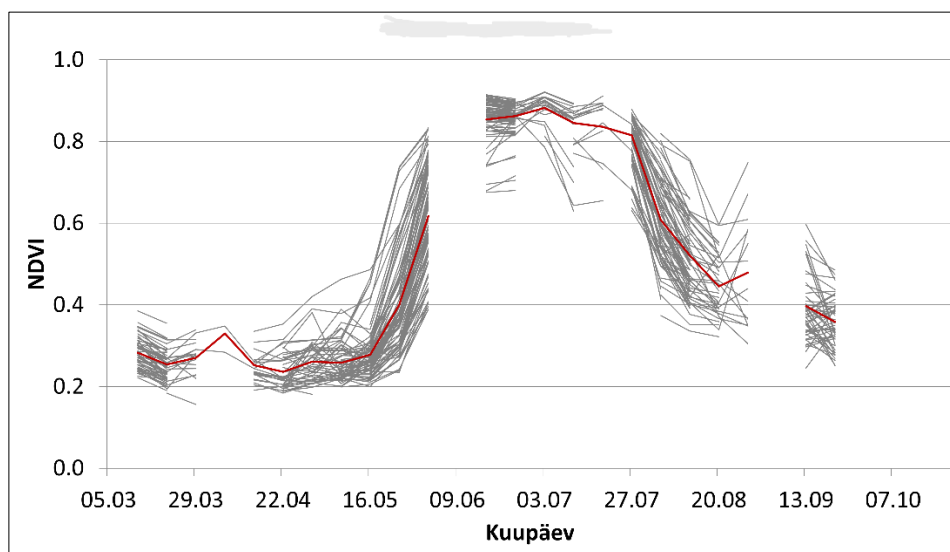
### 2.3.3 Taimkatteindeksite väärtuste leidmine

Uuritavate põldude keskmised NDVI väärtused määrati GEE-s eraldi iga aasta, kultuuri ja maakonna kohta. Suvinisu ja suviadra puhul kasutati ajavahemikku 1. märtsist kuni 1. novembrini, et hõlmata vegetatsiooniperioodi piisava varuga. Rukki kui talivilja puhul kasutati ajavahemikku 1. augustist kuni järgmise aasta 1. septembrini, samuti varuga, et kõik olulisemad fenofaasid jääksid vaadeldavasse perioodi. NDVI väärtused filtreeriti enne analüüsi vahemikku 0,0–1,0, et eemaldada anomaalsed väärtused. Seejärel arvutati iga komposiitkuupäeva kohta põllu polügooni ulatuses pikslite keskmine NDVI väärtus. Arvutused tehti GEE *reduceRegions* funktsiooni abil, mille tulemusel saadi igale põllule üks keskmine NDVI väärtus iga 8-päevase komposiidi kohta (lisa 2).

Iga töötluskorra väljund eksporditi CSV-failina. Failid koostati nn laia tabeli kujul, kus iga rida vastas ühele komposiitkuupäevale ja iga veerg ühele põllule. Põlde eristati tunnuse `pollu_id` alusel, mis tähistas kogu töö vältel ühte ja sama põldu. Lisaks lisati igasse faili ka eraldi veerg kõigi samasse analüüsi kaasatud põldude keskmise NDVI väärtusega. Kuigi väljund sisaldas üksikute põldude väärtusi, keskendus edasine analüüs maakonna keskmisele NDVI dünaamikale; üksikpõldude veerge ja koondkeskmist kasutati seejuures ka kontrolliks ning



graafiliseks visualiseerimiseks (joonis 3). Tehnilise piirangu tõttu määrati ühe töötluskorraga töödeldavate põldude ülempiiriks 200, kuna suurema objektide arvu korral ei viinud GEE päringut lõpuni. Enamasti jäi valim siiski alla selle piiri.

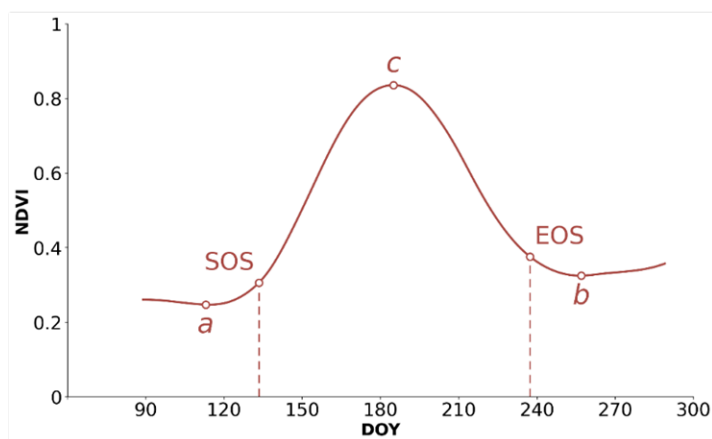


Joonis 3. Põldude NDVI dünaamika; hallid jooned tähistavad üksikpõlde ja punane joon keskmist.

### 2.3.4 Fenoloogiliste faaside leidmine

Fenoloogiliste faaside määramiseks töödeldi GEE-st eksporditud NDVI aegridu Pythonis. Sisendandmeteks olid CSV-failid, milles iga rida vastas ühele 8-päevasele komposiitkuupäevale ja iga veerg ühele põllule. Analüüsiks loeti failid Pythonisse, kuupäevad korrastati ühtsesse vormingusse ning andmed teisendati analüüsiks sobivale kujule, nii et iga NDVI vaatlus oleks seotud kindla põllu ja kuupäevaga. Seejuures kasutati silumisel kõiki üksikute põldude vaatlusi, mitte tuletatud keskmist. Aegridade silumiseks rakendati Whittakeri filtrit, mis vähendab andmetes esinevat müra, säilitades samal ajal aegridade üldise kuju; Meetod võimaldab parameetri lambda abil määrata silumise tugevust (Atzberger & Eilers, 2011). Sobiva silumisparameetri leidmiseks katsetati erinevaid lambda väärtusi ning valiti väärtus 100, kuna see säilitas kõige paremini algandmete üldise kuju, vähendades samal ajal üksikute kõrvalekallete mõju. Silutud väärtuste põhjal moodustati päevase sammuga pidev aegrida. Selleks kasutati interpolatsiooni, kus piisava arvu punktide korral rakendati kuubilist ja väheste punktide korral lineaarset interpolatsiooni (lisa 3).

Fenoloogiliste faaside määramisel leiti esmalt silutud kõvera kõrgeim NDVI väärtus ehk hooajaline maksimum, mida tähistab punkt c (joonis 4). Liu jt (2022) metoodikas seostatakse NDVI kõvera kasvumaksimum loomise faasiga (*heading*), mistõttu määrati punkt ehk c loomise faasiks. Seejärel määrati kevadine miinimum enne maksimumi ehk punkt a ja sügisene miinimum pärast maksimumi ehk punkt b. Tärkamine (SOS, *Start of Season*) määrati Hirdi ja McDermidi (2009) ning Liu jt (2022) metoodikale tuginedes päevana, mil NDVI väärtus oli tõusnud 10%-ni kevadise miinimumi ja hooajalise maksimumi vahelisest amplituudist. Täisküpsus (EOS, *End of Season*) tähistab aega, mil NDVI langeb sügisese miinimumi ja hooajalise maksimumi vahelise vahemiku 10% tasemeni (Hird, McDermid 2009). Tärkamise, loomise ja täisküpsuse kuupäev hinnati silutud kõvera põhjal lineaarse interpolatsiooni abil ühepäevase täpsusega, kuid saadud kuupäevad on ligikaudsed ega pruugi vastata faasi tegelikule toimumispäevale.



Joonis 4. Silutud keskmine, SOS ja EOS leidmine

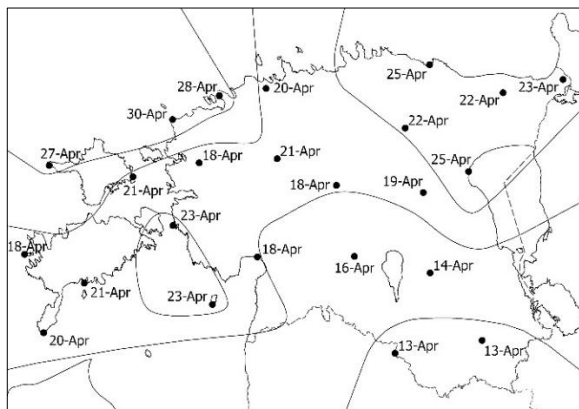
Rukki puhul kasutati eraldi lähenemist, kuna tegemist on teraviljaga. Seetõttu ei tähistata rukki puhul SOS tavapärasest tärkamist, vaid taliteraviljade vegetatsiooni uuenemist kevadel. Rukki analüüsiperiood hõlmas ajavahemikku 1. augustist järgmise aasta 31. augustini, et kõik olulisemad fenofaasid jääksid vaadeldavasse perioodi. Rukki aeGRIDade puhul jagati üle 30-päevaste lünkadega seeriad eraldi segmentideks ning fenoloogilised punktid määrati hooajalise telje alusel. See võimaldas kevad- ja sügisperioodi selgemini eristada ning vähendada talvel esinevate anomaalsete väärtuste mõju ajal, mil vegetatiivset arengut ei toimu.

### 3. Tulemused

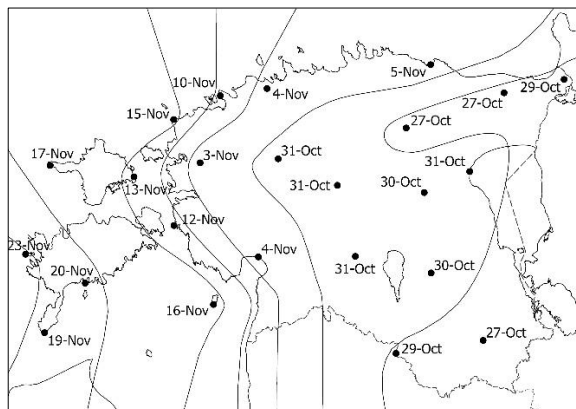
#### 3.1 Meteoroloogilise vegetatsiooniperioodi ruumiline muster Eestis

Vegetatsiooniperioodi algus ja lõpp erineb Eesti piires selgelt. Vegetatsiooniperioodi algab kõige varem Lõuna-Eestis, kus Valga ja Võru jaamas keskmine algus on 13. aprillil (joonis 5a). Kõige hilisem algus esineb Dirhami jaamas, kus vegetatsiooniperiood algab keskmiselt 30. aprillil. Seega algab periood sisemaal ja Lõuna-Eestis üldiselt varem, samas kui rannikualadel ja eriti Loode-Eestis nihkub algus hilisemaks. Vegetatsiooniperioodi lõpp toimub kõige varem Jõhvi jaamas, keskmiselt 27. oktoobril ning kõige hiljem Vilsandi jaamas 23. novembril (joonis 5b). Lõpu puhul on näha, et Ida-Eestis ja sisemaal lõpeb vegetatsiooniperiood varem, samal ajal kui Lääne-Eesti saartel ja rannikualadel kestab see kauem.

a



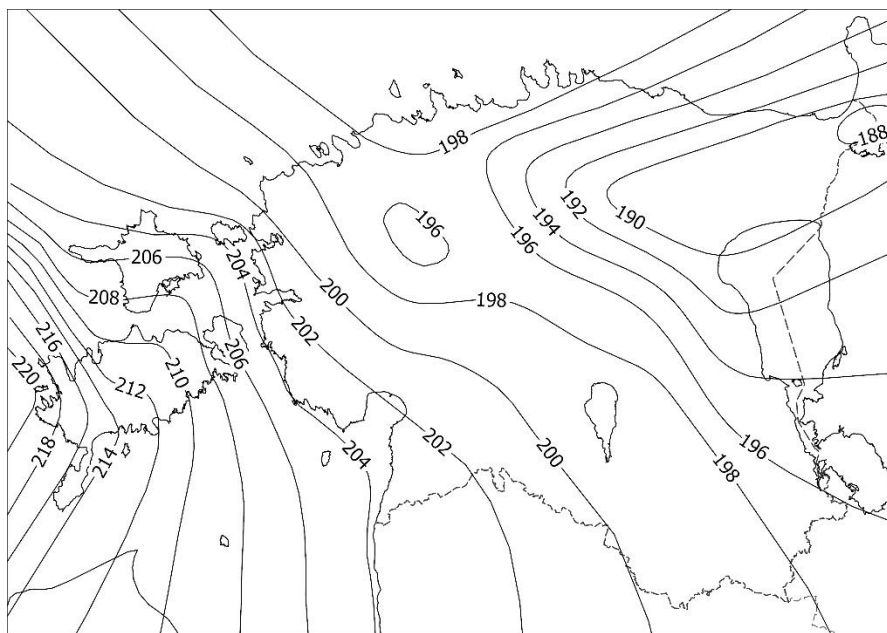
b



Joonis 5. a) Vegetatsiooniperioodi alguskuupäev b) Vegetatsiooniperioodi lõppkuupäev. Eesti keskmine perioodil (2000–2025). Samaväärtusjooned on 4-päevase intervalliga. Andmed: Keskkonnaagentuur

Vegetatsiooniperioodi kestus on Eestis selgelt pikem Lääne-Eesti saartel ning lühem ida- ja kirdeosas (joonis 6). Kõige lühem vegetatsiooniperiood esineb Kirde-Eestis, kus samaväärtusjooned näitavad ligikaudu 188–190 päeva pikkust perioodi. Mujal Eesti siseosas jääb kestus vahemikku 190–202 päeva, suurenedes lääne- ja edela suunas. Lääne-Eesti rannikualadel pikeneb vegetatsiooniperiood 202–206 päevani ning kõige pikem on see Lääne-

Eesti saartel, kus väärtused ulatuvad 206–220 päevani. Eesti piires on lühema ja pikema vegetatsiooniperioodiga piirkondade erinevus ligikaudu 32 päeva.



Joonis 6. Vegetatsiooniperioodi keskmine kestus päevades (2000–2025). Samaväärtusjooned on 2-päevase intervalliga. Andmed: Keskkonnaagentuur

## 3.2 NDVI põhjal määratud põllukultuuride fenoloogilised faasid

### 3.2.1 Suvinisu

Suvinisu analüüsis kasutatud Landsati 8-päevase ajasammuga vaatluskuupäevade arv jäi sõltuvalt maakonnast ja aastast vahemikku 17–29 ning põldude koguarv varieerus 505 ja 2071 vahel. Tulemused on esitatud joonisel 7.

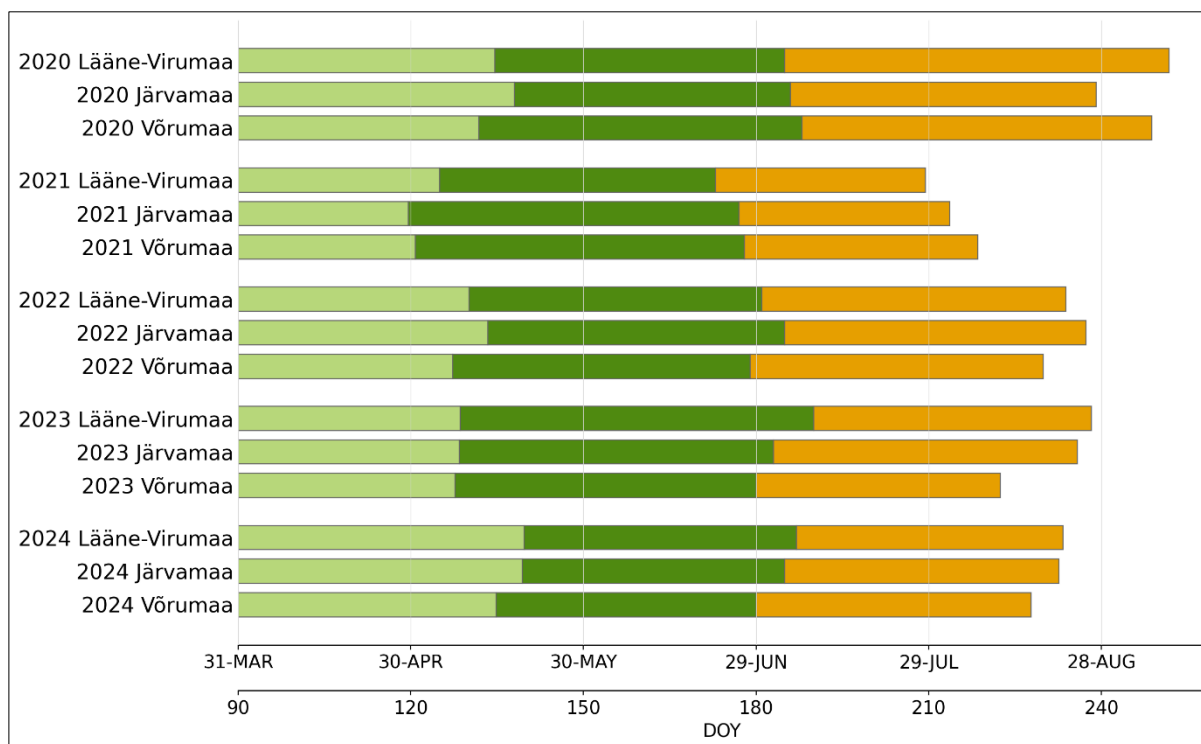
Suvinisu tärkamine jäi ligikaudu aprilli lõpu ja mai keskpaiga vahele. Kõige varasem tärkamine määrati 2021. aastal Järvamaal ning kõige hilisem 2024. aastal Lääne-Virumaal. Maakondade keskmiste põhjal toimus tärkamine kõige varem Võrumaal, mis viitab Lõuna-Eestile iseloomulikule varasemale kevadisele arengule.

Loomine ehk hooajaline NDVI maksimum saabus suvinisul enamasti juuni lõpus või juuli alguses. Ajaliselt oli loomine varasem Võrumaal, kus see toimus keskmiselt 30. juuni paiku, samas kui Järvamaal ja Lääne-Virumaal jäi see ligikaudu 2. juulile. Aastate lõikes saabus loomine varem 2021. ja 2023. aastal ning hiljem 2020. ja 2024. aastal. Hooajalised NDVI

maksimumväärtused jäid vahemikku 0,676–0,882, olles suurimad 2020. aastal Lääne-Virumaal ja väikseimad 2023. aastal Võrumaal.

Täisküpsuse varieeruvus oli suurem kui tärkamise puhul. Varaseim täisküpsus esines 2021. aastal Lääne-Virumaal, kus see langes ligikaudu 28. juulile. Kõige hilisem täisküpsus määrati samuti Lääne-Virumaal, kuid 2020. aastal, mil see jäi septembri algusesse.

Tärkamise ja täisküpsuse vahe põhjal jäi suvinisu kasvuperioodi pikkus ligikaudu 84–117 päeva vahele. Pikim kasvuperiood esines 2020. aastal Lääne-Virumaal ning lühim 2021. aastal samas maakonnas. Aastate keskmiste järgi oli kasvuperiood pikim 2020. aastal, samas kui lühemad kasvuperioodid ilmnisid 2021. ja 2024. aastal. Kuigi Võrumaal algas areng keskmiselt varem, jõudis suvinisu seal ka mõnevõrra varem täisküpsuseni, mistõttu maakondadevahelised erinevused kasvuperioodi pikkuses jäid suhteliselt väikeseks.



Joonis 7. Suvinisu fenoloogiliste faaside ajastus Lääne-Virumaal, Järvamaal ja Võrumaal aastatel 2020–2024. Heleroheline tähistab perioodi 1. aprillist tärkamiseni, tumeroheline perioodi tärkamisest loomiseni ehk hooajalise NDVI maksimumini ning kollane perioodi loomisest täisküpsuseni.

### 3.2.2 Suvioder

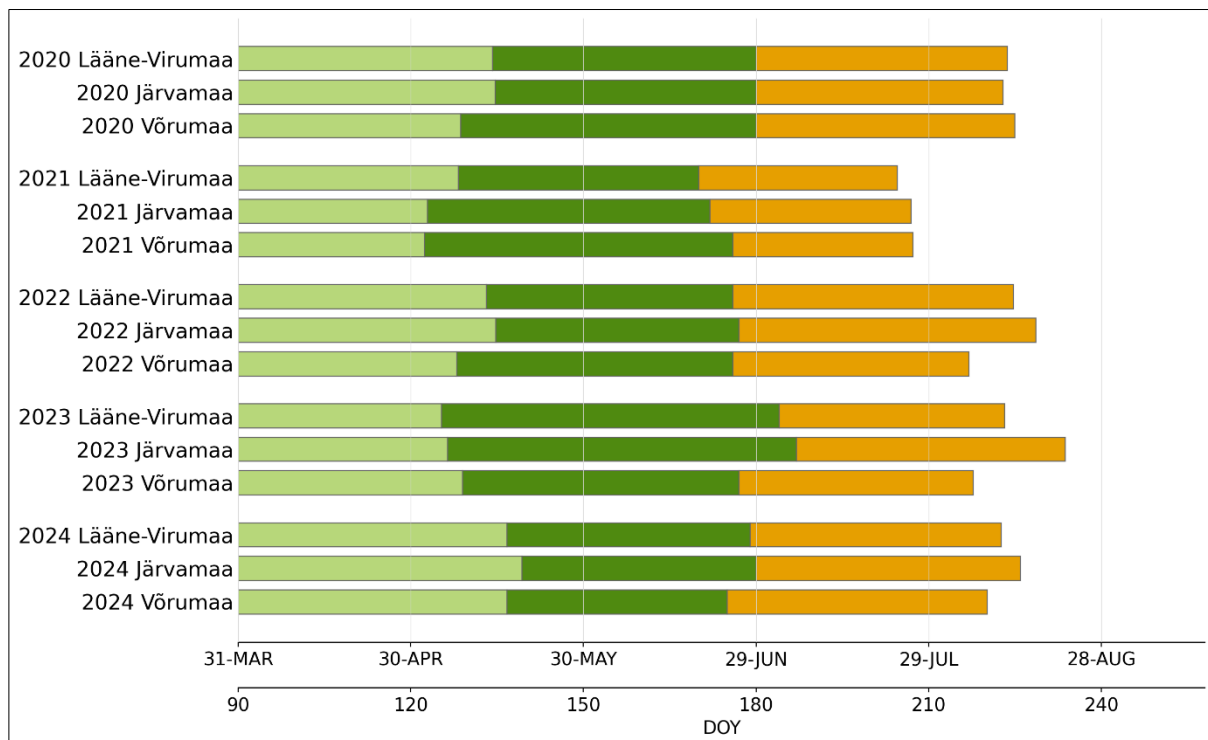
Suviodra puhul jäi vaatluskuupäevade arv sõltuvalt maakonnast ja aastast vahemikku 18–29 ning põldude koguarv varieerus 1130 ja 3273 vahel. Tulemused on esitatud joonisel 8.

Tärkamine varieerus vaadeldud juhtudel ligikaudu 2. maist 18. maini. Kõige varasem tärkamine määrati 2021. aastal Võrumaal ning kõige hilisem 2024. aastal Järvamaal. Aastate keskmiste põhjal toimus tärkamine kõige varem 2021. aastal ja kõige hiljem 2024. aastal. Maakondlikult eristus Võrumaa varasema tärkamisega, kus see toimus keskmiselt ligikaudu 9. mai paiku.

Loomise faasis jäid suviodra hooajalised NDVI maksimumväärtused vahemikku 0,661–0,874. Suurim maksimumväärtus esines 2020. aastal Lääne-Virumaal ning väikseim 2023. aastal Võrumaal. Aastate keskmiste järgi olid maksimumväärtused kõrgeimad 2022. aastal, samas kui 2023. aasta eristus kõigis kolmes maakonnas madalamate NDVI maksimumidega.

Täisküpsus saabus suviodral ligikaudu 23. juuli ja 21. augusti vahel. Kõige varasem täisküpsus määrati 2021. aastal Lääne-Virumaal ning kõige hilisem 2023. aastal Järvamaal. Aastate keskmiste põhjal jõudis suvioder täisküpsuseni kõige varem 2021. aastal ja kõige hiljem 2023. aastal.

Suviodra kasvuperioodi pikkus jäi 76–107 päeva vahele. Lühim kasvuperiood esines 2021. aastal Lääne-Virumaal ning pikim 2023. aastal Järvamaal. Kuigi tärkamine toimus keskmiselt kõige varem Võrumaal, jõudis suvioder seal ka kõige varem täisküpsuseni. Seetõttu ei kujunenud Võrumaal kasvuperiood kõige pikemaks; maakondade võrdluses oli see pikim Järvamaal, ulatudes keskmiselt ligikaudu 92 päevani. NDVI maksimumväärtuste poolest olid Järvamaa ja Lääne-Virumaa omavahel sarnased, samas kui Võrumaa eristus madalamate maksimumväärtustega.



Joonis 8. Suviendra fenoloogiliste faaside ajastus Lääne-Virumaal, Järvamaal ja Võrumaal aastatel 2020–2024. Heleroheline tähistab perioodi 1. aprillist tärkamiseni, tumeroheline perioodi tärkamisest loomiseni ehk hooajalise NDVI maksimumini ning kollane perioodi loomisest täisküpsuseni.

### 3.2.3 Rukis

Vaatluskupaevi oli sõltuvalt aastast ja maakonnast 19–32 ning punktide koguarv jäi vahemikku 61–1958. 2021. aastal vastas Võrumaal valitud kriteeriumitele vaid kuus põldu, mistõttu tuleb selle aasta tulemuste tõlgendamisel arvestada väikese valimimahuga. Sellest hoolimata kaasati arvutatud fenofaasid analüüsi, kuna need olid kooskõlas üldise aeGRIDade mustriga. Rukki tulemused on toodud joonisel 9.

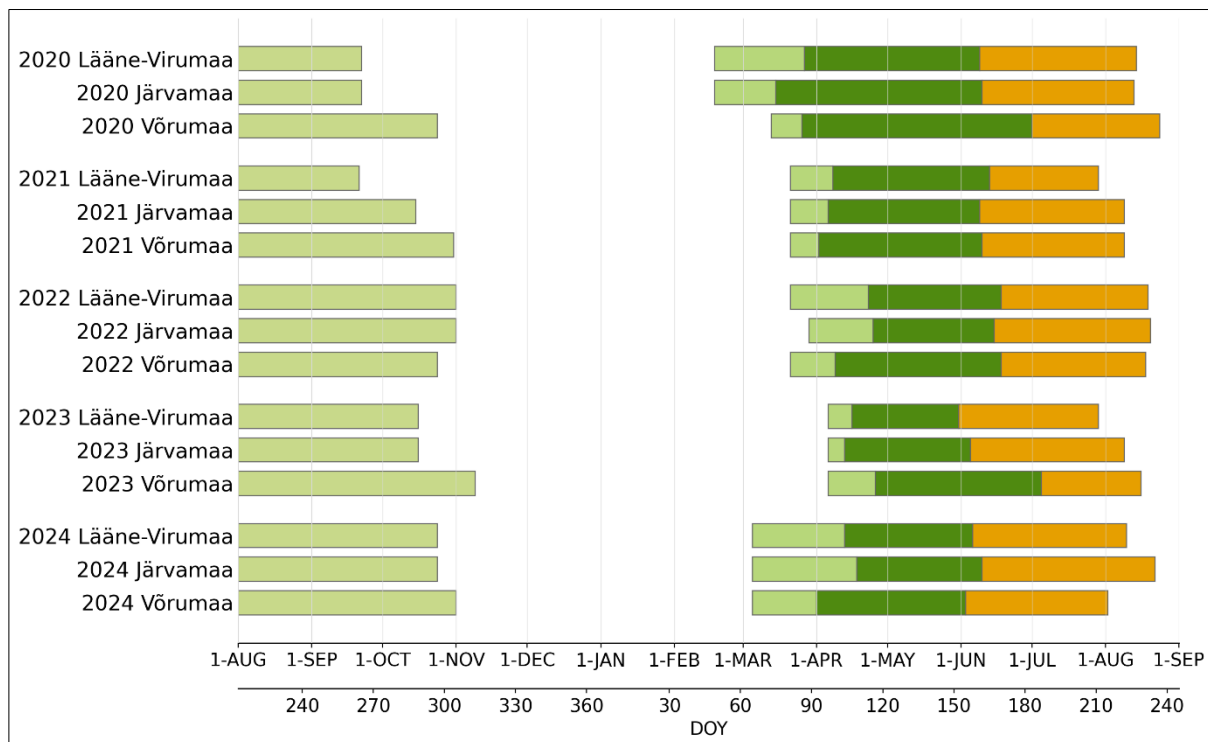
Rukki puhul määrati vegetatsiooni uuenemise faasi tärkamise asemel. Vaadeldud juhtudel jäi tärkamine ligikaudu 15. märtsi ja 27. aprilli vahele. Kõige varem algas kevadine areng 2020. aastal Järvamaal, samas kui kõige hilisem tärkamine määrati 2023. aastal Võrumaal. Aastate keskmiste põhjal toimus tärkamine kõige varem 2020. aastal ning kõige hiljem 2022. ja 2023. aastal.

Hooajaline NDVI maksimum ehk loomine esines valdavalt juuni keskpaigas, kuid üksikjuhtudel varieerus see juuni algusest juuli alguseni. Kõige varasem loomine määrati 2023. aastal Lääne-Virumaal ning kõige hilisem samal aastal Võrumaal. NDVI maksimumväärtused jäid vahemikku 0,632–0,806, olles suurimad 2020. aastal Lääne-Virumaal ja väikseimad 2023. aastal Võrumaal.

Rukki täisküpsus saabus ligikaudu 30. juuli ja 24. augusti vahel. Kõige varem jõudis rukis täisküpsuseni 2021. ja 2023. aastal Lääne-Virumaal, kõige hiljem aga 2020. aastal Võrumaal. Aastate keskmiste põhjal saabus täisküpsus kõige varem 2021. aastal ning kõige hiljem 2022. aastal.

Kevadise vegetatsiooni uuenemise ja täisküpsuse vahe põhjal jäi rukki kasvuperioodi pikkus 104–151 päeva vahele. Pikim kasvuperiood esines 2020. aastal Järvamaal ja Võrumaal, lühim aga 2023. aastal Lääne-Virumaal. Aastate lõikes oli kasvuperiood keskmiselt pikim 2020. aastal ning lühim 2023. aastal. Maakondade võrdluses algas rukki kevadine areng keskmiselt kõige varem Võrumaal, kus täisküpsus saabus samas veidi hiljem kui Lääne-Virumaal. Seetõttu kujunes rukki kasvuperiood keskmiselt pikimaks Võrumaal. Lääne-Virumaa eristus lühema kasvuperioodi ja kõrgema hooajalise NDVI maksimumiga, samal ajal kui Võrumaal olid maksimumväärtused madalamad.





Joonis 9. Rukki fenoloogiliste faaside ajastus Lääne-Virumaal, Järvamaal ja Võrumaal aastatel 2020–2024. Heleroheline tähistab perioodi 1. aprillist tärkamiseni, tumeroheline perioodi tärkamisest loomiseni ehk hooajalise NDVI maksimumini ning kollane perioodi loomisest täisküpsuseni.

## 4. Arutelu

### 4.1 Vegetatsiooniperioodid

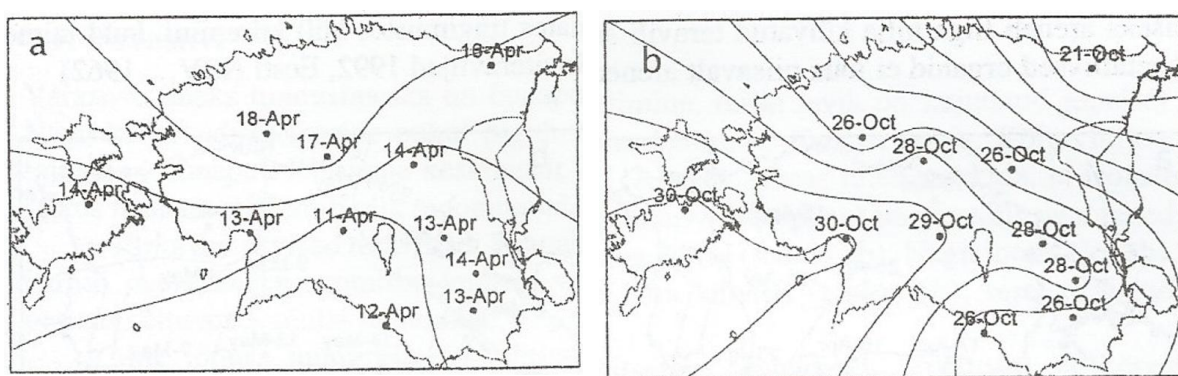
Meteoroloogilise vegetatsiooniperioodi muutuse hindamiseks võrreldi varasema perioodi 1949–1999 kaardiandmeid käesolevas töös arvatud 2000–2025 keskmistega. Varasema perioodi võrdlusandmetena kasutati Aasa (2001) esitatud rukki vegetatsiooni uuenemise ja vegetatsiooni katkemise kartogramme, kus joonis 10a kirjeldab kevadise vegetatsiooni uuenemise ning joonis 10b sügise vegetatsiooni katkemise keskmist ilmumist Eestis. Aasa (2001) käsitluses tähistab agrofenooloogilise kasvuperioodi algust vegetatsiooni uuenemine, mis väljendub põldudel värskel roheline värvuse ilmumises ning langeb üldjoontes ajale, mil õhutemperatuur tõuseb püsivamalt üle 5 °C. Vegetatsiooniperioodi katkemist käsitleb Aasa (2001) omakorda sügise üleminekuna puhkeperioodi, mida seostatakse püsivalt alla 5 °C langeva ööpäeva keskmise õhutemperatuuriga.

Võrdlusesse kaasati ainult need jaamad, mille kohta olid varasemas andmestikus olemas nii vegetatsiooniperioodi algus- kui ka lõppkuupäev. Kui sama jaama uuemas andmestikus ei olnud, kasutati lähimat sobivat jaama: Karja jaama võrreldi Roomassaarega ning Põlva jaama Võruga.

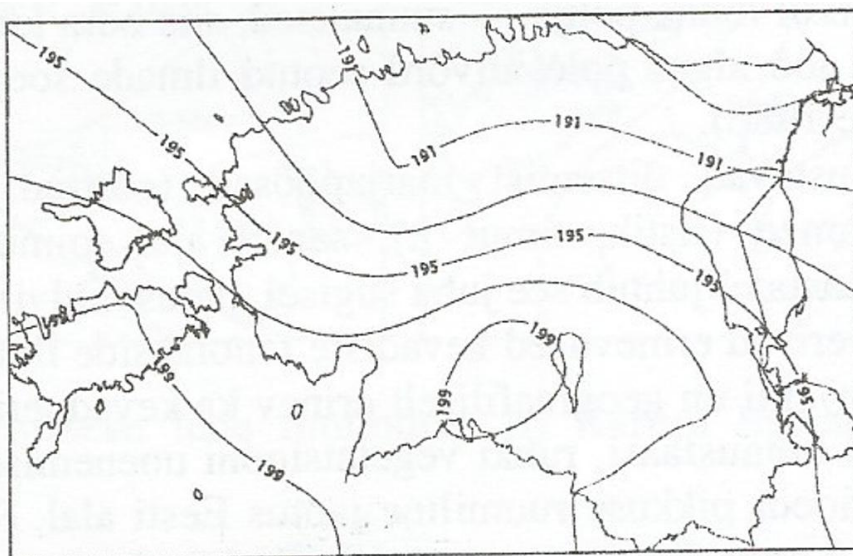
Võrdlus näitab, et vegetatsiooniperioodi algus ei ole 2000–2025 andmetes võrreldes 1949–1999 perioodiga üldiselt varasemaks nihkunud. Enamikus võrreldud jaamades algab vegetatsiooniperiood uuemal perioodil mõne päeva võrra hiljem. Kõige suurem erinevus ilmnes Jõhvis, kus vegetatsiooniperioodi algus nihkus 16. aprillilt 22. aprillile, ning Jõgeval, kus algus nihkus 14. aprillilt 19. aprillile. Samuti oli algus hilisem Pärnus, Viljandis ja Kuusikul. Väiksemad muutused esinesid Lõuna-Eestis: Võrus jäi algus praktiliselt samasse aega ning Põlva jaama võrdluses Võruga oli uuema perioodi algus isegi veidi varasem. Seega ei viita jaamapõhine võrdlus Eestis ühtlasele kevadise vegetatsiooniperioodi varasemaks nihkumisele, vaid pigem piirkondlikult varieeruvale mustrile. See erineb Aasa (2001) esitatud üldisest ruumilisest mustrist, mille järgi rukki vegetatsiooni uuenemine ilmub paljuaastase keskmisena kõige varem Lõuna-Eestis ja liigub seejärel põhja suunas.

Vegetatsiooniperioodi lõpp on võrreldes algusega muutunud ühtlasemalt hilisemaks. Peaaegu kõigis võrreldud jaamades lõpeb vegetatsiooniperiood 2000–2025 perioodil hiljem kui 1949–1999 andmestikus. Suurim erinevus ilmnes Saaremaa piirkonnas, kus Karja jaama 30. oktoobri

lõppkuupäeva võrdlus Roomassaare 20. novembriga näitab vegetatsiooniperioodi lõpu nihkumist ligikaudu kolme nädala võrra hilisemaks. Kuna tegemist ei ole sama jaamaga, tuleb seda tõlgendada ettevaatlikult, kuid tulemus sobib üldise Lääne-Eesti ja saarte pikema sügisese vegetatsiooniperioodi mustriga. Mandri-Eestis jäi lõpu hiline mine enamasti mõne päeva piiresse. Näiteks Kuusikul nihkus lõpp 26. oktoobrilt 31. oktoobrile, Türi jaamas 28. oktoobrilt 31. oktoobrile ning Jõhvis 21. oktoobrilt 27. oktoobrile. Ruumiliselt on see kooskõlas Aasa (2001) joonisega 10b, kus vegetatsiooniperioodi katkemine toimub kõige varem Kirde-Eestis ja kõige hiljem Lääne-Eesti saartel.



Joonis 10. Rukki vegetatsiooni uuenemine ja vegetatsiooni katkemine Eestis: a) rukki vegetatsiooni uuenemine; b) rukki vegetatsiooni katkemine. Faaside keskmine ilmumine Eestis aastatel 1949–1999. Allikas Aasa (2001)



Joonis 11. Kasvuperioodi keskmine pikkus Eestis (1949–1999). Allikas: Aasa (2001)

Vegetatsiooniperioodi kestuse muutus sõltus sellest, kui palju nihkusid Aasa (2001) kaardilt tuletatud vegetatsiooni uuenemise ja katkemise kuupäevad võrreldes 2000–2025 jaamaandmetega (joonis 11). Kuna paljudes jaamades nihkus algus mõnevõrra hilisemaks, kuid lõpp samuti hilisemaks, ei pikenenud vegetatsiooniperiood kõigis piirkondades märgatavalt. Sama jaama või väga lähedase jaama põhjal tehtud võrdluses jäi kestuse muutus enamasti väikeseks. Türi, Kuusiku ja Valga jaamas pikenes vegetatsiooniperiood ligikaudu 2–3 päeva, Võrus umbes ühe päeva ning Tartus vähem kui ühe päeva. Jõhvis jäi kestus sisuliselt samaks, sest nii algus kui ka lõpp nihkusid peaaegu võrdselt hilisemaks.

## **4.2 Põllukultuuride ja maakondade võrdlus**

Rukis eristus suvinisust ja suviodrast varasema kevadise arengualguse ning pikema kasvuperioodi poolest. Suvikultuuride puhul jäi tärkamine üldiselt mai algusesse või keskpaika, kuid nende edasine areng ei olnud täiesti sarnane. Suvioder jõudis täisküpsuseni enamasti varem kui suvinisu, mistõttu oli selle kasvutsükkel kompaktsem. Suvinisu arenguperiood ulatus sagedamini augusti teise poolde, viidates mõnevõrra pikemale ja hilisemale arengudünaamikale võrreldes suviodruga.

Maakondade võrdluses ilmnis kõige järjekindlam ruumiline muster kevadistes faasides. Võrumaa eristus mitme kultuuri puhul varasema tärkamise või rukki puhul vegetatsiooni uuenemisega, mis on kooskõlas Lõuna-Eesti üldiselt varasema vegetatsiooniperioodi algusega. Samas ei tähendanud varasem arengualgus alati pikemat kasvuperioodi, sest suvikultuurid jõudsid Võrumaal sageli ka varem täisküpsuseni. Seetõttu avaldusid maakondlikud erinevused mitte ainult faaside alguskuupäevades, vaid kogu arengutsükli ajastuses. Järvamaa ja Lääne-Virumaa erinesid Võrumaast vähem kevadise alguse poolest, kuid nende vahelised erinevused tulid selgemalt esile kasvuperioodi kestuses ja hooajalistes NDVI maksimumväärtustes.

Aastevahelised erinevused näitavad, et fenoloogiliste faaside ajastus ei sõltunud üksnes maakondlikust paiknemisest, vaid ka konkreetse aasta kasvutingimustest. 2020. aasta paistis mitme kultuuri puhul silma pikema kasvuperioodi ja kõrgemate NDVI maksimumväärtustega, mis viitab soodsatele tingimustele taimkatte arenguks. 2021. aastal esines seevastu mitmel juhul varasem täisküpsus ja lühem kasvuperiood, mis osutab kiiremale arengutsüklile. 2023. aasta eristus madalamate NDVI maksimumväärtustega, eriti Võrumaal. Seda võib tõlgendada

võimaliku määrgina ebasoodsamatest kasvutingimustest või andmelünkade mõjust, kuid ilma täiendava ilmastikutegurite statistilise analüüsita ei saa nende mõju üheselt kinnitada.

### **4.3 Võrdlus varasemate fenoloogiliste andmetega**

NDVI aegridade põhjal määratud fenoloogilisi faase võrreldi Aasa (2001) koostatud Eesti agrofenoloogilise kalendri andmetega, et hinnata, kuidas uurimisperioodi 2020–2024 tulemused suhestuvad varasemate fenoloogiliste vaatlustega. Võrdlus näitas, et suvikultuuride puhul olid peamised fenofaasid valdavalt varasemad kui agrofenoloogilises kalendris esitatud andmetes.

Võrdluse tõlgendamisel tuleb arvestada, et Aasa (2001) andmed põhinevad maapealsetel agrofenoloogilistel vaatlustel, samas kui käesolevas töös on fenofaasid tuletatud NDVI aegridade põhjal. Seetõttu võrreldakse samanimeliste faaside ligikaudset ajastust, mitte täiesti identsel meetodil määratud kuupäevi.

#### **4.3.1 Suvinisu**

Suvinisu puhul oli võrdlus võimalik ainult Aasa (2001) esitatud Jõgeva vaatlusandmetega, kuna teiste uuritud maakondade kohta vastavad varasemad mõõtmised puudusid. Jõgeva suvinisu andmed põhinevad 1978–1995 tehtud fenoloogilistel vaatlustel. Seetõttu saab tulemusi käsitleda üldise võrdlusalusena, mitte otsese maakonnapõhise vastavusena.

Võrdlus näitas, et NDVI põhjal määratud suvinisu tärkamine toimus kõigis kolmes maakonnas Jõgeva varasemast keskmisest varem (tabel 1). Erinevus jäi ligikaudu 6–10 päeva vahele ning oli suurim Võrumaal. Loomise ajastuse erinevus oli väiksem: NDVI-põhised tulemused jäid Aasa (2001) vaatlusandmestikuga üldjoontes samasse perioodi, kuid olid siiski mõne päeva võrra varasemad. Täisküpsuse puhul ilmnis taas selgem nihe, sest see saabus uuritud maakondades ligikaudu 8–11 päeva varem kui Jõgeva varasemates vaatlustes.

Kuigi suvinisu peamised fenofaasid olid NDVI aegridade põhjal üldiselt varasemad, ei muutunud kasvuperioodi pikkus oluliselt. Tärkamise ja täisküpsuse vahe jäi uuritud maakondades ligikaudu samasse suurusjärku nagu Aasa (2001) andmetes. Seega viitab võrdlus pigem kogu arengutsükli varasemale nihkumisele kui kasvuperioodi selgele pikenedamisele või lühenemisele.

Tabel 1. NDVI-põhiselt määratud suvinisu fenoloogiliste faaside keskmiste kuupäevade võrdlus Aasa (2001) agrofenooloogilise kalendri andmetega. Erinevus päevades veerus negatiivne arv tähendab, et faas on saabunud aastatel 2020–2024 varem.

| Maakond       | Faas                    | NDVI-põhine<br>kuupäev / pikkus | Aasa (2001)<br>kuupäev / pikkus | Erinevus päevades |
|---------------|-------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------|
| Lääne-Virumaa | Tärkamine               | 12.05                           | 18.05                           | -6,3              |
| Lääne-Virumaa | Loomine                 | 02.07                           | 03.07                           | -1,1              |
| Lääne-Virumaa | Täisküpsus              | 21.08                           | 29.08                           | -7,2              |
| Lääne-Virumaa | Kasvuperioodi<br>pikkus | 101,7                           | 102,6                           | -0,9              |
| Järvamaa      | Tärkamine               | 12.05                           | 18.05                           | -6,1              |
| Järvamaa      | Loomine                 | 02.07                           | 03.07                           | -1,1              |
| Järvamaa      | Täisküpsus              | 20.08                           | 29.08                           | -8,8              |
| Järvamaa      | Kasvuperioodi<br>pikkus | 99,9                            | 102,6                           | -2,7              |
| Võrumaa       | Tärkamine               | 08.05                           | 18.05                           | -9,4              |
| Võrumaa       | Loomine                 | 30.06                           | 03.07                           | -3,3              |
| Võrumaa       | Täisküpsus              | 18.08                           | 29.08                           | -11,0             |
| Võrumaa       | Kasvuperioodi<br>pikkus | 101,0                           | 102,6                           | -1,6              |

#### 4.3.2 Suvioder

Suviodra puhul oli võimalik teha maakondlikult paremini võrreldav analüüs, sest Aasa (2001) agrofenooloogilises kalendris olid varasemad fenoloogiaandmed olemas kõigi kolme uuritud piirkonna kohta. Järvamaa võrdlusaluseks kasutati Türi vaatlusandmeid aastatest 1949–1995, Lääne-Virumaa puhul Väike-Maarja andmeid aastatest 1963–1985 ning Võrumaa puhul Võru andmeid aastatest 1950–1995.

Suviodra tulemused näitasid kõige ühtlasemat varasemaks nihkumist. Tärkamine toimus kõigis maakondades Aasa (2001) vaatlusandmetega võrreldes ligikaudu 11–13 päeva varem (tabel 2). Ka loomine saabus kõigis maakondades varem, erinevus oli ligikaudu 9–10 päeva. See viitab sellele, et muutus ei olnud seotud ainult ühe piirkonnaga, vaid avaldus kogu uuritud alal üsna sarnaselt.

Täisküpsuse puhul oli varasemaks nihkumine samuti selge, kuid maakondadevaheline erinevus oli suurem. Kõige tugevam nihe ilmnes Lääne-Virumaal, kus täisküpsus saabus ligikaudu 17 päeva varem. Järvamaal ja Võrumaal oli erinevus väiksem, kuid jäi siiski ligikaudu 10–13

päeva piiresse. Kasvuperioodi pikkuses aga ühesuunalist muutust ei ilmnenud: Järvamaal oli see Aasa (2001) vaatlustega võrreldes mõnevõrra pikem, Lääne-Virumaal ja Võrumaal pigem sarnane või veidi lühem. Seega olid suviadra fenofaasid tervikuna varasemad, kuid see ei tähendanud kõigis maakondades kasvuperioodi pikenemist.

Tabel 2. NDVI-põhiselt määratud suviadra fenoloogiliste faaside keskmiste kuupäevade võrdlus Aasa (2001) agrofenooloogilise kalendri andmetega. Erinevus päevades veerus negatiivne arv tähendab, et faas on saabunud aastatel 2020–2024 varem.

| Maakond           | Faas                    | NDVI-põhine<br>Kuupäev / pikkus | Aasa (2001)<br>kuupäev / pikkus | Erinevus päevades |
|-------------------|-------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------|
| Järvamaa          | Tärkamine               | 12.05                           | 22.05                           | -10,5             |
| Järvamaa          | Loomine                 | 28.06                           | 07.07                           | -8,6              |
| Järvamaa          | Täisküpsus              | 12.08                           | 21.08                           | -9,5              |
| Järvamaa          | Kasvuperioodi<br>pikkus | 92,0                            | 87,6                            | 4,4               |
| Lääne-<br>Virumaa | Tärkamine               | 12.05                           | 25.05                           | -13,1             |
| Lääne-<br>Virumaa | Loomine                 | 27.06                           | 07.07                           | -10,2             |
| Lääne-<br>Virumaa | Täisküpsus              | 08.08                           | 24.08                           | -16,8             |
| Lääne-<br>Virumaa | Kasvuperioodi<br>pikkus | 88,2                            | 90,8                            | -2,6              |
| Võrumaa           | Tärkamine               | 09.05                           | 21.05                           | -12,4             |
| Võrumaa           | Loomine                 | 26.06                           | 06.07                           | -9,8              |
| Võrumaa           | Täisküpsus              | 05.08                           | 19.08                           | -13,4             |
| Võrumaa           | Kasvuperioodi<br>pikkus | 88,5                            | 89,1                            | -0,6              |

### 4.3.3 Rukis

Rukki puhul kasutati võrdluseks Aasa (2001) esitatud Türi, Väike-Maarja ja Võru varasemaid fenoloogilisi vaatlusandmeid. Türi andmed põhinevad aastatel 1948–1996, Väike-Maarja andmed aastatel 1963–1976 ning Võru andmed aastatel 1950–1995 tehtud vaatlustel. Kuna rukis on talivili, võrreldi tärkamise asemel kevadise vegetatsiooni uuenemise faasi.

Kõige suurem erinevus ilmnis kevadise vegetatsiooni uuenemises, mis algas NDVI aegridade põhjal ligikaudu 18–24 päeva varem kui Aasa (2001) vaatlusandmetes (tabel 3). See oli kogu peatüki kõige selgem erinevus ning eristus tugevamalt kui suvikultuuride tärkamise varasemaks nihkumine. Suurim muutus ilmnis Lääne-Virumaal.

Rukki hilisemate faaside puhul ei olnud muster samasugune. Loomine oli Aasa (2001) vaatlustega võrreldes pigem sarnane või hilisem. Lääne-Virumaal oli erinevus väike, kuid Järvamaal ja eriti Võrumaal saabus loomine NDVI põhjal hiljem kui varasemates vaatlusandmetes. Ka täisküpsus nihkus kõigis maakondades hilisemaks, ligikaudu 5–9 päeva võrra.

Seetõttu erines rukis suvikultuuridest kõige selgemalt kasvuperioodi pikkuse poolest. Kui suvinisu ja suviadra puhul nihkusid fenofaasid valdavalt varasemaks ilma kasvuperioodi olulise pikenemiseta, siis rukki puhul algas kevadine areng märksa varem ja täisküpsus saabus hiljem. Selle tulemusena kujunes rukki kasvuperiood Aasa (2001) andmetega võrreldes ligikaudu 25–32 päeva pikemaks.

Tabel 3. NDVI-põhiselt määratud rukki fenoloogiliste faaside keskmiste kuupäevade võrdlus Aasa (2001) agrofenooloogilise kalendri andmetega. Erinevus päevades veerus negatiivne arv tähendab, et faas on saabunud aastatel 2020–2024 varem.

| Maakond           | Faas                       | NDVI-põhine<br>Kuupäev / pikkus | Aasa (2001)<br>kuupäev / pikkus | Erinevus päevades |
|-------------------|----------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------|
| Järvamaa          | Vegetatsiooni<br>uuenemine | 31.03                           | 18.04                           | -17,8             |
| Järvamaa          | Loomine                    | 11.06                           | 04.06                           | 6,4               |
| Järvamaa          | Täisküpsus                 | 24.08                           | 15.08                           | 8,3               |
| Järvamaa          | Kasvuperioodi<br>pikkus    | 145,6                           | 120,2                           | 25,4              |
| Lääne-<br>Virumaa | Vegetatsiooni<br>uuenemine | 27.03                           | 20.04                           | -23,5             |
| Lääne-<br>Virumaa | Loomine                    | 10.06                           | 09.06                           | 1,7               |
| Lääne-<br>Virumaa | Täisküpsus                 | 24.08                           | 19.08                           | 4,9               |
| Lääne-<br>Virumaa | Kasvuperioodi<br>pikkus    | 149,8                           | 120,5                           | 29,3              |
| Võrumaa           | Vegetatsiooni<br>uuenemine | 24.03                           | 15.04                           | -21,8             |
| Võrumaa           | Loomine                    | 20.06                           | 05.06                           | 15,3              |
| Võrumaa           | Täisküpsus                 | 22.08                           | 13.08                           | 9,1               |
| Võrumaa           | Kasvuperioodi<br>pikkus    | 150,4                           | 118,1                           | 32,3              |



## 4.4 Uurimisküsimused ja tulemused

Esimene uurimisküsimus käsitles meteoroloogilise vegetatsiooniperioodi alguse, lõpu ja kestuse ruumilist mustrit Eestis perioodil 2000–2025. Tulemused näitasid, et vegetatsiooniperioodi algus on üldiselt varasem Lõuna- ja Kesk-Eestis ning hilisem rannikualadel, samal ajal kui perioodi lõpp nihkub hilisemaks Lääne-Eestis ja saartel. Seetõttu on vegetatsiooniperiood pikem Lääne-Eesti rannikualadel ja saartel ning lühem Ida- ja Kirde-Eestis. Uuritud maakondade tõlgendamisel oli see oluline taust, sest Võrumaa varasem kevadine areng sobitus üldise Lõuna-Eestile iseloomuliku mustriga.

Teine uurimisküsimus keskendus NDVI aegridadest määratud suvinisu, suviadra ja rukki fenoloogiliste faaside varieerumisele Järva-, Lääne-Viru- ja Võru maakonnas aastatel 2020–2024. Kultuuride vahel ilmnis selge erinevus: rukis eristus suvikultuuridest varasema kevadise vegetatsiooni uuenemise ja pikema kasvuperioodi poolest, samal ajal kui suvinisu ja suviader alustasid arengut üldiselt mai alguses või keskpaigas. Maakondlikult ilmnis kõige järjekindlam erinevus kevadistes faasides, kus Võrumaa eristus varasema tärkamise või vegetatsiooni uuenemisega. Samas ei tähendanud varasem algus suvikultuuride puhul alati pikemat kasvuperioodi, sest varasem areng võis kaasneda ka varasema täisküpsusega.

Kolmas uurimisküsimus käsitles NDVI-põhiste fenoloogiliste kuupäevade erinevust Aasa (2001) agrofenoloogilise kalendri andmetest ning rukki kevadise vegetatsiooni uuenemise seost meteoroloogilise vegetatsiooniperioodi algusega. Suvikultuuride puhul olid NDVI-põhiselt määratud fenofaasid üldiselt varasemad kui varasemates agrofenoloogilistes vaatlusandmetes, kuid kasvuperioodi pikkus ei muutunud üheselt. Rukki puhul ilmnis kõige selgem erinevus kevadises vegetatsiooni uuenemises, mis algas NDVI aegridade põhjal varasematest vaatlusandmetest märgatavalt varem. See viitab, et rukki arengutulemuste tõlgendamisel on meteoroloogilise vegetatsiooniperioodi algus eriti oluline taust, kuid NDVI-põhiseid kuupäevi tuleb käsitleda kaugseirepõhiste hinnangutena, mitte otseste maapealsete vaatlustena.

## 4.5 Andmete ja metoodika piirangud

Käesoleva töö tulemuste tõlgendamisel tuleb arvestada mitme andmetest ja metoodikast tuleneva piiranguga. Esiteks põhines põllukultuuride fenoloogiliste faaside määramine NDVI aegridadel, mitte otsestel maapealsetel vaatlustel. Seetõttu ei väljenda saadud kuupäevad

fenoloogiliste faaside tegelikku saabumispäeva põllul, vaid taimkatte spektraalse signaali muutustest tuletatud kaugseirepõhiseid hinnanguid. See on eriti oluline Aasa (2001) agrofenoloogilise kalendri andmetega võrdlemisel, kuna varasemad andmed põhinevad maapealsetel vaatlustel, käesoleva töö tulemused aga kaugseireandmetel.

Tulemusi mõjutas kasutatud Landsati 8-päevaste NDVI komposiitide ajaline lahutusvõime. Kuigi fenoloogilised kuupäevad arvutati silutud ja interpoleeritud aegridade põhjal ühepäevase sammuga, ei tähenda see, et tegelik määramistäpsus oleks üks päev. Algandmed on 8-päevase ajasammuga ning pilvisus, atmosfääritingimused ja komposiitide koostamise viis võivad põhjustada olukorra, kus fenoloogiline muutus jääb kahe vaatluse vahele. Seetõttu tuleb saadud kuupäevi käsitleda ligikaudsete hinnangutena.

Uurimisperioodi aastad olid Keskkonnaagentuuri meteoroloogiliste aastaraamatute põhjal üldiselt päikesepaistelised, mistõttu esines kaugseireandmetes suhteliselt vähe andmelünki. See parandas analüüsi tulemuste kvaliteeti, kuid aastate lõikes esines siiski varieeruvust. Näiteks kujunes 2023. aastal tärkamise ja loomise perioodi vahele ligikaudu kolmenädalane andmelünk, mille tõttu vähenes fenoloogiliste faaside määramise täpsus.

Võru maakonnas oli võrreldes Järva ja Lääne-Viru maakonnaga märgatavalt vähem üle 10 ha suuruseid põlde. Seetõttu ei olnud uuritud põllukultuuridest kõige väiksema kasvupinnaga rukki puhul igal aastal analüüsi teostamiseks piisavalt andmeid. See piirab eriti Võrumaa rukkiga seotud tulemuste üldistatavust.

Varasemad Aasa (2001) fenoloogiaandmed pärinevad eri pikkusega vaatlusperioodidest ning mõnel juhul ei olnud võrdlus võimalik täpselt sama asukohaga. Lisaks erinevad võrreldavad andmed nii ajaliselt, ruumiliselt kui ka vaatlusmeetodilt. Seetõttu ei saa NDVI-põhiste kuupäevade ja Aasa (2001) vaatlusandmete erinevusi tõlgendada ainult kliimamuutuse või fenoloogilise nihkena. Osa erinevusest võib tuleneda ka kasutatud meetodikast, põllumajanduspraktikate muutumisest, sortide vahetumisest ja maakondliku keskmistamise mõjust.

## Kokkuvõte

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärk oli hinnata Landsati NDVI aegridade põhjal suvinisu, suviandra ja rukki fenoloogiliste faaside ajastust Järva-, Lääne-Viru- ja Võru maakonnas aastatel 2020–2024 ning võrrelda tulemusi meteoroloogilise vegetatsiooniperioodi ja varasemate agrofenooloogiliste vaatlusandmetega. Töös kasutati Keskkonnaagentuuri temperatuuriandmeid, PRIA põldude ruumiandmeid ja Landsati 8-päevaseid NDVI komposiite.

Meteoroloogilise vegetatsiooniperioodi analüüs näitas, et kasvuks sobiv periood algab Eestis varem Lõuna- ja sise-Eestis ning hiljem rannikualadel. Vegetatsiooniperioodi lõpp saabub varem Ida- ja Kirde-Eestis, samal ajal kui Lääne-Eestis ja saartel kestab see kauem.

NDVI aegridade põhjal eristus rukis suvinisust ja suviandrast varasema kevadise vegetatsiooniuuenemise ning pikema kasvuperioodi poolest. Suvikultuuride tärkamine jäi üldiselt mai algusesse või keskpaika, kuid rukki kevadine areng algas märtsi lõpus või aprillis. Maakondade võrdluses ilmnis kõige selgem ruumiline erinevus kevadistes faasides: Võrumaa eristus mitme kultuuri puhul varasema tärkamise või vegetatsiooni uuenemisega. Samas ei tähendanud varasem arengualgus suvikultuuride puhul alati pikemat kasvuperioodi.

Võrdlus Aasa (2001) agrofenooloogilise kalendri andmetega näitas, et suvinisu ja suviandra NDVI-põhiselt määratud fenofaasid olid üldiselt varasemad kui varasemates vaatlusandmetes, kuid kasvuperioodi pikkus ei muutunud üheselt. Rukki puhul ilmnis suurim erinevus kevadises vegetatsiooni uuenemises, mis algas varasematest vaatlusandmetest märgatavalt varem. Kuna rukki täisküpsus saabus samal ajal hiljem, kujunes selle kasvuperiood varasemate andmetega võrreldes pikemaks.

Tulemuste tõlgendamisel tuleb arvestada, et NDVI-põhised fenoloogilised kuupäevad on kaugseireandmetest tuletatud hinnangud. Neid võivad mõjutada Landsati 8-päevane ajaline lahutusvõime, andmelüngad, maakondade erinev põldude arv ning varasemate vaatlusandmete erinev meetodika. Töö näitas, et Landsati NDVI aegridu saab kasutada põllukultuuride sesoonse arengu ja piirkondlike erinevuste hindamiseks Eestis.

# **Detection of Changes in Crop Phenological Phases Using Remote Sensing Time Series of Vegetation Indices**

**Kaspar Tuulik**

## **Summary**

The aim of this bachelor's thesis was to assess the timing of phenological phases of spring wheat, spring barley and rye in Järva, Lääne-Viru and Võru counties during 2020–2024 using Landsat NDVI time series. The results were compared with the spatial pattern of the meteorological growing season and with earlier agri-phenological observation data. The study used daily mean air temperature data from the Estonian Environment Agency, PRIA field boundary data and 8-day Landsat NDVI composites processed in GEE. The meteorological growing season was determined using the +5 °C threshold and the condition of five consecutive days, while crop phenological phases were derived from smoothed NDVI time series.

The analysis showed that the beginning, end and length of the meteorological growing season vary clearly across Estonia. On average, the growing season starts earlier in southern and inland Estonia and later in coastal areas, where the influence of the sea delays spring warming. The growing season ends earlier in eastern and northeastern Estonia, whereas in western coastal areas and on the islands, conditions suitable for plant growth persist for a longer period. As a result, the growing season is longer in western Estonia and on the islands, and shorter in the eastern and north-eastern parts of the country. This spatial pattern provided an important background for interpreting the results from the study counties, particularly because the earlier spring development observed in Võru County corresponded to the broader pattern typical of southern Estonia.

The NDVI time series revealed clear differences between the studied crops. Rye differed from spring wheat and spring barley by its earlier spring vegetation renewal and longer growing period. The emergence of spring wheat and spring barley generally occurred in early or mid-May, while the spring development of rye started already in late March or April. Spring barley usually reaches full maturity earlier than spring wheat, indicating a more compact growth cycle. The most consistent regional difference appeared in the spring phases: Võru County stood out with earlier emergence or vegetation renewal in several crops. However, for spring crops, an

earlier start did not necessarily lead to a longer growing period, as earlier development was often accompanied by earlier full maturity.

Comparison with the agri-phenological calendar by Aasa (2001) showed that the NDVI-based phenological phases of spring crops generally occurred earlier than in the earlier ground-based observation data. In the case of spring wheat, the results mainly indicated an earlier shift of the whole development cycle rather than a clear change in the length of the growing period. For spring barley, the shift towards earlier phenological phases was more uniform and appeared in all three studied counties. Rye showed the largest difference in spring vegetation renewal, with renewal beginning considerably earlier in the NDVI-based results than in the earlier observation data. Since full maturity occurred later, the rye growing period was substantially longer compared with the earlier data.

The results should be interpreted with caution, because NDVI-based phenological dates are estimates derived from remote sensing data rather than direct field observations. They may be affected by the 8-day temporal resolution of Landsat composites, gaps in the time series, differences in the number of fields across counties, and methodological as well as temporal differences between the current analysis and earlier observation data. Nevertheless, the study showed that Landsat NDVI time series can be used to describe the seasonal development of field crops and to assess their spatial and temporal variation in Estonia.

## **Tänuavaldused**

Soovin tänada Valentina Sagrist asjaliku juhendamise ja kasulike nõuannete eest töö koostamisel. Samuti tänan Anto Aasat, kes edastas töö jaoks varasemad agrofenooloogilised andmed, mida kasutati NDVI-põhiste tulemuste võrdlemisel.

## Kasutatud kirjandus

- Aasa, A. (2001). Eesti agrofenooloogiline kalender. Teoses R. Ahas (toim.), *Eesti looduse kalender* (lk 139–163). Tartu Ülikooli Kirjastuse trükikoda.
- Ahas, R., & Aasa, A. (2000). The phenological calendar of Estonia and its correlation with mean air temperature. *International Journal of Biometeorology*, 44, 159–166. <https://doi.org/10.1007/s004840000069>
- Anderegg, J., Yu, K., Aasen, H., Walter, A., Liebisch, F., & Hund, A. (2020). Spectral vegetation indices to track senescence dynamics in diverse wheat germplasm. *Frontiers in Plant Science*, 10, Article 1749. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01749>
- Atzberger, C. (2013). Advances in remote sensing of agriculture: Context description, existing operational monitoring systems and major information needs. *Remote Sensing*, 5(2), 949–981. <https://doi.org/10.3390/rs5020949>
- Atzberger, C., & Eilers, P. H. C. (2011). A time series for monitoring vegetation activity and phenology at 10-daily time steps covering large parts of South America. *International Journal of Digital Earth*, 4(5), 365–386. <https://doi.org/10.1080/17538947.2010.505664>
- Google Earth Engine. (i.a.). *Landsat Collection 2 Tier 1 Level 2 8-Day NDVI Composite*. Google for Developers. Loetud 20.05.2026 aadressilt [https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/LANDSAT\\_COMPOSITES\\_C02\\_T1\\_L2\\_8DAY\\_NDVI](https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/LANDSAT_COMPOSITES_C02_T1_L2_8DAY_NDVI)
- Hird, J. N., & McDermid, G. J. (2009). Noise reduction of NDVI time series: An empirical comparison of selected techniques. *Remote Sensing of Environment*, 113(1), 248–258. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.09.003>
- Huang, S., Tang, L., Hupy, J. P., Wang, Y., & Shao, G. (2021). A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*, 32, 1–6. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1>
- Huete, A. R., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices (EVI and NDVI). *Remote Sensing of Environment*, 83(1–2), 195–213. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)

Jaagus, J. (2001). Kliimakalender. Teoses R. Ahas (toim.), *Eesti looduse kalender* (lk 9–25). Tartu Ülikooli Kirjastuse trükikoda.

Jaagus, J., & Ahas, R. (2000). Space–time variations of climate seasons and their correlation with the phenological development of nature in Estonia. *Climate Research*, 15, 207–219. <https://doi.org/10.3354/cr015207>

Keskkonnaagentuur. (i.a.). *Keskkonna ja ilma valdkonna andmeteenused*. Keskkonnaportaal. Loetud 13.12.2025 aadressilt <https://keskkonnaportaal.ee/et/avaandmed/keskkonna-ja-ilma-valdkonna-andmeteenused>

Keskkonnaagentuur. (2021). *Eesti meteoroloogia aastaraamat 2020*. <https://www.ilmateenistus.ee/ilmatarkus/publikatsioonid/aastaraamatud/>

Keskkonnaagentuur. (2022). *Eesti meteoroloogia aastaraamat 2021*. <https://www.ilmateenistus.ee/ilmatarkus/publikatsioonid/aastaraamatud/>

Keskkonnaagentuur. (2023). *Eesti meteoroloogia aastaraamat 2022*. <https://www.ilmateenistus.ee/ilmatarkus/publikatsioonid/aastaraamatud/>

Keskkonnaagentuur. (2024). *Eesti meteoroloogia aastaraamat 2023*. <https://www.ilmateenistus.ee/ilmatarkus/publikatsioonid/aastaraamatud/>

Keskkonnaagentuur. (2025). *Eesti meteoroloogia aastaraamat 2024*. <https://www.ilmateenistus.ee/ilmatarkus/publikatsioonid/aastaraamatud/>

Liu, L., Cao, R., Chen, J., Shen, M., Wang, S., Zhou, J., & He, B. (2022). Detecting crop phenology from vegetation index time-series data by improved shape model fitting in each phenological stage. *Remote Sensing of Environment*, 277, Article 113060. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113060>

Põllumajanduse Registrate ja Informatsiooni Amet. (i.a.). *PRIA avalikud ajaloolised ruumiandmed*. Loetud 29.03.2026 aadressilt [https://kls.pria.ee/geoserver/pria\\_avalik\\_ajalooline/wfs](https://kls.pria.ee/geoserver/pria_avalik_ajalooline/wfs)

Sakamoto, T., Yokozawa, M., Toritani, H., Shibayama, M., Ishitsuka, N., & Ohno, H. (2005). A crop phenology detection method using time-series MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 96(3–4), 366–374. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.03.008>



Snevajs, H., Charvat, K., Onckelet, V., Kvapil, J., Zadrazil, F., Kubickova, H., Seidlova, J., & Batrlova, I. (2022). Crop detection using time series of Sentinel-2 and Sentinel-1 and existing land parcel information systems. *Remote Sensing*, 14(5), Article 1095. <https://doi.org/10.3390/rs14051095>

Statistikaamet. (2026). *PM0281: Põllumajandusmaa ja -kultuurid maakonna järgi*. Statistika andmebaas. Loetud 06.04.2026 aadressilt <https://andmed.stat.ee/et/stat/PM0281>

Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8, 127–150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)

Verhegghen, A., Bontemps, S., & Defourny, P. (2014). A global NDVI and EVI reference data set for land-surface phenology using 13 years of daily SPOT-VEGETATION observations. *International Journal of Remote Sensing*, 35(7), 2440–2471. <https://doi.org/10.1080/01431161.2014.883105>

Zeng, L., Wardlow, B. D., Xiang, D., Hu, S., & Li, D. (2020). A review of vegetation phenological metrics extraction using time-series, multispectral satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 237, Article 111511. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111511>

## Lisa 1.

Kood kirjeldab, kuidas Keskkonnaagentuuri päevaste õhutemperatuuriandmete põhjal määrati meteoroloogilise vegetatsiooniperioodi algus, lõpp ja kestus valitud ilmajaamas. Vegetatsiooniperiood arvutati +5 °C temperatuuriläveni ja viie järjestikuse päeva tingimuse alusel.

```
import json
import urllib.request

import pandas as pd

# -----
# 1. Muudetavad parameetrid
# -----

# Ilmajaama nimi peab vastama Keskkonnaagentuuri andmestikus olevale nimele.
STATION_NAME = "Pärnu"

# Analüüsitav aastavahemik.
START_YEAR = 2000
END_YEAR = 2025

# Kliimaelemendi kood. DTA08 tähistab päeva keskmist õhutemperatuuri.
ELEMENT_CODE = "DTA08"

# Temperatuuripiir, mille järgi hinnatakse vegetatsiooniperioodi algust ja lõppu.
TEMPERATURE_LIMIT = 5.0

# Järjestikuste päevade arv, mille jooksul peab tingimus kehtima.
SEQUENCE_LENGTH = 5

# Varaseim kuu, millest alates hakatakse otsima vegetatsiooniperioodi lõppu.
EARLIEST_END_MONTH = 8

# Keskkonnaandmete API aadressid.
STATIONS_URL = "https://keskkonnaandmed.envir.ee/f_kliima_jaam_vaatlus"
DAILY_DATA_URL = "https://keskkonnaandmed.envir.ee/f_kliima_paev"

# -----
# 2. Andmete laadimise abifunktsioonid
# -----

def load_json(url: str):
    """Laeb etteantud URL-ilt JSON-vormingus andmed."""
    with urllib.request.urlopen(url) as response:
        return json.load(response)

def get_station_code(station_name: str) -> str:
    """
    Leiab ilmajaama koodi jaama nime põhjal.

    Jaama kood on vajalik päevaste kliimaandmete pärimiseks.
    Kui sisestatud jaama nime andmestikus ei ole, lõpetatakse töö veateatega.
    """
    stations = pd.json_normalize(load_json(STATIONS_URL))
    stations = stations[["jaam_kood", "jaam_nimi"]].drop_duplicates()

    selected_station = stations.loc[stations["jaam_nimi"] == station_name]

    if selected_station.empty:
        raise ValueError(f"Jaama nimega '{station_name}' ei leitud.")

    return selected_station.iloc[0]["jaam_kood"]

# -----
```

```

# 3. Päeva keskmise temperatuuri andmete laadimine
# -----

def load_daily_temperature_data(
    station_code: str,
    start_year: int,
    end_year: int,
    element_code: str,
) -> pd.DataFrame:
    """
    Laeb valitud ilmajaama päevased temperatuurandmed aastate kaupa.

    Iga aasta kohta tehakse eraldi päring. Saadud tabelid ühendatakse üheks
    andmestikuks ning kuupäev moodustatakse aasta, kuu ja päeva veergude põhjal.
    """
    yearly_tables = []

    for year in range(start_year, end_year + 1):
        url = (
            f"{DAILY_DATA_URL}"
            f"?aasta={year}"
            "&kuu=gte.1&kuu=lte.12"
            f"&element_kood={element_code}"
            f"&jaam_kood=in.({station_code})"
        )

        data = load_json(url)

        if not data:
            print(f"Hoiatus: {year}. aasta kohta ei leitud andmeid.")
            continue

        yearly_tables.append(pd.json_normalize(data))

    if not yearly_tables:
        raise RuntimeError(
            "Ühtegi aasta andmeid ei leitud. Kontrolli jaama nime ja aastavahemikku."
        )

    data = pd.concat(yearly_tables, ignore_index=True)

    # Veergude tüübid korrastatakse, et arvutused ja kuupäevade moodustamine toimiksid.
    data["aasta"] = data["aasta"].astype(int)
    data["kuu"] = data["kuu"].astype(int)
    data["paev"] = data["paev"].astype(int)
    data["vaartus"] = data["vaartus"].astype(float)

    data["date"] = pd.to_datetime(
        data["aasta"].astype(str)
        + "-"
        + data["kuu"].astype(str)
        + "-"
        + data["paev"].astype(str)
    )

    return data.sort_values("date").reset_index(drop=True)

# -----
# 4. Vegetatsiooniperioodi alguse ja lõpu määramine
# -----

def find_first_sequence(condition_values, sequence_length: int, start_index: int = 0):
    """
    Leiab esimese koha, kus tingimus kehtib järjest nõutud arvu päevi.

    Parameeter condition_values sisaldab väärtusi True/False kujul.
    Funktsioon tagastab jada esimese päeva indeksi. Kui sobivat jada ei leita,
    tagastatakse None.
    """
    last_possible_index = len(condition_values) - sequence_length + 1

    for index in range(start_index, last_possible_index):
        if condition_values[index:index + sequence_length].all():

```

```

        return index

    return None

def calculate_period_for_year(year_df: pd.DataFrame):
    """
    Arvutab ühe aasta vegetatsiooniperioodi alguse ja lõpu.

    Algas leitakse esimese viiepäevase sooja perioodi põhjal.
    Lõpp leitakse pärast seda esimese viiepäevase külma perioodi põhjal,
    kuid ainult alates parameetriga EARLIEST_END_MONTH määratud kuust.
    """
    year_df = year_df.sort_values("date").reset_index(drop=True)

    temperatures = year_df["vaartus"].to_numpy()
    warm_days = temperatures >= TEMPERATURE_LIMIT
    cold_days = temperatures < TEMPERATURE_LIMIT

    # Otsitakse esimene 5 järjestikuse sooja päeva pikkune periood.
    warm_start_index = find_first_sequence(warm_days, SEQUENCE_LENGTH)

    if warm_start_index is None:
        return None, None

    # Vegetatsiooniperioodi algus määratakse päevaks, mis järgneb soojale jadale.
    start_index = warm_start_index + SEQUENCE_LENGTH

    if start_index >= len(year_df):
        return None, None

    start_date = year_df.loc[start_index, "date"]

    # Otsitakse esimene 5 järjestikuse külma päeva pikkune periood.
    # Liiga varased külmad jupid jäetakse vahele, kui need esinevad enne lubatud kuud.
    cold_start_index = None
    for index in range(warm_start_index + 1, len(cold_days) - SEQUENCE_LENGTH + 1):
        if year_df.loc[index, "date"].month < EARLIEST_END_MONTH:
            continue

        if cold_days[index:index + SEQUENCE_LENGTH].all():
            cold_start_index = index
            break

    if cold_start_index is None:
        return start_date, None

    # Vegetatsiooniperioodi lõpp määratakse päevaks, mis järgneb külmale jadale.
    end_index = cold_start_index + SEQUENCE_LENGTH
    end_date = year_df.loc[end_index, "date"] if end_index < len(year_df) else None

    return start_date, end_date

def calculate_vegetation_periods(data: pd.DataFrame) -> dict:
    """Arvutab vegetatsiooniperioodi alguse ja lõpu kõigi aastate kohta."""
    vegetation_periods = {}

    for year, year_data in data.groupby(data["date"].dt.year):
        vegetation_periods[year] = calculate_period_for_year(year_data)

    return vegetation_periods

# -----
# 5. Vegetatsiooniperioodi tunnuse ja kokkuvõtte koostamine
# -----

def add_vegetation_flag(data: pd.DataFrame, vegetation_periods: dict) -> pd.DataFrame:
    """
    Lisab igale päevale tunnuse, kas see kuulub vegetatsiooniperioodi.

    Veerg veg_flag saab väärtuse 1, kui kuupäev jääb vastava aasta
    vegetatsiooniperioodi sisse. Muudel juhtudel on väärtus 0.
    """

```

```

"""
result = data.copy()
result["year"] = result["date"].dt.year
result["veg_flag"] = 0

for year, (start_date, end_date) in vegetation_periods.items():
    if start_date is None:
        continue

    period_mask = result["year"].eq(year)
    period_mask &= result["date"].ge(start_date)

    if end_date is not None:
        period_mask &= result["date"].le(end_date)

    result.loc[period_mask, "veg_flag"] = 1

return result

def make_summary_table(
    data: pd.DataFrame,
    vegetation_periods: dict,
    start_year: int,
    end_year: int,
) -> pd.DataFrame:
    """Koostab iga aasta kohta kokkuvõtliku tabeli."""
    summary_rows = []

    for year in range(start_year, end_year + 1):
        start_date, end_date = vegetation_periods.get(year, (None, None))

        # Kestus arvutatakse ainult siis, kui nii algus kui ka lõpp on teada.
        if start_date is not None and end_date is not None:
            year_mask = data["year"].eq(year) & data["veg_flag"].eq(1)
            length_days = int(year_mask.sum())
        else:
            length_days = 0

        summary_rows.append(
            {
                "aasta": year,
                "algus": start_date.strftime("%d.%m.%Y") if start_date is not None else None,
                "lopp": end_date.strftime("%d.%m.%Y") if end_date is not None else None,
                "pikkus_paevades": length_days,
            }
        )

    return pd.DataFrame(summary_rows)

# -----
# 6. Põhiprogramm
# -----

def main():
    """Käivitab andmete laadimise, arvutused ja kokkuvõtte kuvamise."""
    station_code = get_station_code(STATION_NAME)
    print(f"Valitud jaam: {STATION_NAME} (kood {station_code})")

    temperature_data = load_daily_temperature_data(
        station_code=station_code,
        start_year=START_YEAR,
        end_year=END_YEAR,
        element_code=ELEMENT_CODE,
    )

    vegetation_periods = calculate_vegetation_periods(temperature_data)
    temperature_data = add_vegetation_flag(temperature_data, vegetation_periods)

    summary = make_summary_table(
        data=temperature_data,
        vegetation_periods=vegetation_periods,
        start_year=START_YEAR,

```

```

        end_year=END_YEAR,
    )

    print("
Vegetatsiooniperioodide kokkuvõte:")
    print(summary)

    return summary, temperature_data

if __name__ == "__main__":
    main()

```

## Lisa 2.

GEE koodiga koostati Landsati 8-päevaste NDVI komposiitide põhjal põllupõhised NDVI aegridade tabelid valitud maakondade, aastate ja põllukultuuride kohta. Kood filtreerib sobivad NDVI väärtused, seob need põllupolügoonidega ning arvutab iga kuupäeva kohta põldude NDVI väärtused ja keskmise.

```

// -----
// 1. MUUDETAVAD PARAMEETRID
// -----

// Ruumiline lahutus meetrites
var scale = 30;

// Lubatud NDVI väärtuste vahemik. Väärtused väljaspool seda vahemikku eemaldatakse.
var minNdvi = 0.0;
var maxNdvi = 1.0;

// Analüüsitava ajavahemik aasta sees.
var startMonth = 3;
var startDay = 1;
var endMonth = 11;
var endDay = 1;

// Maksimaalne põldude arv maakonna ja aasta kohta.
var fieldLimit = 200;

// Analüüsitavad aastad.
var years = [2020];

// Analüüsitava põllukultuur. Kui kultuur muutub, tuleb muuta ka cropByYear sisu.
var cropName = 'sn10';

// Maakonnad.
var counties = [
    {name: 'jarva', fc: jarva},
    {name: 'voru', fc: voru},
    {name: 'laane_viru', fc: laane_viru}
];

// Põllukultuuri kihid aastate kaupa
var cropByYear = {
    2020: sn10_2020,
    2021: sn10_2021,
    2022: sn10_2022,
    2023: sn10_2023,
    2024: sn10_2024
};

// -----
// 2. ANDMEALLIKAS JA NDVI VÄÄRTUSTE FILTREERIMINE
// -----

// Landsati 8-päevased NDVI komposiidid.
var ndviCollection = ee.ImageCollection('LANDSAT/COMPOSITES/C02/T1_L2_8DAY_NDVI')
    .select('NDVI');

```

```

// Eemaldab NDVI väärtused, mis jäävad määratud vahemikust välja.
function maskNdviRange(image) {
  var ndvi = image.select('NDVI');
  var validMask = ndvi.gte(minNdvi).and(ndvi.lte(maxNdvi));

  return ndvi
    .updateMask(validMask)
    .copyProperties(image, ['system:time_start']);
}

// -----
// 3. PÕLDE JA NDVI TABELI KOOSTAMINE
// -----

// Valib maakonna piiresse jäävad põllud ja ühtlustab pollu_id tunnuse tekstiks.
function prepareFields(cropFc, countyFc) {
  return cropFc
    .filterBounds(countyFc.geometry())
    .limit(fieldLimit)
    .map(function(feature) {
      return feature.set('pollu_id', ee.String(feature.get('pollu_id')));
    })
    .distinct('pollu_id');
}

// Teisendab ühe NDVI pildi üheks tabelireaks.
// Iga pollu_id muutub eraldi veeruks ning lisatakse põldude keskmine NDVI.
function imageToWideRow(image, fields) {
  var stats = image.reduceRegions({
    collection: fields,
    reducer: ee.Reducer.mean(),
    scale: scale
  });

  // Alles jäetakse ainult need põllud, millel on antud kuupäeval NDVI väärtus olemas.
  stats = stats.filter(ee.Filter.notNull(['mean']));

  var fieldIds = ee.List(stats.aggregate_array('pollu_id'))
    .map(function(id) {
      return ee.String(id);
    });

  var ndviValues = ee.List(stats.aggregate_array('mean'))
    .map(function(value) {
      return ee.Number(value).format('%.3f');
    });

  var row = ee.Dictionary.fromLists(fieldIds, ndviValues);
  var countyAverage = stats.aggregate_mean('mean');
  var hasValues = stats.size().gt(0);

  // Kui kuupäeval on vähemalt üks kehtiv väärtus, lisatakse maakonna keskmine.
  row = ee.Dictionary(ee.Algorithms.If(
    hasValues,
    row.set('average', ee.Number(countyAverage).format('%.3f')),
    row
  ));

  // Kuupäev lisatakse tabeli esimese tunnuseks.
  row = row.set('date', ee.Date(image.get('system:time_start')).format('YYYY-MM-dd'));

  return ee.Feature(null, row);
}

// Koostab ühe maakonna, kultuuri ja aasta NDVI aegridade tabeli.
function makeNdviTable(countyFc, cropFc, year) {
  var startDate = ee.Date.fromYMD(year, startMonth, startDay);
  var endDate = ee.Date.fromYMD(year, endMonth, endDay);

  var fields = prepareFields(cropFc, countyFc);

  var filteredNdvi = ndviCollection
    .filterDate(startDate, endDate)
    .filterBounds(countyFc.geometry())

```

```

        .map(maskNdviRange);

    return ee.FeatureCollection(filteredNdvi.map(function(image) {
        return imageToWideRow(image, fields);
    }));
}

// -----
// 4. KÄIVITAMINE
// -----

// Tulemused kuvatakse GEE konsoolis
years.forEach(function(year) {
    counties.forEach(function(county) {
        var cropFc = cropByYear[year];

        if (cropFc !== undefined) {
            var ndviTable = makeNdviTable(county.fc, cropFc, year);

            print(
                'NDVI tabel:',
                'kultuur =', cropName,
                'maakond =', county.name,
                'aasta =', year,
                ndviTable
            );
        } else {
            print('Puudub põllukultuuri kiht aasta kohta:', year);
        }
    });
});
});

```

## Lisa 3.

Kood näitab, kuidas Google Earth Engineist saadud NDVI aegridadest määrati põllukultuuride fenoloogilised põhipunktid. Selleks korrastati NDVI vaatlused, siluti aegrida Whittakeri meetodiga, interpoleeriti igapäevane NDVI kõver ning arvutati 10% amplituudimeetodil SOS ja EOS.

```

from pathlib import Path
from typing import Dict, List, Tuple

import numpy as np
import pandas as pd
from scipy import sparse
from scipy.interpolate import interp1d
from scipy.sparse.linalg import solve

# -----
# 1. Muudetavad parameetrid
# -----

# Kaust, kus asuvad Google Earth Engineist eksporditud CSV-failid.
INPUT_DIR = Path(r"C:/Users/padu_/baka/GEE/suvioder/proov")

# CSV-faili põhilised veerud.
DATE_COL = "system:time_start"
AVERAGE_COL = "average"

# Whittakeri silumise parameetrid.
LAMBDA_VALUE = 100          # suurem väärtus annab siledama NDVI kõvera
SMOOTHING_ORDER = 2         # teist järku erinevuskaristus
WEIGHT_MODE = "count_std"   # võimalikud väärtused: "count_std", "count", "equal"

# Fenoloogiliste punktide leidmise parameetrid.
THRESHOLD_FRACTION = 0.10   # SOS ja EOS määratakse 10% amplituudi meetodil
SPRING_MIN_START_DOY = 90   # kevadist miinimumi otsitakse alates aasta 90. päevast
PEAK_START_DOY = 90         # maksimumi otsimise algus DOY skaalal
PEAK_END_DOY = 270          # maksimumi otsimise lõpp DOY skaalal

```



```
AUTUMN_MIN_END_DOY = 270      # sügisest miinimumi otsitakse kuni aasta 270. päevani
```

```
# -----  
# 2. Kuupäevade töötlemine  
# -----
```

```
def parse_date_series(series: pd.Series) -> pd.Series:  
    """ Muudab kuupäevad Pandasele arusaadavasse vormingusse.  
    """  
    dates = pd.to_datetime(series, errors="coerce")  
    if dates.notna().sum() > 0:  
        return dates  
  
    numeric_dates = pd.to_numeric(series, errors="coerce")  
    valid_dates = numeric_dates.dropna()  
    if valid_dates.empty:  
        return pd.to_datetime(series, errors="coerce")  
  
    median_value = valid_dates.median()  
    if median_value > 1e12:  
        return pd.to_datetime(numeric_dates, unit="ms", errors="coerce")  
    if median_value > 1e9:  
        return pd.to_datetime(numeric_dates, unit="s", errors="coerce")  
  
    return pd.to_datetime(series, errors="coerce")
```

```
# -----  
# 3. CSV-faili lugemine ja NDVI väärtuste korrastamine  
# -----
```

```
def load_ndvi_points_csv(  
    file_path: Path,  
    date_col: str = DATE_COL,  
    average_col: str = AVERAGE_COL,  
) -> Tuple[pd.DataFrame, List[str]]:  
    """Loeb CSV-faili ja teisendab põldude NDVI väärtused long-formaati.  
  
    GEE väljundis on iga põld eraldi veerus. Analüüsiks viiakse need  
    väärtused ühte veergu, nii et iga rida tähistab ühte NDVI vaatlust.  
    Keskmise veergu ei kasutata silumisel, sest eesmärk on arvestada kõiki  
    üksikuid põlluvaatlusi.  
    """  
    df = pd.read_csv(file_path)  
  
    if date_col not in df.columns:  
        raise ValueError(f"Failis puudub kuupäevaveerg: {date_col}")  
  
    df = df.copy()  
    df[date_col] = parse_date_series(df[date_col])  
    df = df.dropna(subset=[date_col]).sort_values(date_col).reset_index(drop=True)  
  
    field_cols = [  
        col for col in df.columns  
        if col not in [date_col, average_col]  
        and not str(col).startswith("Unnamed")  
    ]  
  
    if not field_cols:  
        raise ValueError("CSV-failist ei leitud ühtegi põlluveergu.")  
  
    for col in field_cols:  
        df[col] = pd.to_numeric(df[col], errors="coerce")  
  
    long_df = (  
        df.melt(  
            id_vars=[date_col],  
            value_vars=field_cols,  
            var_name="field_id",  
            value_name="ndvi",  
        )  
        .dropna(subset=[date_col, "ndvi"])  
        .sort_values(date_col)
```

```

        .reset_index(drop=True)
    )

    if long_df.empty:
        raise ValueError("Pärast puuduvate väärtuste eemaldamist ei jäänud alles ühtegi NDVI
vaatlust.")

    return long_df, field_cols

# -----
# 4. Whittakeri silumine
# -----

def whittaker_smooth_all_points(
    long_df: pd.DataFrame,
    date_col: str = DATE_COL,
    value_col: str = "ndvi",
    lmbd: float = LAMBDA_VALUE,
    smoothing_order: int = SMOOTHING_ORDER,
    weight_mode: str = WEIGHT_MODE,
) -> pd.DataFrame:
    """Silub NDVI aegrida Whittakeri meetodiga.

    Silumisel kasutatakse kõiki üksikuid põlluvaatlusi. Tulemuseks on üks
    silutud NDVI väärtus iga unikaalse kuupäeva kohta.
    """
    df = long_df.dropna(subset=[date_col, value_col]).copy()
    df[date_col] = pd.to_datetime(df[date_col])
    df = df.sort_values(date_col).reset_index(drop=True)

    unique_dates = pd.Index(sorted(df[date_col].drop_duplicates()))
    n_dates = len(unique_dates)
    n_observations = len(df)

    if n_dates < 3:
        raise ValueError("Whittakeri silumiseks on liiga vähe unikaalseid kuupäevi.")

    # Iga üksik NDVI vaatlus seotakse vastava kuupäeva indeksiga.
    date_to_index = {date: index for index, date in enumerate(unique_dates)}
    date_index = df[date_col].map(date_to_index).to_numpy()
    y = df[value_col].to_numpy(dtype=float)

    # Kuupäevapõhine statistika on vajalik kaalude määramiseks ja tulemuste kontrolliks.
    date_stats = (
        df.groupby(date_col)
        .agg(
            count=(value_col, "count"),
            std_ndvi=(value_col, "std"),
            mean_ndvi=(value_col, "mean"),
            median_ndvi=(value_col, "median"),
            min_ndvi=(value_col, "min"),
            max_ndvi=(value_col, "max"),
        )
        .reset_index()
        .sort_values(date_col)
        .reset_index(drop=True)
    )
    date_stats["std_ndvi"] = date_stats["std_ndvi"].fillna(0)

    count_map = dict(zip(date_stats[date_col], date_stats["count"]))
    std_map = dict(zip(date_stats[date_col], date_stats["std_ndvi"]))

    if weight_mode == "count":
        # Kõik üksikvaatlused saavad võrdse kaalu.
        per_date_weight = np.ones(n_dates, dtype=float)
    elif weight_mode == "count_std":
        # Väiksema kuupäevapõhise hajuvusega vaatlused saavad suurema kaalu.
        per_date_weight = np.array(
            [1.0 / (1.0 + std_map[date]) for date in unique_dates],
            dtype=float,
        )
    elif weight_mode == "equal":
        # Iga kuupäeva kogukaal on sama, sõltumata vaatluste arvust.

```

```

        per_date_weight = np.array(
            [1.0 / count_map[date] for date in unique_dates],
            dtype=float,
        )
    else:
        raise ValueError("WEIGHT_MODE peab olema 'count_std', 'count' või 'equal'.")

    observation_weights = per_date_weight[date_index]

    # Disainmaatriks X näitab, millisele kuupäevale iga vaatlus kuulub.
    x_matrix = sparse.coo_matrix(
        (np.ones(n_observations), (np.arange(n_observations), date_index)),
        shape=(n_observations, n_dates),
    ).tocsr()

    weight_matrix = sparse.diags(
        observation_weights,
        0,
        shape=(n_observations, n_observations),
        format="csc",
    )

    # Erinevusmaatriks määrab, kui tugevalt kõvera järske muutusi karistatakse.
    identity_matrix = sparse.eye(n_dates, format="csc")
    difference_matrix = identity_matrix[1:] - identity_matrix[:-1]
    for _ in range(smoothing_order - 1):
        difference_matrix = difference_matrix[1:] - difference_matrix[:-1]

    left_side = x_matrix.T @ weight_matrix @ x_matrix + lmdb * (difference_matrix.T @
difference_matrix)
    right_side = x_matrix.T @ weight_matrix @ y

    smoothed_values = spsolve(left_side, right_side)

    result = date_stats.copy()
    result["smoothed_ndvi"] = smoothed_values
    return result

# -----
# 5. Igapäevase silutud kõvera koostamine
# -----

def make_smooth_daily_curve(
    stats: pd.DataFrame,
    date_col: str = DATE_COL,
    value_col: str = "smoothed_ndvi",
) -> pd.DataFrame:
    """Koostab silutud NDVI väärtustest igapäevase aegridade.

    Fenoloogilised kuupäevad leitakse igapäevaselt interpoleeritud kõveralt,
    mitte ainult satelliitpiltide algsetelt kuupäevadelt.
    """
    curve = stats[[date_col, value_col]].copy()
    curve[date_col] = pd.to_datetime(curve[date_col])
    curve = curve.dropna(subset=[date_col, value_col])
    curve =
curve.sort_values(date_col).drop_duplicates(subset=[date_col]).reset_index(drop=True)

    if len(curve) < 2:
        raise ValueError("Interpoleerimiseks on vaja vähemalt kahte kuupäeva.")

    x = curve[date_col].dt.dayofyear.to_numpy(dtype=float)
    y = curve[value_col].to_numpy(dtype=float)
    x_daily = np.arange(x.min(), x.max() + 1, 1, dtype=float)

    interpolation_kind = "cubic" if len(curve) >= 4 else "linear"
    interpolation_function = interp1d(
        x,
        y,
        kind=interpolation_kind,
        bounds_error=False,
        fill_value="extrapolate",
    )

```

```

y_daily = interpolation_function(x_daily)
year = int(curve[date_col].dt.year.mode().iloc[0])
dates_daily = pd.to_datetime(year * 1000 + x_daily.astype(int), format="%Y%j")

return pd.DataFrame({date_col: dates_daily, value_col: y_daily})

# -----
# 6. Fenoloogiliste põhipunktide leidmine
# -----

def detect_phenology(
    stats: pd.DataFrame,
    date_col: str = DATE_COL,
    smoothed_col: str = "smoothed_ndvi",
) -> Dict[str, object]:
    """Leiab NDVI kõveralt fenoloogilised põhipunktid.

    Arvutatakse kevadine minimum, maksimaalne NDVI, sügisene minimum,
    kevadine ja sügisene amplituud ning 10% meetodil SOS ja EOS.
    """
    daily = make_smooth_daily_curve(
        stats=stats,
        date_col=date_col,
        value_col=smoothed_col,
    )

    dates = pd.to_datetime(daily[date_col])
    values = daily[smoothed_col].to_numpy(dtype=float)
    day_of_year = dates.dt.dayofyear.to_numpy()

    if len(values) < 3:
        raise ValueError("Fenoloogiliste punktide leidmiseks on liiga vähe ajapunkte.")

    # Maksimaalne NDVI leitakse kasvuperioodi seisukohalt mõistlikust DOY vahemikust.
    peak_mask = (day_of_year >= PEAK_START_DOY) & (day_of_year <= PEAK_END_DOY)
    if not np.any(peak_mask):
        raise ValueError("Seasonal maximumi jaoks ei leitud punkte DOY 90-270 vahemikus.")

    peak_candidates = np.where(peak_mask)[0]
    peak_index = peak_candidates[int(np.nanargmax(values[peak_mask]))]
    peak_value = values[peak_index]

    # Kevadine miinimum otsitakse enne maksimumi ja alates määratud DOY piirist.
    spring_mask = (np.arange(len(values)) <= peak_index) & (day_of_year >=
    SPRING_MIN_START_DOY)
    if not np.any(spring_mask):
        raise ValueError("Kevadise miinimumi leidmiseks ei olnud sobivaid punkte.")

    spring_candidates = np.where(spring_mask)[0]
    spring_min_index = spring_candidates[int(np.nanargmin(values[spring_mask]))]
    spring_min_value = values[spring_min_index]

    # Sügisene miinimum otsitakse pärast maksimumi ja kuni määratud DOY piirini.
    autumn_mask = (np.arange(len(values)) > peak_index) & (day_of_year <= AUTUMN_MIN_END_DOY)
    if np.any(autumn_mask):
        autumn_candidates = np.where(autumn_mask)[0]
        autumn_min_index = autumn_candidates[int(np.nanargmin(values[autumn_mask]))]
        autumn_min_value = values[autumn_min_index]
    else:
        autumn_min_index = None
        autumn_min_value = np.nan

    spring_range = peak_value - spring_min_value
    if spring_range <= 0:
        raise ValueError("Kevadine NDVI amplituud ei ole positiivne, mistõttu SOS ei ole
    leitav.")

    if autumn_min_index is not None:
        autumn_range = peak_value - autumn_min_value
        if autumn_range <= 0:
            autumn_range = np.nan
    else:

```

```

autumn_range = np.nan

# SOS ja EOS lävendid arvutatakse 10% amplituudi meetodil.
sos_threshold = spring_min_value + THRESHOLD_FRACTION * spring_range
eos_threshold = (
    autumn_min_value + THRESHOLD_FRACTION * autumn_range
    if autumn_min_index is not None and pd.notna(autumn_range)
    else np.nan
)

return {
    "spring_min_date": dates.iloc[spring_min_index],
    "spring_min_doy": int(dates.iloc[spring_min_index].dayofyear),
    "spring_min_ndvi": float(spring_min_value),

    "seasonal_max_date": dates.iloc[peak_index],
    "seasonal_max_doy": int(dates.iloc[peak_index].dayofyear),
    "seasonal_max_ndvi": float(peak_value),

    "autumn_min_date": dates.iloc[autumn_min_index] if autumn_min_index is not None else
pd.NaT,
    "autumn_min_doy": int(dates.iloc[autumn_min_index].dayofyear) if autumn_min_index is
not None else np.nan,
    "autumn_min_ndvi": float(autumn_min_value) if pd.notna(autumn_min_value) else np.nan,

    "spring_ndvi_range": float(spring_range),
    "autumn_ndvi_range": float(autumn_range) if pd.notna(autumn_range) else np.nan,

    "sos_threshold": float(sos_threshold),
    "eos_threshold": float(eos_threshold) if pd.notna(eos_threshold) else np.nan,
}

# -----
# 7. SOS ja EOS DOY leidmine
# -----

def find_transition_doy(
    daily: pd.DataFrame,
    start_date: pd.Timestamp,
    end_date: pd.Timestamp,
    threshold: float,
    direction: str,
    date_col: str = DATE_COL,
    value_col: str = "smoothed_ndvi",
) -> float:
    """Leiab DOY väärtuse etteantud lävendi põhjal"""
    if pd.isna(start_date) or pd.isna(end_date) or pd.isna(threshold):
        return np.nan

    segment = daily[
        (daily[date_col] >= start_date) &
        (daily[date_col] <= end_date)
    ].reset_index(drop=True)

    if len(segment) < 2:
        return np.nan

    for index in range(1, len(segment)):
        previous_value = segment.loc[index - 1, value_col]
        current_value = segment.loc[index, value_col]

        if direction == "rising":
            crosses = previous_value < threshold <= current_value
        elif direction == "falling":
            crosses = previous_value > threshold >= current_value
        else:
            raise ValueError("direction peab olema 'rising' või 'falling'.")

        if crosses:
            previous_doy = segment.loc[index - 1, "doy"]
            current_doy = segment.loc[index, "doy"]

```

```

        if current_value == previous_value:
            fraction = 0
        else:
            fraction = (threshold - previous_value) / (current_value - previous_value)

        return float(previous_doy + (current_doy - previous_doy) * fraction)

    return np.nan

def get_transition_doy(
    stats: pd.DataFrame,
    phenology: Dict[str, object],
    date_col: str = DATE_COL,
    smoothed_col: str = "smoothed_ndvi",
) -> Tuple[float, float]:
    """Arvutab SOS ja EOS DOY väärtused igapäevaselt silutud kõveralt."""
    daily = make_smooth_daily_curve(
        stats=stats,
        date_col=date_col,
        value_col=smoothed_col,
    ).copy()

    daily[date_col] = pd.to_datetime(daily[date_col])
    daily["doy"] = daily[date_col].dt.dayofyear

    sos_doy = find_transition_doy(
        daily=daily,
        start_date=pd.to_datetime(phenology["spring_min_date"]),
        end_date=pd.to_datetime(phenology["seasonal_max_date"]),
        threshold=phenology["sos_threshold"],
        direction="rising",
        date_col=date_col,
        value_col=smoothed_col,
    )

    eos_doy = find_transition_doy(
        daily=daily,
        start_date=pd.to_datetime(phenology["seasonal_max_date"]),
        end_date=pd.to_datetime(phenology["autumn_min_date"]),
        threshold=phenology["eos_threshold"],
        direction="falling",
        date_col=date_col,
        value_col=smoothed_col,
    )

    return sos_doy, eos_doy

# -----
# 8. Failide töötlemine ja tulemuste koondamine
# -----

def analyse_csv_file(file_path: Path) -> Dict[str, object]:
    """Töötleb ühe CSV-faili ja tagastab fenoloogilised tulemused."""
    long_df, field_cols = load_ndvi_points_csv(file_path)

    smoothed_stats = whittaker_smooth_all_points(
        long_df=long_df,
        date_col=DATE_COL,
        value_col="ndvi",
        lmbd=LAMBDA_VALUE,
        smoothing_order=SMOOTHING_ORDER,
        weight_mode=WEIGHT_MODE,
    )

    phenology = detect_phenology(
        stats=smoothed_stats,
        date_col=DATE_COL,
        smoothed_col="smoothed_ndvi",
    )

    sos_doy, eos_doy = get_transition_doy(
        stats=smoothed_stats,

```

```

        phenology=phenology,
        date_col=DATE_COL,
        smoothed_col="smoothed_ndvi",
    )

    return {
        "file_name": file_path.name,
        "status": "OK",
        "lambda": LAMBDA_VALUE,
        "weight_mode": WEIGHT_MODE,
        "n_dates": len(smoothed_stats),
        "n_total_points": len(long_df),
        "n_fields": len(field_cols),
        **phenology,
        "sos_doy": sos_doy,
        "eos_doy": eos_doy,
    }

def analyse_folder(input_dir: Path = INPUT_DIR) -> pd.DataFrame:
    """Tõõtleb kõik kaustas olevad CSV-failid ja koondab tulemused tabelisse."""
    csv_files = sorted(input_dir.glob("*.csv"))
    if not csv_files:
        raise FileNotFoundError(f"Kaustast ei leitud CSV-faile: {input_dir}")

    results = []
    for file_path in csv_files:
        try:
            results.append(analyse_csv_file(file_path))
        except Exception as error:
            results.append({
                "file_name": file_path.name,
                "status": "ERROR",
                "lambda": LAMBDA_VALUE,
                "weight_mode": WEIGHT_MODE,
                "error_message": str(error),
            })

    return pd.DataFrame(results).sort_values(["status", "file_name"]).reset_index(drop=True)

# -----
# 9. Analüüsi käivitamine
# -----

if __name__ == "__main__":
    results_df = analyse_folder(INPUT_DIR)
    print(results_df)

```

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks**

Mina, Kaspar Tuulik,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose **Taimkatteindeksitel põhinev põllukultuuride fenoloogiliste faaside muutuse tuvastamine pikaajaliste kaugseire aegridade abil**, mille juhendaja on Valentina Sagris,

reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace 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.

*Kaspar Tuulik*

21.05.2026