

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

Geoinformaatika ja kartograafia magistritöö (30 EAP)

**Sõja mõju Ukraina põllumajandusele optilise ja radarkaugseire
vahenditele tuginedes**

Mariana Rohtsalu

Juhendajad:
Prof. Raivo Aunap
Prof. Tauri Tampuu

Tartu 2024

Annotatsioon

Sõja mõju Ukraina põllumajandusele optilise ja radarkaugseire vahenditele tuginedes

Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli uurida Vene–Ukraina sõja mõju Ukraina põllumajandusele optilise ja radarkaugseire vahenditele tuginedes. Eesmärgi täitmiseks tuvastati Sentinel-1 ja Sentinel-2 aegridade alusel muutused kündmises ja saagikoristuses, mis on Ukrainas aset leidnud sõja ajal võrreldes sõjale eelnenud perioodiga. Magistritöö tulemused näitavad, et mida kaugemal aktiivsest rindest, seda vähem esines sõjast tingitud häiringuid. Rinde läheduses oli kõige rohkem häiritud taliviljade koristus ning osaliselt ka suviviljade koristus. Seevastu tali- ja suviviljade kündmistepuhul ei ilmnunud sõjast tingitud olulisi muutusi.

Märksõnad: Ukraina, kaugseire, põllumajandus, tehisavaradar, optiline satelliit

CERCS kood: T181 – Kaugseire

Abstract

The impact of the war on Ukrainian agriculture in terms of optical and radar remote sensing

The aim of the thesis was to study the impact of the Russian-Ukrainian war on Ukrainian agriculture based on optical and radar remote sensing tools. To fulfill the objective, changes in tillage and harvesting that have occurred in Ukraine during the war compared to the pre-war period were identified based on Sentinel-1 and Sentinel-2 time series. The results of the thesis show that the farther away from the active front, the less war-related disturbances occur. In the vicinity of the front, the harvesting of winter crops is the most disturbed, and partly also the harvesting of summer crops. On the other hand, there were no significant differences due to the war in the tillage of winter and summer crops.

Keywords: Ukraine, remote sensing, agriculture, Synthetic Aperture Radar, Optical Satellite

CERCS code: T181 – Remote sensing

Sisukord

Lühendite loetelu.....	5
Sissejuhatus.....	6
1. Teoreetiline ülevaade.....	8
1.1. Ukraina põllumajandus	8
1.1.1. Põllumajandustoodangu eksport	10
1.2. Vene-Ukraina sõda.....	11
1.2.1. Sõja mõju Ukraina põllumajandusele	12
1.2.2. Põllumajanduslike kahjustuste hindamine kaugseire meetodite abil.....	13
1.3. Satelliitidelt pärinevad andmed.....	15
1.3.1. Sentinel-1 andmestik.....	15
1.3.2. Sentinel-2 andmestik.....	18
1.3.3. Vegetatsiooniindeksid.....	19
1.3.4. Aegread kündmise ja saagikoristuse tuvastamiseks.....	21
2. Andmed ja metoodika.....	23
2.1. Uurimisala.....	23
2.2. Andmed.....	24
2.2.1. Põldude valik.....	24
2.2.2. Satelliidiandmete eeltöötlus	25
2.2.3. Aegridade sildistamine.....	27
2.2.4. Sõja mõju põlluharimissündmuste sagedusele	29
2.2.5. Sõjast tingitud põlluharimissündmuste sesoonsuse muutused.....	29
3. Tulemused.....	31
3.1. Põlluharimissündmuste arv	31
3.2. Rindejoone kauguse ja põlluharimissündmuste arvu vaheline seos	32
3.3. Taliviljade eraldamine suviviljadest	35
3.4. Põlluharimissündmuste sesoonsuse muutused.....	36
3.5. Põlluharimissündmuste sesoonsuse muutused aegridade visuaalsel võrdlusel.....	38
3.6. Sööti jäetud põldude osakaalu muutus.....	40
Arutelu	41
Kokkuvõte.....	43
Summary.....	44
Kasutatud kirjandus.....	47

Lisa 1.....	56
Lisa 2.....	57
Lisa 3.....	58
Lisa 4.....	59
Lisa 5.....	60
Lisa 6.....	61
Lisa 7.....	62

Lühendite loetelu

C-laineala – konventsionaalne laineala (*Conventional band; C-Band*)

DInSAR – diferentsiaalne interferomeetriline tehisavaradar (*Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry*)

HH – horisontaalne edastus, horisontaalne vastuvõtt (*horizontal transmit, horizontal receive*)

HV – horisontaalne edastus, vertikaalne vastuvõtt (*horizontal transmit, vertical receive*)

InSAR – interferomeetriline tehisavaradar (*Interferometric Synthetic Aperture Radar*)

IW – interferomeetriline laia vaateala režiim (*Interferometric Wide-swath mode*)

NDVI – normaliseeritud vegetatsiooniindeks (*Normalized Difference Vegetation Index*)

NIR – lähi-infrapuna (*Near-infrared*)

RON – suhteline orbiidi number (*relative orbit number*)

SAR – tehisavaradar (*Synthetic Aperture Radar*)

UTM – Universaalne Mercatori põikprojektsioon (*Universal Transverse Mercator*)

VH – vertikaalne edastus, horisontaalne vastuvõtt (*vertical transmit, horizontal receive*)

VI – vegetatsiooniindeks (*vegetation index*)

VV – vertikaalne edastus, vertikaalne vastuvõtt (*vertical transmit, vertical receive*)

Sissejuhatus

Toit on inimese üks põhivajadustest ning selle kindel varu on ellujäämiseks kriitilise tähtsusega. Sellegipoolest on globaalne toiduga kindlustatuse olukord tänapäeval keerulises seisus (Olsen et al., 2021). Toidu olemasolu võivad ohustada nii kliimamuutustest, inimtegevusest kui ka sotsiaal-poliitilistest teguritest tulenevad probleemid (Hendrix & Brinkman, 2013). Relvastatud konfliktid on üks näide sotsiaal-poliitilistest teguritest, mis võivad panna riike toidupuuduse käes kannatama (Olsen et al., 2021). Käimasolev Venemaa-Ukraina sõda, mis algas 24. veebruaril 2022 on üheks taoliseks näiteks.

Ukraina on tänu sealsetele viljakatele muldadele ja soodsale kliimale üks maailma suurimaid põllumajandustoodangu eksportijaid, kasvatades erinevaid õliseemne-taimi ning mitmeid teravilju nagu näiteks nisu, oder ja mais (U.S. Department of Agriculture, 2024). Mitmed riigid nii Lähis-Idas, Põhja-Aafrikas ja ka Euroopas sõltuvad Ukraina teravilja ekspordist, kuid sõja tõttu on see nüüd häiritud (Nykolyuk et al., 2021). Peamised relvastatud konfliktide alad jäävad Ukrainas intensiivse põllumajanduse piirkondadesse (Skakun et al., 2019). Sealsed põllumaad on sõjategevuse tõttu tõsiselt kahjustada saanud ning sõjajärgse olukorda taastamine võib võtta aega aastakümneid (Case, 2024). Selleks, et mõista sõja negatiivse mõju ulatust Ukraina põllumajandusele, on tarvis saada õigeaegset ja täpset teavet (He et al., 2023).

Kaugseire meetodite kasutamine on tõhus viis põllumajanduslike muutuste tuvastamiseks tänu selle kõrgele ajalisele ja ruumilisele lahutusvõimele (Skakun et al., 2019). Kasutades Copernicuse programmi satelliite Sentinel-1 ja Sentinel-2 on võimalik tuvastada erinevaid põlluharimissündmusi, nagu näiteks külmist ja koristust (Voormansik et al., 2020; Shang et al., 2020). Sõja olukorras on kaugseire ressursimahukate väliuuringute kõrval parim ja ka turvalisem viis põllumajanduse olukorrast õigeaegse ülevaate saamiseks (Shelestov et al., 2023).

Alates sõja algusest on avaldatud mitmeid uurimusi, kus hinnatakse tekkinud kahjustusi Ukraina põllumajandusele. Paljud neist põhinevad statistikal satelliidipiltide kasutamata, kuid mõned uurivad sõja mõju ka kaugseire meetodeid kasutades, analüüsides näiteks muutusi põllukultuuride fenoloogias (Sanchez, 2024) või tuvastades hüljatud (Ma et al., 2022; He et al., 2023; Skakun et al., 2019; NASA Harvest, 2023) ning sõjast kahjustunud põldusid (Kussul et al., 2023; Shelestov et al., 2023). Ka Hosseini et al. (2023) tuvastasid kui paljudele põldudele on sõja aastatel midagi külvatud, kasutades selleks tehisavaradarit. Samas ei ole senimaani

uuritud sõja mõju Ukrainas põldude harimisele, kombineerides nii optilise kui ka radarsatelliidi andmeid.

Antud magistritöö eesmärgiks on Sentinel-1 ja Sentinel-2 aegridade alusel tuvastada muutused künni ja saagikoristuse sündmustes, mis on aset leidnud Ukrainas sõja ajal võrreldes sõjale eelnenud perioodiga.

Uurimistöö peamised küsimused on:

1. Kuivõrd interferomeetrilise tehisavaradari Sentinel-1 koherentsuse ja Sentinel-2 optilise NDVI aegridade sidumise abil tuvastatavad põlluharimissündmused on eristatavad sõjast põhjustatud häiringutest?
2. Millisel määral häirib rinde lähedus põllumajandustegevust ja kui kaugemale see mõju ulatub nähtuna valitud kaugseiremeetodite abil?

Uurimistöö hüpoteesid on:

1. Põllumajandustegevus on rinde vahetus läheduses häiritud, mis paisatab välja sellest, et aegridades puuduvad tavaolukorrale vastavad sündmuste sesoonsed muustrid ja esinevad hoopis sõjast tingitud katkestused.
2. Rinde tagalas tegeldakse vaatamata sõjale põllumajandusega edasi; mida kaugemal aktiivsest rindest, seda vähem esineb sõjast tingitud häiringuid.

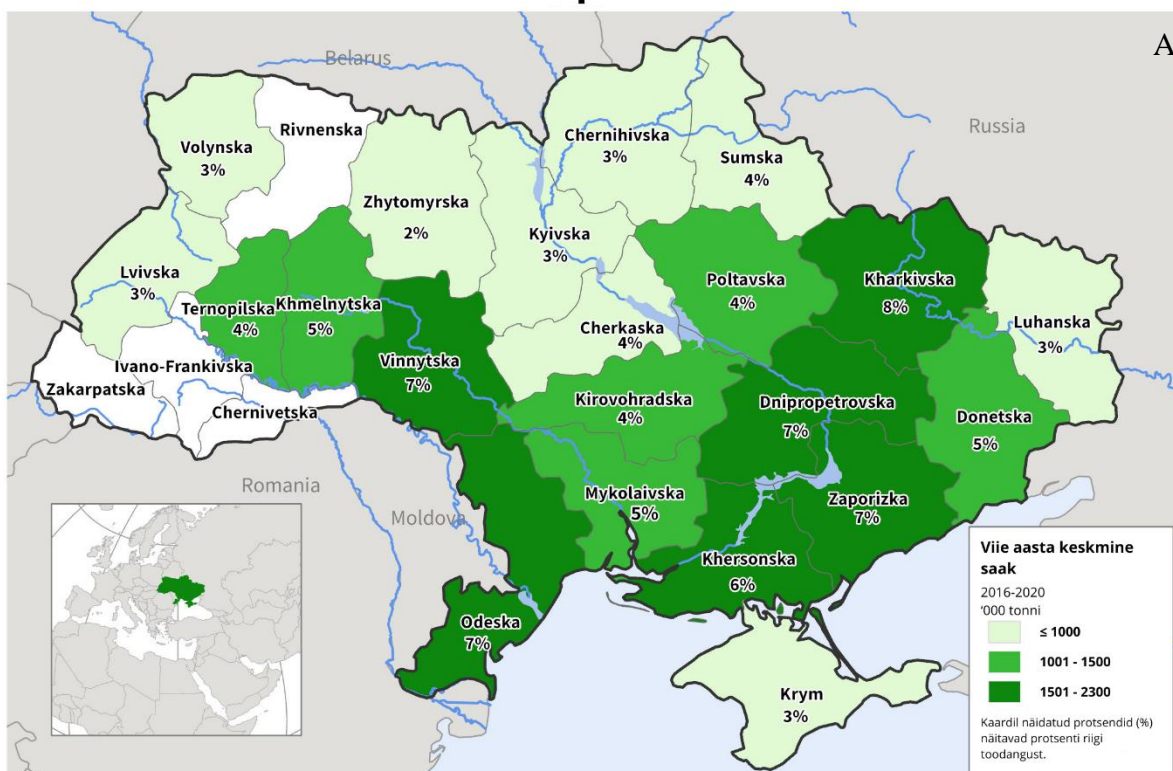
1. Teoreetiline ülevaade

1.1. Ukraina põllumajandus

Ukraina on oma põllumajandusliku toodangu mahuga üks juhtivaid riike maailmas, omades tähtsat rolli erinevate teraviljade ja seemneõlide ekspordis (U.S. Department of Agriculture, 2024). Ukraina kogupindalast moodustab 70% põllumajandusmaa, mis on umbes 42,2 miljonit hektarit (Nykolyuk et al., 2021).

Peamised teraviljad, mida kasvatatakse on mais, nisu ja oder, mis moodustavad 97% teraviljade kogutoodangust ning riigi õliseemnete toodangust moodustavad 99% päevalill, raps ja soja (Matuszak, 2021). Peamised nisu kasvatuse piirkonnad asuvad Ukraina kesk- ja lõunaosas (U.S. Department of Agriculture, 2024). Talinisu külv toimub sügiseti ja koristatakse järgmise aasta juulis või augustis (World Data Center, 2020). Ukraina idaosas kasvab enim suvioder, mida külvatakse tavaliselt aprillis ja koristatakse augustis (World Data Center, 2020). Kuna talioder on oma loomult vägagi külmatundlik ning talve väga hästi üle ei ela, piirdub selle kasvatamine enamasti riigi kaguosaga, kus on soojem kliima (World Data Center, 2020). Nisu ja odra toodangu kõrval on Ukrainas väga olulisel kohal ka maisikasvatus, mille kasvatamine jääb peamiselt Ida- ja Lõuna-Ukrainasse (Good, 2022). Maisi külvatakse tavaliselt aprillis või mais, koristamine kestab aga septembri lõpust kuni isegi novembri alguseni (World Data Center, 2020). Ukraina on ka väga tuntud oma päevalilleõli toodangu poolest. Päevalille kasvatamiseks sobivad hästi Ukraina lõuna- ja idaoblastid (Hamkalo, 2005). Päevalilled külvatakse tavaliselt aprillis ja koristatakse sügisel septembrist kuni oktoobrini (World Data Center, 2020). Joonistel 1 ja 2 on näha, kus asuvad Ukraina intensiivse põllumajandusega aladel peamised nisu, odra ja päevalille kasvatuse piirkonnad.

Nisu kasvatamise piirkonnad Ukrainas



Odra kasvatamise piirkonnad Ukrainas



Joonis 1. Ukraina peamised nisu (A) ja otra (B) kasvatavad oblastid koos nende viie aasta (2016–2020) keskmise saagiga ning oblasti osakaal (%) vastava kultuuri riiklikust kogutoodangust Ukraina Riikliku Statistikaameti ja Krimmi andmete puhul Rosstatsist andmetel (kohandatud U.S. Department of Agriculture, 2024 järgi).

Päevalille kasvatamise piirkonnad Ukrainas



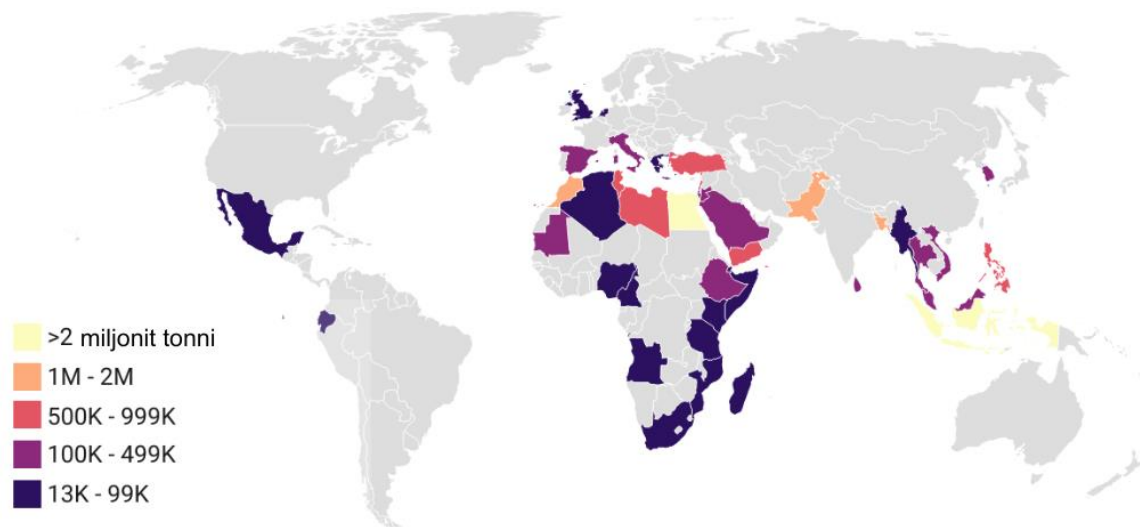
Joonis 2. Ukraina peamised päevalille kasvatavad oblastid koos nende viie aasta (2016–2020) keskmise saagiga ning oblasti osakaal (%) vastava kultuuri riiklikust kogutoodangust Ukraina Riikliku Statistikaameti ja Krimmi andmete puhul Rosstatsist andmetel (kohandatud U.S. Department of Agriculture, 2024 järgi).

Ukrainas leiab kasutust ka mitu erinevat põllukultuuride rotatsioonisüsteemi. Põllukultuuride vahetamise peamiseks eesmärgiks on mulla viljakuse säilitamine ning umbrohtude ja kahjurite tõrje (Liebman & Dyck, 1993). Peale selle esineb ka küllaltki palju põldude sööti jätmist. Näiteks mustkesad, kus sagedase põllu kündmisega hoitakse need umbrohtudest puhtad, et siis sügisel sinna mõni talivili külvata: kuigi mustkesa puuduseks on ühe aasta toodangust ilma jäämine ning intensiivse mullaharimise tagajärjel huumuskihi ja mullastruktuuri kahjustamine (Paivel, 2014). Kuna sööti jätmisele järgneval aastal on taimede jaoks soodsamad kasvutingimused, siis külvatakse peale puhke aastat sageli talinisu just selle nõudliku iseloomu tõttu (Liebman & Dyck, 1993). Tüüpiline erinevate kultuuride rotatsioon võib välja näha järgmine: söötis põld, talinisu, talinisu, päevalill, kevadoder ja seejärel mais (World Data Center, 2020).

1.1.1. Põllumajandustoodangu eksport

Ukraina on üks peamisi teravilja ja taimeõlide eksportijaid maailmas. (USDA Foreign Agricultural Service, 2022). Asudes Musta mere ääres, on Ukrainal otsene ligipääs peamistele

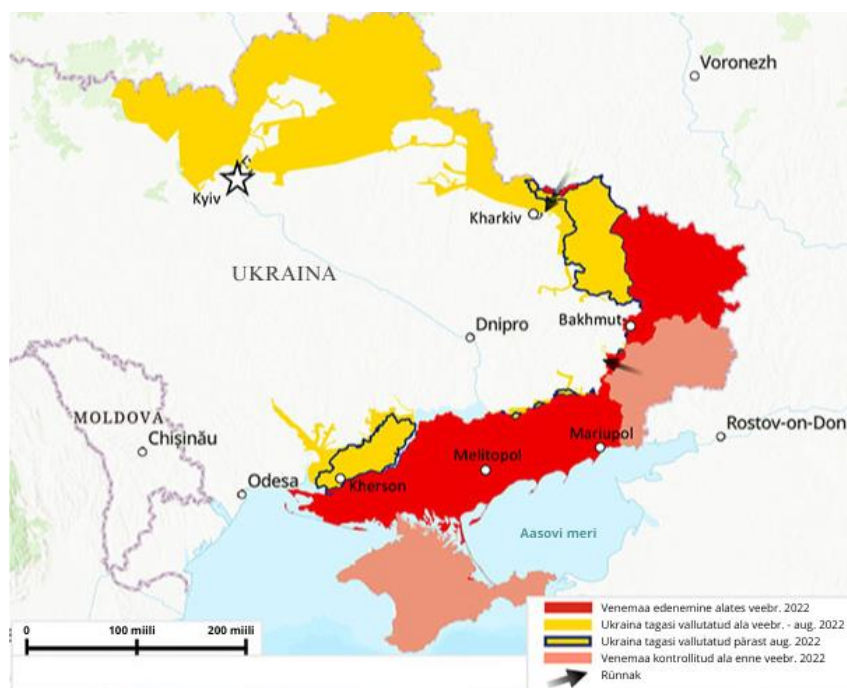
turgudele Euroopas, Lähis-Idas ja Põhja-Aafrikas, tänu millele on Ukraina püsinud maailma kümne suurima nisu, maisi ja päevalilleõli eksportija hulgas juba ligi kümme aastat (Nykolyuk et al., 2021). Ukraina ekspordist sõltuvad väga palju erinevad Aasia ning Aafrika madala ja keskmise sissetulekuga riigid (Maciejewska, 2022) (joonis 3). Seetõttu on Vene-Ukraina sõja ajal ekspordi jätkumine kriitilise tähtsusega Ukraina teraviljast sõltuvate riikide jaoks, stabiliseerides toiduainete hinnatõusu maailmaturgudel (Maciejewska, 2022). Aastal 2021. eksportis Ukraina ligikaudu 55% oma nisust Aasiasse ja 41% Aafrika riikidesse (Maciejewska, 2022). Seega mida kauem Venemaa-Ukraina sõda kestab, seda rohkem on põhjust toiduvarude pärast muretsemiseks mitte ainult Ukrainas, vaid kogu maailmas.



Joonis 3. Ukraina nisust sõltuvad riigid: Ukraina nisu suurimad importijad aastatel 2022 ja 2021 (kohandatud Feingold (2022) järgi).

1.2. Vene-Ukraina sõda

Enne Venemaa täiemahulist sissetungi Ukrainasse, mis algas 24. veebruaril 2022, oli Ida-Ukrainas juba kaheksa aastat kestnud konflikt Ukraina valitsusvägede ja Venemaad toetanud separatistide vahel (Nikolskaya & Osborn, 2022; Ray, 2024). Konflikt Venemaa ja Ukraina vahel sai alguse 2014. aasta veebruari lõpus, kui venemeelsed jõud võtsid üle Krimmi autonoomse vabariigi ning varsti peale seda liituti Venemaaga (Walker, 2023). Venemaa täiemahuline rünnak algas 2022. aastal esialgu põhjarindel Valgevenest Kiievi suunas, lõunarindel Krimmist ning kagurindel Luhanskist ja Donetskist Harkivi suunas (Ray, 2024). ÜRO andmetel on käesoleva aasta seisuga sõda põhjustanud Ukrainas kokku 30 457 tsiviilohvrit ning tegelikud numbrid võivad olla veelgi suuremad (United Nations, 2024). Rohkem kui kaks aastat kestnud sõjast annab 14. mai, 2024 seisuga ülevaate joonis 4.



Joonis 4. Venemaa sissetungide ulatus 2024. aasta mai seisuga (kohandatud Davidson & Facini (2024) järgi).

1.2.1. Sõja mõju Ukraina põllumajandusele

Alates Venemaa täiemahulise sissetungi algusest on Ukraina põllumajandussektor olnud Venemaa rünnakute peamiseks sihtmärgiks, mõjutades sealseid põllumajanduslikult olulisi piirkondi ja tootmisinfrastruktuuri. Hinnatakse, et 2024. aastaks on sõda tekitanud Ukraina põllumajandussektorile kokku ligikaudu 80 miljardi dollari väärtuses kahju (Neyter et al., 2024). Seda näitab ka ekspordimahtude vähenemine. Näiteks eksportis Ukraina 2022/2023 turundusaastal (1. juuli 2022–30. juuni 2023) 23,6 miljonit tonni teravilja, mis on varasema hooaja 33,5 miljoni tonniga võrreldes oluliselt vähem (Polityuk, 2023).

Ukraina oli juba aastaid tarninud 90% oma toodangust Musta mere sadamate kaudu ning 2022. aasta suvel sõlmisid Venemaa, ÜRO ja Türgi omavahel kokkulepe, mis võimaldas ohutult suurema osa Ukraina teraviljast eksportida läbi kolme Ukraina Musta mere sadama (Council of the European Union, 2024). Sõlmitud kokkulepet nimetati Musta mere teravilja algatuseks (*Black Sea Grain Initiative - BSGI*) ning tänu BSGI olemasolule jõudis umbes 20% Ukraina nisuekspordist arengumaadesse. Juba aasta hiljem, 2023. aasta juulis astus Venemaa sõlmitud kokkuleppest välja, nõrgendades Ukraina positsiooni veelgi enam (Economics Observatory, 2024).

Mereeksporti infrastruktuuri pihta tehtud rünnakute tõttu pidi Ukraina hakkama otsima alternatiive. Kõige loogilisema lahendusena tundus ekspordiga jätkata maismaa kaudu, kuid ka

see ei olnud ilma probleemideta (Reidy, 2023). Vedades suurema osa teraviljast läbi oma Euroopa naabrite, põhjustas Ukraina kaubanduspingeid, mille tõttu Euroopa toetus Ukrainale vähenes (Welsh, 2024). Seega oli Ukraina sunnitud uuesti leidma alternatiivseid viise oma toodangu eksportimiseks ning seekord otsustati proovida jätkata kaubaveoga Musta mere kaudu (Reidy, 2023). Uus koridor ei läinud enam otse Bosporuse väina poole, vaid ringiga mööda Rumeenia ja Bulgaaria rannikut (Reidy, 2023). Tänu naaberriikide territoriaalmeredele on Ukrainal õnnestunud ekspordiga piisavas mahus jätkata (Donley, 2024; Gro Intelligence, 2024).

2023. aasta 4. detsembri seisuga on Ukraina alates 2023/2024 turundusaasta algusest eksportinud juba 13,4 miljonit tonni teravilja, mis on küll 26,7% vähem kui aasta varem, kuid stabiilsete olude juures töötab see veel suurenda (All About Feed, 2023; Xinhua, 2023). Hoolimata sõjast on tänu erakordselt soodsatele ilmastikutingimustele aasta 2023 olnud Musta mere äärsete alade jaoks võrdlemisi produktiivne, mis omakorda tähendab, et märkimisväärne osa toodangust saadi ka Venemaa poolt okupeeritud aladelt, mille majanduslikust kasust jääb Ukraina ilma (NASA Harvest, 2023).

Ukraina põllumajandust ei mõjuta mitte ainult turvalise eksportimise võimaluse puudumine, vaid ka otsene kahju põllumajandusele. Kahhovka tammi purunemine 6. juunil 2023, hävitas ümberkaudsete alade taristu ja kahjustas piirkonna põllumaid. Samuti on miljoneid hektareid põllumaid muutunud miinide ning jätkuva sõjategevuse tõttu praktiliselt kasutuskõlbmatuks (Case, 2024). Granados & Sampson (2023) andmetel sai Ukrainast 2023. aastal kõige enim maamiinidega kaetud riik maailmas, kahjustades Ukraina põllumajandust veel aastakümneid. Lisaks on sõja algusest saati tuhanded Ukraina põllumehed läinud oma kodumaad kaitsma, omades juba varasemat kogemust suurte masinatega ning olles seega väärtuslik lisajõud armeele (Case, 2024). Sellest tulenevalt esineb paljudes allesjäänud farmides kogunud tööjõu puudus, vähendades tootlikkust veelgi rohkem (Piper & Polityuk, 2023).

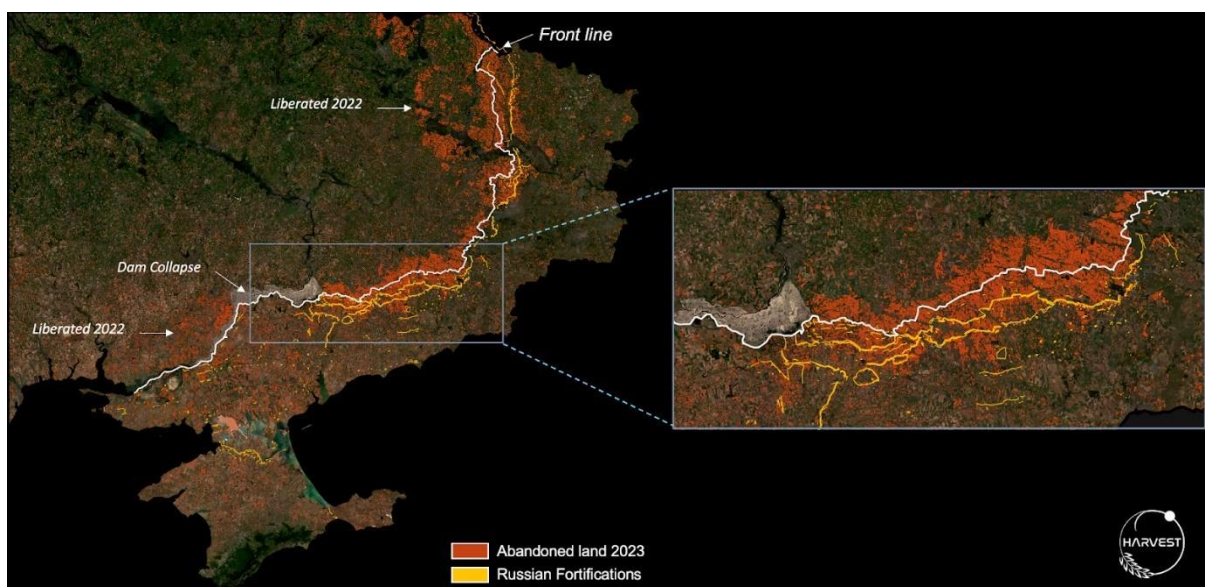
Isegi kui sõjategevus lõppeks kohe praegu, siis võtaks sõjaeelsesesse olukorda taastumine aega rohkem kui 20 aastat (Case, 2024). Ukraina põllumajanduspoliitika ja toiduminister Mõkola Solskõi sõnul on sõja algusest alates kaotatud ligi 20% põllumaadest ning isegi sõja lõppedes võtab põldudel kaevikute kinniajamine ning põldude miinidest vabanemine aega veel kümneid aastaid (Case, 2024).

1.2.2. Põllumajanduslike kahjustuste hindamine kaugseire meetodite abil

Selleks, et tuvastada muutuseid suurtel aladel ei piisa vaid väliuuringutest, mis on aeganõudev ning kallis meetod. Seevastu satelliitseire võimaldab põllumaade kiiret ja laiaulatuslikku

analüüsimist, tuvastamaks sealseid pikaajalisi trende või muutuseid ilma kohale minemise vajaduseta (Atzberger, 2013). Sõja olukorras, kus sageli otsene ligipääs põldudele puudub, on kaugseire ainus ohutu ning regulaarselt andmeid tootev võimalus põllumajanduse seisundi õigeaegseks hindamiseks (Shelestov et al., 2023).

Hindamaks sõja mõju Ukraina põllumajandusele, on viimaste aastate jooksul läbi viidud mitmeid kaugseire meetodeid kasutavaid uuringuid. Näiteks Deininger et al. (2023) näitasid kuidas optilise kaugseire meetodiga kogutud teavet saab edukalt kasutada konflikti mõju hindamiseks sealsetele talikultuuridele. Ka Sanchez (2024) kasutas oma magistritöös optilise satelliidi andmeid, et uurida sõjast tingitud muutuseid põllukultuuride fenoloogias. Ma et al. (2022), He et al. (2023) ja Skakun et al. (2019) kasutasid optiliste satelliitide andmeid tuvastamaks Ukrainas hüljatud põldusid ja nende paiknemist konflikti-piirkondade suhtes. Militaartegevustest tekkinud otseseid põllukahjustusi uurisid optiliste seire andmetega Kussul et al. (2023) ning Shelestov et al. (2023). Joonisel 5 on näha NASA Harvesti optiliste satelliidipiltide ning kohalikelt kogutud informatsiooni abil tuvastatud hüljatud põllumaade hulk rindejoonele lähedates piirkondades (NASA Harvest, 2023). Ka Hosseini et al. (2023) tuvastasid kui paljudel põldudele on hoolimata sõjast midagi külvatud, kasutades selleks tehisavaradarit.



Joonis 5. Ukraina hüljatud põldude paiknemine rindejoone (*Front line*) suhtes 2023 aastal. Hüljatud põllud on tähistatud oranžiga (*Abandoned land 2023*) ning Vene kaitserajatised kollasega (*Russian Fortifications*). Allikas: NASA Harvest, 2023

1.3. Satelliitidelt pärinevad andmed

Copernicuse programmi Sentinel missioonid on Euroopa Komisjoni ja Euroopa Kosmoseagentuuri ühisalgatus ülemaailmse keskkonnaseire tagamiseks (Drusch et al., 2012). Sentineli missioone iseloomustab pikaajaline järjepidev seire ning andmete salvestamine (Berger et al., 2012). Lisaks on satelliitidel kõrge ruumiline ja ajaline lahutusvõime, kattes samaaegselt laiaulatuslikke alasid sagedaste ülelendudega (Berger et al., 2012). Tänapäevaks koosneb Sentinel programm seitsmest missioonist, sisaldades nii passiivseid kui ka aktiivseid instrumente, mida kasutatakse maa, ookeani ja atmosfääri jälgimiseks (The European Space Agency, 2024).

1.3.1. Sentinel-1 andmestik

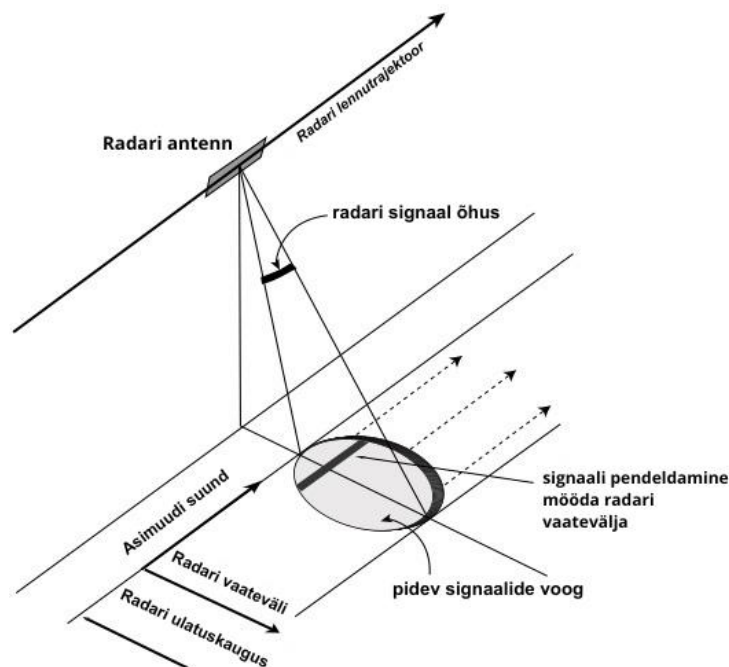
Tehisavaradar (*Synthetic Aperture Radar – SAR*) Sentinel-1 (S1) on aktiivne sensor, mis saadab välja ~5,6 cm lainepikkusega mikrolainete (C-laineala) sagedusvahemiku kiirgust ja mõõdab tagasipeegelduva signaali tugevust ning faasi (Torres et al., 2012). Sentinel-1 missioon koosneb kahest identsest, 693 km kõrgusel asuvast orbiiti jagavast satelliidist Sentinel-1A ja Sentinel-1B, mis käivitati vastavalt 2014 ja 2016 aastatel (Torres et al., 2012). Tänapäevaks on kahest satelliidist alles vaid Sentinel-1A, põhjuseks 2022. aastal ootamatult juhtunud Sentinel-1B rike. (The European Space Agency, 2024; Torres et al., 2012). Satelliidi asendamiseks on plaanis 2024. aasta lõpuks saata orbiidile Sentinel-1C (Parsonson, 2024).

Radarit iseloomustab 250 km lai pildistamise vaateväli ning kõrge geomeetiline (5×20 m) ja radiomeetiline lahutusvõime (Yagüe-Martínez et al., 2016). Tehisavaradar kasutab erinevaid töörežiime, mis varieeruvad ruumilise lahutuse ning vaatevälja suuruse vahel. Enim kasutatust leiab interferomeetiline laia vaatevälja töörežiim (*Interferometric Wide-swath mode – IW*), kuna see rahuldab suurema osa tänapäeval leiduvate rakenduste nõuetest SAR'i andmete kvaliteedi osas (Torres et al., 2012).

Sentinel-1 satelliidid katavad Maa erinevaid piirkondi kokku 175 suhtelisel orbiidil (RON) ning üks satelliit on võimeline kaardistama IW režiimis iga 12 päeva järel, kaks satelliiti iga 6 päeva tagant ekvaatoril (Torres et al., 2012). Kõrgematel laiuskraadidel on orbiidi radade väiksemast kaugusest ja seetõttu ülekattest tingituna ühe satelliidi korduvkülastuse arv suurem kui ekvaatoril. Orbiiti, millel satelliit liigub, nimetatakse kas tõusvaks (*ascending*), kui see liigub lõunast põhja poole või laskuvaks (*descending*), liikudes põhjast lõunapooluse suunas (Ferretti et al., 2007).

Tehisavaradari pildid jagunevad vastavalt nende töötlemise tasemele kolmeks. Tase-0 (*Level-0*) on SAR-i toorandmed, mida töödeldes saadakse *Level-1* (L1) ja *Level-2* (L2) (Guillaume et al., 2021). Tase-1 sisaldab geokodeeritud andmeid (Torres et al., 2012). Lisaks koosneb L1 kahest andmeformaadist: *Single-Look Complex* (SLC) interferomeetriliste rakenduste jaoks ja *Ground Range Detected* (GRD) kujutised (Guillaume et al., 2021). L2 on mõeldud ookeanide jälgimiseks, edastades teavet sealsete tuulte, vee paisumise ning hoovuste kohta (Guillaume et al., 2021).

Radari üheks oluliseks eeliseks on tänu mikrolainekiirguse kasutamisele võime pildistada nii päeval kui ka öösel ning näha isegi läbi pilvede (Ferretti et al., 2007). Kuna maale jõudes hajub radari signaal vastu objekte põrgates laiali, jõuab vaid osa saadetud signaalist tagasi antennini (Moreira et al., 2013). Tehisavaradar mõõdab edastatava signaali tagasihajumise amplituudi ja faasi. Amplituud sõltub tajutava objekti füüsilistest (pinnageomeetria, karedus) ja elektrilistest omadustest (dielektriline läbilaskvus). Faasimõõtmine sisaldab lisaks teavet ka objekti kauguse kohta (Ferretti et al., 2007). Tehisavaradari nimetus tuleb selle võimekusest tagasihajunud signaalide vastuvõtmisel luua virtuaalne ava, mis on antenni enda pikkusest kordades suurem, tekitades sedasi parema lahutusvõimega kujutise (Preiss & Stacy, 2006; Ferretti et al., 2007).

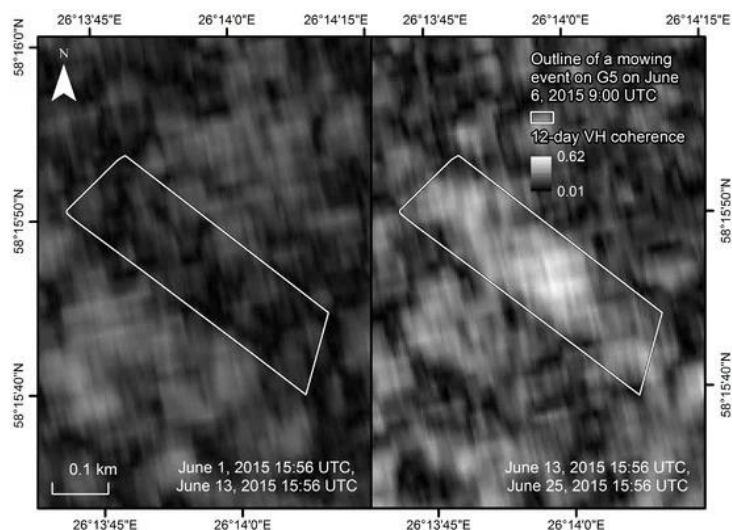


Joonis 6. Radari tööpõhimõte (kohandatud NISAR (2024) järgi).

Radari üheks oluliseks rakenduseks on erinevate muutuste tuvastamine kasutades selleks maapinnalt tagasi hajunud signaali faasi otsest seost pinna deformatsioonidega (Ferretti et al.,

2007). SAR interferomeetrias (*Interferometric SAR – InSAR*) moodustub kahe pildi faaside kombineerimisel interferogramm, mis iseloomustab nende faaside erinevust (Bamler & Hartl, 1998). Kindla sihtmärgi muutuste tuvastamiseks kasutatakse diferentsiaalse interferomeetrilise tehisavaradari meetodit (*Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry – DInSAR*) (Ferretti et al., 2007). DInSAR-i puhul on oluline, et kombineeritavad pildid oleksid tehtud eri aegadel, kuid sama vaatenurga alt ja samast asukohast orbiidil (Ferretti et al., 2007). Eeldades, et vaadeldava objekti dialektriline konstant ja seega selle hajumise omadused püsivad samad, iseloomustab DInSAR faas kahe võtte vahelise aja jooksul pinna deformatsioonist tulenevat muutust antenni ja sihtmärgi kauguse vahemaa kaudu (Bamler & Hartl, 1998).

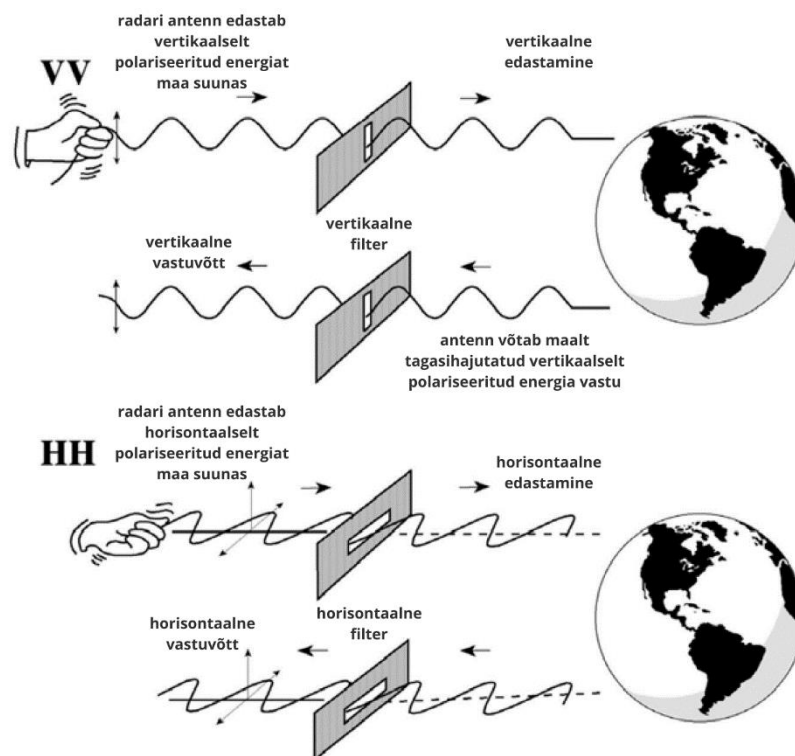
Interferogrammi faasihinnangu usaldusväärsust saab mõõta koherentsusega (γ), mis on iga piksli amplituudi ja faasi sarnasuse normaliseeritud mõõt kahe erineval ajal tehtud SAR pildi vahel, näidates nende omavahelist korrelatsiooni 0–100% (0–1) (Moreira et al., 2013; Ferretti et al., 2007). Mida vähem on vaadeldava objekti suhteline asukoht või füüsilised omadused kahe võtte vahelise aja jooksul muutunud, seda suurem on koherentsus ning vastupidi, mida juhuslikum on muutus, seda väiksem (Preiss & Stacy, 2006). Näiteks heinamaal kasvav kõrge rohi on pidevas muutuses ning seega omab kahe võtte vahelisel ajal madalat koherentsust, seevastu pärast niitmist on hein madal ning vähem muutuv, mida illustreerib joonis 7.



Joonis 7. Pärast 6. juunil toimunud heinamaa niitmist on märgata koherentsuse kasvu. Vasakpoolsem pilt kujutab 12 päevast VH koherentsust enne niitmist 1. juunil 2015 ning parempoolsem pilt 12 päevast koherentsust pärast niitmist 13. juunil 2015 (Allikas: Tamm et al., 2016).

Sentinel-1 SAR instrument edastab ning võtab signaale vastu erinevates polarisatsioonides (Torres et al., 2012). Lainete edastamine antennist toimub alati kas vertikaalselt või

horisontaalselt (Torres et al., 2012). Pärast objektiga kokku puutumist võib lainete polarisatsioon muutuda hoopis vastupidiseks, võimaldades seega kokku neli kombinatsiooni: HH (*Horizontal transmit, Horizontal receive*), HV (*Horizontal transmit, Vertical receive*), VV (*Vertical transmit, Vertical receive*) ning VH (*Vertical transmit, Horizontal receive*) polarisatsioon (European Space Agency, 2012). VV ja HH polarisatsioonid on visualiseeritud joonisel 8. IW režiim toetab korraga kahes polarisatsioonis (*Dual polarisation*) töötamist (HH + HV või VV + VH), mis tähendab, et radar edastab signaali ühes polarisatsioonis ja võtab selle vastu kahes polarisatsioonis (Guillaume et al., 2021). Tagasihajunud signaali vastu võtmine kahes polarisatsioonis on väga tõhus viis näiteks põllumajanduse ja põllukultuuride analüüsimiseks (UP42, 2024).



Joonis 8. VV ja HH polarisatsioonide tööpõhimõtte (kohandatud Balaji (2023) järgi).

1.3.2. Sentinel-2 andmestik

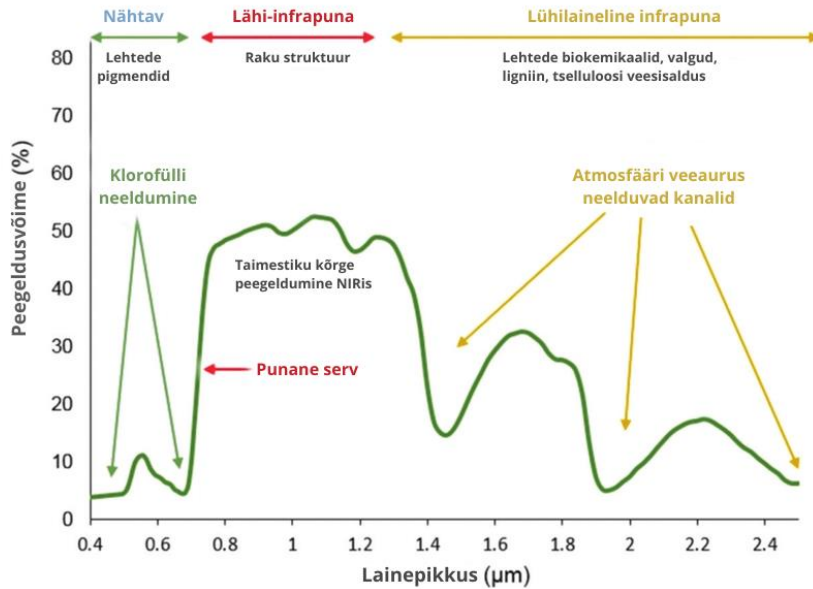
Sentinel-2 (S2) on multispektraalne kõrglahutusega missioon, mis hõlmab endas kahte, 2015 ja 2017 orbiidile saadetud satelliiti Sentinel-2A ja Sentinel-2B (The European Space Agency, 2024). Mõlemad satelliidid asuvad 768 km kõrgusel päikese-sünkroonsel polaarorbiidil (Drusch et al., 2012). Satelliitide seire vahendiks on multispektraalseadme (*MultiSpectral Instrument* – MSI), mis jäädvustab ekvaatoril iga viie päeva tagant 13 spektrikanaliga pilte

(Satellite Imaging Corporation, 2022). Kanalid asuvad nähtava, lähi-infrapunase (NIR) ning lühilainelise infrapunase (SWIR) kiirguse sagedusvahemikus ning olenevalt kanalist jääb piltide ruumiline lahutusvõime 10 kuni 60 m vahele (vaata lisa 1) (Gatti & Bertolini, 2018). Sentinel-2 pildistab 290 km vaatenurga ning $100 \times 100 \text{ km}^2$ katvusega maismaad ja rannikualasid. Tänu eelmainitud omadustele pakub Sentinel-2 missioon kasutajatele võimsat tööriista erinevate maapealsete muutuste tuvastamiseks ning jälgimiseks (Gatti & Bertolini, 2018).

Kuna piltide paremaks interpreteerimiseks on tarvis neid enne kalibreerida, siis kasutatakse peamiselt kahte sorti eeltöödetud pilte. Level-1C (L1C) kujutab endast geokodeeritud atmosfääri ülemise osa peegeldust koos pilvemaskiga, Level-2A (L2A) on aga atmosfääri alumise osa järgi korrigeeritud ning seega puudub sellel hägustav atmosfääri efekt ning pilt paistab selgem (Schiller, 2015). Lisaks sellele on L2A toodete puhul arvesse võetud Copernicus DEMi, mis on digitaalne maakatte kõrgusmudel (*Digital Surface Model – DSM*) (Copernicus, 2022), kompenseerimaks võimalikke nõlva kaldest põhjustatud moonutusi (Gatti & Bertolini, 2018).

1.3.3. Vegetatsiooniindeksid

Optiline kaugseire on tänu selle erinevates spektri osades paiknevatele kanalitele tõhus viis taimestiku jälgimiseks. Taimede kiirgusvõimet erinevates spektrites on juba aastaid laialdaselt uuritud. Punase (RED, 600-700 nm) kiirguse neeldumine taimestikus on parem suurema klorofüllis sisalduse juures, samas kui lehtede pindala ja taime raku struktuur on tugevas seoses lähi-infrapunase (NIR, 750-1350 nm) kiirguse peegeldumisega lehtede pinnalt (Major, 1990, *cit.* Bannari et al., 1995). See tähendab, et terve taim, millel on palju klorofüllit ja rakustruktuure, neelab aktiivselt punast valgust ja peegeldab NIR-i, kahjustunud taime puhul on see aga vastupidine (Bannari et al., 1995).



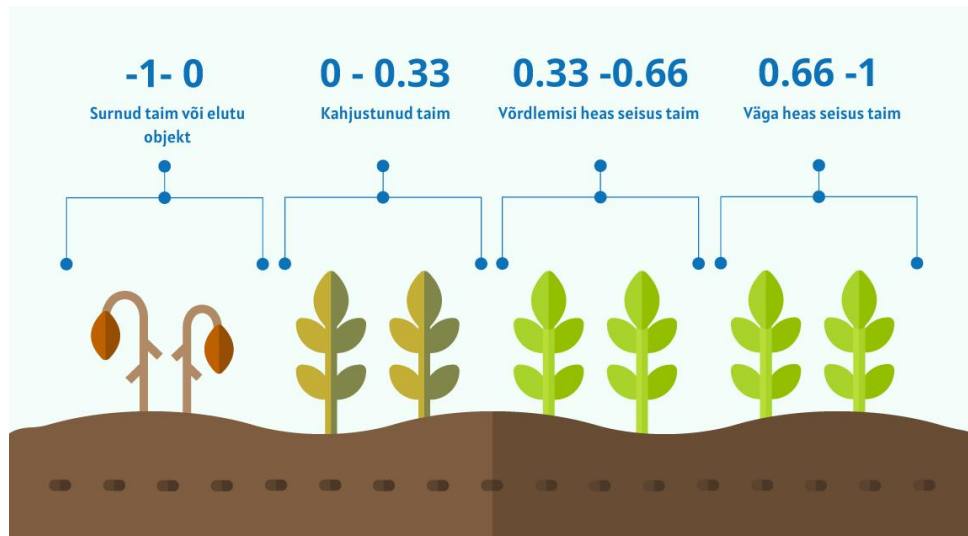
Joonis 9. Taimestiku spektraalne peegelduskõver nähtavas, lähi-infrapunase ja lühilainelise infrapuna vahemikes (kohandatud Roman & Ursu (2016) järgi).

Selleks, et taimestiku paremini jälgida ei piisa alati vaid ühes kindlas spektrivahemikus tehtud mõõtmisest (Xue et al., 2017). Kombineerides omavahel kahe või enama spektri andmed, saab vähendada päikesekiirguse ja ümbritseva keskkonna efekte, tugevdades samal ajal taimestiku signaali (Basso et al., 2004). Sellist kombineerimise meetodeid nimetatakse vegetatsiooniindeksiteks (VI) (Jackson & Huete, 1991).

Tänaseks on välja arendatud rohkem kui 40 erinevat vegetatsiooniindeksit (Bannari et al., 1995). Tuntuimaks neist on normaliseeritud vegetatsiooniindeks (*Normalized Difference Vegetation Index* – NDVI), mida tutvustasid esimest korda (Rouse et al., 1974, *cit.* Xue et al., 2017) (valem 1).

$$NDVI = \frac{NIR - punane}{NIR + punane} \quad (1)$$

NDVI on peegeldusvõimete erinevus lähi-infrapuna ja punase spektri osa vahel (Petropoulos & Kalaitzidis, 2012). Tüüpiline NDVI kurv on kergesti tõlgendatav – kasvuperioodi alguses esineb kiire kasv ning lõpu poole langus (Pettorelli et al., 2005). Jensen (2000, *cit.* Petropoulos & Kalaitzidis, 2012) andmetel jäävad NDVI väärtused vahemikku -1 kuni $+1$, kus taimkatteta alade, nagu näiteks vee väärtused jäävad alla nulli, nullile lähedased väärtused vastavad väga vähese taimestikuga alale/paljale maapinnale ning mida lähemal on NDVI väärtused ühele, seda tervem ning lopsakam taimestik on (joonis 10).

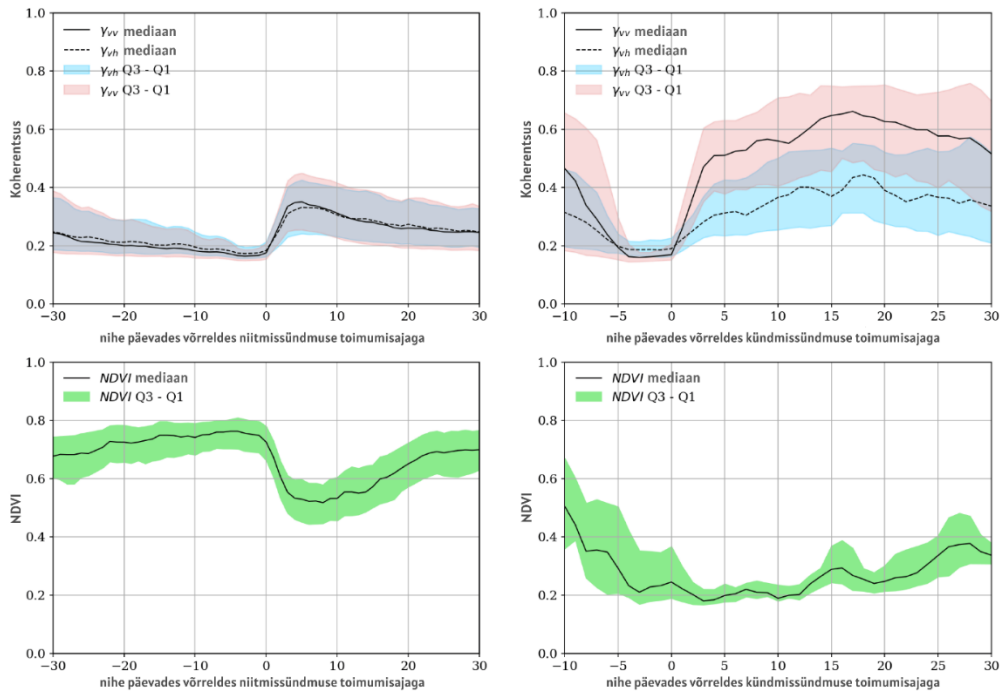


Joonis 10. NDVI väärtuste varieerumine vastavalt taime seisundile (Auravant, 2024).

1.3.4. Aegread kündmise ja saagikoristuse tuvastamiseks

Sentinel-1 pakub häid võimalusi künni ja saagikoristuse tuvastamiseks. Kui optilise satelliidi andmete põhjal saab peamiselt teavet põllukultuuride bioloogiliste omaduste kohta, siis SAR edastab teavet taimkatte ja muldpinna füüsilise struktuuri kohta (Zheng et al., 2014).

Tehisavaradari andmed on oma olemuselt väga tundlikud pinna niiskuse ja füüsilise struktuuri muutustele, mis võib olla põhjustatud näiteks põllu kündmisest (Satalino et al., 2018). Seda, kuidas Sentinel-1 aegride põhjal kündmist tuvastada, on oma töös uurinud näiteks Voormansik et al. (2020) ja Robertson et al. (2023). Voormansik et al. (2020) sidusid omavahel Sentinel-1 VV/VH koherentsuse aegread Sentinel-2 NDVI-ga. Selgus, et peale kündmist koherentsuse väärtused suurenevad ning tulemuste põhjal ilmnes tendents, kus kõrge koherentsus vastas madalale NDVI'le ja vastupidi (Voormansik et al., 2020). Lisaks märkisid autorid ära, et peale kündmist saavutab koherentsus oma maksimumi mõningase hilinemisega (joonis 11). Maksimaalne koherentsuse väärtus saabub siis, kui värskest küntud pinnas on lõplikult kuivanud ning kündmise järgsed tegevused, nagu näiteks väetamine on lõppenud (Voormansik et al., 2020).



Joonis 11. S1 koherentsuse (ülemine) ja S2 NDVI (all) mediaanväärtused niitmise (vasakul) ja kündmise (paremal) korral, kus värvilised piirkonnad tähistavad piksliväärtuste põllu-eraldise sisest interkvartiilset vahemikku (*Interquartile range*). Sündmused on 2017. aasta maist oktoobrini (niitmine) ja juunist septembrini (küünd) (kohandatud Voormansik et al. (2020) järgi).

SAR'i meetodeid on uuritud ka saagikoristuse tuvastamise eesmärgiga. Selgub, et InSAR koherentsust annab edukalt seostada saagikoristusest tingitud muutustega, kuna võrreldes taimkattega, mis on pidevas muutumises, on põllu pind peale saagikoristust stabiilsem väljendudes koherentsuse kasvuga, mis jääb püsima juhul kui põllul rohkem midagi ei toimu (Shang et al., 2020). Ka Robertson et al. (2023) näitasid, et InSAR koherentsust saab kasutada põllumajandustegevusest tingitud muutuste tuvastamiseks.

Sentinel-2 andmed on samuti tõhus vahend suurte maa-alade harimisvõtete tuvastamiseks. Vegetatsiooniindeksitega on võimalik kontrollida näiteks taimkatte olemasolu või selle puudumist, lihtsustades sedasi kündmise tuvastamist (Patel & Oza, 2014). Vegetatsiooniindeksit NDVI kasutasid oma töös kündmise tuvastamiseks näiteks Kassouk et al. (2020), eristamaks muldpinda taimkattest.

2. Andmed ja meetodika

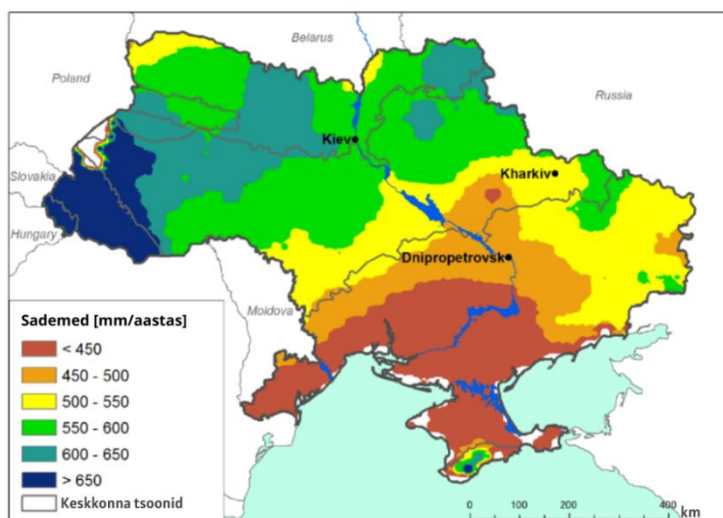
2.1. Uurimisala

Ukraina asub Euroopa idaosas, Musta mere põhjarannikul, piirnedes idas ja põhjas Venemaa ja Valgevenega, läänes Poola, Slovakkia ja Ungariga ning lõunas Rumeenia ja Moldovaga. Ukraina ulatus idast läände on ligikaudu 1316 km ja põhjast lõunasse umbes 893 km (Ukraine, 2022). Ukraina pindala on 603 500 km², mis teeb sellest Euroopa suurima riigi (Ukraine, 2022).

Magistritöö uurimisalad valiti välja nii kesk-, ida- kui ka lõuna- oblastides. Kesk- ja ida- piirkondi iseloomustavad kõrgemad temperatuurid ning vähesemad sademed (joonis 12 ja 13).



Joonis 12. Aasta keskmine temperatuur (°C) Ukrainas 2005–2012 (Müller et al., 2016).



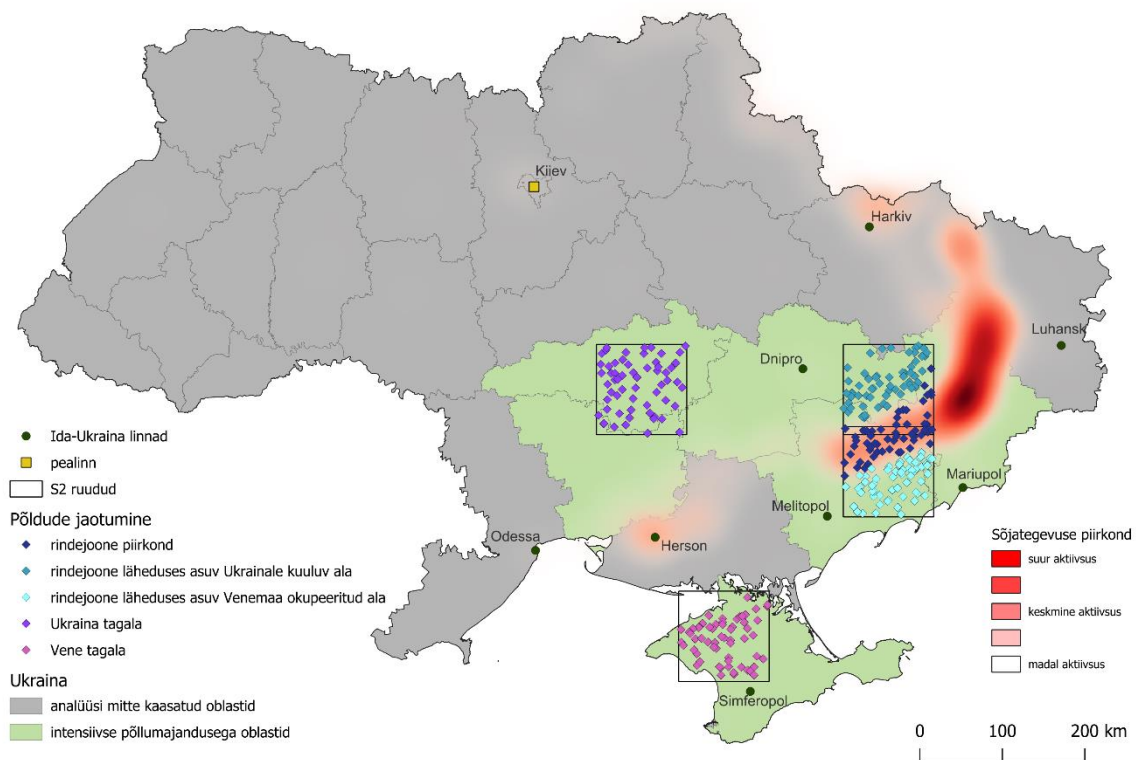
Joonis 13. Aasta keskmine sademete hulk (mm) Ukrainas 2005–2012 (Müller et al., 2016).

Lõunaoblastites valitseb parasvöötme mereline kliima, kus on teiste piirkondadega võrreldes pehmemad talved (joonis 12). Talvekuudel on keskmine temperatuur tavaliselt vahemikus -5°C kuni -10°C , kevade saabudes tõusevad temperatuurid 5°C ja 15°C vahele ning suvel võivad temperatuurid tõusta üle 30°C , seda eriti lõuna- ja keskiirkondades (World Data Ukraine, 2024). Varasügisel on suhteliselt soojad ning temperatuur jääb vahemikku $10-15^{\circ}\text{C}$ (World Data Ukraine, 2024). Keskmine sademete hulk varieerub olenevalt aastaajast ja piirkonnast. Näiteks Musta mere piirkonnas on aastane sademete hulk küllaltki madal, keskmiselt alla 500 mm aastas (Climates to travel, 2024) (joonis 13).

2.2. Andmed

2.2.1. Põldude valik

Ukraina põldude ruumikujud pärinevad OpenStreetMapist, mis on vabatahtlike poolt üles ehitatud avalik ruumiandmete andmebaas (OpenStreetMap, 2024). Andmebaasist saadud põllud asuvad töö huviala katvate Sentinel-2 ruutude (36TWR, 36TYT, 36UVU, 36UYU) (Justin Meyers, 2015) sees, mis jagavad Maa $110 \times 110 \text{ km}^2$ pindalaga ruutude komplektiks (Sentinel Online, 2024). Analüüsiks valiti välja juhuslikud 300 põldu, mis asuvad intensiivse põllumajandusega oblastides. Põldude valikul arvestati 2022 ja 2023 toimunud sõjategevuse asukohta ja intensiivsust, kasutades selleks The Armed Conflict Location & Event Data Project (ACLED, 2024) andmeid. Analüüsimaks sõja mõju põllumajandusele, klassifitseeriti vaatlusaluse piirkonna põllud kahe aasta sõjategevuse asukoha ja intensiivsuse põhjal võrdsetesse gruppidesse (60 põldu grupis) (joonis 14). Eristati viis gruppi: 1 – „rinne“, 2 – „rindejoone läheduses asuv Ukrainale kuuluv ala“, 3 – „rindejoone läheduses asuv Venemaa poolt okupeeritud ala“, 4 – „rindejoonest eemal asuv Ukraina tagala“ ning 5 – „rindejoonest eemal asuv Venemaa tagala (okupeeritud Krimm)“.



Joonis 14. Rinde ja põldude paiknemine perioodil 2022–2023 (OpenStreetMap, 2024; ACLED, 2024).

2.2.2. Satelliidiandmete eeltöötlus

Suure andmemahu tõttu töödeldi nii Sentinel-1 kui ka Sentinel-2 andmed KappaZeta OÜ poolt. Kõik satelliitandmed saadi CREODIAS keskkonna kaudu. Sentinel-1 puhul kasutati L1 SLC laia vaatevälja (IW) andmeid, Sentinel-2 puhul aga multispektraalseadme (MSI) L2A andmeid. Kogu andmekorje ja töötlus tehti OÜ KappaZeta poolt arendatud tarkvaraga, mis põhineb vabavaralistel vahenditel, kasutades ESA SNAP tööriistu (ESA, 2024) (joonis 15).

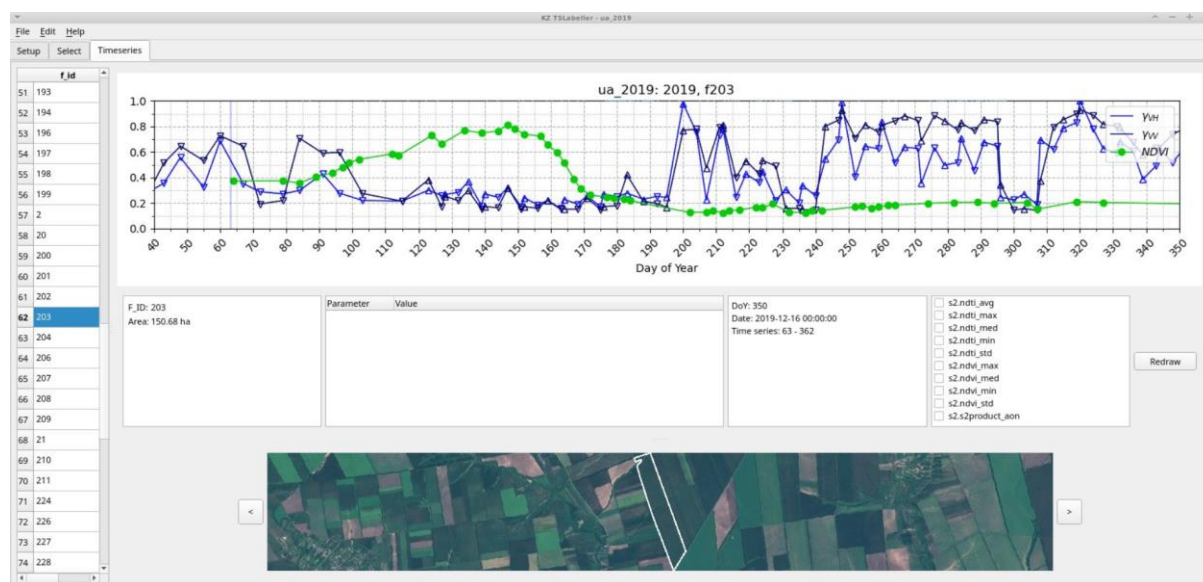


Joonis 15. KappaZeta serveris läbi viidud satelliidipiltide eeltöötlus.

Sentinel-1 andmete eeltöötluse käigus korrigeeriti orbiidi andmeid, suruti alla termilist müra ning rakendati geokodeerimise operaatorit. Viimase operatsiooniga viidi iga satelliidipildi punkt vastavusse maapinnal asuva punktiga ning projitseeriti raster UTM 36N (Universal Transverse Mercator) projektsiooni. Geokodeerimiseks kasutati SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) 1 kaaresekundilise lahutusvõimega kõrgusmudelit. Pärast geokodeerimist arvutati põllu piiridesse jäävate pikslite 12 päeva koherentsuse statistika VH ning VV polarisatsioonides. Statistika hõlmas endas miinimumi, maksimumi, keskmist, mediaani ja standardhälvet. Koherentsus arvutati paarikaupa 12 päevaste ajasammudega kahe järjestikku tuleva Sentinel-1 pildi vahel. Sentinel-2 L2A andmetele rakendati eeltöötlusena Sen2Cor pilvemask, mille käigus teisendati madalama lahutusega kanalid 10 m pikslisuuruse peale (*upsampling*) ning rakendati pilvemaski tulemuste parendamiseks lisafiltreid. Vegetatsiooniindeks NDVI arvutati Sentinel-2 B8 (NIR) ja B4 (RED) kanalitest kasutades selleks valemit 1. Kõige viimasena teostati KappaZetas 2019–2023 aastate S1 ja S2 andmete põhjal TSLabelleri konfiguratsioonide loomine (TSLabellerist loe lähemalt alapeatükis 2.2.3).

2.2.3. Aegridade sildistamine

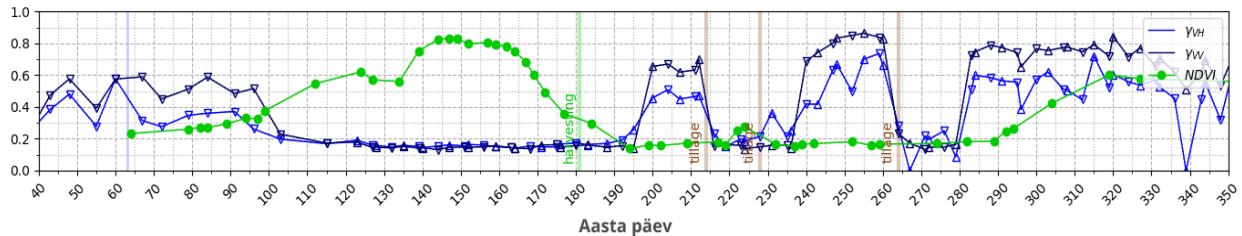
Antud magistritöö praktilise osa mahukaimaks ülesandeks oli künni ja saagikoristuse siltide märkimine. Kündmise alla kuuluvad kõik harimisviisid, mille käigus töödeldakse mulda füüsiliselt tööriistade ja seadmete abil, eesmärgiga luua paremad tingimused seemnete idanemiseks ja taimede kasvuks (Agwan, 2024). Saagikoristus on taime või selle majanduslikult kasuliku osa eemaldamine pärast valmimist (Ministry of Agriculture, Land and Fisheries, 2024). Kündmiste ja koristamiste märkimiseks kasutati KappaZeta arendatud aegridade sildistamise tarkvara TSLabeller (joonis 16). Põlluharimissündmuste sildistamiseks telliti KappaZetalt nii VV ja VH koherentsuse kui ka NDVI aegread. Peale põllu statistikute visualiseerimise, on TSLabelleris võimalik kasutada ka Sentinel Hub WMS (*Web Map Service*) kaudu Sentinel-2 õigevärvipilte (RGB: *red-green-blue*), tänu millele saab edukalt kontrollida, kas koherentsuse ja NDVI aegridu tõlgendati õigesti.



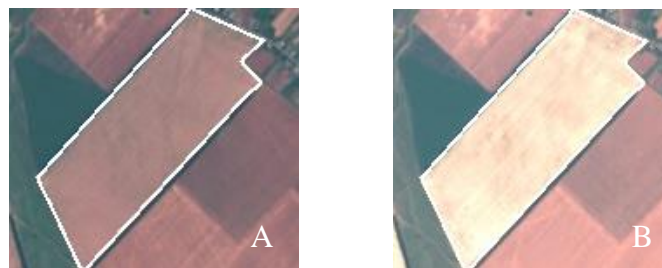
Joonis 16. Põldude sildistamise tarkvara TSLabeller. Tehtud kuvatõmmisel on vasakul pool näha põldude ID'd, millele klikkides ilmub konkreetse põllu aegrea aken koos selle keskmise NDVI (roheline joon) ning VV ja VH koherentsustega (hele/tume sinakad jooned). Aegrea all asuvate akende eesmärgiks on kuvada põllu ja põlluharimissündmustega seotud andmeid ning kõige alumises aknas kuvatakse WMS kaudu optilisi pilte.

Tänu keskmiste statistikute aegridadele, millelt on näha NDVI ning VV ja VH koherentsuse tõusu/langust, tulevad muutused põllul küllaltki selgelt esile. Shang et al. (2020) järgi kaasneb saagikoristamisega koherentsuse langus kohe peale põllul toimunud muutust ja koherentsus tõuseb siis, kui häiringud põllul on lõppenud (näiteks taime jäänuste kuivamisest tulenevad muutused tagasihajuvus signaalis). Saagikoristamisele vastavat signatuuri on hästi näha

joonisel 15 näitena toodud aegreal. TSLabelleris märgiti koristamine tarkvara kasutaja (st käesoleva töö autori poolt) rohelist värvi sildiga „harvesting“ (koristamine) kuupäevale 30.06.2019 ning joonisel 17 on toodud põld enne (A) ja pärast (B) koristust S2 RGB piltide kuvatõmmistena.



Joonis 17. TSLabelleris visualiseeritud põllu keskmise NDVI, VV ja VH koherentsuste aegrida, kus tarkvara kasutaja poolt omistatud roheline silt „harvesting“ märgib tarkvara kasutaja poolt aegridade ja Sentinel-2 optiliste piltide abil tuvastatud saagikoristamise kuupäeva ning helepruun „tillage“ silt kündmise kuupäeva.



Joonis 18. Sentinel-2 optilistelt piltidelt on näha põld enne (A) ja pärast (B) saagikoristust.

Sarnaselt saagikoristusele on ka kündmisele iseloomulik koherentsuse väärtuste kasv. Vastavalt Voormansik et al. (2020) ja Robertson et al. (2023) töödele, ilmneb kündmise puhul tendents, kus kõrge koherentsus vastab madalale NDVI-le ja vastupidi. Erinevalt saagi koristamisele, on kündmise ajaks NDVI väärtused madalamad ning maksimaalne koherentsuse väärtus saabub siis, kui värskelt küntud pinnas on lõplikult kuivanud ning kündmise järgsed tegevused, nagu näiteks väetamine on lõppenud (Voormansik et al., 2020). Eelmainitud töödele tuginedes on joonisel 19 TSLabelleris kündmised märgitud pruuni värvi siltidega „tillage“ (kündmine) kuupäevadele 02.06.2019, 16.08.2019 ja 21.09.2019.



Joonis 19. Sentinel-2 optilistelt piltidelt on näha põld enne (A) ja pärast (B) kündmist.

Kõik kündmise ja koristamise sildid salvestati koos vastava põllu ID ja nende toimumise kuupäevaga eraldi andmebaasi, kust need hiljem analüüsimiseks päringu kaudu eksporditi.

2.2.4. Sõja mõju põlluharimisündmuste sagedusele

Konflikti mõju ulatuse hindamiseks kasutati DeepStateMap 2023. aasta andmetele tuginedes paika pandud rindejoone asukohta. Esmalt loeti aastate kaupa kokku iga põllu künnid ja koristused kasutades selleks Python *Pandas* teeki ning seejärel liideti tulemus põldude ruumikuju atribuuttabeliga. Põldude ja rindejoone vahelise kauguse leidmine tehti avatud lähtekoodiga tarkvara QGIS abil. Selleks arvutati rindejoonele ühe kilomeetri tagant punktid „Points along geometry“ tööriistaga. Seejärel arvutati iga põllu kohta selle tsentroid tööriistaga „Centroids“ ja leidmaks põllu tsentroidide ja lähima rindejoone punkti vahemaa kasutati „Distance to nearest hub (points)“ tööriista. Tulemuseks saadi punktide ruumikuju kiht, mis sisaldas andmeid vastavate vahemaadega.

Põldude ja rindejoone kauguse ja sündmuste arvu vahelise seose leidmiseks viidi läbi Spearmani korrelatsioonianalüüs vabavaralise statistikatarkvaraga R selle integreeritud arenduskeskkonnas Rstudio. Korrelatsioonianalüüsiks kasutati „ggstatsplot“ teeki ja analüüsi meetodiks valiti „nonparametric“ ehk Spearmani korrelatsioonianalüüs.

2.2.5. Sõjast tingitud põlluharimissündmuste sesoonsuse muutused

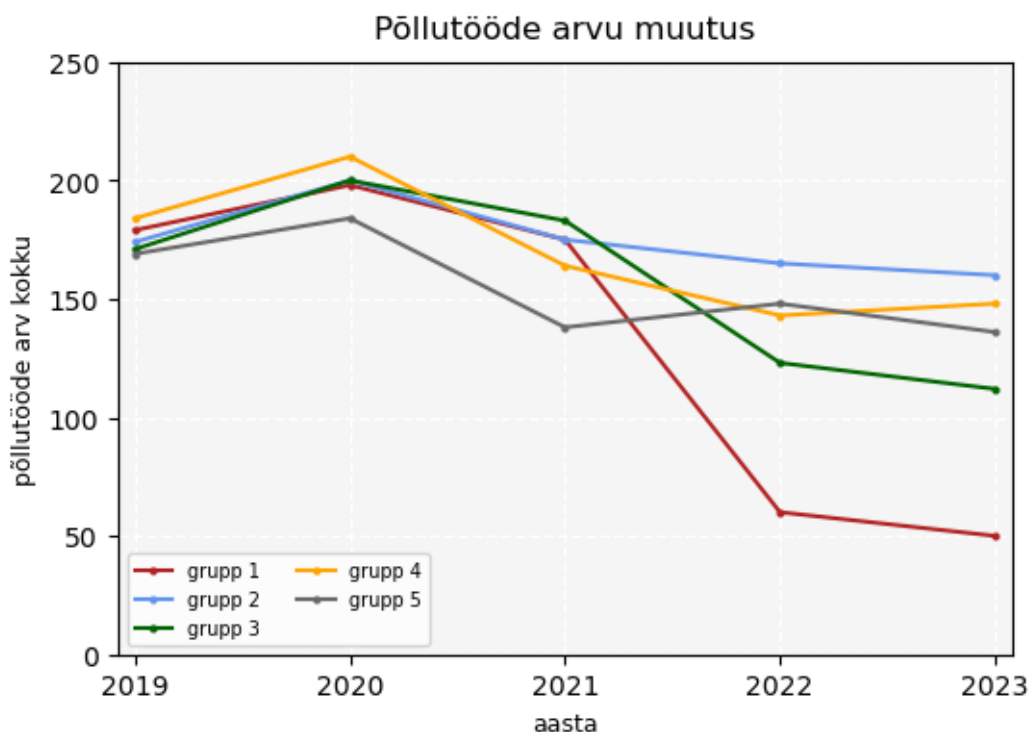
Põlluharimissündmuste sesoonsete mustrite tuvastamiseks võrreldi kündmist ja koristamiste kuupäevade varieeruvust alates NDVI maksimumi kuupäevast. Paremaks võrdlemiseks eristati esmalt üksteisest tali- ja suviviljad, kasutades sorteerimiseks Python *Pandas* ja visualiseerimiseks *Matplotlib* teeki. Taliviljade eraldamiseks suviviljadest kasutati NDVI väärtuste ja NDVI kasvule vastava perioodi ajalise paiknemise põhjal aegridade filtreerimist, mida seadistati vastavalt vajadusele. Kuna uurimisala põllud asuvad piirkonnas, kus kasvatatakse palju talinisu (joonis 1), siis taliviljade filtreerimisel toetuti Eriksson & Magnusson (2015) uuringule talinisu fenoloogias Ukrainas.

Enne põlluharimissündmuste sesoonsuse arvutamist kasutati NDVI aegridade silumist Savitzky-Golay filtri abil, mida näiteks Liu et al. (2017) kasutasid NDVI väärtuste silumiseks oma globaalses uuringus. Filtri eesmärgiks on ühtlustada NDVI kõverat ja kõrvaldada erandid. Seejärel arvutati iga aasta kohta selle silutud NDVI maksimum väärtuste ja põllu kündmistele ja koristamistele väärtuste vahele jäävate päevade arv kasutades selleks *Pandas* abi.

3. Tulemused

3.1. Põlluharimissündmuste arv

Magistritöös sildistati viie aasta peale kokku 3 949 põlluharimise sündmust, millest 2 712 moodustasid kündmised ja 1 237 koristamised. Sündmuste jaotumine põldude asukoha kategooriate järgi on näha joonisel 20.



Joonis 20. Põlluharimise sündmuste arv (künnid ja koristamised kokku) viies sõjategevuse paiknemise järgi klassifitseeritud uurimisgrupis enne ja pärast sõja algust.

Joonis 20 põhjal järeldub, et sõjaeelsetel aastatel olid kõik 5 gruppi võrreldavad. Sõja-aastatel (alates 2022) on rinde piirkonnas asuvatel põldudel põlluharimissündmuste arv oluliselt kahanenud. Ka rindest läheduses asuvatel põldudel on tegevuste arv kahanenud. Selgub, et hiljuti Venemaa poolt okupeeritud põldudel on põllutööde arv vähenenud rohkem kui teisel pool rinnet, Ukrainale kuuluvatel põldudel. Seevastu nii Venemaa kui Ukraina tagalas on näitajad sarnased ja sõja algus teiste gruppidega sarnast põlluharimissündmuste arvu langust kaasa ei too. Jooniselt on ka märgata, et võrreldes 2019. ja 2021. aastaga, oli 2020. aastal tehtud põllutööde arv kõigis uurimispiirkondades suurem. Üheks võimalikuks põhjuseks võib olla Kagu-Ukraina piirkonnas 2020. aastal olnud madalam sademete hulk (Tutiempo Network, 2024), võimaldades seega rohkem põllutöid teha.

3.2. Rindejoone kauguse ja põlluharimissündmuste arvu vaheline seos

Rindejoone kauguse ja põlluharimissündmuste arvu vahelise seose hindamiseks kasutati Spearmani korrelatsiooni, mille tulemused on näha tabelis 1. Spearmani korrelatsioon (vahemikus –1 kuni 1) mõõdab kahe muutuja vahelise seose tugevust ja suunda (Turney, 2022). Kuna seose tugevuse ja suuna tõlgendused võivad kohati varieeruda, kasutati levinuimat tõlgendusviisi (Turney, 2022).

Tabelis 1 on näha, et analüüsi valitud aastate hulgas ilmub sõja-aastatel (2022 ja 2023) põldude ja rindejoone vahelise kauguse ja põlluharimissündmuste arvu vahel mõõdukas positiivne seos, mis osutab, et mida lähemal põld rindejoonele asub, seda vähem on seda haritud. Sõjale eelnevatel aastatel 2019 ja 2020, ei esinenud seost tulevase rindejoone piirkonna ja põlluharimissündmuste arvu vahel. Seevastu 2021. aasta puhul on tegemist küll statistiliselt olulise, kuid nõrga negatiivse sidemega ($p < 0,001$).

Tabel 1. Põllu kaugus rindejoonest ja põlluharimissündmuste arvu seos enne ja pärast sõja algust.

Aasta	Spearmani korrelatsioon (r)	p-väärtus
2019	-0,04	0,47
2020	0,02	0,75
2021	-0,21	$p < 0,001$
2022	0,35	$p < 0,001$
2023	0,39	$p < 0,001$

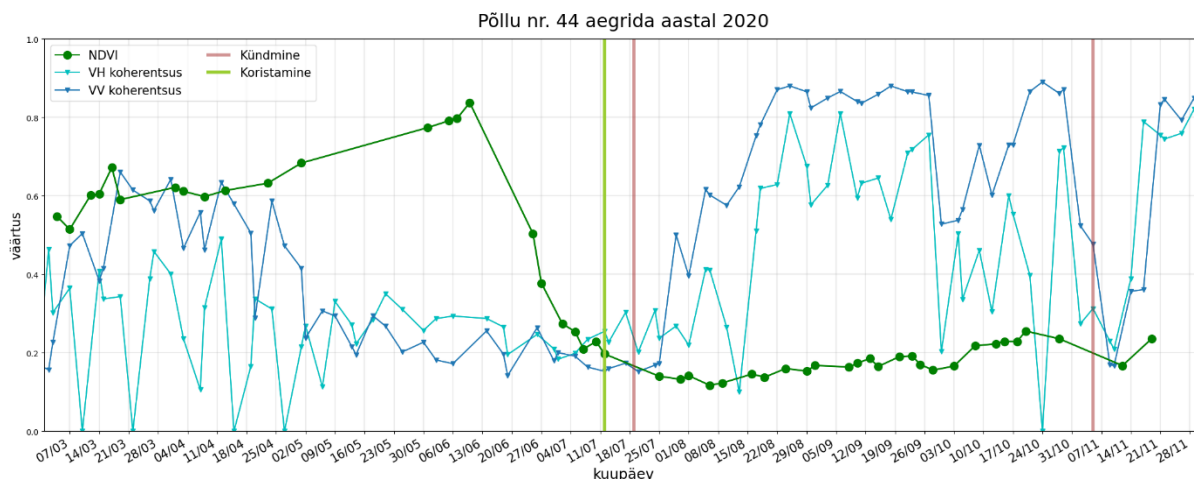
Sõja negatiivset mõju on näha ka erinevate aastate aegridade võrdlemisel. Näiteks põllul 44, mis asub sõjarinde piirkonnas, ilmnevad selgelt sõjast tingitud erinevused aastates enne ja pärast sõja algust.

Aastal 2019 on põld nr. 44 olnud söötis, mida iseloomustab kevade lõpus/suve alguses põllukultuurile mitteisoomulik aeglane NDVI kasv ja saagikoristuse puudumine (joonis 21). Põllu söötis oleku kinnitamiseks kontrolliti seda TSLabelleris optiliste piltidega Sentinel-2 RGB piltide pealt.



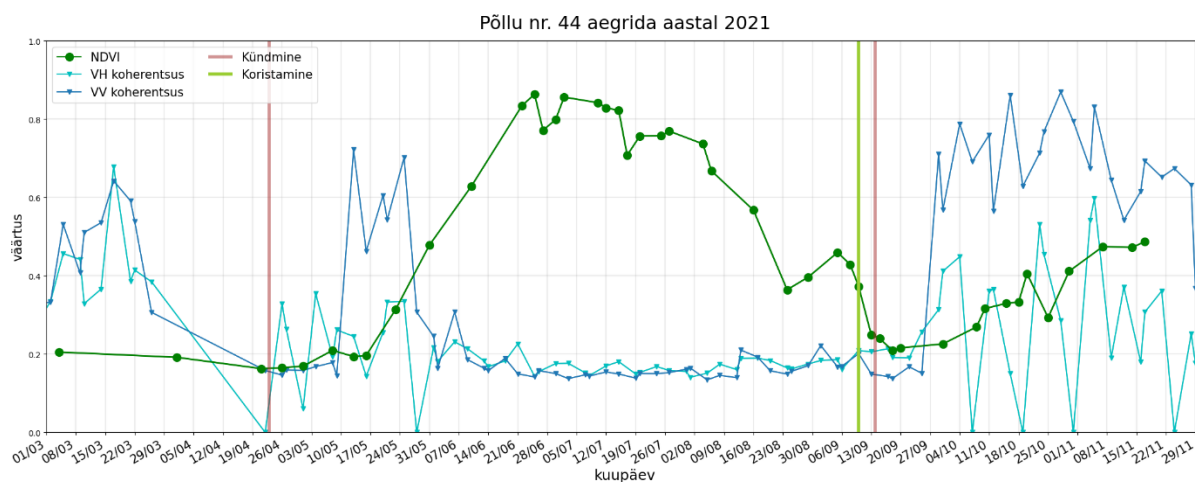
Joonis 21. Aegrida koos põldu nr. 44 iseloomustava NDVI, koherentsuse ning põlluharimisündmustega aastal 2019.

Aastal 2020 on põllul kasvatatud mõnda talivilja, mille tunneb ära varajase kõrge NDVI järgi (joonis 22). Põllul on tuvastatud ka 3 põlluharimissündmust, üks koristus ja kaks kündmist.



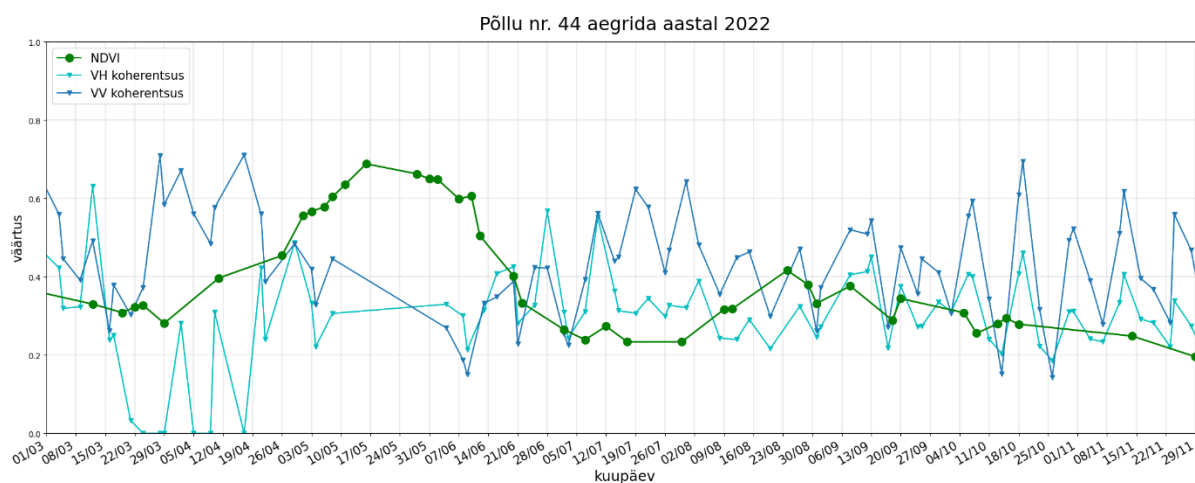
Joonis 22. Aegrida koos põldu nr. 44 iseloomustava NDVI, VV/VH koherentsuse ning põlluharimisündmustega aastal 2020.

Aastal 2021 on põllul kasvatatud suvilja, mida kinnitab taimekasvu kõvera järsk tõus suve alguses, mis saavutab oma maksimumi umbes suve keskpaigas (joonis 23). Sellel aastal künti põldu kaks korda – üks kord enne suve ja teine pärast saagikoristust.



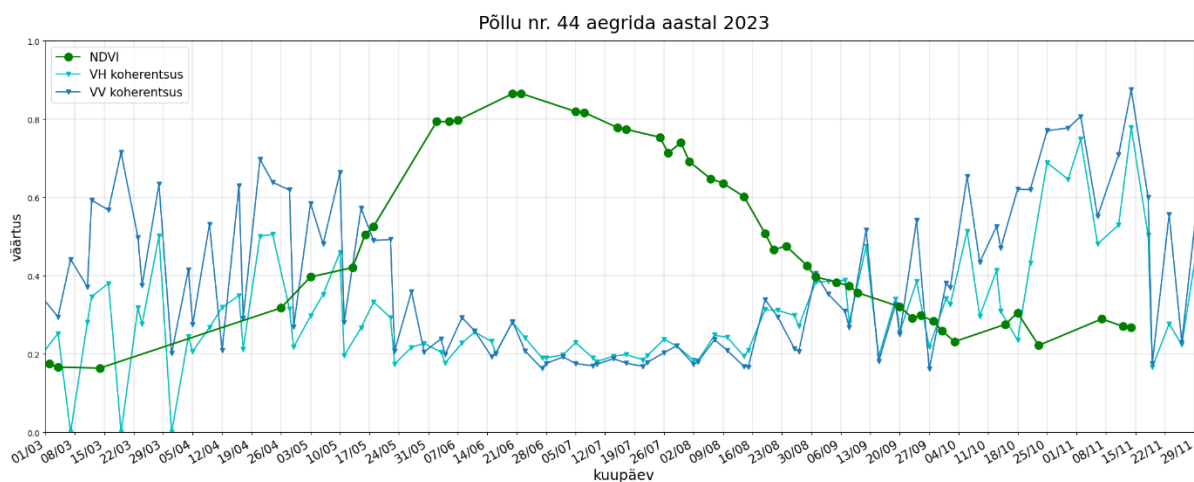
Joonis 23. Aegrida koos põldu nr. 44 iseloomustava NDVI, VV/VH koherentsuse ning põlluharimisündmustega aastal 2021.

Aastal 2022 on põllul kasvatatud talivilja, kuid sõja tõttu on jäänud ära nii saagikoristus kui ka koristusjärgsed kündmised (joonis 24). Seda kinnitavad Sentinel-1 aegridadest puuduvad põllu-harimisele omased koherentsuse pikema ajaperioodi jooksul püsivad madalad ja kõrged väärtused.



Joonis 24. Aegrida koos põldu nr. 44 iseloomustava NDVI, VV/VH koherentsusega 2022. aastal.

Kuigi 2023. aasta NDVI kõver võib esmapilgul tunda teistpidi osundavat, siis kontrollides S2 RGB piltidelt ei ole põllul tollel aastal kultuurtaime kasvatatud (joonis 25). Seda kinnitab ka koherentsuse aegridades puuduvad kündmise ja koristamise tagajärjel tekkivad langused.

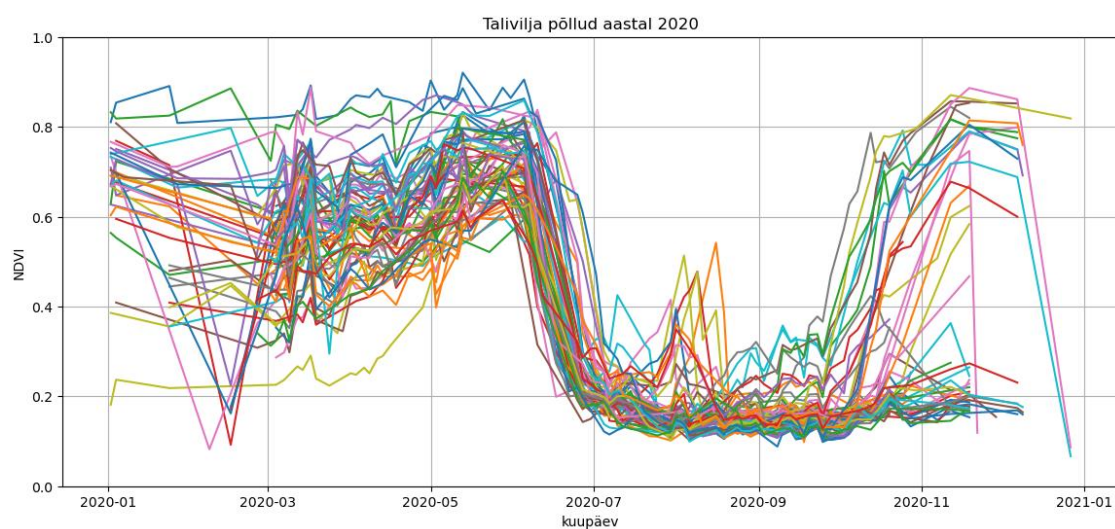


Joonis 25. Aegrida koos põldu nr. 44 iseloomustava NDVI, VV/VH koherentsusega 2023. aastal.

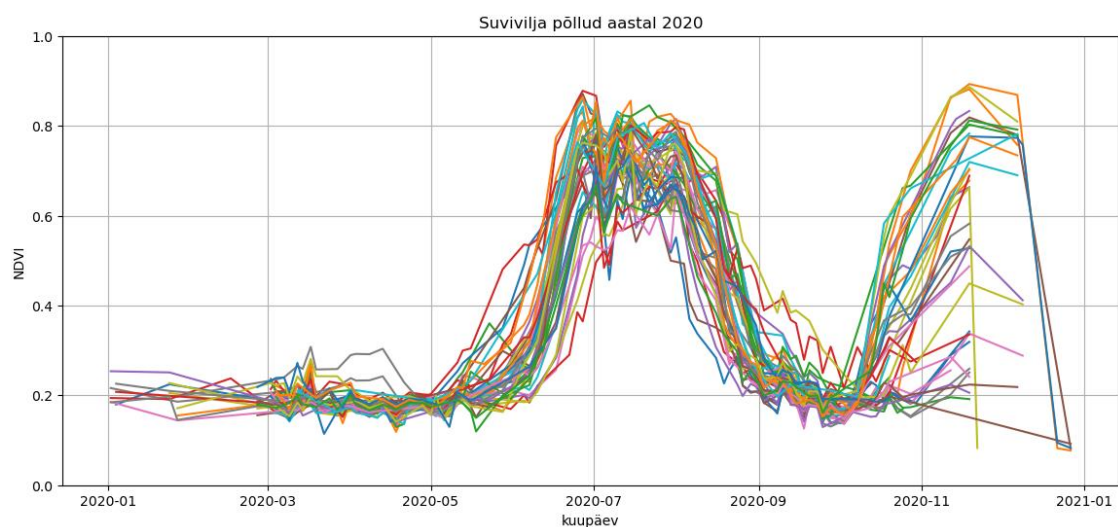
Asudes aktiivses sõjapiirkonnas, on põld nr. 44 aastaks 2023 täielikult hüljatud ning põldu katavad nüüd umbrohi, kaevikud ning suure tõenäosusega ohtlikud miinid.

3.3. Taliviljade eraldamine suviviljadest

Tuvastamaks muutuseid põldude koristamise ja kündmise ajalises varieeruvuses, eristati üksteisest tali- ja suviviljad, tuginedes Eriksson & Magnusson (2015) tööle talinisu fenoloogia uuringutest Ukrainas. Taliviljade filtreerimise tulemusel nimekirjast välja jäänud põllud loeti suviviljadeks. Filtreerimise tulemuse näited on joonistel 26 ja 27.



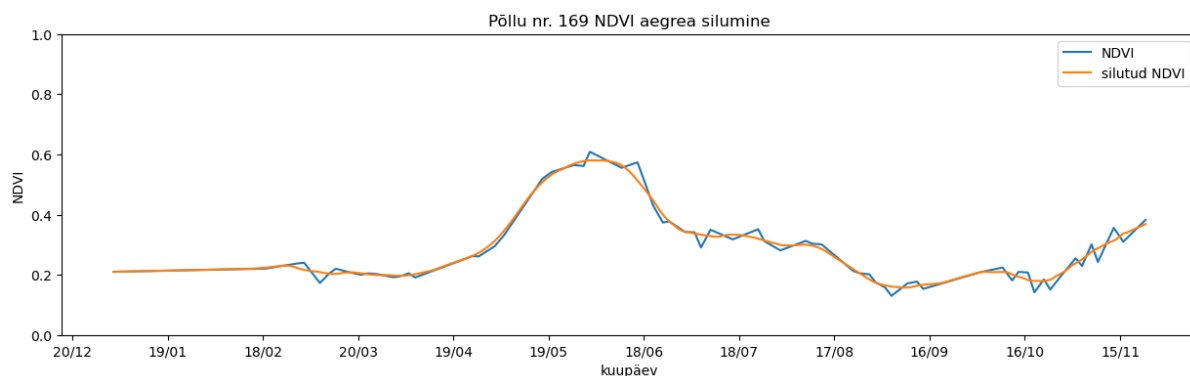
Joonis 26. Aegridade filtreerimise tulemusel eraldatud 2020. aasta taliviljade aegridad.



Joonis 27. Aegridade filtreerimise tulemusel eraldatud 2020. aasta suviviljade aegread.

Tulemusest tuleb selgesti esile tali- ja suviviljade aegridade erinevus. Taliviljade puhul esineb kõrge NDVI aasta alguses ning suviviljad saavutavad oma NDVI maksimumi suve keskel.

NDVI enne ja pärast Savitzky-Golay filtriga silumist on näha joonisel 28.



Joonis 28. Näitena toodud põllu nr. 169 NDVI aegrea silumise tulemus 14 päevase akna kasutamisel.

Tulemusest on näha, kuidas aegrea silumine leevendab järske NDVI kõikumisi, mis võivad olla põhjustatud näiteks pilvemaski vigadest.

3.4. Põlluharimissündmuste sesoonsuse muutused

Pärast tali- ja suviviljade üksteisest eraldamist ja NDVI silumist, arvutati iga põllu NDVI maksimum väärtuse ja põllutööde kuupäevade vahele jäävate päevade arv. Sõjarinde piirkonnas asuvate tali- ja suvivilja põldude (grupp 1) NDVI maksimumi ja sündmuste vahelise päevade arvu ajaline jaotus päevades on näha lisas 2. Karpdiagrammil tähistab kast

interkvartiilset vahemikku (*Interquartile range* – IQR) ning katab keskmist 50% andmetest. Kasti sees olev joon tähistab andmete mediaani ning kastidest välja ulatuvad vurrud iseloomustavad andmekogumi vahemikku (mitte rohkem kui 1,5 korda IQR kastist (R Documentation, 2019)), millest väljapoole jäävad erindid. Mediaani ümbritsev sälk näitab 95% usaldusvahemikku mediaani ümber, mis annab aimu vahemikust, millesse tegelik mediaan tõenäoliselt langeb. Kui kahe kasti sälgud ei kattu, viitab see kahe rühma mediaanide statistiliselt olulisele erinevusele. See on visuaalne näitaja, et tõenäoliselt ei ole erinevus tekkinud juhuslikult, kuigi seda ei tohiks pidada formaalseks testiks (Chambers, 2018; R Documentation, 2019).

Lisas 2 toodud rinde piirkondi iseloomustavate karpdiagrammide põhjal selgub, et 2022. aasta talivilja põldude saagikoristuste mediaan päevade arv NDVI maksimumist on Mann–Whitney U testi järgi võrreldes 2019 ($p < 0.05$), 2020 ($p < 0.01$) ja 2021 ($p < 0.001$) aastatega oluliselt erinev. Seevastu 2023. aasta erines oluliselt vaid 2019. ja 2020. aastast, kuid mitte 2021. aastast. Selle põhjuseks võib olla 2023. aastal rinde piirkonnas toimunud vähem saagikoristusi ning koristusajas esinenud erindid, mis suurendasid päevade arvu varieeruvust. Suvivilja koristustes ei esinenud aastate vahelisi statistiliselt olulisi erinevusi. Tali- ja suvivilja kündmistepuhul ei ilmne samuti märkimisväärseid erinevusi. Põhjus võib olla selles, et erinevalt saagikoristusest, on kündmistepuhul juba oma iseloomu poolest rohkem varieeruvad.

Lisas 3 toodud rindejoone läheduses asuva Ukrainale kuuluva ala analüüsist selgub, et aastal 2023 on võrreldes varasemate aastatega talivilja koristamised suurema ajalise varieeruvusega ning peale selle toimunud ka oluliselt hiljem. Suvivilja koristuste ajalises varieeruvuses ei esine aastate lõikes statistiliselt olulisi erinevusi. Ka tali- ja suvivilja kündmistepuhulises jaotuses ei ilmne aastaid omavahel võrreldes suuri muutusi.

Lisas 4 on rindejoone lähedal asuvat Venemaa okupeeritud ala iseloomustavad karpdiagrammid. Selgub, et sarnaselt rinde lähedal asuva Ukraina poolega, on 2023. aastal just talivilja koristamised toimunud sõjale eelnevate aastatega võrreldes hiljem ning rohkem varieeruvad koristamiste ja NDVI maksimumi vahele jäävate päevade arvus. Suvivilja koristuste puhul ei esine jällegi aastate vahel märkimisväärseid seoseid. Talivilja kündmistepuhul ei esine jällegi aastate vahel statistiliselt olulisi erinevusi. Seevastu on 2023. aasta suviviljade kündmistepuhul ja 2020. ning 2019. aasta kündmistepuhul üksteisest statistiliselt oluliselt erinevad, kuna mõlema puhul on p-väärtused $< 0,05$.

Lisa 5 põhjal selgub, et Ukraina tagalas asuvate talivilja põldude sõja-aastatel tehtud koristamistes ei esine statistiliselt olulist erinevust võrreldes 2021. ja 2020. aastaga. Seevastu ilmnevad 2019. aasta koristamiste ja kõigi ülejäänud nelja aasta vahel statistiliselt olulised

seosed. Ukraina tagala suvivilja põldudel ei ole enamuses juhtudel erinevate aastate saagikoristuste vahel olulist erinevust, väljaarvatud aasta 2022, mis erineb ülejäänud aastatest statistiliselt oluliselt. Nii tali- kui ka suviviljade kündmistel puhul esineb erinevatel aastatel mõningaid statistiliselt olulisi erinevusi, kuid mitte niivõrd sõjale eelnevate ja sõja aegsete aastate vahel.

Lisa 6 põhjal selgub, et Vene tagalas Krimmis on 2022. aasta talivilja koristused statistiliselt oluliselt erinevad aastatest 2020 ($p < 0.001$), 2021 ($p < 0.001$) ja 2023 ($p < 0.01$). Seevastu ei erine 2022. saagikoristused oluliselt 2019. aasta omadest. Ka suvivilja koristused ning tali- ja suvivilja kündmistel vahel puuduvad statistiliselt olulised erinevused.

3.5. Põlluharimissündmuste sesoonsuse muutused aegriidade visuaalsel võrdlusel

Kuna analüüsi valitud põldude ja nendel toimunud põllutööde arv oli võrdlemiseks suur ning nende kuupäevad olid juba iseenesest varieeruvad, siis võis arvata, et statistiliste meetodite analüüsi teel ei pruugi muutused kuigi selgelt välja tulla. Seevastu oli põllutööde sildistamise käigus märgata sõja aastatel mõningaid ebaharilikke saagikoristuste aegu. Näiteks joonisel 29 on võrreldud sama piirkonna talivilja põldude künni- ja koristuskuupäevi nii sõjale eelnenud perioodil kui ka sõja ajal. Sedaviisi aegriidu omavahel võrreldes on hästi märgata, kuidas sõja ajal on põldu ebatavaliselt hilja koristatud, lisaks ei ole põldu peale saagikoristust küntud.

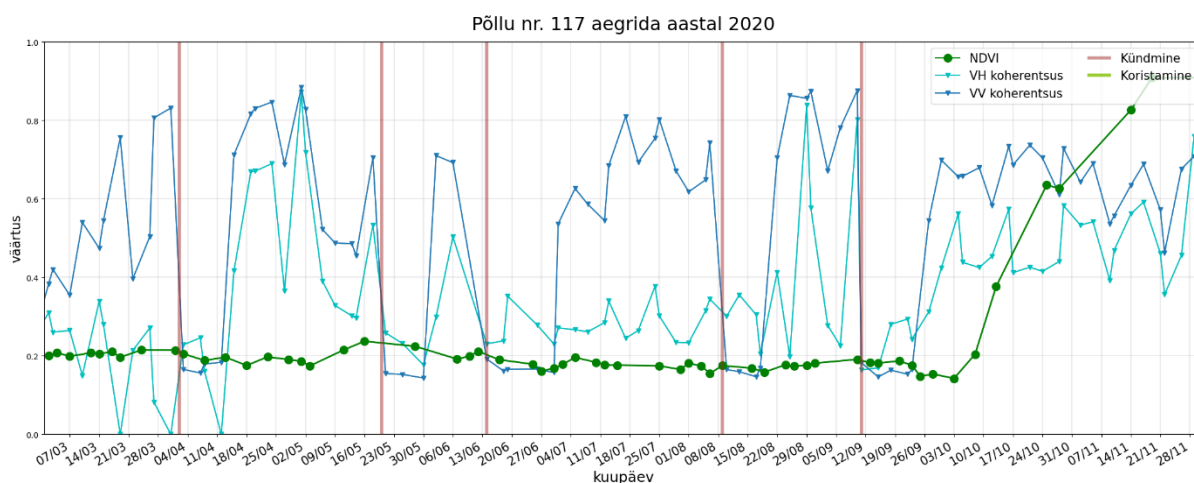


Joonis 29. Aastal 2020 on põllul nr. 54 (A) toimunud talivilja koristus varem kui samast piirkonnast pärit talivilja põllul aastal 2022 (B). Samuti on sõja ajal põldu küntud vähem kui sõjale eelneval, 2020. aastal.

Põhjuseks võib pidada koristusperioodil (juulis) põllutöid takistanud Vene rünnakud, mille toimumist kinnitavad ka erinevad ametlikud allikad nagu näiteks Ukraina Pravda (Ukrainska Pravda, 2022) ja ACLED andmed. Vene rünnakud Zaporižžja oblastis asuva Huliaipoli linna pihta 12. juulil 2022, põhjustasid ümberkaudsetes piirkondades mitmeid põlenguid ning ligikaudu 600 ha jagu teravilja hävimist (Ukrainska Pravda, 2022). Hoolimata sellest, et rünnakud keetsid nr. 113 põllu lähedal veel mitu nädalat edasi (Ukrinform, 2022) ning mille tõttu oli põllule minek ohtlik, õnnestus saak siiski ära koristada (lisa 7).

3.6. Sööti jäetud põldude osakaalu muutus

Sööti jäetud põllumaadeks loeti neid põlde, mille aegridades ei ilmnenud põllukultuurile kohast NDVI kõvera kuju koos saagi küpsemisperioodi ja koristusega ning samuti suvised mustkesa põllud. Joonisel 30 on näitena toodud 2020. aastal mustkesas hoitud põld.



Joonis 30. Mustkesa põld aastal 2020, millel on korduvalt erinevaid kündmise alla kuuluvaid mullatöid tehtud, et see kevadest kuni sügisese talivilja külvamiseni umbrohtudest puhas hoida.

Sööti jäetud põldude osakaalu muutus on toodud tabelis 2.

Tabel 2. Sööti põldude osakaalu muutus aastatel 2019–2023.

Aasta	2019	2020	2021	2022	2023
Osakaal	6,7%	5,3%	4,3%	7,7%	10%

Tabel 2 põhjal selgub, et sõja aastatel on söötis põldude arv kasvanud. Põhjuseks võib pidada nii sõjast tingitud otseseid häiringuid kui ka üldiselt ebakindlat aega Ukraina põllumajanduses, tekitades olukorra, kus põllumeestel võivad puududa ressursid ja ka kindlustunne, et põldudele midagi külvata.

Arutelu

Kaugseire meetodite kasutamine on tõhus viis põllumajanduslike muutuste tuvastamiseks tänu selle kõrgele ajalisele ja ruumilisele lahutusvõimele (Skakun et al., 2019). Sarnaselt teiste uurimistööde tulemustega (Voormansik et al., 2020; Shang et al., 2020), on interferomeetrilise tehisavaradari Sentinel-1 koherentsuse ja Sentinel-2 NDVI aegridade sidumise teel võimalik tuvastada erinevaid põlluharimissündmusi, nagu näiteks kündmist ja koristust. Ukraina-Venemaa sõja olukorras on kaugseire parim ja ka turvalisem viis põllumajanduse olukorrast õigeaegse ülevaate saamiseks.

Tulemustest selgus, et sõja-aastatel on nii rindel kui ka selle lähedal asuvatel põldudel põlluharimissündmuste arv kahanenud. Seevastu Vene ja Ukraina tagalas ei ole olulist muutust märgata. Kuigi põlluharimissündmuste esinemist võivad mõjutada mitmed tegurid, võiski eeldada, et sõjale eelnevatel aastatel rindejoone kauguse ja põlluharimissündmuste arvu vahel seos puudub ning et sõja-aastatel esineb nende vahel positiivne seos.

Uurimistöö üheks püstitatud hüpoteesiks oli rinde vahetus läheduses toimunud põlluharimissündmuste häiringud, mis paistavad silma tavaolukorrale vastavate sündmuste sesoonsete mustrite puudumises ning mille asemel esinevad hoopis sõjast tingitud katkestused. Aegridade visuaalse võrdluse teel tulid põlluharimissündmuste erinevused enne ja pärast sõja algust hästi välja. Joonisel 29 on toodud aastate 2020 ja 2022 võrdlusena samast piirkonnast pärit kahe talivilja aegread, mis erinesid üksteisest nende põlluharimissündmuste omaduste poolest. Seevastu mitmeid põlluharimissündmuseid korraga käsitledes ei pruugi alati seosed ilmned ka seal, kus võiks neid kõige rohkem oodata. Analüüsid kündmist ja koristamist ajalise varieeruvuse tuleks arvestada ka muid tegureid, nagu aastati erinevaid ilmastikutingimusi või põlluharimismeetoditele iseloomulikke eripärasid. Näiteks kündmistele on iseloomulik suurem ajaline varieeruvus võrreldes saagikoristusega.

Analüüsid muutuseid põlluharimissündmuste sesoonsuses, tõusis 2023. aasta rinde lähedal asuvate piirkondade ajalises jaotuses esile ülejäänud aastatega võrreldes suurem varieeruvus taliviljade saagikoristustes. Üheks põhjuseks võib olla 2023. aasta suvel Zaporizžja piirkonnas toimunud suur Ukraina vägede vasturünnak (Eric, 2023), mille tõttu oli häiritud taliviljade tavapärasel ajal koristamine.

Tasub ka meeles pidada, et kahe SAR'i võtte vahelise aja jooksul ei pruugi põllu seisund muutuda vaid põlluharimistööde tõttu. Koherentsuse langust võib segi ajada ka näiteks ilmastikusündmustest (vihm, lumi) tekkinud muutustega (Robertson et al., 2023). Selle kitsaskoha ületamiseks tasub analüüsi kaasata mitu erinevat RON'i, kuna erinevalt

põllumajandussündmusest, mis mõjutab ühte andmepunkti kõigis RON'ides, mõjutab vihm vaid ühe RON'i andmepunkte (Voormansik et al., 2020).

Kokkuvõte

Magistritöö eesmärgiks oli uurida Vene–Ukraina sõja mõju Ukraina põllumajandusele optilise ja radarkaugseire vahenditele tuginedes. Töös tuvastati Sentinel-1 ja Sentinel-2 aegridade alusel muutused künni ja saagikoristuse sündmustes, mis on aset leidnud Ukrainas sõja ajal võrreldes sõjale eelnenud perioodiga. Põldude ruumikujud saadi OpenStreetMapist ning sõja mõju kauguse hindamiseks kasutati ACLED andmeid.

Töö on aktuaalne, sest peamised sõjategevuse tõttu kahjustada saanud alad jäävad Ukrainas intensiivse põllumajandusega piirkondadesse ning tänu kõrgele ajalisele ja ruumilisele lahutusele on kaugseire tõhusaks viisiks mõistmaks sõja negatiivse mõju ulatust. Lisaks ei ole magistritöö valmimise hetkeks varem optilise ja radarsatelliidi andmeid kombineerides uuritud sõja mõju põldude harimisele Ukrainas.

Magistritöö metoodika osa hõlmas Sentinel-1 ja Sentinel-2 aegridade alusel künni ja saagikoristuse siltide märkimist. Seejärel analüüsiti erinevaid meetodeid kasutades sildistatud põlluharimissündmuste ja relvastatud konflikti omavahelisi seoseid, võttes arvesse põldude kaugust rindest.

Uurimistöö peamised küsimused said vastatud. Sõja-aastatel on nii rinde kui ka selle lähedal asuvatel põldudel põlluharimissündmuste arv vähenenud. Seevastu Venemaa ja Ukraina tagalas ei ole sõda põlluharimissündmuste arvus olulist langust põhjustanud. Kahest püstitatud hüpoteesist osutus tõseks väide, et mida kaugemal aktiivsest rindest, seda vähem esineb sõjast tingitud häiringuid. Teine püstitatud hüpotees täielikult tõseks ei osutunud. Rinde läheduses on kõige rohkem häiritud taliviljade koristus, vahetevahel ka suviviljade koristus. Seevastu ei taliviljade ega suviviljade kündmistele ajalisel jaotuses ei ilmnenud sõjast tingitud olulisi erinevusi.

Magistritöö tulemused näitavad, et Sentinel-1 koherentsuse ja Sentinel-2 NDVI aegridade sidumise abil tuvastatud põlluharimissündmused on eristatavad sõjast põhjustatud häiringutest. Tööst selgus ka, et sõja mõju on suurim rinde lähedal, kuid ei mõjuta oluliselt tagala piirkondi, võimaldades seal põlluharimisega jätkata. Lisaks tuvastati rinde läheduses talivilja põldudelt saagikoristuse suur erinevus võrreldes sõjale eelnevate aastatega.

The impact of the war on Ukrainian agriculture in terms of optical and radar remote sensing

Mariana Rohtsalu

Summary

The aim of the thesis was to study the impact of the Russian-Ukrainian war on Ukrainian agriculture based on optical and radar remote sensing tools. Based on Sentinel-1 and Sentinel-2 time series, the work identified changes in tillage and harvesting events that have occurred in Ukraine during the war compared to the period before the war. Spatial shapes of the fields were obtained from OpenStreetMap, and ACLED data was used to estimate the distance of the impact of the war.

The work is relevant because the main war-damaged areas in Ukraine remain in intensively agricultural areas, and due to the high temporal and spatial resolution, remote sensing is an effective way to understand the extent of the negative impact of war. In addition, at the time of completion of the master's thesis, the impact of war on field cultivation in Ukraine has not been investigated by combining optical and radar satellite data.

The methodological part of the master's thesis included the marking of tillage and harvesting labels based on Sentinel-1 and Sentinel-2 time series. Then, using different methods, the correlations between the labeled farming events and the armed conflict were analyzed, taking into account the distance of the fields from the front.

The main research questions were answered. During the war years, the number of farming events has decreased both on the front and in the fields near it. On the other hand, in the rear of Russia and Ukraine, the war has not caused a significant decrease in the number of farming events. Of the two hypotheses, the statement that the farther from the active front, the less war-related disturbances occur, turned out to be true. The second hypothesis did not turn out to be completely true. In the vicinity of the front, the harvesting of winter crops is the most disturbed, occasionally also the harvesting of summer crops. On the other hand, there were no significant differences due to the war in the temporal distribution of tillage for either winter crops or summer crops.

The results of the master's thesis show that cropping events detected by linking Sentinel-1 coherence and Sentinel-2 NDVI time series are distinguishable from war-induced disturbances. The work also revealed that the impact of the war is greatest near the front, but does not significantly affect the rear areas, allowing farming to continue there. In addition, a large

difference in the harvest from the fields of winter crops near the front was detected compared to the years before the war.

Tänuavaldused

Soovin tänada oma juhendajaid Tauri Tampuud ja Raivo Aunapit, kes andsid magistritöö kirjutamise ajal nõu ja jagasid oma soovitusi. Samuti soovin tänada KappaZetast Mihkel Vesket ja Indrek Sünterit, kes olid mulle suureks abiks.

Kasutatud kirjandus

- Agwan, A. (2024). Tillage. <https://krishilearning.com/tillage/> (viimati vaadatud 19.05.2024)
- All About Feed. (2023). Ukrainian grain export to level out thanks to alternative routes. <https://www.allaboutfeed.net/animal-feed/raw-materials/ukrainian-grain-export-to-level-out-thanks-to-alternative-routes/> (viimati vaadatud 11.01.2024)
- 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.
- Auravant. (2024). Vegetation indices and their interpretation: NDVI, GNDVI, MSAVI2, NDRE, and NDWI. <https://www.auravant.com/en/articles/precision-agriculture/vegetation-indices-and-their-interpretation-ndvi-gndvi-msavi2-ndre-and-ndwi/> (viimati vaadatud 14.04.2024)
- Balaji, P. (2023). Decoding Synthetic Aperture Radar (SAR) remote sensing: SAR Series Part 1: Getting started. Medium. <https://medium.com/@preet.balaji20/decoding-synthetic-aperture-radar-sar-remote-sensing-sar-series-part-1-getting-started-d3409eb3b2e3> (viimati vaadatud 25.03.2024)
- Bamler, R., & Hartl, P. (1998). Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Problems*, 14(4), R1.
- Bannari, A., Morin, D., Bonn, F., & Huete, A. (1995). A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews*, 13(1–2), 95–120.
- Basso, B., Cammarano, D., De Vita, P., & others. (2004). Remotely sensed vegetation indices: Theory and applications for crop management. *Rivista Italiana Di Agrometeorologia*, 1(5), 36–53.
- Berger, M., Moreno, J., Johannessen, J. A., Levelt, P. F., & Hanssen, R. F. (2012). ESA's sentinel missions in support of Earth system science. *Remote Sensing of Environment*, 120, 84–90.
- Brzezinski, B. (2024). Russia is winning the global grain war. Politico. <https://www.politico.eu/article/russia-winning-global-grain-war-farmer-ukraine-putin-agriculture/> (viimati vaadatud 21.03.2024)
- Bullock, D. G. (1992). Crop rotation. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 11(4), 309–326.
- Case, P. (2024). Ukraine war: Farmers fight for survival two years on. Farmers weekly. <https://www.fwi.co.uk/news/ukraine-war-farmers-fight-for-survival-two-years-on> (viimati vaadatud 21.03.2024)
- Chambers, J. M. (2018). Graphical methods for data analysis. Chapman and Hall/CRC.

- Climates to travel. (2024). Climate – Ukraine. <https://www.climatestotravel.com/climate/ukraine> (viimati vaadatud 15.05.2024)
- Copernicus. (2022). Copernicus DEM - Global and European Digital Elevation Model (COP-DEM). <https://spacedata.copernicus.eu/collections/copernicus-digital-elevation-model> (viimati vaadatud 31.03.2024)
- Council of the European Union. (2023). Infographic - How the Russian invasion of Ukraine has further aggravated the global food crisis. <https://www.consilium.europa.eu/en/infographics/how-the-russian-invasion-of-ukraine-has-further-aggravated-the-global-food-crisis/> (viimati vaadatud 21.01.2024)
- Council of the European Union. (2024). Infographic - Ukrainian grain exports explained. <https://www.consilium.europa.eu/en/infographics/ukrainian-grain-exports-explained/> (viimati vaadatud 06.03.2024)
- Creodias. (2024). Remote transfer for EODATA, https://creodias.eu/eobased-services/remote-transfer-for-eodata/?gad_source=1&gclid=CjwKCAjww_iwBhApEiwAuG6ccK9IpHbWehjFsdKKPsILqCqKCmRL2F4nEtgaAnwg8pGf01flQnhxQhoCoE8QAvD_BwE (viimati vaadatud 08.04.2024)
- CRISP. (2001). Microwave Remote Sensing. <https://crisp.nus.edu.sg/~research/tutorial/mw.htm> (viimati vaadatud 26.03.2024)
- Davidson, K., Facini, A. (2024). The Russia-Ukraine War Report Card, May 14, 2024. Russia Matters., <https://www.russiamatters.org/news/russia-ukraine-war-report-card/russia-ukraine-war-report-card-may-14-2024> (viimati vaadatud 20.05.2024)
- DeepStateMap. (2024). <https://deepstatemap.live/en#11/47.5327/35.8353> (viimati vaadatud 17.04.2024)
- Donley, A. (2024). Ukraine grain exports on the rise. World-Grain. <https://www.world-grain.com/articles/19589-ukraine-grain-exports-on-the-rise> (viimati vaadatud 11.01.2024)
- Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., & others. (2012). Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25–36.
- Economics Observatory. (2024). Update: how is the war in Ukraine affecting global food prices? <https://www.economicsobservatory.com/update-how-is-the-war-ukraine-affecting-global-food-prices> (viimati vaadatud 15.05.2024)

- ESA. (2024). Sentinel Application Platform SNAP. European Space Agency (ESA). <http://step.esa.int/main/toolboxes/snap/> (viimati vaadatud 12.04.2024)
- European Space Agency. (2012). Sentinel-1: ESA's Radar Observatory Mission for GMES Operational Services.
- Feingold, S. (2022). Ukraine's food exports by the numbers. World Economic Forum. <https://www.weforum.org/agenda/2022/07/ukraine-s-food-exports-by-the-numbers/> (viimati vaadatud 17.01.2024)
- Ferretti, A., Monti-Guarnieri, A., Prati, C., Rocca, F., & Massonet, D. (2007). *InSAR principles-guidelines for SAR interferometry processing and interpretation* (Vol. 19).
- Gatti, A., & Bertolini, A. (2018). Sentinel-2 products specification document. *Thales Alenia Sp*, 1–487.
- Gatti, A., & Bertolini, A. (2018). Sentinel-2 products specification document. *Thales Alenia Sp*, 1–487.
- GISGeography. (2024). Sentinel 2 Bands and Combinations. <https://gisgeography.com/sentinel-2-bands-combinations/> (viimati vaadatud 19.02.2024)
- Good, K. (2022). A Closer Look at Ukrainian Corn and Wheat Exports - Recent USDA Reports. Farm Policy News. <https://farmpolicynews.illinois.edu/2022/02/a-closer-look-at-ukrainian-corn-and-wheat-exports-recent-usda-reports/> (viimati vaadatud 19.05.2024)
- Granados, S., Sampson, E. (2023). Ukraine is now the most mined country in the world. Washington Post. <https://www.washingtonpost.com/world/2023/07/22/ukraine-is-now-most-mined-country-it-will-take-decades-make-safe/> (viimati vaadatud 16.05.2024)
- Gro Intelligence. (2024). Ukraine Grain Exports Reach Highest Levels Since the War Began. <https://www.gro-intelligence.com/insights/ukraine-grain-exports-reach-highest-levels-since-the-war-began> (viimati vaadatud 11.01.2024)
- Guillaume, H., Bourbigot, M., Johnsen, H., & Piantanida, R. (2021). Sentinel-1 Product Specification. *S-1 Mission Performance Centre*, 1–209
- He, T., Zhang, M., Xiao, W., Zhai, G., Wang, Y., Guo, A., & Wu, C. (2023). Quantitative analysis of abandonment and grain production loss under armed conflict in Ukraine. *Journal of Cleaner Production*, 412, 137367.
- Hendrix, C., & Brinkman, H.-J. (2013). Food insecurity and conflict dynamics: Causal linkages and complex feedbacks. *Stability: International Journal of Security and Development*, 2(2), 26–26.
- Hosseini, M., Becker-Reshef, I., Khabbazan, S., Wagner, J., Nair, S., Sadeh, Y., ... & Eilerts, G. (2023). Rapid Response Crop Planting Detection over Ukraine using Synthetic

- Aperture Radar. In IGARSS 2023-2023 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (pp. 1768-1770). IEEE.
- Jackson, R. D., & Huete, A. R. (1991). Interpreting vegetation indices. *Preventive Veterinary Medicine*, 11(3–4), 185–200.
- Justin Meyers. (2015). Sentinel-2 Shapefile Index. <https://github.com/justinelliottmeyers/Sentinel-2-Shapefile-Index> (viimati vaadatud 10.04.2024)
- Kassouk, Z., Zayani, H., Mougenot, B., Mabrouki, R., & Lili-Chabaane, Z. (2020). Detection of tillage areas and periods using high spatial resolution optical image time series. *2020 Mediterranean and Middle-East Geoscience and Remote Sensing Symposium (M2GARSS)*, 334–337.
- Kussul, N., Drozd, S., Yailymova, H., Shelestov, A., Lemoine, G., & Deininger, K. (2023). Assessing damage to agricultural fields from military actions in Ukraine: An integrated approach using statistical indicators and machine learning. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 125, 103562.
- Liebman, M., & Dyck, E. (1993). Crop rotation and intercropping strategies for weed management. *Ecological Applications*, 3(1), 92–122.
- Liu, C., Sun, P. S., & Liu, S. R. (2016). A review of plant spectral reflectance response to water physiological changes. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 40(1), 80.
- Ma, Y., Lyu, D., Sun, K., Li, S., Zhu, B., Zhao, R., Zheng, M., & Song, K. (2022). Spatiotemporal analysis and war impact assessment of agricultural land in Ukraine using RS and GIS technology. *Land*, 11(10), 1810.
- Maciejewska, A. (2022). Ukraine agriculture exports – what is at stake in the light of invasion? S&P Global Market Intelligence. <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/mi/research-analysis/ukraine-agriculture-exports-what-is-at-stake.html> (viimati vaadatud 06.03.2024)
- Matuszak, S. (2021). The breadbasket of the world? Agricultural development in Ukraine. Centre for Eastern Studies. <https://www.osw.waw.pl/en/publikacje/osw-report/2021-12-09/breadbasket-world> (viimati vaadatud 10.04.2024)
- Mena Sanchez, L. (2024). CONFLICT IN UKRAINE: ASSESSING PHENOLOGICAL CHANGES IN GRAIN PRODUCTION AREAS OF UKRAINE DURING THE RUSSO-UKRAINIAN CONFLICT USING NDVI TIME SERIES DERIVED FROM SENTINEL-2 DATA [PhD Thesis]. Politecnico di Torino.

- Ministry of Agriculture, Land and Fisheries. (2024). How and When to Harvest Crops. <https://agriculture.gov.tt/publications/how-and-when-to-harvest-crops/> (viimati vaadatud 19.05.2024)
- Moreira, A., Prats-Iraola, P., Younis, M., Krieger, G., Hajnsek, I., & Papathanassiou, K. P. (2013). A tutorial on synthetic aperture radar. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 1(1), 6–43.
- NASA Harvest. (2023). Farming Amidst A War: Satellite Data Reveals Productive Yet Challenging Season For Ukraine. <https://nasaharvest.org/news/farming-amidst-war-satellite-data-reveals-productive-yet-challenging-season-ukraine> (viimati vaadatud 21.03.2024)
- Neyter, R. Zorya, S. and Muliar, O. (2024). Agricultural War Damages, Losses, and Needs Review, KSE Agrocenter. https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/02/RDNA3_eng.pdf
- Nikolskaya, P., Osborn, A. (2022). Russia's Putin authorises 'special military operation' against Ukraine. Reuters. <https://www.reuters.com/world/europe/russias-putin-authorises-military-operations-donbass-domestic-media-2022-02-24/> (viimati vaadatud 15.04.2024)
- NISAR. (2024). Overview. <https://nisar.jpl.nasa.gov/mission/get-to-know-sar/overview/> (viimati vaadatud 26.03.2024)
- Nykolyuk, O., Pyvovar, P., Chmil, A., Bogonos, M., Topolnycky, P., Cheban, I. and Fellmann, T. (2021): Agricultural markets in Ukraine: current situation and market outlook until 2030, EUR 30874 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2021, ISBN 978-92-76-42649-3, doi:10.2760/669345, JRC126768
- Olsen, V. M., Fensholt, R., Olofsson, P., Bonifacio, R., Butsic, V., Druce, D., Ray, D., & Prishchepov, A. V. (2021). The impact of conflict-driven cropland abandonment on food insecurity in South Sudan revealed using satellite remote sensing. *Nature Food*, 2(12), 990–996.
- OpenStreetMap. (2024). <https://www.openstreetmap.org/#map=7/58.613/25.024>
- Paivel, M. (2014). Talivilja agrotehnika - Eelviljad. Teabesalv. <https://teabesalv.pikk.ee/taimekasvatus/teraviljakasvatus/talivilja-agrotehnika/?cookie-state-change=1716334630479> (viimati vaadatud 19.05.2024)
- Parsonson, A. (2024). ESA Targets 15 November for Vega C Return to Flight Mission. European Spaceflight. <https://europeanspaceflight.com/esa-targets-15-november-for-vega-c-return-to-flight-mission/> (viimati vaadatud 26.05.2024)

- Patel, J. H., & Oza, M. P. (2014). Deriving crop calendar using NDVI time-series. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40, 869–873.
- Petropoulos, G. P., & Kalaitzidis, C. (2012). Multispectral vegetation indices in remote sensing: An overview. *Ecol. Model*, 2, 15–39.
- Pettorelli, N., Vik, J. O., Mysterud, A., Gaillard, J.-M., Tucker, C. J., & Stenseth, N. C. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution*, 20(9), 503–510.
- Piper, E., Polityuk, P. (2023). Insight: Ukraine farms lose workers to war, complicating a tough harvest. Reuters. <https://www.reuters.com/world/europe/ukraine-farms-lose-workers-war-complicating-tough-harvest-2023-05-08/> (viimati vaadatud 11.01.2024)
- Polityuk, P. (2022). Ukraine to sow as many crops as possible this spring – President. Reuters. <https://www.reuters.com/world/ukraine-sow-many-crops-possible-this-spring-president-2022-03-11/> (viimati vaadatud 11.01.2024)
- Polityuk, P. (2023). Ukraine grain exports down 29.6% at 23.6 mln T so far in 2022/23. Reuters. <https://www.reuters.com/markets/commodities/ukraine-grain-exports-down-296-236-mln-t-so-far-202223-2023-01-09/> (viimati vaadatud 11.01.2024)
- Preiss, M., & Stacy, N. J. (2006). Coherent change detection: Theoretical description and experimental results.
- R Documentation. (2024). Box plots. <https://www.rdocumentation.org/packages/graphics/versions/3.6.1/topics/boxplot> (viimati vaadatud 19.05.2024)
- Ray, M. (2024). Russia-Ukraine War. Britannica. <https://www.britannica.com/event/2022-Russian-invasion-of-Ukraine> (viimati vaadatud 21.03.2024)
- Robertson, L. D., McNairn, H., van der Kooij, M., Jiao, X., Ihuoma, S., & Joosse, P. (2023). Monitoring autumn agriculture activities using Synthetic Aperture Radar (SAR) and coherence change detection. *Heliyon*, 9(6).
- Roman, A., & Ursu, T. (2016). Multispectral satellite imagery and airborne laser scanning techniques for the detection of archaeological vegetation marks. *Landscape Archaeology on the Northern Frontier of the Roman Empire at Porolissum: An Interdisciplinary Research Project. Cluj-Napoca: Mega Publishing House*, 141–152.
- Satalino, G., Mattia, F., Balenzano, A., Lovergine, F. P., Rinaldi, M., De Santis, A. P., Ruggieri, S., García, D. N., Gómez, V. P., Ceschia, E., & others. (2018). Sentinel-1 & Sentinel-2 data for soil tillage change detection. *IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 6627–6630.

- Satellite Imaging Corporation. (2022). Sentinel-2A Satellite Sensor (10m). <https://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/other-satellite-sensors/sentinel-2a/> (viimati vaadatud 17.05.2024)
- Schiller, C. (2015). Understanding Sentinel-2 Satellite Data. EOX. <https://eox.at/2015/12/understanding-sentinel-2-satellite-data/> (viimati vaadatud 17.05.2024)
- Schmitt, Eric; Kurmanaev, Anatoly; Kramer, Andrew E. (2023). "U.S. official says Ukrainian attack in south appears to be a main thrust of counteroffensive". The New York Times. ISSN 0362-4331
- Scholarly Community Encyclopedia. (2022). Copernicus Programme. <https://encyclopedia.pub/entry/34177> (viimati vaadatud 21.01.2024)
- Science Toolbox Exploitation Platform. (2024). Sen2Cor. <https://step.esa.int/main/snap-supported-plugins/sen2cor/> (viimati vaadatud 14.03.2024)
- Segarra, J., Buchailot, M. L., Araus, J. L., & Kefauver, S. C. (2020). Remote sensing for precision agriculture: Sentinel-2 improved features and applications. *Agronomy*, 10(5), 641.
- Sentinel Online. (2024). Data Products. <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2/data-products> (viimati vaadatud 12.05.2024)
- Shang, J., Liu, J., Poncos, V., Geng, X., Qian, B., Chen, Q., Dong, T., Macdonald, D., Martin, T., Kovacs, J., & others. (2020). Detection of crop seeding and harvest through analysis of time-series Sentinel-1 interferometric SAR data. *Remote Sensing*, 12(10), 1551.
- Shelestov, A., Drozd, S., Mikava, P., Barabash, I., & Yailymova, H. (2023). War damage detection based on satellite data. *Proceedings of the 11th International Conference on Applied Innovations in IT,(ICAIIT)*.
- Skakun, S., Justice, C. O., Kussul, N., Shelestov, A., & Lavreniuk, M. (2019). Satellite data reveal cropland losses in South-Eastern Ukraine under military conflict. *Frontiers in Earth Science*, 7, 305.
- Tamm, T., Zalite, K., Voormansik, K., & Talgre, L. (2016). Relating Sentinel-1 interferometric coherence to mowing events on grasslands. *Remote Sensing*, 8(10), 802.
- The European Space Agency. (2024). The Sentinel missions. https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/The_Sentinel_missions (viimati vaadatud 19.02.2024)

- Torres, R., Snoeij, P., Geudtner, D., Bibby, D., Davidson, M., Attema, E., Potin, P., Rommen, B., Floury, N., Brown, M., & others. (2012). GMES Sentinel-1 mission. *Remote Sensing of Environment*, 120, 9–24.
- Turney, S. (2022). Pearson Correlation Coefficient (r) | Guide & Examples. Scribbr. <https://www.scribbr.com/statistics/pearson-correlation-coefficient/> (viimati vaadatud 16.05.2024)
- Tutiempo. (2024). Historical weather data in Ukraine. Zaporizžja. <https://en.tutiempo.net/climate/ukraine.html>
- U.S. Department of Agriculture. (2024). Ukraine, Moldova and Belarus - Crop Production. https://ipad.fas.usda.gov/rssiws/al/up_cropprod.aspx (viimati vaadatud 19.05.2024)
- UDSA Foreign Agricultural Service. (2022). Ukraine Agricultural Production and Trade. <https://fas.usda.gov/sites/default/files/2022-04/Ukraine-Factsheet-April2022.pdf> (viimati vaadatud 17.05.2024)
- Ukraine grain exports continue to slip. World-Grain. <https://www.world-grain.com/articles/19203-ukraine-grain-exports-continue-to-slip> (viimati vaadatud 21.01.2024)
- Ukraine. (2022). How large is Ukraine? <https://ukraine.ua/faq/how-big-is-ukraine/> (viimati vaadatud 15.05.2024)
- Ukrainska Pravda. (2024). Russian missiles destroy 600 hectares of grain in one day in the Zaporizhzhia region. <https://www.pravda.com.ua/eng/news/2022/07/13/7357913/> (viimati vaadatud 19.05.2024)
- Ukrinform. (2022). Ukrainian defenders forced enemy to retreat in four directions. <https://www.ukrinform.net/rubric-ato/3555248-ukrainian-defenders-forced-enemy-to-retreat-in-four-directions.html> (viimati vaadatud 19.05.2024)
- United Nations. (2024). Ukraine: Report reveals war's long-term impact which will be felt 'for generations'. <https://news.un.org/en/story/2024/02/1146842> (viimati vaadatud 21.03.2024)
- UP42. (2024). Polarization. <https://docs.up42.com/data/reference/polarization> (viimati vaadatud 10.04.2024)
- Voormansik, K., Zalite, K., Sünter, I., Tamm, T., Koppel, K., Verro, T., Brauns, A., Jakovels, D., & Praks, J. (2020). Separability of mowing and ploughing events on short temporal baseline Sentinel-1 coherence time series. *Remote Sensing*, 12(22), 3784.
- Walker, N. (2023). Conflict in Ukraine: A timeline (2014 - eve of 2022 invasion). Commons Library Research Briefing. <https://researchbriefings.files.parliament.uk/documents/CBP-9476/CBP-9476.pdf>

- Welsh, C. (2024). Russia, Ukraine, and Global Food Security: A Two-Year Assessment. CSIS. <https://www.csis.org/analysis/russia-ukraine-and-global-food-security-two-year-assessment> (viimati vaadatud 16.05.2024)
- World Data Center. (2020). Ukraine: Agricultural Overview. <http://wdc.org.ua/en/node/29> (viimati vaadatud 24.03.2024)
- World data Ukraine. (2024). <https://www.worlddata.info/europe/ukraine/climate.php> (viimati vaadatud 12.05.2024)
- Xinhua. (2023). Ukraine sees strong grain, oilseed exports in 2022-2023 marketing year. <https://english.news.cn/20230901/21927002db39482cbc720cd4238c2f96/c.html> (viimati vaadatud 12.05.2024)
- Xue, J., Su, B., & others. (2017). Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. *Journal of Sensors*, 2017.
- Yagüe-Martínez, N., Prats-Iraola, P., Gonzalez, F. R., Brcic, R., Shau, R., Geudtner, D., Eineder, M., & Bamler, R. (2016). Interferometric processing of Sentinel-1 TOPS data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(4), 2220–2234.
- Zheng, B., Campbell, J. B., Serbin, G., & Galbraith, J. M. (2014). Remote sensing of crop residue and tillage practices: Present capabilities and future prospects. *Soil and Tillage Research*, 138, 26–34.

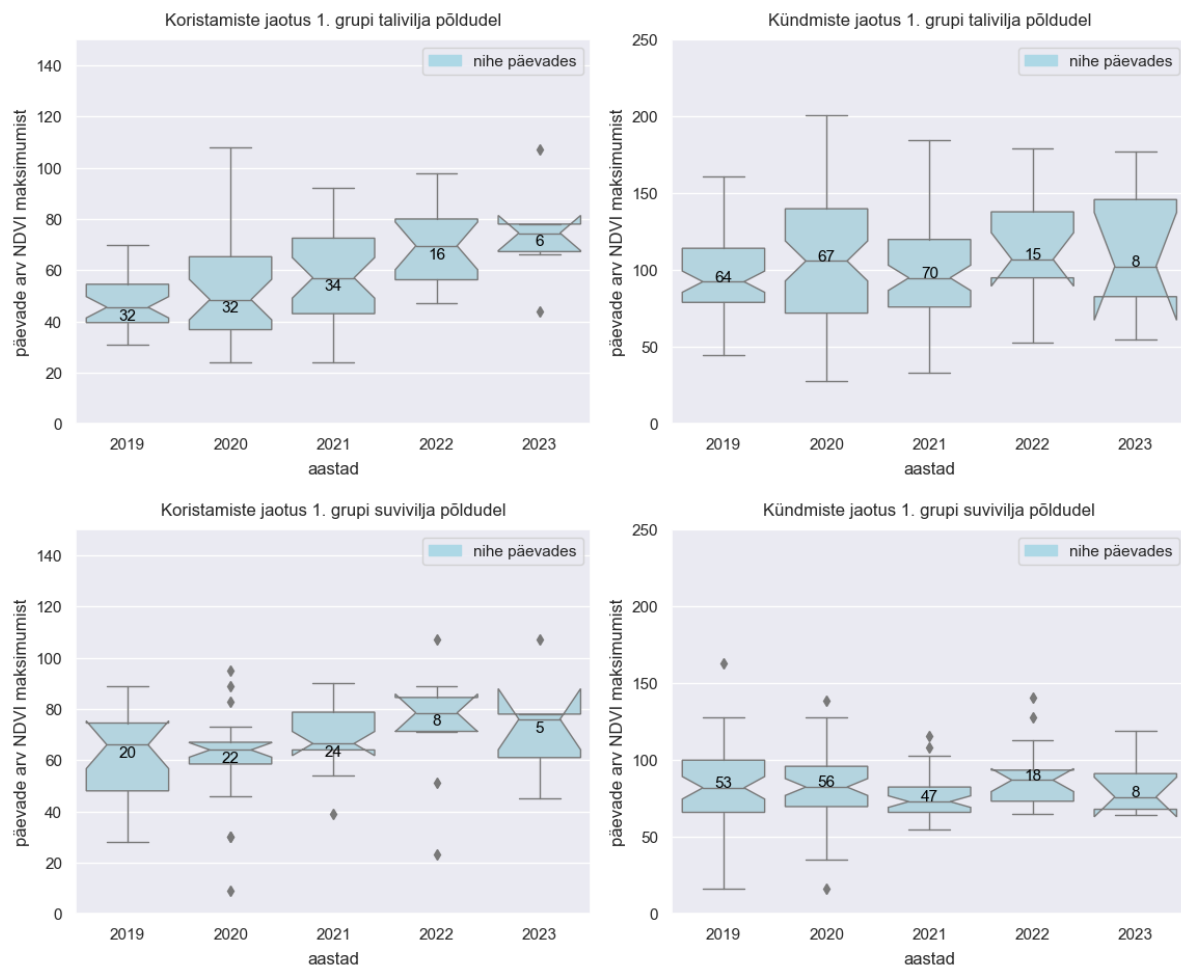
Lisa 1.

Sentinel-2 MSI instrumendi kanalid, mis koosnevad ultra sinisest, sinisest, rohelisest, punasest, nähtavast ja lähintrapunasest (VNIR) ning lühilainelisest lähinfrapunasest (SWIR). (Allikas: Drusch et al., 2012).

Kanal	Lahutusvõime (m)	Keskmine lainepikkus (nm)	Kirjeldus	Kasutus
B1	60	443	Ultra sinine	Pilved ja atmosfääri korrigeerimine
B2	10	490	Sinine	Taimkatte jälgimine
B3	10	560	Roheline	
B4	10	665	Punane	
B5	20	705	VNIR	Lume/jää/pilvede tuvastamine
B6	20	740	VNIR	
B7	20	783	VNIR	
B8	10	842	VNIR	Taimkatte jälgimine
B8a	20	865	VNIR	Lume/jää/pilvede tuvastamine
B9	60	945	SWIR	Pilved ja atmosfääri korrigeerimine
B10	60	1380	SWIR	
B11	20	1610	SWIR	Lume/jää/pilvede tuvastamine
B12	20	2190	SWIR	

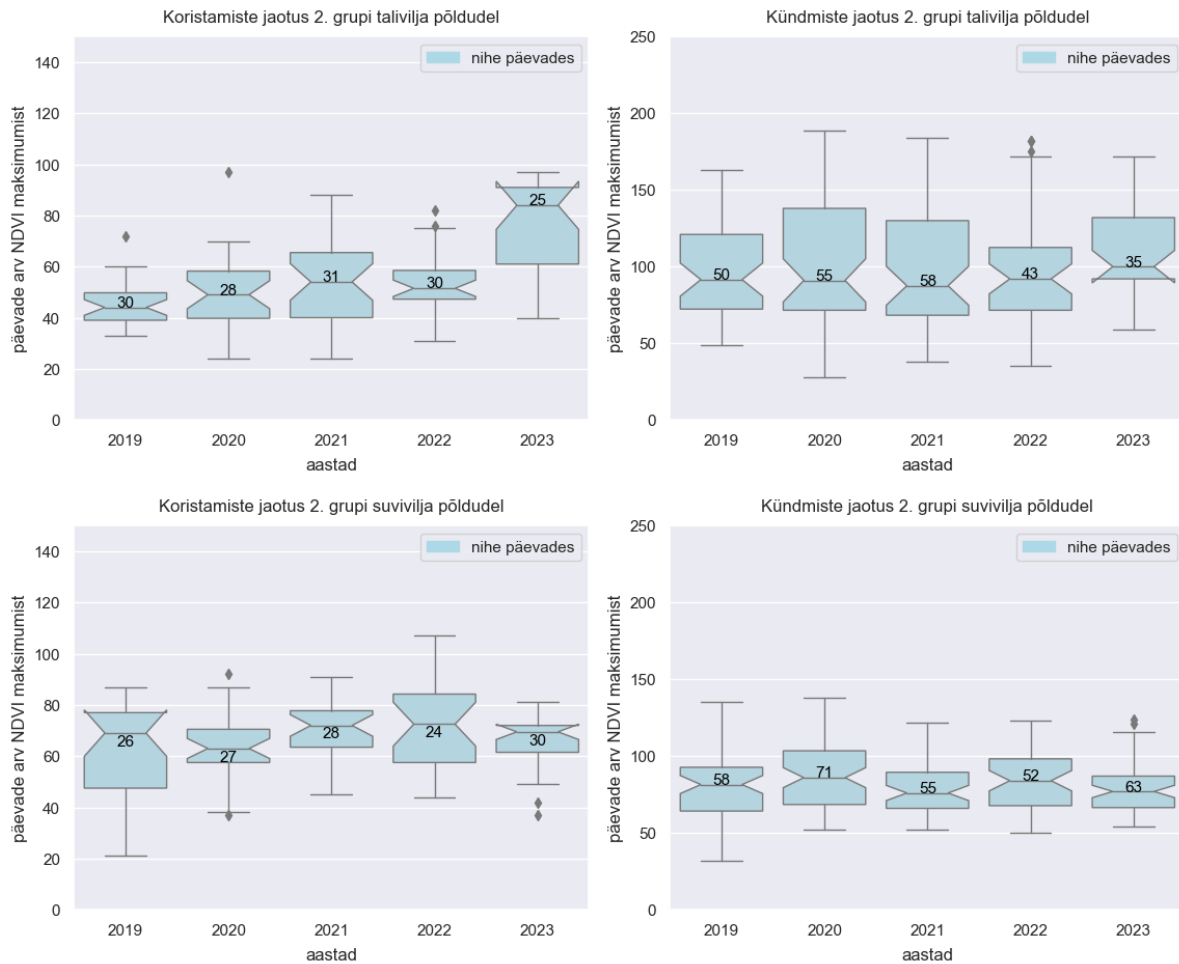
Lisa 2.

Rinde piirkonna tali- ja suvivilja põldude (grupp 1) koristamiste ja kündmistega ajaline jaotumine päevades. Diagrammi karpide sees olevad numbrid näitavad põlluharimissündmuste arvu.



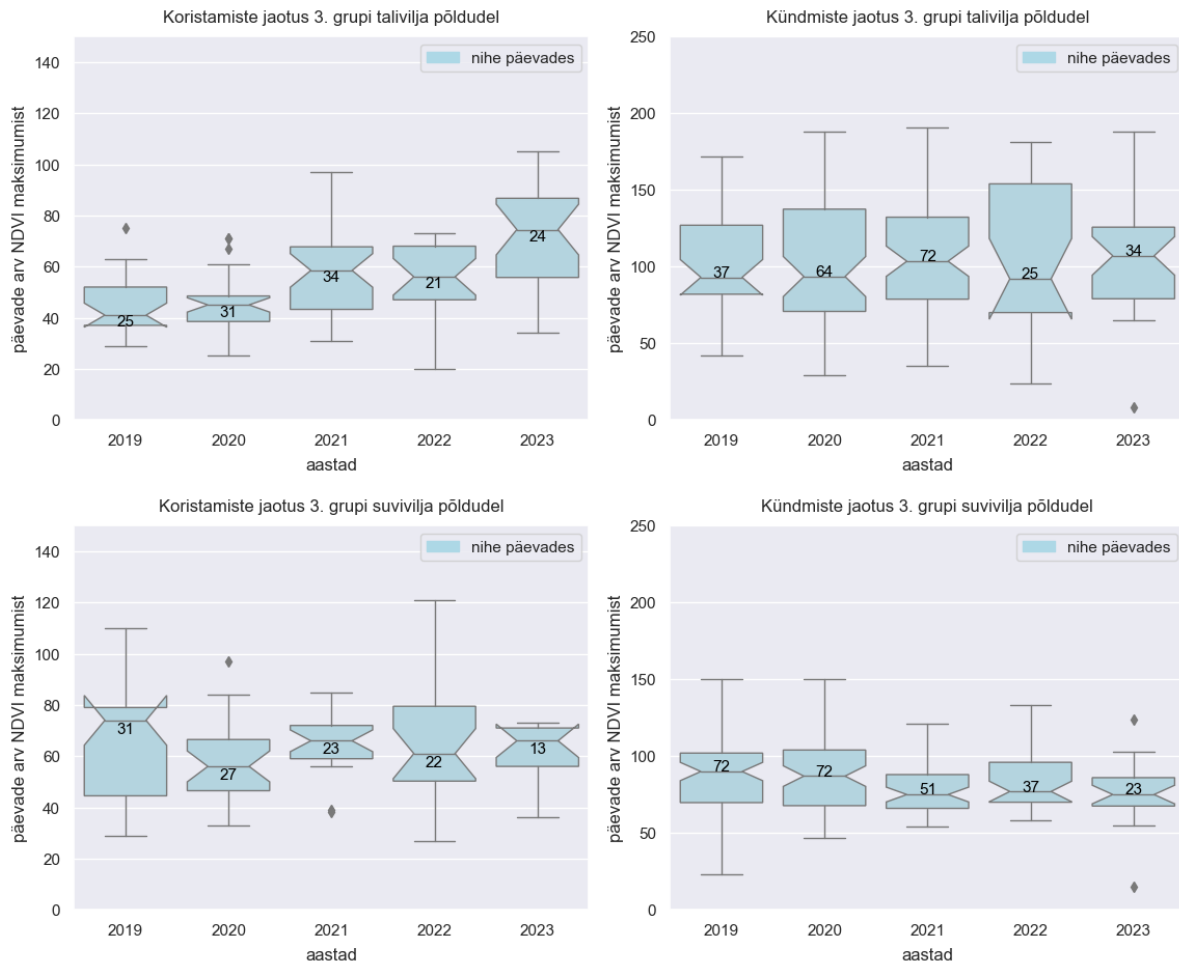
Lisa 3.

Rindejoone läheduses Ukrainale kuuluva ala tali- ja suvivilja põldude (grupp 2) koristamiste ja kündmistega ajaline jaotumine päevades. Diagrammi karpide sees olevad numbrid näitavad põlluharimissündmuste arvu.



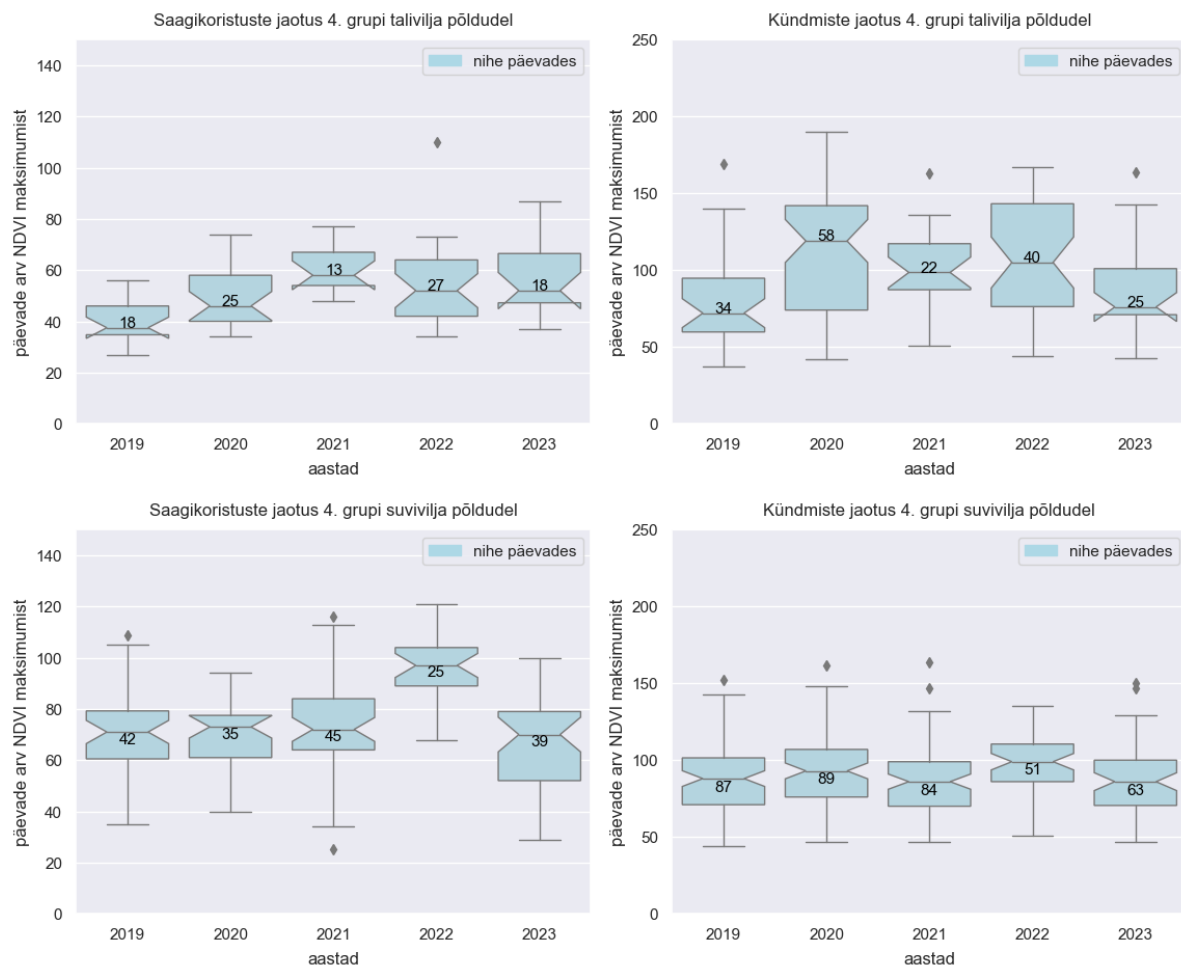
Lisa 4.

Rindejoone läheduses Venemaa okupeeritud ala tali- ja suvilja põldude (grupp 3) koristamiste ja kündmistega ajaline jaotumine päevades. Diagrammi karpide sees olevad numbrid näitavad põlluharimissündmuste arvu.



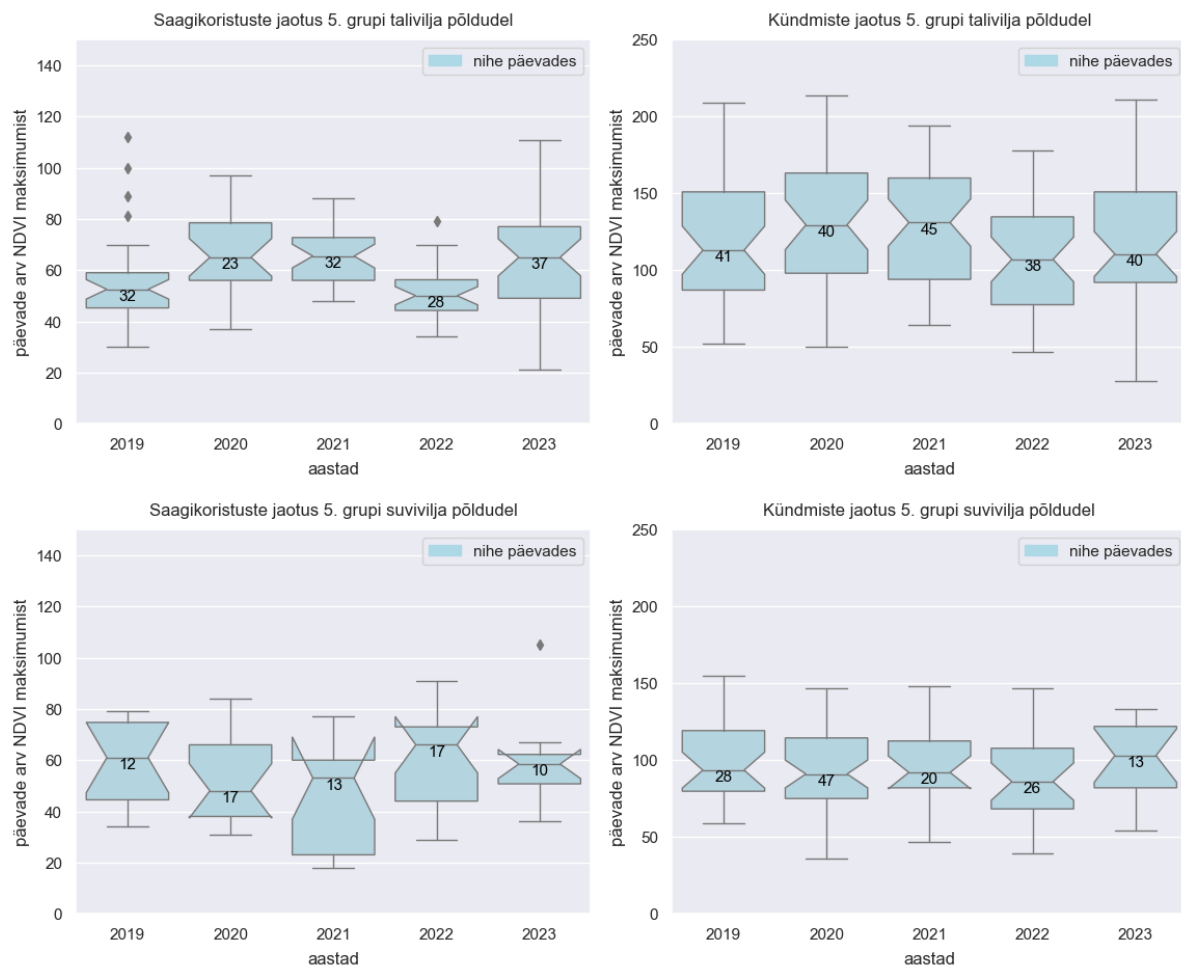
Lisa 5.

Ukraina tagala tali- ja suvivilja põldude (grupp 4) koristamiste ja kündmiste ajaline jaotumine päevades. Diagrammi karpide sees olevad numbrid näitavad põlluharimissündmuste arvu.



Lisa 6.

Vene tagala tali- ja suvivilja põldude (grupp 5) koristamiste ja kündmiste ajaline jaotumine päevades. Diagrammi karpide sees olevad numbrid näitavad põlluharimissündmuste arvu.



Lisa 7.

Zaporižžja oblastis põllu nr. 113 läheduses toimunud pommitamised. Piltidelt on näha, et 7. juulil 2022 on põllu ümbruses sõidukitega läbi vilja sõidetud. Kuu lõpus, 30. juulil on näha, kuidas mõned päevad varem toimunud rünnaku tõttu on vili naaberpõldudel ära põlenud. Viimane, 24. augusti pilt näitab, et lõpuks on põld siiski koristatud.



Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Mariana Rohtsalu,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose „**Sõja mõju Ukraina põllumajandusele optilise ja radarkaugseire vahenditele tuginedes**“, mille juhendajad on Prof. Raivo Aunap ja Prof. Tauri Tampuu, 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.

Mariana Rohtsalu

27.05.2024