

Lisa 1

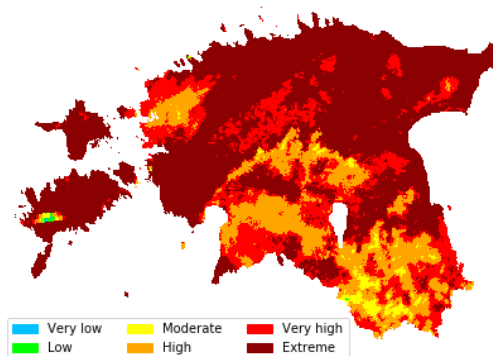
DOI: [10.23673/re-263](https://doi.org/10.23673/re-263)

## Metsa- ja maastikutulekahjude ennetamine ja likvideerimine

### LÕPPARUANNE



Tuleohuindeksi klassid, 2018-05-20



Dokumendi koostasid: Tõnu Oja, Valentina Sagris, Merle Muru, Edgar Sepp

Tartu 2020



KESKKONNAMINISTEERIUM



SISEMINISTEERIUM



MAJANDUS- JA  
KOMMUNIKATSIOONI-  
MINISTEERIUM



MAELUMINISTEERIUM

## Sisukord

1. Teema .....	3
2. Metoodika .....	4
2.1. Tuleohu kaardistamine .....	4
2.2. Põlengute avastamine ja esialgne analüüs.....	6
2.3. Põlengu leviku modelleerimine .....	7
2.4. Põlengu tagajärjel tekkinud kahjude hindamine.....	9
2.5. Prototüüpide tarvis meteoroloogiliste ja põlevmaterjali andmete täpsustamine .....	11
2.5.1 Täppismeteoroloogia .....	11
2.5.2. Põlevmaterjali hulga täpsustamine .....	12
3. Testimine ja veahinnangud .....	12
3.1. FWI mudeli täpsus ja usaldusväärtus .....	12
3.2. FBP indeksite pere mõõdetavus .....	13
4. Soovitused ja hinnangud .....	13
4.1. Soovitused .....	13
4.2. Rakendatavuse hinnang .....	14
5. Kasutusala .....	14
6. Maksumuse hinnang .....	14
7. Andmed .....	15
8. Tulemid.....	15
8.1. Projekti käigus välja töötatud tulemite ülevaade .....	15
8.2 Projekti käigus välja pakutud prototüübid .....	19
Kirjandus.....	19
Tulem D2.8 .....	21
Tulem D2.10 .....	42
Tulem D2.14 .....	61

## 1. Teema

Maastikutulekahjude temaatika uurimisküsimused jagunesid kolme alateema vahel: tuleohu prognoos, tule leviku modelleerimine, kahjude hindamine.

Välja tuli selgitada, millised on kaugseireandmete kasutamisest lähtuvad sobivaimad meetodid ja tehnoloogiad metsa- ja maastikutulekahjude tekkega seotud seireandmete kogumiseks, milliste andmeallikatega tuleks neid seostada eesmärgiga tõhustada rutiinset kontrolli ja järelevalvet ning kasutada andmeid riskiprognoside tegemisel. Erinevaid kaugseireandmeid kasutades välja selgitada sobivaim meetodika ja protsess tuleohukaardi koostamiseks, metsa- ja maastikutulekahjude avastamiseks, kriisiolukordade eelanalüüsiks, modelleerimiseks, võimalike kriiside tekkefaktorite kõrvaldamiseks ja potentsiaalsete kriiside ennetamiseks. Tulekustutustööde juhtimise uurimisküsimused keskendusid kaugseireandmete kasutamisest lähtuvate sobivaimate meetodite ja tehnoloogiate leidmisele kriisiolukordades reageerimiseks, tule ja suitsu levikusuundade hindamiseks, tulekollete avastamiseks, ressursside (inimeste ja masinate) suunamiseks, elanike evakueerimiseks, ja kriisifaktori ning tagajärgede likvideerimiseks. Kahjude hindamisel tuli keskenduda tulekahjus kahjustunud ökosüsteemide tuvastamiseks ja väärtuse hindamiseks ning ärahoitud kahjude hindamiseks sobivaimate meetodite leidmisele.

RITA KAUGSEIRE maastikupõlengute teema on tegelenud peamiselt kolme alateemaga, mis on päädinud lõpptarbijatele suunatud prototüüpidega: (1) võimalused tuleohu riski tõepärasemaks ja detailsemaks hindamiseks; (2) tule käitumine põlengu ajal, selle efektiivsem prognoosimine ja kustutustööde juhtimise võimalik tõhusamaks muutmine; (3) põlengu tagajärjeks olevate kaotuste (väljendatuna rahaliselt või loodusväärtustena) põhjalikum hindamine nii tekkinud kahju, kui ära hoitud kahju osas.

Lisaks on tuleohu kaardistamisega seotud täppismeteoroloogia prototüübid, kuivõrd meteoroloogilised andmed on oluline sisend tuleohu hindamisele ja tule leviku modelleerimisele. Ka on tuleohu hindamisega ning tule levikuga seotud oluline lähteandmestik põlevmaterjali hulga hindamine. Põlengu haldamisele ja tekkinud kahjude hindamisele aitab kaasa droonide kasutamine maastikupõlengute jälgimisel.

Kõik kolm suunda tulenevad tegelikest vajadustest ja seega on otseselt kasutatavad. Põlengute tulemusena tekib arvestatav majanduslik kahju nii ära põlenud ressursside, sh ka kadunud ökosüsteemide loodusväärtuste kui kustutamisega seotud kulude arvel. Selleks, et põlengute sagedust vähendada, tuleb vähendada põlengute tekkimise tõenäosust. Põlengud võivad tekkida nii looduslikel (nt äike) kui inimtegevusest tingitud põhjustel, arvuliselt on ülekaalus viimased. Inimtekkeliste põlengute arvu aitavad eeldatavalt vähendada piirangud tuleohtlikul ajal, nende kehtestamine eeldab võimalikult täpset, usaldusväärset ja hästi (sh inimestele arusaadavalt ja usutavalt) põhjendatud tuleohu riskide hinnangut. Lisaks aitab tuleohu taseme teadmine parandada valmisolekut / valvelolekut põlengute võimalikult kiireks avastamiseks ning kustutamiseks. Tuleohu hindamine on preventiivne tegevus ning teiste preventiivsete tegevuste (nt inimeste hoiatamine) aluseks, seda tehakse pidevalt, mitte seoses konkreetse põlenguga.

Teine tekkinud kahjude ja põlengu kustutamisega seotud kulutuste vähendamise võimalus on võimalikult efektiivne tegutsemine kustutustöödel. Sellele võiks kaasa aidata parem tule leviku (suundade, kiiruse, intensiivsuse jmt) prognoosimine / modelleerimine. Põlengu leviku parem mõistmine on operatiivne tegevus, mida tuleb teha kustutustööde ajal, valmisolekut selleks on aga

võimalik suurendada ka preventiivselt enne põlengute tekkimist. Osaliselt saadakse tule käitumise modelleerimiseks vajalik teadmine tuleohuindeksi arvutamisel.

Tekkinud kahjude ja efektiivse kustutustegevuse tulemusena ära hoitud kahjude hindamine on põlengu kustutamise järgne toiming, mis on vajalik nõ inventuurina aga ära hoitud kahjude suhe tekkinud kahjudesse (või tegelike kahjude osakaal potentsiaalselt tekkida võinud kahjudest) annab ka võimaluse analüüsida tegevusi kustutustööde ajal ning selle põhjal võib-olla parandada tegutsemise efektiivsust järgmiste põlengute korral.

## 2. Metoodika

### 2.1. Tuleohu kaardistamine

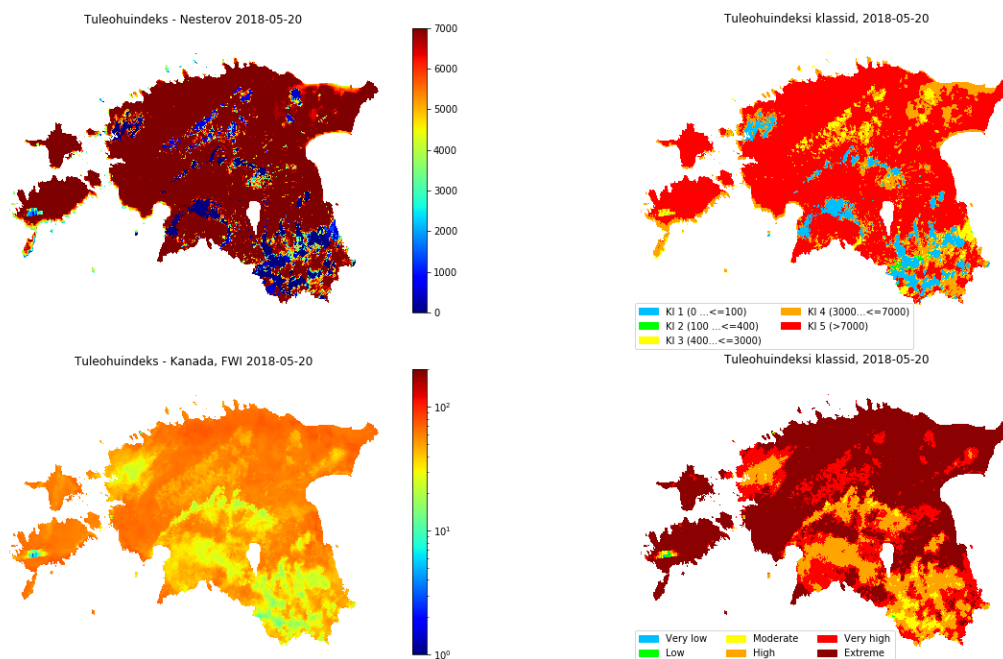
Maastikupõlengud on paljudes maailma ökosüsteemides loomulik nähtus. Üks olulisemaid põlengute haldamise komponente on põlenguohu prognoosimine. Chowdhury ja Hassan (2015) seadsid endale ülesandeks analüüsida järgmisi aspekte: i) kehtivad tegevuslikud metsapõlengute ennustamise süsteemid ja nende piiratud; ii) kaugseirel põhinevad põlenguriskide jälgimise süsteemid ja nende kasutatavus tegevuslikkuse vaates; iii) kaugseirel põhinevad põlenguriski hindamise süsteemid ning nende toimivad rakendused; ning iv) tegevuslike ennustussüsteemide ja kaugseirel põhinevate meetodite võimalik sünergia. Üldiselt kasutavad tegevuslikud süsteemid punktmõõtmistel põhinevaid meteoroloogilisi näitajaid (nt temperatuur, tuule kiirus ja suund, suhteline niiskus, sademed, pilvisus, päikesekiirgus jmt) ning tuletavad riskikaardid interpoleerides. Teoreetiliselt on võimalik interpoleerimise ebamäärasused osaliselt tasandada kasutades kaugseire andmeid.

Potentsiaalsete maastikutulekahjude avastamiseks, elanikkonna valvsuse tõstmiseks ning maastikutulekahjude ennetamiseks on vajalik koostada võimalikult täpne tuleohu kaart ja seda igapäevaselt uuendada. Maailmas on kasutusel erinevaid tuleohu arvutamise metoodikaid (Torres et al. 2018), kusjuures enamik neist põhineb peaaugust meteoroloogilistel andmetel. Eestis on seniajani Riigi Ilmateenistus kasutanud ainult *in situ* jaamade meteoroloogilisi andmeid ja nn "Nesterovi" metoodikal põhinevat arvutusmeetodit (Nesterov, 1949; Chandler et. al, 1983; Chowdhury ja Hassan, 2015). Nesterovi tuleohuindeks lähtub temperatuurist, kastepunktist ja kumulatiivsetest sademetest ning arvutused tehakse ilmajaamades ja interpoleeritakse seejärel kogu Eesti territooriumile.

RITA KAUGSEIRE projektis kasutati ülalmainitud andmetele lisaks meteoroloogilise prognoosimudeli järelanalüüsi andmeid (õhutemperatuur, õhuniiskus ja tuule kiirus) ja ilmaradarilt sademete andmeid, mis võimaldas saada senisest detailsema, ruutkilomeetri põhise ruumilise jaotuse. Detailsem ruumiline jaotus annab võimaluse teha arvutusi igas ruutkilomeetrivõrestiku punktis ja vabaneda interpoleerimise ebamäärasusest. See omakorda lubab paremaid ennetustöid ja pakub võimalust avastada maastikutulekahjud varajases staadiumis ning paremini ette valmistada maastikutulekahjude likvideerimiseks.

Tuleohu kaardistamise prototüübi (pt. 8.2, Tulem D2.8) tegemisel analüüsiti ja testiti kahte tuleohuindeksit – kasutuses olevat Nesterovi indeksit ja maailmas laialt levinud Kanada indeksit FWI (*Fire Weather Index*, <http://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/background>; Wagner, 1987; Wang, Anderson, Suddaby, 2015). Kanada FWI tuleohuindeksi valimise kasuks rääkisid kaks asjaolu: esiteks, seda kasutab Euroopa Liidu metsatulekahjude avastamise ja tuleohu ennustamise portaali EFFIS

(<https://effis.jrc.ec.europa.eu/>), teiseks, FWI arvutamise käigus valmivaid vahetulemusi on võimalik kasutada tule leviku analüüsimisel koos põlevmaterjali andmetega (pt. 2.3, pt. 8.2, Tulem D2.10). Prototüübi kirjelduses (Tulem D2.8) esitatakse algoritmid ja protseduurid andmete ettevalmistamiseks ning tuleohuindeksi arvutamiseks mõlema mudeli järgi. Põhjalikult on ära kirjeldatud sisendandmete olemus ja olemasolu ning nende kvaliteedi mõju tulemustele. Nt. kasutati Sürgavere ilmaradarist sademete andmeid, mida korrigeeriti ilmajaamades mõõdetud andmetega (pt. 2.5), kuid radari häirete ja sellest tuleneva andmelünga puhul lisati prototüübile ilmajaamadest mõõdetud sademete interpoleerimise protseduur. Tuleohuindeksite võrdlemiseks kasutati nende arvutamisel samu detailseid andmeid. Mõlema tuleohuindeksi kaarte koostati erinevatel ilmastiku perioodidel ning kaarte kõrvutati tulemuste erinevuste illustreerimiseks ja hindamiseks. Joonisel 1 on toodud mõlema indeksi ja nende põhjal arvutatud tuleohu klasside kaardid 20. mail 2018. a. ehk kevadpõua perioodil. Joonisel on näha, et FWI on üksikute sademepuhangute suhtes vähem tundlik kui Nesterovi indeks ning ohuindeks ja klass ei kuku FWI puhul drastiliselt väiksete sademete korral. Selle põhjuseks on asjaolu, et koondindeksi leidmise käigus arvutab Kanada mudel ka vahetulemusi, mis iseloomustavad potentsiaalse põlevmaterjali erinevate fraktsioonide niiskust ja struktuuri (põlevmaterjali olemasolu, mahtu ja tüübi andmeid sellel etapil ei arvestata). Mõlemad mudelid kasutavad iga järgmise päeva tuleohuindeksi arvutamisel eelneva päeva tulemusi, kuid FWI puhul kandub kaasa ka eelneval perioodil kogutud põlevmaterjali niiskus ja seega annab FWI realistlikuma tulemuse.

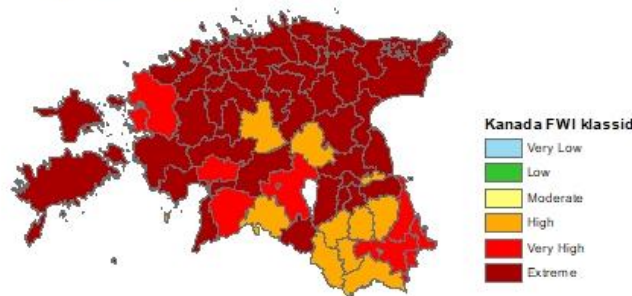


**Joonis 1.** Nesterovi ja nn Kanada mudeli FWI tuleohuindeksid ja tuleohu klassid, 20. mai 2018.

Avalikusele ja ametitele info edastamiseks pakuti tuleohuindeksi kaartidest erinevaid tulemeid tekitavaid protseduure:

- üldistatud tuleohukaardi tegemine, kus silutakse andmeid erineva kerneliga (ühtlustatakse naaberruutude väärtused) vähendamaks juhuslikku varieeruvust ja pildi liigset kirjusust;
- tuleohu klasside asustus- ja haldusüksuste tasemele üldistamise protseduur (Joonis 2).

Enim esinev klass



**Joonis 2.** Tuleohu klasside üldistamine kohalike omavalitsuste kaupa 20. mail 2018. a., enim esineva klassi meetod.

Tuleohuindeks soovitatakse edaspidi arvutada Kanada mudeli FWI indeksi alusel.

Tuleohu kaardistamise rakenduse juurutamisel tuleb arvestada järgmiste andmevoogutega:

- rakendus saab igapäevaselt meteoroloogilisi sisendandmeid – meteoroloogilise prognoosmudeli järelanalüüsi andmeid (õhutemperatuur, õhuniiskus ja tuule kiirus) ning ilmaradarilt ja ilmajaamadest sademete andmeid;
- FWI arvutamise vahepealsed tulemusi salvestatakse rakenduses korduskasutamiseks;
- FWI vahetulemusi edastatakse põlengu leviku modelleerimise rakendusele (pt. 2.3, pt. 8.2, Tulem D2.10)

## 2.2. Põlengute avastamine ja esialgne analüüs

Põlenguid saab avastada nii juhuslikult kui süstemaatilise jälgimisega. Viimane on võimalik satelliitidelt selleks välja arendatud tehnoloogiat kasutades aga ka maa pealt. Satelliitseire toimub pidevalt, seda arendatakse edasi, ent seirel on ka puuduseid. Esineb nõ valepositiivseid tulemusi, kus põlenguks tõlgendatakse mingi muu nähtus. Ka ei taga satelliitseire piisavat ajalist ja ruumilist lahutust, eriti asulate läheduses, kus toimub enamik põlengutest. Väga oluline on põlengute avastamisel inimeste tähelepanelikkus, mida saab efektiivsemaks muuta teades tuleohtu.

Põlengute avastamisel ja esialgses analüüsis kasutatakse ka termokanalipõhist lähenemist.

Lähiinfrapunane (NIR) ja lühilaineline infrapunane (SWIR) kanal mõõdavad eelkõige peegeldunud infrapunast kiirgust. Kesk- (MWIR) ja pikalaineline infrapunane (LWIR) kanal on seotud objektide temperatuuriga (Thermal IR). Soojustundlike kaamerate kasutamine droonidel on põlengute avastamiseks potentsiaalselt kasutatav, kuid mitte esmaste põlengute avastamisel, küll aga lõpuni kustutamata jäänud tulekollete avastamisel taassüttimiste vältimiseks.

Alljärgnevalt on välja toodud olulisemad vabalt kasutatavad kaugseiresüsteemid põlengute avastamiseks ja jälgimiseks.

## Nasa Firms

FIRMS - *The Fire Information for Resource Management System*:

<https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/>

Reaalaja lähedane rakendus, mis baseerub MODIS'e ja VIIRS'i satelliitide andmetel. Jooksvalt saab andmeid alla laadida ([https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/active\\_fire](https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/active_fire)) ja kasutada FIRMS'i kodulehelt SHP, KML, TXT, WMS kihtidena (<https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/web-services/>). Saab tellida ka hoiatused e-postile.

VIIRS (<https://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data/near-real-time/firms/v1-vnp14imgt>): 375m ruumiline lahutus, ajaline lahutus 2 korda päevas.

MODIS (<https://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data/near-real-time/firms/c6-mcd14dl>): ruumiline lahutus u 1km, 1 kord päevas. Veebiliides võimaldab veel andmeid natuke agregeerida (lugeda kokku sündmuste arvu) ja kuvada erineval ajal põlenud alasid. Eesti kontekstis: ruumiline lahutus ebapiisav, pilvkate segab

## Copernicus EFFIS

EFFIS - The European Forest Fire Information System (<https://effis.jrc.ec.europa.eu/>)

Aktiivsete põlengute kihid, sisuliselt samad, mis pakub NASA FIRMS: MODIS ja VIIRS. - <https://effis.jrc.ec.europa.eu/about-effis/technical-background/active-fire-detection/>

Rakendus võimaldab veel:

- vaadata arvatud tuleohuindeksite väärtusi (Kanada FWI indeksi baasil);
- kuvada põlenud alasid;
- vaadata "kütuse" kaarti;
- analüüsi töövahendid – kuvab trende.

**Kokkuvõttes võib öelda, et satelliitidel põhinev põlengute avastamine on suuteline tuvastama üksnes suuremad põlengud, mille osatähtsus Eestis on väike.**

Ülaltoodud süsteemides satelliitide jälgimine on üks põlengute avastamise komponent. Kohalike põlengute avastamiseks on satelliidid liiga „aeglased“, samas võib nii mõnigi kohalik kulupõleng hilise reageerimise korral muutuda suuremaks, üle minna kas metsa või hoonete põlenguks. Siin tuleb järgida tavapärasest välja kujunenud avastamise viisi, mis põhineb kodanike reageerimisel. Soovitav on arvestades tuleohuindeksit ja selle ruumilist jaotust ning eriti tuleohtlikes piirkondades ja ajal rakendada kõrgendatud tähelepanu.

## 2.3. Põlengu leviku modelleerimine

Maastikupõlengu kiire esialgne analüüs ning ohu modelleerimine võimaldab efektiivselt tegutseda põlengute alguse faasis ning piirata tule edasist levikut. Projekti raames testiti Kanada maastikupõlengute mudelite komplekti (<http://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/background>; Wagner, 1987; Wang, Anderson, Suddaby, 2015) kuuluvat FBP moodulit (*Forest Fire Behaviour Prediction System*) ning töötati välja algoritmid ja protseduurid andmete ettevalmistamiseks ning põlengu analüüsiks (pt. 8.2 Tulem D2.10). Testimise jaoks kasutati R keskkonnas toimivat vabavaraalset koodi.

Põlengu potentsiaalse leviku modelleerimise prototüüp D2.10 hindab potentsiaalset tuleohtu, arvestades ilmastikupõhist tuleohuindeksit (FWI, Tulem D2.8), põlevmaterjali mahtu ja omadusi (Tulem D2.4) ning topograafiat. Prototüüp käsitleb FBP mooduli primaarseid väljundeid (*primary outputs*; pt 8.2). Tule arengu mudelit (*elliptical growth model*) ehk FBP mooduli sekundaarseid väljundeid (*secondary outputs*) kirjeldatud prototüüp ei kajasta. Algoritm koostab neli olusituatsiooni hindavat kaarti (nn. FBP *primary* väljundit):

- Tulefrondi leviku kiirus – Rate of Spread (ROS, m/min)
- Summaarne põlevmaterjali kulu – Total Fuel Consumption (TFC, kg/m<sup>2</sup>)
- Tulefrondi intensiivsus – Head Fire Intensity (HFI, kW/m)
- Tulekahju kirjeldus – Fire Description (FD, S=Surface, I=Intermittent, C=Crown), mis sisaldab põlengu tüüpi (rohttaimestiku/maapinna, puistu keskosa, võrapõleng) ja põlenud võrade osakaalu hinnangut (Crown Fraction Burned, CFB).

Prototüüp vajab sisendina igapäevaselt tulemi D2.8 FWI vahetulemuse – FFMC, ISI ja BUI indeksid, mis iseloomustavad potentsiaalse põlevmaterjali erinevate fraktsioonide niiskust (resolutsioon 1 km); ning tulemi D2.6 meteoroloogilise mudeli tuule kiirus ja suund (resolutsioon 1 km). Samuti kasutab prototüüp sisendiks Maa-ameti 25-meetrise lahutusvõimega kõrgusmudeli tuletisi ning tulemi D2.4 põlevmaterjali tüüpide, võraalguse kõrguse ja põlevaine massi kaarte, kõik lahutusvõimega 25 m. FBP mooduli primaarsed tulemused arvutatud resolutsiooniga 25 m.

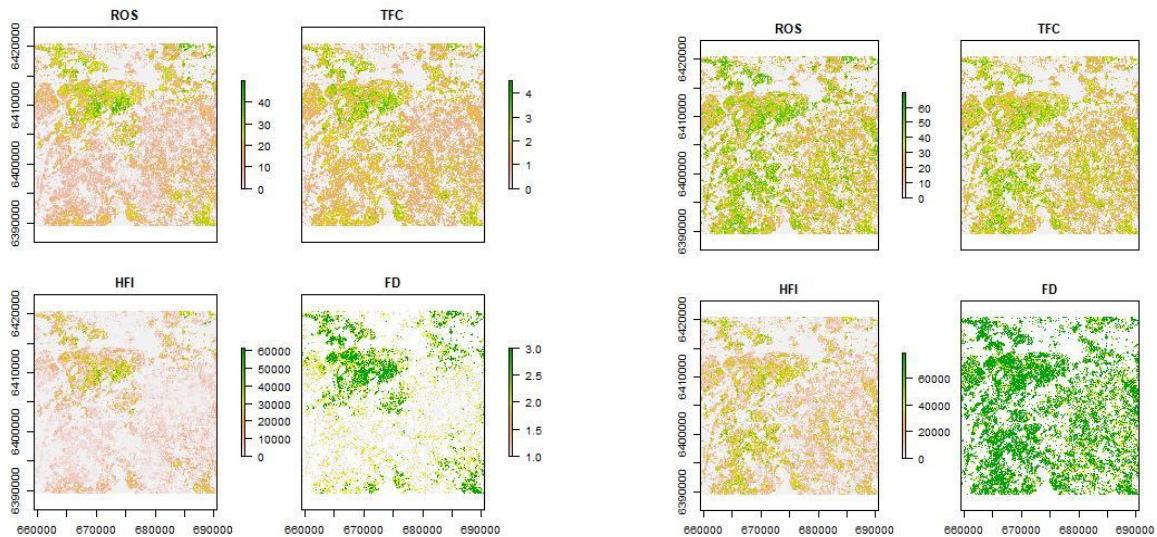
Põlevmaterjali tüüpide otsene ülekandmine Kanada FBI mudelist ei ole võimalik ega ka vajalik, Põhja-Ameerikas on maastikupõlenguid looduslikult rohkem ja teised, sh tuleohtlikumad liigid. Sisuliselt on Eesti oludes võimalik piirduda kuue põlevmaterjali klassiga, kaks neist – segametsad ja rohumaad - on jagatud alamklassideks vastavalt sesoonsele varieeruvusele (Tabel 1).

**Tabel 1.** Kanada mudeli FBP algoritmi sisendina kasutatavad põlevmaterjali tüübid.

Kood	FBP tähis	Kanada FBP tüübid	Eestile kohendatud FBP tüübid
2	C-2	Boreal spruce	Kuusik
3	C-3	Mature jack or lodgepole pine	Männik
9	M-1	Boreal mixedwood-leafless	Segamets lehtedeta
10	M-2	Boreal mixedwood-green	Segamets lehes
13	NF	Not a fuel	Põlevmaterjali ei ole
14	O-1a	Matted grass	Lamandunud rohi
15	O-1b	Standing grass	Lamandumata rohi
19	WA	Water	Vesi

Algoritmi testimiseks vaadeldi põlengu ohtu proovialadel Haanjas ja Alutagusel. Joonis 3 illustreerib Haanja prooviala tulemuse 5. mail 2018.a. ehk kevadpõua alguses. Valitud stsenaarium: M-1 – lehtedeta segamets ja O-1a lamandunud rohi (Tabel 1) - peegeldab varakevadist fenoloogilist situatsiooni. Samal ajal toimus prooviala põhjaosas mitu põlengut.





(a)

(b)

**Joonis 3.** Haanja prooviaala, FBP primaarsed väljundid (a) 20. mai 2018 ja (b) 25. mai 2018. Lühendid: ROS - Tulefrondi leviku kiirus [m/min], TFC - Summaarne põlevmaterjali kulu [kg/m<sup>2</sup>], HFI - Tulefrondi intensiivsus [kW/m], FD - Tulekahju kirjeldus (1-rohttaimestiku/maapinna, 2-puistu keskosa, 3-võrapõleng).

Uuringus osalenud teadlased soovivad kasutada Kanada maastikupõlengute FBP moodulit. Oma paindlikkuse tõttu võimaldab see arvestada sesoonsete muutustega ning arvutuste jaoks on olemas R keskkonnas toimiv vabavaraline kood. Samas R moodul kasutab Kanadas testitud põlevmaterjalide tüüpide parameetreid, seega on otstarbekaskoodi edasi arendada, eelkõige vaadata üle parameetrid, kasutades kohalike empiirilisi andmeid. Rakenduse ehitamisel ja edaspidisel kasutamisel tuleb silmas pidada nii operatiivsete (FWI väljundid ja tule kiirus ja suund), kui pikaajaliste (põlevmaterjali kaadid) andmete kaasajastamist.

Põlengu dünaamiliseks modelleerimiseks saab kasutada vabavaralist tarkvarapaketti Prometheus [http://www.firegrowthmodel.ca/prometheus/overview\\_e.php](http://www.firegrowthmodel.ca/prometheus/overview_e.php). Prometheus on deterministlik maastikupõlengu simulatsioonimudel, mis tugineb FWI ja FBP arvutustel ja tulemitel. Mudel arvutab tule ruumilise käitumise ja leviku arvestades põlevmaterjali heterogeensust, topograafiat ja ilmaolusid. Kõik väljundid on GIS põhised. Kuivõrd on tegu vabavaralise lahendusega, mis sobib kasutamiseks ka Eestis, puudus vajadus selle kohendamiseks või dubleerivaks arenduseks.

## 2.4. Põlengu tagajärjel tekkinud kahjude hindamine

Teaduskirjanduses avaldatakse põlengukahjude hindamise käsitlusi üha enam.

On artikleid, mis käsitlevad otseselt põlengujärgseid muutuseid – ruumilise mustri muutused (Colak, Sunar 2020), puitmaterjali kadu (Storey 2020), põlengu mõju puude füsioloogiale (Bär et al. 2019) ja meetodeid põlengu mõju määramiseks kaugseire meetoditega (Klauberg et al. 2019).

Käsitletud on põlengu käigus emiteeritavate (kasvuhoone)gaaside hulka (Junpen et al. 2020) ja põlengujärgsete tegevuste mõju taastumise erinevatele aspektidele (Kelly, Hodges 2020), maastikumuutuste mõju põlengute tõenäosusele ning võimalikele kahjudele (Sila et al. 2019),

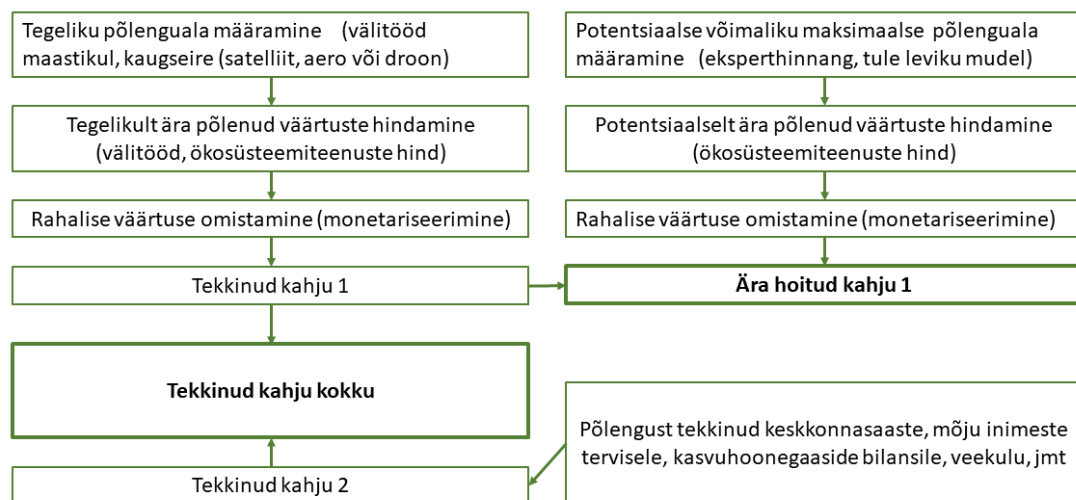
võrreldud erinevate kasvukohtade metsade ohustatust ning põlengust põhjustatud kahjustusi (Almeida et al. 2016) ning nõlvakalde mõju tule levikule (Fidanova, Marinov 2016).

On kirjeldusi ekspertsüsteemides, mis aitaks hallata põlengutega seotud teemasid (Semeraro et al. 2016), sündmuspõhise lähenemise viise seostamaks keskkonnategureid ja põlengu intensiivsust (Picos et al. 2019) ning käsitletud põlengutealase teadlikkuse seoseid kahjudega (Ergibi, HesseIn 2020).

Tulekahjude käsitlemise raamistiku oluline osa on ökosüsteemide kahjude hindamine. Maastikupõlengu poolt tekitatud kahju ökosüsteemidele ning samuti ärahoitud kahju on võimalik tuvastada ning hinnata tule leviku mudelit ning kahju hindamise meetodeid kasutades.

#### *Kahjude hindamine FBP indeksist lähtuvalt*

Pärast põlengu kustutamist määratakse tegelikult põlenud ala ja põlengu määr ning võimalikud keskkonnakahjud põlengu ajal. Viimased on aluseks tekkinud kahjude hindamiseks ja seejärel monetariseerimiseks (joonis 4). **Tule potentsiaalset levikut hinnatakse FBP indeksi abil, mis on aluseks võimaliku maksimaalse põlengu ala ja määra leidmisel.** Potentsiaalse põlenguala ja tegelikult põlenud ala vahe ning põlengumäärade erinevus annavad ära hoitud kahjude leidmise võimaluse ja seejärel monetariseerimise aluse. Kahjusid hinnatakse rahas, vahetulemustena ka ressursikaos, emiteeritud saaste hulgas jmt, mis pärast monetariseeritakse ökosüsteemiteenuste kontseptsiooni alusel.



**Joonis 4.** Kahjude hindamise vooskeem.

Projekti raames töötati välja algoritmide ja protseduuride kirjeldused andmete ettevalmistamiseks ning potentsiaalse põlengu analüüsiks ja võrdlemiseks tegelikult põlenud alaga (pt. 8.2 Tulem D2.14). Potentsiaalse põlengu ala määratakse lähtudes tule leviku mudelist (FBP) ja reaalistest looduslikest tingimustest / takistustest. Tegelikult põlenud ala määratakse pärast põlengu kustutamist. Ökosüsteemi teenuste meetodikaga leitakse nii potentsiaalselt põleda võinud väärtused kui tegelikult põlenud väärtused. Viimased annavad hinnangu tekkinud kahju kohta, vahe potentsiaalselt põleda võinud ja tegelikult põlenud väärtuse vahel annab ärahoitud kahju hinnangu.

Prototüübi tulemusi saab kasutada, et määrata:

- elupaikade kadu pindalaliselt (ulukid, kasulikud taimed jms, aga ka nõ mitteutilitaarsed ökosüsteemiteenused);
- tegeliku põlengu ulatuse määramise aluseks on satelliidipiltide võrdlus enne ja pärast; ka droonipildid. Kindlasti on vaja teada, mis tüüpi kooslusega oli tegemist. Vastavad andmed saab leida metsandusandmetest, mida toetab RITA KAUGSEIRE projekti käigus valminud puistute kaart.
- kasvuhoonegaaside bilanss pindalaliselt;
- puidu kadu pindalaliselt/mahuliselt (mille saab ümber arvutada rahasse, arvestades metsast saadava puitmaterjali hinda); arvutuse aluseks on puistute liigi ja mahu kaardid
- pinnase kadu pindalaliselt/mahuliselt (mille saab ümber arvutada rahasse). Pinnase kadu korreleerub elupaikade kao pindalaga. Andmed arvutusteks saab mullakaardilt, toetab ka puistute kaart.

Kahjude hindamise raamistikku rakendati Vikipalu 2018 aasta põlengu näitel. Potentsiaalse põlenguala ja tegelikult põlenud ala vahe ning põlengumäärade erinevus annavad ära hoitud kahjude leidmise võimaluse ja seejärel monetariseerimise aluse.

## 2.5. Prototüüpide tarvis meteoroloogiliste ja põlevmaterjali andmete täpsustamine

### 2.5.1 Täppismeteoroloogia

Meteoroloogiliste andmete leidmise täielik metoodika on esitatud Lisas 5.

#### *Meteoroloogiliste andmete täpsustamine – temperatuur ja tuuleväli*

Kasutatakse andmeid METCOOP (<http://metcoop.org/>) HARMONIE (<http://hirlam.org/>) meteoroloogilisest mudelist Eesti ala kohal. Ala on 393 korda 285 punkti alates laiuskraadist 57.4327 ja pikkuskraadist 21.5896. Ida suunas on võrgusamm 0.0173 kraadi ja põhja suunas 0.0087 kraadi, seega horisontaalne lahutus on umbes 2.5 km. HARMONIE mudeli versioon on v40h1.1 ([doi.org/10.1175/MWR-D-16-0417.1](https://doi.org/10.1175/MWR-D-16-0417.1)).

Andmed on õhutemperatuur ja suhteline niiskus kahe meetri kõrgusel aluspinnast kell 12 UTC ning õhutemperatuur ja suhteline niiskus kahe meetri kõrgusel aluspinnast ja tuule komponendid kümne meetri kõrgusel aluspinnast kell 09 UTC. Andmed on korrapärasel WGS84 võrgustikul.

Tegemist on meteoroloogilise mudeli analüüsidega, s.t. need on numbrilise mudeli andmed, mida on in-situ, satelliidi, atmosfääri sondeerimiste jm. mõõtmistega korrigeeritud. Originaalandmed ise asuvad Norra meteoteenistuse thredds serveril <http://thredds.met.no/thredds/metno.html>

#### *Meteoroloogiliste andmete täpsustamine – sademed*

Ilmaradari mõõdetud peegelduvusväärtustest reaalsete sajuintensiivsuste arvutamine käib läbi empiirilise Marshall-Palmeri Z-R seose. Kasutatavad parameetrid pole Eesti sademejaotuse jaoks optimeeritud, mistõttu võivad maapealse jaama ja radarmõõtmiste erinevused sademehulkades olla väga suured. Kahe andmestiku võrdlemiseks loetakse maapealsete jaamade mõõtmisandmed alustõeks (*ground truth*) ning selle põhjal korrigeeritakse radari andmeid. Lihtsaim lähendus on keskmise välja erinevuse meetod (*mean field bias - MFB*), kus leitakse positiivsete väärtuspaaride (nii jaama, kui radari andmetes peab olema sadu registreeritud, vastasel korral andmeid ei korrigeerita, väljundiks on radari algne andmestik) vahel olevad erinevused, millest arvutatakse kogu välja

kõrvalekallet kirjeldav keskmistatud koefitsient. Selle koefitsiendiga korrigeeritakse kogu radarivälja. Korrigeerimine toimub iga tundi viimase tunni saajussummade põhjal. Andmete väljundi geograafiline võrgustik on sarnane ilmapildi väljundile, 393 x 285 punkti alates laiuskraadist 57.4327 ja pikkuskraadist 21.5896 võrgusammudega 0.0173 kraadi idasuunas ja 0.0087 kraadi põhjasuunas, mis annab horisontaalse lahutuse ligikaudu 1 km, WGS 84 projektsioonis.

Ajaliselt väljastatakse sademesummad kolme tunni saajussummana. Andmed väljastati NETCDF konteineris nimetusega SURAAKKPPHHMM.nc, kus SUR on radari nimi, AA aasta, KK kuu, PP kuupäev, HH tund (tähistab n-ö 3 eelmist tundi), MM minutid.

### 2.5.2. Põlevmaterjali hulga täpsustamine

Kasutades Eesti Maa-ameti laserskanneerimise andmeid, Eesti digitaalset põhikaarti ning Eesti puistuplaani (Lang et al. 2018) koostati Eestit katvad rasterkaardid maastikupõlengute riski hindamise ja tule leviku prognoosimudelite jaoks (Tulem D2.4).

Andmebaas koosneb järgnevatest kaardikihtidest.

1) Maakatteklasside kaart, kus on eristatud järgmised klassid:

- -9999: andmed puuduvad. Tegemist on maa-alaga, kus pole puid või mis on kasutusel olev põllumaa või hoonetusala. Siia alla lähevad ka laiema sihid, teed ja kraavid põhikaardi järgi.
- 31: FPB klass 31 (seisev rohi). Eesti puistuplaani lage ala ja selgusetu ala (Lang et al., 2018).
- 102: FPB klass 102 (veekogud). Eesti põhikaardilt.
- 500-595: Okaspuude osakaal puistu koosseisus protsentides. Eesti puistuplaanilt (Lang et al., 2018).
- 1010-1050: Eesti põhikaardi märgalad (E\_306\_margala\_a ja E\_306\_margala\_ka).

2) Põlevmaterjali hulga ja struktuuri kaardid:

- Põlevaine mass võras,  $g/m^2$  (Andersen et al. 2005 järgi).
- Võraalguse kõrgus, cm (Arumäe, Lang 2013 järgi).
- Võraalguse kõrgus, cm (Andersen et al. 2005 järgi).

Põlevmaterjali massi võras ja võraalguse kõrgus arvutamiseks on kasutatud Maa-ameti aeropildistamise ja laserskanneerimise 2017. ning 2018. a. kevadiste ja suviste lendude andmeid. Andmeid soovitame uuendada kord aastas.

## 3. Testimine ja veahinnangud

Mudeleid on rakendatud Eesti ilmastiku (2018., 2019. a.) ja põlevmaterjali hulga andmetega, võrreldes senikasutatava Nesterovi mudeli ja väljapakutud Kanada mudeli metoodikat ja tulemusi.

### 3.1. FWI mudeli täpsus ja usaldusväärtus

Kasutatavad indeksid ei ole füüsiliselt mõõdetavad suurused, mida saaks teisiti mõõta ja täpsuse kvantitatiivseks hindamiseks mudeli väärtustega võrrelda. Võimalik võrdlus tegelike põlengutega sõltub väga paljudest juhuslikest teguritest ega ole statistiliselt olulisena määratav. Seega saame usaldusväärsust hinnata vaid kvalitatiivselt. Tuleb tõdeda, et põlengud tekivad nii ekstreemsete kui ka keskmiste tuleohuindeksi väärtuste juures. Testid proovialadel ja nende võrdlemine toimunud

tulekahjude andmetega, nagu Vikipalu põleng 2018. a., on näidanud, et piirkondades, kus toimusid ulatuslikud tulekahjud oli alati kõrge ka FWI indeks.

**FWI annab võrreldes seni kasutatud indeksiga detailsema pildi ja on tundlikum niiskuse varude tekkimise suhtes.** FWI indeksi arvutamist mõjutab niiskuse akumulatsioon hinnanguliselt eelneva 7 kuni 10 päeva oludes.

Prototüübi FWI ruumiline lahutus on määratud sisendandmete ruumilise lahutusega, mis on 1 x 1 km, mis on oluliselt detailsem praegu kasutatavast lahendusest, mille sisendiks on ilmajaamade andmed.

### 3.2. FBP indeksite pere mõõdetavus

FBP primaarsed väljundid (pt. 2.3) on mõõdetavad nähtused, kuid nende kogumist Eestis ei toimu. Visuaalne hindamine ja kõrvutamine tulekahjude andmetega lubab väita, et FBI väljundid loovad realistliku pildi. Võib toetuda Kanada ekspertide pikaajalisele kogemusele ja empiirilist tõestatud valimitele, kuid FBP väljundite verifitseerimiseks Eesti oludes tuleks välja töötada andmete kogumise meetodikat.

Kõige suuremaks ebamäärasuseks on Kanada mudelis kasutatavad põlevmaterjalide tüübid ja Eesti olude neile vastavusse viimine.

**FBP indeksite perel on kõrge ruumiline lahutus**, kuna sisendandmed – põlevmaterjali tüüpide ja põlevmaterjali mahu kaardid – on kõrge lahutusega (25 m).

## 4. Soovitused ja hinnangud

### 4.1. Soovitused

Copernicuse programmi raames on välja arendatud Euroopa tulekahjude teabesüsteem, mis on kasulik töövahend üle-euroopaliste protsesside ja trendide hindamiseks, kuid tulekahjude kohepealsel ohjamisel on soovitatav siiski kasutada täpsemaid ja kohaspetsiifilisemaid kaugseirerakendusi, mis integreerivad satelliitandmed, droonimõõtmised ja muud andmeallikad.

Soovitame kasutada nn Kanada mudelite peret, mis sisaldab nii tuleohu kaardistamise kui sellega seotud põlengu leviku modelleerimise mooduleid:

- Tuleohu hindamiseks ja kaardistamiseks soovitame kasutada Kanada mudeli indeksit FWI (pt. 8.2, Tulem D2.8).
- Maastikupõlengute kulgemise mudelina oleme soovitanud Kanada tuletõrjesüsteemi kuuluvad moodulid FBP (pt. 8.2, Tulem D2.10) ja seda täiendavat moodulit *Prometheus* ([http://www.firegrowthmodel.ca/prometheus/overview\\_e.php](http://www.firegrowthmodel.ca/prometheus/overview_e.php)). FBP algses mudelis on 16 põlevmaterjaliklassi (<https://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/background/fueltypes/c1>), Eesti jaoks oleme soovitanud piirduda kuue klassiga (Tabel 1).
- Looduskeskkonna tulekahjust tekkivate kahjude hindamise meetodika on rakendatav suhteliselt lihtsalt, eeldusel, et varem on rakendatud sama põlengu modelleerimise meetodikat. Ilma sellise sünergiata (nii nagu seda tehakse ka praegu), tuleb kahjude hindamine läbi viia eksperthinnangute alusel ning potentsiaalse põlengu (st ärahoitud kahju) ulatuse määramine jääb ebamäärasemaks. Ökosüsteemiteenuste rahalise väärtuse hinnangute

aluseks on soovitatav kasutada juba käimasoleva Keskkonnaagentuuri ELME projekti tulemusi (<https://www.keskkonnaagentuur.ee/et/eesmargid-tegevused/projektid/elme/okosusteemide-seisundi-ja-okosusteemiteenuste-uleriigiline>).

## 4.2. Rakendatavuse hinnang

Tuleohuindeksi arvutamise meetodika muutus on otseselt rakendatav. Prototüübis kirjeldatud protseduurid - andmehõive, indeksi arvutamine, tulemuste tõlgendamine ja üldistamine - võib töötavasse rakendusse otseselt, kuid väikeste muudatustega integreerida. Kuivõrd tegemist on olemasolevate algoritmide rakendamisega, on töö põhiliselt tehniline, kuidas rakendada mudelid ja andmevood konkreetsetes IT oludes, arvestades Ilmateenistuse spetsiifikat, turvanõuded jne. Rakenduse juurutamise eelduseks on, et meteoroloogiliste mudelite andmete moodul (RITA KAUGSEIRE Lisa 5) on rakendatud või vähemalt teada, mis kujul, mis formaadis ja missugustes ühikutes hakkavad andmed laekuma. Tuleohuindeksi rakendus eeldab andmete uuendamist igapäevaselt.

Tule leviku modelleerimine on põhimõtteliselt rakendatav, selles suunas tuleb edasi töötada. Päästametil on põhimõtteline valmisolek asja uurimiseks olemas. Arvutamise meetodika suhtes soovitame R tarkvara põhisest teegist loobumist ja oma koodi arendust. See võimaldab kriitiliselt üle vaadata Eesti oludes mittevajalikud sammud ja korrigeerida erinevate põlevmaterjali tüüpidega seotud koefitsiente. Soovitame jätkata algoritmi valideerimise tarbeks andmete kogumist. Rakenduse juurutamise eelduseks on, et tuleohuindeksi rakendus/moodul Ilmateenistuses on rakendatud või vähemalt on teada, kuidas andmed hakkavad laekuma. Põlengu leviku modelleerimise rakendus eeldab andmete uuendamist igapäevaselt. Perioodiliselt, kord aastas, tuleb uuendada andmeid põlevmaterjali kohta. Vastavalt Maa-ametis tehtavatele aerofoto ja Lidar-möödistuse lendudele saab värskendada põlevmaterjali tüübi, põlevmaterjali mahu ja võrakõrguse kaarte. Tõenäoliselt on otstarbekas etapiviisiline rakendamine. Lisaks tehnilisele rakendamisele on vajalik ka arvestatav lõppkasutaja koolitus.

Kahjude hindamise meetodika on rakendatav suhteliselt lihtsalt, eeldusel, et varem on rakendatud põlengu modelleerimine. Ilma selleta saab kahjusid hinnata (seda tehakse ka praegu) ent potentsiaalse põlengu ulatuse määramine jääb ebamäärasemaks või tuleb lahendada eksperthinnangute alusel. Ökosüsteemiteenuste monetariseerimise alused tulevad keskkonnaagentuuri ELME (<https://www.keskkonnaagentuur.ee/et/eesmargid-tegevused/projektid/elme/okosusteemide-seisundi-ja-okosusteemiteenuste-uleriigiline>) ja Elu:mõju (Kaldma et al, 2017) projektidest.

## 5. Kasutusala

Prototüübid on välja töötatud lähtudes lähteülesandest kasutamiseks Eesti Vabariigi Ilmateenistuses ja Päästametis tuleohu kaardistamiseks, põlengu leviku modelleerimiseks ja põlengu tagajärjel tekkinud ning ära hoitud kahjude hindamiseks.

## 6. Maksumuse hinnang

Väljapakutud uus tuleohuindeksi arvutamise meetodika on otseselt rakendatav. Töö Life projekti taotlusega, mille raames saaks selle alates aastast 2022 rakendada käib, hinnanguline eelarve on

projektis kokku suurusjärgus 130 000 €. Projekti on kaasatud Keskkonnaagentuur, Ilmateenistus, Tartu Ülikool, kasutajana Päästeamet. Lisaks tehnilisele rakendamisel on vajalik mõningane lõppkasutaja koolitus.

Tule leviku modelleerimise arenduse (FBP) hinnanguline maksumus on 260 000 €. Tuleb muuta/kohandada Eesti oludele algoritmi, põlevmaterjali koefitsiente ja luua uusi protseduure, sh. rakenduse keskkonna loomine nagu ka FWI puhul. Eraldi tuleb sätestada andmevahetus tuleohuindeksi ja meteoroloogiliste mudelite rakendustega konkreetses keskkonnas. Lisaks tuleb läbi viia lõppkasutajate koolitus. Arendus on tehtav etapiviisilisena.

Põlengu tekitatud kahjude hindamine on rakendatav väiksemate kuludega, hinnanguliselt suurusjärgus 50 000 – 70000 €. Realiseerida tuleb FWI ja FBI rakenduste väljundite sidumine teiste riigi süsteemidega ning läbi viia kasutajate koolitus. Maksumus ei sisalda ökosüsteemiteenuste rakenduse arendust, mis eeldatavalt toimub Keskkonnaagentuuris üldisemal tasemel, kuivõrd on vajalik väga mitmete riiklike rakenduste jaoks ega ole käesoleva teema spetsiifiline.

## 7. Andmed

Prototüüpide arendamise käigus tekkis suur hulk andmeid: meteoroloogiliste andmete komplekt kohandatud mudelite sisendiks, põlevmaterjali tüüpide kaardid ning indekseid arvutamise vahepealsed väljundid ja tulemused (kõik 2017., 2018.a. kohta). Kõik need andmed asuvad Tartu Ülikooli HPC Teadusarvutuste keskuse serveris ja tehakse tellijale kättesaadavaks. Neid andmeid on võimalik kasutada planeeritavate rakenduste arenduseks ja testimiseks.

Avaandmetena on kättesaadavad tuleohuindeksi (FWI) tulemused Eesti jaoks 2018. ja 2019. aasta kohta <https://datadoi.ee/handle/33/311>.

## 8. Tulemid

### 8.1. Projekti käigus välja töötatud tulemite ülevaade

*D2.3 Võimalikud meetodid/protseduurid kaugseire ja muude andmete integreerimiseks maastikupõlengute ohu hindamiseks, seireks, jälgimiseks, ja riskide hindamiseks.*

Ülevaade teaduskirjanduses avaldatud artiklitest, milles käsitletakse erinevaid metsa- ja maastikupõlengute põhjuseid, põlengute avastamise viise, põlenguohude prognoosimist, tule leviku prognoosimist. Ülevaade kaugseire vahenditega pakutavatest võimalustest metsa- ja maastikupõlengute jälgimiseks. Erinevate võimaluste esialgne analüüs. Nesterovi põlenguohu hindamise (praegu Eestis kasutatav mudel) meetodi võrdlus teiste maailmas laialt kasutatavat mudelitega.

*D2.1, D2.2, D2.6, D2.12 – meteoandmed ja nende arvutamise metoodika*

Need tulemid on kirjeldatud Lisas 5.

#### D2.4 Põlevmaterjali hulk ja struktuur

Metoodika kirjeldus, rasterkihid ja andmebaas puistute liigilise koosseisu, põlevmaterjali massi ja võraalguse kõrguse kohta lähtuvalt Lang jt 2018 tööst ning Maa-ameti aeropildistamise ja laserskanneerimise ja eesti põhikaardi andmetest.

#### D2.5 Soovitav metoodika tuleohuindeksi arvutamiseks

Kirjeldatakse/esitatakse tuleohu kaardi valmistamise üldine vooskeem (joonis 5).



**Joonis 5.** Soovitav metoodika tuleohu kaardi arvutamiseks.

Kirjeldatakse valmistamisvoo erinevate etappide soovituslikku metoodikat:

- Meteoroloogiliste andmete täpsustamine (temperatuur, tuuleväli (METCOOP HARMONIE meteoroloogilistest mudelitest), sademed (ilmaradarist empiirilise Marshall-Palmeri Z-R seose läbi);
- Põlevmaterjali hulga täpsustamine (metsade ruumiline jaotus ja metsa struktuur, roostike ja rohumaade jaotus);
- Kaardistamise metoodika – 1. kaardistatakse ruutkaardil lahutusega 1x1 km üle kogu Eesti, sisendiks dünaamiliselt uuenev meteoandmete väli, põlevmaterjali jaotus (uuendamise samm kord aastas), võimalikud riskitegurid (nii ohtu suurendavad kui potentsiaalselt ohustatud – asustus, teedevõrk); 2. üle rastervälja kaardistatud tuleohuindeks üldistatakse tuleohu klassideks; 3. moodustakse tuleohu klasside jaotus administratiivüksuste kaupa.

Tuukse välja erinevused soovitusliku metoodika ja seni kasutatava metoodika vahel ning eeldatavalt parema tulemuse saamise tegurid – detailsemad ja täpsemad meteoroloogilised andmed, parem hinnang põlevmaterjalile, interpoleerimine sisendandmete tasemel ning ohuindeksi arvutamine rasterkaardil.



### *D2.7 Droonide kasutamine maastikupõlengu jälgimisel*

Uuringus tegeleti mehitamata õhusüsteemide (*Unmanned Aerial Systems, UAS*) metsatulekahju seire ja avastamise võimaluste välja selgitamisega ning meetodiliste lünkade kõrvaldamisega.

Uuring koosnes kolmest erinevast eksperimendist. 1) UAS rakendamine surnud puidu automaatseks kaardistamiseks ja iseloomustamiseks, mille käigus viidi Lahemaa rahvusparkis läbi lühikeste katselendude seeria metsakeskkonnas optimaalse lennu seadistamise skeemi kindlaks tegemiseks. Kontrolliti, kas metsaalusest oleks võimalik saada detailseid ortofotomosaiike. 2) UAS-põhiste andmekogumite sobivus hindamine erinevate põlevmaterjalide klassifitseerimiseks, kus katsete käigus hinnati erinevate UAS-põhiste sensorite andmete võimet klassifitseerida ja kaardistada põlevmaterjali omadusi. 3) ThermoMAPI kaamera sobivuse hindamine potentsiaalsete taassüttimise kollete tuvastamiseks, mille käigus tehti Lavassaare LKA põlenud alal termoinfrapuna-kaameraga katselennul kindlaks, et temperatuuri muutuste jälgi on võimalik tuvastada ka 3 päeva pärast tule kustutamist.

UAS-i platvormid sobivad aktiivseks maastikutulekahjude jälgimiseks ja avastamiseks. Uuringute tulemused näitasid, et mitme rootoriga droonid ja testitud sensorid annavad selleks otstarbeks usaldusväärseid andmeid.

### *D2.8 Tuleohu kaardi prototüüp*

Tulem D2.8 kirjeldab tuleohu kaardistamise prototüübi tehnilisi aspekte vastavalt tulemis D2.5 välja pakutud meetodikale. Kirjeldus sisaldab prototüübi tegemisel kasutatud algoritme ja protseduure andmete ettevalmistamiseks ning tuleohuindeksi arvutamiseks kahe mudeli järgi – kasutuses oleva Nesterovi indeksi ja maailmas laialt levinud Kanada indeksi FWI järgi. Põhjalikult on ära kirjeldatud sisendandmete olemus ja olemasolu ning nende kvaliteedi mõju tulemustele. Protseduurid on koondatud nelja plokki: 01 – lähteandmete hõive; 02 – tuleohuindeksi arvutamine; 03 – tuleohuindeksite üldistamine tuleohu klassideks; 04 – tuleohuindeksite ja väärtuste leidmine kohalike omavalitsuste kaupa.

Kirjeldus sisaldab mõlema tuleohuindeksi kaarte, mis koostati erinevatel ilmastikuperioodidel kahe indeksi erinevuste illustreerimiseks ja hindamiseks. Tulemuste usaldusväärtuse hindamiseks analüüsiti neid koos tulekahjude andmetega.

### *D2.9 Soovituslikud meetodid põlengute avastamiseks, esialgseks analüüsiks ja ohu modelleerimiseks*

Kirjeldatakse/esitatakse võimalikke soovituslikke meetodeid tulekahjude avastamiseks, esialgseks analüüsiks ja hädaolukordade modelleerimiseks.

Kooskõlas tuleohu kaardistamise meetodikaga, kus soovitati kasutada nn „Kanada“ mudelit (FWI), on tule leviku (esialgne analüüs) modelleerimiseks mõistlik kasutada samasse perekonda kuuluvat mudelit FBP.

Tulekahjude avastamiseks on soovitatav kasutada kombineeritud meetodit. Satelliitidel põhinev põlengute avastamine on suuteline tuvastama üksnes suuremad põlengud, mille osatähtsus on väike (mis küll kahjustest moodustavad suurema osa). Kohalike põlengute avastamiseks tuleb järgida tavapärasest välja kujunenud avastamise viisi, mis põhineb kodanike reageerimisel. Soovitatav on arvestades tuleohuindeksit ja selle ruumilist jaotust, eriti tuleohtlikes piirkondades ja -ajal rakendada kõrgendatud tähelepanu.

### *D2.10 Algoritmi prototüüp põlengu analüüsimiseks*

Tulem D2.10 kirjeldab põlengu potentsiaalse leviku modelleerimise prototüübi tehnilisi aspekte vastavalt tulemis D2.9 välja pakutud metoodikale. Detailselt analüüsiti ja testiti R keskkonnas toimivat vabavaralist koodi. Põhjalikult on ära kirjeldatud lähteandmete tüübid, nende allikad ja erinevused põlevmaterjali tüüpide klassifikatsiooni skeemis Kanadas ja Eestis.

Prototüüp käsitleb FBP mooduli primaarseid väljundeid (*primary outputs*; pt 8.2, Tulem D2.10) ning tulemused on illustreeritud väljundite kaartidega, mis on koostatud kahe prooviala jaoks - Haanjas ja Alutagusel.

### *D2.11 Soovituslikud meetodid tule tõrjumiseks kasutades kaugseiret, droone ja seireandmeid*

Esitatud on Kanada põlengumudeli põlevmaterjalide tüüpide selgitused, mis ühtlasi aitavad kaas erineva põlevmaterjali hulgaga põlengute iseloomustamisel. Eesti jaoks oleme soovitanud piirduda kuue klassiga.

Toodud on põlengute seosed inimasustuse ja teedevõrguga.

Koondatud on mõned uuemad publikatsioonid UAV kasutamisest tuletõrjeoperatsioonides ja põlengu tagajärgede hindamisel, see täiendab varem tulemis D2.9 esitatut. Esialgse tulekolde piiritlemiseks ja ja hilisemaks järelkontrolliks sobib kasutada droone.

### *D2.13 Ökosüsteemile tekitatud kahju ja ära hoitud kahju hindamise soovituslikud meetodid*

Esitatakse ülevaade võimalikest maailmas kasutatavatest meetoditest ökosüsteemi kahjude ja muude maastiku/metsapõlengutega seotud kahjude hindamiseks.

Pakutakse välja võimalik lähenemine kahjude hindamisele, mis sobib kokku eelmistes tulemites käsitletud nn Kanada mudeli teiste komponentidega, et luua ühtne süsteem riski modelleerimisest kuni kahjude hindamiseni.

Potentsiaalse põlengu ala saab määrata lähtudes tule leviku mudelist (Tulem D2.10) ja reaalsetest looduslikest tingimustest / takistustest. Põlenud ala määratakse pärast põlengu kustutamist. Ökosüsteemi teenuste hindamise metoodikaga saab leida nii potentsiaalselt põleda võinud väärtused kui tegelikult põlenud väärtused. Viimased annavad hinnangu tekkinud kahju kohta, vahe potentsiaalselt põleda võinud ja tegelikult põlenud väärtuse vahel annab ärahoitud kahju hinnangu.

### *D2.14 Ökosüsteemide kahjude määratlemise ja hindamise algoritmi prototüüp*

Põlengu tekitatud kahjude ja ärahoitud kahjude algoritm lähtub varem kirjeldatud tule leviku mudelist (Tulem D2.10) ja võimalikest meetoditest kahjude hindamiseks (Tulem D2.13).

Esitatakse algoritmide ja protseduuride kirjeldused (hindamissammude loogiline käik) andmete ettevalmistamiseks ning potentsiaalse põlengu analüüsiks ja võrdlemiseks tegelikult põlenud alaga. Potentsiaalse põlengu ala määratakse lähtudes tule leviku mudelist (Tulem D2.10) ja reaalsetest looduslikest tingimustest / takistustest. Põlenud ala määratakse pärast põlengu kustutamist. Ökosüsteemi teenuste metoodikaga leitakse nii potentsiaalselt põleda võinud väärtused kui tegelikult põlenud väärtused. Viimased annavad hinnangu tekkinud kahju kohta, vahe potentsiaalselt põleda võinud ja tegelikult põlenud väärtuse vahel annab ärahoitud kahju hinnangu.

## 8.2 Projekti käigus välja pakutud prototüübid

Lõppkasutajale suunatud prototüüp-tulemid on lisatud käesoleva aruande lõppu täismahus.

**D2.8. Tuleohu kaardi koostamise ja uuendamise algoritmi prototüüp (A)**

**D2.10. Põlengu leviku algoritmi prototüüp (B)**

**D2.14. Ökosüsteemidele tekitatud kahju ning ära hoitud kahju tuvastamise ja hindamise algoritmi prototüüp (C)**

## Kirjandus

- Almeida, DRA., Nelson, BW., Schietti, J., Gorgens, EB., Resende, AF, Stark, SC. , Valbuena, R. 2016. Contrasting fire damage and fire susceptibility between seasonally flooded forest and upland forest in the Central Amazon using portable profiling LiDAR. *Remote Sensing of Environment*: 153-160
- Andersen, H.-E., R.J. McGaughey, S.E. Reutebuch. 2005. Estimating forest canopy fuel parameters using LIDAR data. *Remote Sensing of Environment* 94(4):441-449.
- Arumäe, T., Lang, M. 2013. A simple model to estimate forest canopy base height from airborne lidar data. – *Forestry Studies | Metsanduslikud Uurimused* 58,46–56.
- Bär, A., Michaletz, ST., Mayr, S. 2019. Fire effects on tree physiology. *New Phytologist* 223: 1728–1741.
- Chandler, C., P. Cheney, P. Thomas, L. Trabaud, D. Williams. 1983. *Fire in forestry*. Bd. 1. New York: John Wiley and Sons
- Chowdhury, E. H., Hassan, Q. K.. 2015. Operational perspective of remote sensing-based forest fire danger forecasting systems. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 104 (2015) 224–236.
- Chung, M., Kim, Y. 2020. Analysis on Topographic Normalization Methods for 2019 Gangneung-East Sea Wildfire Area Using PlanetScope Imagery. *Korean Journal of Remote Sensing*, 36(2-1):79-197.
- Colak, E., Sunar, F. 2020. Spatial pattern analysis of post-fire damages in the Menderes District of Turkey. *Front. Earth Sci.* 14(2): 446–461.
- Ergibi, M., Hesseln, H. 2020. Awareness and adoption of FireSmart Canada: Barriers and incentives. *Forest Policy and Economics* 119:102271.
- Fidanova, S., Marinov, P. 2016. The Impact of Slope on Fire Spread Simulation. *Environmental Engineering and Management Journal*, 15(3):505-510.
- Junpen, A., Roemmontri, J., Boonman, A., Cheewaphongphan, P., Thao, PTB., Garivait, S. 2020. Spatial and Temporal Distribution of Biomass Open Burning Emissions in the Greater Mekong Subregion. *Climate* 8, 90.
- Kaldma, KK., Weber, T., Sirkel, H., Pajupuu, J., Maasalu, K. Karu, M. 2017. Ökosüsteemiteenuste kontseptsiooni rakendamine Päästeameti töö hindamisel. *Aruanne Päästeametile*, Tallinn, TLÜ, 52 lk.
- Kelly, AJ., Hodges, KE. 2020. Post-fire salvage logging reduces snowshoe hare and red squirrel densities in early seral stages. *Forest Ecology and Management* 473, 118272.

- Klauberg, C., Hudak, AT., Silva, CA., Lewis, SA., Robichaud, PR., Jain, TB. 2019. Characterizing fire effects on conifers at tree level from airborne laser scanning and high-resolution, multispectral satellite data. *Ecological Modelling* 412, 108820.
- Kosk, A., Lõhmus, L. 2011. Ülevaade Eesti rabade ökosüsteemi teenustest ja nende majanduslike väärtuste hindamisest. *Eesti Maaülikool*, lk 1-28.
- Semeraro, T., Mastroleo, G., Aretano, R., Facchinetti, G., Zurlini, G., Petrosillo, I. 2016. GIS Fuzzy Expert System for the assessment of ecosystems vulnerability to fire in managing Mediterranean natural protected areas. *Journal of Environmental Management* 168:94-103.
- Lang, M., Kaha, M., Laarmann, D., Sims, A. 2018. Construction of tree species composition map of Estonia using multispectral satellite images, soil map and a random forest algorithm. – *Forestry Studies | Metsanduslikud Uurimused* 68, 5–24.
- Nesterov, V.G. 1949. Combustibility of the forest and methods for its determination (in Russian). USSR State Industry Press.
- Picos, J., Alonso, L., Bastos, G., Armesto, J. 2019. Event-Based Integrated Assessment of Environmental Variables and Wildfire Severity through Sentinel-2 Data. *Forests* 10, 1021.
- Semeraro, T., Mastroleo, G., Aretano, R., Facchinetti, G., Zurlini, G., Petrosillo, I. 2016. GIS Fuzzy Expert System for the assessment of ecosystems vulnerability to fire in managing Mediterranean natural protected areas. *Journal of Environmental Management* 168:94-103.
- Sila, A., Fernandes, PM., Rodrigues, AP., Alonso, JM., Honrado, JP., Perera, A., Azevedo, JC. 2019. Farmland abandonment decreases the fire regulation capacity and the fire protection ecosystem service in mountain landscapes. *Ecosystem Services* 36, 100908.
- Storey, EA. 2020. Postfire evaluation of fuelwood loss and restoration priority in a mixed, community-managed conifer forest of central New Mexico, United States. *Applied Geography*, 117, 102182.
- Torres, F.T.P., Romeiro, J.M.N., de Albuquerque Santos, A.C., de Oliveira Neto, R.R, Lima, G.S., Zanuncio, J.C.. 2018. Fire danger index efficiency as a function of fuel moisture and fire behavior. *Science of The Total Environment* , 631–632:1304-1310
- Van Wagner, C. E. (1987). Development and Structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. Canadian forest service, Forestry Technical report 35, Ottawa.
- Wang, Y., Anderson, K. R., Suddaby, R. M. (2015). Updated source code for calculating fire danger indices in the Canadian Forest Fire Weather Index System. Canadian forest service, Information report NOR-X-424, Ottawa.

## D2.8 Prototype of the algorithm for compiling and renewing fire hazard map

### D2.8 Tuleohu kaardi koostamise ja uuendamise algoritmi prototüüp

#### Kokkuvõte

Esitatakse algoritmide ja protseduuride kirjeldused andmete ettevalmistamiseks ning tuleohuindeksi arvutamiseks Nesterovi ja „Kanada“ mudeli järgi. Esitatakse näitlikustavad kaardid tuleohuindeksi muutumisest erineva ilmastiku perioodidel ning erinevaid mudeleid võrdlevad kaardid. Kirjeldatud on sisendandmete olemus ja olemasolu, andmete töötlemise protseduurid, tuleohuindeksi arvutamine.

Viited protseduuride ja andmete asukohtadele on selles versioonis TÜ sisemisele andmehoidlale. Protseduuride ja andmete tehniline jagamine tellijaga lepitakse kokku eraldi.

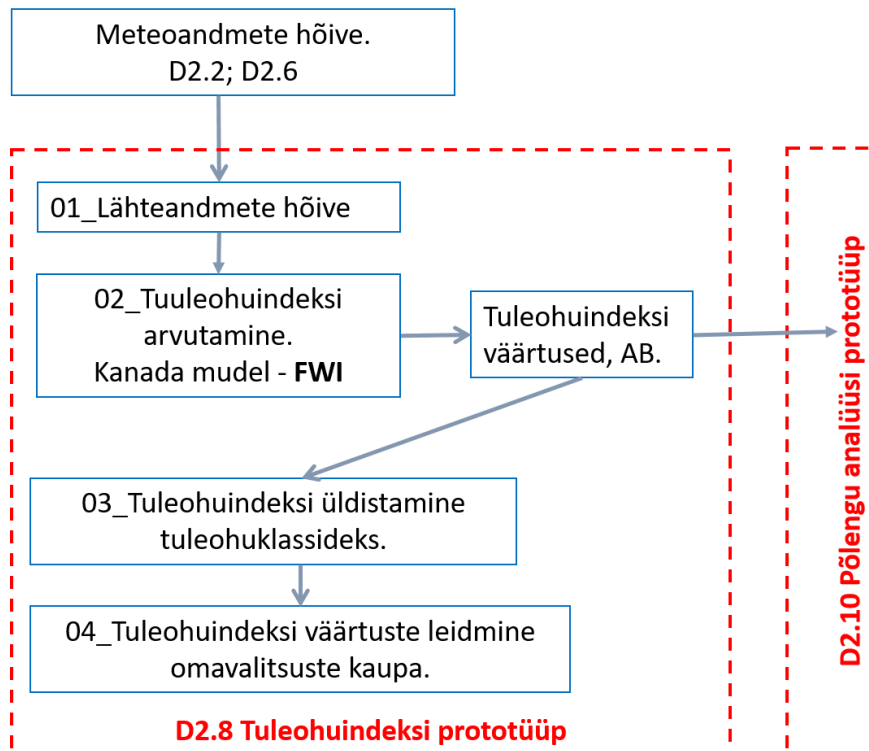
## Sisukord

1	Tuleohu kaardi valmistamise üldine vooskeem .....	23
2	Sisendandmed .....	23
2.1	Meteoroloogilised andmed, TÜ FI.....	23
2.2	Ilmajaamade andmed, KEMIT .....	24
2.3	Tulekahjude andmed.....	25
2.4	Tuleohuindeksid 2014-2018.....	25
2.5	RITA ruudustik .....	26
2.6	Administratiivüksused.....	26
2.7	Maismaamask.....	26
2.8	Andmetega kaetus.....	26
3	Andmete ettevalmistamine.....	27
3.1	Nesterovi mudel .....	27
3.2	KANADA mudel.....	28
4	Tuleohutuse indeksi arvutamine .....	30
4.1	Nesterovi tuleohuindeksi arvutamine .....	30
4.2	KANADA mudeli tuleohuindeksi arvutamine .....	31
4.3	Tuleohuindeksi üldistamine tuleohu klassideks.....	32
4.4	Tuleohu klasside jaotus administratiivüksuste kaupa.....	34
4.5	Kanada indeksi vahepealsete tulemuste kasutamine Päästeameti tuleleviku kaardi koostamisel .....	35
5	Tuleohuindeksi arvutamise näited .....	36
Lisa A1.....		41
	Kanada mudeli osised ja põhimõtteline skeem.....	41

# 1 Tuleohu kaardi valmistamise üldine vooskeem

Prototüübi loomisel kasutati metoodikat, mis on kirjeldatud dokumendis D2.5 Soovituslikud meetodid tuleohu kaardi koostamiseks. Vastavalt metoodikale hindab kaart meteoroloogilistest näitajatest tulenevat tuleohtu.

Tuleoht kaardistatakse ruutkaardil lahutusega ligikaudu 1x1 km üle kogu Eesti, sisendiks dünaamiliselt uuenev meteoandmete väli. Tuleohuindeksi arvutatakse nn. Kanada mudeli FWI algoritm meetodil (joonis A.1.; vaata lisa 1).



Joonis A.1. Prototüübi üldine skeem

## 2 Sisendandmed

### 2.1 Meteoroloogilised andmed, TÜ FI

#### **Mudeli andmed:**

HARMONIE mudelist pärivad temperatuur, suhteline niiskus ja tuulekiirus X ja Y suunas (vaata ka D2.6), mis prototüübi tegemise ajal on saadud Füüsika Instituudist. Edaspidi kasutatakse Ilmateenistuse püsitenust. Formaat ja ajaline jaotus võib muutuda. Uuendatakse iga päev. Andmed on NetCDF formaadis.

Andmete geograafiline võrgustik on 393 x 285 punkti alates laiuskraadist 57.4327 ja pikkuskraadist 21.5896 võrgusammudega 0.0173 kraadi idasuunas ja 0.0087 kraadi põhjasuunas, WGS 84 projektsioonis, mis annab horisontaalse lahutuse ligikaudu 1 km (vaata ka RITA ruudustik).

FI-st saadud erinevad tulemid, FWI arvutamisel kasutatud 2017 ja 2018 andmed, mis asuvad: Z:\RITA\2\_Saadud\_andmed\190520\_TÜ\_FI\_meteo\_mudelandmed. Algandmete komplektid on eraldi

KANADA ja NESTEROV mudelite jaoks, mõlemas 2017 ja 2018 andmed, iga kuupäeva kohta on eraldi fail.

Failide nime struktuur: KANADA\_Y2017M01D01\_09UTC.nc = komplekt\_Yaaaa +Mkk+Dpp\_kellUTC

NESTEROV\_temp\_rh\_Y2017M01D01\_12UTC.nc=komplekt\_temp\_rh\_Yaaaa +Mkk+Dpp\_kellUTC

Erinevalt 2017, 2018 andmetest on 2019. a andmetes antud tuulekiirus m/s ja tuule suund. Andmed asuvad R:\RITA\2\_Saadud\_andmed\200522\_TU\_FI\_mudeliandmed\_2019. 2019. a andmetel on sama faili nime struktuur.

**Sademetete (radari) andmed asuvad:** R:\RITA\2\_Saadud\_andmed\192710\_TU\_FI\_sademed\_WP2; olemas 2018 ja 2019

Ajaliselt väljastatakse sademesummad kolme tunni sajusummana alates 02:00-05:00 UTC jne. Andmete formaat NetCDF, faili nime struktuur SURAAKKPPHHMM.nc, kus SUR on radari nimi, AA aasta, KK kuu, PP kuupäev, HH tund (tähistab n-ö 3 eelmist tundi), MM minutid. Edaspidi hakkavad sademetete andmed olema vahemikes 0:00-03:00 UTC jne. 3h vahemikena.

# SUR1804010200.nc - see on 23..02 UTC

# SUR1804010500.nc

# SUR1804011100.nc

# SUR1804011400.nc

# SUR1804010800.nc

# SUR1804011700.nc

# SUR1804012000.nc

# SUR1804012300.nc

## 2.2 Ilmajaamade andmed, KEMIT

Kasutatakse radari rikete puhul

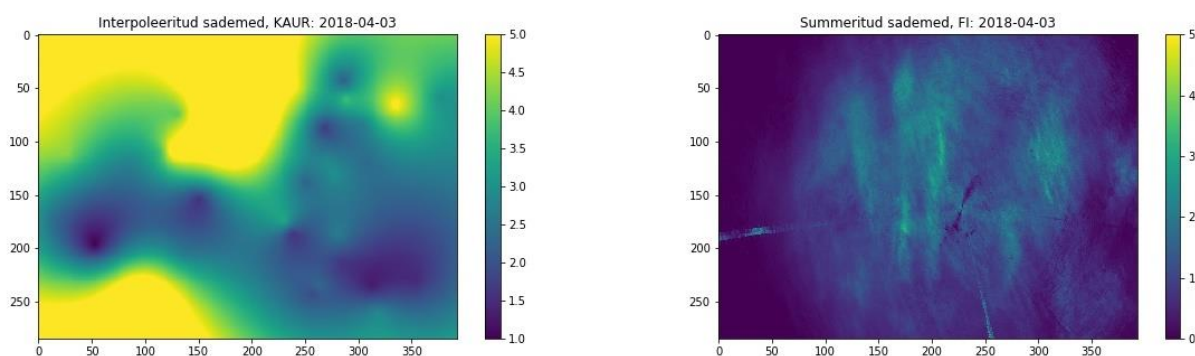
01\_2-10\_19\_99 meteoroloogilised andmed.xlsx on 2014 kuni 2019:

- Nesterovi jaoks temperatuur 12 UTC, kastepunkt 12 UTC,
- Kanada mudeli jaoks temperatuur 9 UTC, suhteline õhuniiskus 9 UTC, 10 min keskmine tuulekiirus 9 UTC, 10 minuti keskmine tuule suund 9 UTC
- Tunnisademed

Kood andmete teisendamiseks .csv failideks

Asukoht:	R:\RITA\RITA_WP2_Tuli\2_Andmete_ettevalmistamine\KEMIT_meteoandmed_14-18
Kood:	02_Formaadi_kastepunkti_csv_12UTC.ipynb 02_Formaadi_sademetete_csv.ipynb 02_Formaadi_temperatuuri_csv_12UTC.ipynb
Tegija:	Edgar Sepp
Algandmed:	01_2-10_19_99 meteoroloogilised andmed.xlsx
Sammud:	Valmistab kolm csv faili Nesterovi mudeli jaoks
Tulemus:	03_Temperatuur_12UTC.csv 03_Kastepunkt_12UTC.csv 03_sademed_1h.csv





**Joonis A.2.** Interpoleeritud ilmajaamade sademed (vasakul) ja sademed radarilt (paremal) 3.aprill 2018.a.

### 2.3 Tulekahjude andmed

Pärinevad Päästeametist, viidud shape-faili kujule, saadud kahes osas 2014-2018 ja 2019. a. Kasutatud prototüübi valideerimisel.

Asukoht:	R:\RITA\RITA_WP2_Tuli\2_Andmete_ettevalmistamine\Tulekahjud_PA
Kood:	Formaadi_tulekahjude_andmeid.ipynb
Tegija:	Edgar Sepp, Merle Muru
Algandmed:	01_Tulekahjud_2014-2018_es.xlsx ja 021_Tulekahjud_2014-2018_es_v1.xlsx, Tulekahjud2019.xlsx
Sammud:	
Tulemus:	Tulekahjud.shp, Tulekahjud2019.shp

### 2.4 Tuleohuindeksid 2014-2018

Päri vad KAURist, kasutati Nesterovi prototüübi valideerimisel

Asukoht:	R:\RITA\RITA_WP2_Tuli\2_Andmete_ettevalmistamine\tuleohuindeksid
Kood:	Formaadi_tuleohuindeksite_andmed_190315.ipynb
Tegija:	Edgar Sepp
Algandmed:	Tuleohuindeksid_14-18_mod.xls
Sammud:	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Tuleohuindeksite xls fail natuke kohendatud - ülemine tühi rida eemaldatud jne..</li> <li>2. Jupyter notebook võtab Exceli faili ja <ul style="list-style-type: none"> <li>- teeb päev kuu aasta põhjal kuupäeva välja</li> <li>- tühjad väljad (mõõtmistulemusi polnud täidab -999)</li> </ul> </li> <li>3. Ekspordib tabeli uude csv faili! <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tuleohuindeksid_14_18_ok.csv</li> </ul> </li> </ol>
Tulemus:	Tuleohuindeksid_14_18_ok.csv

Ilmateenistusest saadud mudeli kirjelduse alusel koostatud koodiga arvutatud Nesterovi tuleohuindeksid jäid mõnevõrra erinevaks ametlikest tulemustest.

## 2.5 RITA ruudustik

Meteoroloogilise mudeli andmete koordineerimiseks lepiti kokku nn. RITA ruudustik. L'Est97 koordinaatsüsteemis genereeritud täis-kilomeetri ruudustik, ulatusega X,Y (6373000, 365000) kuni X,Y (6640000, 745000).

Ruudustiku punktid on transformeeritud WGS84 projektsiooni, selleks et moodustada alus meteomudeli andmetele. Tulemusena loodi laiuskraadist 57.4327 ja pikkuskraadist 21.5896 võrgusammudega 0.0173 kraadi idasuunas ja 0.0087 kraadi põhjasuunas alusruudustik.

Z:\RITA\RITA\_WP2\_Tuli\2\_Andmete\_ettevalmistamine\Kood\grid, kolm shape-faili:

- punktid\_eesti.shp (jooned, L'Est97),
- punktid\_eesti\_label.shp (punktid L'Est97) ja
- punktid\_eesti\_label\_wgs.shp (punktid WGS84)
- 

## 2.6 Administratiivüksused

Iga administratiivüksuse jaoks arvutatakse enimesinev (majority) ja maksimaalne (maximum) tuleohuindeksi väärtus. Algandmeteks on Z:\RITA\RITA\_WP2\_Tuli\3\_GIS\Asustus: maakond\_2019030.shp, omavalitsus\_20190301.shp (Maa-amet, 2019).

## 2.7 Maismaamask

Maismaa maskid, mida kasutati TI tulemuste visualiseerimiseks: R:\RITA\RITA\_WP2\_Tuli\3\_GIS\Andmed: mask\_est\_wgs.tif ja mask\_est\_lest.tif

## 2.8 Andmetega kaetus

Tabelis A.1 on toodud ülevaade sisendandmetest.

**Tabel A.1.** Andmetega kaetus (N – Nesterov, K-Kanada)

	2017	2018	2019
<i>Meteomudeli andmed</i>	N, K	N, K	N,K
<i>Radari sademed</i>		N, K valed ajavahemikud	N, K valed ajavahemikud
<i>KAURi meteoandmed</i>	N, K	N, K	N,K
<i>Tuleohuindeksid</i>	N	N	-
<i>Tulekajud</i>	jah	jah	jah

### 3 Andmete ettevalmistamine

Enne tulehuindeksi arvutamist ühtlustatakse lähteandmete ruumiline lahutus interpoleerides väärtused samale ruudustikule, mis on RITA ruudustik WGS84 projektsioonis (285 x 393). Igapäevaselt arvutatavad meteoroloogilised väärtused salvestatakse andmekogusse ning vajadusel kasutatakse neid rekursiivselt järgmise päeva tulehuindeksi väärtuste leidmiseks.

#### 3.1 Nesterovi mudel

Nesterovi mudeli algoritm luges niiskuse ja temperatuuri otse meteomudeli netCDF algfailidest, arvutas kastepunkti ja teisendas temperatuuri ühikud (Tabel A.2). Sademed (kas interpoleeritud ilmajaamade andmetest või summeeritud radari andmed) tuli ette valmistada. Kood sademete summeerimiseks ja interpoleerimiseks:

Asukoht:	R:\RITA\RITA_WP2_Tuli\3_GIS\Kood
Kood:	01_Arvuta_sademetesummad_radarilt.ipynb
Tegija:	Valentina Sagris
Algandmed:	3t sademete summad R:\RITA\2_Saadud_andmed\192710_TU_FI_sademed_WP2\2018\
Sammud:	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Tekitab tühja sõnastiku päevasummade hoidmiseks sade_radar{}</li> <li>2. <i>Loop</i>: iga kuupäeva kohta <ol style="list-style-type: none"> <li>a. Tekitab tühja sõnastiku ühe päeva 3t algnetCDF hoidmiseks dataset{}</li> <li>b. Lisad selle päeva failid: <ol style="list-style-type: none"> <li>i. Avab algfaili, loeb np arrayks, kontrollib väärtused üle 30mm ja NaN</li> <li>c. Kui ei ole hooaja esimene päev: lisab eelmise päeva failid <ol style="list-style-type: none"> <li>i. Avab algfaili, loeb np arrayks, kontrollib väärtused üle 30mm ja NaN</li> </ol> </li> <li>d. Summerib 3t failid</li> <li>e. Lisab päevasumma sade_radar{}</li> </ol> </li> </ol> </li> <li>3. Kontroll ja visualiseerimine</li> </ol>
Tulemus:	3_GIS\Arvutused\aaaa_sade_db.pkl

Asukoht:	R:\RITA\RITA_WP2_Tuli\3_GIS\Kood
Kood:	02_Arvuta_ruumiline_sademetekiht.ipynb
Tegija:	Edgar Sepp
Mudel	<b>Nesterov / ilmajaamade andmed, sademed</b>
Algandmed:	-al algusKp, lo -lõppKp csv failid
Sammud:	<i>Loop</i> : <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Pythoni dataframe ühe päeva sademetest</li> <li>2. Lisab ilmajaamade koordinaadid</li> <li>3. Interpoleerib rasterkihi (1km_wgs84), formaat = ndarray</li> <li>4. Kirjutab ilmajaamade shp (optional) kataloogi = 'Arvutused/Sademed/'</li> <li>5. Kirjutab sademete tiff (optional) kataloogi = 'Arvutused/Sademed/'</li> <li>6. Lisab interpoleeritud kihi sõnastikule</li> </ol>
Tulemus:	sõnastik → 2018_sademed_db.pkl

**Tabel A.2.** Ettevalmistatud andmed, NESTEROVI mudel: R:\RITA\RITA\_WP2\_Tuli\3\_GIS\Arvutused\

	2017	2018	2019
Kastepunkt	Arvutab koos indeksiga	Arvutab koos indeksiga	
Temperatuur, FI	Arvutab koos indeksiga	Arvutab koos indeksiga	
Sademed, interpoleeritud	2018_sademed_db.pkl	2018_sademed_db.pkl	
Sademed, radarilt		2018_sade_db.pkl	2019_sade_db.pkl

### 3.2 KANADA mudel

Kuna KANADA mudeli indeksid arvutati Pythoni keskkonnas, tuli meteomudeli netCDF faile sisse lugeda *array*-tüüpi massiivideks, teisendada ühikud ja vahel arvutada sisendandmeid ümber (Tabel A.3). Andmed salvestati uuesti *python* pickle formaadis, et hõlbustada teiste protseduuride poolt lugemist. Andmete ettevalmistamine koosnes kolmest protseduurist: 1) meteomudeli andmete teisendamine, 2) sademete kihi moodustamine ilmajaamade andmetest ja 3) radari andmete teisendamine

Asukoht:	R:\RITA\RITA_WP2_Tuli\3_GIS_k\Kood
Kood:	01_Arvuta_mudel_DB.ipynb
Tegija:	Valentina Sagris
Algandmed:	R:\RITA\2_Saadud_andmed\190520_FI_meteo_mudelandmed\kanada\KANADA_nc_singletime_filled\
Sammud:	Arvutab temperatuuri Kelvin → Celsius Arvutab tuulekiirust km/t : $w = np.sqrt(wX^{**2} + wY^{**2}) * 3.6$
Tulemus:	temperatuur C, suhteline niiskus, tuulekiirus km/h --> salvestab 3 python pickle faili: aaaa_tuul_db.pkl; aaaa_niis_db.pkl; aaaa_temp_db.pkl

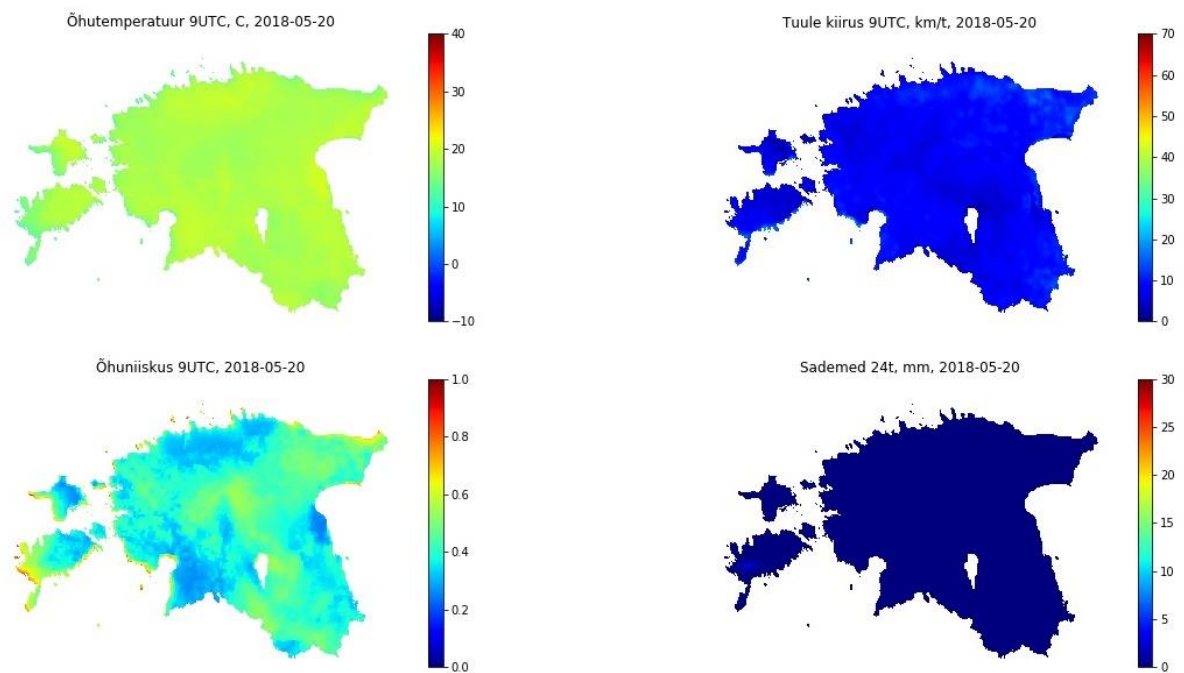
Asukoht:	R:\RITA\RITA_WP2_Tuli\3_GIS_k\Kood
Kood:	01_Arvuta_ruumiline_sademetekkuht.ipynb
Tegija:	Edgar Sepp, Valentina Sagris
Algandmed:	
Sammud:	Sademetekkihi arvutamine KAUR vaatlusandmetest
Tulemus:	2017_sademed_db.pkl

Asukoht:	R:\RITA\RITA_WP2_Tuli\3_GIS_k\Kood
Kood:	01_Sademetesummad_radarilt.ipynb
Tegija:	Valentina Sagris
Algandmed:	3t sademeteksummad R:\RITA\2_Saadud_andmed\192710_TU_FI_sademed_WP2\2018\
Sammud:	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Tekitab tühja sõnastiku päevasummade hoidmiseks sade_radar{}</li> <li>2. Loop: iga kuupäeva kohta <ol style="list-style-type: none"> <li>a. Tekitab tühja sõnastiku ühe päeva 3t algnetCDF hoidmiseks dataset{}</li> <li>b. Lisad selle päeva failid: <ol style="list-style-type: none"> <li>i. Avab algfail, loeb np array-ks, kontrollib väärtused üle 30mm ja NaN</li> <li>c. Kui ei ole hooaja esimene päev: lisab eelmise päeva failid</li> <li>i. Avab algfail, loeb np array-ks, kontrollib väärtused üle 30mm ja NaN</li> <li>d. Summerib 3t failid</li> <li>e. Lisab päevasumma sade_radar{}</li> </ol> </li> </ol> </li> <li>3. Kontroll ja visualiseerimine</li> </ol>
Tulemus:	aaaa_sade_db.pkl

**Tabel A.3.** Ettevalmistatud andmed, KANADA mudel asuvad

R:\RITA\RITA\_WP2\_Tuli\3\_GIS\_k\Arvutused\

	2017	2018	2019
<i>Suhteline niiskus</i>	2017_niis_db.pkl	2018_niis_db.pkl	2019_niis_db.pkl
<i>Temperatuur, FI</i>	2017_temp_db.pkl	2018_temp_db.pkl	2019_temp_db.pkl
<i>Tuulekiirus</i>	2017_tuul_db.pkl	2018_tuul_db.pkl	2019_tuul_db.pkl
<i>Sademed, interpoleeritud</i>	2017_sademed_db.pkl	2018_sademed_db.pkl	-
<i>Sademed, radarilt</i>		2018_sade_db.pkl	2019_sade_db.pkl



**Joonis A.3.** Kanada mudeli sisendandmed, 20. mai 2018.

## 4 Tuleohutuse indeksi arvutamine

### 4.1 Nesterovi tuleohuindeksi arvutamine

Praegu on Ilmateenistuses kasutusel Nesterovi tuleohuindeksi arvutamise mudel (vt. tulem D2.5). Ilmateenistuselt saadud koodi kirjelduse alusel loodud mudeli ja ametlikud tulemused erinevad pisut.

Kaks protseduuri: 1) ilmajaama andmete põhjal (sarnane hetkel kasutusel Ilmateenistuses), 2) radariandmete põhjal.

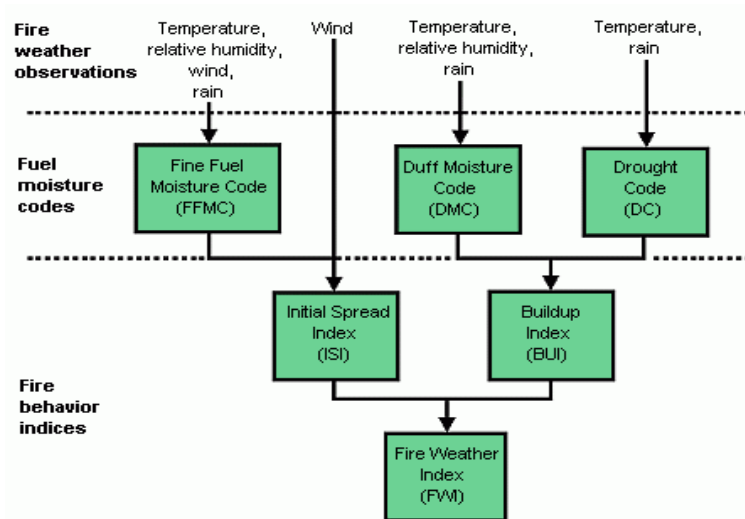
Asukoht:	R:\RITA\RITA_WP2_Tuli\3_GIS\Kood
Kood:	03_Arvuta_ruumilise_tuleohuindeksi_DB.ipynb
Tegija:	Edgar Sepp
Mudel	<b>Nesterov / ilmamudel andmed, sademed ilmajaamadest</b>
Algandmed:	2018_sademed_db.pkl,
Sammud:	Defineerib kaks visualisierimis meetodi: draw_fire_in_raw ja draw_fire_index_classes <ol style="list-style-type: none"><li>1. Avab suure netCDF - NESTEROV_temp_rh_Y2017Y2018_12UTC.nc ja filtreerib vastavalt algus-lõpp vahemikus</li><li>2. Initsialiseerib tühja array(285,393) ja tühja ti_db sõnastiku,</li><li>3. <i>Loop</i> igale kuupäevale:<ul style="list-style-type: none"><li>- Avab temperatuuri ja õhuniiskuse np.flipud</li><li>- Kalkuleerib kastepunkti</li><li>- Leiab kuupäeva stringi ja arvutab järgmise päeva kuupäeva</li><li>- Leiab eelmise kuupäeva 12UTC kuni 12UTC sademed</li><li>- <i>Loop</i>: Arvutab ti_uus piksli kaupa</li><li>- Lisab ti_uus sõnastikku, ti← ti_uus</li></ul></li><li>4. Visualiseerib ja salvestab (optional) raw_index ja class_index</li></ol>
Tulemus:	2018_ti_db2.pkl , kataloog = 'Arvutused/Tuleohuindeks/ti_ruumiline/' Raw index ja Class_index pildid

Asukoht:	R:\RITA\RITA_WP2_Tuli\3_GIS\Kood
Kood:	03a_Arvuta_ruumilise_tuleohuindeksi_DB.ipynb
Tegija:	Edgar Sepp
Mudel	<b>Nesterov / ilmamudel andmed, sademed radarilt</b>
Algandmed:	2018_sademed_db.pkl,
Sammud:	Defineerib kaks visualiseerimismeetodi: draw_fire_in_raw ja draw_fire_index_classes <ol style="list-style-type: none"><li>5. Avab suure netCDF - NESTEROV_temp_rh_Y2017Y2018_12UTC.nc ja filtreerib vastavalt algus-lõpp vahemikus</li><li>6. Initsialiseerib tühja array(285,393) ja tühja ti_db sõnastiku,</li><li>7. <i>Loop</i> igale kuupäevale:<ul style="list-style-type: none"><li>- Avab temperatuuri ja õhuniiskuse np.flipud</li><li>- Kalkuleerib kastepunkti</li><li>- Leiab kuupäeva stringi ja arvutab järgmise päeva kuupäeva</li><li>- Leiab eelmise kuupäeva 12UTC kuni 12UTC sademed</li><li>- <i>Loop</i>: Arvutab ti_uus piksli kaupa</li><li>- Lisab ti_uus sõnastikku, ti← ti_uus</li></ul></li><li>8. Visualiseerib ja salvestab (optional) raw_index ja class_index</li></ol>
Tulemus:	2018_ti_db2.pkl , kataloog = 'Arvutused/Tuleohuindeks/ti_ruumiline/' Raw index ja Class_index pildid

## 4.2 KANADA mudeli tuleohuindeksi arvutamine

Pythoni vahenditega realiseeriti algoritm, mis on kirjeldatud Van Wagner (1987) ja Wang, Anderson and Subbady (2015).

Metsadele ilmastikust tuleneva tuleohuindeks (Fire Weather Index, FWI) on erinevate indeksite süsteem (Joonis A.4), mida on arendatud ja testitud aastakümneid.



Joonis A.4. Kanada FWI indeksi arvutamise skeem (allikas <http://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/background>)

Järgnev protseduur teostab FWI (ja teiste indeksite) arvutust.

Asukoht:	R:\RITA\RITA_WP2_Tuli\3_GIS_k\Kood
Kood:	O2_Arvuta_FWI
Tegija:	Valentina Sagris
Algandmed:	Temperatuuri, õhuniiskuse, sademete ja tuule AB (pickles)
Sammud:	<p>Loeb andmestiku sisse</p> <p>Loob ffmc0, dmc0 ja dc0 – stardiväärtusetega <i>ndarray</i>-id</p> <p><i>Loop:</i></p> <p>Kasutab FWICLASS selleks, et arvutada pikslite kaupa ffmc, dmc, dc, isi, bui ja fwi indeksid kuupäeva kohta.</p> <p>Lisab arvutatud ffmc, dmc, dc, isi, bui ja fwi array-d vastavasse sõnastikku</p> <p>Salvestab jooksva kuupäeva ffmc, dmc, dc stardiväärtustena järgmiseks kuupäevaks</p> <p>Salvestab <b>ffmc, dmc, dc, isi, bui ja fwi</b> jooksva kuu andmed kettale.</p>
Tulemus:	Tabel A.4.

**Tabel A.4.** Arvutatud Kanada FWI indeksi tulemuste failid

Kataloog	Meteo	Sademed	Tulemus Iga kuu kohta eraldi db
GIS_k/Arvutused/FWI	FI meteo	interpoleeritud	aaaakk_ffmc_db.pkl aaaakk_dmc_db.pkl aaaakk_dc_db.pkl aaaakk_isi_db.pkl aaaakk_bui_db.pkl aaaakk_fwi_db.pkl
GIS_k/Arvutused/FWI-2	FI meteo	radarilt	aaaakk_ffmc_db.pkl aaaakk_dmc_db.pkl aaaakk_dc_db.pkl aaaakk_isi_db.pkl aaaakk_bui_db.pkl aaaakk_fwi_db.pkl

### 4.3 Tuleohuindeksi üldistamine tuleohu klassideks

Nesterovi tuleohu klassid moodustati vastavalt välja kujunenud praktikale – keskkonnaministri määrusele (Tabel A.5).

**Tabel A.5.** Nesterovi tuleohuklassid

<i>Klassid:</i>	<i>TI väärtused suvel</i>	<i>TI väärtused kevadel kulu perioodil</i>
<i>Kl 1</i>	0 ...<= 100	0 <= 60
<i>Kl 2</i>	101 ...<= 400	61 <= 130
<i>Kl 3</i>	401...<= 3000	131 <= 450
<i>Kl 4</i>	3001...<= 7000	451 <= 2400
<i>Kl 5</i>	>= 7001	>= 2401

Kanada FWI indeksi klasside skaalasid on kasutusel erinevad, antud prototüübis kasutati EL EFFIS portaali skaalat (Tabel A.6).

<https://effis.jrc.ec.europa.eu/about-effis/technical-background/fire-danger-forecast/>

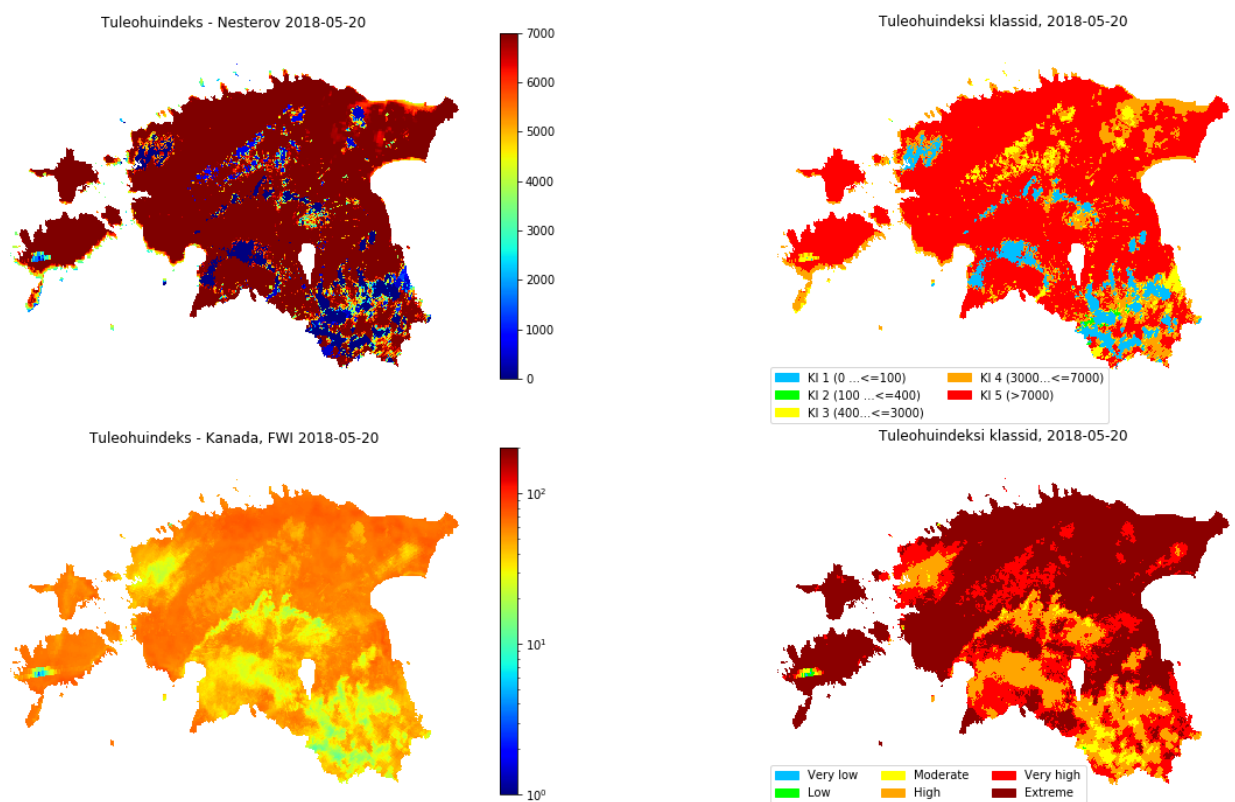
**Tabel A.6.** EFFIS tuleohu klassid

Fire Danger Classes	FWI	FFMC	DMC	DC	ISI	BUI
Very Low	FWI < 5.2	FFMC < 82.7	DMC < 15.7	DC < 256.1	ISI < 3.2	BUI < 24.2
Low	5.2 >= FWI < 11.2	82.7 >= FFMC < 86.1	15.7 >= DMC < 27.9	256.1 >= DC < 334.1	3.2 <= ISI < 5.0	24.2 <= BUI < 40.7
Moderate	11.2 >= FWI < 21.3	86.1 >= FFMC < 89.2	27.9 >= DMC < 53.1	334.1 >= DC < 450.6	5.0 <= ISI < 7.5	40.7 <= BUI < 73.3
High	21.3 >= FWI < 38.0	89.2 >= FFMC < 93.0	53.1 >= DMC < 140.7	450.6 >= DC < 749.4	7.5 <= ISI < 13.4	73.3 <= BUI < 178.1
Very High	38.0 >= FWI < 50.0	FFMC >= 93.0	DMC >= 140.7	DC >= 749.4	ISI >= 13.4	BUI >= 178.1
Extreme	FWI >= 50.0					



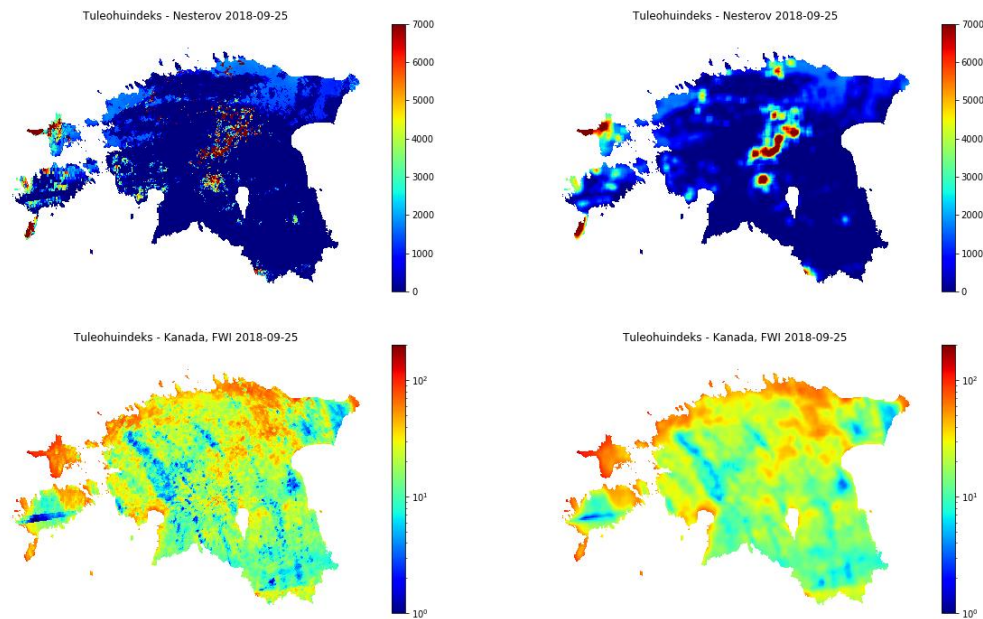
Visualiseerimiseks loodud protseduur kasutab Nesterovi TI klassid (tabel A.5) ja Kanada FWI klassid (tabel A.6) ja valmistab kahte tüüpi kaarte.

Asukoht:	R:\RITA\RITA_WP2_Tuli\3_GIS_k\Kood
Kood:	03_Visualiseeri_tuleohuindeks
Tegija:	Valentina Sagris
Algandmed:	ffmc, dmc, dc, isi, bui ja fwi sõnastikud
Sammud:	Option 1 Visualiseerib Nesterovi TI ja FWI väärtused ja klassid kõrvuti (joonis A.5) Option 2 Visualiseerib Nesterovi TI või FWI väärtused valitud perioodi jooksul
Tulemus:	Nt. Joonis A.5



**Joonis A.5.** Nesterovi ja Kanada mudelite indeksid ja tuleohu klassid, 20. mai 2018.

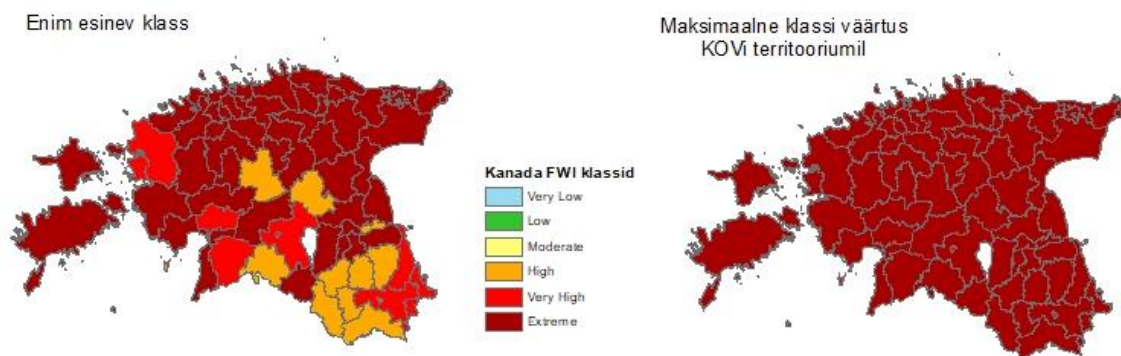
Visualiseerimise protseduuri käigus on võimalik andmeid siluda liikuva akna filtriga (filtri suuruse saab ette anda), et saavutada üldistatumat pilti.



**Joonis A.6.** Üldistatud tulemused, filtri suurus 7 x 7 pikslit. Vasakul indeksi algväärtused, paremal üldistatud väärtused.

#### 4.4 Tuleohu klasside jaotus administratiivüksuste kaupa.

Loodud protseduur tuleohuindeksite enimesinevate ja maksimaalsete väärtusete leidmiseks administratiiv-üksuste kohta (omavalitsused/maakonnad).



**Joonis A.7.** Tuleohu klasside üldistamine KOV-ide kaupa. Vasakul: enim esineva klassi meetodiga, paremal: maksimum klassi meetodiga. Sama kuupäeva üldistamata andmed on esitatud joonisel A.5.

Tuleb arvestada, et kohalike omavalitsuste pindalad peale haldusreformi on nii suured ja tuleohu ruumiline varieeruvus omavalitsuse piires on suur. Jooniselt A.7 näeme, et enimesinevad ja maksimaalsed väärtused jäävad domineerima ja tulemusena laiendatakse kogu KOV territooriumile kõige tuleohtlikum klass. Kui tuleoht väheneb nt. veerandil territooriumist, siis see KOV tasandil ei kajastu. Seega, on ka KOV jaoks informatiivsem algandmestik pikslipõhiselt. Kaaluda üldistamist väiksemate üksuste kaupa.

Asukoht:	R:\RITA\RITA_WP2_Tuli\3_GIS_k\Kood
Kood:	04_TI_interpreteerimine.ipynb
Tegija:	Valentina Sagris
Algandmed:	FWI sõnastikud
Sammud:	-Kasutab omavalitsuste või maakondade shapefaili, mida konverteerib rastriks sama resolutsiooniga kui FWI tulemused -teisendab FWI väärtuste rastri -FWI klasside rastriks -leiab zonal_stat funktsiooni abil KOVile majority ja maksimum FWI klass -salvestab tulemus csv failina
Tulemus:	Csv fail kujuga: MNIMI,MKOOD,majority,max Saare maakond,0074,6.0,6.0 Viljandi maakond,0084,4.0,6.0 Hiiu maakond,0039,6.0,6.0 Harju maakond,0037,6.0,6.0 Lääne maakond,0056,4.0,6.0 Rapla maakond,0071,6.0,6.0 Lääne-Viru maakond,0060,6.0,6.0 Ida-Viru maakond,0045,6.0,6.0 Põlva maakond,0064,4.0,6.0 Valga maakond,0081,4.0,6.0 Tartu maakond,0079,6.0,6.0 Pärnu maakond,0068,6.0,6.0 Järva maakond,0052,6.0,6.0 Võru maakond,0087,4.0,6.0 Jõgeva maakond,0050,6.0,6.0

#### 4.5 Kanada indeksi vahepealsete tulemuste kasutamine Päästeameti tuleleviku kaardi koostamisel

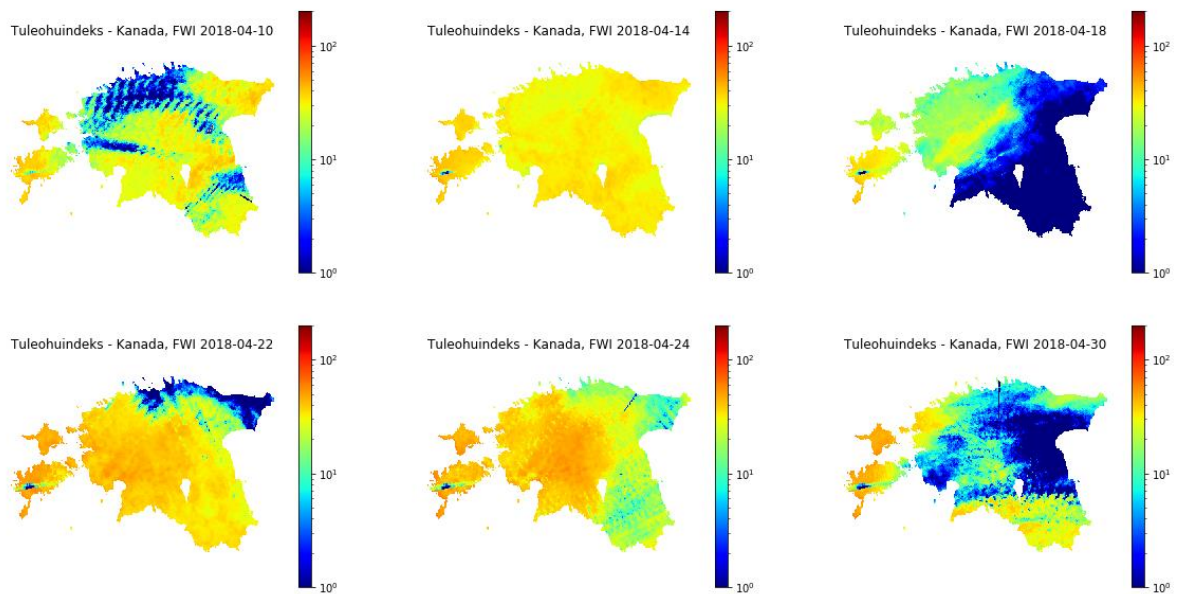
Vastavalt Tulem 2.10 metoodikale, FWI kalkuleerimise käigus valminud vahepealsed tulemused (vt. joonis A.1 ja A.3) salvestatakse iga päev ja tehakse kättesaadavaks Päästeameti põlengu analüüsi rakendusele, mis kasutab Kanada FBP (Fire Behavior Prediction System) tule käitumise ennustamise süsteemi algoritme. Meie arendatud prototüübis teostab selle protseduur 02\_Arvuta\_FWI. FBP-le on vajalikud järgmised vahetulemused:

- FFMC            Fine fuel moisture code
- BUI             Buildup index
- ISI              Initial spread index

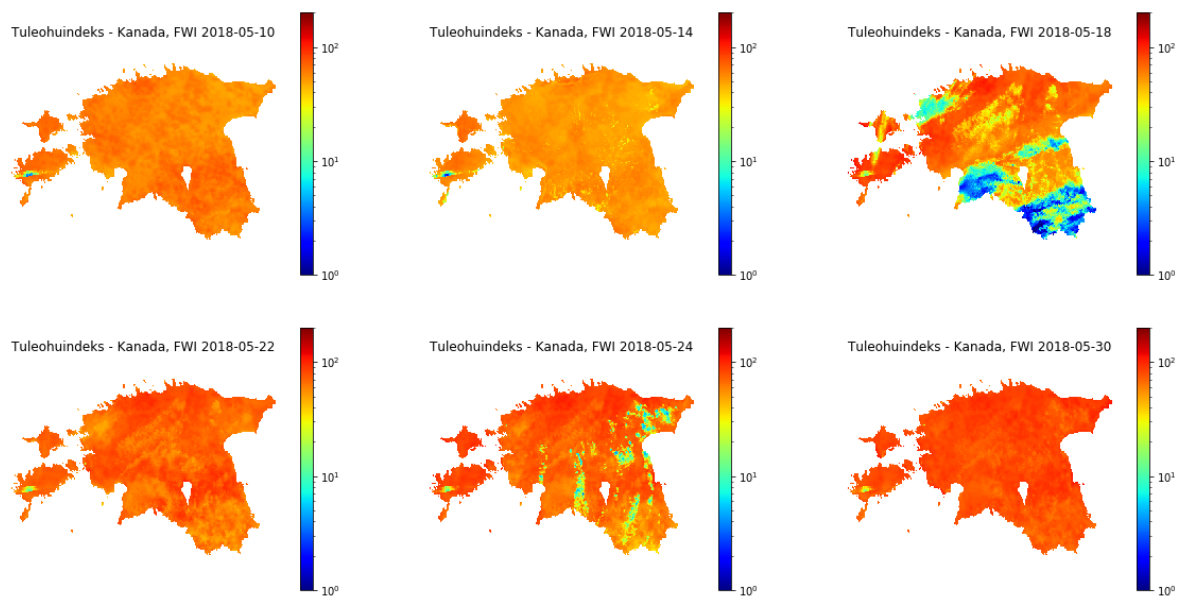
## 5 Tuleohuindeksi arvutamise näited

Näited tuleohuindeksi arvutamise tulemuste kohta on esitatud 2018. a. kevade põhjal.

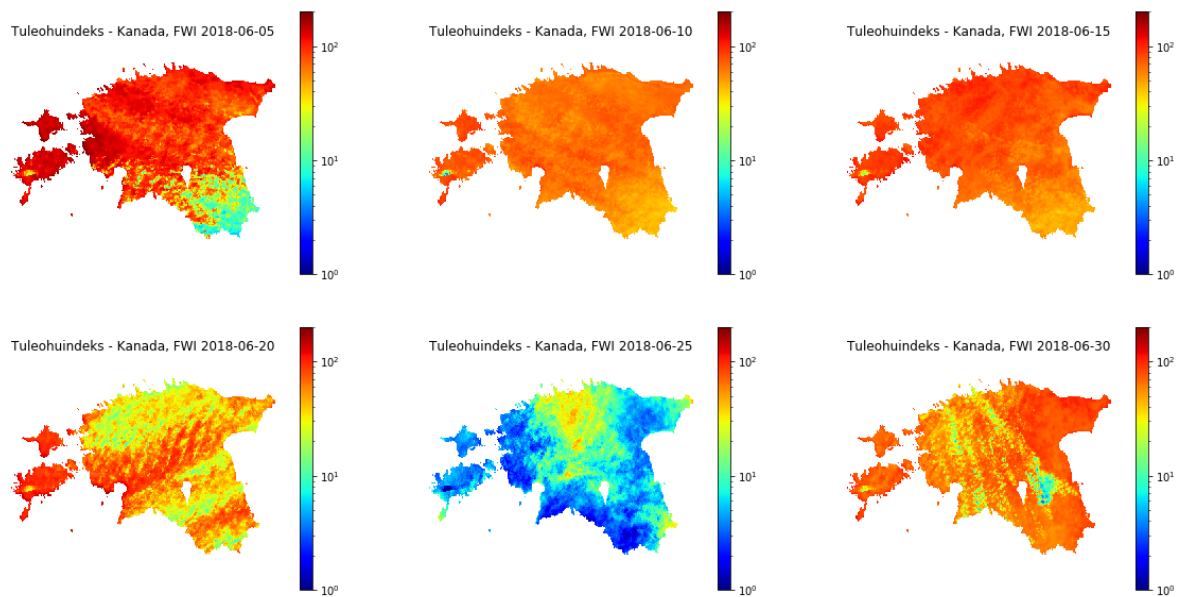
Üks tulekahjuderohkeimatest kuudest on aprill – ülevaade tuleohuindeksi muutumisest kuu lõikes joonisel A.8. Võrreldes järgnevate kuudega ei ole aprilli tuleohuindeks (FWI) kõrge. Edaspidi, maikuu hakkas põud (joonis A.9), mis kestis läbi juunikuu ja vihma sadas alles jaanipäeva paiku (joonis A.10).



**Joonis A.8.** FWI väärtused 2018. a aprillis, mil toimusid tulekahjud igal pool Eestis.



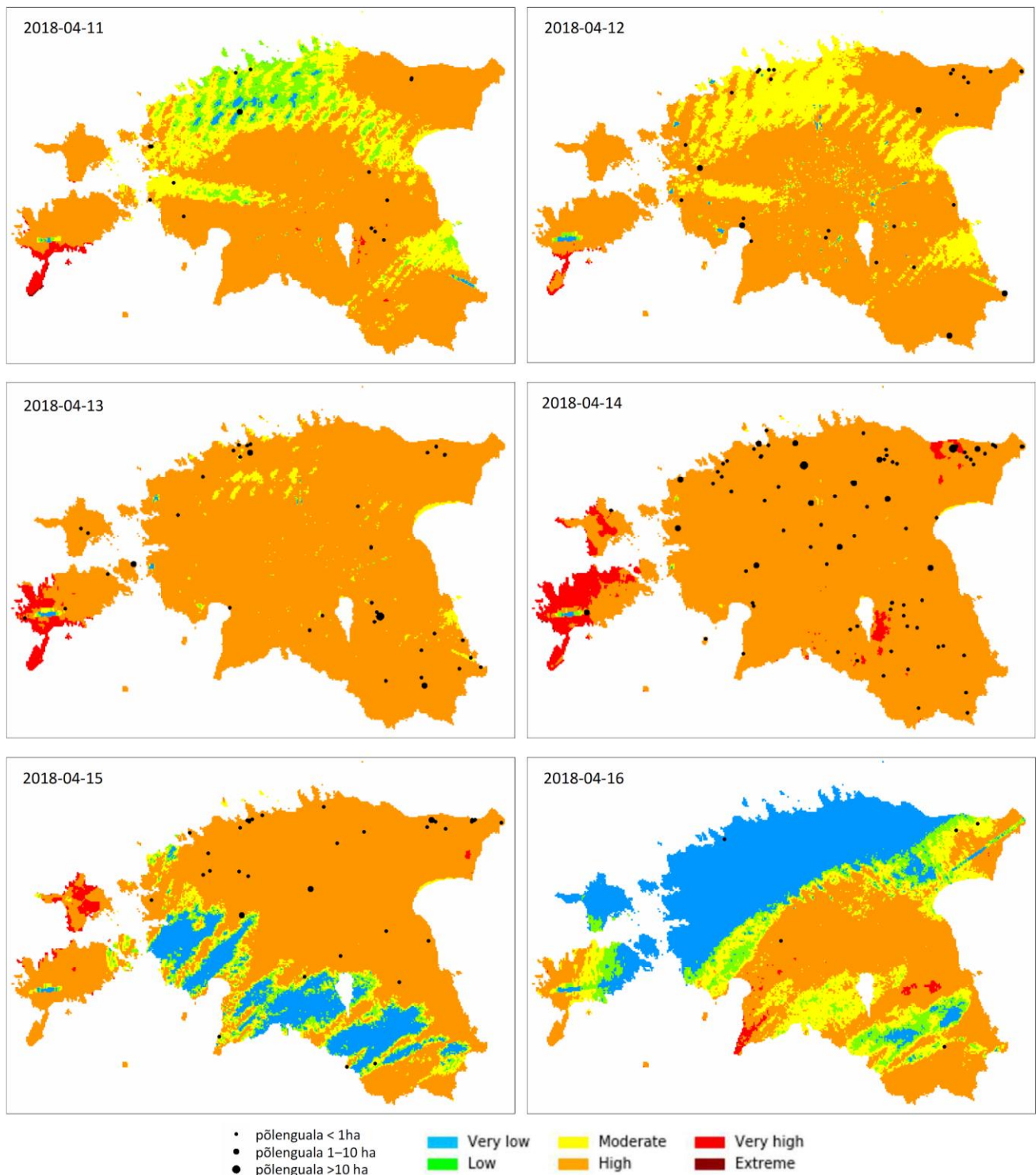
**Joonis A.9.** FWI väärtused 2018. a maikuu – põud.



**Joonis A.10.** FWI väärtused 2018. a juunikuus

Kanada mudeli alusel arvatud tuleohuindeks (FWI) suureneb 2018. aastal kogu Eestis kuni 14. aprillini, mil esines enim maastikupõlenguid ühel päeval. Seejärel Edela- ja Lõuna-Eestis sajud vähendavad tuleohuindeksit, kuid ei nulli seda ja juba päev hiljem, 16. aprillil, on arvestatav tuleoht, mida kajastab indeksi klass mõõdukas (*moderate*), nendel aladel taas olemas (joonis A.11). Tuleohuindeksi realistlikumad väärtused, s.o. tuleohutase kiire taastumine peale mõõdukat sadu on üks Kanada mudeli eelis võrreldes Nesterovi mudeliga.

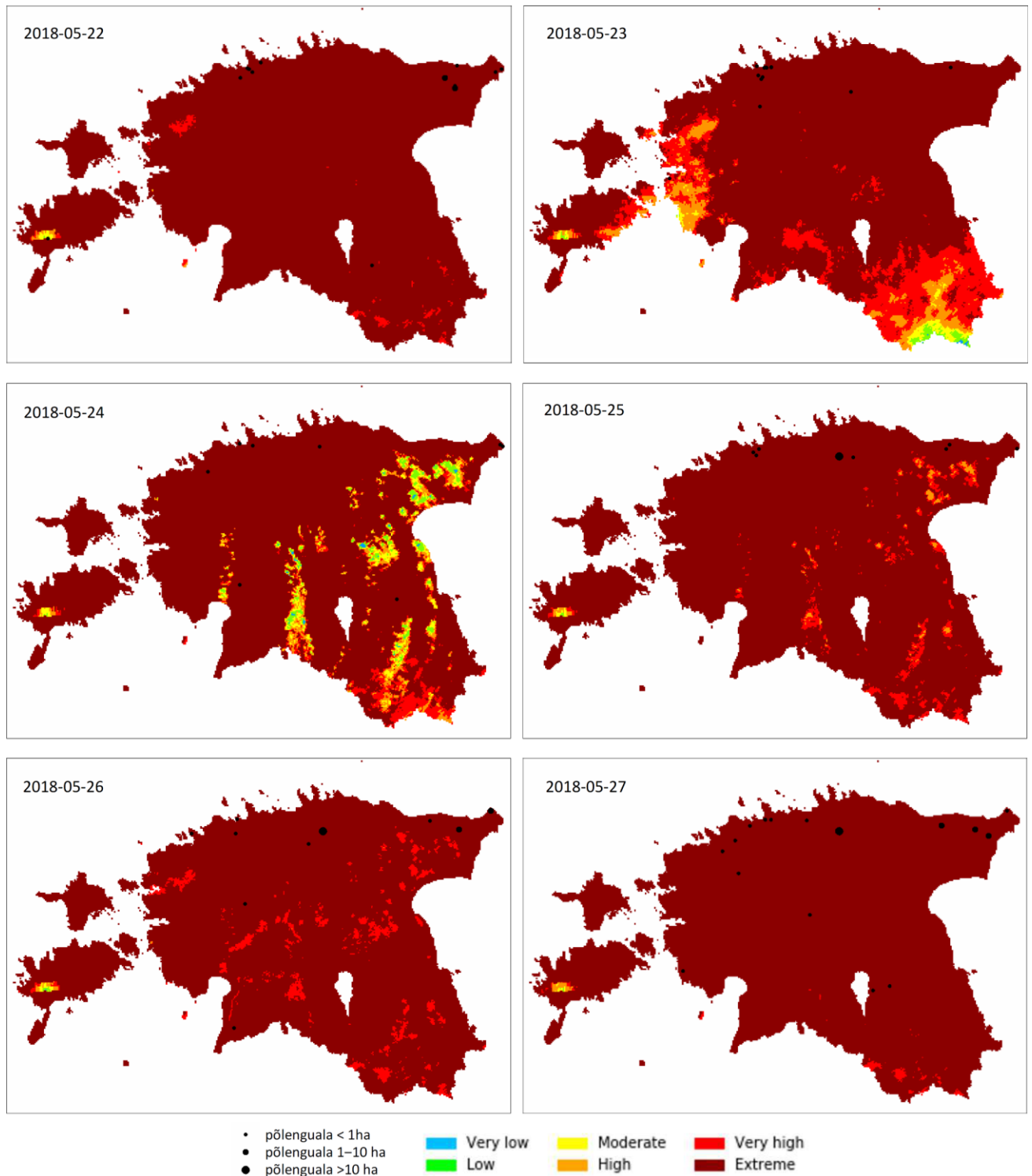
Aprilli tulekahjustest oli suur osa kulupõlengud ja väikese ulatusega, kuid leidis aset ka ulatuslikemaid, pindalaga üle 1 ha ja üle 10 ha metsapõlenguid. Arvatud tuleohuindeksi muutustest ja tulekahjude arvust ning ulatusest perioodil 11.-16. aprill annab ülevaate joonis A.11.



**Joonis A.11.** Tuleoht ja maastikutulekahjud Eestis 11.-16. aprill 2018. Tuleohuklassid vastavalt tabelile A.6, tulekahjud vastavalt Päästeameti andmestikule.

Mai teises pooles 2018. a. annab Kanada mudel tulemuseks valdavalt ekstreemse (*extreme*) tuleohtu klassi kogu Eestis (joonis A.12). Hästi on näha, kuidas tuleohuindeksi väärtused reageerivad lokaalsetele sademetele 23. ja 24. mail, mil üheks päevaks paiguti tuleoht oluliselt väheneb. Võrreldes aprilliga on mai tulekahjude seas suhteliselt rohkem metsa- ja maastikupõlenguid, vähem kulupõlenguid. Üks 2018. a. ulatuslikemaid ja ajaliselt pikemaid põlenguid algab 25. mail ja kestab 5 päeva Kuusalu vallas Keskpõlügenil. Tuleohuindeks on selleks ajaks väga kõrgeid (*very high*) ja

ekstreemseid väärtusi näidanud mitu nädalat (joonis A.9). Kuigi tuleohu klass on valdavalt ekstreemne, on mais põlengute koguarv väiksem kui aprillis. Tegelik lokaalne tuleoht võib olla mais ülehinnatud ja/või aprillis alahinnatud tulenevalt Eestile omastest sesoonsetest taimkattemuutustest.



Joonis A:12. Tuleoht ja maastikutulekahjud Eestis 22.-27. mai 2018. Tuleohuklassid vastavalt tabelile A.6, tulekahjud vastavalt Päästeameti andmestikule.

## Kirjandus:

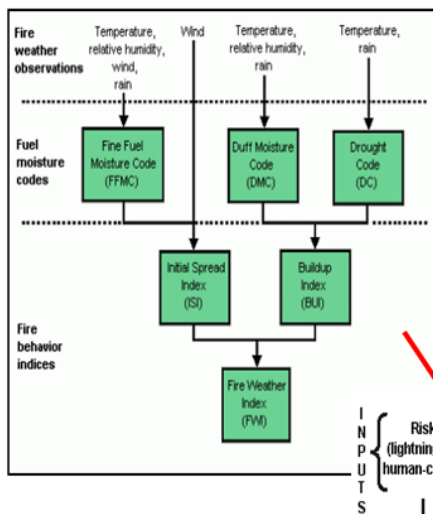
C. E. Van Wagner (1987). Development and Structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. Canadian forest service, Forestry Technical report 35, Ottawa.

Y. Wang, K. R. Anderson, and R. M. Suddaby (2015). Updated source code for calculating fire danger indices in the Canadian Forest Fire Weather Index System. Canadian forest service, Information report NOR-X-424, Ottawa.

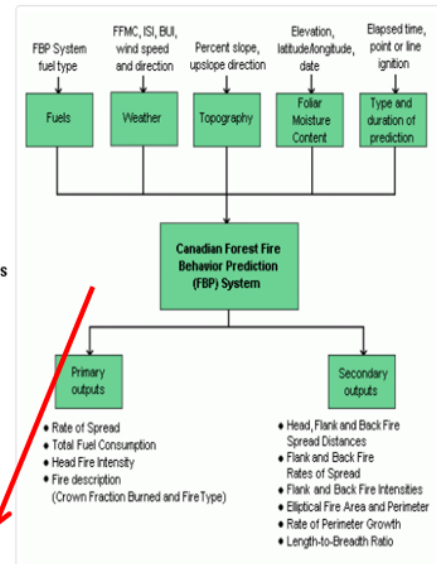
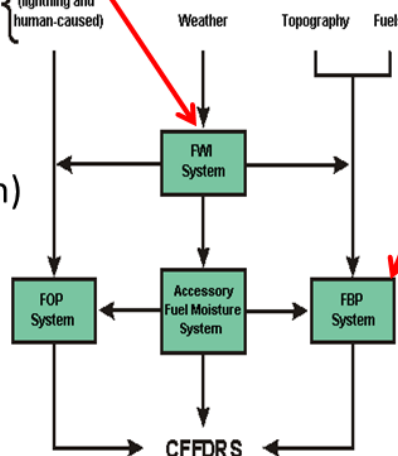


<http://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/background/summary/fdr>

• „Kanada mudel“



FWI 1984 (4. edition)



FBP 1992

7

- **Fine Fuel Moisture Code** **Peenpõlevmaterjali niiskus**
  - The Fine Fuel Moisture Code (FFMC) is a numeric rating of the moisture content of litter and other cured fine fuels. This code is an indicator of the relative ease of ignition and the flammability of fine fuel.
- **Duff Moisture Code** **Jäme põlevmaterjali niiskus**
  - The Duff Moisture Code (DMC) is a numeric rating of the average moisture content of loosely compacted organic layers of moderate depth. This code gives an indication of fuel consumption in moderate duff layers and medium-size woody material.
- **Drought Code** **Põuamäär = süvakihtide niiskus**
  - The Drought Code (DC) is a numeric rating of the average moisture content of deep, compact organic layers. This code is a useful indicator of seasonal drought effects on forest fuels and the amount of smoldering in deep duff layers and large logs.
- **Initial Spread Index** **Alge levikukiiruse indeks**
  - The Initial Spread Index (ISI) is a numeric rating of the expected rate of fire spread. It combines the effects of wind and the FFMC on rate of spread without the influence of variable quantities of fuel.
- **Buildup Index** **Põlevmaterjali hulk**
  - The Buildup Index (BUI) is a numeric rating of the total amount of fuel available for combustion. It combines the DMC and the DC.
- **Fire Weather Index** **Tuleohu indeks, seob alglevikukiiruse ja põlevmaterjali hulga**
  - The Fire Weather Index (FWI) is a numeric rating of fire intensity. It combines the Initial Spread Index and the Buildup Index. It is suitable as a general index of fire danger throughout the forested areas of Canada.
- **Daily Severity Rating** **Tuletõrje keerukuse määr**
  - The Daily Severity Rating (DSR) is a numeric rating of the difficulty of controlling fires. It is based on the Fire Weather Index but more accurately reflects the expected efforts required for fire suppression.

## D2.10 Prototype of the algorithm for wildfire situation analysis

### Põlengu leviku algoritmi prototüüp

#### Põlengu leviku algoritmi prototüüp

Baseerub:

- D2.8 Tuleohu kaardi prototüüp
- D2.9 Soovituslikud meetodid põlengute avastamiseks, esialgseks analüüsiks ja ohu modelleerimiseks

#### Kokkuvõte

Esitatakse algoritmide ja protseduuride kirjeldused andmete ettevalmistamiseks ning maastikupõlengu analüüsiks. Esitatakse näitlikustavad kaardid põlengu levikust ja iseloomust proovialadel. Soovitame kasutada Kanada maastikupõlengute mudelite komplekti kuuluvat arvutuseeskirja FBP (*Canadian Forest Fire Behavior Prediction System*), mille jaoks on olema R keskkonnas toimiv vabavaraline kood (arvutab primaarsed väljundid). Tulemkaardid annavad asukohapõhist teavet potentsiaalse tulekahju liigi, tule leviku kiiruse ja intensiivsuse ning põlenud materjali hulga kohta. Sekundaarsete väljundite arvutamiseks on olemas vabavaraline kood Prometheus (vt ka tulem 2.9).

## Sisukord

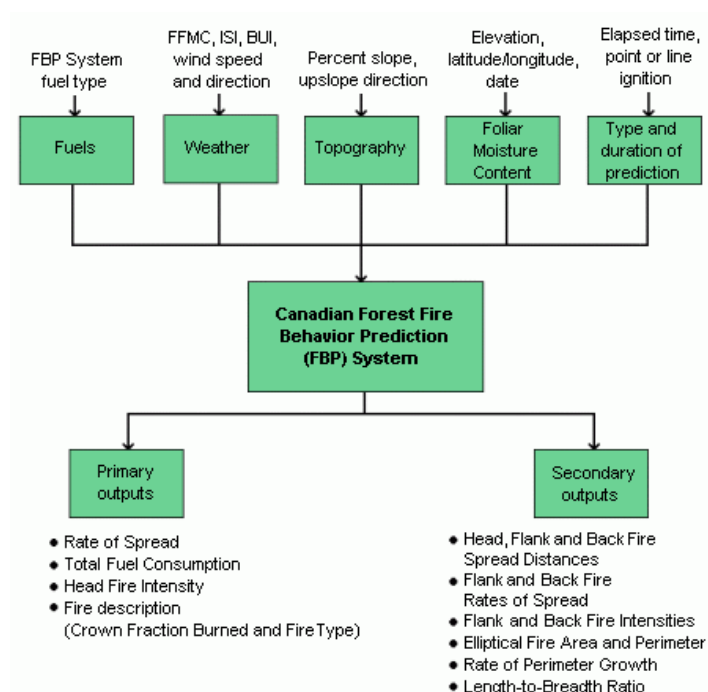
1.	Potentsiaalse põlengu analüüs.....	44
1.1	Kanada tule käitumise ennustamise süsteem.....	44
1.2	Algandmed .....	45
1.3	Andmete ettevalmistamine.....	46
1.3.1	Andmete uuendamine ja rakendamise etapid.....	48
1.4	Põlengu analüüsi kaartide koostamine .....	48
1.4.1	Algoritmi analüüs.....	48
1.4.2	Algoritmi rakendamine proovialadel.....	52
1.4.3	Asukohapõhised tulemid ja prognoosid.....	59
2	Põlengu arengu analüüs (sekundaarsed tulemid).....	59
Lisa B.1	.....	60

# 1. Potentsiaalse põlengu analüüs

## 1.1 Kanada tule käitumise ennustamise süsteem

Prototüüp baseerub algoritmil *Canadian Forest Fire Behavior Prediction System* (FBP) <https://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/background/summary/fbp> ja hindab potentsiaalset tuleohtu, arvestades ilmastikupõhist tuleoahuindeksit (FWI, vt. RITA tulem 2.8), põlevmaterjali mahtu ja omadusi (vt. RITA tulem 2.4) ning topograafiat.

FBP süsteemi struktuur on kujutatud joonisel B.1. FBP süsteemis kasutusel olevad lühendid koos eestikeelsete vastete ja mõõtühikutega on toodud **lisas B.1**. Käesolev prototüüp käsitleb FBP süsteemi primaarseid väljundeid (*primary outputs*; vt. joonis B.1). Prototüübis ei ole tegeldud tule arengu mudeliga (*elliptical growth model*) ehk FBP süsteemi sekundaarsete väljunditega (*secondary outputs*; vt. joonis B.1).



**Joonis B.1.** FBP algoritmi üldine skeem (allikas <https://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/background/summary/fbp>)

FBP kaartide loomiseks kasutati vabavaralist tarkvara R CFFDRS moodulit, fbpRaster funktsiooni

Algoritm koostab neli situatsiooni hindavat kaarti (nn. FBP *primary* väljundit):

- Tulefrondi leviku kiirus – Rate of Spread (ROS, m/min)
- Summaarne põlevmaterjali kulu – Total Fuel Consumption (TFC, kg/m<sup>2</sup>)
- Tulefrondi intensiivsus – Head Fire Intensity (HFI, kW/m)
- Tulekahju kirjeldus – Fire Description (FD, S=Surface, I=Intermittent, C=Crown), mis sisaldab põlengu tüüpi (rohttaimestiku/maapinna -, puistu keskosa, võrapõleng) ja põlenud võrade osakaalu hinnangut (Crown Fraction Burned, CFB).

Lisaks koostab algoritm eraldi kaardid võrade põlevmaterjali kulu - Crown Fuel Consumption (CFC, kg/m<sup>2</sup>) ja maapinna põlevmaterjali kulu - Surface Fuel Consumption (SFC, kg/m<sup>2</sup>) kohta, mis annavad kokku summaarse põlevmaterjali kulu – Total Fuel Consumption (TFC, kg/m<sup>2</sup>); ning tule leviku suuna asimuudi - Spread direction azimuth (RAZ, kraadides).

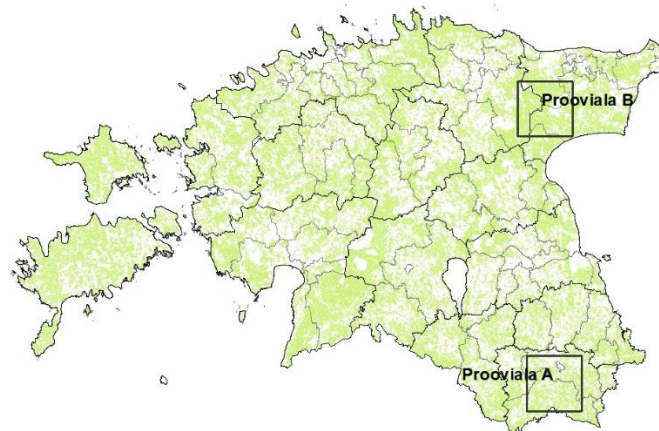
Erinevad stsenaariumid FBP algoritmis:

- lehtedeta puistutega versioon;
- lehes puistutega versioon;
- rohttaimestikus erinev kulu osakaal.

Oma paindlikkuse tõttu võimaldab FBP arvestada sesoonsete muutustega. FuelType koodid muutuvad, kui lehtpuud on raagus (leafless) või lehes (green). Samuti on võimalik rohttaimestikule ette anda kulu aste ('cured') protsentides.

Erinevate stsenaariumite parameetreid tuleb sisendis kasutada vastavalt situatsioonile looduses – kas vegetatsiooniperiood on alanud, kaua kestnud; kas puude lehtimine on alanud, kaua kestnud. Parima tulemuse saavutamiseks eeldab loodusvaatlusi eraldi Eesti erinevate piirkondade/maakondade kohta. Kaudsete näitajatena saab arvestada meteoroloogilisi (kaugseire)andmeid nagu pikaajaline ööpäeva keskmine õhutemperatuur, sademete hulk, lumikatte sulamise aeg.

FBP väljundite arvutusi katsetati kahel proovialal (joonis B.2) FWI aprilli ja mai kuu andmetega. 5. mai kohta arvutati võrdluseks nii lehtedeta kui lehes versioon.



**Joonis B.2.** FBP algoritmi rakendamise proovialad.

## 1.2 Algandmed

Algoritm kasutab sisendites järgmisi andmeid:

- Tulemi D2.8 FWI indeksid – FFMC, ISI ja BUI, resolutsioon 1 km;
- Tulemi D2.6 meteoroloogilise mudeli tuule kiirus ja suund, resolutsioon 1 km;
- Maa-ameti kõrgusmudel lahutusvõimega 25 m;
- Tulemi D2.4 põlevmaterjali tüüpide kaart, võraalguse kõrguse ja põlevaine massi kaardid, kõik lahutusvõimega 25 m.

FWI indeksid ja meteoroloogilised andmed muutuvad iga päev, kõrgusmudel ja põlevmaterjali tüüp vajavad muutmist aastase sammuga või harvem.

### 1.3 Andmete ettevalmistamine

Tabelis B.1. on esitatud FBP mooduli sisendite loend.

**Tabel B.1.** FBP algoritmi sisendid (eestikeelsed vaste lisas 1).

Lühend	Nimetus	Vaikimisi väärtus
FFMC	Fine fuel moisture code [FWI output]	
BUI	Buildup index [FWI output]	
ISI	Initial spread index [FWI output]	0
WS	Wind speed [km/h]	
WD	Wind direction [decimal degrees]	0
ELV	Elevation [meters above sea level]	
GS	Ground Slope [percent]	
Dj	Julian day	
Aspect	Aspect of the slope [decimal degrees]	
FuelType	FBP System Fuel	C2 (conifer) kood 2
PC	Percent Conifer for M1/M2 [percent]	50
CC	Percent Cured for O1a/O1b [percent]	80
GFL	Grass Fuel Load [kg/m <sup>2</sup> ]	0.35
CBH	Crown to Base Height [m]	3
CFL	Crown Fuel Load [kg/m <sup>2</sup> ]	1.0
LAT	Latitude [decimal degrees]	
LONG	Longitude [decimal degrees]	

#### Tulemist D2.8 FWI lähtuvad andmed ning tuule kiirus ja suund:

FWI andmete ning tuule kiiruse ja tuule suuna rastrid, mille resolutsiooni on 1 km muudetakse 25 m resolutsiooniga rastriteks. Kuna FBP kirjelduses on kasutatud lähema ilmajaama FWI süsteemi indekseid, on kasutatud FWI resolutsioon igati sobilik.

Protseduur '01\_andmete\_ettevalmistamine\_25m' teisendab andmed projektsiooni L'Est97, iga kuupäeva puhul moodustab kuupäevale alamkataloogi, iga FWI ja tuule muutuja kuupäeva kihist lõikab vastava suurusega prooviaala, vähendab resolutsiooni 25 meetrile ja salvestab tif-failiks. Sama protseduur valmistab ette DOY kihi – ehk tif-faili mille ainus väärtus on selle kuupäeva number.

#### Kõrgusmudel:

Kõrgusandmed pärinevad Maa-ameti geoserverist. Kõrgusmudelist (DEM) lahutusvõimega 25 m kalkuleeriti maapinna kalde (GS) ja ekspositsiooni (Aspect) rasterkihid. Iga prooviaala jaoks lõigatakse sellele alale vastava ulatusega sisendrastrid.

See on ühekordne töö, spetsiaalset protseduuri pole loodud. Andmed ei muutu arvestatava kiirusega.

#### Põlevmaterjali tüüp:

Põlevmaterjali tüübi kaardi ettevalmistamisel lähtutakse Kanadas loodud empiirilistest andmetest, mis on väga põhjalikult dokumenteeritud. <https://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/background/fueltypes/c1>

Otsene klasside ülekandmine ei ole võimalik ega ka vajalik, Põhja-Ameerikas on maastikupõlenguid looduslikult rohkem ja teised sh tuleohtlikumad liigid. Sisuliselt on Eesti oludes võimalik piirduda kuue põlevmaterjali klassiga (Kanadas 16, vt ka Tulem D2.11)

Kasutati ainult klasse, mis on toodud tabelis B.2. Tabel sisaldab ka Tulem D2.4 koodi, mis teisendati fbpRaster funktsioonile sobivaks. Valmistati kaks versiooni – nn. kevadine versioon, kus segametsad on lehtedeta (kood 9) ja rohi on lamandunud ('matted'; kood 14); ja teine, lehes segametsadega versiooni (kood segamets - 10 ja rohi – 15). Iga prooviala jaoks lõigati sellele alale vastava ulatusega sisendrastrid.

See on ühekordne töö, spetsiaalset protseduuri pole loodud. Edasisel rakendamisel tuleb andmekihti siiski uuendada, eriti metsamaa osas (raiesmikud), kus muutused on iga-aastased. Lähtuda põlevmaterjali kaardi loomise metoodikast, tulem 2.4.

**Tabel B.2.** FBP algoritmi sisendina kasutatavad põlevmaterjali tüübid ja neile vastavad põlevmaterjali klassid RITA tulem 2.4 raames loodud puistuplaanilt.

Kood	FBP tähis	Kanada FBP tüübid	Eestile kohandatud tüübid	Tulem D2.4 kood FBP_System_fuels.19.06.2020.tif
2	C-2	Boreal spruce	Kuusik	580-595 ja puistuplaani info
3	C-3	Mature jack or lodgepole pine	Männik	580-595 ja puistuplaani info
9	M-1	Boreal mixedwood-leafless	Segamets lehtedeta	500-595
10	M-2	Boreal mixedwood-green	Segamets lehes	500-595
13	NF	Not a fuel	Põlevmaterjali ei ole	-9999
14	O-1a	Matted grass	Lamandunud rohi	31
15	O-1b	Standing grass	Lamandumata rohi	31
19	WA	Water	Vesi	102

Lehtmetsades **okaspuude osakaalu** kiht (PC, Percent Conifer) arvatati Tulem D2.4 koodide 500-595 protsentideks teisendamise teel.

**Kulu astme** (CC, Percent Cured) kihi jaoks genereeriti rohumaade mask ja omistati väärtus ühtlaselt kogu rohumaal ulatuses. Valmistati ette erineva parameetri väärtusega kihid. Katsetati erinevate protsentidega väärtuseid - 40, 50, 60, ja 70 (kokku neli kihti)

**Rohttaimestiku põlevmaterjali mahu** (GFL, Grass Fuel Load) kihi moodustamisel pandi kokku rohumaade mask FBP\_System\_fuels.19.06.2020.tif-st ja polevaine.voras.tif. Ilmnes, et esineb alasid, kus polevaine maht on eeldatust suurem. Põhjuseks on see, et alad, mis on ETAKis rohumaad, on kohati kinni kasvanud. Ühikud teisendati kg/m<sup>2</sup>.

**Võra põlevmaterjali mahu** (CFL, Crown Fuel Load) moodustamisel pandi kokku metsade mask FBP\_System\_fuels.19.06.2020.tif-st ja polevaine.voras.tif. Ühikud teisendati kg/m<sup>2</sup>.

Kihi **võra alguse kõrgus maapinnast** (CBH, Crown to Base Height) moodustamisel pandi kokku metsade mask FBP\_System\_fuels.19.06.2020.tif-st ja vora.korgus.Irinne.tif. Ühikud teisendati meetriteks.

Prototüübi katsetustes ei ole eristatud põlevmaterjali tüübina **raiesmikke**. Originaalalgoritm on vastava sisendi ('slash') võimalus olemas. Vastava klassi loomiseks ja põlevmaterjali kaardile lisamiseks tuleks lähtuda algandmetena katastrikaardist (metsamaa, Maa-amet) ning sellele asuva maakatte kihi paksusest (Lidar maakattemudel, Maa-amet) ning teostada ruumianalüüs. Kui puudub oluline

maakattekihi paksus, on suure tõenäosusega tegemist raiesmiku seisus metsamaaga. Tehes arvutuse iga-aastaselt, saab eristada värsked raiesmikud taastuvatest ehk noore metsa järelkasvuga metsamaadest.

### 1.3.1 Andmete uuendamine ja rakendamise etapid

Kuna põlengu analüüsi rakenduse juurutamise eelduseks on:

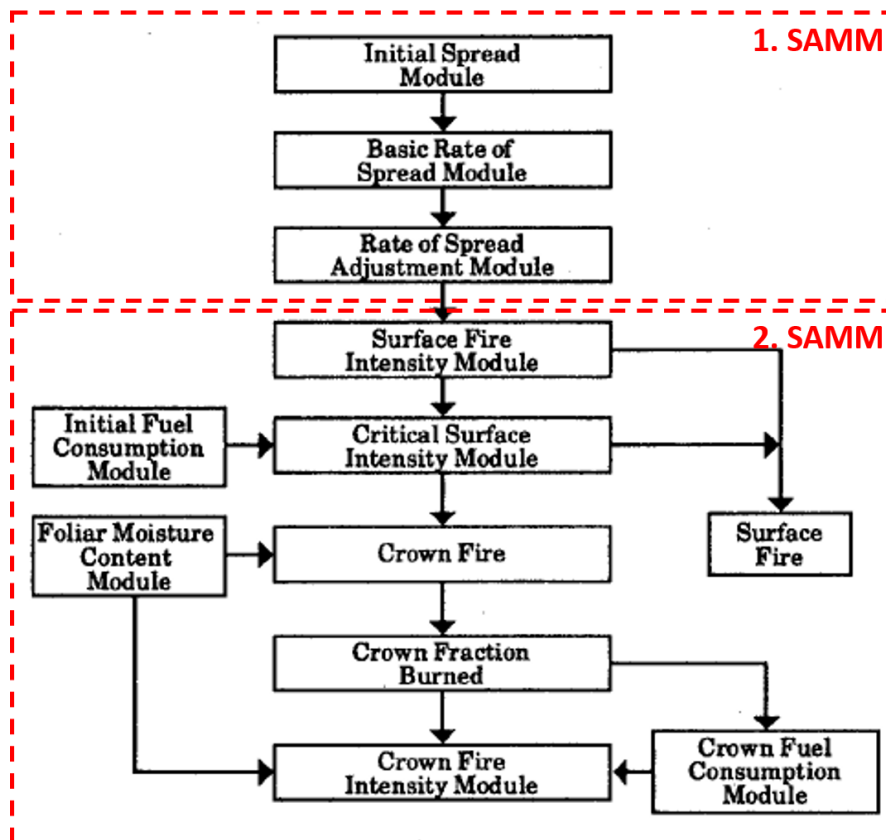
- Meteo-mudelite andmete moodul Ilmateenistuses on rakendatud või vähemalt teada, mis kujul, mis formaadis ja missugustes ühikutes hakkavad andmed laekuma. Potentsiaalse põlengu analüüsi rakendus eeldab andmete uuendamist igapäevaselt.
- Tuleohuindeksi rakendus/moodul ilmateenistuses on rakendatud või vähemalt on teada, kuidas andmed hakkavad laekuma. Potentsiaalse põlengu analüüsi rakendus eeldab andmete uuendamist igapäevaselt

Perioodiliselt, kord aastas, tuleb uuendada andmeid põlevmaterjali kohta. Vastavalt Maa-ametis tehtavatele aerofoto ja Lidar-mõõdistuse lendudele tuleb värskendada põlevmaterjali tüübi, põlevmaterjali mahu ja võrakõrguse kaarte.

## 1.4 Põlengu analüüsi kaartide koostamine

### 1.4.1 Algoritmi analüüs

Analüüsiti prototüübi algoritmi, mis on skemaatiliselt kujutatud joonisel B.3.

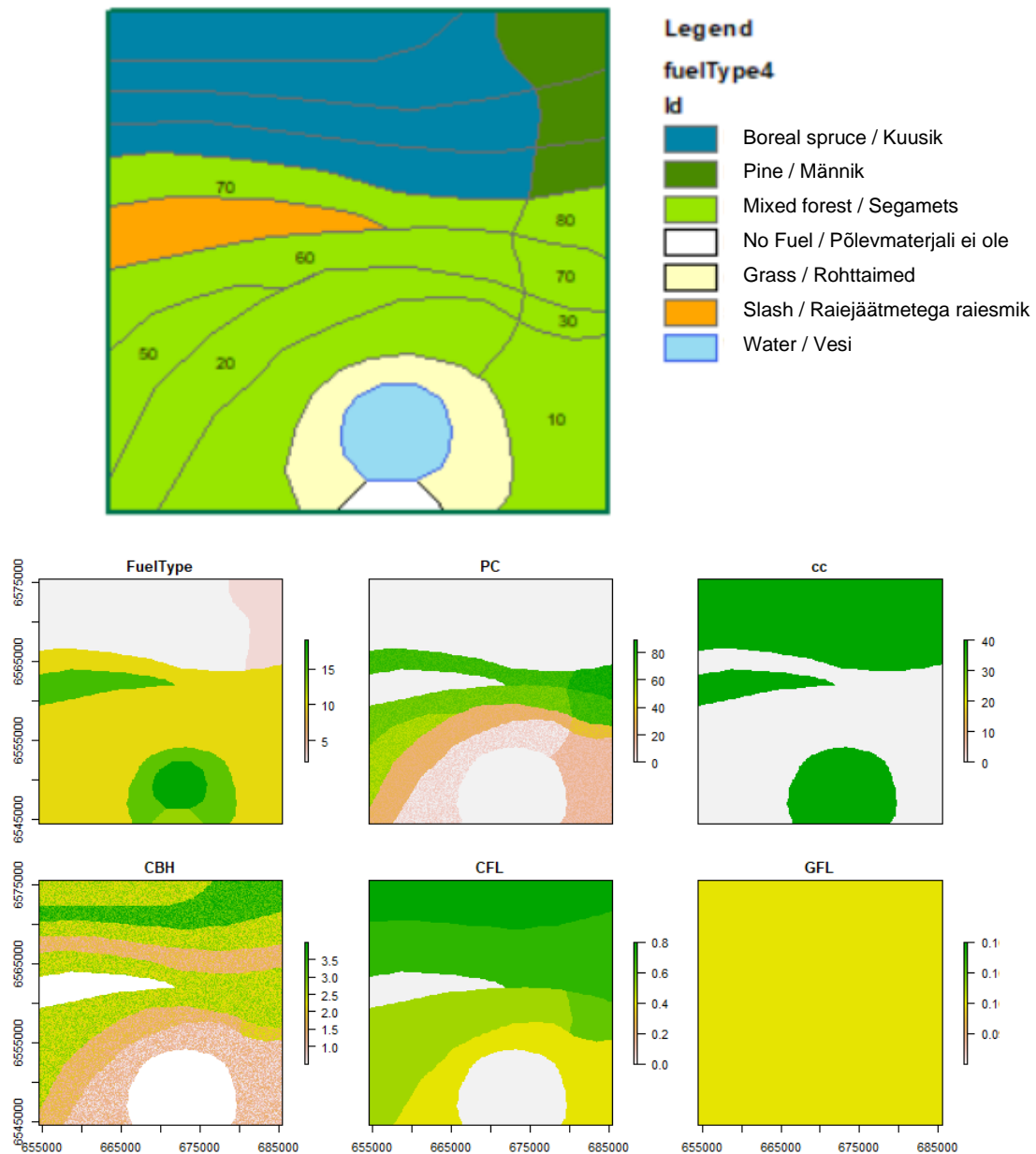


Joonis B.3. FBP-primary süsteemi algoritmi skeem.



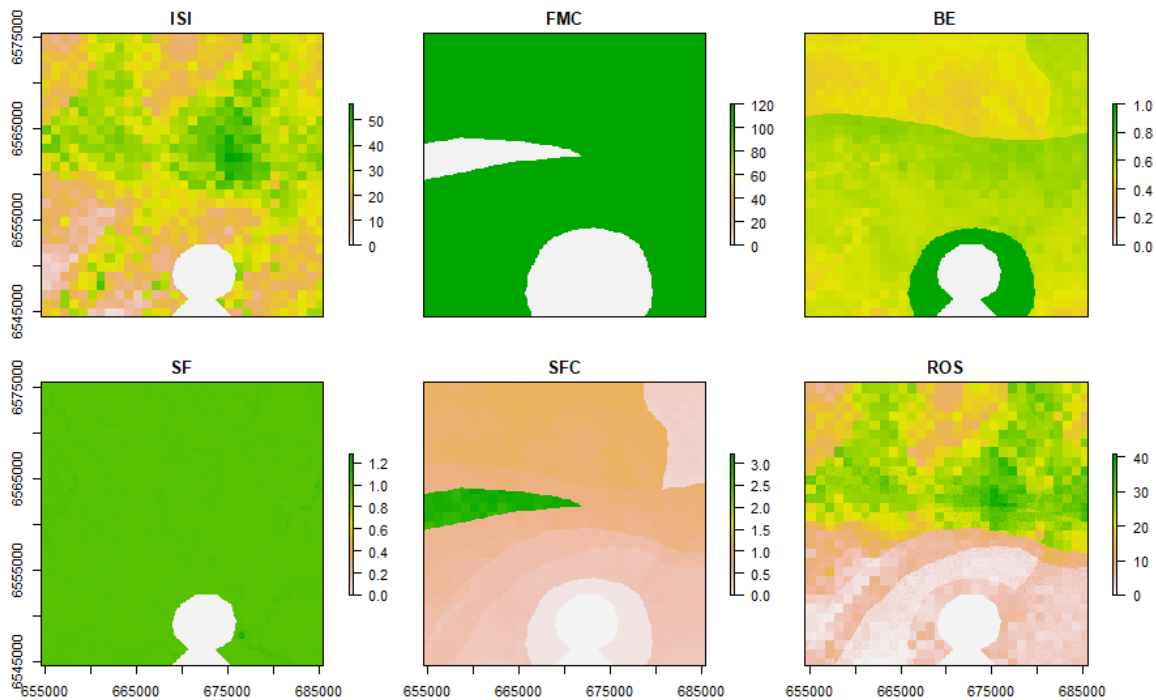
Prototüübil loodi maksimaalselt originaalilähedane variant, selleks et analüüsida, kuidas see Eesti tingimustes toimib. Prototüübi realiseerimisel võib mõnest osast loobuda, nt. FMC ehk Foliar Moisture Content Module arvutus.

Kuna looduses on metsa pilt kirju, katsetati esialgu skemaatilise lihtsustatud proovitükiga, mis on toodud joonisel B.4.



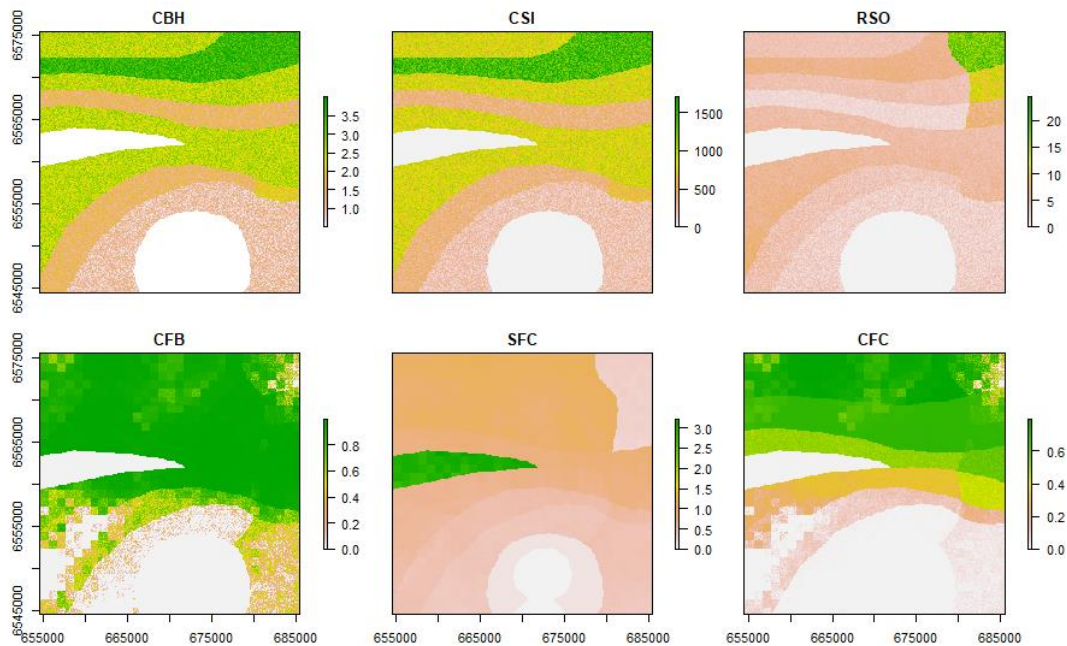
**Joonis B.4.** Skemaatiline katseala (ülevaht) ja FuelType bloki sisend (all). PC - Percent Conifer for mixed forest [%]; cc - Percent Cured for grass [%]; GFL - Grass Fuel Load [kg/ m<sup>2</sup>]; CBH - Crown to Base Height [m]; CFL - Crown Fuel Load [kg/ m<sup>2</sup>].

Esimesel sammul arvutab algoritm tulefrondi leviku kiiruse ROS (Rate of Spread; joonis B.5) Peamiseks sisendiks on kõik FuelType bloki sisendid, pinnakalle ja kaks FWI mudelist lähtuvat indeksit – esialgne levikuindeks ISI ja tule struktuuri indeks BUI. Joonis 5 illustreerib sammu vahetulemusi ja esimene FBP-*primary* tule ROS.



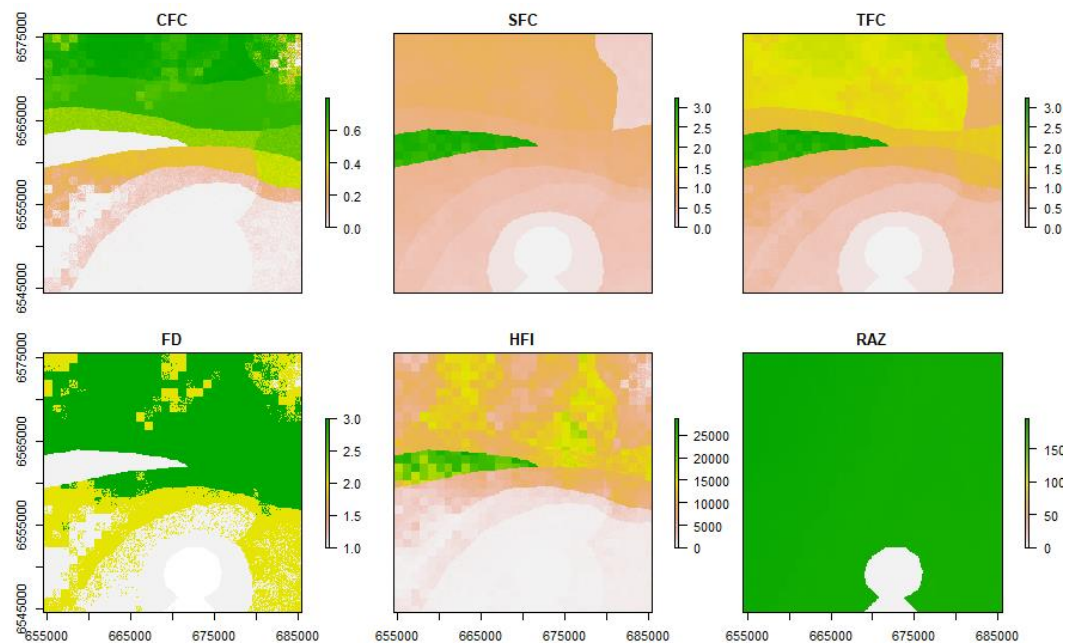
**Joonis B.5.** Esimene FBP algoritmi samm, vahetulemused. ISI - *Initial Spread Index*, BE - *BUI effect on spread rate*, SF - *Slope Factor*, SFC - *Surface Fuel Consumption* [kg/m<sup>2</sup>], **ROS - *Equilibrium Head Fire Rate of Spread* [m/min]**

Esimese sammu baasil arvutatakse esimene tulekahju intensiivsuse muutuja SFC - Surface Fuel Consumption (rohttaimestiku/maapinna põlevmaterjali kulu). Kui see on piisavalt kõrge, et tuli jõuaks puude võradeni, arvutab algoritm ladvatule tekke ehk nn kroonimise ('*Crowning*') tulemeid (joonis B.6). Sellel etapil arvutatakse teine FBP-*primary* tulem – CFB - Crown Fraction Burned (põlenud võrade osakaal).



**Joonis B.6.** Crowning moodul, esimene osa. CBH - *Crown to Base Height* [m], CSI *Critical Surface Intensity for crowning* [kW/m], RSO *Critical spread rate for crowning* [m/min], **CFB Crown Fraction Burned** [%], SFC - *Surface Fuel Consumption* [kg/m<sup>2</sup>], CFC - *Crown Fuel Consumption* [kg/m<sup>2</sup>].

Viimaks liidetakse CFB ja SFC kokku, et arvutada summaarne põlevmaterjali kulu ehk **TFC** (*Total Fuel Consumption*) ja tulekahju kirjeldus **FD** (*1=Surface, 2=Intermittent, 3=Crown*), kas tuli asub maapinnal, puistu keskosas või võras. Leitakse ka tulefrondi intensiivsus **HFI** (*Head Fire Intensity*), mille arvutamisel arvestatakse leviku kiirust ja põlevmaterjali kulu; viimane FBP-*primary* väljund on leviku suuna asimuuti **RAZ** (*Spread direction azimuth*), mis arvestab tuult ja maapinna kallet, et ennustada tuleleviku suunda (joonis B.7).

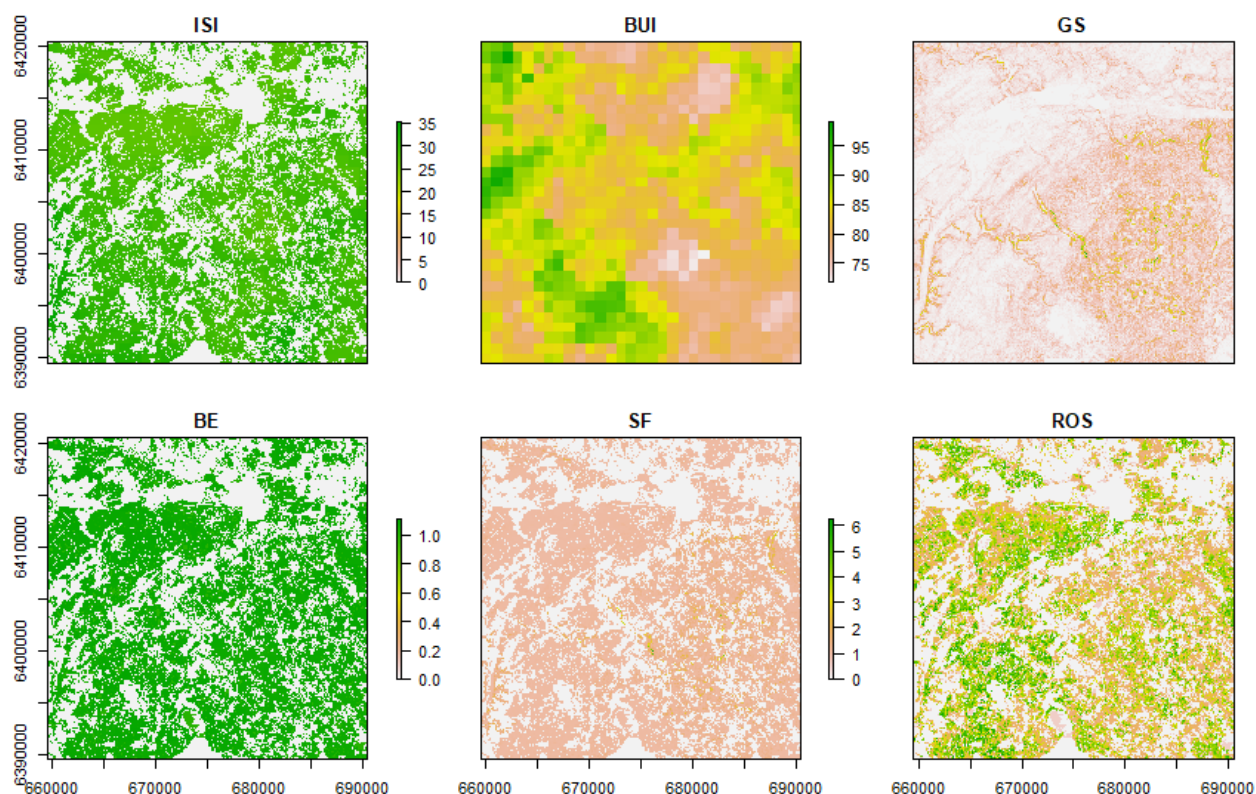


**Joonis B.7.** FBP-*primary* algoritmi viimane etapp. TFC - *Total Fuel Consumption* [kg/m<sup>2</sup>]; FD - *Fire description* (*1=Surface, 2=Intermittent, 3=Crown*), HFI - *Head Fire Intensity* [kW/m], RAZ - *Spread direction azimuth* [degrees]

#### 1.4.2 Algoritmi rakendamine proovialadel

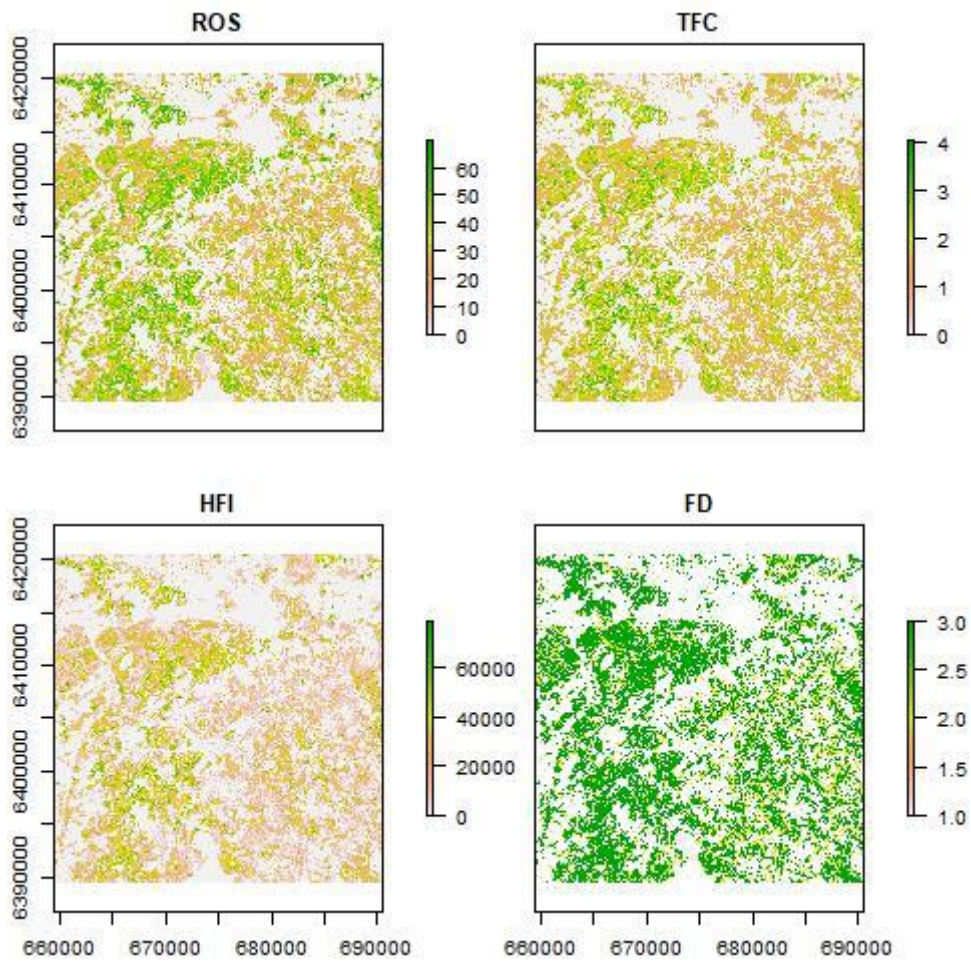
Prooviala A: Võru-Haanja piirkonnas, suurus 31 x 31 km. Ala on valitud suurte maapinna kallete tõttu, kõrgete okaspuu metsadega. Joonisel B.8 on näha suuremad kalded ja suurem kalde mõju (SF) võrreldes proovialaga B (joonis B.11).

Prooviala B: Lääne ja Ida Virumaa piiril Alutagusel – tuntud metsane piirkond, kus esinevad mitmed metsatüübid.

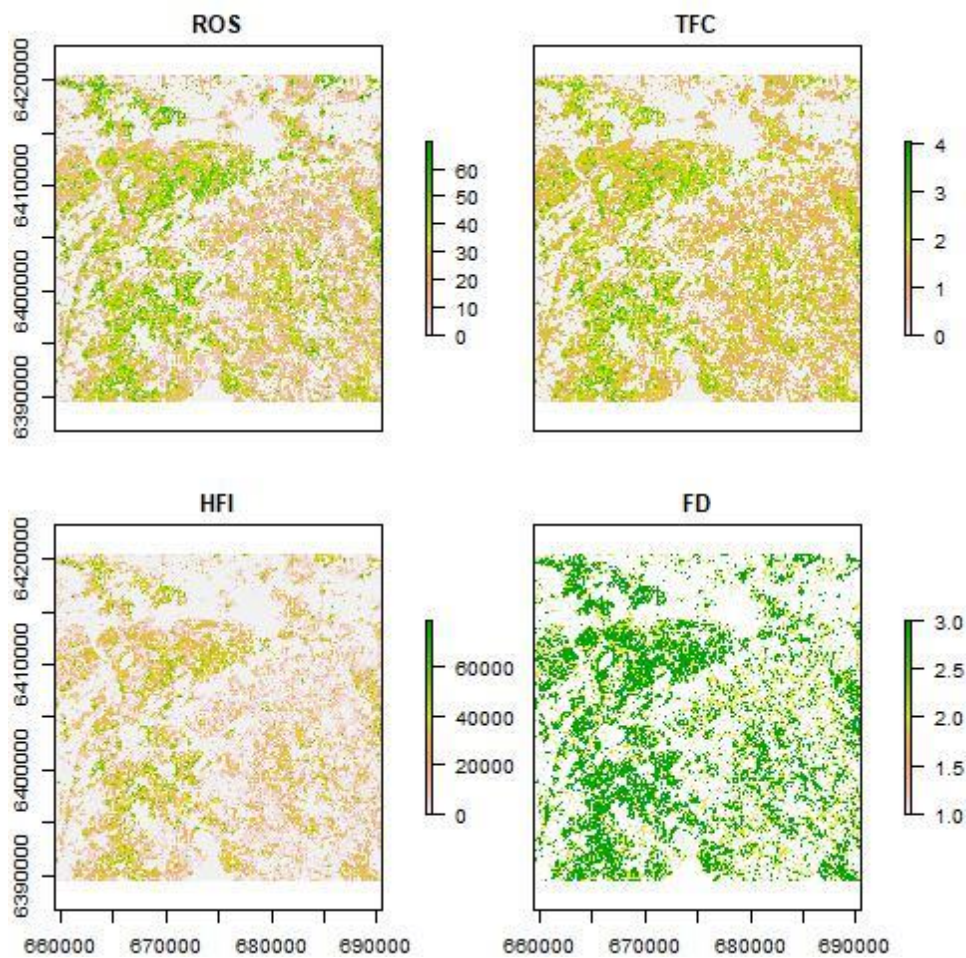


**Joonis B.8.** Prooviala A, FBP esimene samm kuni ROS (tulefrondi leviku kiirus) tulemuseni. Kuupäev: 2018-05-05, lehtedeta versioon. Sisendid (ülal vasakult): *Initial spread index* [FWI tulem], *Buildup index* [FWI tulem], *Ground Slope* [%]. Väljundid (all vasakult): *BUI effect on spread rate*, *Slope Factor*, *Head Fire Rate of Spread* [m/min].

Joosnel B.9 ja B.10 on toodud arvutused prooviala A jaoks võrreldes kahte olukorda . lehtedeta kulu periood ja lehtimisjärgne periood.

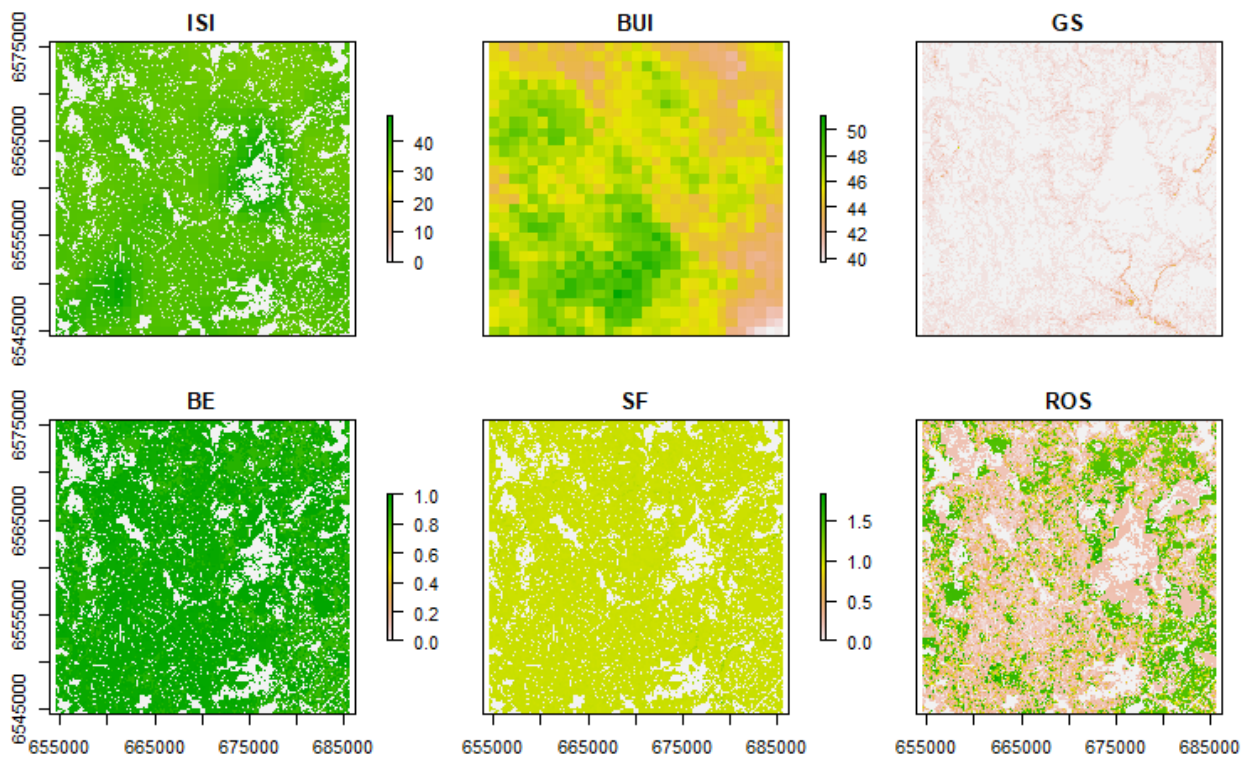


**Joonis B.9.** Prooviala A. FBP tulemused 2018-05-05, lehtedeta versioon. Väljundid: *Head Fire Rate of Spread* [m/min], *Total Fuel Consumption* [kg/m<sup>2</sup>], *Head Fire Intensity* [kW/m], *Fire description* (1=Surface, 2=Intermittent, 3=Crown).

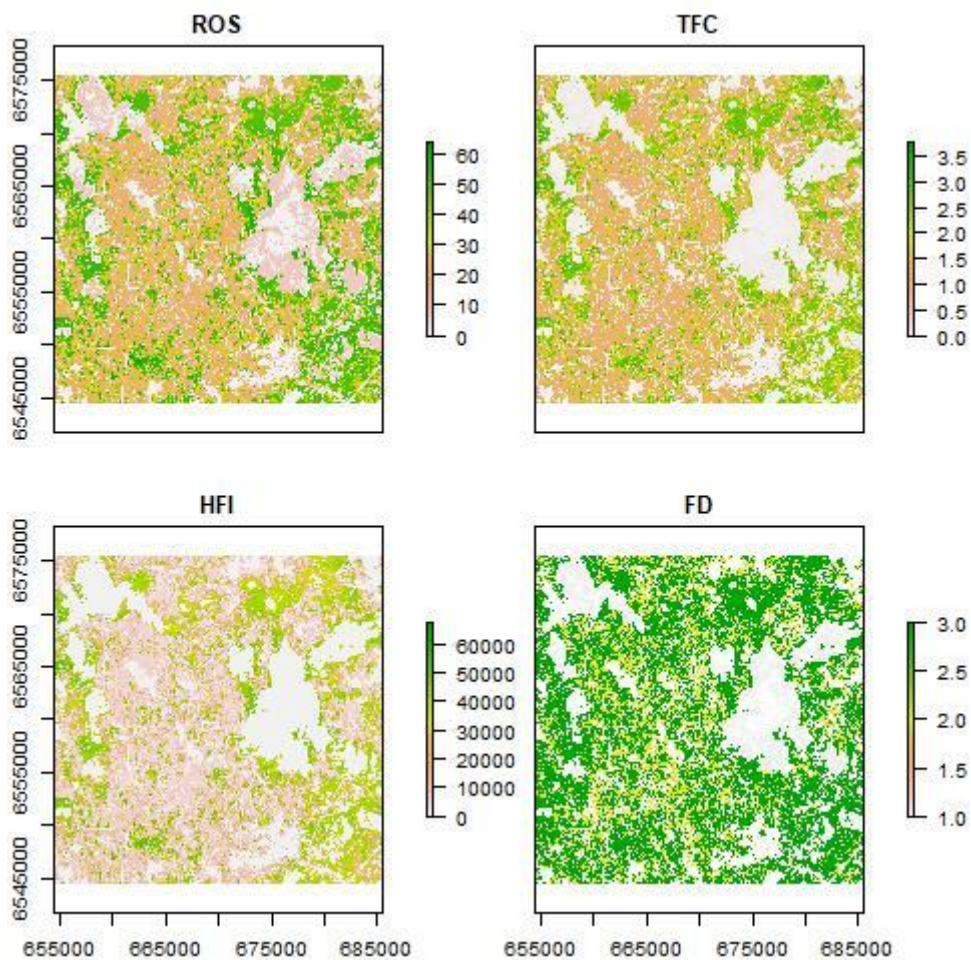


**Joonis B.10.** Prooviala A FBP tulemused 2018-05-05, lehes versioon. Väljundid: *Head Fire Rate of Spread* [m/min], *Total Fuel Consumption* [kg/m<sup>2</sup>], *Head Fire Intensity* [kW/m], *Fire description* (1=Surface, 2=Intermittent, 3=Crown).

Joonistel B.11, B.12 ja B.13 on toodud analoogilised arvutustulemused prooviala B kohta.

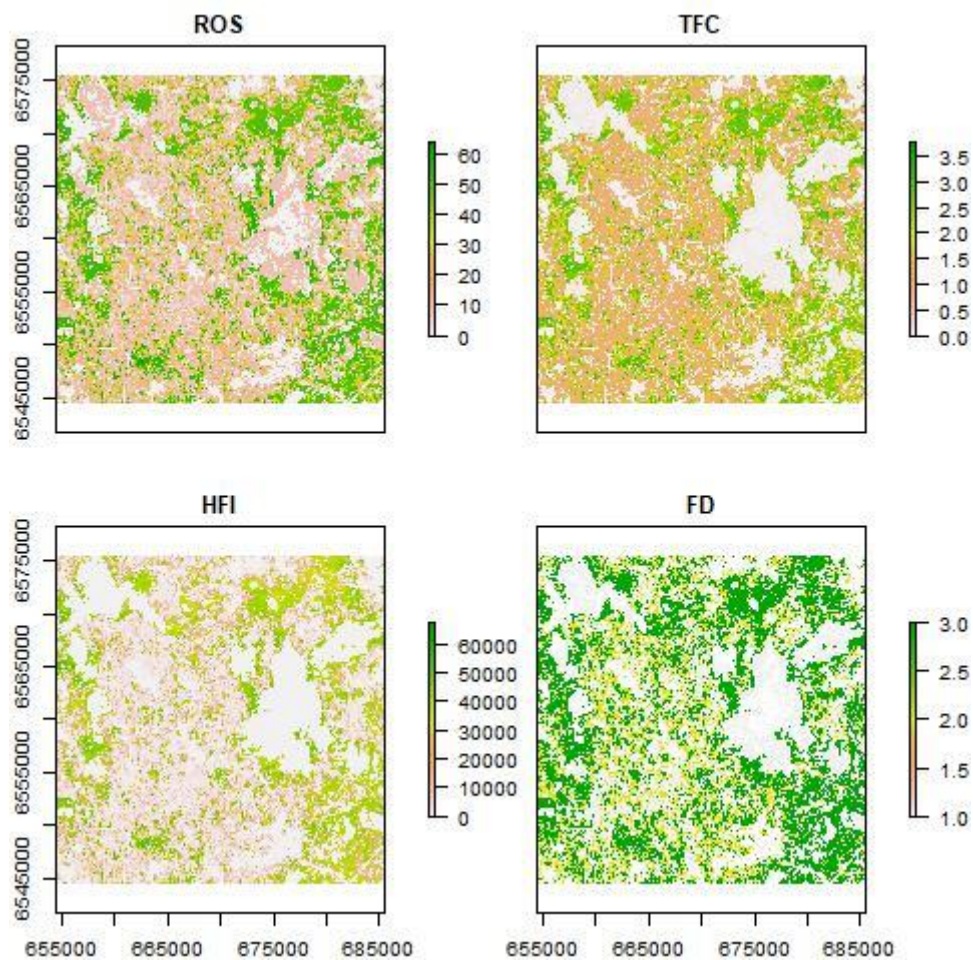


**Joonis B.11.** Prooviala B, FBP esimine samm kuni ROS (Rate of Spread tulemuseni). Kuupäev: 2018-05-05, lehtedeta versioon. Sisendid (ülal vasakult): *Initial spread index* [FWI tulem], *Buildup index* [FWI tulem], *Ground Slope* [%]. Väljundid (all vasakult): *BUI effect on spread rate*, *Slope Factor*, *Head Fire Rate of Spread* [m/min].



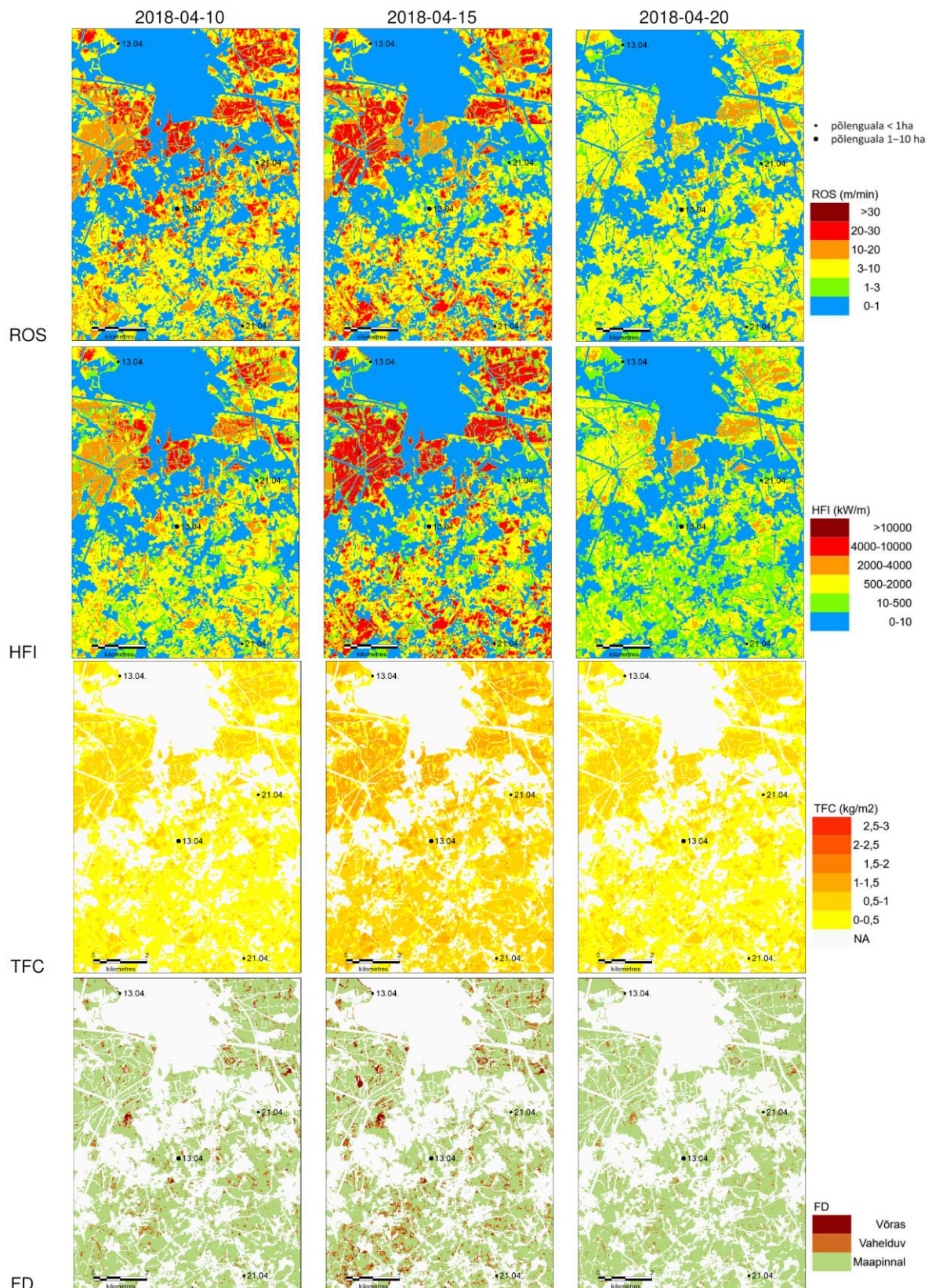
**Joonis B.12.** Prooviala B FBP tulemused 2018-05-05, lehtedeta versioon. Väljundid: *Head Fire Rate of Spread* [m/min], *Total Fuel Consumption* [kg/m<sup>2</sup>], *Head Fire Intensity* [kW/m], *Fire description* (1=Surface, 2=Intermittent, 3=Crown).





**Joonis B.13.** Prooviala B FBP tulemused 2018-05-05, lehtedega versioon. Väljundid: *Head Fire Rate of Spread* [m/min], *Total Fuel Consumption* [kg/m<sup>2</sup>], *Head Fire Intensity* [kW/m], *Fire description* (1=Surface, 2=Intermittent, 3=Crown).

Katsetati ka detailsemat arvutust Võru-Haanja prooviala põhjapoolses osas valitud väiksema proovialaga (joonis B.14).



**Joonis B.14.** FBP primaarsed näitajad koos reaalseste põlengu andmetega Võru-Haanja detailse prooviala kohta aprillis 2018.

### 1.4.3 Asukohapõhised tulemid ja prognoosid

Prototüübis on kasutatud detailseid algandmeid (25 m ruumiline lahutus), mis võimaldab väljastada tulemid asukohapõhiselt. Selleks tuleb rakenduse algoritmi lisada asukohade loetelu, nt. kõik asustusüksused, ning nende ruumikuju (shape-fail). Algoritmi tuleb sel juhul lisada lihtne protseduur, mis kalkuleerib igale antud geograafilisele üksusele FWI ja FPB väärtused nagu keskmine, maksimaalne, enimesinev vms.

Algoritm võimaldab koostada asukohapõhise prognoosi eeldusel, et FWI mudeli sisenditeks on prognoosandmed (modelleerib ja väljastab Ilmateenistus).

## 2 Põlengu arengu analüüs (sekundaarsed tulemid)

Põlengu arengu analüüsiks ehk FBP sekundaarsete tulemite leidmiseks saab kasutada tarkvarapaketti Prometheus

[http://www.firegrowthmodel.ca/prometheus/overview\\_e.php](http://www.firegrowthmodel.ca/prometheus/overview_e.php)

Prometheus on deterministlik maastikupõlengu imitatsioonimudel, mis tugineb FWI ja FBP arvutustele. Mudel arvutab ruumiliselt tule käitumise ja arengu, arvestades põlevmaterjali heterogeensust, topograafiat ja ilmaolusid. Kõik väljundid on GIS põhised.

## Lisa B.1

### FBP lühendid

#### Sisendi muutujad

Lühend	Nimetus	
LAT	Latitude [decimal degrees]	Laiuskraadid
LONG	Longitude [decimal degrees]	Pikkuskraadid
Dj	Julian Day	Päev aasta algusest, Juliani päev
FFMC	Fine Fuel Moisture Code [FWI output]	Peene põlevmaterjali niiskuse hinnang, lähtudes ainult meteoroloogilisest FWI mudelist
BUI	Buildup Index [FWI output]	Tule struktuuri indeks, lähtudes FWI-st
ISI	Initial Spread Index [FWI output]	Esialgne levikuindeks, lähtudes FWI-st
WS	Wind Speed [km/h]	Tuule kiirus [km/t]
WD	Wind Direction [decimal degrees]	Tuule suund [kümnendkraadid]
GS	Ground Slope [percent]	Maapinna kalle [protsenti]
Aspect	Aspect of the Slope [decimal degrees]	Kalde aspekt [kümnendkraadid]
ELV	Elevation [m above sea level]	Maapinna kõrgus [m üle merepinna]
FuelType	FBP System Fuel	Põlevmaterjali tüüp FBP süsteemi järgi
PC	Percent Conifer for M1/M2 [percent]	Okaspuude osakaal [protsenti]
CC	Percent Cured for O1a/O1b [percent]	Kuivanud rohu osakaal [protsenti]
GFL	Grass Fuel Load [kg/m <sup>2</sup> ]	Rohttaimestiku põlevmaterjali maht [kg/ m <sup>2</sup> ]
CBH	Crown to Base Height [m]	Võra alguse kõrgus maapinnast [m]
CFL	Crown Fuel Load [kg/m <sup>2</sup> ]	Võra põlevmaterjali maht [kg/ m <sup>2</sup> ]
FMC	Foliar Moisture Content if known [percent]	Lehtede niiskusesisaldus, kui teada [protsenti]

#### Väljundid

Lühend	Nimetus	
Primary FBP väljund sisaldab 8 järgmist muutujat:		
CFB	Crown Fraction Burned by the head fire	Põlenud võrade osakaal [protsenti]
CFC	Crown Fuel Consumption [kg/m <sup>2</sup> ]	Võrade põlevmaterjali kulu [kg/m <sup>2</sup> ]
FD	Fire Description (1=Surface, 2=Intermittent, 3=Crown) keskosa,3=võrad)	Tulekahju kirjeldus (1=rohttaimestiku/maapinna, 2=puistu)
HFI	Head Fire Intensity [kW/m]	Tulefrondi intensiivsus [kW/m]
RAZ	Spread direction azimuth [degrees]	Leviku suuna asimuut [kraadid]
ROS	Head Fire Rate of Spread [m/min]	Tulefrondi leviku kiirus [m/min]
SFC	Surface Fuel Consumption [kg/m <sup>2</sup> ]	Rohttaimestiku/maapinna põlevmaterjali kulu [kg/m <sup>2</sup> ]
TFC	Total Fuel Consumption [kg/m <sup>2</sup> ]	Summaarne põlevmaterjali kulu [kg/m <sup>2</sup> ]

#### FBP sekundaarsed väljundid (ainult need, mis on aruandes kasutatud):

Lühend	Nimetus	
BE	BUI Effect on spread rate	BUI indeksi mõju levimiskiirusele
SF	Slope Factor (multiplier for ROS increase upslope)	Maapinna kalde mõju
RSO	Critical Spread Rate for crowning [m/min]	Kriitiline levimiskiirus, pinnatuli tõuseb võradesse [m/min]
CSI	Critical Surface Intensity for crowning [kW/m]	Kriitiline tule intensiivsus, millal pinnatuli tõuseb võradesse [kW/m]

## D2.14 Prototype of the algorithm for identification and assessment of damage to ecosystems and damage prevented

### D2.14 Ökosüsteemidele tekitatud kahju ning ära hoitud kahju tuvastamise ja hindamise algoritmi prototüüp.

#### Kokkuvõte

Põlengu tekitatud kahjude ja ära hoitud kahjude tuvastamise ja hindamise algoritm lähtub varem kirjeldatud tule leviku mudelist (D2.10) ja võimalikest meetoditest kahjude hindamiseks (D2.13).

Esitatakse algoritmide ja protseduuride kirjeldused (hindamissammude loogiline käik) andmete ettevalmistamiseks ning potentsiaalse põlengu analüüsiks ja võrdlemiseks tegelikult põlenud alaga. Potentsiaalse põlengu ala määratakse lähtudes tule leviku mudelist (D2.10) ja reaalistest looduslikest tingimustest / takistustest. Põlenud ala määratakse pärast põlengu kustutamist. Ökosüsteemi teenuste hindamise metoodikaga leitakse nii potentsiaalselt põleda võinud väärtused kui tegelikult põlenud väärtused. Viimased annavad hinnangu tekkinud kahju kohta, vahe potentsiaalselt põleda võinud ja tegelikult põlenud väärtuse vahel annab ära hoitud kahju hinnangu.

## Sisukord

1. Sissejuhatus .....	63
2. Metoodika põhimõtteline ülesehitus.....	63
2.1. Ilmastiku tuleohu indeks FWI .....	65
2.2. Tulekahjude avastamine/ulatuse määramine.....	65
2.3. Tulekahjueelse situatsiooni hindamine.....	65
2.4. Tulekahju ulatuse modelleerimine.....	66
2.5. Tulekahju riskide hindamine (FBP).....	66
2.6. Ökosüsteemiteenused.....	66
3. Põlengute tekitatud kahjude hindamise prototüüp.....	66
4. Põlenguala määramine.....	68
5. Soovitusi jätkuuringuteks .....	70
Kirjandus.....	71

## 1. Sissejuhatus

Põlenguga kaasnevate kahjude ja kulude hindamine hõlmab nii põlengu ja kustutustööde käigus tekkinud kahjude kui põlengu tagajärjel kaotatud ressursside väärtuste hindamist. Märkimisväärselt panustab kahjudesse ka põlemisega kaasnev mõju keskkonnale ja inimeste tervisele.

Kaotatud ressursside väärtuse hindamise aluseks on ökosüsteemiteenuste kontseptsioon.

Ökosüsteemiteenuste hindamine on osa tulekahjude käsitlemise raamistikust. Teenuste hindamine sõltub paljudest riiklikul tasemel kogutavatest andmetest.

Hiljuti on RITA KAUGSEIRE projektiga paralleelselt osaliselt valminud projektid (ELME), millel on käesolevast erinevaid ülesandeid, ent mille alusel hakatakse tootma andmeid, mis on ökosüsteemi kahjude hindamise aluseks.

ELME projekti (<https://www.keskkonnaagentuur.ee/et/eesmargid-tegevused/projektid/elme>) raames on muuhulgas välja töötatud ökosüsteemiteenuste kaardistamise ja hindamise tegevuskava ning kaardistatud ja hinnatud valitud ökosüsteemiteenused.

RITA KAUGSEIRE projekti raames välja pakutud meetodika ja sellel põhinev prototüüp tuginevad neil riiklikult kehtestatavatel ökosüsteemiteenuste väärtustel.

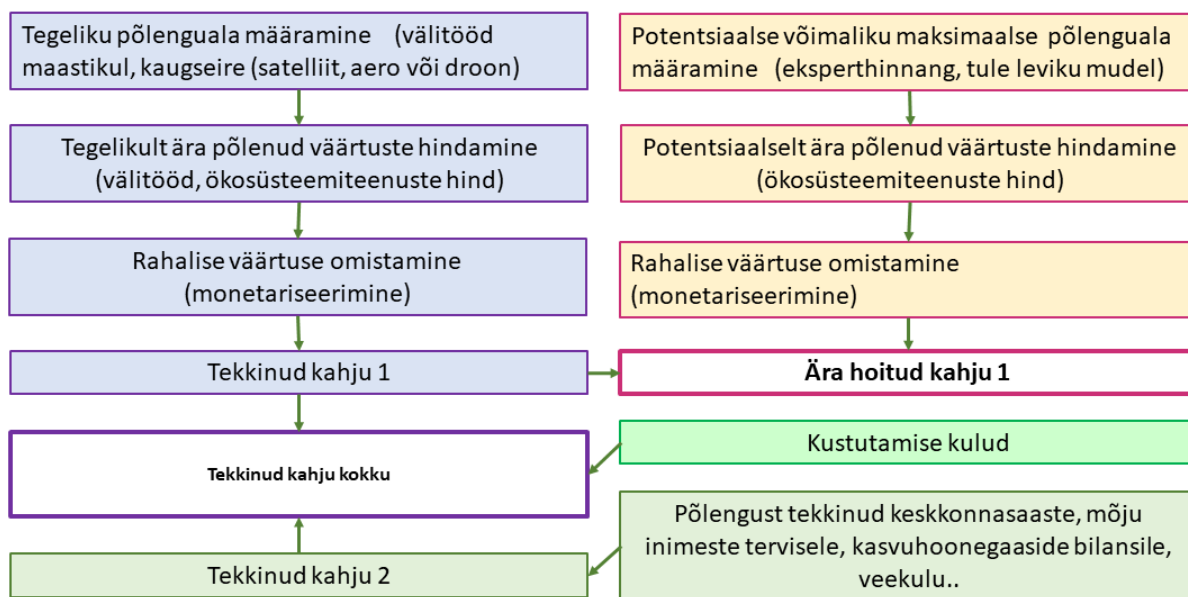
Käesoleva prototüübi ja selle aluseks oleva meetodilise ülevaate raames on kirjeldatud, kuidas RITA projektis tekkinud andmestikke ja lähenemise meetodeid saaks ökosüsteemiteenuste kahjude hindamisel rakendada maastikupõlengute kontekstis.

## 2. Meetodika põhimõtteline ülesehitus

Hinnatakse põlengu leviku mudeli FBP abil tule potentsiaalset levikut, mis on aluseks võimaliku maksimaalse põlenguala ja põlengu määra leidmisel.

Pärast põlengu kustutamist määratakse tegelikult põlenud ala ja põlengu määr ning võimalikud keskkonnakahjud põlengu ajal.

Põlenud väärtused ja avaldunud keskkonnamõjud on aluseks tekkinud kahjude hindamisel. Hindamise aluseks on välitööd, põlenud ressursi hinnang. Põlenud väärtused ja avaldunud keskkonnamõjud on aluseks ka kahjude monetariseerimiseks (nende väljendamiseks rahalises vääringus). Ökosüsteemiteenuste hindade määramise meetodika on välja pakutud Keskkonnaagentuuri ELME projektis.



**Joonis C.1.** Kahjude hindamise põhimõtteline skeem.

Metoodika ülesehitust illustreerivad joonised C.1 ja C.2.

Potentsiaalse põlenguala ja tegelikult põlenud ala vahe ning põlengumäärade erinevus annavad ära hoitud kahjude leidmise võimaluse ja seejärel selle rahalise väljendamise aluse.

Põlengu ulatuse ja määra alusel hinnatakse põlengu käigus tekkinud kahjusid (õhusaaste, mõju ökosüsteemidele ja inimese tervisele, mõju kasvuhoonegaaside bilansile jmt.)

Tule potentsiaalse leviku mudeli FBP põhjal saab määratleda mitmed vajalikud andmekihid (Joonis 3):

1. Tegelik põlengu osas täpsustada erinevaid hindamise etappe – määratleda põlevmaterjali maht, mis tüüpi metsaga on tegu (okas- ja lehtmetsa osakaal) jmt
2. Piiritleda halvima stsenaariumi juhtum:
  - Välja pakutud leviku algoritmi tarvis on kasutatavad RITA KAUGSEIRE projekti tule allosa raames valminud andmekihid.
  - Kui põlenguala potentsiaalsed piirid on määratud, on võimalik hinnata kahju FBP kihtide abil: põlengu intensiivsus (*head of fire intensity*), pinnasetule põlevmaterjali hulk (*surface fuel consumption*), ladvatule põlevmaterjali hulk (*crown fuel consumption*), kogu põlevmaterjali hulk (*total fuel consumption*).
  - Saab hinnata, mitu päeva oli põlengurisk kõrge ja selle alusel piiritleda potentsiaalse põlengu kestus ja kaudselt põlengu ulatus.
  - Ala (põlengu ulatuse) piiritleb ekspert, kasutades ruumianalüüsi meetodeid olemasolevate ruumiantmete abil (ETAKi teed, veed, tehisalad jmt andmed Maaametist) ja FBP kihid.
3. “Ära jäänud tekkida võinud kahju” stsenaariumi puhul on vaja võrdlemiseks määratleda potentsiaalselt põleda võinud ala ja tegelik põlenguala ning põlengu määr. Ära hoitud kahju on nende vahe.



Tekkinud kahju arvutatakse ökosüsteemiteenuste metoodikaga lähtudes tegeliku põlengu andmetest. FWI ja FBP kaardikihid annavad parema ülevaate riskidest ja sellest tuleneb kõrgem valmisolek.

Lisaks võib edaspidi rakendada mõnda olemasolevat tule leviku mudelit, nt *Prometheus* (või sarnane), mis on vabalt kasutatava tarkvarana internetist alla laaditavad.

### 2.1. Ilmastiku tuleohu indeks FWI

Indeks leitakse põlenguohu kaardistamiseks igapäevaselt sõltumata, kas tekkinud kahjusid hinnatakse. Mõned indeksi arvutamise vahetulemused on rakendatavad ka tule leviku modelleerimisel ja seeläbi kahjude hindamisel.

FWI indeks ei ole otseselt ökosüsteemiteenuste kahjudega seotud, kuid sellest tuleb oluline sisend tulekahjude riskide hindamise süsteemi. Indeksi siinkohal kasulikud osised on:

- FFMC – peene põlevmaterjali niiskus (*Fine fuel moisture code*);
- BUI – tule kujunemise indeks (*Buildup index*);
- ISI – tule algse leviku indeks (*Initial spread index*).

### 2.2. Tulekahjude avastamine/ulatuse määramine

Kuna põlengute avastamist ei saa kuidagi mudelitega simuleerida on vajalik kohapealne teabe kogumine ja/või kaugseire.

KKI ja PA süsteemis on praegu toimiv tulekahjude avastamise süsteem, seda ei ole vaja radikaalselt muuta, küll võib vajadusel täiendada.

Praegusele süsteemile võib saada toeks kaugseirel baseeruv tulekahjude avastamine/ulatuse jälgimine (ei ole RITA projekti osa). Siiski, ainult satelliitseirel põhinev põlengute avastamine oleks Eesti oludes ebapiisav, see võib anda lisaväärtuse asustusest eemal seisvates piirkondades ent elamute läheduses on inimeste teadatel põhinev avastamine kiirem ja efektiivsem.

Peale tulekahju kustutamist saab kaugseire abiga piiritleda täpsemalt põlenud alade ulatuse – see on juba sisend ökosüsteemidele tekkinud mõju hindamise süsteemi.

Põlenguala saab määrata, kas satelliitkujutistelt (vt nt Kim et al. 2019), LiDAR-andmetest (Garcia et al. 2020) või kasutades droone (Junho et al. 2019).

Viimane on aluseks tekkinud kahjude hindamisel ja seejärel monetariseerimiseks. Arvestatakse ka hinnangute ebamäärasust (vt nt. Guillaume et al. 2019)

### 2.3. Tulekahjueelse situatsiooni hindamine

Selleks, et kahju hinnata tuleb saada ülevaade sellest, mis tegelikult oli põlengualal enne tulekahju. Selleks on kasutatavad näiteks tulemis D2.4 toodud parameetrid põlevaine maht ja esimese rinde võra kõrgus, mille abil saab täpsustada praegu kasutusel olevaid metsaregistri andmeid. Tuleohtu ja potentsiaalseid riske süttimise puhul arvutavad tulemites D2.8 ja D2.10 kirjeldatud prototüübid.

## 2.4. Tulekahju ulatuse modelleerimine

Halvima stsenaariumi hindamine. Prometheuse sarnane tarkvara või ekspert hinnang, abiks FBP kihid (Tulem D2.10):

- ROS – tulefrondi leviku kiirus (*Rate of Spread*);
- HFI – tulefrondi intensiivsus (*Head Fire Intensity*);
- TFC – summaarne põlevmaterjali kulu (*Total Fuel Consumption*);
- FD – põlengu tüüp, 1 pinnatuli, 2 vahepealne segatuli, 3 ladvatuli (*Fire Description, 1=surface, 2=intermittent, 3=crown*).

## 2.5. Tulekahju riskide hindamine (FBP)

Hindamine toimub kahe ulatuse (tegelik tulekahju, halvim stsenaarium) ja nende erinevuse (ärahoitud kahju) jaoks. FBP kihtide (Tulem D2.10) abil leitakse:

- TFC – summaarne põlevmaterjali hulk (*Total Fuel Consumption*)
- SFC – pinnasetule põlevmaterjali hulk (*Surface Fuel Consumption*)
- CFC – ladvatule põlevmaterjali hulk (*Crown Fuel Consumption*)
- CFB – ladvapõlengu osakaal (*Crown Fraction Burned*)

## 2.6. Ökosüsteemiteenused

Ökosüsteemiteenuste hindamise alused tulevad teistest riiklikest projektidest ja nende tulemitest.

Olulise panuse annavad ELME projekti andmed, mis on kavandatud riikliku ökosüsteemiteenuste kaardistamise aluseks. Päästeameti tellimusel on läbi viidud projekt Elu:mõju (Kaldma jt 2017), mille meetodika annab konkreetsed soovitused põlengutega seotud kahjude hindamiseks, sealhulgas majanduslik mõju metsale ja laiem mõju ökosüsteemidele.

Ökosüsteemiteenuste alusel leitakse ning monetariseeritakse tekkinud kahjud ja potentsiaalselt tekkida võinud kahjud ning nende vahena ära hoitud kahjud. Päästeameti efektiivsus arvutatakse lähtuvalt ära hoitud kahjust.

## 3. Põlengute tekitatud kahjude hindamise prototüüp

Kahjusid hinnatakse rahas, vahetulemustena ka ressursside kadudes, nagu emiteeritud saaste hulk jmt, mis pärast monetariseeritakse ökosüsteemiteenuste kontseptsiooni alusel. Prototüübi üldine raamistik on toodud joonisel C.2 ja selle rakendamise näide joonisel C.3.

Prototüüp arvutab:

- elupaikade kao pindalaliselt (sh ulukid, kasulikud ja kaitsealused taimed jms, aga ka nõ mitteutilitaarsed ökosüsteemiteenused; siin ei arvutata iga teenuse kohta täpset kogust ega rahalist väärtust);
- kasvuhoonegaaside bilansi pindalaliselt;
- puidu kao pindalaliselt/mahulise (suhteliselt lihtne ümber arvutada rahasse);
- pinnase kao pindalaliselt/mahulise (suhteliselt lihtne ümber arvutada rahasse).

Prototüübis on välja pakutud ainult kaugseire kasutamise tekkivad eelised. Asjaolusid, mida peab ka edaspidi arvestama nii, nagu see seni toimub, prototüüp ei puuduta.

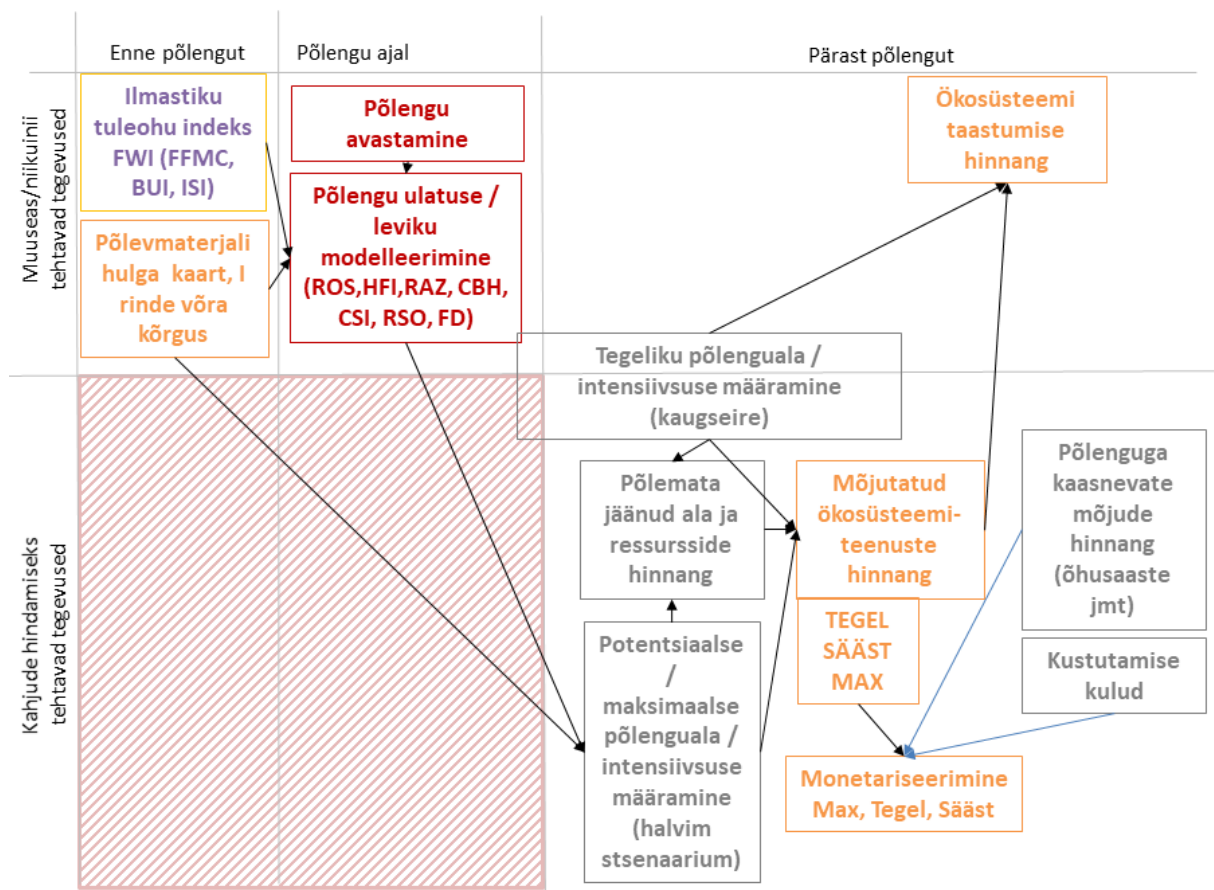
Elupaikade kao pindalaliselt saab satelliidi- ja droonipiltide võrdlusest enne ja pärast põlengut. Seejuures on vaja teada, mis tüüpi kooslusega oli tegemist. Selle saab metsaregistri andmetest, määramist toetab ka tulemi D2.4 puistute (põlevmaterjali) kaart.

Kasvuhoonegaaside bilansi pindalalise arvutuse kohta on info töös Kaldma jt (2017). On vaja teada, mis kooslus oli alal enne põlengut.

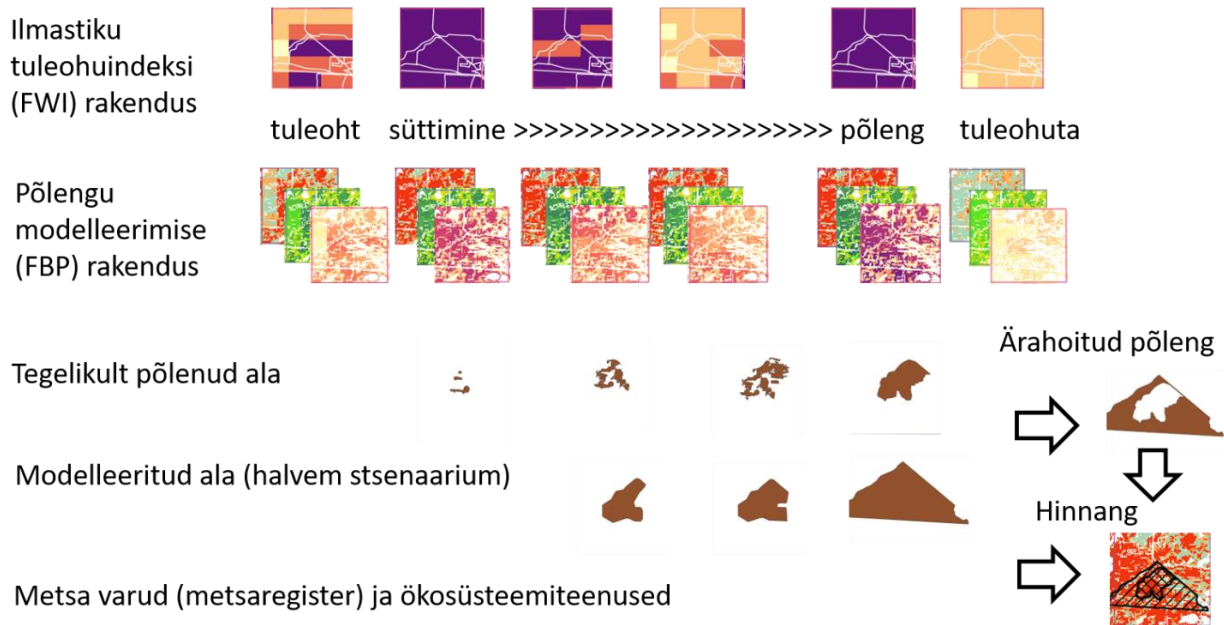
Puidu kao pindalalise/mahulise leidmise aluseks on Tulemi D2.4 puistute liigi ja mahu kaardid.

Pinnase kadu pindalaliselt/mahuliselt korreleerub elupaikade kao pindalaga. Andmed saab mullakaardilt (jm), toetab Tulemi D2.4 puistute kaart. Arvutuse näide on olemas töös Kaldma jt (2017).

Ärahoitud kahju arvutamine toimub tule liikumise mudeli (Tulemi D2.10) alusel võrreldes potentsiaalselt tekkida võinud kahju ja tegelikku kahju. Leitakse, mis oleks juhtunud, kui ei oleks kustutatud. Samuti saab mudeli abil arvutada, mis oleks juhtunud, kui oleks kiiremini kustutama jõutud.



**Joonis C.2.** Põhimõtteline skeem kahjude hindamiseks vajalikest tegevustest nende ajaraamistikus. Viirutatud sektoris kahjude hidamisega ei tegeleta.



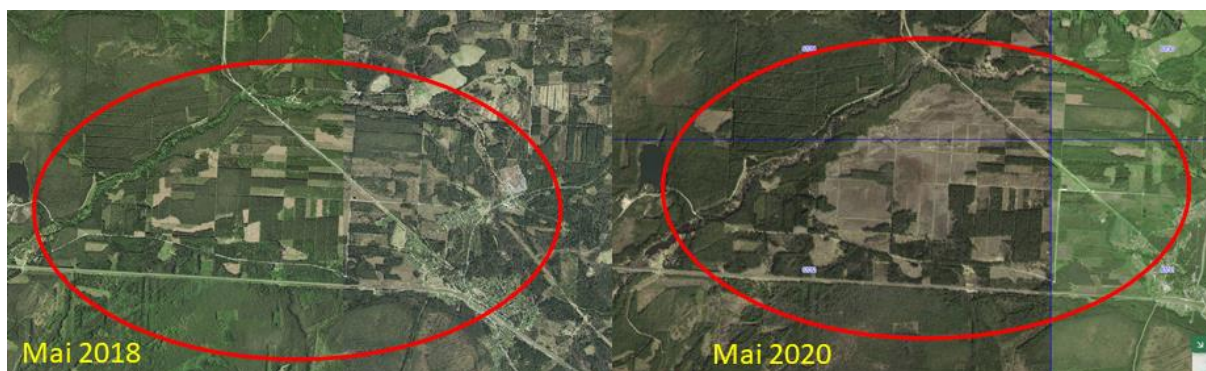
**Joonis C.3.** Kahjude hindamise raamistik rakendatuna Vikipalu 2018. aasta põlengu näitel.

#### 4. Põlenguala määramine

Põlenud ala saab määrata kas välitöödega, (kustutamise käigus tehakse seda mingil määrla niikuinii), kasutades droonifotogramm-meetriat, aerofotosid või satelliitseiret.

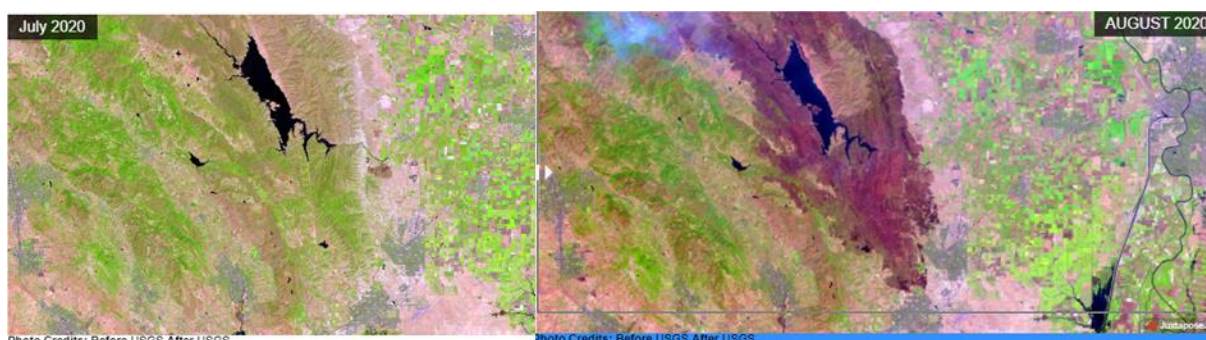
Välitööd on kõige täpsem ja kindlam meetod, ent ulatuslike alade puhul ka ajakulukas. Väikese ulatusega põlengute puhul ilmselt muid meetodeid vaja ei olegi. Saab kasutada droonifotosid, mida võib kombineerida välitöödega. Põlenud alad on tuvastatavad ka aero- ja kosmosefotodelt.

Aerofotosid teeb Eestis Maa-amet igal aastal, ent sama piirkonna kaetust same üldiselt eeldada nelja või kahe aastase vahega. Nelja aasta tagant toimub sama tüüpi (kordus)pildistamine, kahe aasta intervalli saame kombineerides topograafilise ja metsandusliku lennu fotosid. Ka kaheaastane vahemik võib olla liiga pikk põlenud ala piiritlemiseks, sesttoimuvad nii looduslikud kui inimtekkelised (korrastus- ja taastamistööd) muutused. Spetsiaalse lennu tellimine põlenud alal tuvastamiseks võib olla otstarbekas erijuhtudel ent üldise soovitusena ei ole see mõistlik. Joonisel C.4 on näidatud Maa-ameti aerofotod Vikipalu/Aegviidu 2018 põlenguala kohta vahetult enne põlengut ja kaks aastat pärast põlengut (ja põlengujärgset raiet).



**Joonis C.4.** Maaameti aerofotod Aegviidu – Vikipalu põlengu piirkonnast 2018 ja 2020 aasta kevadel. Põleng toimus 2-3 nädalat pärast 2018. aasta fotolendu.

Satelliitkujutisi on võimalik saada märksa parema sagedusega. Joonisel C.5 on toodud kaks kosmosefotot 2020 aasta juulist ja augustist (<https://www.mercurynews.com/2020/09/05/before-and-after-satellite-images-show-how-lightning-complex-fires-scarred-bay-area-landscape/>). Kujutiste võrdlemisel on põlenguala “silma näha”.



**Joonis C.5.** “Enne” ja „pärast” satelliitkujutised, põlengu jälg on selgelt tuvastatav. NB tegu on nn valemvärvikujutistega ehk värviskaala on tinglik. Originaalfotod USGS.

Sentinel'i kujutiste jaoks on välja pakutud algoritm põlenguala tuvastamiseks. See põhineb lähisinfirapuna (NIR) ja nähtava ning lühilaineinfirapuna (SWIR) erineval peegeldumisel ning neeldumisel põlemata ja põlenud aladelt (Sharma 2020).

Peegeldunud energia intensiivsuste põhjal arvutatakse normeeritud põlengumäär (NBR) ning selle erinevus enne ja pärast põlengut (dNBR) iga piksli jaoks ning kogu huvipakkuva alal kohta.

$$NBR = \frac{(NIR - SWIR)}{(NIR + SWIR)} = \frac{(Band\ 8 - Band\ 12)}{(Band\ 8 + Band\ 12)}$$

$$dNBR = NBR_{pre-fire} - NBR_{post-fire}$$

Valemis toodud kanalid on Sentinel'i sensori jaoks. dNBR näitaja alusel saab hinnata ka põlengu intensiivsust. Negatiivne dNBR iseloomustab põlengjärgselt taastuvat ala, põlemata al puhul on näitaja nulli lähedane ning tugeva põlengu puhul ulatub üle 1.

## 5. Soovitusi jätkuuringuteks

Toodud Aegviidu-Vikipalu 2018 põlengu näite puhul on põlengualal määramisel kombineeritud mudelarvutusi ja „eksperthinnangut“. Eesmärk oli pigem katsetada protsessi läbitegemist kui saada võimalikult realistlikud tulemused. Eriti puudutab see potentsiaalselt põleda võinud ala ja seeläbi ka ärahoitud kahju hindamist.

Pildil (Joonis C.3) toodud potentsiaalselt põleda võinud ala on saadud eksperthinnanguna võttes nõ maksimaalse võimaliku (kõigi halbade asjade kokkulangemisel ja siis ka eriti pessimistlikus meeleolus, et no enam suuremaks ta ikka ei lähe) ala. Tõenäoliselt oleks põleng ka iseeneslikult laienenud vähem, ka ei ole vähetõenäoline, et põlenguala sees võivad tekkida põlemata laigud (tulenevalt looduslikest oludest, mulla tüübist, niiskurežiimist jmt) mis kõik mõjutab ära hoitud kahjude hindamist. Liiga suur potsnetsiaalselt põled avõinud ala hakkab „ära hoitud“ kahju põhjendamatult paisutama.

Kuivõrd ärahoitud kahjude hindamine on oluline näitaja päästjate tegutsemise hindamisel, seeläbi parema päästetegevuse kavandamisel tulevikuks, otseste kahjude hindamisel ja muude ülesannete juures, on mõistlik edaspidi võimalikes jätkuprojektides uurida looduslike tingimuste mõju põlengu kustumisele, ning käsitleda potentsiaalse põlengu ulatuse määramist jmt detailsemalt ja põhjelikumalt. Arvestades Eesti kaetust ruumiandmetega võiks olla võimalik realistlikuma „kaardikihhi“ tekitamine põlengu iseenesliku kustumise tõenäosuste hindamiseks (mullakaardi, metsatüübi, puistu tuleohuklassi, maakatte jmt andmete alusel).

## Kirjandus

ELME projekt. <https://www.keskkonnaagentuur.ee/et/eesmargid-tegevused/projektid/elme/okosusteemide-seisundi-ja-okosusteemiteenuste-uleriigiline>

García, M., North, P., Viana-Soto, A., Stavros, NE., Rosette, J., Martín, PP., Franquesa, M., González-Cascón, R., Riaño, D., Becerra, J., Zhao, K. 2020. Evaluating the potential of LiDAR data for fire damage assessment: A radiative transfer model approach. *Remote Sensing of Environment* 247:111893.

Guillaume, B., Porterie, B., Batista, A., Cottle, P., Alberge, A. 2019. Improving the uncertainty assessment of economic losses from large destructive wildfires. *International Journal of Wildland Fire* 28:420–430.

Junho, Y., Youkyung, H., Taeheon, K., Yongmin, K. 2019. Forest Fire Damage Assessment Using UAV Images: A Case Study on Goseong-Sokcho Forest Fire in 2019. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography* 37(5):351-357.

Kaldma, KK., Weber, T., Sirkel, H., Pajupuu, J., Maasalu, K. Karu, M. 2017. Ökosüsteemiteenuste kontseptsiooni rakendamine Päästeameti töö hindamisel. Aruanne Päästeametile, Tallinn, TLÜ, 52 lk.

Kim, M., Jung, M., Kim, Y. 2019. Histogram Matching of Sentinel-2 Spectral Information to Enhance PlanetScope Imagery for Effective Wildfire Damage Assessment. *Korean Journal of Remote Sensing*, 35(4):517-534.

Sharma, A. 2020. Monitoring Wildfires using Earth Observation Satellites. *Towards Data Science*. <https://towardsdatascience.com/monitoring-wildfires-using-earth-observation-satellites-e3ee7113bae4>