



Veekaitsevööndite reostustundlikkuse ja kaldavööndi puhverribade rajamise vajalikkuse hinnangute kaardikihtide loomine

Projekt nr. 3-2_3/9795-4/2019

Töö teostajad:

Evelyn Uuemaa, Kiira Mõisja, Alexander Kmoch, Hanna-Ingrid Nurm

Nõustajad: Ain Kull

Geograafia osakond

Tartu Ülikool

Vanemuise 46, 51003 Tartu

Estonia

Telefon +372 737 5827

email: evelyn.uuemaa@ut.ee

Projekti rahastajad:



**KESKKONNAINVESTEERINGUTE
KESKUS**

Tartus, 2021



SISUKORD

1	Lühikokkuvõte	3
2	Sissejuhatus	5
3	Puhverribade funktsioonid ja efektiivsus	6
4	Eesti mullastikukaardi korrastamine ja täiendamine	7
4.1	Eesti mulla nimetuste (sifrite) ja lõimiseklasside eraldamine, WRB mullatüübi ja USDA lõimise klassi lisamine.....	10
4.2	Reljeefi indekse lisamine mullastikukaardile.....	14
4.3	Maakasutuse [arable] [forest] [grassland] [urban] [water] [other] ja maaparandusalaga kattuva ala [drain] pindala [area_] ja osakaalude [_pct] lisamine mullastiku kaardile.....	15
4.4	Mulla orgaanilise süsiniku sisalduse [SOC1-4] modelleerimine	15
4.5	Mulla lasuvustihedus [BD1-4], veega küllastunud mulla veejuhtivus [K1-4] ja mulla aktiivveemahutavus [AWC1-4].....	19
4.6	Andmebaas ja selle lisad ning kood.....	22
5	Puhverribade soovitusliku laiuse ja reostustundlikkuse määramine	22
5.1	Puhverribade soovitusliku laiuse määramise meetodika.....	22
5.1.1	Nomogrammi alusel mudeli loomine	22
5.1.2	Nomogrammi põhjal välja töötatud mudeli ebamäärasuse ja tundlikkuse hindamine	27
5.1.3	Soovitusliku puhverriba laiuse vektoriseerimine	28
5.2	Reostustundlikkuse klassid.....	31
5.3	Taimkatte andmekihi loomine.....	34
5.4	Andmekihid ja kood.....	37
6	Mitteheas seisundis veekogumite veekaitsevööndites ja planeeritavates 50m täiendavates puhverribades paiknevate põldude pindala analüüs	38
6.1	Andmekihid.....	44
7	Probleemkohad sisendandmekihtides	44
8	Kasutatud kirjandus.....	45
9	Lisad.....	48

1 LÜHIKOKKUVÕTE

Käesoleva projekti peamised eesmärgid olid: 1) lisada Eesti digitaalsele mullastikukaardile reostustundlikkuse hinnangu andmiseks ja toitainete väljakande modelleerimiseks vajalikud numbrilised parameetrid (savi ja liiva osakaal, orgaanilise süsiniku sisaldus jms), mida saab kasutada enamlevinud mudelite arvutustes; 2) luua mulla ja reljeefi näitajate põhjal veekaitsevööndite potentsiaalse reostustundlikkuse ja soovitusliku puhverriba laiuse hinnangu kaardikiht; 3) hinnata, kui suur on toitainete sisalduse kõrge taseme tõttu mitteheas seisundis olevate veekogumite naabrusesse jäävate põllumaade pindala ning mitteheas seisundis olevate veekogude (v.a Läänemeri) valglatesse jäävate looduslike veekogude ja üle 10 km² suuruse valglaaga maaparanduse eesvoolude 50 meetri raadiusesse jäävate põllumassiivide pindala.

Eesti mullastikukaardi korrastamine ja täiendamine

Digitaalse Eesti mullastikukaardi (1:10 000) atribuutandmed korrastati ning ühtlustati. Eelnevalt ei olnud mullastikukaart täielikult masinloetav, sest andmed ei vastanud andmemudelile. Näiteks, oli 120 mulla nimetuse (šiffer) asemel atribuuditabelis 7067 nimetust. Käesoleva töö raames mullastikukaardi geomeetria andmeid ei muudetud, vaid korrastati ja täiendati ainult atribuutandmeid ning tehti seda kogu Eesti ala kohta. Lähteandmeteks oli digitaalne mullastikukaart, mis laeti alla Maa-ameti veebilehelt seisuga 01.09.2018. Lõpptulemusena valmis uus andmebaas EstSoil-EH. Andmebaasile lisati esmalt unikaalne rea indeks andmete ühendamiseks ja säilitati orginaal mullastikukaardi FID number väljas. Seejärel korrastati mulla nimetused ja lõimisevalemid, lisati WRB mullatüüp ning USDA lõimiseklass, reljeefi indeksid ning maakasutuse osakaalud mulla kaardistusüksuses. Kõige viimase sammuna lisati mullastikukaardile masinõppe abil mulla orgaanilise süsiniku sisaldus ning mulla seosefunktsioonide abil arvutati lasuvustihedus ja veega küllastunud mulla veejuhtivus.

Puhverribade soovitusliku laiuse ja reostustundlikkuse määramine

Teadusuuringud näitavad, et peamisteks teguriteks puhverriba laiuse määratlemisel on maastikulised tegurid: nõlvakalle ja mulla tüüp (peamiselt lõimis). Puhverriba laius sõltub ka taimkattest ning selle naabruses kasutatavatest maaharimise võtetest. Samas viimased ajas muutuvad ning antud töö seisukohalt võeti seetõttu arvesse ainult maastiku parameetreid: muld ja nõlvakalle. Veekaitsevööndite reostustundlikkuse ja soovitusliku puhverribade laiuse määramise aluseks võeti varasemalt Eestis läbi viidud uuringu (Mander jt., 1997; Mander ja Kuusemets, 1998) puhverribade efektiivsuse mõõtmise tulemused ning väljatöötatud meetodika, mille aluseks on mulla lõimisel, nõlvakaldel ning nõlva teguril põhinev nomogramm ja selle funktsioon. Nõlvategur ja nõlvakalle arvutati Maa-ameti 5m maapinna kõrgusmudelist. Tulemuseks oli kogu Eestit kattev soovitusliku puhverriba laiuse raster. Sellest rasterkihist arvutati kõikidele Veeseadusest tuleneva veekaitsevööndi kohustusega looduslikele veekogudele ja maaparandussüsteemide eesvooludele vektorkihi atribuutidesse soovituslik puhverriba laius. Teine vektorkiht loodi nii, et soovituslik puhverriba laius avaldub puhvrite geomeetrias, mida on visuaalselt lihtsam lugeda. Täiendavalt leiti veekogude ja maaparandussüsteemide eesvoolude veekaitsevööndite reostustundlikkus lähtuvalt mulla- ja reljeefitingimustest. Reostustundlikkuse ehk reostusohu all mõeldakse selle töö kontekstis potentsiaalset ohtu, et mulla- ja reljeefi tingimuste tõttu võib reostus (toitained, taimekaitsevahendid vmt) jõuda pindmise äravooluga veekogusse. Reostustundlikkus antud töö raames ei näita, kui tundlik puhverriba ise on reostuse suhtes, vaid näitab ainult potentsiaalset ohtu reostuse jõudmiseks veekogusse: kui veekogu piirneb põllumajanduslikus kasutuses oleva maaga, siis on vajalik kaaluda



vastava laiusega puhverriba rajamist ja puhverriba laius sõltub reostuse veekogusse jõudmise ohust ehk reostustundlikkusest. Töö tulemusel leiti, et ligikaudu 75% looduslikest veekogudest ja maaparandussüsteemide avatud eesvoolude veekaitsevöönditest on madala või väga madala reostustundlikkusega. Enamasti paiknevad need tasasema reljeefiga aladel. Keskmise reostustundlikkusega veekaitsevööndeid oli ligikaudu 1/10 ning kõrge ja väga kõrge reostustundlikkusega alla 5%. Viimased paiknevad peamiselt Lõuna-Eesti kõrgustikel. Seisu- ja vooluveekogude ning maaparandussüsteemide avatud eesvoolude veekaitsevööndite reostustundlikkus (reostusohu) on arvatud arvestades ainult mulla ja reljeefi tingimusi. See tähendab, et need näitavad potentsiaalset ohtu: kui antud veekoguga piirneb põllumajanduslikus kasutuses olev maa, siis on vajalik kaaluda vastava laiusega puhverriba rajamist. Käesolevad reostustundlikkuse kihid ei arvesta reostusohu põhjaveele, sest see ei olnud antud töö eesmärk ja eeldab täiendavat hüdrogeoloogilist analüüsi. Samas on võimalik töö põhjal täiendava uuringuna lisada põhjavee ohustatuse hinnang ning anda komplekshinnang reostustundlikkuse kohta. Loodud kaardikihid ei arvesta ka olemasoleva kõrgema taimkatte olemasolu, sest see on ajas muutuv. Siiski loodi staatilise indikaatorina 2017–2019. aasta andmete põhjal kõrgema (üle 2-meetrise) taimkatte olemasolu/puudumist näitav kaardikiht, mis võimaldab tuvastada, kas veekogu ääres oli vastaval ajavahemikul kõrgem taimkatte olemas või ei olnud. Kui vaadata üle 2 m kõrguse taimkatte esinemist eri reostustundlikkuse klasside lõikes, selgub, et väga kõrge reostustundlikkusega aladel on veekoguäärne kallas kaetud looduslikel veekogudel 78,4% ja maaparandussüsteemi avatud eesvooludel 54,0% ulatuses taimkattega.

Kuidas käesoleva töö tulemkihte kasutada ja mida tähele panna?

Töös valminud kaardikihte on soovitatav kasutada põllumeeste teadlikkuse tõstmiseks ja informeerimiseks. Kaardikihtide abil on võimalik tuvastada põllumaadega piirnevate veekogude ääres paiknevaid kriitilisi piirkondi, kus on lähtuvalt mulla ja reljeefitingimustest suurem tõenäosus, et toitained või taimekaitsevahendid liiguvad veekogusse. Kõik loodud soovitusliku puhverriba andmekihid on indikaatiivsed, aitamaks põllumeestel tuvastada oma maadel potentsiaalseid ohukohti, kus põllu olemasolul või rajamisel on suurendatud oht toitainete väljakandeks veekogudesse ja vajalik oleks kaaluda täiendava puhverriba rajamist.

Lisaks on kaardikihid abiks veekaitse meetmete välja töötamisel otsuste tegemiseks. Ühtlasi võib kaardikihid võtta aluseks edasiste survegurite tuvastamisel valglates ning leevendusmeetmete välja töötamisel.

Andmekihid ja koodid

Kõik selle töö raames loodud andmekihid ja koodid on avatud ja kättesaadavad siit: <https://landscape-geoinformatics.ut.ee/puhverribad?lang=et>

Projekti käigus loodud kaardikihtidega on võimalik tutvuda veebirakenduse prototüübis: <https://puhverribad.web.app/> Veebiplatvorm on aktiivne kuni 1.09.2021. Selleks ajaks loodame saada kaardikihid Maa-ameti, PRIA ja/või Põllumajandusameti veebirakendustesse.

2 SISSEJUHATUS

Intensiivistuv põllumajandus suurendab hajureostusest tulenevat toitainete koormust pinnaveekogudele ja põhjaveele. Pinnaveekogude reostuse vältimiseks ja vähendamiseks on seadusega kehtestatud veekaitsevööndid. Veekaitsevööndi ulatus on sätestatud Veeseadusega ja sõltuvalt veekogust on need vastavalt 1, 10 või 20 m veepiirist. Veekaitsevööndis on põllumajandustegevustest keelatud maaharimine, väetise ja reoveesette kasutamine, sõnnikuhoidla ja -auna paigaldamine, keemilise taimekaitsevahendi kasutamine. Sõltuvalt keskkonnatingimustest (muld, reljeef) on mõnikord vajalik veekaitsevööndist laiem puhverriba ja mõningtes kohtades võib olla veekaitsevöönd laiem kui vajalik. Suurema reostustundlikkusega piirkondades võib esineda ka vajadus puhverriba osaline katvus kõrgema taimestikuga.

Samas on puhverribade rajamine kulukas ning põllumeestele mitte väga meelt mööda, kuna kaitseribade alune maa jääb põllumajanduslikust tootmisest välja. Seetõttu on mõistlik tuvastada kohad, kus veekaitsevööndites on reostustundlikkus kõige suurem ning kaldavööndi puhverriba rajamine oleks kõige tulusam. Peamiselt sõltub reostustundlikkus mulla lõimisest ja nõlva omadustest (kaldest). Näiteks, lämmastik leostub peamiselt kergesti läbilaskvast (liivasest) pinnasest ja kohtades, kus maapind on tasane, aga savikatel tasasematel aladel ei ole reostusohu nii suur. Samas aladel, kus maapind on järsema kaldega ning muld savine, toimub ärakanne peamiselt pindmise äravoolu teel. Vastavaid ärakande mehhanismide alaseid teadmisi kasutades on võimalik leida vastavate mulla ja reljeefiomaduste kombinatsioonid veekaitsevööndites ning anda koondhinnang reostustundlikkuse ning kaldavööndi puhverriba vajalikkuse kohta.

Praeguseks on olemas kogu Eestit kattev ning avaandmetena saadaval nii digitaalne mullakaart kui LiDARil põhinev väga täpne kõrgusmudel. Nende kahe andmestiku põhjal on võimalik ruumianalüüsi abil tuvastada kõikide veekaitsevööndite reostustundlikkus ja kaldavööndite kaitseribade vajadus.

Varasemalt on Jänijõe valglas GIS-i (geograafilise infosüsteemi) abil tuvastatud puhverribade rajamiseks prioriteetsed kohad (Kasak ja Piirimäe, 2019), aga üleriigiliselt seda Eestis tehtud ei ole. Autoritele teadaolevalt ei ole seda ka tehtud mujal maailmas. Lokaalsel tasandil on juba 1990ndatel välja töötatud meetodid, kuidas optimaalset puhverriba laiust määrata mulla ja reljeefi parameetrite alusel, aga suuremal kui valgla tasand on seda siiani keeruline olnud teha peamiselt arvutusliku võimsuse ja piisava täpsusega andmete puudumise tõttu. Tänu LiDAR tehnoloogiale on Eestis olemas tänaseks päevaks väga detailne maapinna kõrgusmudel ning digitaliseeritud on ka mullastikukaart. See loob head võimalused üleriigiliselt GIS-i abil tuvastada veekogude äärne reostustundlikkus ning leida soovituslikud puhverribade laiused. Samas tuleb silmas pidada, et käesoleva töö tulemusel valmivad andmekihid on **indikatiivsed ja soovituslikud** ning teatud kohtades esineb sisendandmetest tulenevaid ebatäpsusi.

Olulised mõisted käesoleva töö kontekstis

Veekaitsevöönd – Veeseaduses sätestatud veekogude kallastel nõutav vöönd, mille eesmärgiks on kaitsta vett hajureostuse eest.

Puhverriba – veekogude kallastel olev taimestikuga vöönd, mis võib hõlmata nii veekaitsevööndit, aga võib olla ka kitsam või laiem ning selle eesmärgiks on samuti kaitsta pinnavett hajureostuse eest. Puhverriba võib olla sarnases kasutuses ja piirangutega nagu veekaitsevöönd, aga see võib omada ka

täiendavat looduslikku või rajatud kõrgemat taimestikku toitainete väljakande vähendamiseks ning elurikkuse soodustamiseks.

Reostustundlikkus ehk reostusohu – potentsiaalne oht, et mulla- ja reljeefi tingimuste tõttu võib reostus (toitained, taimekaitsevahendid vmt) jõuda pindmise äravooluga veekogusse. Reostustundlikkus antud töö raames ei näita, kui tundlik puhverriba ise on reostuse suhtes, vaid näitab ainult potentsiaalset ohtu reostuse jõudmiseks veekogusse: kui veekogu piirneb põllumajanduslikus kasutuses oleva maaga, siis on vajalik kaaluda vastava laiusega puhverriba rajamist ja puhverriba laius sõltub reostuse veekogusse jõudmise ohust ehk reostustundlikkusest.

Käesoleva projekti peamised eesmärgid olid:

- 1) lisada Eesti digitaalsele mullastikukaardile reostustundlikkuse hinnangu andmiseks ja toitainete väljakande modelleerimiseks vajalikud numbrilised parameetrid (savi ja liiva osakaal, orgaanilise süsiniku sisaldus jms), mida saab kasutada enamlevinud mudelite arvutustes;
- 2) luua mulla ja reljeefi näitajate põhjal veekaitsevööndite reostustundlikkuse ja soovitusliku puhverriba laiuse hinnangu kaardikiht;
- 3) hinnata, kui suur on toitainete sisalduse kõrge taseme tõttu mitteheas seisundis olevate veekogude (v.a Läänemeri) valglatesse jäävate looduslike veekogude ja üle 10 km² suuruse valglaga maaparanduse eesvoolude 50 meetri raadiusesse jäävate põllumassiivide pindala.

3 PUHVERRIBADE FUNKTSIOONID JA EFEKTIIVSUS

Puhverribad on väga multifunktsionaalsed maastikuelemendid, mis pakuvad väga erinevaid ökosüsteemi teenuseid. Puhverribade olulisimad funktsioonid on: 1) pindmise veevoolu filtreerimine põllumajanduslikus kasutuses olevate veekogude ääres; 2) kallaste kaitse erosiooni eest; 3) süsiniku sidumine; 4) õhusaaste kandumise vähendamine veekogudesse; 5) mikrokliima parandamine; 6) elupaikade loomine (Mander jt. 2005; Polyakov jt. 2005).

Hajureostuse vähendamise seisukohalt on olulised lämmastikku ja fosforit eemaldavad protsessid, mis leiavad aset puhverribades. Peamised lämmastikku eemaldavad protsessid veekogude kaldaäärsetes puhverribades on 1) lämmastiku kasutamine taimede poolt; 2) mikroobne sidumine mulda orgaanilise lämmastikuna; 3) denitrifikatsioon; 4) lämmastiku lendumine ammooniumina. Toitainete talletamine taimestikku sõltub peamiselt jõeäärse koosluse vanusest. Noorematel, suktsessiooni etapis olevatel metsadel ja niitudel kõrgem lämmastiku eemaldamise võime. Peamised fosforit eemaldavad protsessid veekogude kaldaäärsetes puhverribades on 1) tahke fosfori settimine ja keemiline sadestamine; 2) imbumine mulda; 3) lahustunud anorgaanilise fosfori eemaldamine taimede poolt; 4) mikroobne sidumine mulda orgaanilise fosforina. (Mander jt. 2005; mander ja Tournebize, 2005)

Puhverriba efektiivsus sõltub eelkõige selle laiusest ja taimkatte struktuurist. Teadusuuringutes on tuvastatud, et puhverribad suudavad pindmise veevooluga veekogusse sattuvate osakeste hulka vähendada 67–90% (Polyakov jt. 2005). Seejuures on esimesed 2–6m kõige efektiivsemad. Alla 3 m laiused puhverribad vähendavad kuni 50% ja üle 6 m laiused puhverribad üle 90% pinnaseosakeste sattumist veekogusse (Yuan jt. 2009).

Enamus põllumajanduslikelt maadelt veekogudesse liikuvast lämmastikust on nitraadi kujul. Kuna puhverribas vee liikumine aeglustub, siis toimub mitmesugune lämmastiku eemaldamine tõhusamalt. Nitraatide eemaldamise efektiivsus on varasemate uuringute põhjal väga suures ulatuses varieeruv. Enamus uuringuid näitab, et orgaanikarikastes muldades ulatub puhverribade lämmastiku



eemaldamise efektiivsus üldjuhul üle 80% (Hickey ja Doran, 2004). Fosfori osas ei pruugi puhverribade efektiivsus olla nii hea ning aja jooksul see väheneb. Fosfori äraanne on tugevamalt seotud füüsikaliste teguritega ning peamine äraanne toimub mullaosakestega erosiooni käigus. Seetõttu aitab igasugune püsiv taimkate veekogude kallastel fosfori kannet veekogusse vähendada. Eestis tehtud uuringud on näidanud, et halli lepiku puhverriba koos rohumaa ribaga eemaldab kuni 81% lämmastikust ja 67% fosforist (Mander jt. 1997).

Eriti efektiivne puhverriba koosneb rohu-, puhma- ja puuvööndist. Veekogule kõige lähemal võiks olla puude vöönd ja põllule kõige lähemal rohuvöönd. Eesti tingimustes on head puhverriba liigid hall-lepad (*Alnus incana*) ja pajupöösad (*Salix spp.*). Puhverriba peaks regulaarselt hooldama kas niitmise või karjatamisega. Viimasel juhul peaksid loomad olema veekogust võimalusel eraldatud aedikuga, et piirata nende veekogusse minekut, eriti kui on tegemist suuremate karjadega. Kariloomade uriini ja sõnnikuga võib sattuda veekogudesse arvestataval kogusel toitaineid ning lisaks suureneb bakteriaalse reostuse oht.

4 EESTI MULLASTIKUKAARDI KORRASTAMINE JA TÄIENDAMINE

Eestis on muldade omadusi, viljakust, levikut ja kasutussovivust võrdlemisi põhjalikult uuritud (Astover jt. 2014). Kogu Eesti maismaad kattev mullastikukaart (mõõtkavas 1:10 000) digitaliseeriti 1990ndate lõpus ja sisaldab enam kui 750 000 andmebaasi kirjet. Lisaks on andmestikku hiljem ka korrastatud, aga mullastikukaardi kasutamine on hoolimata sellest olnud piiratud osaliselt kasutajaskonna tagasihoidlike teadmiste tõttu erialainfo tõlgendamisel ja teisalt mõningaste andmestiku puuduste tõttu (erinevad geomeetria- ja atribuutivead) (Astover jt. 2014; Suuster jt. 2011a).

Muldade nimetus ja lõimis on esitatud teatud süsteemiga kirjeldusena ja mitte standardiseeritud klassidena, mis ei võimalda lihtsalt numbrilisi väärtusi (näiteks savi %) tuletada ega ka andmeüldistusi teha. Esialgse andmete kontrolli käigus tuvastati näiteks, et mullastikukaardi seletuskirja 120 mulla nimetuse (šiffer) asemel atribuutitabelis 7067 nimetust. Sarnane probleem esines ka lõimise puhul.

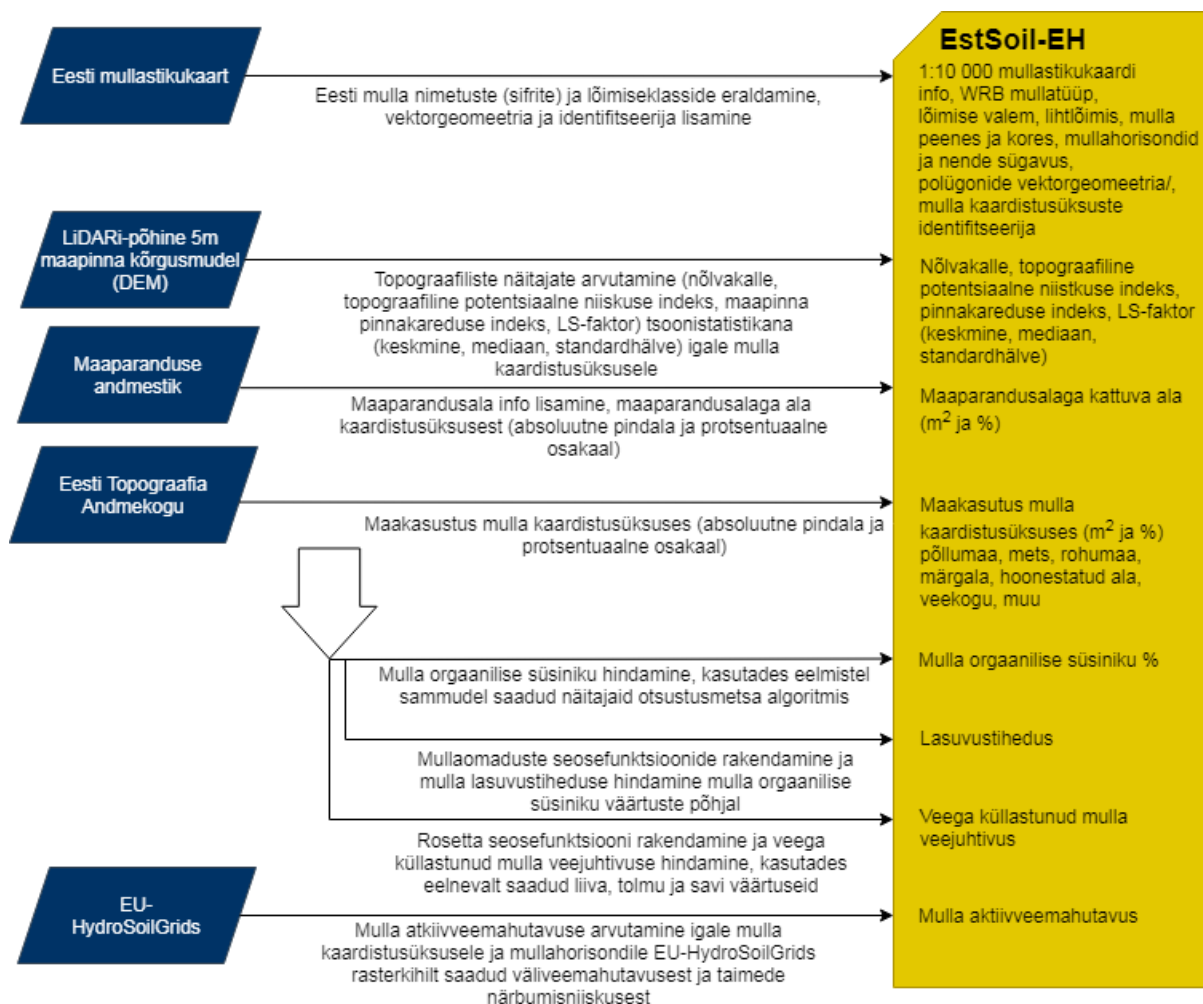
Mullastikukaardi andmebaasis on juba varasemate korrastustööde käigus (Astover jt. 2014) tuvastatud stringivead, mis omakorda jagunevad kaheks:

- 1) Tähemärgivead – vead, mis tulenevad andmete eksportimisest ja importimisest erinevate tarkvarade vahel, sisestamisvigadest jne. Vigased tähemärgid ja nende kombinatsioonid põhjustavad segadust.
- 2) Loogikavead – mullakaardi kaardilehtede liitmiskohtades on tekkinud areaale, kus tervikuks liitmise tulemusena esineb sageli situatsioon, kus ühele mullaarealile, mis paikneb erinevatel kaardi naaberruutudel, on omistatud erinevad atribuutväärtused.

Astover jt. (2014) viisid läbi juba olulise atribuutide korrastuse Tartumaal ja Saaremaal, aga lausaliselt üle Eesti pole andmebaasi korrastatud eelpool mainitud vigadest.

Käesoleva töö raames mullastikukaardi geomeetria andmeid ei muudetud, vaid korrastati ja täiendati ainult atribuutandmeid ning tehti seda kogu Eesti ala kohta. Lähteandmeteks oli digitaalne mullastikukaart, mis laeti alla [Maa-ameti veebilehelt](#) seisuga 01.09.2018. Lõpptulemusena valmis uus andmebaas EstSoil-EH, mille töövoog ja korrastatud ning loodud uued parameetrid on näha joonisel 1. Andmebaasile lisati esmalt unikaalne rea indeks [idx] andmete ühendamiseks ja säilitati orginaal mullastikukaardi FID number väljas [orig_fid]. Seejärel korrastati mulla nimetused ja lõimisevalemid, lisati WRB mullatüüp ning USDA lõimiseklass, reljeefi indeksid ning maakasutuse osakaalud mulla

kaardistusüksuses. Kõige viimase sammuna lisati mullastikukaardile masinõppe abil mulla orgaanilise süsiniku sisaldus ning mulla seosefunktsioonide abil arvatati lasuvustihedus ja veega küllastunud mulla veejuhtivus. EstSoil_EH andmebaasi atribuutide info on leitav tabelist „attributes.xlsx“ ning Tabelis 1. EstSoil_EH andmebaasi loomise meetoodika ja andmebaas ise on publitseeritud teadusartiklina „EstSoil-EH: a high-resolution eco-hydrological modelling parameters dataset for Estonia“ rahvusvahelises teadusajakirjas *Earth System Science Data* ja on allalaetav siit: <https://essd.copernicus.org/articles/13/83/2021/>



Joonis 1. Mullastikukaardi korrastamiseks ja täiendamiseks kasutatud sisendandmed (sinisel taustal), töövood (valgel taustal) ja tulem atribuudid (kollasel taustal). Töö tulemusel valmis uus andmebaas EstSoil-EH.

Tabel 1. Andmebaasi EstSoil-EH andmebaasi atribuutide kirjeldus

atribuudi nimi	andmetüüp	kirjeldus
idx	int64	unikaalne rea indeks andmete ühendamiseks
orig_fid	int64	unikaalne rea indeks Maa-ameti mullastikukaardist
est_soiltype	string	mulla nimetus (šiffer)
wrb_code	string	WRB mullatüüp (1. ja 2. tase)
wrb_main	string	WRB mullatüüp (1. tase)
Loimis1	string	lõimise valem
est_txcode	string	korrastatud lõimise valem
nlayers	number	tuvastatud mullahorizontide arv
ZMX	float64	mullaprofiili sügavus või maksimaalne määratud sügavus (mm)
Z1-4	float64	sügavaima mullahorisoni alumine piir või maksimaalse määratud sügavuse piir
EST_TXT1-4	string	lõimis
LXTYPE1-4	string	USDA tekstuur ehk lõimiseklass
EST_CRS1-4	string	mulla kores
SAND1-4	int64	liiva osakaal (%)
SILT1-4	int64	tolmu osakaal (%)
CLAY1-4	int64	savi osakaal (%)
ROCK1-4	int64	koreselisus (% mahust)
SOC1-4	float64	mulla orgaanilise süsiniku %
BD1-4	float64	lasuvustihedus (g/cm ³)
K1-4	float64	veega küllastunud mulla veejuhtivus (mm/h)
AWC1-4	float64	mulla aktiivveemahutavus (mm H ₂ O/mm) (Tóth jt. 2017)
unit_area	float64	mulla kaardistusüksuse pindala m ²
slp_mean	float64	kaardistusüksuse keskmine nõlvakalle kraadides, arvutatud kõrgusmudelilt
slp_median	float64	kaardistusüksuse mediaan nõlvakalle kraadides, arvutatud kõrgusmudelilt
slp_stdev	float64	kaardistusüksuse nõlvakalle standard hälve, arvutatud kõrgusmudelilt
twi_mean	float64	kaardistusüksuse keskmine topograafiline potentsiaalse niiskuse indeks,
twi_median	float64	kaardistusüksuse mediaan topograafiline potentsiaalse niiskuse indeks,
twi_stdev	float64	kaardistusüksuse topograafilise potentsiaalse niiskuse indeksi standardhälve,
ls_mean	float64	kaardistusüksuse keskmine nõlvapikkuse ja -kalde tegur (Moore jt. 1991),
ls_median	float64	kaardistusüksuse mediaan nõlvapikkuse ja -kalde tegur (Moore jt. 1991),
ls_stdev	float64	kaardistusüksuse nõlvapikkuse ja -kalde teguri (Moore jt. 1991) standardhälve,
tri_mean	float64	kaardistusüksuse keskmine pinnakareduse indeks, arvutatud kõrgusmudelilt
tri_median	float64	kaardistusüksuse mediaan pinnakareduse indeks, arvutatud kõrgusmudelilt
tri_stdev	float64	kaardistusüksuse pinnakareduse indeksi standardhälve, arvutatud
area_drain	float64	maaparandusalaga kattuva ala pindala kaardistusüksuses (m ²)
drain_pct	float64	maaparandusalaga kattuva ala osakaal kaardistusüksuses (%)
area_arable	float64	haritava maa pindala (m ²) kaardistusüksuses, arvutatud ETAKist
arable_pct	float64	haritava maa osakaal kaardistusüksusest (%), arvutatud ETAKist
area_forest	float64	metsa pindala (m ²) kaardistusüksuses, arvutatud ETAKist
forest_pct	float64	metsa osakaal kaardistusüksusest (%), arvutatud ETAKist
area_grassland	float64	rohuma pindala (m ²) kaardistusüksuses, arvutatud ETAKist
grassland_pct	float64	rohuma osakaal kaardistusüksusest (%), arvutatud ETAKist
area_wetland	float64	märgala pindala (m ²) kaardistusüksuses, arvutatud ETAKist
wetland_pct	float64	märgala osakaal kaardistusüksusest (%), arvutatud ETAKist
area_urban	float64	hoonestatud ala pindala (m ²) kaardistusüksuses, arvutatud ETAKist
urban_pct	float64	hoonestatud ala osakaal kaardistusüksusest (%), arvutatud ETAKist
area_water	float64	veekogu pindala (m ²) kaardistusüksuses, arvutatud ETAKist
water_pct	float64	veekogu osakaal kaardistusüksusest (%), arvutatud ETAKist
area_other	float64	muu maakasutus kaardistusüksuses (m ²), arvutatud ETAKist
other_pct	float64	muu maakasutuse osakaal kaardistusüksusest (%), arvutatud ETAKist
geometry	geometry	geomeetria, EPSG:3301 L-EST 1997

4.1 EESTI MULLA NIMETUSTE (SIFRITE) JA LÕIMISEKLASSIDE ERALDAMINE, WRB MULLATÜÜBI JA USDA LÕIMISE KLASSI LISAMINE

Mulla nimetuste [est_soiltype] standardiseerimise alusena kasutati mullastikukaardi legendi 130 mulla nimetust (Maa-amet, 2001). Mullastikukaardi andmebaasis olevate mulla nimetuste vastavusse viimiseks kasutati Pythoni koodi, mis leidis parima vaste legendis olevatele mulla nimetustele. Juhul kui vastet automaatselt ei leitud, siis kasutati vaste leidmiseks erandite otsingutabelit (*look-up table*) (Tabel 2), mis loodi manuaalselt kõiki erandeid läbi käies. Otsingutabelis on kokku enam kui 300 kirjet ning tabel on täiendav lisa EstSoil-EH andmebaasile failina soil_types_error_rules_lookup.xlsx. Korrastatud mulla nimetus on EstSoil-EH andmebaasis väli [est_soiltype].

Tabel 2. Väljavõtte mulla nimetuse korrastamisel kasutatud otsingutabelist, kus on vigased mulla nimetused ja nende asendused.

ID	Vigane mulla nimetus	Asendus
0	AM	AM'
1	E	E2I
2	E1I	E2I
3	E2	E2I
4	E2(1)	E2I
5	E2(1)I	E2I

WRB mullatüüp [WRB_code] [WRB_main] (FAO, 2015) lisati peale mulla nimetuste korrastamist. *World Reference Base* (WRB) on ülemaailmselt oluline mullastiku klassifikatsioon, mis on kasutusel kõigis maailma riikides, kuigi enamikus maades on ka rahvuslikud mulla klassifikatsioonid. WRB on paljuski kokkulangev USA põllumajanduse osakonnas (USDA) välja töötatud süsteemiga ja põhineb diagnostilistel tunnustel, mis mõjutavad pedogeneesi. WRB ja Eesti muldade klassifikatsioon erinevad üksteisest väga paljude kriteeriumite poolest ning ei ole väga üks-ühele vastavusse viidav, sest igale valdavale osale mullaliikidest (kaardistamisüksustest) võib ilma täiendavaid tunnuseid kaasamata anda mitmeid erinevaid vasteid WRB järgi (Kõlli, 2000). Antud töö raames siiski anti igale Eesti mulla nimetusele WRB vaste, et võimaldada andmebaasi kasutamist ka rahvusvahelistes uurimustöodes ning rahvusvaheliselt väljatöötatud keskkonnamudelite sisendina. Väljavõtte mõningatest mulla nimetustest ja nende WRB vastetest on toodud tabelis 3. Kogu mulla nimetuste tabel sisaldab 135 enam-levinud mulla nimetust ja on täiendav lisa EstSoil-EH andmebaasile failina soil_types_legend.csv

Tabel 3. Väljavõtte korrastatud muldade nimetuste ja neile vastavate WRB mullatüüpide tabelist.

Mulla siffer	Mulla nimetus	Mulla inglisekeelne nimetus	WRB kood
Ag	Gleistunud lammimuld	Endogleyic Fluvisols	FL-gln
AG	Lammi-gleimuld	Gleyic Fluvisols	FL-gl
AG1	Lammi-turvastunud muld	Histic Fluvisols	FL-hi
AM'	Väga õhuke lammi-madalsoomuld	Rheic Sapric Histosols (fluvic)	HS-sa.rh-fv
AM''	Õhuke lammi-madalsoomuld	Rheic Sapric Histosols (fluvic)	HS-sa.rh-fv
Dg	Gleistunud deluviaalmuld	Endogleyic Umbrisols (deluvic, novic)	UM-gln-del.nv
E2l	Keskmiselt erodeeritud kahkjaa leetunud ja leetunud muld	Dystric Regosols	RG-dy
E2k	Keskmiselt erodeeritud rähkmuld	Epicalcaric Regosols	RG-cap
E2o	Keskmiselt erodeeritud leostunud ja leetjas muld	Eutric Brunic Regosols	RG-br.eu
E3l	Tugevasti erodeeritud kahkjaa leetunud ja leetunud muld	Dystric Regosols	RG-dy
E3k	Tugevasti erodeeritud rähkmuld	Epicalcaric Regosols	RG-cap
E3o	Tugevasti erodeeritud leostunud ja leetjas muld	Eutric Brunic Regosols	RG-br.eu

Mulla lõimise valem [Loimis1] on mullastikukaardil tekstilisel ja raskesti arusaadaval kujul. Selle standardiseerimiseks ja masinloetavale kujule viimiseks kasutati peamiselt Arpeggio (Dejanović jt. 2016) moodulil põhinevat Pythoni koodi. Arpeggio on rekursiivne märgendaja (*parser*), mis võimaldab reeglite ja sümbolite (grammatika) abil märgendada teksti ja leida antud juhul mullastikukaardis defineeritud lõimiseklasse. Grammatika jaoks defineeriti mullastikukaardi legendi järgi 1) mulla peenes: plsl, pl, tsl, tls, dk, sl, ls, s, l ning täiendavalt defineeritu turvas t; 2) mulla kores kr, kb, pk, ck, lu, v_0, k_0, r_0, r, v, k, p, d. Lisaks defineeriti kõik erisümbolid ja eraldajad. Need olid peamisteks vea allikateks. Näidiskood grammatika reeglitest on toodud lisa 1. Tähemärgivigade ja ebaloogiliste lõimise valemite korrastamiseks kasutati käsitsi valideeritud otsingutabelit, kus olid tuvastatud vigased lõimise valemid ning nende sobivaimad vasted. Tabel 4 on väljavõtte lõimise valemite otsingutabelist. Otsingutabelis on kokku enam kui 200 kirjet ning tabel on täiendav lisa EstSoil-EH andmebaasile failina „texture_error_lookup.xlsx“.

Tabel 4. Väljavõtte lõimise valemite korrastamisel kasutatud otsingutabelist, kus on vigased lõimise valemite väärtused ja nende asendused

ID	Vigane lõimise valem	Asendus
0	(sl)	sl
1	(t ₃ 60)/(t ₂ 90)	t ₃ 60/t ₂ 90
2	(t ₃ /lu/l)	t ₃ /lu/l
13	e40/ls ₁	ls ₁
14	e;ls	ls
15	krb	kb
16	krl/+30	krl+30
50	pl;120/v ₂ l	pl120/v ₂ l
51	r ₁ l15/r _{4a} l25/p	r1l15/r425/p
52	r1ls110-70/i20/p	r1ls110-70/p
53	r1ls130/r33ls1	r1ls130/r3ls1
195	v°1ls130-50/v°1ls240-60/r1ls120-50/p(100-140)	v°1ls130-50/v°1ls240-60/r1ls120-50/p100-140
196	v°1ls1;(sl)50/ls225/r1ls2	v°1ls1;sl50/ls225/r1ls2
197	v°1ls1;v°1sl35-40/v°1ls110-65/r1ls1(45-1)	v°1ls1;v°1sl35-40/v°1ls110-65/r1ls145
198	v°1sl,v°1ls140-90/v°1ls120-60/r1ls1(60-1)	v°1sl,v°1ls140-90/v°1ls120-60/r1ls160
199	v°1sl30/+(lr3ls2)	v°1sl30/r3ls2+30

Märgendaja tuvastab lõimise valemite erinevad elemendid (peenes, kores, horisondid) ja grammatikareeglite järgi pannakse lõimise valem uuesti süsteemselt kokku. Osades lõimise valemite on ära toodud ka mitu lõimist, mis samas kaardistusüksuses esinevad. Sellist horisontaalset lõimise infot antud korrastamise käigus ei olnud võimalik säilitada ja seetõttu jäeti igasse kaardistusüksusesse ainult esimene (enamlevinud) lõimise info. Korrastatud lõimise valem on EstSoil-EH andmebaasis [est_txcode] ja sellel põhinev lõimis [EST_TXT1-4].

Mulla granulomeetrisel fraktsioonid ([EST_CRS1-4], [SAND1-4], [SILT1-4], [CLAY1-4], [ROCK1-4]) ja USDA tekstuur ehk lõimiseklass [LXTYPE1-4]. Eestis on mulla peenese fraktsioone eristatud omaaegses Nõukogude Liidu ametlikult kehtinud Katšinski (1965) klassifikatsiooni järgi (Kask, 2001). USDA (USA Põllumajandusministeeriumi muldade klassifikatsioon) kasutab Atterbergi süsteemi modifikatsiooni (White, 1987). Katšinski järgi lõimiseklasside määramisel on põhiliseks füüsikalise savi (osakesed alla 0,01 mm) osakaal. Erimite määramisel arvestatakse veel tolmu ja liiva erinevate fraktsioonide vahet. Samas USDA süsteem kasutab 12 lõimise ehk tekstuuri klassi ja võtab lõimiseklassi määramisel üheaegselt arvesse kolme erineva põhifraktsiooni – liiva, tolmu ja ible osakaalu. Katšinski ja Atterbergi süsteemi seoseid on uurinud Kask (2001), kelle töö võeti modifikatsioonidega aluseks Katšinski süsteemist USDA süsteemi üle viimisel. Tabelis 5 on näha väljavõtte lõimise klasside üleviimiseks USDA süsteemi. Täielik tabel on lisa EstSoil-EH andmebaasis failina „texture_rules_lookup.xlsx”.

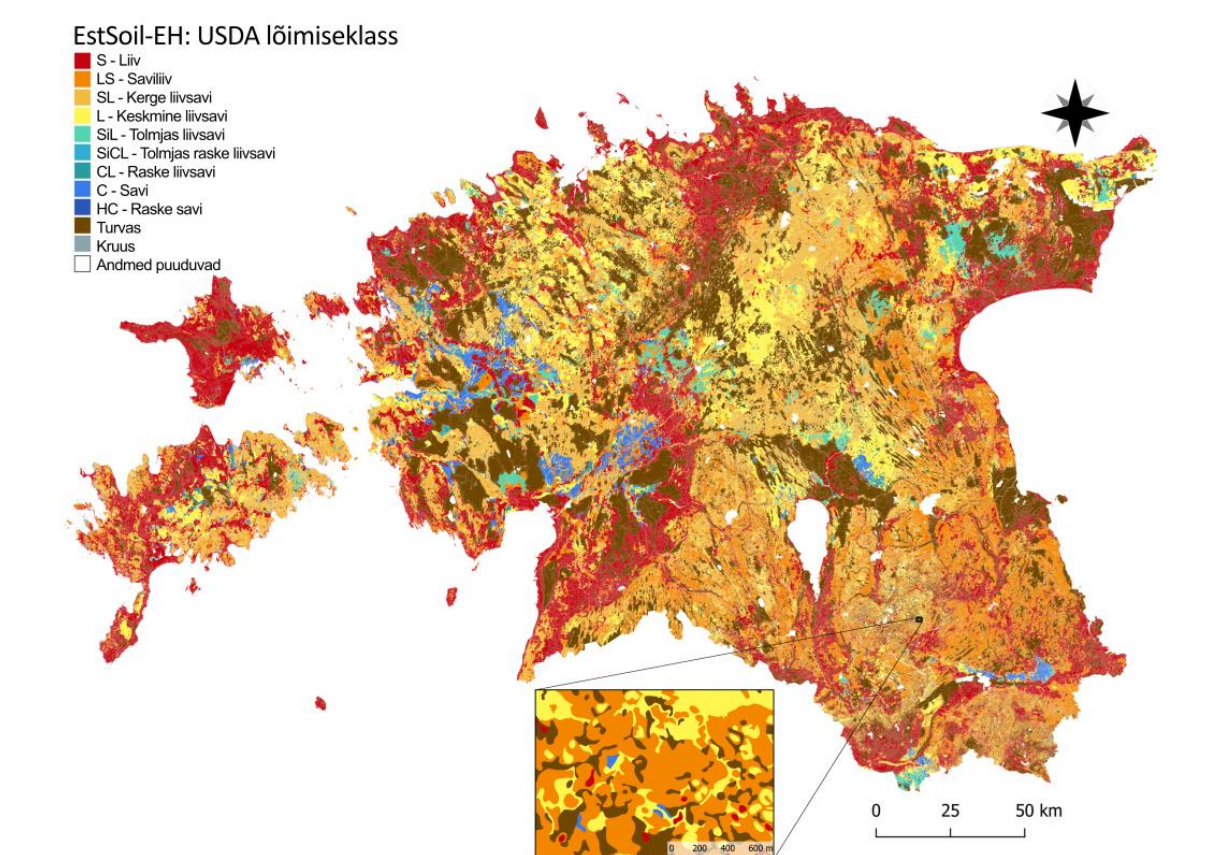
Kasutades eelpool mainitud reeglistikku (Tabel 5), omistati kõigepealt igale horisondile mulla lõimisele [EST_TXT1-4] vastavad liiva [SAND1-4], tolmu [SILT1-4], savi [CLAY1-4] (massi) osakaalud ning seejärel vastav USDA lõimise klass [LXTYPE1-4].

Tabel 5. Väljavõtte numbriliste väärtuste tuletamise tabelist, mida kasutati Eesti lõimise klassidele USDA lõimise klasside vastete leidmisel.

Eesti lõimise lühend	Eestikeelne lõimise nimetus	Ingliskeelne lõimise nimetus	USDA lõimiseklassi lühend	Osakaal (%) kogukaalust		
				Liiva %	Tolmu %	Savi %
I	liiv	sand	S	90	5	5
I1	sõre liiv	coarse sand	S	95	5	0
I2	sidus liiv	fine sand	S	90	3	7
sI	saviliiv	loamy sand	LS	82	9	9
sI1	saviliiv	loamy sand	LS	82	9	9
Is	liivsavi	loam	L	55	30	15
Is1	kerge liivsavi	sandy loam	SL	65	20	15
Is2	keskmine liivsavi	loam	L	55	30	15
s	savi	clay	C	25	30	45

USDA süsteemi 12 lõimise klassile lisati täiendavalt kaks klassi: turvas ja kruus. Klass „turvas“ märgib kaardistusüksusi, kus turbakihi paksus on vähemalt 30 cm. Kuna andmestiku üheks eesmärgiks on ka kasutatavus hüdroloogilise modelleerimisel, siis otsustati mõõndusena turbale lisada ka savi, tolmu ja liiva fraktsioonide osakaalud, mis on sedalaadi mudelites vältimatu eeldus. Hüdroloogilise modelleerimise vajadustest lähtuvalt omistati „turba“ klassile kõrge savi osakaal, et imiteerida madalat vertikaalset veejuhtivust turbaalustes kihtides. Samas kui soovida tegelikku savi sisaldust mulla üksustes hinnata, siis peaks „turba“ klassi kaardistusüksused analüüsist välja jätma, sest need ei näita savi sisaldust adekvaatselt. Klass „kruus“ markeerib kaardistusüksusi või kihte, kus on defineeritud ainult kores (peenes puudub). Sellistel juhtudel võib kores koosneda nii kruusast, veeristest kui ka rähast.

Joonisel 2 on ülemise mullahorisoni USDA lõimiseklasside jaotus Eestis. Ligikaudu 20% muldadest kuulub klassi turvas, mida algses USDA klassifikatsioonis ei ole, aga Eesti kontekstis on see klass ülimalt oluline ja seetõttu lisatud.



Joonis 2. USDA lõimise klasside jaotus Eestis, mis on tuletatud Eesti mullastikukaardi andmestikust. USDA klassifikatsioonile lisati klassid „turvas“ ja „kruus“.

Mulla korese osas eristati korese rühmad (kr, v⁰ jne) [EST_CRS1-4] ja koreselisuse protsent mahust. Mahuprotsendid on algsel mullastikukaardil antud protsendivahemikena (r1 ... k¹ - nõrgalt koreseline, sisaldus 2–10 % mulla mahust), aga ühe numbrilise väärtuse tuletamiseks võeti igast vahemikust keskmine, st. 2–10 % väärtusest sai 6 %. Kõik koreselisuse tähistuses kasutatavad indeksid ja neile vastavad väärtused uues EstSoil-EH andmebaasis on ära toodud tabelis 6.

Tabel 6. Koreselisuse tähistuses kasutatavad indeksid ja neile vastavad mahuprotsendid

	Koreselisuse mahuprotsentide vastavus tähistusele					
Koreselisuse tähistuse indeks	1	2	3	4	5	6
Koreselisus (% mahust)	6%	15%	25%	40%	60%	85%

Mullahorizontide sügavus [Z1–4] ja horisontide arv [nlayers] ning mullaprofiili maksimaalne sügavus [ZMX] tuletati korrastatud lõimise valemist. Antud tööprotsessis eeldati, et üldjuhul on mullaprofiilide sügavus 1m. Kui mullahorizontide infost selgus sügavam väärtus, siis omistati profiilile see sügavuse väärtus. Juhul kui esialgselt lõimise valemist puudusid mõne mullahorisoni sügavuse andmed, siis lihtsustuse mõttes eemaldati vastav horisont. Kui mullahorisoni sügavus oli antud vahemikuna, siis määrati vastava mullahorisoni sügavuseks vahemiku keskmine väärtus. Näiteks, kui mullahorisoni sügavus oli 70–110 cm, siis sai see uueks sügavuseks 90 cm. Kõik sügavusandmed teisendati sentimeetristest millimeetriteks.

Tulemuste valideerimine

Mulla nimetuste ja lõimise korrastamise valideerimiseks kasutati Tartumaa mullastikukaardi andmebaasi, mis oli sarnasel moel käsitsi ekspertide poolt korrastatud Astover jt. (2014). Andmebaas sisaldab 83 364 kirjet.

Mulla nimetuste osas oli 97,7% osas kattuvus kahe andmestiku vahel. Ebakõla esines 1943 kirjes (2,3 % Tartumaa andmebaasist), mille läbivaatamisel selgus, et kõikidel sellistel juhtudel ei olnud ekspert mõningaid šifri lisaindekseid/täiendeid alati järjepidevalt ühtemoodi klassifitseerinud. Seega võib öelda, et automaatne korrastamine ja ühtlustamine oli väga täpne ning on suuremahuliste tööde puhul ning ekspertide poolt loodud õigete grammatika reeglite puhul täpsem manuaalsest tööst.

Mulla lõimise puhul valideeriti esmalt kogu lõimise valemit ja seejärel iga kihti eraldi:

- Kogu lõimise valemi kattuvus kahe andmebaasi vahel oli 93,4 % (77 870 kirjet 83 364 kirjest)
- 85,9 % (71 635 kirjet) kattuvus tuvastati esimese mullahorisondi puhul. Tuvastatud erinevustest 10 312 kirjet omas tegelikult erinevat väärtust, aga 1417 kirje puhul puudus väärtus ühes või mõlemas andmebaasis.
- 78,0 % kattuvus (65 000 kirjet) esines teise mullahorisondi osas. Erinevustest 2325 kirjet olid tegelikult erineva väärtusega ning 16 038 kirjet ei omanud väärtust ühes või mõlemas andmebaasis.
- 99,0 % kattuvus tuvastati kolmanda mullahorisondi osas. Erinevustest ainult 334 kirjet olid tegelikud erinevused ja 523 kirjet ei omanud väärtust.

Lõimise puhul olid ebakõlade põhjused sarnased mulla nimetusele. Peamiselt tekkisid erinevused sellest, et eksperdi poolt manuaalsel korrastamisel oli reeglistikku tekitatud täiendavaid erandeid või ei olnud ekspert alati sama süsteemi järginud. Samuti oli vahel üritatud maksimaalselt infot säilitada nt ka mulla horisontaalsed kihid, mida antud andmebaasi loomisel alles ei jätud, sest nende säilitamine oleks lisanud andmebaasi suurel hulgal keerukust ning ebamäärasust.

Savi, liiva ja tolmu osakaalu valideerimiseks kasutati saadaval olnud 84 metsade mullaproovide tulemusi (Hiederer jt. 2011). Tulemuste valideerimiseks arutati ruutkeskmine viga (RMSE), mis savil, liival ja tolmul oli vastavalt 6,5 %, 13,1 % ja 10,7 %.

Kokkuvõttes selgus valideerimise tulemustest, et antud töö tulemuste täpsus oli üldiselt väga hea. Peamiselt tekkisid ebakõlad valideerimise andmestikuga sellest, et manuaalsel mulla nimetuste ja lõimise valemite korrastamisel üritasid eksperdid võimalikult palju infot alles hoida ja sellest tekkisid vahel ebareeglipärasused võid isegi vead. Käesolevas andmebaasis ei säilitatud mulla lõimise puhul ühe kaardistusüksuse kaasnevate muldade lõimise andmeid, mis olid samuti tihti kahe andmebaasi erisuste põhjuseks.

4.2 RELJEEFI INDEKSITE LISAMINE MULLASTIKUKAARDILE

Mulla orgaanilise süsiniku modelleerimise ning ka võimaliku hüdroloogilise modelleerimise rakenduse jaoks arvutati kõikidele mulla kaardistusüksustele mitme reljeefi indeksi keskmine, mediaan ja standardhälve, mida kasutati modelleerimises sõltumatute ennustavate parameetritena. Reljeefi indeksitest lisati topograafiline potentsiaalse niiskuse indeks (*Topographic Wetness Index; TWI*), reljeefi pinnakareduse indeks (*Terrain Ruggedness Index; TRI*) ja nõlvapikkuse ja -kalde tegur (*LS-factor*).

Kõik reljeefi indeksid arvutati Maa-ameti LiDAR-i-põhisest maapinna kõrgusmudelist (5 m) (Maa-amet, 2019a), kasutades SAGA-GIS tarkvara (Conrad jt. 2015).

Topograafiline potentsiaalse niiskuse indeks (*Topographic Wetness Index; TWI*) (Beven and Kirkby, 1979) võimaldab kaudselt hinnata madalamaid reljeefi kohti, kuhu potentsiaalselt võiks vesi koguneda ning mullaniiskus olla kõrgem. Mitmetes mullaniiskuse ja hüdrooloogiliste protsesside teadusuuringutes kasutatakse seda indeksit võimalike liigniiskete kohtade tuvastamiseks maastikus. Indeks arvestab nõlvakallet ja vooluakumulatsiooni:

$$TWI = \ln \left(\frac{a}{\tan b} \right) \quad (1)$$

kus a on iga konkreetse piksli lokaalne valgla ja b on nõlvakalle kraadides.

Reljeefi pinnakareduse indeks (*Terrain Ruggedness Index*) on erosiooniprotsesside indikaatoriks ja väljendab iga piksli kõrguse erinevust naaberpiksli suhtes. TRI leitakse samuti liikuva akna meetodil piksli kõrgusväärtuste võrdlemisel. Indeksit arvutatakse järgnevalt:

$$TRI = Y[\sum(x_{ij} - x_{00})^2]^{1/2} \quad (2)$$

kus x_{ij} on keskse piksli (x_{00}) iga naaberpiksli kõrgus. Tasased alad omandavad väärtuse 0 ja künklikud ning suure nõlvakaldega alad saavad positiivse väärtuse.

Nõlvapikkuse ja -kalde tegur (*LS-factor*) võimaldab hinnata potentsiaalset erosiooniohtlikkust valglates ja põhineb see nõlvakaldel ja iga piksi lokaalset valglat. SAGA-GISis arvutatakse see järgneva valemi põhjal (Moore jt. 1991):

$$LS = (n + 1) \left(\frac{A_s}{22,13} \right)^n \left(\frac{\sin \beta}{0,0896} \right)^m \quad (3)$$

kus A_s on konkreetse piksli lokaalne valgla, β on nõlvakalle ning $n=0,4$ ja $m=1,3$.

4.3 MAAKASUTUSE [ARABLE] [FOREST] [GRASSLAND] [URBAN] [WATER] [OTHER] JA MAAPARANDUSALAGA KATTUVA ALA [DRAIN] PINDALA [AREA_] JA OSAKAALUDE [_PCT] LISAMINE MULLASTIKU KAARDILE

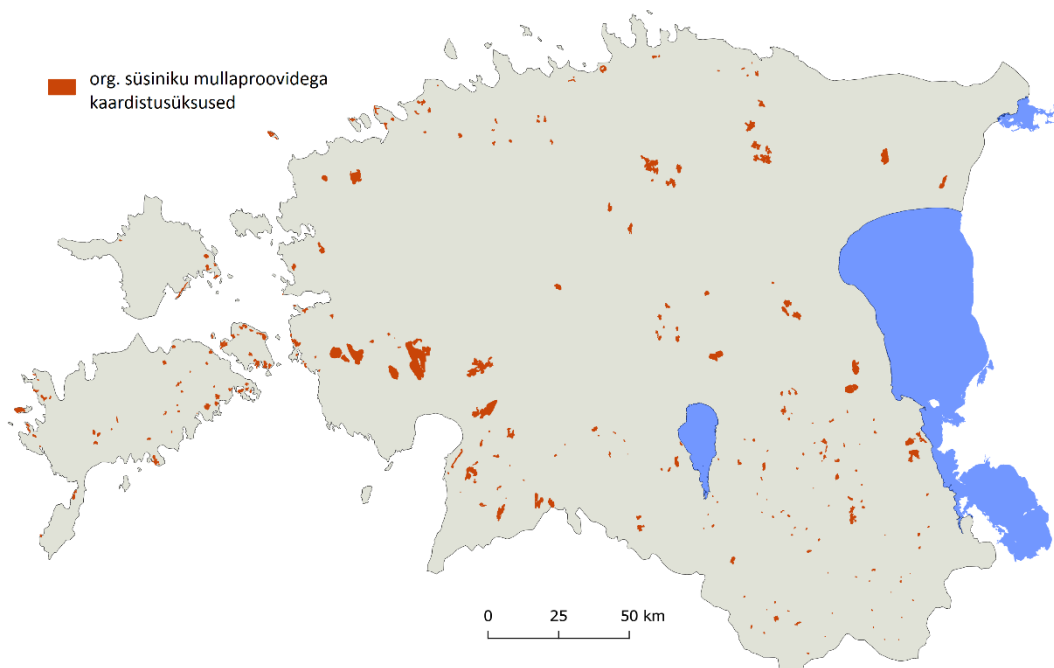
Iga mulla kaardistusüksuse kohta leiti haritava maa, metsa, loodusliku rohumaa, hoonestatud alade, veekogu ja muude alade pindalad (m^2) ja pindalalised osakaalud (%) kogu kaardistusüksusest. Maakasutuse andmekihina kasutati Maa-ameti Eesti topograafia andmekogu (ETAK) (Maa-amet, 2019b). Täiendavalt lisati andmebaasile maaparandusalaga kattuva ala pindala ja osakaal, mis leiti Põllumajandusameti Maaparandussüsteemide registri (MSR) andmestiku põhjal (Põllumajandusamet, 2020).

4.4 MULLA ORGAANILISE SÜSINIKU SISALDUSE [SOC1-4] MODELLEERIMINE

Mulla orgaanilise süsiniku sisaldus on oluline mulla viljakuse ja kvaliteedi indikaator ja see on ülimalt tähtis mulla talitlemise seisukohalt. Orgaaniline aine pole otseselt taimedele toiduks, kuid optimaalsel hulgal ja kvaliteedis tagab see soodsad kasvutingimused ja alles orgaanika mineraliseerumisel vabanevad mulda taimetele omastatavad toitained (Astover ja Leedu, 2013). Seetõttu on oluline teada ja jälgida orgaanilise süsiniku varu mullas. Mulla orgaanilise süsiniku sisaldus muutub ajas ja sõltub olulisel määral maakasutusest. Haritavatel maadel enamasti orgaanilise süsiniku sisaldus väheneb, kuna paranenud mulla õhustatuse ja kuivendusega reguleeritud niiskuserežiimi ning lisatavate

lämmastikväetiste tõttu orgaanilise aine lagunemine suureneb. Rohumaadel ja metsades on orgaanilise aine sisaldus haritavatest maadest enamasti kõrgem (FAO, 2001).

Mulla orgaanilise süsiniku sisalduse (SOC) modelleerimiseks kasutati masinõppe algoritmi otsustusmets (*random forest*). Otsustusmetsa eelistati sügavõppe algoritmidele, sest otsustusmets saab hästi hakkama andmetes leiduva müraga (Breiman, 2001) ja otsustusmetsa tulemusi on võimalik interpreteerida ning leida olulisimad mudelisse panustavad sõltumatud tunnused (Elith jt. 2008). Mudeli õpetamisandmetena (märgendatud andmetena) kasutati mullaproovide andmeid metsadest ($n = 100$) (Noreika jt. 2019), rohumaadelt ja alvaritelt ($n = 466$), märgaladelt ($n = 175$) ja haritavatelt maadelt ($n = 8964$) (Suuster jt. 2011b), mis kõik kokku asusid 3373 erinevas asukohas. Mitmed mullaproovid (eelkõige haritavate maade) olid samast mulla kaardistusüksusest. Sellisel juhul leiti mullaproovide orgaanilise süsiniku sisalduse keskmine väärtus kaardistusüksuse kohta. Selle tulemusel jäi lõplikuks sõltumatuks õpetamisandmestiku mullaproovide arvuks 397, mille paiknemine Eestis on näha joonisel 3.



Joonis 3. Mulla kaardistusüksused, mille kohta olid olemas mulla orgaanilise süsiniku andmed mullaproovide alusel. Andmeid kasutati masinõppe õpetamisandmestikuna.

Tulemused ja nende valideerimine

Kogu märgendatud andmestik ($n=397$) jagati kaheks: treeninghulk (60%) ja valideerimishulk (40%). Sõltumatute muutujatena kasutati eelnevalt mullastikukaardi korrastatud ja lisatud parameetreid. Testiti erinevaid sisendparameetrite kombinatsioone ning lõplikuks valikuks jäid: liiva [SAND1], tolmu [SILT1] ja savi [CLAY1] osakaal (%), koreselisus [ROCK1], maaparandusala kattuva ala osakaal (%) ning nõlvakalde [SLP_], topograafilise potentsiaalse niiskuse indeksi [TWI_], nõlvapikkuse ja -kalde teguri [LS_] ja pinnakareduse indeksi [TRI_] keskmine, mediaan ja standardhälve. Otsustusmetsa mudeli jaoks kasutati *RandomForest Regressor* funktsiooni *Scikit-learn* Pythoni moodulist (Pedregosa jt. 2011). Mudelit valideeriti valideerimishulga peal ning kogu mudeli headuse hindamiseks kasutati Pearsoni korrelatsioonikordajat (r), determinatsioonikordajat (R^2), ruutkeskmist viga (RMSE), normaliseeritud absoluuthälbe mediaani (nMAD). Viimased kaks näitajat arvutati ka iga maakasutuse klassi kohta eraldi.

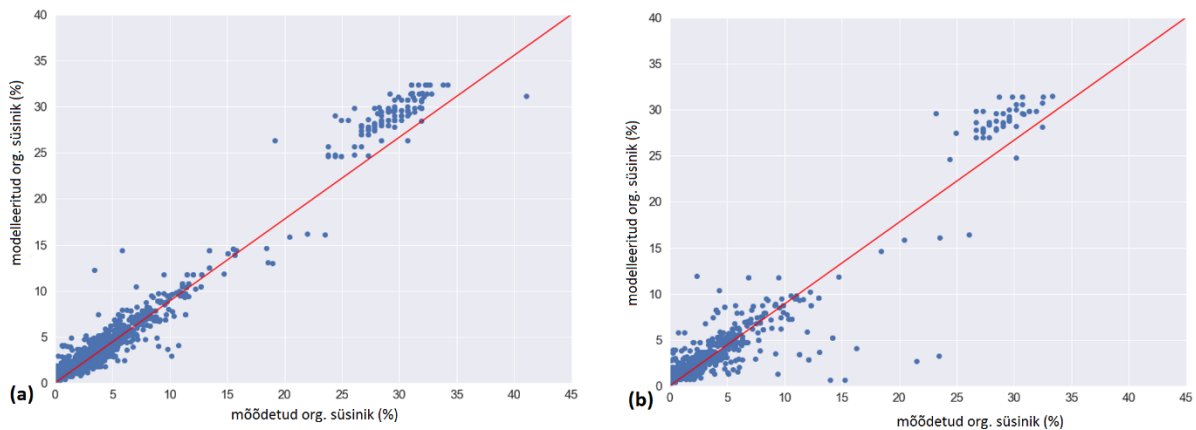
Kogu mudeli headuse hinnang:

- determinatsioonikordaja (R^2): 0,69;
- Pearsoni korrelatsioonikordaja (r): 0,83;
- ruutkeskmine viga (RMSE): 2,95%
- normaliseeritud absoluuthälbe mediaan (nMAD): 1,44%

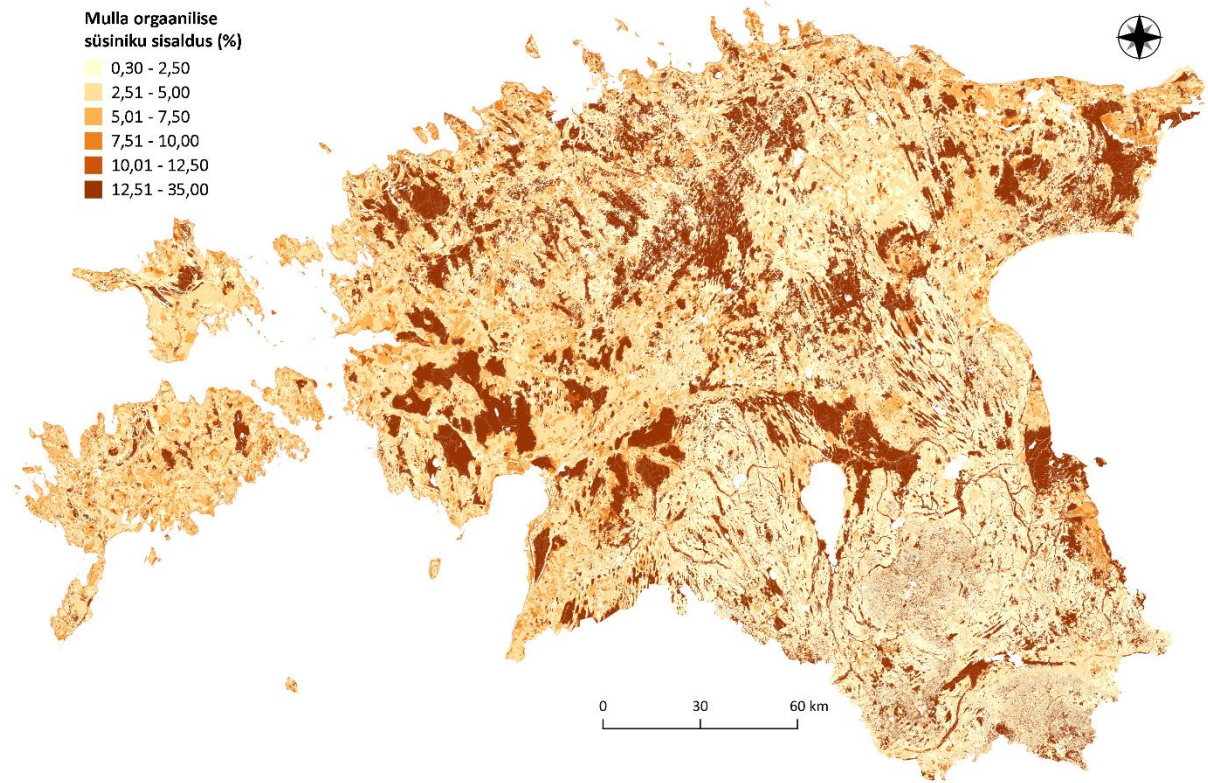
Kuus kõige olulisemat tunnust ja nende olulisus mudelis olid:

- savi sisaldus (CLAY1): 0,65;
- pinnakareduse indeksi standardhälve (tri_stdev): 0,04;
- liiva sisaldus (SAND1): 0,03;
- kaardistusüksuse mediaan nõlvakalle (slp_median): 0,028;
- maaparandusalaga kattuva ala osakaal kaardistusüksuses (drain_pct): 0,027;
- koreselisus (ROCK1): 0,024

Joonisel 4 on näha mudeli valideerimistulemus: modelleeritud vs mõõdetud orgaanilise süsiniku väärtused. Selle põhjal võib öelda, et mudeli prognoosivõimekus oli oodatult väga hea treeningandmete puhul. Valideerimisandmete puhul oli hajuvus suurem, aga üldine tulemus oli siiski hea. Jooniselt tulevad selgelt esile suure orgaanilise süsiniku sisaldusega turvasmullad, mis moodustavad hajuvusdiagrammil eraldi grupi. Joonisel 5 on modelleeritud orgaanilise süsiniku sisalduse ruumiline jaotus Eestis, kust on oodatult näha, et madalad orgaanilise süsiniku väärtused on peamistel põllumajanduslikel aladel ja väga kõrged väärtused märgaladel.



Joonis 4. Masinõppe mudeli valideerimistulemused: modelleeritud vs mõõdetud orgaanilise süsiniku väärtused treeningandmete (a) ja valideerimisandmete (b) puhul.



Joonis 5. Modelleeritud orgaanilise süsiniku sisaldus (%) ülemises mullahorisondis kogu Eestis.

Kuna mõõdetud mulla orgaanilise süsiniku väärtuseid olid mõõdetud erinevatel maakasutuse klassidel ning igal klassil oli suhteliselt vähe mõõtmisi, siis valideeriti ka iga maakasutuse tulemusi eraldi ning mudeli täpsus oli parim haritud maal ($RMSE=2,35$), kus oli ka suurim arv mõõtmispunkte ning kõige kehvem metsades ($RMSE=4,92$). Metsade mõõtmisandmed olid valdavalt Lõuna-Eestist, mistõttu mõõtmisandmed ei katnud kogu Eesti ruumilist varieeruvust ära ja seetõttu ka mudeli täpsus metsade osas ei olnud nii hea.

Kokkuvõttes võib öelda, et mudeli ennustustäpsus oli hea. Mudeli tulemust on kindlasti võimalik parendada täiendavate õpetamisandmete lisamisel eelistatult ühtlasemalt üle Eesti ning erinevatelt mulla ja maakasutuse tüüpidelt. Limiteerivaks teguriks modelleerimisel oli piiratud mõõtmisandmete hulk ja ruumiline kaetus. Kuigi mõõtmisandmed olid olemas nelja peamise maakasutuse tüübi jaoks, siis ei hõlma mõõtmisandmed kindlasti kogu mulla orgaanilise süsiniku varieeruvust ruumis. Lõppkasutaja seisu kohalt on oluline tähele panna, et mulla ülemine kiht ei ole siinkohal vaikimisi 30 cm nagu paljudes rahvusvahelistes käsitlustes, vaid tegeliku ülemise mulla kihi paksusega, mis on tuletatud mullastiku andmebaasist. Samuti ei ole orgaanilise süsiniku sisaldus modelleeritud vertikaalselt ega ka horisontaalselt pideva nähtusena, vaid diskreetsete mulla kaardistusüksustena.

Kõlli jt. (2009) on varasemalt hinnanud Eesti muldade orgaanilise süsiniku varu arvutades maakasutuse ja mullatüüpide pindalalise ulatuse ning mullatüüpide keskmise orgaanilise süsiniku sisalduse järgi koguhinnangud. Samas ei esitanud nad orgaanilise süsiniku ruumilist jaotust, mida tehti käesolevas töös. Üldiselt on ajalooliselt pigem keskendunud põllumaadel orgaanilise süsiniku mõõtmisele ja hindamisele. Näiteks, Putku (2016) modelleeris oma doktoritöös orgaanilise süsiniku sisaldust Tartumaa põllumaadel. Osaliselt on ka seetõttu keeruline leida mõõtmisandmeid teiste maakasutuse tüüpide kohta, mis aitaks mudelit parandada.

Kuna kogu loodud andmebaas on vaba ja loodud avatud koodiga, siis on kogu töövoog kergesti replikeeritav ning seda on võimalik uute andmete lisandumisel täiendada. Käesolevaga on loodud hea alus võimalikeks orgaanilise süsiniku varude hindamiseks ja selle muutusteks ajas üleriigiliselt.

4.5 MULLA LASUVUSTIHEDUS [BD1-4], VEEGA KÜLLASTUNUD MULLA VEEJUHTIVUS [K1-4] JA MULLA AKTIIVVEEMAHUTAVUS [AWC1-4]

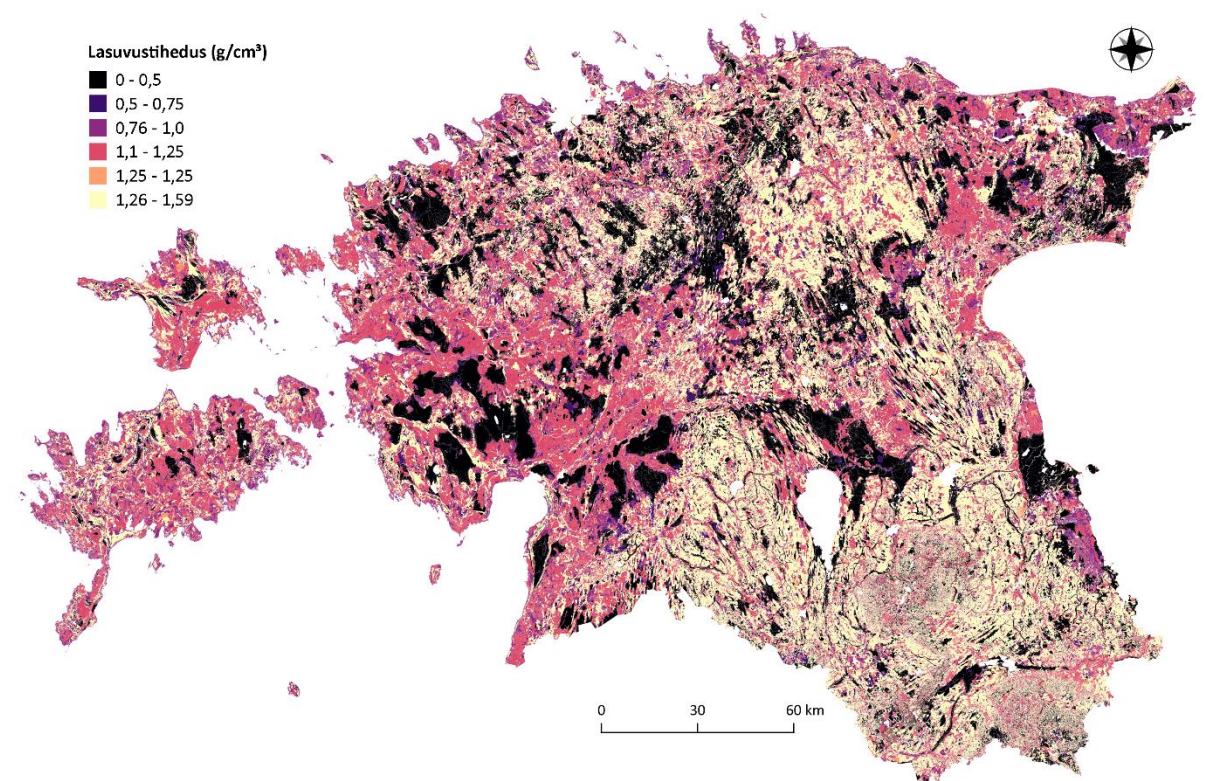
Kuna kõiki mulla füüsikalisi parameetreid on kulukas mullaproovide abil lausaliselt mõõta, siis mõningate kvantitatiivsete mullastiku näitajate osas on mõistlik kasutada mulla seosefunktsioone (*pedotransfer functions*), mille abil on võimalik olemasolevatest tunnustest kaudselt tuletada vajalikke täiendavaid parameetreid. Mulla seosefunktsioone kasutati mulla lasuvustiheduse ning veega küllastunud mulla veejuhtivuse tuletamiseks.

Mulla lasuvustihedus [BD1-4](g/cm³) arvutati modelleeritud orgaanilise süsiniku sisalduse põhjal kasutades seosefunktsiooni (Adams, 1973; Kauer jt. 2019):

$$BD = 1 / (0,03476 \times SOM + 0,6098) \quad (4)$$

kus: SOM (mulla orgaaniline aine) = $SOC \times 1,724$

Mulla orgaanilise aine ja orgaanilise süsiniku sisalduse omavahelise konverteerimise koefitsient varieerub veidi erinevate mullatüüpide puhul, kuid antud töös kasutati lihtsuse mõttes laialtkasutatavat universaalset väärtust 1,724. Lasuvustiheduse arvutatud väärtusi valideeriti samade mullaproovide andmete põhjal, mida kasutati mulla orgaanilise süsiniku sisalduse valideerimiseks. Lasuvustiheduse ruutkeskmine viga (RMSE) oli 0,33 g/cm³ ja normaliseeritud absoluuthälbe mediaan (nMAD) 0,15 g/cm³, mis on suhteliselt kõrge, aga siiski rahuldav tulemus. Lasuvustiheduse väärtused kogu Eesti ulatuses on näha joonisel 6.

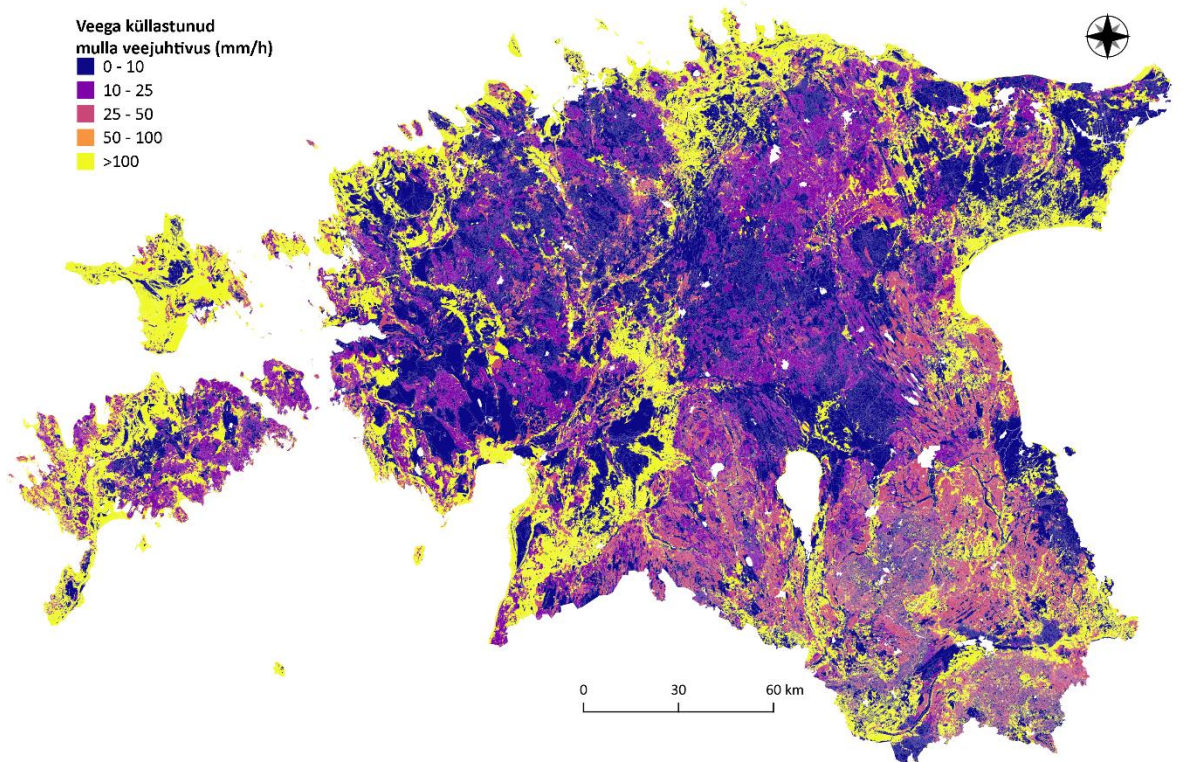


Joonis 6. Mulla ülemise kihi lasuvustihedus arvutatuna mulla seosefunktsiooni (PTF) abil mulla orgaanilisest süsiniku sisaldusest.

Veega küllastunud mulla veejuhtivus [K1-4](mm/h) arvatati liiva, tolmu ja savi osakaalude põhjal kasutades Rosetta 3 mudelit, kus võetakse arvesse kvantitatiivsel lõimise infol põhinevaid seosefunktsioone masinõppe sügavates närvivõrkudes (*artificial neural network*) (Zhang ja Schaap, 2017). Rosetta 3 abil arvatati igale mulla kaardistusüksusele ja mullakihiile veega küllastunud mulla veejuhtivus. Tabelis 7 on näha modelleeritud veega küllastunud mulla veejuhtivuse väärtused erinevatele lõimise klassidele ja joonisel 7 on veega küllastunud mulla veejuhtivus kogu Eestis.

Tabel 7. Modelleeritud veega küllastunud mulla veejuhtivuse (K) (mm/h) ja selle standardhälve arvatatuna Rosetta3 mudeliga.

USDA lõimise klass (Eesti lõimise klass)	Liiva %	Tolmu %	Savi %	K	K SD
GRAVELS (kruus)	100	0	0	645,68	1,29
S (sõre liiv I ₁)	95	5	0	362,25	1,19
S (liiv I)	90	5	5	133,21	1,13
S (sidus liiv I ₂₋₅)	90	3	7	113,71	1,17
LS (saviliiv sI ₁₋₃)	82	9	9	37,54	1,15
LS (Estonian tsI ₁ class)	80	14	6	40,2	1,18
SL (kerge liivsavi I _{s1})	65	20	15	11,02	1,18
L (liivsavi I _{s2})	55	30	15	9,04	1,21
CL (raske liivsavi I _{s3})	50	15	35	3,67	1,3
L (keskmise liivsavi I _{s2})	40	45	15	8,16	1,37
SiL (tolmjas liivsavi)	35	50	15	8,89	1,35
SiCL (tolmjas raske liivsavi)	30	40	30	3,97	1,34
PEAT (turvas t ₁)	25	25	50	5,09	1,53
HUMUS (huumus)	25	25	50	5,09	1,53
HC (raske savi s ₁₋₂)	25	30	45	4,29	1,43
C (savi s)	25	30	45	4,29	1,43
PEAT (turvas t ₂)	20	20	60	7,24	1,81
PEAT (turvas t ₃)	15	15	70	9,2	2,45



Joonis 7. Veega küllastunud mulla veejuhtivus (mm/h) arvatuna Rosetta 3 mudeliga

Mulla aktiivveemahutavus [AWC] (mm H₂O/mm) on leitav mulla väliveemahutavuse ja närbumisniiskuse vahena ning moodustab taimedele omastatava vee hulga mullas. Aktiivveemahutavuse arvutamiseks kasutati 250-meetrise ruumilise resolutsiooniga EU-SoilHydroGrids andmebaasist (Tóth jt. 2017) väliveemahutavuse (FC) ja närbumisniiskuse (WP) väärtuseid kihtide 0, 5, 15, 30, 60, 100 ja 200 cm kohta. Kõikide nende kihtide kohta arutati aktiivveemahutavus järgmiselt: $AWC = FC - WP$ (Dipak ja Abijit, 2005) ning lõpuks leiti nende 7 kihi põhjal keskmised väärtused vastavalt Eesti mullastiku kihtide sügavustele. EU-SoilHydroGrids andmebaasi kasutamise puuduseks oli asjaolu, et see on loodud kogu Euroopa kohta ning Eesti kontekstis esineb liigseid üldistusi ja ebatäpsusi. Eelkõige on aktiivveemahutavuse väärtused veidi tegelikust madalamad, sest ei arvestata märgalade eripära ega kuivendust.

4.6 ANDMEBAAS JA SELLE LISAD NING KOOD

Andmebaasi juurde kuuluvad lisafailid on toodud tabelis 8. Andmebaas on allalaetav *Shapefile* (ESRI) ja *GeoPackage* (QGIS) formaadis: <https://landscape-geoinformatics.ut.ee/puhverribad?lang=et>

Tabel 8. EstSoil-EH andmebaasi lisafailide nimetused ja kirjeldused.

Faili nimi	Kirjeldus
EstSoil-EH_atribuudid.xlsx	kogu EstSoil_EH andmebaasi atribuutide info
soil_types_error_rules_lookup.xlsx	Mulla nimetuste otsingutabel
texture_error_lookup.xlsx	mittesüsteematiliste või vigaste lõimise valemite standardiseerimise otsingutabel
texture_rules_lookup.xlsx	lõimise klasside ülemineku reeglid USDA süsteemi
soil_types_legend.csv	Mulla nimetused Eesti ja inglise keeles ning WRB klassifikatsioon
est_splitoff.csv	Eesti mullastikukaardi andmebaasi atribuudid, mida EstSoil_EH andmebaasis ei säilitatud. Atribuudid saab EstSoil-EH andmebaasiga taasühendada kasutades unikaalsed ID-d idx

5 PUHVERRIBADE SOOVITUSLIKU LAIUSE JA REOSTUSTUNDLIKKUSE MÄÄRAMINE

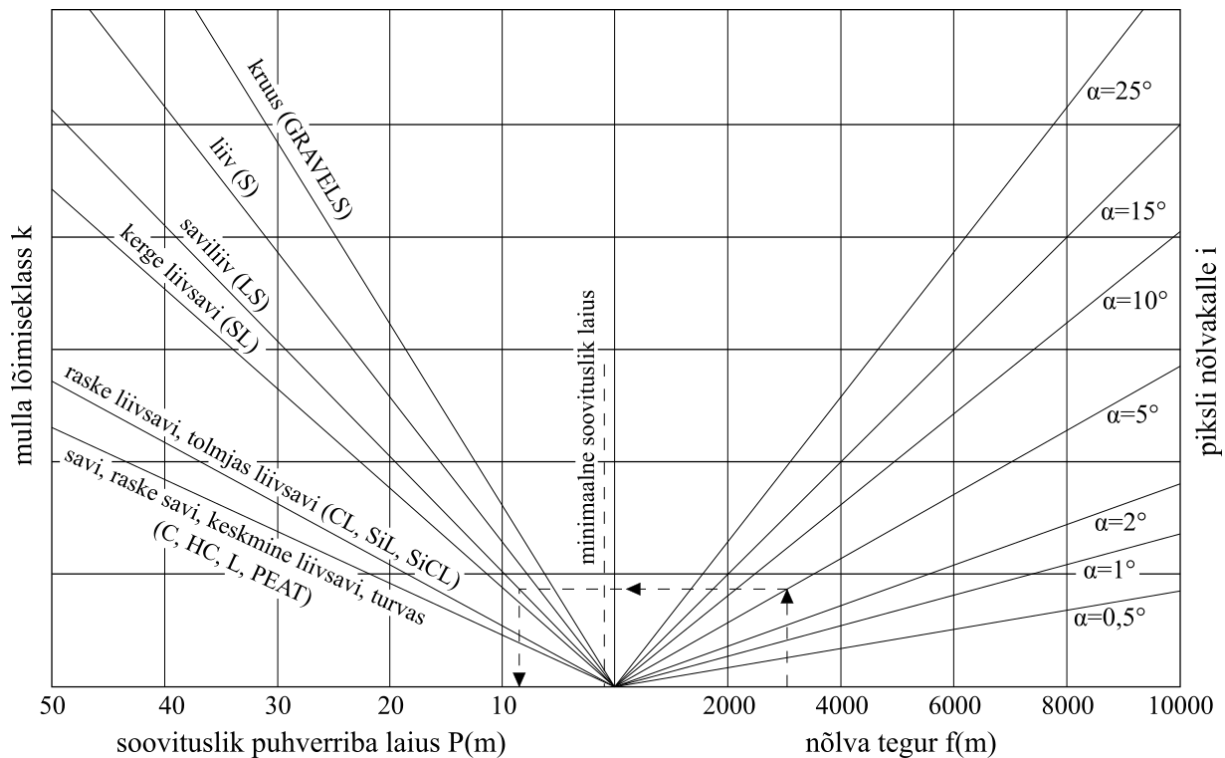
5.1 PUHVERRIBADE SOOVITUSLIKU LAIUSE MÄÄRAMISE METOODIKA

5.1.1 Nomogrammi alusel mudeli loomine

Teadusuuringud näitavad, et peamiseks teguriteks puhverriba laiuse määratlemisel on maastikulised tegurid: nõlvakalle ja mulla tüüp (peamiselt lõimis) (Mander jt. 2005; Yuan jt. 2009). Puhverriba laius sõltub ka taimkattest ning selle naabruses kasutatavatest maaharimise võtetest (Kasak ja Piirimäe, 2019; Mayer jt. 2005). Samas viimased ajas muutuvad ning antud töö seisukohalt võeti seetõttu arvesse ainult maastiku parameetreid: muld ja nõlvakalle. Veekaitsevööndite reostustundlikkuse ja soovitusliku puhverribade laiuse määramise aluseks võeti varasemalt Eestis läbi viidud uuringu (Mander jt. 1997; Mander ja Kuusemets, 1998) puhverribade efektiivsuse mõõtmise tulemused ning väljatöötatud meetodika, mille aluseks on mulla lõimisel, nõlvakaldel ning nõlva teguril põhinev nomogramm (Joonis 8) ja selle funktsioon (Mander ja Kuusemets, 1998; Mander ja Tournebize, 2015):

$$P = 0,00069q \times f \times \sqrt{i} / (m \times K_i \times n) \quad (5)$$

Kus P on soovituslik puhverriba laius (m), q on keskmine pindmine veevool Eestis lumesulamise perioodil (mm päevas, Eestis $f = 8,4$), f on nõlva tegur (elementaarvalgla pindala/valgla veekoguga piirneva serva pikkus), i nõlvakalle ($i = \tan \alpha$), m on pinnakareduse koefitsient, K_i vee infiltratsiooni kiirus sõltuvalt mullalõimisest (tuletatakse nomogrammi põhjal k väärtusest) ning n on mulla imamisvõime.



Joonis 8. Soovitusliku puhverriba laius määratlemise nomogramm. Kohandatud Mander ja Kuusemets (1998) tööst.

Eelnevalt kirjeldatud funktsioon on rakendatud nomogrammis erinevatel nurkadel põhinevate seostega. Need seosed kodeeriti Pythoni NumPy trigonomeetriliste funktsioonidena. Nomogrammi sisendinda kasutati järgmisi parameetreid (joonis 9):

1) **Nõlva teguri** puhul oli oluline arvesse võtta nõgusaid orvandeid, kus vesi koondub ja liigub veekogude poole (joonis 10). Sellistes kohtades on reostusohhtlikkus suurim ning puhverribade vajadus samuti.

Seetõttu kombineeriti nõlva tegur f kolmest sisendist: LS faktorist, voolutee pikkusest ja vooluakumulatsioonist.

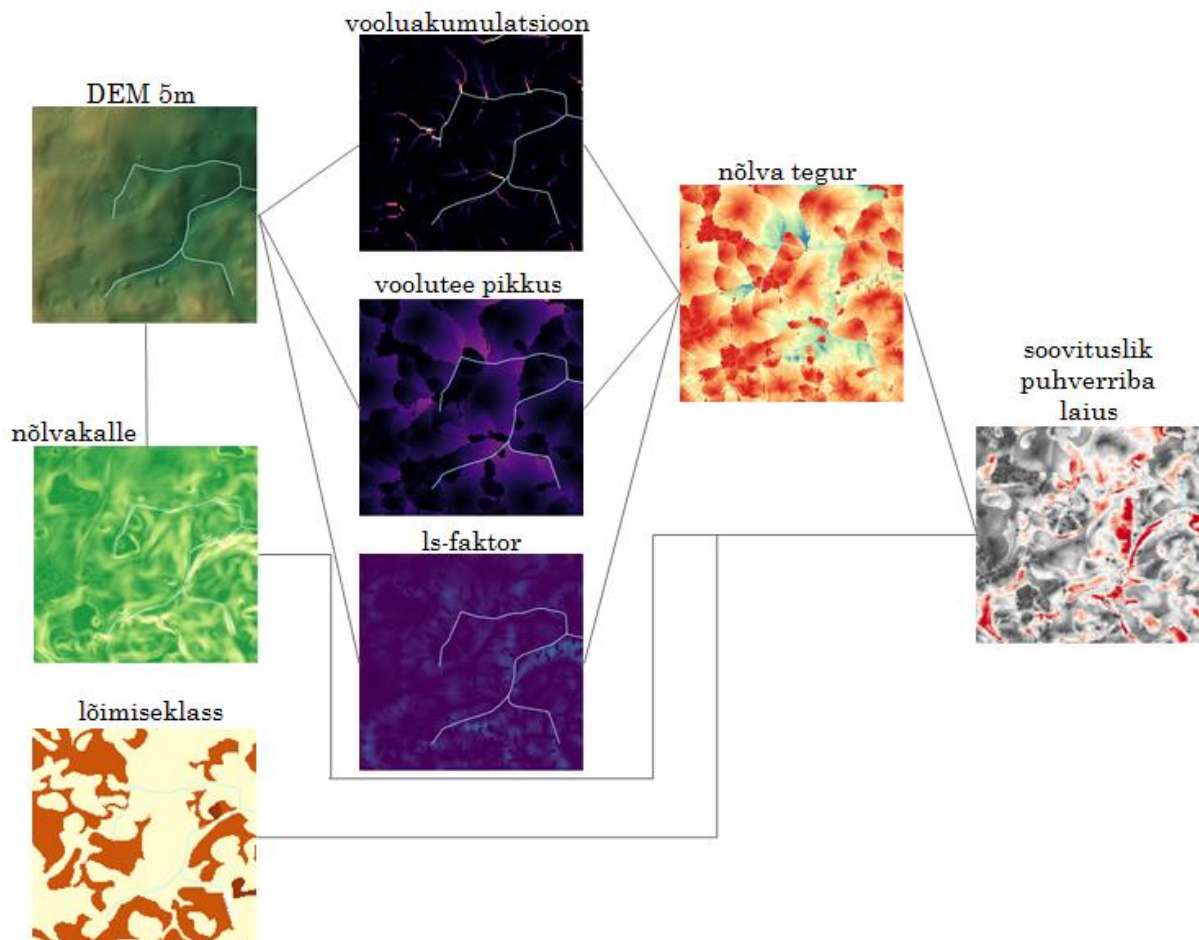
LS faktori arvutamiseks kasutati (Wischmeier ja Smith, 1978) valemit

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22,13} \right)^m (65,41 \sin^2 \theta + 4,56 \sin \theta + 0,065)$$

Kus λ on nõlva pikkus (m), θ nõlvakalle (kraadides) ja m on nõlva pikkuse astendaja (nõlvakalle radiaanides $< 0,01$, siis m on 0,2; nõlvakalle 0,01 – 0,035, siis m on 0,3; nõlvakalle on 0,035 – 0,05, siis m on 0,4; kui nõlvakalle $> 0,05$, siis m on 0,5).

Vooluakumulatsiooni ja nõlvapikkuse arvutamiseks testiti vabavaralisi tööriistu: SAGA-GIS tarkvara nõlva pikkuse ja vooluakumulatsiooni tööriistu (Conrad jt. 2015) ning GRASS tarkvara vooluakumulatsiooni (*flow accumulation*) ja vooluteepikkust (*flow length*) (Team, 2017). Kõik neli arvutati nii 1- kui ka 5-meetrise rastri jaoks Valgjärve testalal (joonis 11). Iga tööriista tulemit analüüsiti võrreldes Manderi ja Kuusemetsa (1998) poolt algselt välja töötatud nõlva teguriga ning lisaks viidi läbi Valgjärve testalal välitööd, kus tuvastati erineva voolutee pikkuse ja vooluakumulatsiooniga nõlvad looduses ning kontrolliti, kas reljeefipõhiselt tuvastatud vooluteed on õiged. Lisaks kontrolliti samal

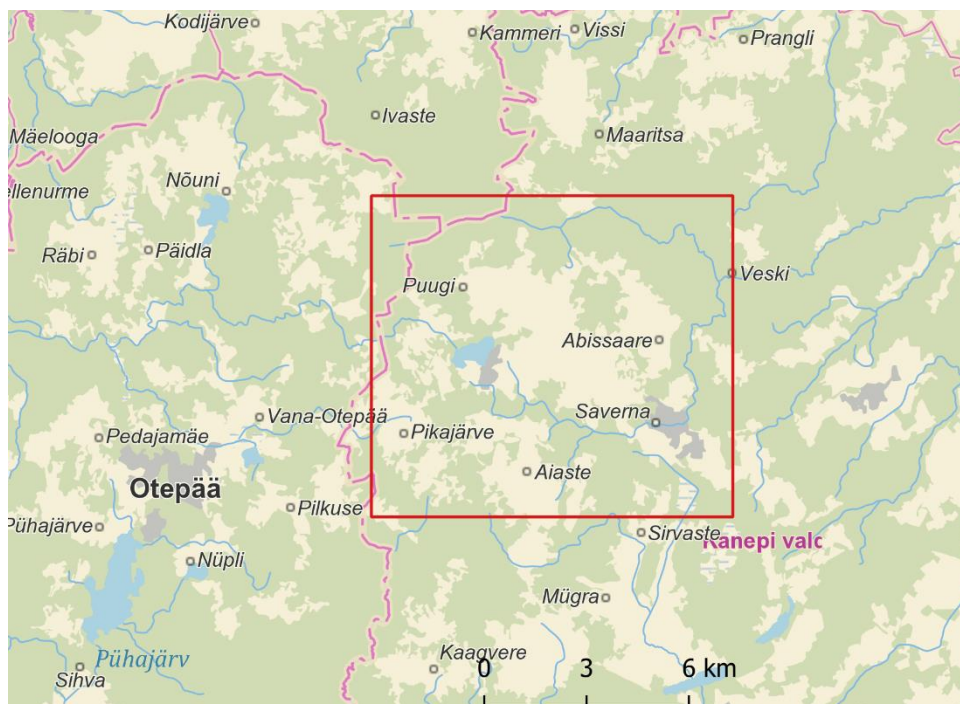
testalal käsitsi üle kõik veekogude äärsed nõlvakalded tuvastamiseks, kas kuskil esineb alasid, kus nõlvakalle on veekogust eemale. Selliseid kohti tuvastati piirkonnas ainult kaks ja need olid inimtekkelised. Lõpuks valiti eelneva põhjal sisendiks GRASS-i voolutee pikkus ja vooluakumulatsioon (*r.flow*) (Mitasova jt. 1995; Mitášová ja Hofierka, 1993), mis ühtis kõige paremini Manderi ja Kuusemetsa (1998) poolt maastikul välja töötatud parameetriga. Selleks, et kolme erinevas mõõdustikus sisendit omavahel kombineerida, normaliseeriti kõik kolm sisendit (LS faktor, voolutee pikkus ja vooluakumulatsioon) vahemikku 0 kuni 100 ning peale normaliseerimist omistati igale sisendile kaal 1/3 ning skaleeriti tagasi nomogrammi algmesse väärtusvahemikku (0 – 10 000).



Joonis 9. Nomogrammi sisendparameetrid.



Joonis 10. Vooluveekogusse suunduv nõgus orvand, kus pinnavee vool koondub.



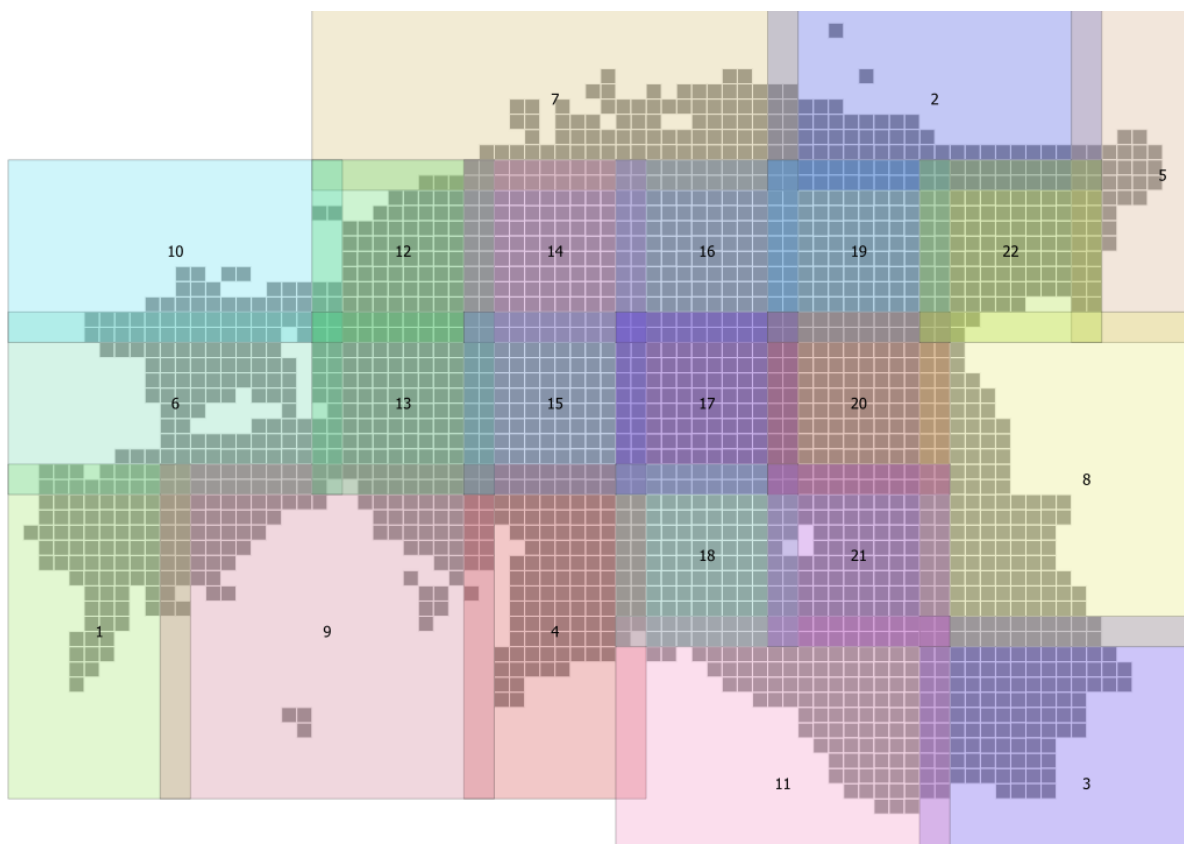
Joonis 11. Valgjärve testala, kus kõiki nomogrammi parameetreid testiti ning sisendandmeid valideeriti välitööde käigus.

2) **Nõlvakalle** kraadides arvutati LiDARI põhiseist maapinna kõrgusmudelist (horisontaalse eraldusvõimega 5 m) (Maa-amet) pikslipõhiselt.

3) **Mulla lõimiseklassi** info võeti korrastatud EstSoil-EH USDA lõimiseklassist ning iga lõimiseklassile omistati vastav tõusufunktsioon nomogrammist (joonis 8). Lõimiseklasside info rasteriseeriti 5m resolutsiooniga rastriks.

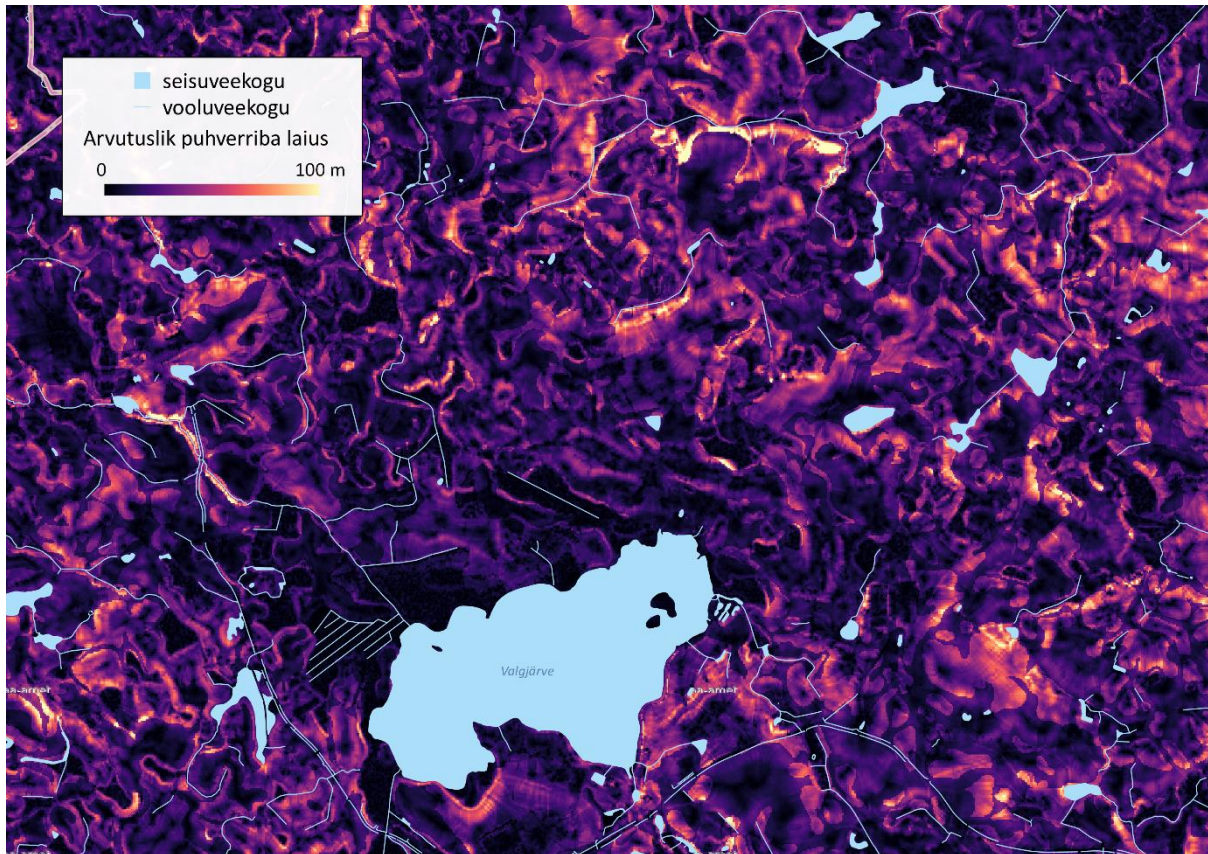
Kogu arvutusprotsessi jaoks jaotati Eesti 22ks tsooniks (joonis 12), kuna kogu Eesti ühekorraga arvutamine oleks olnud liiga ressursinõudlik. Kõikidel tsoonidel oli üksteisega 1 kaardilehe ulatuses

kahepoolne ülekate, et tagada korrektne lokaalse vooluakumulatsiooni ning reljefiindeksite arvutus. Peale arvutust eemaldati ülekatted ning liideti kogu Eesti uuesti kokku. Tsoonide ülekatte piirkondi kontrolliti peale töötlust ning selle käigus ei tuvastatud mingeid artefakte, mis näitas, et antud meetod oli efektiivne.



Joonis 12. Andmetötluse tsoonid, mida kasutati töömahu optimeerimiseks ja paralleelseerimiseks.

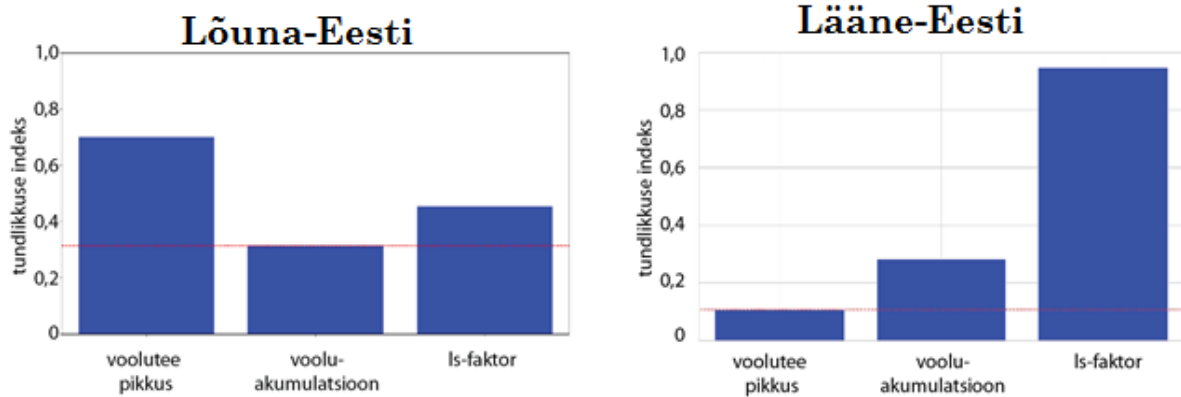
Nomogrammi arvutuste tulemuseks oli üks väljundraster kogu Eesti kohta, mille väärtusteks oli soovituslik puhverriba laius (Joonis 13). Kuna maapinna kõrgusmudel ei ühtinud igal pool mere ääres täpselt kaldajoonega, siis interpoleeriti 100 m ulatuses kaldajoone *nodata* väärtustele lähimatest väärtusega pikslitest soovitusliku puhverriba laiuse väärtused. Veekaitsevööndites puhverriba laiuse lõpliku hinnangu saamiseks viidi läbi mitme-etapiline andmete vektoriseerimine KPO-de põhised (vt. ptk 5.1.3).



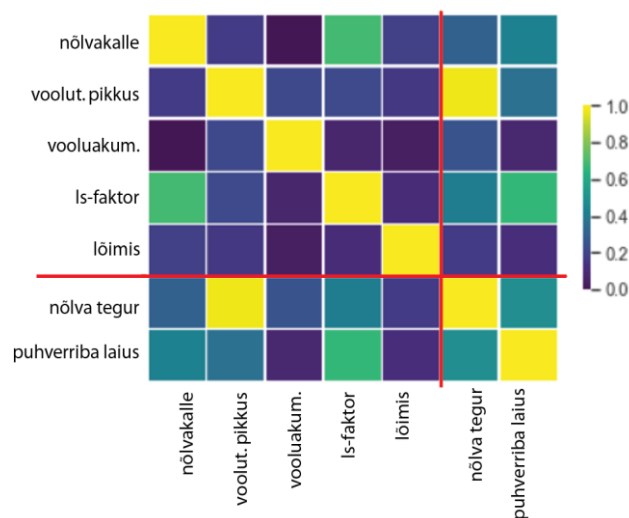
Joonis 13. Väljavõte Valgjärve ümbruse soovitusliku puhverriba laiuse rastrist.

5.1.2 Nomogrammi põhjal välja töötatud mudeli ebamäärasuse ja tundlikkuse hindamine

Nomogrammi põhjal loodud mudeli tundlikkust erinevate sisendparameetrite osas testiti globaalse tundlikkuse analüüsiga (*Fourier Amplitude Sensitivity Test*) (Saltelli jt. 1999). Mudelit jooksutati 500 korda ja iga kord muudeti nõlva teguri kolme sisendi kaalusid. Selle tulemusena leiti, et Lõuna-Eestis oli mudel kõige tundlikum vooluakumulatsioonile. Samas Lääne-Eesti tasastel aladel oli mudel tundlikum ls-faktorile, st mudeli lõpptulemus sõltub rohkem ls-faktorist (joonis 14). Kõikide sisendparameetrite tundlikkust hinnati ka korrelatsioonide abil. Kõiki sisendkaardikihte korreleeriti omavahel ja väljundid soovitusliku puhverriba laiusega. Jooniselt 15 võib näha, et kõige tundlikum (korrelatsioon tugevaim) oli mudel ls-faktorile ja kõige vähem tundlik vooluakumulatsioonile ja mulla lõimisele. See tähendab, et enim määrab puhvri laiuse vajalikkuse ära reljeef ja eelkõige nõlvade pikkus ja kalle.



Joonis 14. Globaalse tundlikkusanalüüsi tulemus: nõlva teguri tundlikkus vooluteepikkusele, vooluakumulatsioonile ja Is-faktorile Lõuna-Eestis (paremal) ja Lääne-Eestis (vasakul). Lõuna-Eestis on mudel tundlikum vooluteepikkusele ja Lääne-Eestis Is-faktorile.



Joonis 15. Mudeli sisendparameetrite ja väljundite korrelatsioonimaatriks.

5.1.3 Soovitusliku puhverriba laiuse vektoriseerimine

Eelmises etapis loodud soovitusliku puhverriba laiuse rasterkiht vektoriseeriti ja leiti puhverriba laiuse veekaitsevööndi kohustusega looduslikele veekogudele ja maaparandussüsteemide eesvooludele. Selle jaoks kasutati kahte andmekihti:

- 1) Maa-ametist saadi KPO looduslike veekogude joonte ja pindade andmekihid (edaspidi LVK kihid). Isiklik kirjavahetus Erik Valdmaaga 16.09.2020.
- 2) Põllumajandusametist maaparandussüsteemide eesvoolud (edaspidi MSR kihid). Isiklik kirjavahetus Asko Pöderiga 21.09.2020.

Kõik LVK ja MSR vooluveekogude **joonte** kihtides olevad jooned tähistavad vooluveekogu telgjoone asukohta looduses ning **ei sisalda andmestikku vooluveekogu laiuse kohta**.

Puhverribade laius arvutati eraldi MSR ja LVK joontele. Nende andmekihtide omavaheline liitmine ei olnud otstarbekas kahel põhjusel: 1) andmetabelite struktuur oli erinev ning liitmisel oleksid atribuudid kas ära kadunud või siis vastupidi, oleks tekkinud liiga suur andmetabel, kus on palju tühje lahtrid; 2) liidetud andmekihi maht oleks andmetöötluse jaoks läinud liiga suureks.

Kõik jooned tükeldata 5-meetristeks lõikudeks selleks, et hilisem puhverilais muutuks vastavalt veekogu kaldavööndi muutustega. Igale joonlõigule genereeriti 50 m laiune vasakpoolne ja parempoolne

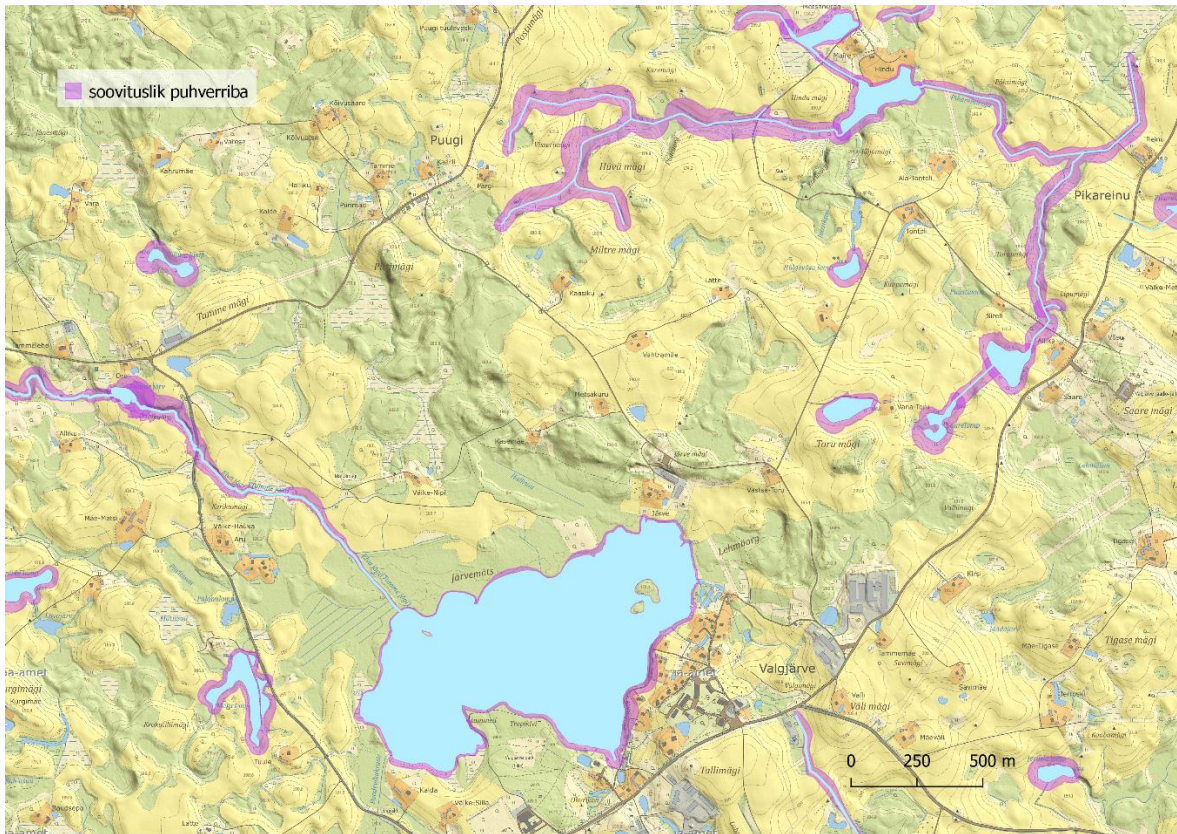


puhver, sest puhverriba laius on kahel pool veekogu erinev. Oluline on mainida, et joone parema ja vasaku poole määrab arvuti vastavalt joone digimise suunale. Seega ei pruugi vooluveekogu voolusuuna järgi määratav parem- ja vasakkallas ühtida digijoone parema ja vasaku poolega. Veelgi enam, kui jõe üks lõik on digitud voolusuunas ja teine lõik vastupidises suunas, on vasakpuhverid nendel joontel erinevatel pooltel. Antud töös lahendati probleem nii, et mõlema poole puhvrid analüüsiti eraldi ja pärast eemaldati veemaskiga veekogu alale jäävad üleliigsed puhvrid, mis võimaldas lõpptulemuseks saada igale kaldale vastavad õiged puhvriäärtused. Igale puhvrile leiti soovitusliku puhverriba laiuse rasterkihilt puhvrise jäävate pikslite mediaanväärtus ning salvestati see kas Lmed (vasakpoolne puhvri mediaanväärtus) või Rmed (parempoolne puhvri mediaanväärtus) atribuudina andmetabelisse. Rmed ja Lmed väärtused näitavad soovituslikku puhverriba laiust. Puhverriba laiused ümardati täisnumbriteni, kuna looduses ei ole täpsem kui 1 m mõistlik. Minimaalseks puhvri laiuseks määrati 1 m ja maksimaalseks 100 m. Kui arvutuslik puhvri laius oli üle 100 m nomogrammi mudeli järgi, siis määrati väärtuseks 100 m. Selliseid juhte oli alla 1% kõigist puhverriba laiuse väärtustest. Vooluveekogudega külgnevatest puhvrite atribuutandmete tabelist kanti soovituslikud puhverriba laiused tagasi LVK ja MSR joonte andmetabelisse.

Järgnevalt loodi joonte kihi põhjal kaks erinevat kihti: üks, milles soovituslik puhvri laius kajastub geometrias ja teine, kus soovituslik puhverriba laius kajastub atribuutides.

Soovituslik puhverriba laius geometrias

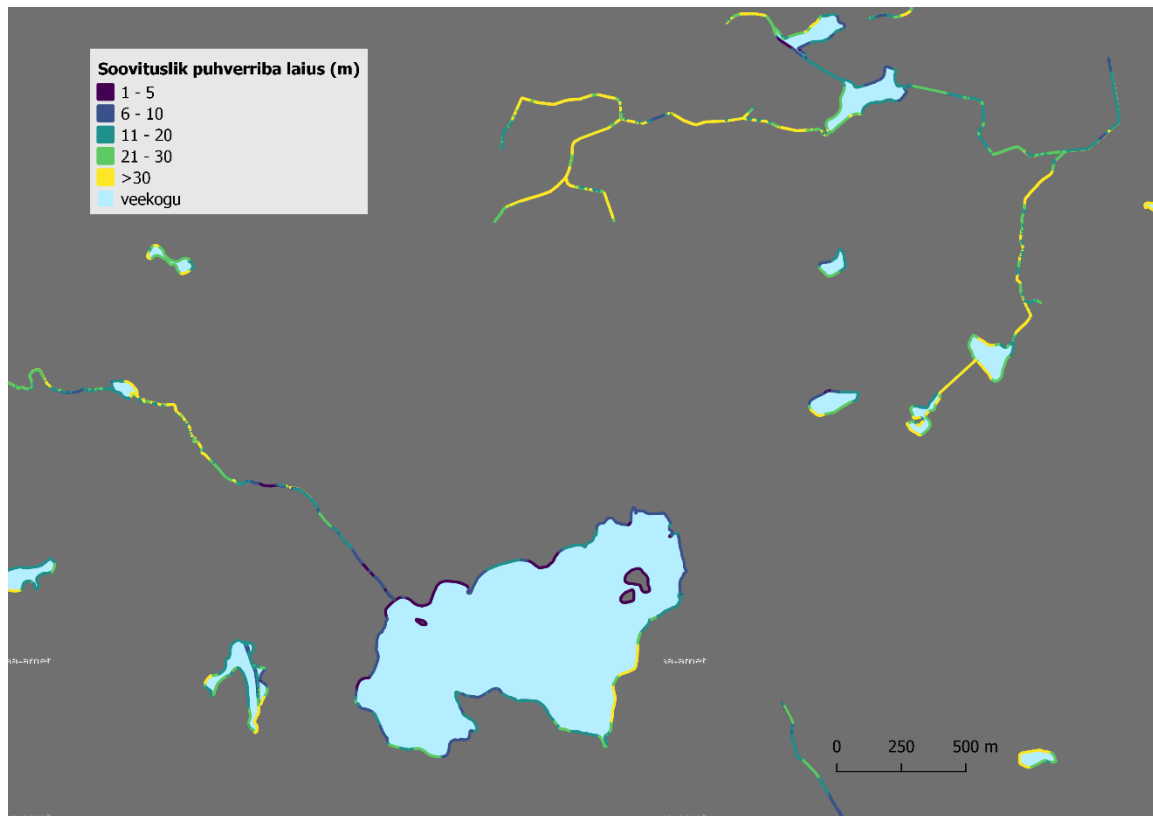
Lähtudes Rmed ja Lmed väärtustest, arvutati igale joonelõigule uued erineva laiusega kaitsepuhverid. Kõikides kaitsepuhvrite kihtides ühendati kõrvuti paiknevad ja LVK andmekihtides ning MS_KOODI MSR andmekihtides ühesugust KKR koodi kandvad (näiteks ühe vooluveekogu või seisuveekogu) puhvrid kokku üheks vööndiks. Tulemusena saadi ühe veekogu soovitusliku puhverriba laiuse kas parem- või vasakpoolne pindobjekt, mille laius varieerub sõltuvalt potentsiaalsest ärakandekoormusest, st. nõlva ja mullateguritest (joonis 16). Tulemiks olid kaardikihid **LVK_sovituslik_puhverriba_geomeetria** ja **MSR_sovituslik_puhverriba_geomeetria**.



Joonis 16. Mulla ja reljefitingimuste põhjal arvatud soovituslik puhverriba laius Valgjärve ümbruses. Soovituslik puhverriba laius avaldub kaardikihtide LVK_sovituslik_puhverriba_geomeetria ja MSR_sovituslik_puhverriba_geomeetria geometrias.

Soovituslik puhverriba laius atribuutides

Igale joonlõigule arvutati vasakule ja paremale poole eraldi 1-meetrised puhvrid. Igale puhvrile määrati vastavalt Lmed või Rmed väärtusele soovitusliku puhverriba laiuse väärtus välja *Puhv_laius*. Sellest andmekihist on võimalik iga veekogu kaldajoone lõigu kohta päringu abil tuvastada soovituslik puhverriba laius ja kuvada puhverriba laius erinevate värvidega (joonis 17).



Joonis 17. Mulla ja reljeefitingimuste põhjal arvatud soovituslik puhverriba laius Valgjärve ümbruses. Soovituslik puhverriba laius avaldub andmekihtide LVK_sovituslik_puhverriba_artibuut ja MSR_sovituslik_puhverriba_artibuut atribuutides.

Kaardikihtide **LVK_sovituslik_puhverriba_geomeetria** ja **MSR_sovituslik_puhverriba_geomeetria** eeliseks on see, et nende lugemine kaardilt on lihtne, sest visuaalselt on selgelt näha puhverribla laius. Puuduseks on asjaolu, et puhverribades esineb mõningaid artefakte, mis on tingitud kihtide loomisest ning mida ei olnud võimalik eemaldada. Lisaks ei olnud võimalik ainult joonobjektidena esitatud vooluveekogude laiust arvesse võtta, sest algandmete atribuutides ei olnud vooluveekogude laiuse infot säilinud. Seetõttu on parem kasutada kaardikihte **LVK_sovituslik_puhverriba_artibuut** ja **MSR_sovituslik_puhverriba_artibuut**, sest nende kihtide puhul on võimalik veekogu laiuse info vajadusel juurde arvestada.

5.2 REOSTUSTUNDLIKKUSE KLASSID

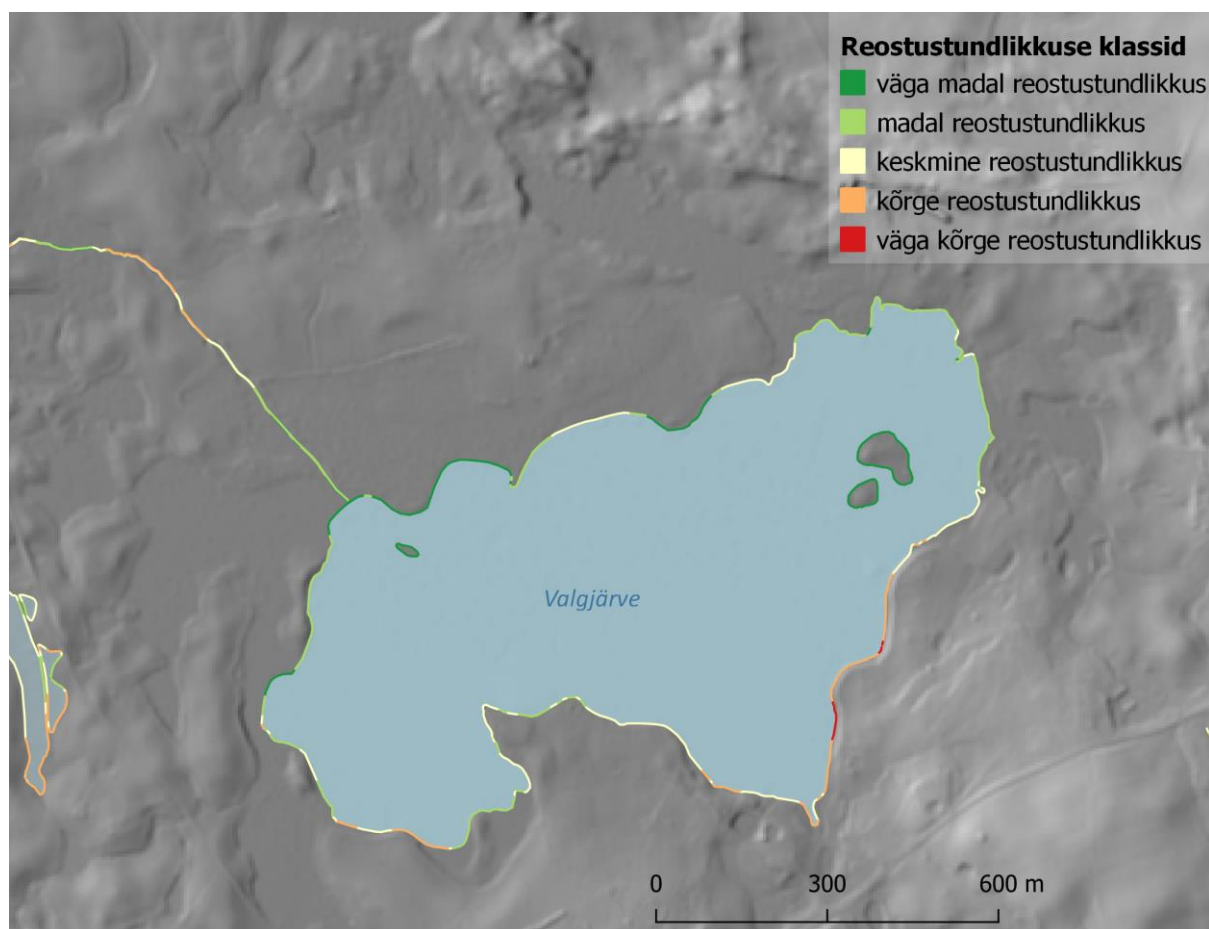
Reostustundlikkuse ehk reostusohtlikkuse all peetakse siin silmas, kui suur on reostuse veekogusse jõudmise potentsiaal lähtuvalt kaldavööndi mulla ja reljeefitingimustest. Nomogrammi arvutuslike tulemuste põhjal loodi reostustundlikkuse klassid (Tabel 9) ning veekaitsevööndite reostustundlikkuse kaardikihid. Lähteandmeteks olid LVK ja MSR joonte 5-meetriste joonlõikude andmekiht, mis loodi eelmises etapis. Igale joonlõigule arvutati paremale ning vasakule poolele eraldi 1-meetrised puhvrid. Igale puhvrile määrati vastavalt Lmed või Rmed väärtusele reostustundlikkuse klass – *RT_klass*.

Seejärel ühendati andmekihtides kõrvuti asetsevad ning ühesuguse *RT_klass* väärtusega puhvrid üheks reostustundlikkuse vööndiks. Järgmiseks liideti parem- ja vasakpoolsete puhvrite kihid kokku üheks andmekihiks, kus joontel on paremal ja vasakul pool eraldi vööndid, millel on atribuutides märgitud selle vööndi reostustundlikkuse klass (Joonis 18). Tulemiks andmekihid **LVK_veekaitsevööndi_reostustundlikkus** ja **MSR_veekaitsevööndi_reostustundlikkus**.

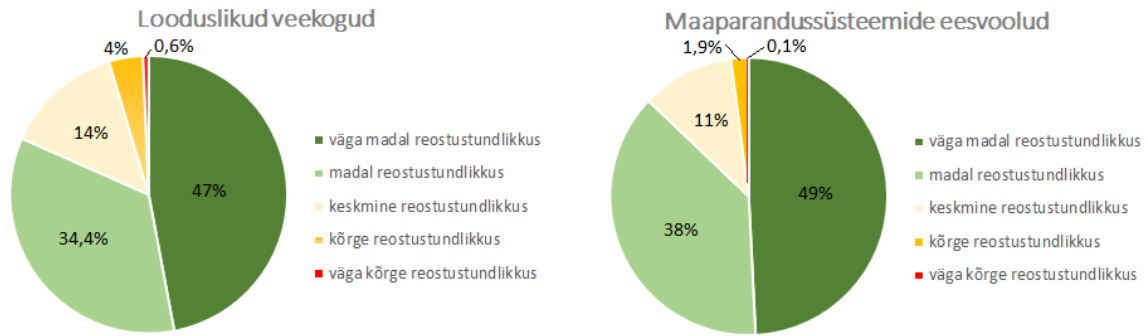
Ligikaudu 75% looduslikest veekogudest ja maaparandussüsteemide avatud eesvoolude veekaitsevöönditest on madala või väga madala reostustundlikkusega (joonis 19 ja joonis 20). Enamasti paiknevad need tasasema reljeefiga aladel. Keskmise reostustundlikkusega veekaitsevööndeid oli ligikaudu 1/10 ning kõrge ja väga kõrge reostustundlikkusega alla 5%. Viimased paiknevad peamiselt Lõuna-Eesti kõrgustikel.

Tabel 9. Reostustundlikkuse klassid ja neile vastavad soovituslikud puhverriba laiused

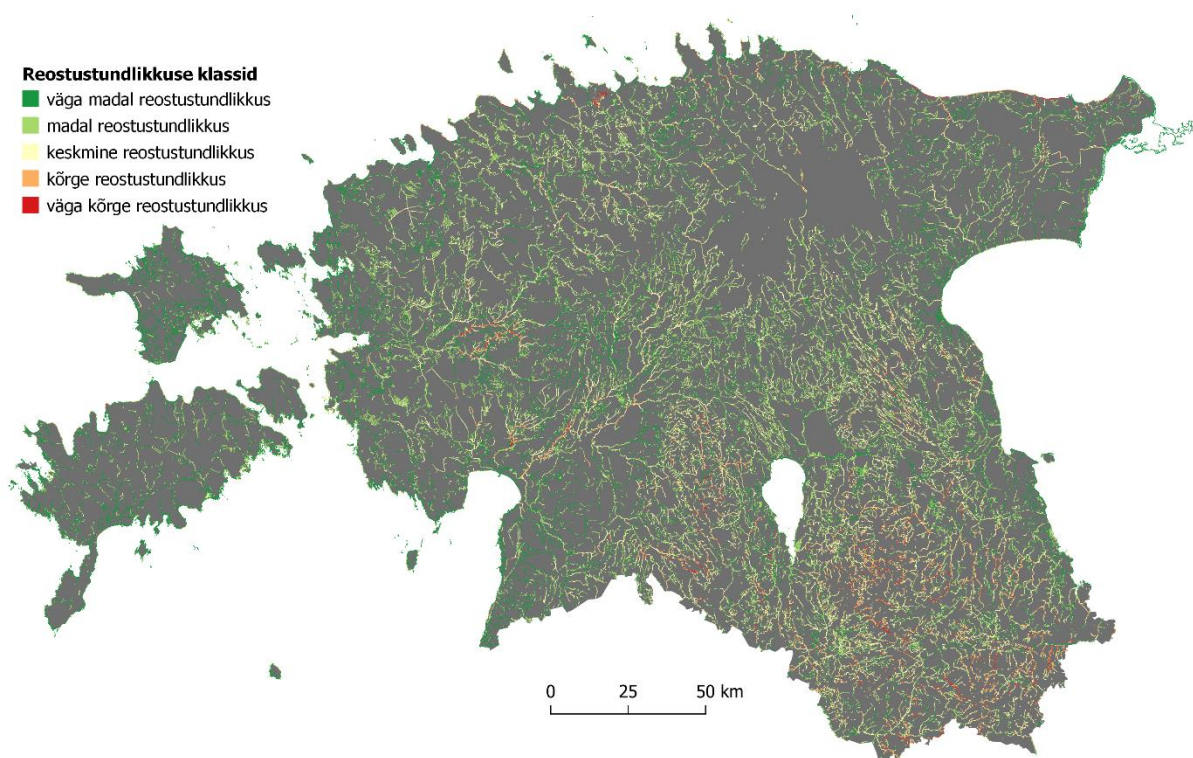
Reostustundlikkuse klassi number	Reostustundlikkus	Soovituslik puhverriba laius (m)
1	Väga madal	1 – 5 m
2	Madal	6 – 10 m
3	Keskmine	11 – 20 m
4	Kõrge	21 – 40 m
5	Väga kõrge	41 – 100 m



Joonis 18. Mulla ja reljeefitingimuste põhjal arvatud looduslike veekogude ja maaparandussüsteemide eesvoolude kaldavööndite reostustundlikkus Valgjärve ümbruses. Reostustundlikkuse klass on andmekihtide LVK_veekaitsevööndi_reostustundlikkus ja MSR_veekaitsevööndi_reostustundlikkus atribuutides.



Joonis 19. Reostustundlikkuse klasside jaotus looduslike veekogudel (vasakul) ja maaparandussüsteemide eesvooludel (paremal).



Joonis 20. Looduslike veekogude ja maaparandussüsteemide avatud eesvoolude veekaitsevööndite reostustundlikkus Eestis. Reostustundlikku ehk reostusohu on potentsiaalne oht, et mulla- ja reljeefi tingimuste tõttu võib reostus (toitained, taimekaitsevahendid vmt) jõuda pindmise äravooluga veekogusse. Reostustundlikkus siin ei näita, kui tundlik puhverriba ise on reostuse suhtes, vaid näitab ainult potentsiaalset ohtu reostuse jõudmiseks veekogusse.

Soovitused puhverribade maakasutuseks sõltuvalt reostustundlikkuse klassist

1. klass – puhverriba laius peaks olema 1–5 m ja piisab rohumäärast, kus rakendatakse veekaitsevööndile sarnaseid meetmeid (keelatud on väetiste ja keemiliste taimekaitsevahendite jms kasutamine). Rohttaimed aitavad vähendada pindmist erosiooni ning eemaldada toitained, ilma et nad varjutaksid põllul kasvavaid põllukultuure. Eestis on soovitatud puhverribas rohurindes kasvatada harilikku orasheina, mis moodustab tiheda maapealse kui ka -aluse biomassi. (Kasak jt. 2016). Vältima peaks liblikõieliste taimede kasvatamist, sest nad omastavad lämmastikku atmosfäärist ja teatud tingimustel võib see lämmastik hoopis mulda tagasi jõuda, omades hoopis vastupidist efekti (Drake, 2011; Hickey ja Doran, 2004).

Peamine hooldusmeetod on niitmine või karjatamine ja niidetud hein tuleks puhverribalt eemaldada, et taimedes akumulbeerunud toitained aineringlusest välja viia.

2. klass – puhverriba laius peaks olema 6–10 m ja piisab rohumaast, aga võib veekogule lähemale planeerida puhmarinde, mis aitaks stabiliseerida järsemaid nõlvasid ning toimiks parema toitainete eemaldajana.

3. klass – puhverriba laius peaks olema 11–20 m ja veekogule lähemale peaks rajama puhmarinde, aga soovitatavalt ka kitsama põõsa või puurinde.

4. klass – puhverriba laius peaks olema 21–40 m ning peaks koosnema vähemalt rohumaaribast (lähemal põllule) ja põõsarindest (veekogule lähemal) ning soovitatavalt ka puurindest. Puu- ja põõsarinne aitab kaldavööndit stabiliseerida ning varjutab veekogu, mis vähendab kõrgemate taimede vohamist veekogus. Samas tuleb põõsa- ja puurinet hooldada (eemaldada vanu oksid ja liigselt veekogusse kasvavaid puid ning põõsaid), et vältida veekogu ning eriti maaparanduse eesvoolude kinnikasvamist.

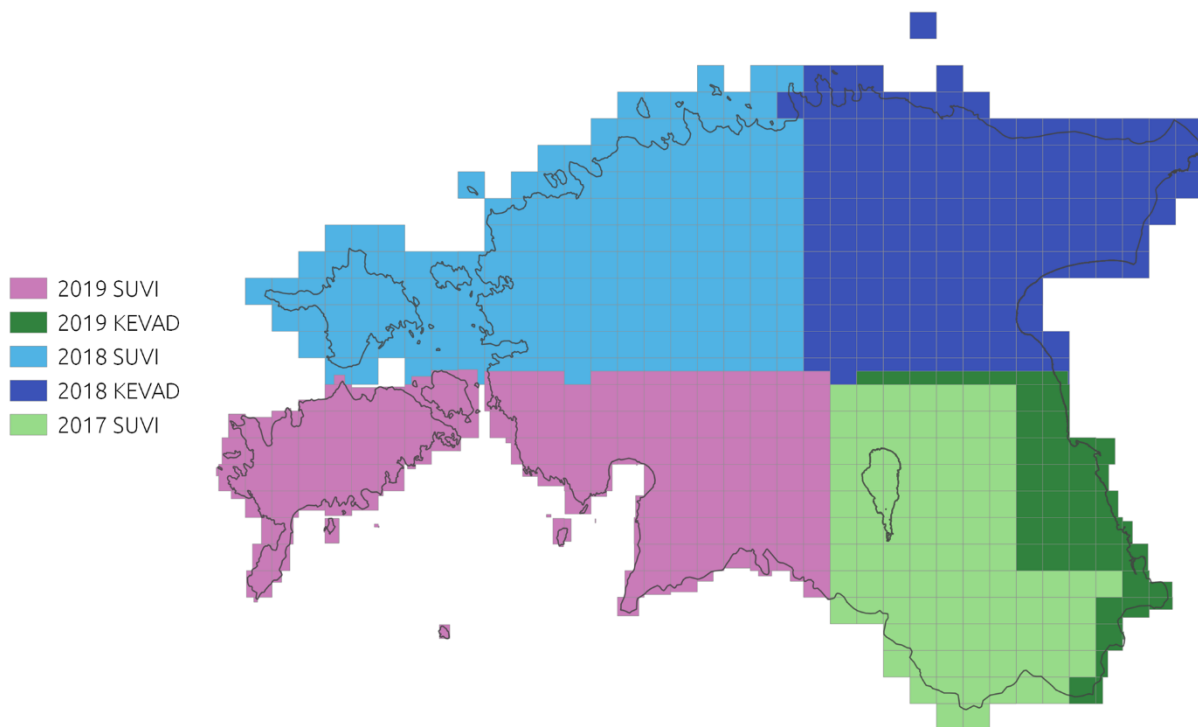
5. klass – puhverriba laius peaks olema 40–50 m ja soovitatavalt kolmerindelise. Veekogule kõige lähemal võiks olla ca 10 m laiune puude vöönd, milleks Eestis sobivad kiirekasvulised hall lepp ja harilik paju. Puudevööndile võiks järgneda ca 5 m laiune põõsavöönd ning ülejäänud oleks rohuvöönd. Selline kombineeritud puhverriba on kõige efektiivsem vältimaks toitainete sattumist veekogusse ja samas luues elupaiku ja suurendades bioloogilist mitmekesisust.

Oluline arvesse võtta kaardikihtide kasutamisel

Seisu- ja vooluveekogude ja maaparandussüsteemide avatud eesvoolude veekaitsevööndite reostustundlikkus ehk reostusohu on arvatud, arvestades ainult mulla ja reljeefi tingimusi. See tähendab, et need näitavad potentsiaalset ohtu: kui antud veekoguga piirneb põllumajanduslikus kasutuses olev maa, siis on vajalik kaaluda vastava laiusega puhverriba rajamist. Käesolevad reostustundlikkuse kihid ei arvesta põhjavee tundlikkust, sest see ei olnud antud töö eesmärk. Samas on võimalik käesoleva töö põhjal täiendada uuringuna lisada põhjavee tundlikkus ning anda komplekshinnang reostustundlikkuse kohta. Käesolevad kaardikihid ei arvesta ka olemasoleva kõrgema taimkatte olemasolu, sest see on ajas muutuv. Selleks, et hetkeolukorra kohta siiski mingi hinnang saada, loodi hetkel kõige värskemate andmete põhjal taimkatte kaardikiht (vt. järgmine ptk).

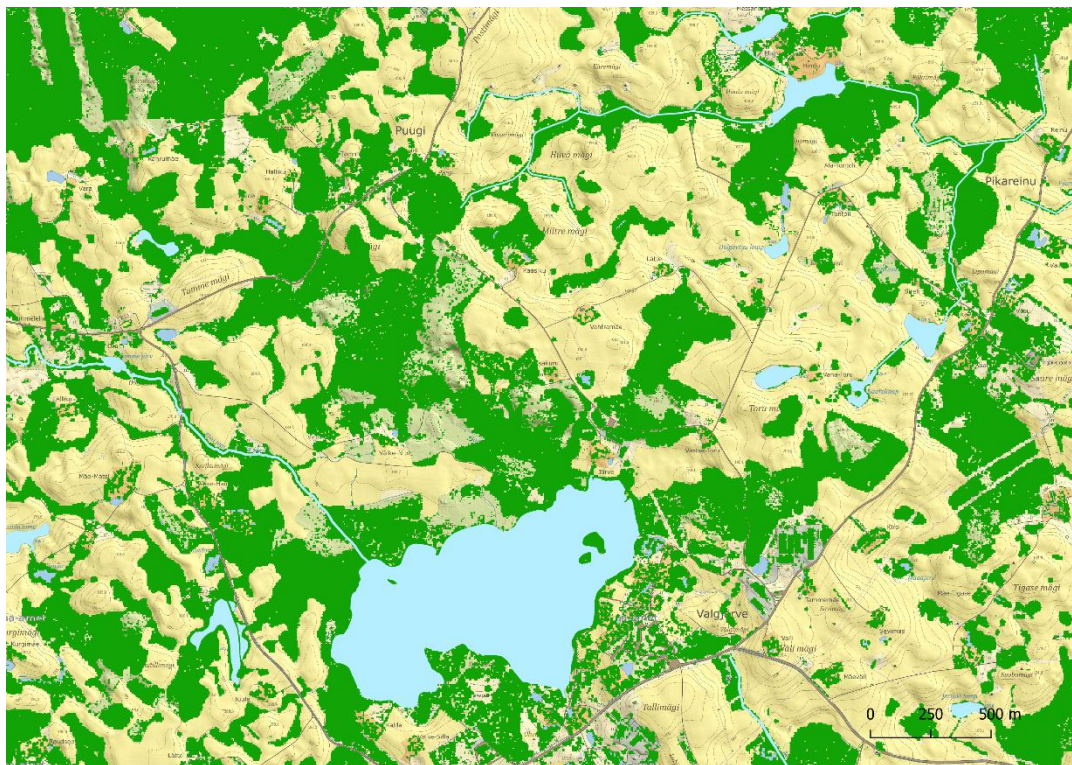
5.3 TAIMKATTE ANDMEKIHI LOOMINE

Taimkatte andmekihina kasutati Maa-ameti taimkatte kõrgusmudelit (CHM – *Canopy Height Model*) lahutusega 4 meetrit aastatest 2017–2019 (joonis 21). Suvel kogutud andmeid eelistati kevadele, et tuvastada maksimaalne taimkate. Mudelist on eemaldatud objektid, mille kõrgus maapinnast jääb kahest meetrist allapoole. Kuna üle-eestiliste aerolaserskaneerimise andmete maksimaalne punktide vahe on kuni 2,6 meetrit, siis võib juhtuda, et ka mõned väiksemad objektid on mudelist puudu (Maa-ameti Geoportaal, 2019). Taimkatte mudel valideeriti käsitsi Valgjärve testalal, kasutades vastava aasta ortofotosid, ja leiti, et taimkatte mudel oli üldiselt täpne ning tuvastati ainult mõned üksikud valepositiivsed pikslid, mida olid põhjustanud kõrgepingeliinid.

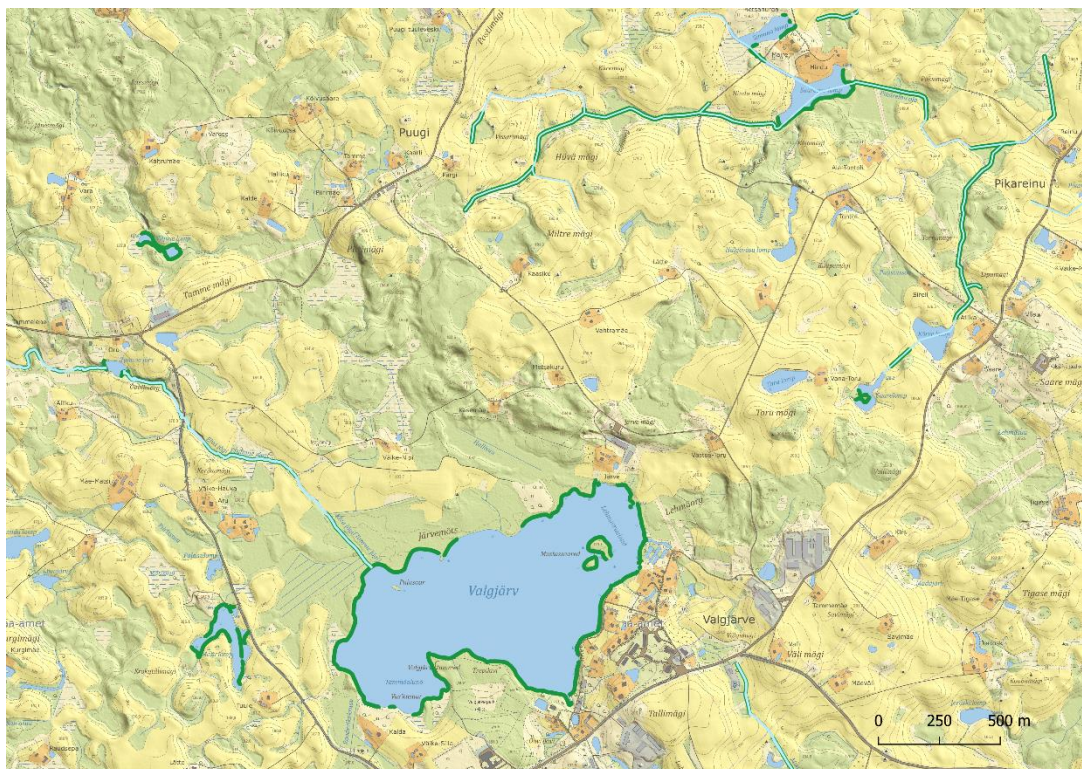


Joonis 21. Taimkatte kaardikihi jaoks kasutatud Maa-ameti taimkatte kõrgusmudeli kaardilehed aastate kaupa.

Kuna kõik ülejäänud sisendandmed olid 5 m ruumilise lahutusega, siis konverteeriti taimkatte kõrgusmudel 5 meetri lahutusega rastroks, kasutades lähima naabri meetodit. Seejärel klassifitseeriti taimkatte mudel ümber nii, et igasugune taimkattega ala sai väärtuseks 1, taimkatteta ala väärtuseks 0 ja *no data* jäi muutmata (joonis 22). Tulemiks taimkatte raster: taimkatte_raster.tif. Seejärel loodi taimkatte rasterkihist puhverribade taimkatte vektorkiht. Selleks kasutati QGIS töövahendit *Zonal Statistics*, kus statistiku “majority” abil leiti puhvris kõige sagedamini esinev piksli väärtus, mis salvestati puhvrite andmetabelisse atribuudina **Taimk**. Juhul kui enamuse puhverribast kattis taimkate, sai puhver väärtuseks 1, ning kui taimkatet ei olnud või see oli vähemuses, sai puhver väärtuseks 0. Need väärtused kanti üle 1m-laiustesse LVK ja MSR puhvritesse veekogude kallastel ning ühendati sama väärtusega naaberpuhvid üheks puhvriks ja lõpptulemiks olid taimkatte olemasolu näitavad kaardikihid: MSR_puhverriba_taimkate ja LVK_puhverriba_taimkate. Joonisel 23 on näha väljavõtte Valgjärve piirkonna taimkatte olemasolu veekaitsevööndites näitavast andmekihist. Ligikaudu 60% looduslike veekogude ja 50% maaparandussüsteemide avatud eesvoolude puhverribadest on hetkel kaetud kõrgema taimestikuga.



Joonis 22. Väljavõte Valgjärve ümbruse taimkatte rasterkihist. Rohelised alad märgivad üle 2 m kõrguse taimkatte olemasolu.



Joonis 23. Väljavõte Valgjärve ümbruse puhverribade taimkatte olemasolu näitavast kaardikihist. Rohelisega märgitud aladel on puhverribades rohkem kui 50% alast kaetud üle 2 m kõrguse taimkattega.

Kui vaadata üle 2 m kõrguse taimkatte esinemist eri reostustundlikkuse klasside lõikes, selgub, et väga kõrge reostustundlikkusega (klass nr 5) aladel on veekoguäärne kallaskall kaetud looduslikel veekogudel 78,4% ja maaparandussüsteemi avatud eesvooludel 54,0% ulatuses (Tabel 10). Kahe veekogutüübi

võrdluses on peaaegu kõigis reostustundlikkuse klassides just maaparandussüsteemidel väiksem taimkattega kaetus. Joonisel 24 on näidiseks väljavõtte Rääsu ojast Pärnumaal, mille veekaitsevööndid on peamiselt järsu nõlvakalde tõttu kõrge reostustundlikkusega, aga kõrgem taimkate puudub. Samas on veekogude vahetus läheduses on ka põllumajanduslikus kasutuses olevad maad.

Tabel 10. Taimkatte esinemise osakaal 50m kaldavööndis reostustundlikkuse klasside lõikes.

Reostustundlikkuse klassi number	Looduslik veekogu (LVK)	Maaparandussüsteemi eesvool (MSR)
1	55,9%	56,9%
2	60,6%	43,5%
3	66,2%	42,7%
4	72,0%	43,4%
5	78,4%	54,0%



Joonis 24. Näide alast (Räägu oja Pärnumaal), kus mulla- ja reljeefitingimustest tulenevalt on reostustundlikkus ehk reostusohu tase kõrge ja kaldavööndis kõrgem taimkate peaaegu puudub. Vasakul reljeefivarjutus ja paremal ortofoto. Aluskaart: Maa-amet, 2021.

5.4 ANDMEKIHID JA KOOD

soovituslik_puhverriba_raster.tif – soovitusliku puhverriba laiuse (m) rasterkiht (7 GB)

soovituslik_puhverriba_raster.pdf – soovitusliku puhverriba laiuse (m) rasterkihti metaandmed

soovituslik_puhverriba_artibuut.gpkg/gdb – soovituslik puhverriba laius (m) on atribuutandmetes (4,5 GB)

- LVK_sovituslik_puhverriba_artibuut – soovituslik puhverriba laius Veeseadusest tuleneva veekaitsevööndi kohustusega looduslikele veekogudele (meetrites)
- MSR_sovituslik_puhverriba_artibuut – soovituslik puhverriba laius Veeseadusest tuleneva veekaitsevööndi kohustusega maaparandussüsteemide eesvooludele (meetrites)

soovituslik_puhverriba_artibuut_metaandmed.pdf – soovituslik_puhverriba_atribuut vektorkihi metaandmed

soovituslik_puhverriba_geomeetria.gpkg/gdb (1,2 GB) – soovituslik puhverriba laius (m) avaldub geomeetrias

- LVK_sovituslik_puhverriba_geomeetria – soovituslik puhverriba laius Veeseadusest tuleneva veekaitsevööndi kohustusega looduslikele veekogudele (meetrites)



- MSR_soovituslik_puhverriba_geomeetria – soovituslik puhverriba laius Veeseadusest tuleneva veekaitsevööndi kohustusega maaparandussüsteemide eesvooludele (meetrites)

soovituslik_puhverriba_geomeetria_metaandmed.pdf – soovituslik_puhverriba_geomeetria vektorkihi metaandmed

veekaitsevööndi_reostustundlikkus.gpkg/gdb – hinnanguline veekaitsevööndite reostustundlikkus (3,2 GB)

- LVK_veekaitsevööndi_reostustundlikkus
- MSR_veekaitsevööndi_reostustundlikkus

veekaitsevööndi_reostustundlikkus_metaandmed.pdf – reostustundlikkuse vektorkihi metaandmed

puhverriba_taimkate.gpkg/gdb (2,4 GB)

- LVK_puhverriba_taimkate
- MSR_puhverriba_taimkate

puhverriba_taimkate_metaandmed.pdf – puhverriba_taimkate vektorkihi metaandmed

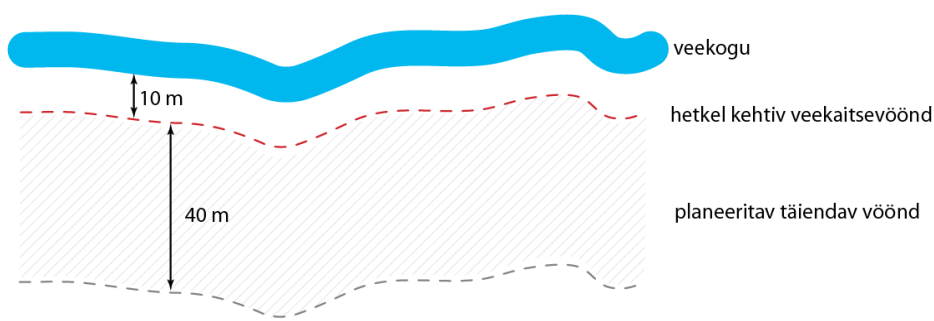
taimkate_raster.tif – taimkate olemasolu/puudumist näitav andmekiht. Väärtused 1 näitavad üle 2 m kõrguse taimkate olemasolu ja 0 selle puudumist (143 MB)

taimkate_raster_metadata.pdf – taimkate_raster rasterihi metaandmed

Andmetöötluseks kasutatud kood: https://github.com/LandscapeGeoinformatics/raster_nomograph

6 MITTEHEAS SEISUNDIS VEEKOGUMITE VEEKAITSEVÖÖNDITES JA PLANEERITAVATES 50M TÄIENDAVATES PUHVERRIBADES PAIKNEVATE PÕLDUDE PINDALA ANALÜÜS

Eesmärk: leida mitteheas seisundis olevate veekogude (v.a Läänemeri) valglatesse jäävate looduslike veekogude ja üle 10 km² suuruse valglaga maaparanduse eesvoolude veekaitsevöönditesse ja 50 meetri raadiusesse jäävate põllumassiivide pindala ning pindala, mis jääb veekaitsevööndile lisaks 50 meetri sisse (Joonis 25) põllukultuuride kaupa. Täiendava ala hindamise mõte on anda hinnang täiendava puhverriba alla jääva maa pindala hinnang kui igale poole rakendada 50-meetrist soovituslikku puhverriba.



Joonis 25. Hetkel kehtiva veekaitsevööndi ja planeeritava täiendava meetme vööndi skeem

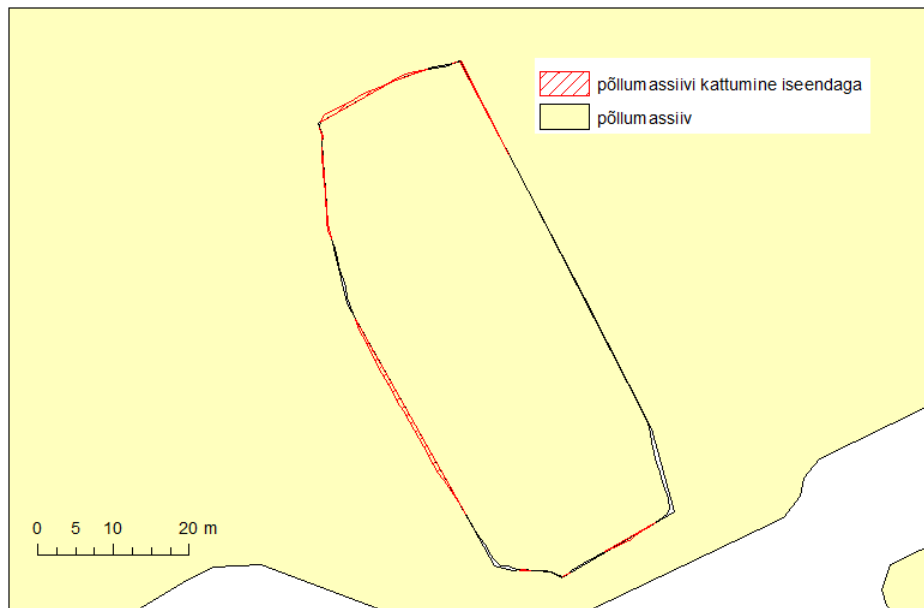
Lähteandmed:

- 1) Põllumassiivide kaardikiht – PRIA avaandmed: <https://opendata.riik.ee/andmehulgad/p-llumassiivide-register/>
- 2) Veekaitsevööndid – Maa-ameti avaandmed Veekogude ja hüdrooloogiliste rajatiste kitsenduste mõjualad: <https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/Kitsenduste-andmed/Kitsenduste-andmete-allalaadimine-p624.html>
- 3) Pinnaveekogumite seisundi kaardikiht saadi KAURist 31. juulil 2020. Kontaktisikuteks olid Kristiina Ojamäe ja Marge Muna.
- 4) KPO-de kihid: Maa-ametist KPO looduslike veekogude joonte ja pindade andmekihid ja
- 5) EELISe valgate kiht seisuga 1.10.2020

Kõikides sisendandmetes esinesid topoloogia vead (alade iseendaga kattumised, piirid ei ühti täpselt, ülekatted naaberaladega jms), mis mõjutasid analüüsi metoodika valikuid ja vähesel määral tulemusi (hinnanguliselt vähem kui 5%). Seetõttu tuvastati esmalt probleemsed kohad sisendandmetes ja seejärel viidi läbi pindala hindamine.

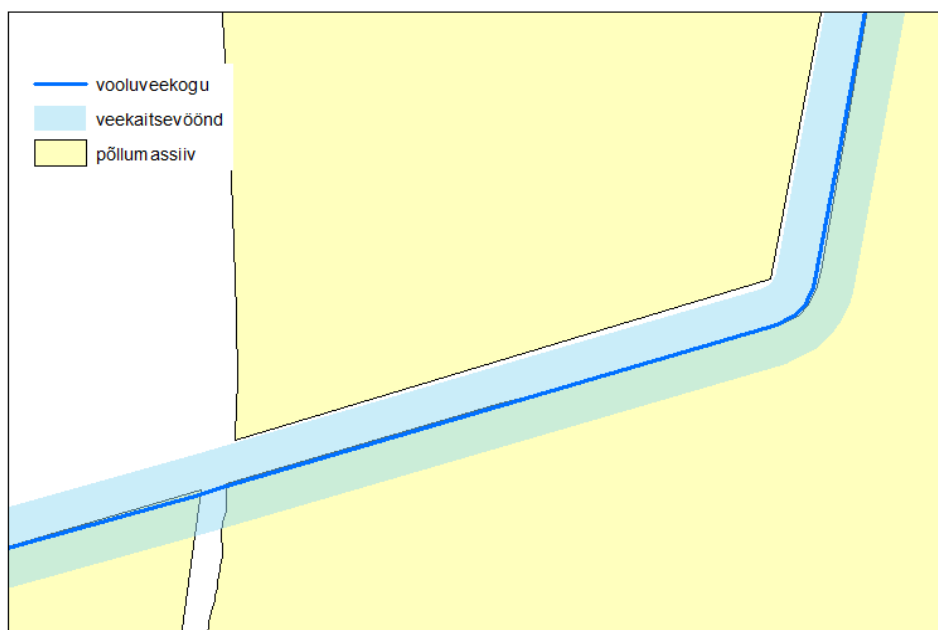
Tuvastatud probleemid:

- 1) PRIA põllumassiivide kihis on väikeses osas põlluservad iseendaga ülekattes või ei ole põllupiirid üksteisega koos, kuigi reaalsuses on piirid koos (Joonis 26).



Joonis 26. Näide PRIA põllumassiivide piiride ebatäpsusest.

Lisaks on PRIA põllumassiivide kaardikihis põllumassiivid peamiselt veekaitsevöönditest välja kaardistatud ning alati ei ole põllupiir kaardi peal täpselt kohakuti veekaitsepiiriga (Joonis 27). Seetõttu ei ole võimalik automaatse päringuga veekaitsevööndiga piirnevaid põlde tuvastada ilma täiendava puhvri või otsinguraadiuseta.



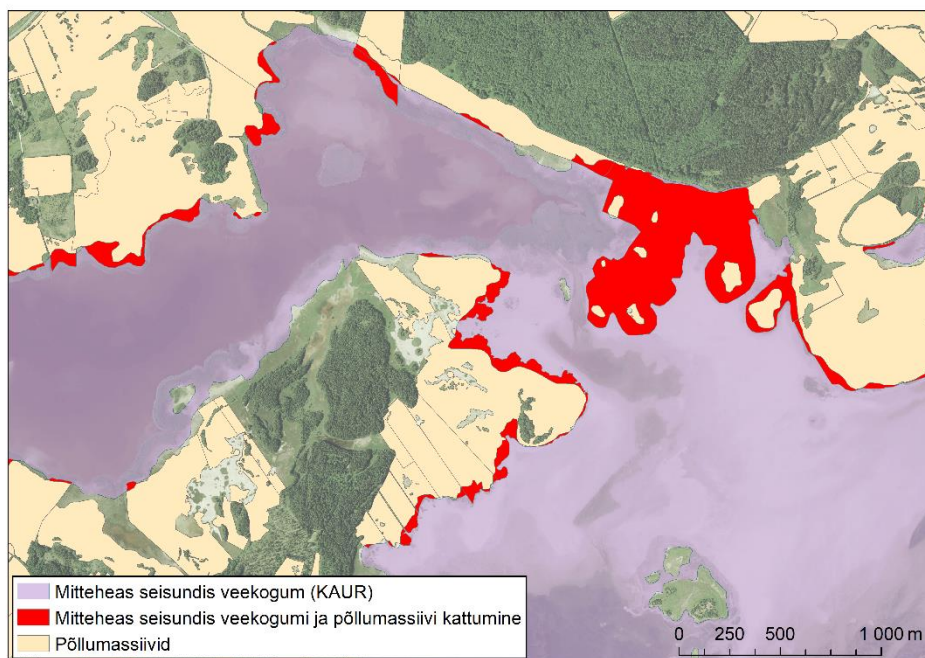
Joonis 27. Vooluveekogust põhjapoolse jääv põllumassiiv on veekaitsevööndist välja kaardistatud ja ei puutu sellega kokku servapidi, aga lõunapoolne massiiv on täielikult veekaitsevööndi sisse kaardistatud.

2) KAURI mitteheas seisundis veekogumite kaardikihil on kaks probleemkohta: 1) veekogumid ei kattu Eesti topograafia andmekogu (ETAK) veekogudega, mille järgi on moodustatud enamik veekaitsevööndeid (Joonis 28); 2) veekogumite kiht kattub kohati (enamasti rannikul) PRIA põllumassiivide kihiga (Joonis 29). Selliseid kattumisi esineb 824 põllumassiivil.

Kuna mitteheas seisundis veekogumite ruumikujud ei kattu ETAKi veekogude ruumikujudega, siis ei ole võimalik nende veekaitsevööndeid eristada Maa-ameti kitsenduste andmebaasist.



Joonis 28. Näide mitteheas seisundis veekogumi ja ETAKi veekogu mitte kattumisest. Aluskaart: Maa-amet, 2020



Joonis 29. Näide mitteheas seisundis veekogumi ja põllumassiivide kattumisest. Aluskaart: Maa-amet, 2020

3) Maa-ameti kitsenduste andmebaasis olevad veekaitsevööndid ei kattu samuti alati veekogudega, kuna looduslike veekogude veekaitsevööndite määratlemiseks on kasutatud ETAKi andmeid, aga maaparanduskraavide veekaitsevööndite määratlemiseks on kasutatud Maaparandussüsteemide registri andmeid, mille ruumikujud ei ole ETAKiga vastavuses. Seetõttu ei ole veekaitsevöönd alati veekogu kohal või kattub iseendaga (Joonis 30).



Joonis 30. Näide veekaitsevööndi ja veekogu mitte kattumisest. Aluskaart: Maa-amet, 2020

Eelnevatest probleemidest lähtuvalt leiti veekogude äärde jäävad põllumassiivid järgnevalt:

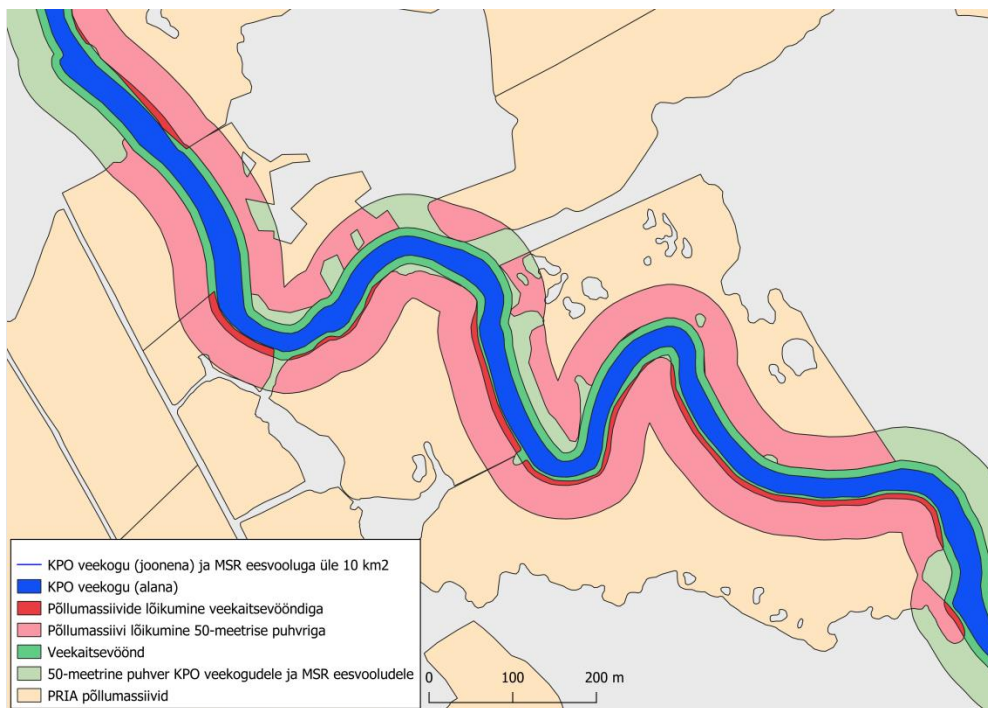
1) Mitteheas seisundis veekogumite valglate leidmine

Igale mitteheas seisundis veekogule (v.a Läänemeri) leiti EELISE valglate kihilt vastav valgla. Seejuures tehti üks parandus: Jõemõisa järvele genereeriti olemasolevate valgapiiride järgi valgla, sest sellele veekogule vastavat valglat andmekihil ei olnud. Valitud valglat liideti analüüsi tarbeks kokku.

2) Valglate sees põllumassiivide osade leidmine

Põllumassiivide analüüsiks leiti esmalt põllumassiivid, mis jäävad välja valitud valglate sisse. Seejärel lõigati põllumassiivide kihti veekaitsevöönditega (tumedam punane ala Joonisel 31) ja leiti nende kattumisalade pindalad (Tabeli 11 III tulp). Selliseid alasid mitteheas seisundis veekogumite valglates on kokku 1213,3 ha. Tulemiks andmekiht **pollud_50m_valglates**.

Täiendava ala leidmiseks genereeriti 50-meetrine puhver kitsendusi põhjustavate objektide (KPO) seas olevatele veekogudele ning maaparandussüsteemi (MSR) eesvoolude kihilt võetud üle 10 km² suuruse valgla eesvooludele. Eri kihtide puhvrid liideti kokku ja lõigati sellega põllumassiivide kihti (visuaalselt kogu punane ala Joonisel 31 ja Joonisel 32). 50-meetrise puhvri sisse jäävate alade pindalad põllukultuuride kaupa on Tabelis 11 (II tulp), kokku on neid 12 334,1 ha. Et teada, kui suur on veekaitsevöönditele juurde planeeritavas alas põllumassiive, lahutati tulemused (Tabel 11, IV tulp). Geoinformaatiliselt polnud võimalik seda kihti luua andmestikus esinevate geomeetriavigade tõttu. Joonisel 31 võib seda ala näha heledama punasega, kus lõikumine veekaitsevööndiga ei kata lõikumist puhvriga. Täiendavana planeeritavas vööndis on kokku 11 120,8 ha põllumassiive.

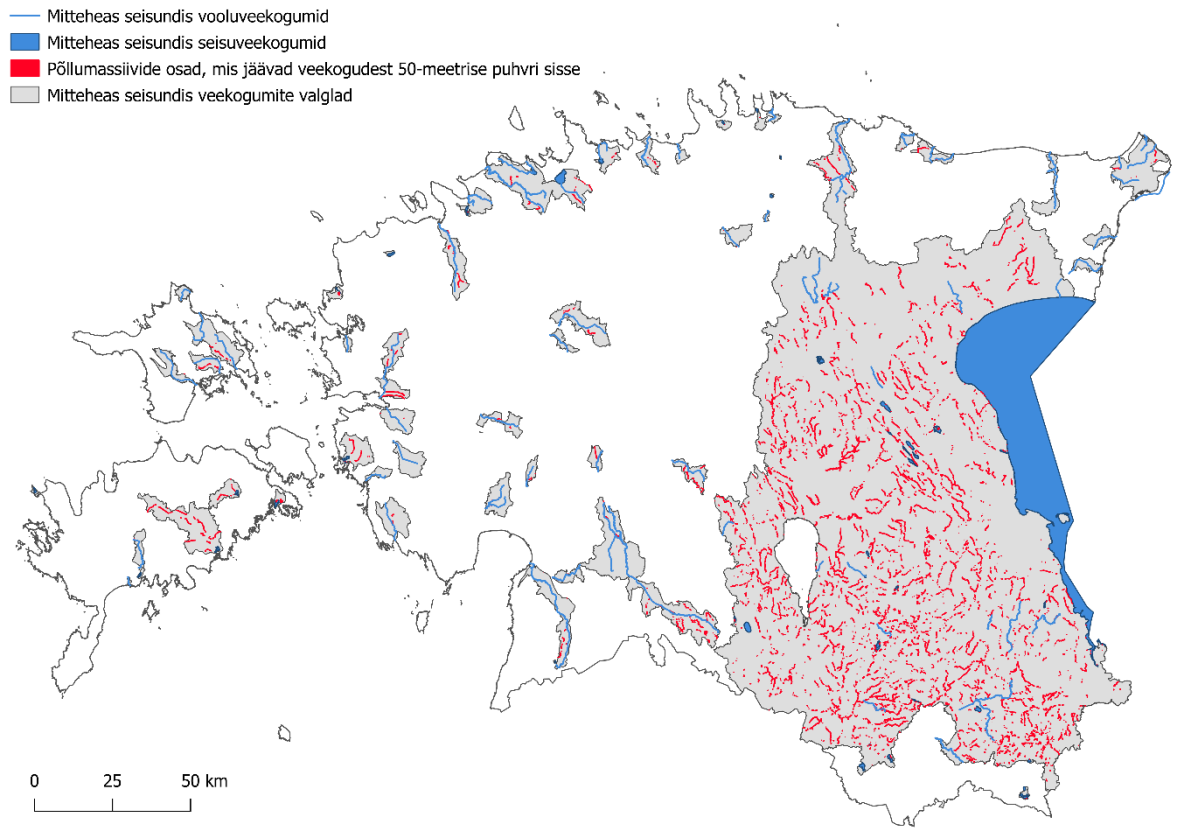


Joonis 31. PRIA põllumassiivide paiknemine veekogu lähedal ja nende kattumine veekaitsevööndi ja analüüsitud genereeritud 50-meetrise puhvriga

Tabel 11. Mitteheas seisundis veekogumite valglate sees leiduvatest kitsendusi põhjustavatest veekogudest ja üle 10 km² suuruse eesvooluga maaparandusobjektidest 50 meetri raadiuses asetsevate ning samade valglate sees asuvates veekaitsevööndites olevate põllumassiivide pindalad põllukultuuride kaupa

Põllukultuur	50meetrise puhvriga kattumise pindala (ha)	veekaitsevööndiga kattumise pindala (ha)	vahe ehk maksimaalne planeeritav ala (ha)
Karjatamine väljaspool põllumaj. maad	26,2	3,8	22,4
Keskkonnatundlik püsirohuma	61,3	6,2	55,0
Mustkesa	79,2	6,7	72,5
Põllukultuurid	6405,0	506,9	5898,1
Püsikultuurid	37,6	2,2	35,4
Püsirohuma	5606,5	663,0	4943,6
Tagasirajatud rohumaa	118,3	24,5	93,8
KOKKU	12334,1	1213,3	11120,8

Kuna täpsed andmed väetamise kohta puuduvad, siis saame ainult eksperthinnanguna öelda, et kõige intensiivsema väetamise koormuse saavad enamasti põllukultuurid ja püsikultuurid (peamiselt mineraalväetiste kujul) ja karjatamine väljaspool põllumajanduslikku maad (orgaaniline väetis ehk sõnnik). Sellele järgneb väetamise intensiivsuse poolest püsirohuma ja tagasirajatud rohumaa. Mustkesa tavaliselt ei väetata, aga sõltuvalt aastaajast ja mustkesa kestvusest, on ohuks pindmine erosioon, sest mulda kinni hoidvad taimejuured puuduvad. Pindmise erosiooniga kantakse toitained veekogudesse. Keskkonnatundlik püsirohuma on väikseima intensiivsusega. Väetistarve sõltub lisaks kasvatatavast kultuurist ka mullaomadustest, peamiselt mulla tüübist ja lõimisest. Ligikaudse ülevaate teoreetilisest väetistarbest annab Põllumajandusuuringute keskuse mullaseirebüroo poolt koostatud kasutussobivuse ja arendatav väetustarbe [kaardirakendus](#).



Joonis 32. PRIA põllumassiivide paiknemine veekogu lähedal ja nende kattumine veekaitsevööndi ja analüüsis genereeritud 50meetrise puhvriga mittheas seisundis veekogumite valglates.

6.1 ANDMEKIHDID

pollud_50m_valglates.gpkg/gdb – mittheas seisundis olevate veekogude (v.a Läänemeri) valglatesse jäävate looduslike veekogude ja üle 10 km² suuruse valglaga maaparanduse eesvoolude 50 meetri raadiusesse jäävate põllumassiivide ala

pollud_50_valglates_metaandmed.pdf - pollud_50m_valglates vektorkihi metaandmed

7 PROBLEEMKOHAD SISENDANDMEKIHTIDES

Kogu andmetöötlusel olid piiravaks asjaoluks mõningased probleemid sisendandmetes, mis teatud juhtudel suurendavad ebamäärasust. Lisaks peatükis 5 välja toodud probleemidele, esinesid veel järgmised probleemid:

- 1) ETAKi põhistel KPOde joonekihtidel, mis antud projekti jaoks saadi, ei olnud veekogude laiuse atribuuti ja seetõttu ei olnud võimalik alla 8-meetrise laiusega vooluveekogude puhul arvestada puhverriba soovituslikku laiust kaldajoonest, vaid arvestati veekogu teljest.
- 2) ETAKi, maaparandussüsteemide ja mittheas seisundis veekogumite ruumikujud ei kattu st üks ja sama veekogu on kõigis kolmes andmebaasis erineva kujuga. Meie hinnangul on ETAKi ruumikuju täpsem ja võiks võimalusel olla aluseks teistele andmebaasidele.
- 3) ETAKi (ja ka teiste andmebaaside) puuduseks on veekogude topoloogia puudumine st vooluveekogude suund ei ühti digimise suunaga ning seisuveekogudel ei ole alati süsteemselt üks ja sama pool (vasak või parem pool) veekogu.

Edaspidi andmete korrastamisel või digimisel võiks alati digida kõik veekogud ühtepidi kas allavoolu või ülesvoolu.

8 KASUTATUD KIRJANDUS

- Adams, W.A., 1973. The Effect of Organic Matter on the bulk and true Densities of some Uncultivated Podzolic Soils. *J. Soil Sci.* 24, 10–17. doi:10.1111/j.1365-2389.1973.tb00737.x
- Astover, A., Leedu, L., 2013. Mulla ABC II osa. Mulla orgaaniline aine.
- Astover, A., Roostalu, H., Suuster, E., Rossner, H., Kukk, L., Reintam, E., Krebstein, K., Penu, P., Loide, V., Kikas, T., 2014. Mullastikukaartide- ja andmebaaside rakendused jätkusuutlikuks maakasutuseks ja põllumajandustootmiseks.
- Beven, K.J., Kirkby, M.J., 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol. Sci. Bull.* 24, 43–69. doi:10.1080/02626667909491834
- Breiman, L., 2001. Random Forests. *Mach. Learn.*
- Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., Wehberg, J., Wichmann, V., Böhner, J., 2015. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. *Geosci. Model Dev.* 8, 1991–2007. doi:10.5194/gmd-8-1991-2015
- Dejanović, I., Milosavljević, G., Vaderna, R., 2016. Arpeggio: A flexible PEG parser for Python. *Knowledge-Based Syst.* 95, 71–74. doi:10.1016/j.knosys.2015.12.004
- Dipak, S., Abhijit, H., 2005. *Physical and Chemical Methods in Soil Analysis - Fundamental concepts of analytical chemistry and instrumentation techniques.* New Age International Ltd., New Delhi.
- Elith, J., Leathwick, J.R., Hastie, T., 2008. A working guide to boosted regression trees. *J. Anim. Ecol.* doi:10.1111/j.1365-2656.2008.01390.x
- FAO, 2015. World reference base for soil resources 2014 International soil classification system, *World Soil Resources Reports No. 106.*
- FAO, 2001. Soil carbon sequestration for improved land management, *World Soil Resources Reports.*
- Hickey, M.B.C., Doran, B., 2004. A review of the efficiency of buffer strips for the maintenance and enhancement of riparian ecosystems. *Water Qual. Res. J. Canada.* doi:10.2166/wqrj.2004.042
- Hiederer, R., Michéli, E., Durrant, T., 2011. Evaluation of the BioSoil Demonstration Project. *Ispra.*
- Kachinsky, N., 1965. Fizika potchv. Soil physics. In Russian, Vol. 1. in. ed. Moscow University Press, Moscow.
- Kasak, K., Piirimäe, K., 2019. Keskkonnasõbralike põllumajanduslike kuivendussüsteemide eesvoolude hooldusja uuendustööd.
- Kask, R., 2001. Eesti muldade eestikeelsete lõimiseklasside vastetest inglise keeles. *Akad. Põllumajanduse Seltsi Toim.* 93–97.
- Kauer, K., Astover, A., Viiralt, R., Raave, H., Kätterer, T., 2019. Evolution of soil organic carbon in a carbonaceous glacial till as an effect of crop and fertility management over 50 years in a field experiment. *Agric. Ecosyst. Environ.* 283, 106562. doi:10.1016/j.agee.2019.06.001
- Kõlli, R., 2000. Eesti muldkattes leiduvad WRB referentsmullad. *Akad. Põllumajanduse Seltsi Toim.* 29–32.
- Kõlli, R., Ellermae, O., Köster, T., Lemetti, I., Asi, E., Kauer, K., 2009. Stocks of organic carbon in Estonian soils. *Est. J. Earth Sci.* 58, 95. doi:10.3176/earth.2009.2.01

- Maa-amet, 2019a. Maapinna kõrgusmudel [WWW Document]. URL <https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/Korgusandmed/Korgusmudelid-p508.html> (viimati külastatud 9.12.19).
- Maa-amet, 2019b. Eesti topograafia andmekogu [WWW Document]. URL <https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/Eesti-topograafia-andmekogu-p79.html> (viimati külastatud 10.15.19).
- Maa-amet, 2001. Vabariigi digitaalse suuremõtkavalise mullastiku kaardi seletuskiri.
- Maa-ameti Geoportaal, 2019. Kõrgusmudelid [WWW Document]. URL <https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/Korgusandmed/Korgusmudelid-p508.html> (viimati külastatud 4.15.20).
- Mander, Ü., Hayakawa, Y., Kuusemets, V., 2005. Purification processes, ecological functions, planning and design of riparian buffer zones in agricultural watersheds, in: *Ecological Engineering*. doi:10.1016/j.ecoleng.2005.01.015
- Mander, Ü., Kuusemets, V., 1998. Mander, Ü. and Kuusemets, V. 1998. Non-point pollution control by riparian buffer strips: Dimensioning and efficiency assessment., in: *Proceedings of the 3rd International Conference on Diffuse Pollution*. Edingurh, pp. 136–143.
- Mander, Ü., Kuusemets, V., Lõhmus, K., Muring, T., 1997. Efficiency and dimensioning of riparian buffer zones in agricultural catchments. *Ecol. Eng.* doi:10.1016/S0925-8574(97)00025-6
- Mander, Ü., Tournebize, J., 2015. Riparian Buffer Zones: Functions and Dimensioning, in: *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. doi:10.1016/b978-0-12-409548-9.09304-0
- Mayer, P.M., Reynolds, S.K., Canfield, T.J., 2005. Riparian buffer width, vegetative cover, and nitrogen removal effectiveness: a review of current science and regulations. *Epa/600/R-05/118*.
- Mitášová, H., Hofierka, J., 1993. Interpolation by regularized spline with tension: II. Application to terrain modeling and surface geometry analysis. *Math. Geol.* doi:10.1007/BF00893172
- Mitasova, H., Mitas, L., Brown, W.M., Gerdes, D.P., Kosinovsky, R., Baker, T., 1995. Modelling spatially and temporally distributed phenomena: New methods and tools for GRASS GIS. *Int. J. Geogr. Inf. Syst.* doi:10.1080/02693799508902048
- Moore, I.D., Grayson, R.B., Ladson, A.R., 1991. Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrol. Process.* doi:10.1002/hyp.3360050103
- Noreika, N., Helm, A., Öpik, M., Jairus, T., Vasar, M., Reier, Ü., Kook, E., Riibak, K., Kasari, L., Tullus, H., Tullus, T., Lutter, R., Oja, E., Saag, A., Randlane, T., Pärtel, M., 2019. Forest biomass, soil and biodiversity relationships originate from biogeographic affinity and direct ecological effects. *Oikos* oik.06693. doi:10.1111/oik.06693
- Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., Vanderplas, J., Passos, A., Cournapeau, D., Brucher, M., Perrot, M., Duchesnay, É., 2011. Scikit-learn: Machine learning in Python. *J. Mach. Learn. Res.*
- Põllumajandusamet, 2020. Maaparandussüsteemide register (MSR) [WWW Document]. URL <https://portaal.agri.ee/avalik/#/maaparandus/msr/systeemi-otsing>
- Polyakov, V., Fares, A., Ryder, M.H., 2005. Precision riparian buffers for the control of nonpoint source pollutant loading into surface water: A review. *Environ. Rev.* doi:10.1139/a05-010
- Putku, E., 2016. Prediction models of soil organic carbon and bulk density of arable mineral soils. Estonian University of Life Sciences. doi:hdl.handle.net/10492/2502
- Saltelli, A., Tarantola, S., Chan, K.P.S., 1999. A quantitative model-independent method for global sensitivity analysis of model output. *Technometrics*. doi:10.1080/00401706.1999.10485594
- Suuster, E., Astover, A., Roostalu, H., Penu, P., 2011a. Suuremõtkavalisest mullastikukaardist maakasutuse otsusteni, in: Kadaja, J. (Ed.), *Agronoomia*. Saku: Eesti Maaviljeluse Instituut, pp. 223–230.

- Suuster, E., Ritz, C., Roostalu, H., Reintam, E., Kölli, R., Astover, A., 2011b. Soil bulk density pedotransfer functions of the humus horizon in arable soils. *Geoderma* 163, 74–82. doi:10.1016/j.geoderma.2011.04.005
- Team, G.D., 2017. Geographic Resources Analysis Support System (GRASS GIS) Software. GRASS Dev. Team.
- Tóth, B., Weynants, M., Pásztor, L., Hengl, T., 2017. 3D soil hydraulic database of Europe at 250 m resolution. *Hydrol. Process.* 31. doi:10.1002/hyp.11203
- White, R.E., 1987. Introduction to the principles and practice of soil science. Oxford, London.
- Wischmeier, W., Smith, D., 1978. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning, U.S. Department of Agriculture Handbook No. 537. doi:10.1029/TR039i002p00285
- Yuan, Y., Bingner, R.L., Locke, M.A., 2009. A review of effectiveness of vegetative buffers on sediment trapping in agricultural areas. *Ecohydrology*. doi:10.1002/eco.82
- Zhang, Y., Schaap, M.G., 2017. Weighted recalibration of the Rosetta pedotransfer model with improved estimates of hydraulic parameter distributions and summary statistics (Rosetta3). *J. Hydrol.* 547, 39–53. doi:10.1016/j.jhydrol.2017.01.004

9 LISAD

Lisa 1. Näidis grammatika reeglistest, mida kasutati mullastiku kaardi lõimise valemi korrastamiseks

```
# ... at the first the basic elements are defined, starting with the actual soil texture fine-textured soils ("peenes") types
def l(): return 'l' # liiv, en: sand
def pl(): return 'pl' # pl - peenliiv, en: fine sand (täiendina peenliivakas)
def plsl(): return 'plsl' # plsl - peenliivakas saviliiv, en: fine clayey sand
# ... other "finely textured" types
def fine_textured_list(): return [plsl, pl, tsl, dk, sl, ls, s, l]
def fine_textured(): return Optional(kPlus), fine_textured_list, Optional(amplifiers), Optional(depth_range)

# turfs, aka, peat bogs and similar are specially handled types
def t(): return 't' # t - turvas, en: peat
def th(): return 'th' # th 15 or th 15-20 humus thickness
def turfs(): return Optional(kPlus), [th, t], Optional(amplifiers), Optional(depth_range)

# soil skeleton ("koores") types, for stone content and shape in the soil part
def kr(): return 'kr' # kr - kruus, en: gravel
def r(): return 'r' # r - rähk, en: grit, rubble
# ... and other "skeleton" types
def skeleton_list(): return [kr, kb, pk, ck, lu, v_0, k_0, r_0, r, v, k, p, d]
def skeleton(): return Optional(kPlus), skeleton_list, Optional(amplifiers), Optional(depth_range)

# ... several separators and special indicators can precede or be appended in combinations with the above soil elements
def depth_number(): return RegExMatch(r'\d+') # at least two digits for depth numbers (well might as well be one)
def depth_range(): return Optional(kPlus), depth_number, ZeroOrMore('-', depth_number)
def vertiSep(): return '/'
def horiSep(): return ';'

# ... and eventually get composed into aggregated lists of components per encoded profile
def constituent(): return ZeroOrMore(skeleton), ZeroOrMore([fine_textured, turfs, Optional(alternateComma)])
def paraSeq(): return OneOrMore(constituent)
def soilParts(): return paraSeq, ZeroOrMore(vertiSep, paraSeq)
def texture_grammar(): return OneOrMore(soilParts, sep=horiSep), EOF
```