

TARTU ÜLIKOOL
LOODUS- JA TÄPPISTEADUSTE VALDKOND
Ökoloogia ja maateaduste instituut
Geoloogia osakond

Magistritöö geoloogias (30 EAP)

**Põhjavee kaitstuse kaardi koostamine
GIS-põhise Eesti näitel muudetud
DRASTIC-metoodikaga**

Magdaleena Männik

Juhendajad: Maile Polikarpus

Tavo Ani

Tartu 2020

Põhjavee kaitstuse kaardi koostamine GIS-põhise Eesti näitel muudetud DRASTIC-metoodikaga

Põhjavee kaitstuse kaardid on olulised paljude keskkonnaalaste otsuste tegemisel, mis vajavad informatsiooni põhjavee reostuskaitstuse kohta. Võrreldes 1:50 000 mõõtkavas põhjavee kaitstuse kaardistamise algusega 1990. aastatel on toimunud oluline areng geoinfosüsteemide (GIS) põhiste meetodite kasutamises. Käesoleva töö eesmärk oli välja töötada efektiivsem ja automatiseeritum meetod Eesti geoloogilise baaskaardi põhjavee kaitstuse kaardi koostamiseks. Kaartide koostamisel kasutati DRASTIC-metoodikat, mida töö käigus muudeti vastavalt Eesti geoloogilistele tingimustele. Meetodi sobivuse uurimiseks ja rakendamiseks koostati QGIS'i andmetöötlusmudel, mida rakendades koostati Järvakandi, Rapla, Võru ja Tartu kaardilehtede põhjavee kaitstuse kaardid.

Märksõnad: *Põhjavee kaitstus, DRASTIC-metoodika, GIS.*

P470 Hüdrogeoloogia, geoplaneering ja ehitusgeoloogia

Mapping groundwater vulnerability using GIS-based DRASTIC method modified based on Estonian conditions

Groundwater vulnerability maps are useful for environmental decision making where information about groundwater vulnerability to contamination is needed. GIS-based methods have developed over the years compared to the beginning of groundwater vulnerability mapping (scale 1:50 000) in Estonia in the 1990s. The aim on this thesis was to develop an effective and more automated method for groundwater vulnerability mapping in Estonia using the DRASTIC method modified according to Estonian geological conditions. To assess the suitability of the method a QGIS based data processing model was created. Groundwater vulnerability maps for Järvakandi, Rapla, Võru and Tartu sheets of the base map were made using the created model.

Keywords: *Groundwater vulnerability, DRASTIC method, GIS*

P470 Hydrogeology, geographical and geological engineering

Sisukord

Sissejuhatus	5
1. Teoreetiline taust	6
1.1 Põhjavee kaitstuse mõiste	6
1.2 Põhjavee kaitstuse kaartide meetodikad	7
1.3 Eesti põhjavee kaitstuse kaardid	11
1.4 Eesti põhjavee kaitstuse kaardi koostamise meetoodika	14
2. Materjalid ja meetoodika.....	17
2.1 Uuringuala	17
2.2 DRASTIC-meetoodika muutmine.....	20
2.2.1 Veetaseme sügavus (D)	21
2.2.2 Netoinfiltratsioon (R)	23
2.2.3 Põhjaveekihi omadused (A)	24
2.2.4 Mulla/pinnakatte omadused (S).....	25
2.2.5 Topograafia (T).....	26
2.2.6 Aeratsioonivööndi mõju / pinnakatte paksus (I).....	27
2.2.7 Filtratsioonimoodul (C)	28
2.2.8 Kaitstuse indeksi alusel klasside moodustamine	29
2.3 DRASTIC-meetoodika andmetöötlusmudeli koostamine	30
2.4 Rasterarvutuse tulemuse kartograafiline silumine	32
3. Tulemused	34
3.1 Rapla ja Järvakandi	34
3.2 Võru	39
3.3 Tartu.....	42
3.4 DRASTIC-meetoodika andmetöötlusmudel.....	44

4. Arutelu	45
Kokkuvõte	48
Mapping groundwater vulnerability using GIS-based DRASTIC method modified based on Estonian conditions	49
Tänuavaldused	50
Kirjanduse loetelu.....	51
Lisa 1. Maa-ameti ArcGIS geoandmebaasi ülesehitus.....	57
Lisa 2. QGIS'i graafilise modelleerija DRASTIC-metoodika töövoog.....	58
Lisa 3. QGIS'i graafilise modelleerija kartograafilise silumise mudel	59

Sissejuhatus

Põhjavee kaitstuse kaardid on kasulikud paljude keskkonnaalaste otsuste tegemisel. Kaartide abil saab kindlaks teha kõige reostusohlikumad alad, kavandada seirevõrke ja teha otsuseid maakasutuse ja põhjavee kaitsmise osas (Zwahlen, 2004).

Põhjaveekihi kaitstus on reguleeritud ja määratletud Eesti Vabariigis Veeseaduse §68 poolt, mille alusel on põhjaveekihi kaitstus defineeritud kui põhjaveekihi kaetus vett halvasti juhtiva pinnasekihiga või veepidemega. Põhjaveekihi kaitstuse hindamisel võetakse arvesse pinnakatte koostis ja kõik põhjaveekihi kohal lasuvad veepidemed. Veeseaduse §68-st lg-st 3 lähtuvalt jaotatakse Eesti territooriumi alad põhjaveekihi loodusliku kaitstuse alusel kaitsmata, nõrgalt kaitsitud, keskmiselt kaitsitud, suhteliselt kaitsitud ja kaitsitud põhjaveega aladeks.

Eesti põhjavee kaitstuse klasside kriteeriumid töötati välja 1980. aastate alguses (Savitskaja, Viigand & Kulitshenko, 1982) ja on säilinud tänapäevani. Võrreldes 1:50 000 mõõtkavas kaardistamise algusega 1990. aastatel on toimunud oluline areng geoinfosüsteemide (GIS) põhiste meetodite kasutamises. Samuti on kättesaadaval oluliselt rohkem digitaliseeritud faktilist materjali, mille alusel otsuseid teha. Arengud arvutivõimsuses ja ligipääs erinevatele tarkvaradele on loonud soodsad tingimused uudsete meetodikate katsetamiseks. Kaarte on võimalik genereerida sõltudes vähem koostaja subjektiivsusest, kasutades kindlapiirilisel defineeritud parameetreid ja väärtusvahemikke.

Magistritöö eesmärk on välja töötada efektiivsem ja rohkem automatiseeritud meetod Eesti geoloogilise baaskaardi kaardikomplekti mõõtkavas 1:50 000 põhjavee kaitstuse kaardi koostamiseks. Selleks katsetatakse maailmas rohkelt kasutatud leidnud DRASTIC-metoodikat ning muudetakse seda vastavalt Eesti geoloogilistele ja hüdrogeoloogilistele tingimustele. DRASTIC-metoodika rakendamiseks koostatakse QGIS'i andmetöötlusmudel, mis kasutab geoloogilise baaskaardi geoandmebaasi andmeid, et genereerida tulemuseks põhjavee kaitstuse kaart.

1. Teoreetiline taust

1.1 Põhjavee kaitstuse mõiste

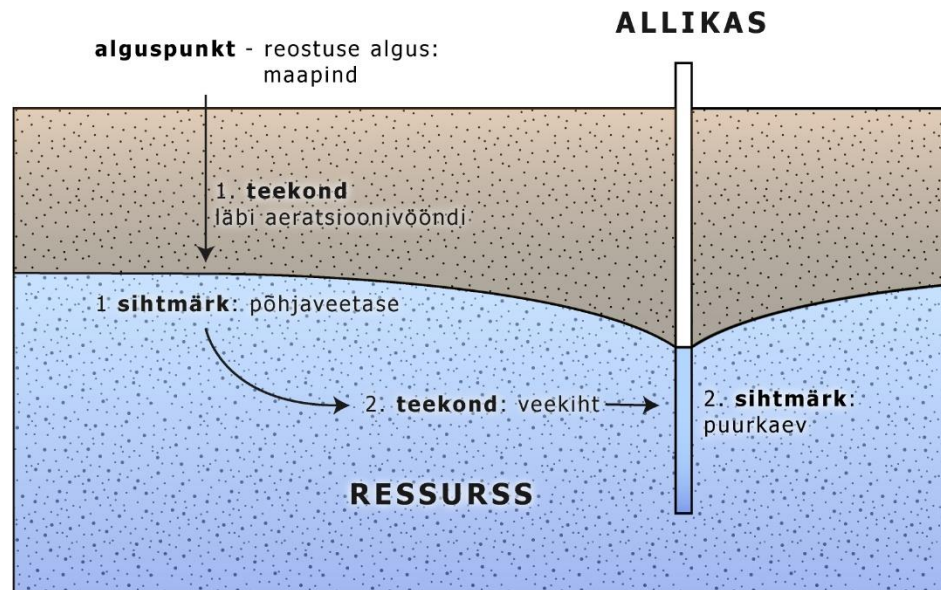
Mõiste põhjavee reostuskaitstus (ingl *groundwater vulnerability*) võttis esmakordselt kasutusele prantsuse hüdrogeoloog J. Margat 1960. aastatel, et tõsta ühiskonnas teadlikkust põhjavee reostuse teemadel. Erinevates piirkondades varieeruva põhjavee kaitstuse näitamiseks koostati hüdrogeoloogiliste tingimuste alusel kaardid (Vrba & Zaporozec, 1994).

Põhjavee kaitstus on suhteline omadus, mis pole otseselt mõõdetav ning mille kontseptsioon põhineb ideele, et osad piirkonnad on põhjavee reostuse suhtes tundlikumad kui teised. Keskkonnatingimused võivad pakkuda põhjaveele kaitset looduslike ja antropogeensete tegurite eest. Sellest tulenevalt saab põhjavee kaitstuse taset hinnata, arvestades piirkonna geoloogilisi ja hüdrogeoloogilisi tingimusi (Gogu & Dassargues, 2000).

Põhjavee kaitstuse hindamise täpsuse määrab olemasolevate andmete kogus ja kvaliteet. Peamiselt kasutatakse põhjavee loodusliku kaitstuse määramisel infiltratsiooni (sademete maapõue imbumist) ning mulla, aeratsioonivööndi ja küllastusvööndi omadusi. Teisejärgulistena kasutatakse maapinna topograafiat ning põhja- ja pinnavee omavahelisi seoseid (Vrba & Zaporozec, 1994).

Põhjavee loodusliku kaitstuse taseme ehk reostusohklikkuse suuruse määrab peamiselt teekond reostuse allikast põhjaveekihini. Reoaine füüsilist olekut ja keemilist koostist võivad mõjutada mitmed füüsikalised ja keemilised protsessid, mis toimuvad mullas, aeratsioonivööndis ja küllastusvööndis. Need protsessid võivad vähendada reostuse mahtu (Gogu & Dassargues, 2000).

Põhjavee kaitstust saab kirjeldada reoaine liikumise teekonna järgi alguspunkt-teekond-sihtmärki kontseptuaalse mudeli (ingl *origin-pathway-target model*) abil (Joonis 1). Alguspunkt (ingl *origin*) on reoaine vabanemise piirkond. Põhjavee kaitstuse hindamise puhul võetakse alguspunktiks maapind. Teekonna (ingl *pathway*) all mõistetakse reoaine liikumist vabanemise piirkonnast punktini, mille kaitstust hinnatakse. Surveta veekompleksi puhul on teekond veetasemeni ning survele veekompleksi puhul põhjaveekihi ülemise pinnani (mitte survetasemeni). Sihtmärki (ingl *target*) on põhjaveekiht, mille kaitstust hinnatakse. Allika kaitstuse puhul on sihtmärgiks kaev või allikas ning teekond koosneb lisaks eelnevale ka horisontaalsest teekonnast põhjaveekompleksis (Zwahlen, 2004).



Joonis 1. Alguspunkt-teekond-sihtmärk kontseptuaalne mudel, muudetud Zwahlen (2004) järgi.

1.2 Põhjavee kaitstuse kaartide meetodikad

Põhjavee kaitstuse kaardid on tuletatud (hüdro)geoloogilistest kaartidest ja on seega interpretatiivsed ja kasutajakesksed. Põhjavee kaitstuse kaardid erinevad hüdrogeoloogilistest kaartidest, kuna ei kajasta põhjaveekompleksi parameetreid vaid nende omadusi seoses põhjavee kaitstusega. Kaardi peamine eesmärk on jagada maa-ala osadeks vastavalt piirkonna tundlikkusele inim- ja loodusmõjude vastu (Vrba & Zaporozec, 1994).

Põhjavee kaitstuse kaartide koostamise meetodika alusel eristatakse kahte liiki kaitstust: looduslikku ehk loomulikku kaitstust (ingl *intrinsic vulnerability*) ning spetsiifilist ehk integreeritud kaitstust (ingl *specific vulnerability*). Looduslik kaitstus hindab põhjavee kaitstust reostumise eest, võttes arvesse piirkonna geoloogilisi, hüdrooloogilisi ja hüdrogeoloogilisi tingimusi. Spetsiifiline kaitstus kujutab lisaks looduslikule komponendile ka inimõju: põhjavee kaitstust mingi konkreetse saasteaine või saasteainete grupi eest, võttes arvesse saasteaine omadused ja selle suhte loodusliku kaitstuse komponentidesse (Zwahlen 2004; Gogu & Dassargues, 2000; Vrba & Zaporozec, 1994).

Suur osa põhjavee kaitstuse kaartide koostamise meetoditest põhinevad summaarse indeksi tehnikal (ingl *overlay-index method*). Igale põhjavee kaitstust iseloomustavale parameetrile (muld, geoloogia, vee sügavus jne) määratakse indeks või punktide skoor. Parameetreid kokku liites

saadakse üldine põhjavee kaitstuse punktide skoor. Erinevate meetodite eesmärk on kaitstuse parameetreid võimalikult kvantitatiivselt hinnata. Summaarse indeksi meetodeid saab jaotada kaheks: hüdrogeoloogiliste tingimuste meetod (ingl *hydrogeological complex and settings method*) ja parameetrite süsteemi meetod (ingl *parametric system method*; Gogu & Dassargues, 2000).

Hüdrogeoloogiliste tingimuste meetod eeldab kvalitatiivselt hinnangut piirkonna kohta. Tehakse kindlaks ala hüdrogeoloogilised, hüdrograafilised ja geomorfoloogilised tingimused ning kuidas need üksteise koostoimel põhjavee kaitstust mõjutavad. Hüdrogeoloogiliste tingimuste meetod sobib uurimaks ulatuslikke alasid muutlike hüdrograafiliste ja geomorfoloogiliste tingimustega (Vrba & Zaporozec, 1994). Meetodit kasutab ka Maa-ameti juhend Eesti geoloogilise baaskaardi kaardistamiseks (Maa-amet, 2015a).

Parameetrite süsteemi meetodites on igale parameetrile määratud väärtuste vahemik, mis on põhjavee kaitstuse alusel jaotatud intervallideks, millele antakse hinnang vastavalt piirkonna tundlikkusele reostuse suhtes (Gogu & Dassargues, 2000; Vrba & Zaporozec, 1994). Parameetrite süsteemi kasutavad näiteks GOD-metoodika (Foster, 1987) ja AVI-metoodika (Van Stempvoort, Ewert & Wassenaar, 1993).

Parameetrite süsteemi meetodites eristatakse parameetrite kaalukuse ja hinnangu meetodeid, kus parameetritele antakse lisaks hinnangule ka kaalukus, et kirjeldada nende omavahelist suhet. Hinnang korrutatakse läbi kaalukusega ning tulemused liidetakse kokku, et konkreetse piirkonna põhjavee kaitstust kirjeldada. Tulemiks on suhteline hinnang ala kaitstuse kohta, seejuures kõrgema väärtusega alad on reostusele tundlikumad. Kõige keerulisem aspekt meetodi juures on lõpptulemuse jagamine kaitstuse alusel vahemikeks. Parameetrite kaalukuse ja hinnangu meetodi näiteks on DRASTIC-metoodika (Aller et al., 1987) ja EPIK-metoodika (Doerfliger, Jeannin & Zwahlen, 1999).

USA Keskkonnakaitse Agentuur avaldas 1987. aastal DRASTIC-metoodika hindamiseks põhjavee tundlikkust reostuse vastu. Akronüüm DRASTIC viitab seitsmele parameetrile, mida põhjavee kaitstuse määramiseks kasutatakse (Tabel 1): veetaseme sügavus (ingl *depth to water*), netoinfiltratsioon (ingl *net recharge*), põhjaveekihi omadused (ingl *aquifer media*), mulla omadused (ingl *soil media*), topograafia (ingl *topography*), aeratsioonivööndi mõju (ingl *impact of the vadose zone*) ja filtratsioonimoodul (ingl *hydraulic conductivity*; Aller et al., 1987).

Tabel 1. DRASTIC-metoodika parameetrite kirjeldused ja kaalukused

Parameeter	Kirjeldus (Aller et al., 1987; Vrba & Zaporozec, 1994)	Kaalukus
Veetaseme sügavus (D)	Näitab sügavust maapinnast kuni põhjaveetasemeni. Sügavamal olev veetase tähendab väiksemat võimalust põhjavee reostumiseks.	5
Netoinfiltratsioon (R)	Näitab kui suur hulk vett jõuab maapinnalt läbi aeratsioonivööndi põhjaveekihti. Infiltreruv vesi võimaldab reoainel põhjaveekihini jõuda. Kõrgem netoinfiltratsiooni väärtus viitab suuremale reostusohklikkusele.	4
Põhjaveekihi omadused (A)	Kirjeldab küllastusvööndit moodustavate setete omadusi. Parema veejuhtivusega kivimites saab reoaine kiiremini edasi liikuda.	3
Mulla omadused (S)	Kirjeldab kõige ülemist murenenud osa aeratsioonivööndist ning määrab kui palju vett saab maapinda imbuda. Orgaanika ja savi olemasolu võimaldab reoaine edasi liikumist vähendada.	2
Topograafia (T)	Näitab maapinna nõlvakallakust ning määrab kas sademevesi saab jääda maapinnale, et imbuda küllastusvööndisse.	1
Aeratsioonivööndi mõju (I)	Kirjeldab aeratsioonivööndi setete omadusi, mis kontrollivad reoainete lahjendumist ja läbimist küllastusvööndini. Parema veejuhtivusega pinnas võimaldab reoainel kiiremini põhjaveekihini jõuda.	5
Filtratsioonimoodul (C)	Kirjeldab põhjaveekihi võimet vett juhtida ja sellega reoainet põhjaveekihis edasi viia. Kõrgem filtratsioonimooduli väärtus tähendab reoaine kiiremat liikumist.	3

Parameetritele antakse hinne 1–10, seejuures 1 on suurima kaitstusega ja 10 on kõrgeima reostuse ohuga. Arvutuslikud parameetrid nagu põhjaveekihi sügavus, netoinfiltratsioon, topograafia ja filtratsioonimoodul jaotatakse arvuliselt väärtuse järgi vahemikesse. Põhjaveekihi ja mulla omaduste ning aeratsioonivööndi mõju parameetrid jaotatakse omaduste alusel gruppidesse. Igale parameetrile antakse kaalukus vastavalt tema suhtelisele olulisusele.

DRASTIC kaitstuse indeks (D_i) on summa seitsme parameetri hinnangu ja kaalukuse korrutisest:

$$D_i = \sum_{j=1}^7 (W_j \times R_j) \quad (\text{valem 1})$$

D_i – kaitstuse indeks

W_j – parameetri j kaalukus

R_j – parameetri j hinne

Kaitstuse indeksi tulemus jaotatakse klassideks. Aller et al. (1987) soovib klasside jaotamist kaheksasse kategooriasse võrdsete vahemikega ja kvalitatiivse hinnanguga (madal, kõrge kaitstus). Mitmed autorid on tulemused jaotanud kaitstuse indeksi väärtuste alusel võrdsete intervallidega viide põhjavee kaitstuse klassi vastavalt parameetrite leviku statistilisele analüüsile. Kaitstuse klasside õigsust on kontrollitud seoses nitraatide levikuga põhjavees (Barzegar et al., 2019; Huan, Wang & Teng, 2012; Kadkhodaie et al., 2019).

DRASTIC-metoodika on maailmas laialt levinud ja populaarne viis põhjavee kaitstuse hindamiseks (Shirazi, Imran & Akib, 2012), mida on kasutatud näiteks Jaapanis (Babiker, Mohamed, Hiyama & Kato, 2005), Hiinas (Huan et al., 2012), Indias (Rahman, 2008) ja Portugalis (Stigter, Ribeiro & Dill, 2006). Mitmed autorid on kasutanud DRASTIC-metoodikat originaalkujul ja valemi (1) abil koostanud põhjavee kaitstuse kaarte (Babiker et al., 2005; Carreras et al., 2015; Chitsazan & Akhtari, 2009; Kim & Hamm, 1999).

DRASTIC-meetodi muutmine ja täiustamine annab mitmete autorite tööde põhjal paremaid tulemusi kui metoodika originaalkujul kasutamine (Barzegar et al., 2019; Moustafa, 2019; Neshat et al., 2014). Peamiselt muudetakse DRASTIC-meetodit statistilise andmetöötlemise tulemusel, kus korreleerides parameetrite kaalukusi võetakse arvesse piirkonnas levivate nitraatide sisaldused (Huan et al., 2012).

Näitena DRASTIC-metoodika modifitseerimise kohta võib välja tuua KARSTIC-meetodi peamiselt karbonaatsete kivimite põhjaveekihtide kaitstuse hindamiseks. D-parameeter (põhjaveekihi sügavus) on asendatud K-parameetriga, mis iseloomustab karstiasid. Põhjaveekihi sügavuse mõju on liidetud I-parameetritele (aeratsioonivööndi omadused). Kuna karbonaatsetes kivimites levivad karstialad, mis on kõrge reostusohklikkusega piirkonnad, on vajalik nende mõju hindamine põhjaveekihi kaitstusele (Davis, Long & Wireman, 2002).

Eestis on varem DRASTIC-meetodi põhimõtteid kasutanud 1995. aastal Saaremaa põhjavee reostuskaitstuse kaardi (mõõtkavas 1:350 000) koostamisel Teiter (1995) bakalaureusetöös. Antud kaardi koostamise metoodikas lähtuti DRASTIC-meetodi põhimõtetest, kuid muudeti parameetreid ja nende kaalukust ning kasutati lisaks ka AVI-meetodit. Algse seitsme parameetri asemel kasutati nelja: pinnakatte läbilõike analüüs, põhjavee toitealad, pinnakatte setted ja karstialad (võeti automaatselt kaitsmata alaks). Tulemuseks saadi kaart, milles jaotati alad kuueks põhjavee kaitstuse klassiks (Teiter, 1995).

1.3 Eesti põhjavee kaitstuse kaardid

Varasemaid geoloogilisi ja hüdrogeoloogilisi kaarte aluseks võttes koostati 1982. aastal esimene kogu Eestit hõlmav põhjavee kaitstuse kaart mõõtkavas 1:200 000. Kaart koostati reoaine infiltratsioonija järgi, mis tugines 1981. aastal loodud põhjavee kaitstuse kriteeriumitele (Savitskaja jt., 1982). Arvutustel võeti arvesse kvaternaarisetete paksust, heitvee kihi paksust, filtratsioonimoodulit ning aeratsioonivööndi looduslikku niiskust.

Arvutuste läbiviimisel arvestati, et reoaineks on põllumajanduse ja toiduainete tööstuse heitveed ning kommunaalveed, aeratsioonivööndiks loeti kogu paksuses kvaternaarisetteid ning infiltratsiooni suund loeti vertikaalseks. Antud kriteeriumid olid hiljem aluseks ka L. Savitskaja poolt 1992. aastal koostatud Eesti põhjavee kaitstuse ja antropogeense koormuse kaardi tugilegendile, kus täpsustati põhjavee kaitstuse klasside definitsioone vastavalt pinnakatte tüübile ja paksusele (Kajak jt., 1992):

1. kaitsmata alad (reoaine infiltratsiooniaeg läbi kvaternaarisetete $T \leq 30$ ööpäeva):
 - a. alvarid;
 - b. moreeni ≤ 2 m ($k = 0,01-0,5$ m/d);
 - c. liiva, kruusa ≤ 20 m ($k = 1-5$ m/d).
2. nõrgalt kaitstud alad (reoaine infiltratsiooniaeg läbi kvaternaarisetete $T = 30-180$ ööpäeva):
 - a. moreeni 2–10 m ($k = 0,01-0,5$ m/d);
 - b. savi, liivsavi ≤ 2 m ($k = 0,0001-0,005$ m/d);
 - c. liiva, kruusa 20–40 m ($k = 1-5$ m/d).

3. keskmiselt kaitstud alad (reoaine infiltratsiooniaeg läbi kvaternaarisetete $T = 180\text{--}360$ ööpäeva):
 - a. moreeni 10–20 m ($k = 0,01\text{--}0,5$ m/d);
 - b. savi, liivsavi 2–5 m ($k = 0,0001\text{--}0,005$ m/d).
4. kaitstud alad (reoaine infiltratsiooniaeg läbi kvaternaarisetete $T > 360$ ööpäeva):
 - a. moreeni > 20 m ($k = 0,01\text{--}0,5$ m/d);
 - b. savi, liivsavi > 5 m ($k = 0,0001\text{--}0,005$ m/d).

Järgmine tervet Eestit hõlmav põhjavee kaitstuse kaart koostati 2001. aastal mõõtkavas 1:400 000 (Perens, 2001). Metoodilise juhendina kasutati Rahvusvahelise Hüdrogeoloogide Assotsiatsiooni poolt välja antud juhendeid ja standardlegende (Struckmeier & Margat, 1995; Vrba & Zaporozec, 1994) ja Eesti põhjavee kaitstuse ja antropogeense koormuse kaardi (mõõtkavas 1:50 000) legendi (Kajak jt., 1992).

1992. aastal koostatud Eesti põhjavee kaitstuse ja antropogeense koormuse kaardi tugilegend klassifikatsioon on edaspidi olnud aluseks mitmetele põhjavee kaitstuse kaartidele. T. Mardim koostas 1993. aastal Hiiumaa põhjavee kaitstuse kaardid mõõtkavas 1:50 000 (Suuroja jt., 1993). Tartu maakonna põhjavee kaitstuse kaart mõõtkavas 1:100 000 valmis 2001. aastal (Polikarpus, 2001). 2003. aastal valmisid Harju alamvesikonna põhjavee kaitstuse kaart mõõtkavas 1:50 000 (Savitskaja, Savva & Jashtshuk, 2003) ja Pärnu maakonna põhjavee kaitstuse kaart mõõtkavas 1:100 000 (Perens & Polikarpus, 2003). Saare maakonna põhjavee kaitstuse kaart mõõtkavas 1:50 000 valmis 2004. aastal (Perens jt., 2004).

Eesti Geoloogiakeskuses viidi läbi Eesti geoloogilise baaskaardi kaardikomplektide kaardistamist (mõõtkavas 1:50 000) 1991–2017. aastatel (Klein, 2012). Kaardikomplekti kuuluvad ka põhjavee kaitstuse kaardid, mida on kokku koostatud 29 tükki (Joonis 2).

Esimesed geoloogilise baaskaardi kaardilehtede põhjavee kaitstuse kaardid valmisid Eesti Geoloogiakeskuses Eesti Keskkonnaministeeriumi tellimusel: Tallinn ja Rohuneeme (Perens jt., 2003), Maardu (Mardim, 2002a), Kehra (Mardim, 2002b), Prangli (Mardim, 2002c) ning Loksa (Mardim, 2002d).

1.4 Eesti põhjavee kaitstuse kaardi koostamise meetodika

Veeseaduse §68-st lg-st 3 lähtuvalt jaotatakse Eesti territooriumi alad põhjaveekihi loodusliku kaitstuse alusel järgmiselt:

- 1) kaitsmata põhjaveega ala on karstiala, alvar ja ala, kus põhjaveekihil lasub kuni 2 meetri paksune moreenikiht või kuni 20 meetri paksune liiva- või kruusakiht;
- 2) nõrgalt kaitstud põhjaveega ala, kus põhjaveekihil lasub 2–10 meetri paksune moreenikiht või kuni 2 meetri paksune savi- või liivsavikiht või 20–40 meetri paksune liiva- või kruusakiht;
- 3) keskmiselt kaitstud põhjaveega ala, kus põhjaveekihil lasub 10–20 meetri paksune moreenikiht või 2–5 meetri paksune savi- või liivsavikiht;
- 4) suhteliselt kaitstud põhjaveega ala, kus põhjaveekihil lasub üle 20 meetri paksune moreenikiht või üle 5 meetri paksune savi- või liivsavikiht;
- 5) kaitstud põhjaveega ala, kus põhjaveekiht on kaetud regionaalse veepidemega.

Käesoleva magistritöö koostamise hetkel on kehtivaks Eesti geoloogilise digitaalkaardistamise juhendiks 2015. aastal koostatud Maa-ameti juhendi versioon 2.4 (Maa-amet, 2015a) ja selle seletuskiri (Maa-amet, 2015b). Juhendi koostamisel kasutati rahvusvahelist hüdrogeoloogiliste kaartide tugilegendit (Struckmeier & Margat, 1995) ja Eesti hüdrogeoloogilise kaardi, mõõtkavas 1:50 000, tugilegendit (Kajak jt., 1992).

Põhjavee kaitstuse klassid näitavad vaadeldava piirkonna põhjavee tundlikkust maapinnalt lähtuva punkt- või hajureostuse suhtes. Vaadeldavaks (e kaitstavaks) põhjaveeks on maapinnalt esimese aluspõhjalise veekompleksi põhjavesi, tsentraalselt tarbitava Kvaternaari veekihi põhjavesi või mattunud orgudes Kvaternaari liivades-kruusades levivate veekihtide põhjavesi.

Klasside moodustamise aluseks on hüdrogeoloogiliste tingimuste meetod (ingl *hydrogeological complex and setting method*; Vrba & Zaporozec, 1994), millega hinnatakse reostuse leviku kiirust maapinnalt põhjavette. Eesti meetodika puhul ei võeta arvesse vee looduslikku isepuhastusvõimet, mille järgi on mullakihil, aeratsioonivööndil ja põhjaveekihil võime bioloogiliste, füüsikaliste ja keemiliste protsesside käigus erinevaid reoaineid siduda, adsorbeerida ja lagundada.

Põhjavee kaitstuse klasside koostamisel määratakse esimese etapina vaadeldava põhjavee leviku piirkond. Teisena eristatakse setete iseloomu ja paksuste järgi loodusliku kaitstuse seisukohalt sarnased alad (Tabel 2).

Tabel 2. Põhjavee kaitstuse kaudne hindamine pinnakatte paksuse ja muude põhjavee looduslikku kaitstust mõjutavate tegurite alusel (Maa-amet, 2015b)

KLASS	Põhjavee kaitstuse klassi üheselt määravad geoloogilised nähtusklassid			Klasside levikut korrigeerivad geoloogilised nähtusklassid	
	Pinnakatte paksus (m), litoloogia				
	Moreen, aleuriit või saviliiv	Savi või liivsavi		+ 1 klass (kaitstuse poole)	- 1 klass (kaitsmatuse poole)
Kaitsmata	<2	Pole	Alvar, karstiala, aluspõhja lõikuv vooluveekogu		-
Nõrgalt kaitstud	2...10	<2		<ul style="list-style-type: none"> Savi või liivsavi esinemine kvaternaarisetetes Savi lamamiga sood Tõusuallikate olemasolu Tüsedad (>1 m) järvelubja kihi või järvemuda esinemine 	<ul style="list-style-type: none"> Karstilehter/alang alvari lähedal Glatsiofluviaalsed setted aluspõhjal Rikutud põhjaveerežiimiga alad Poorsete kivimite põhjaveekiht Purdsetetega täitunud mattunud org aluspõhjas Aluspõhja kivimeid avavad magistraalkraavid, vooluveekogude orundid
Keskmiselt kaitstud	10...20	2...5	Aluspõhjalised veepidemed paksusega >2 m, tasakaalualad		
Suhteliselt kaitstud	20...50	5...10	Põhjavee ülevoolu piirkonnad		
Kaitstud	> 50	> 10	Regionaalsed veepidemed		

Seejärel tehakse kindlaks antud piirkonnas põhjavee kaitstust mõjutavad geoloogilised ja geograafilised nähtused: karstialad, aluspõhjalased veepidemed paksusega üle 2 m, regionaalsete veepidemete avamus, ülevoolualad jne. Viimaks määratakse saadud info alusel piirkondadele kaitstuse klass. Lisaks põhjavee kaitstuse aladele kuvatakse kaardil mitmeid teisi nähtusklassi, nende hulgas: maapinnalt esimese aluspõhjalise veekompleksi hüdroisohüpsid ehk põhjaveetaseme samakõrgusjooned, pinnakatte paksuse isojooned, savi levikupiirkonnad, sood, mattunud orud, põhjavee ülevoolu piirkonnad, karstiväljad, karstiaugud, kaevandusalad ja allmaakaevandused, mineraalsuse samaväärtusjooned, põhjavee liikumise suunad ja tarbepuurkaevud veevõtuga > 5 m³ (Maa-amet, 2015a; Maa-amet, 2015b).

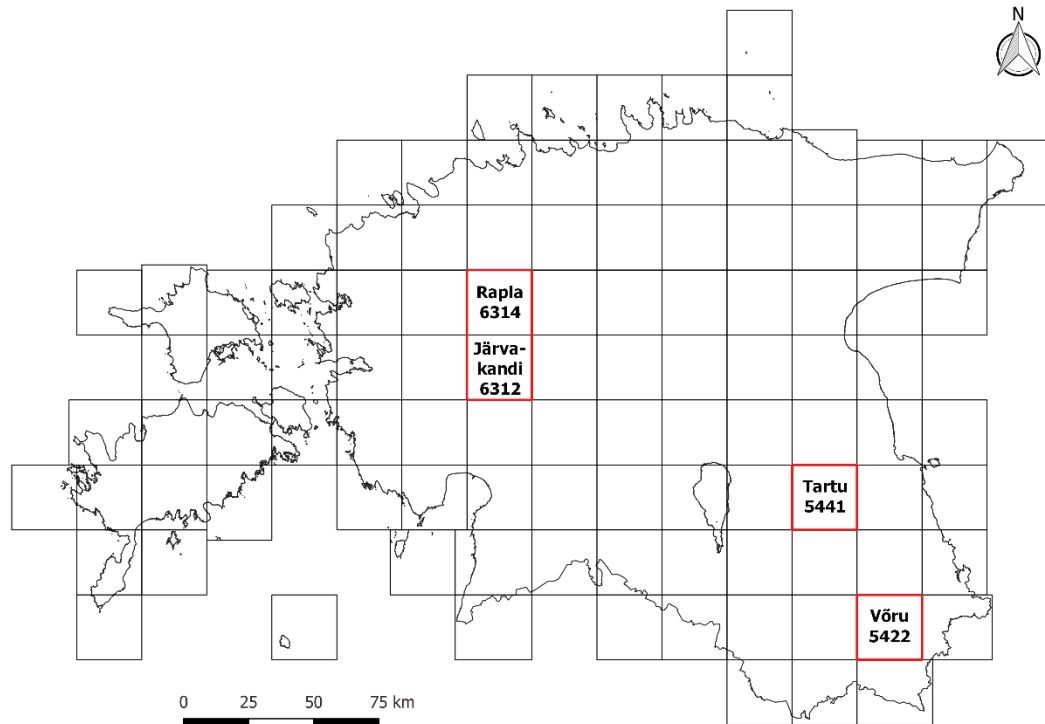
Eesti geoloogilise baaskaardi andmed kogutakse ArcGIS'i geoandmebaasi. Vastavalt koostatud kaartidele koosneb geoandmebaas üheksast andmekogust, nende hulgas ka hüdrogeoloogia ja põhjavee kaitstus (Lisa 1; Maa-amet, 2015a). Kaardistatud nähtused on grupeeritud objektiklassidesse vastavalt elemendi tüübile (punkt, joon, pind).

Eesti põhjavee kaitstuse kaardistamise meetodikas on säilitatud sama kaitstuse klasside koostamise põhimõtte alates 1982. aastast. Võrreldes 1:50 000 mõõtkavas kaardistamise algusega 1990. aastatel on toimunud oluline areng geoinfosüsteemide (GIS) põhiste meetodite kasutamises. Terve kaardistamise süsteem on muutunud geoandmebaasi põhiseks ning andmeid sisestatakse ArcGIS programmis Maa-ameti faktilise materjali toimetaja rakendusega (Maa-amet, 2015a). Põhjavee kaitstuse kaardi legendi on küll täiendatud, kuid algselt peamiselt reoaine infiltratsioonaja järgi loodud põhjavee kaitstuse klasside definitsioonis on jäänud alles vaid pinnakatte setete litoloogilise tüübi ja paksuse komponendid, mille väärtused on säilinud muutumatuna (Maa-amet, 2015b). Arvestades järjest areneva GIS-meetodeid geoloogiliste kaartide koostamisel (Roosaare, Mõisja & Aunap, 2019), on vajalik ka põhjavee kaitstuse kaartide koostamise meetodika arendamine ja automatiseerimine kasutades tänapäeva võimalusi ja meetodeid.

2. Materjalid ja meetodika

2.1 Uuringuala

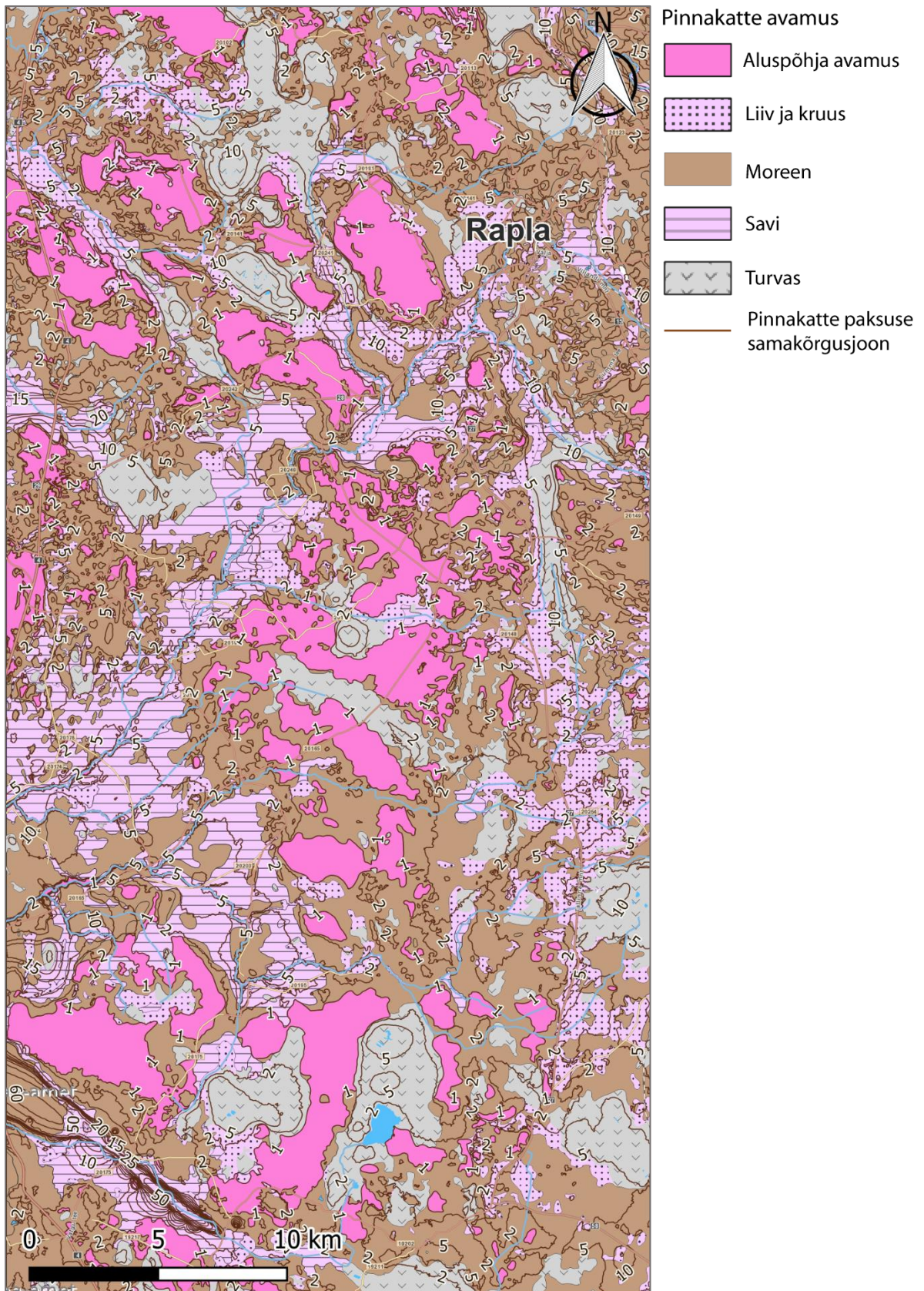
DRASTIC-metoodika Eestis kasutamiseks võeti uuringualadeks Eesti geoloogilise baaskaardi kaardilehed Rapla (6314), Järvakandi (6312), Tartu (5441) ja Võru (5422) (Joonis 3), kus on varasemalt Maa-ameti kaardistamise juhendi alusel koostatud põhjavee kaitstuse kaardid (Vahtra, 2018; Männik, 2020; Perens, 2007; Rohtla, 2014).



Joonis 3. Uuringualade paiknemine Eesti geoloogilise baaskaardi kaardilehtedel.

Rapla ja Järvakandi kaardilehed esindavad piirkonda, kus esimeseks aluspõhjaliseks veekompleksiks, mida kaitstuse seisukohalt hinnatakse, on Siluri-Ordoviitsiumi karbonaatsete kivimite põhjaveekompleks. Siluri-Ordoviitsiumi põhjaveekompleks toitub oma avamusel sademeveest ja võib kergesti reostuda, eriti õhukese pinnakattega aladel (Perens, 2001).

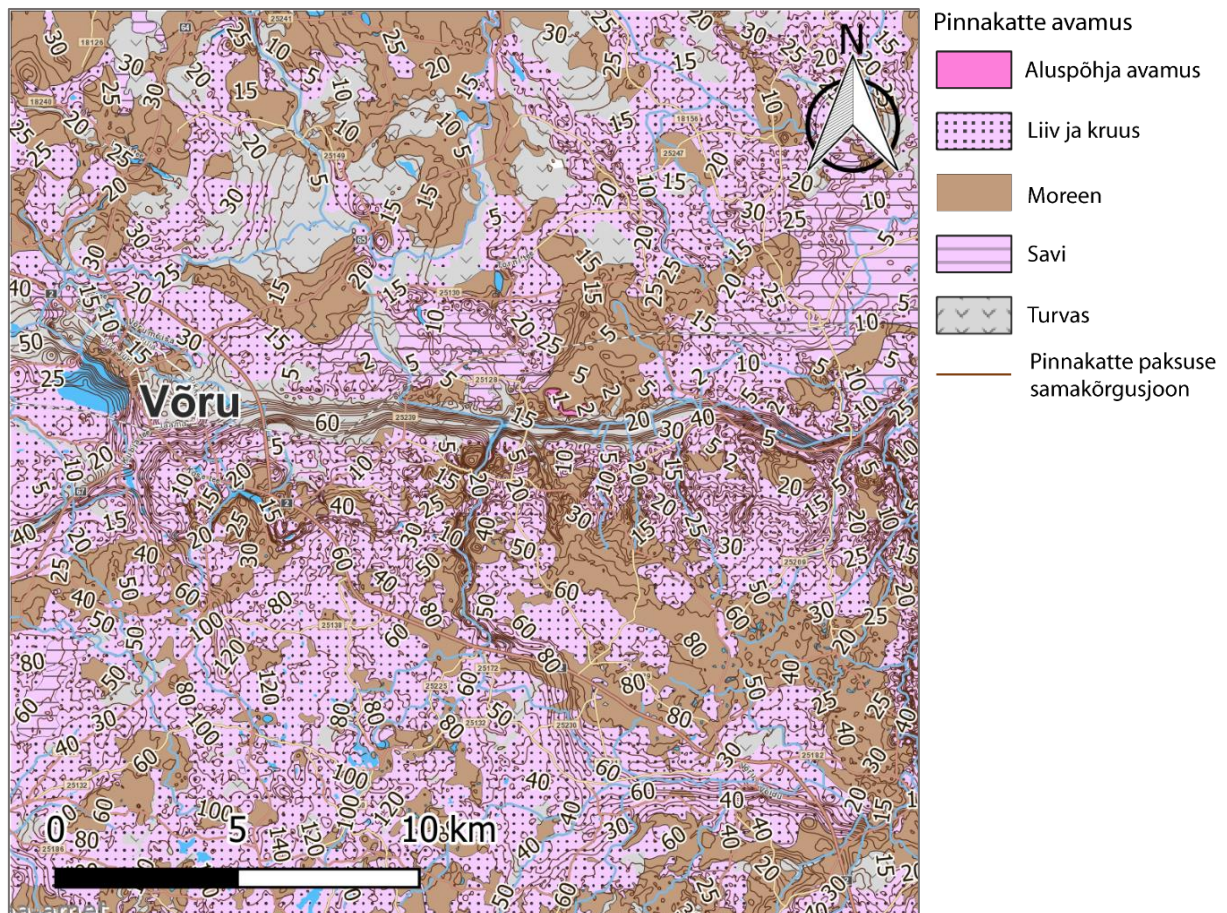
Pinnakatte setetest on kaardilehtede piirkonnas enam levinud glatsiaalsed setted (moreenid), glatsiofluviaalsed setted (liivad, kruusad) ja jääjärvelised setted (liivad, savid; Joonis 4). Pinnakate on suhteliselt õhuke, keskmine paksus on alla 5 m. Kaardilehtede pindalast moodustavad õhukese pinnakattega (alla 1 m) alad umbes 16%. Suurimad pinnakatte paksused (kuni 70 m) on mattunud orgudes (Suuroja jt., 2017a; Suuroja jt., 2017b).



Joonis 4. Pinnakatte avamused ja paksused Rapla ja Järvakandi kaardilehtedel. Muudetud Ploom (2016) ja Ploom (2017) järgi.

Võru kaardileht esindab piirkonda, kus esimeseks aluspõhjaliseks veekompleksiks on Kesk-Devoni liivakivide põhjaveekompleks, mis toitub oma levikualal läbi Kvaternaari veekompleksi infiltreeruvatest sademetest, peamiselt Haanja, Karula ja Otepää kõrgustikelt (Põldvere jt., 2016).

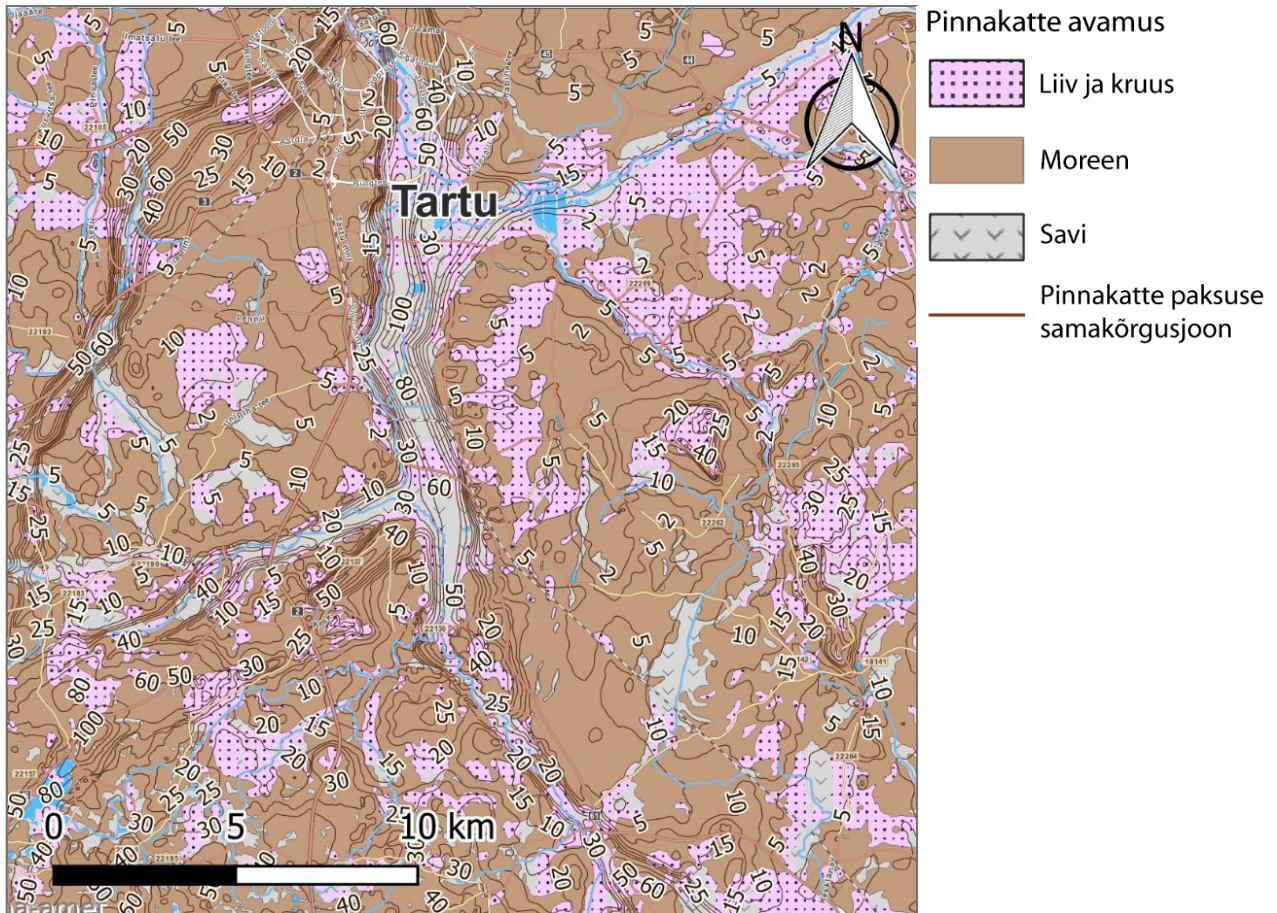
Võru kaardilehe piirkonna pinnakate koosneb peamiselt moreenidest ja liustikuveelistest setetest (Joonis 5). Kaardilehe keskel asub Võru orund ning lõunapoolsele osale jääb Haanja kõrgustiku kõrgeim keskosa. Haanja kõrgustik kujutab endast künkliku moreenreljeefi, küngaste laugedel lagedel katavad moreeni kohati jääjärvelised liivad-savid. Kaardilehe põhjapoolses levivad moreentasandikul 1–20 m paksused pinnakatte setted. Haanja kõrgustiku pinnakatte setete paksus on kõrgeimas osas 100–190 m, nõlvadel 50–60 m. Võru orundis ulatub pinnakatte setete paksus 60–80 meetrini (Põldvere jt., 2016).



Joonis 5. Pinnakatte avamused ja paksused Võru kaardilehel. Muudetud Ariva & Rohtla (2011) järgi.

Tartu kaardileht esindab samuti piirkonda, kus esimeseks aluspõhjaliseks veekompleksiks, mida kaitstuse seisukohalt vaadeldakse, on Kesk-Devoni liivakivide põhjaveekompleks. Põhiliselt toitub veekompleks sademetest ning peamiseks toitealaks on Otepää kõrgustik (Põldvere jt., 2007).

Tartu kaardilehel on moreentasandikku lõikunud Tartu-Aardla ja Tatra ürgorud. Moreentasandiku pinnakatte paksus on keskmiselt 5 m, lõunapoolses osas 5–15 m (Joonis 6). Tartu-Aardla mattunud orus ulatub pinnakatte setete paksus 52–89 meetrini, Tatra orus on setete paksus 21–34 m. Otepää kõrgustikul ulatub pinnakatte paksus 50–60 meetrini (Pöldvere jt., 2007).



Joonis 6. Pinnakatte avamused ja paksused Tartu kaardilehel. Muudetud Rohtla & Tilk (2006) järgi.

2.2 DRASTIC-metoodika muutmine

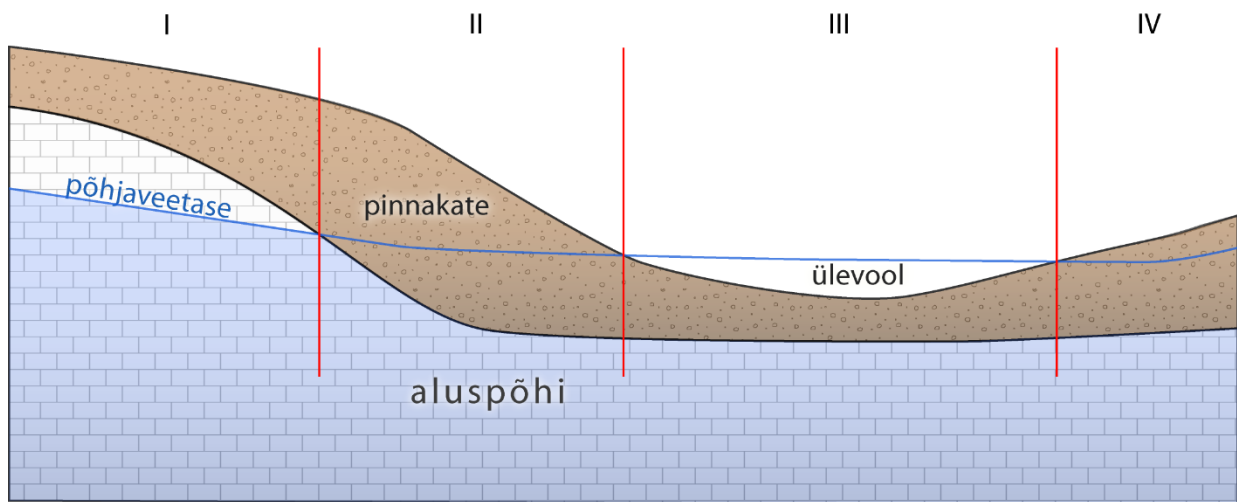
Põhjavee kaitstuse hindamiseks DRASTIC-metoodikaga kasutati Eesti geoloogilise baaskaardi ArcGIS'i geoandmebaasi andmeid (Maa-amet, 2020; Eesti Geoloogiateenistus, 2020). ArcGIS'i geoandmebaasi andmed avati vabavaralise geoinfoprogrammiga QGIS 3.4.11, mida kasutati ka andmete töötlemiseks ja analüüsimiseks. Kaartide koostamiseks vajalikud maapinna kõrgusandmed saadi Maa-ameti LiDAR-andmestiku maapinnapunktidel põhinevast 10-meetrise lahutusega rasterkõrgusmudelist (edaspidi DEM) (Maa-amet, 2012–2017).

DRASTIC-metoodika kasutab originaalkujul seitset parameetrit: veetaseme sügavus, netoinfiltratsioon, põhjaveekihi omadused, mulla omadused, topograafia, aeratsioonivööndi omadused ja filtratsioonimoodul (Aller et al., 1987). Parameetreid muudeti vastavalt Eesti geoloogilistele tingimustele.

2.2.1 Veetaseme sügavus (D)

Veetaseme sügavuse parameeter võimaldab hinnata reoaine teekonna pikkust maapinnast kuni kaitstuse seisukohast hinnatava ehk esimese aluspõhjalise põhjaveekihi. Mida sügavamal asub põhjaveetase, seda suurem on tõenäosus, et reoaine lahjendub enne selleni jõudmist. Maapinnalähedane põhjaveetase saab seega kõrgema reostusohutikkuse hinnangu. D-parameeter on kaalukusega 5.

DRASTIC-metoodikat Eestis rakendades tekkis vajadus muuta D-parameetri olemust, et võrrelda põhjaveetaset hoopis aluspõhja pealispinna ehk pinnakatte lamamiga (Joonis 7). Kui põhjaveekihi veetase on aluspõhja pealispinnast kõrgemal, on vesi survealine ja reoaine liikumine põhjaveekihti takistatud. Põhjaveetaseme sügavuse asemel kirjeldab antud töös muudetud DRASTIC-metoodikas reoaine teekonna pikkust aeratsioonivööndi mõju parameeter (vt ptk 2.2.6).



Joonis 7. D-parameetri joonis. I piirkond viitab situatsioonile, kus põhjaveetase on allpool aluspõhja pealispinda ja põhjaveekiht on surveta. II–IV piirkonnas on põhjaveekiht survealine, sest veetase on kõrgemal aluspõhja pealispinnast. Antud piirkondades on reoaine levik põhjaveekihti takistatud. III situatsioon viitab olukorrale, kus põhjavee survetase on maapinnast kõrgemal ja tegemist on põhjavee ülevoolu alaga.

D-parameetri väärtuse hindamiseks koostati põhjaveetaseme pinda kujutav rasterfail, millest lahutati aluspõhja pealispinna rasterfail. Põhjaveetaseme rasterpinna loomiseks kasutati põhjaveekomplekside veetasemete samakõrgusjooni (ehk hüdroisohüpsed), mis on koostatud piirkonna kaevude veetasemete põhjal. Selleks, et põhjaveetaseme pinda täpsemalt kujutada, kasutati lisaks jõgede andmeid Keskkonnaagentuuri Eesti looduse infosüsteemi (EELIS) andmebaasist WFS-teenuse kaudu (Keskkonnaagentuur, 2020). Tulemusele anti D-parameetri hinnang ning negatiivne väärtus viitab põhjaveetasemele, mis asub allpool aluspõhja pealispinda ja positiivne väärtus kõrgemal (Tabel 3).

Tabel 3. Põhjaveekihi surve- või veetaseme sügavuse väärtuse vahemikud muudetud meetodikas

Põhjaveetaseme sügavus võrreldes aluspõhja pealispinnaga (m)	Hinnang
< -10	10
-10...-5	9
-5...-1	7
-1...0	6
0...1	5
1...3	3
3...5	2
> 5	1

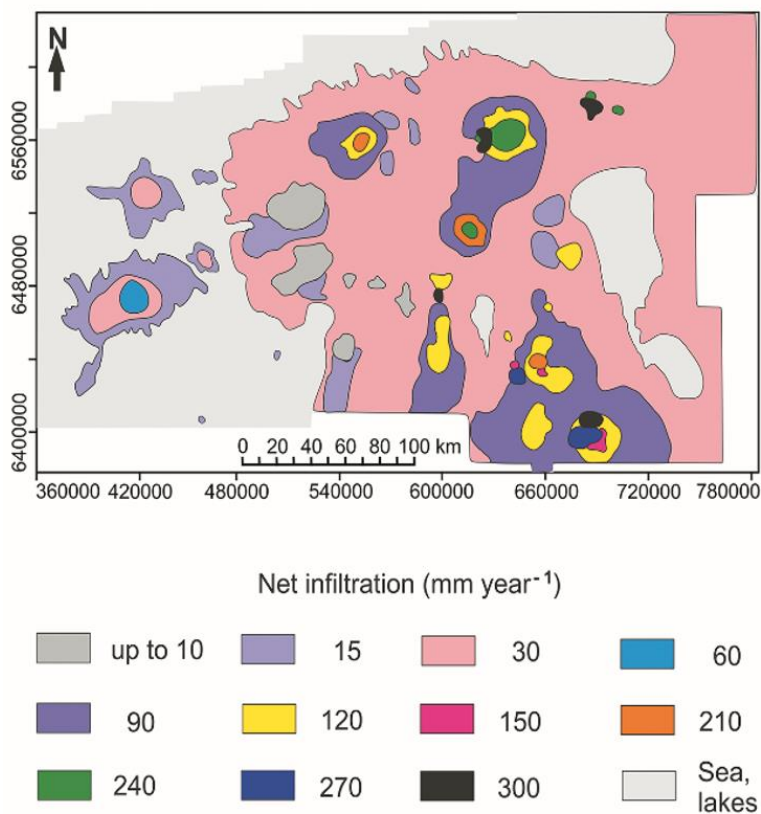
Põhjaveetaseme sügavust kujutava rasterfaili loomiseks kasutati geoandmebaasi objektiklassi HG_Hüdroisohüps, kust tehti väljavõtte uuritavas piirkonnas leviva esimese aluspõhjalise põhjaveekompleksi hüdroisohüpsidest, millest eraldati käänupunktid QGIS'i tööriistaga *extract vertices*. Ka jõgede andmed muudeti käänupunktideks ning Maa-ameti DEM'i abil lisati neile kõrgusandmed. Põhjaveetaseme pinna rasterfail loodi QGIS'i interpolatsiooni tööriistaga *natural neighbour* ning tulemus lahutati maapinna DEM'ist tööriista *raster calculator* abil. Saadud rasterfailis olevad negatiivse väärtusega piirkonnad iseloomustavad põhjavee ülevoolu alasid. Võttes arvesse interpolateerimise teatud ebatäpsuseid (rasterfaili piksli suurus 80 m, enam kui 10 korda suurem jõe tegelikust laiusel), loeti ülevooluks põhjaveetaseme pind, mis asus rohkem kui 1 m kõrgemal maapinna DEM'ist.

Kuna muudetud DRASTIC-metoodika käigus on vajalik pinnakatte paksust kujutava rasterfaili loomine (vt ptk 2.2.6), kasutati antud faili ka D-parameetri hindamise puhul. Maa-ameti DEM'ist lahutati pinnakatte paksuse rasterfail, et kujutada aluspõhja pealispinda. Eelnevalt loodud põhjaveetaseme pinnast lahutati aluspõhja pealispind, et kujutada nende vahelist erinevust. Tööriistaga *reclassify by table* jaotati saadud tulemused D-parameetri hinnangu alusel vahemikeks.

2.2.2 Netoinfiltratsioon (R)

Kaitstuse seisukohalt vaadeldav esimene aluspõhjaline veekompleks toitub sademetest, mis läbi aeratsioonivööndi infiltreeruvad põhjaveekihti ja seetõttu võivad transportida ka reoaineid. Mida suurem kogus vett maapinnalt infiltreerub, seda suurem on põhjavee reostusohklikkus. Netoinfiltratsioon kirjeldab vee kogust, mis jõuab pindala ühiku kohta läbi aeratsioonivööndi põhjaveekihti. Hindamisel arvestatakse keskmist aasta jooksul infiltreerunud vee kogust ning kõrvale jäetakse vee edasine levik ja sajuperioodide intensiivsus (Aller et al., 1987).

Netoinfiltratsiooni hindamiseks kasutati Vallner & Porman (2016) poolt loodud netoinfiltratsiooni pindalalise jaotumise kaarti Eesti ala kohta (Joonis 8).



Joonis 8. Netoinfiltratsiooni (mm aastat⁻¹) pindalaline jaotumine Eestis (Vallner & Porman, 2016)

Netoinfiltratsiooni kaardilt saadud väärtused jagati DRASTIC-metoodika alusel vahemikeks ja neile määrati kaitstuse hinnang (Tabel 4). Netoinfiltratsioon on DRASTIC-metoodikas kaalukusega 4.

Tabel 4. Netoinfiltratsiooni väärtuste vahemikud Aller et al. (1987) järgi

Netoinfiltratsioon (mm aastas⁻¹)	Hinnang
0–50	1
50–100	3
100–175	6
175–250	8
> 250	9

2.2.3 Põhjaveekihi omadused (A)

Põhjaveekihi omaduste parameetri abil kirjeldatakse kaitstuse seisukohalt vaadeldavat esimest aluspõhjalist veekompleksi moodustava kivimi omadusi nagu litoloogia, tekstuur ja struktuur. Antud omadused mõjutavad põhjaveekihi sisest reoaine transporti. Pinnase veejuhtivus on suurem kõrgema efektiivse poorsuse ning suurema tühimike ja lõhede arvuga kivimites. Põhjaveekihi omaduste parameetri kaalukus on 3.

Põhjaveekihi omaduste hindamisel kasutati Eesti geoloogilise baaskaardi ArcGIS'i geoandmebaasi objektiklassi HG_Veekompleks, milles tuuakse välja erinevad põhjaveekompleksid ja jaotatakse klassidesse veejuhtivuse alusel. Vastavalt DRASTIC-metoodikas soovitatud väärtusvahemikele (Aller et al., 1987) lisati igale nähtusele QGIS'i tööriistaga *field calculator* juurde A-parameetri hinnang (Tabel 5).

Tabel 5. Muudetud DRASTIC-metoodika põhjaveekihi omaduste hinnang

Tunnus	Hinnang
Veepide	1
Olulise põhjaveevaruta veekihiid	3
Kvaternaari veekompleks veeandvusega 0,1–0,5 l/s/m	4
Kvaternaari veekompleks veeandvusega 0,5–1,0 l/s/m	5
Kvaternaari veekompleks veeandvusega > 0,5 l/s/m	6
Liivakivi veekompleks veeandvusega < 0,5 l/s/m	5
Liivakivi veekompleks veeandvusega 0,5–1,0 l/s/m	6
Liivakivi veekompleks veeandvusega > 1,0 l/s/m	7
Karbonaatsete kivimite veekompleks veeandvusega < 0,1–1,0 l/s/m	9
Karbonaatsete kivimite veekompleks, veeandvusega 0,1–0,5 l/s/m	9
Karbonaatsete kivimite veekompleks, veeandvusega 0,5–1,0 l/s/m	9
Karbonaatsete kivimite veekompleks, veeandvusega 1,0–5,0 l/s/m	10
Karbonaatsete kivimite veekompleks, veeandvusega > 5,0 l/s/m	10

2.2.4 Mulla/pinnakatte omadused (S)

DRASTIC-metoodikas kirjeldatakse S-parameetriga aeratsioonivööndi kõige ülemise ning olulise bioloogilise aktiivsusega osa ehk mulla omadusi. Täpsemalt vaadeldakse maapinnast alates umbes 2 meetri sügavust osa. Muld kontrollib oluliselt vee kogust, mis saab maapinda infiltreeruda ja edasi aeratsioonivööndisse liikuda. Muld mängib tähtsat rolli reoainete adsorbeerimisel ja lagundamisel läbi bioloogiliste, füüsikaliste ja keemiliste protsesside. Seega on mulla omadused peamiselt olulised hinnates spetsiifilisi reoaineid ja nende lahustumist (Aller et al., 1987; Vrba & Zaporozec, 1994).

Kuna Eesti metoodikas ei võeta arvesse vee looduslikku isepuhastusvõimet (sh mullakihi mõju; Maa-amet, 2015b), siis muudeti käesoleva töö DRASTIC-metoodikas S-parameetri olemust. Mulla omaduste asemel hinnati pinnakatte omadusi, mida on Eesti põhjavee kaitstuse hindamise puhul peetud palju olulisemaks (Veeseadus, 2019). Seetõttu asendati S-parameeter algse DRASTIC-metoodika aeratsioonivööndi omadustega. Mulla omaduste parameetri kaalukus alguses DRASTIC-

metoodikas on 3, kuid kuna käesolevas töös on see muudetud pinnakatte omaduste parameetriks, hinnati selle kaaluks 5.

Pinnakatte omaduste hindamisel kasutati Eesti geoloogilise baaskaardi ArcGIS'i geoandmebaasi objektiklassi Q_Avamus, milles on välja toodud pinnakatte avamus litoloogia alusel. Vastavalt DRASTIC-metoodikas soovitatud väärtusvahemikele (Aller et al., 1987) lisati igale nähtusele QGIS'i tööriistaga *field calculator* juurde S-parameetri hinnang 1–10 (Tabel 6). Erandina hinnati savi ja viirsavi väärtusega -3, et tõsta nende kaalukust kaitstud alana, sest algne minimaalne väärtus ei võimaldanud > 5 m savi levikupiirkondasid hinnata suhteliselt kaitstud aladena. Lisaks geoandmebaasi objektiklassi Q_Avamus nähtustele arvestati ka karstialasid (geoandmebaasi objektiklassist HG_Alad), mis said automaatselt kõrgeima reostusohkkuse väärtuse 10.

Tabel 6. Pinnakatte omaduste hinnangud muudetud DRASTIC-metoodikas

Tunnus	Hinnang	Tunnus	Hinnang
Savi	-3	Eriteraline liiv	8
Viirsavi	-3	Peenliiv	8
Mereline muda	2	Liiv ja kruus	8
Järvemuda	2	Jämeliiv	9
Järvelubi	2	Kruus	9
Liivakas viirsete	4	Veerised ja munakad	9
Aleuriit	6	Aluspõhja avamus	10
Rabaturvas	6	Aluskorra avamus	10
Madalsooturvas	6	Karstiala	10
Moreen	7		

2.2.5 Topograafia (T)

Topograafia parameeter kirjeldab maapinna nõlvakallet. Maapinna kallakus võimaldab reoainete äravoolu. Tasase piirkonna puhul saavad reoained paigale jääda ja infiltreeruda (Aller et al., 1987). Topograafia parameetri hindamisel kasutati Maa-ameti maapinna DEM'i. QGIS'i tööriistaga *slope* arvutati rasterkõrgusmudelil uuringupiirkonna nõlvakalded. DRASTIC-metoodika juhendi alusel hinnati nõlvakallete vahemikke väärtusega 1–10 (Tabel 7). Selleks kasutati tööriista *reclassify by table*. Topograafia parameetri kaalukus on 1.

Tabel 7. Nõlvakalde väärtused ja hinnang Aller et al. (1987) järgi

Vahemik (%)	Hinnang
0–2	10
2–6	9
6–12	5
12–18	3
> 18	1

2.2.6 Aeratsioonivööndi mõju / pinnakatte paksus (I)

DRASTIC-metoodikas hinnatakse aeratsioonivööndi mõju parameetri abil pinnast, mis moodustab teekonna maapinnast põhjaveekihini (vt ptk 2.2.4). Käesolevas töös hinnatakse I-parameetriga pinnakatte paksust, mis on Eestis kehtestatud põhjavee kaitstuse klasside hindamisel olulisel kohal (Veeseadus, 2019).

Veeseaduses kehtestatud põhjavee kaitstuse klassides välja toodud pinnakatte paksuste vahemikest lähtudes jaotati need hinnanguga 1–10 (Tabel 8). Pinnakatte paksuse parameetri kaalukus on 5.

Tabel 8. Pinnakatte paksuse parameetri vahemikud ja hinnangud

Vahemik (m)	Hinnang
0–2	10
2–5	9
5–10	7
10–20	5
20–40	3
> 40	1

Pinnakatte paksuse hindamiseks kasutati geoandmebaasi objektiklassi QP_Isojoon, milles esitatakse pinnakatte paksuse samakõrgusjooned. Jooned tehti käänupunktideks QGIS'i tööriistaga *extract vertices* ning nende alusel interpoleeriti tööriista *natural neighbour* abil rasterpind pinnakatte paksuse väärtustega. Saadud rasterfail jagati tööriistaga *reclassify by raster* vahemikeks ja neile anti I-parameetri hinnang.

2.2.7 Filtratsioonimoodul (C)

Filtratsioonimoodul (m/d) kirjeldab kivimite veejuhtivust, mis näitab kui kiiresti on võimalik veel läbi pinnase liikuda. Koos veega infiltreerub läbi pinnase ka reoaine, seega saab filtratsioonimooduli abil hinnata kui kiiresti reoaine põhjaveekihis liigub. Veejuhtivust mõjutavad poorsus, lõhelisus ja tühimike arv kivimis. Filtratsioonimooduli parameetri kaalukus on 3.

Tabelis 9 on toodud DRASTIC-metoodika filtratsioonimooduli väärtuste vahemikud ja nende hinnang põhjavee kaitstuse seisukohalt. C-parameetri hindamisel lähtuti Eestis levivate veekomplekside keskmistest filtratsioonimooduli väärtustest.

Tabel 9. Filtratsioonimooduli väärtused ja nende hinnang Aller et al. (1987) järgi

Vahemik (m/d)	Hinnang
0,04–4	1
4–12	2
12–28	4
28–40	6
40–80	8
> 80	10

Kvaternaari veekompleksi puhul kasutati hindamisel glatsiofluviaalsetest setetest koosneva veekihi filtratsioonimooduli keskmist väärtust 5–10 m/d (Perens & Vallner, 1997), sest kaardikomplekti hüdroteoloogia kaardil eristatakse Kvaternaari veekompleksis vaid glatsiofluviaalsetes setetes levivaid veevarustuse poolest olulisi veekihte. ArcGIS'i geoandmebaasis on Kvaternaari veekompleks eraldatud vaid Kehra, Prangli, Loksa ja Sillamäe kaardilehtedel (Mardim, 2002b; Mardim, 2002c; Mardim, 2002d; Mardim, 2009). Kvaternaari veekompleks sai hinnangu 2.

Liivakivi veekomplekside puhul lähtuti nende keskmisest filtratsioonimooduli väärtusest 2–6 m/d (Perens & Vallner, 1997), mis tähendab hinnangut 1. Karbonaatsete kivimite veekomplekside puhul kasutati nende keskmist filtratsioonimooduli väärtust 10–50 m/d (Perens & Vallner, 1997) ja hinnanguks tuli 8.

2.2.8 Kaitstuse indeksi alusel klasside moodustamine

DRASTIC-metoodika abil põhjavee kaitstuse hindamiseks loodi kõikidest parameetritest ja nende hinnangutest rasterfailid. Kaitstuse indeksi (D_i) arvutamiseks kasutati DRASTIC valemit (1). QGIS'i tööriistaga *raster calculator* arvutati tulemus valemiga (2), mis arvestas parameetrite (D, R, A, S, T, I, C) hinnangute rasterfaile ja neile määratud kaalukust:

$$D_i = D \times 5 + R \times 4 + A \times 3 + S \times 5 + T \times 1 + I \times 5 + C \times 3 \quad (\text{valem 2})$$

Tulemuseks saadud rasterfaali siluti tööriistaga *simple filter*, et tulemus sujuvamaks muuta. Seejärel jagati raster tööriista *reclassify by table* abil vahemikeks, mis esindavad põhjavee kaitstuse klasse (Tabel 10). Järgmise etapina kasutati tööriista *polygonize (raster to vector)*, et luua rasterfailist vektorfail.

Tabel 10. Kaitstuse indeksi (D_i) väärtused ja vastavad põhjavee kaitstuse klassid

Vahemik (D_i)	Hinnang
Veepidemed	Kaitstud alad
< 105	Suhteliselt kaitstud alad
105–135	Keskmiselt kaitstud alad
135–165	Nõrgalt kaitstud alad
> 165	Kaitsmata alad

Kaitstud alad liideti hiljem tulemusele eraldi juurde juhul kui piirkonnas levisid regionaalsed veepidemed, mis ainsana kaitstud aladeks liigitatakse (Veeseadus, 2019). HG_Veekompleks objektiklassist eraldati veepidemed ning tööriista *symmetrical difference* abil lõigati kaitstuse alade tulemusest välja veepideme levikuala. Seejärel liideti veepidemed tulemusele juurde *merge vector layers* tööriistaga. Ülejäänud vahemikud valiti lähtudes Aller et al. (1987) poolt pakutud võrdsete vahemike klassifikatsioonist ning sobitades neid vastavaks Veeseaduses kehtestatud põhjavee kaitstuse klasside definitsioonile (Veeseadus, 2019).

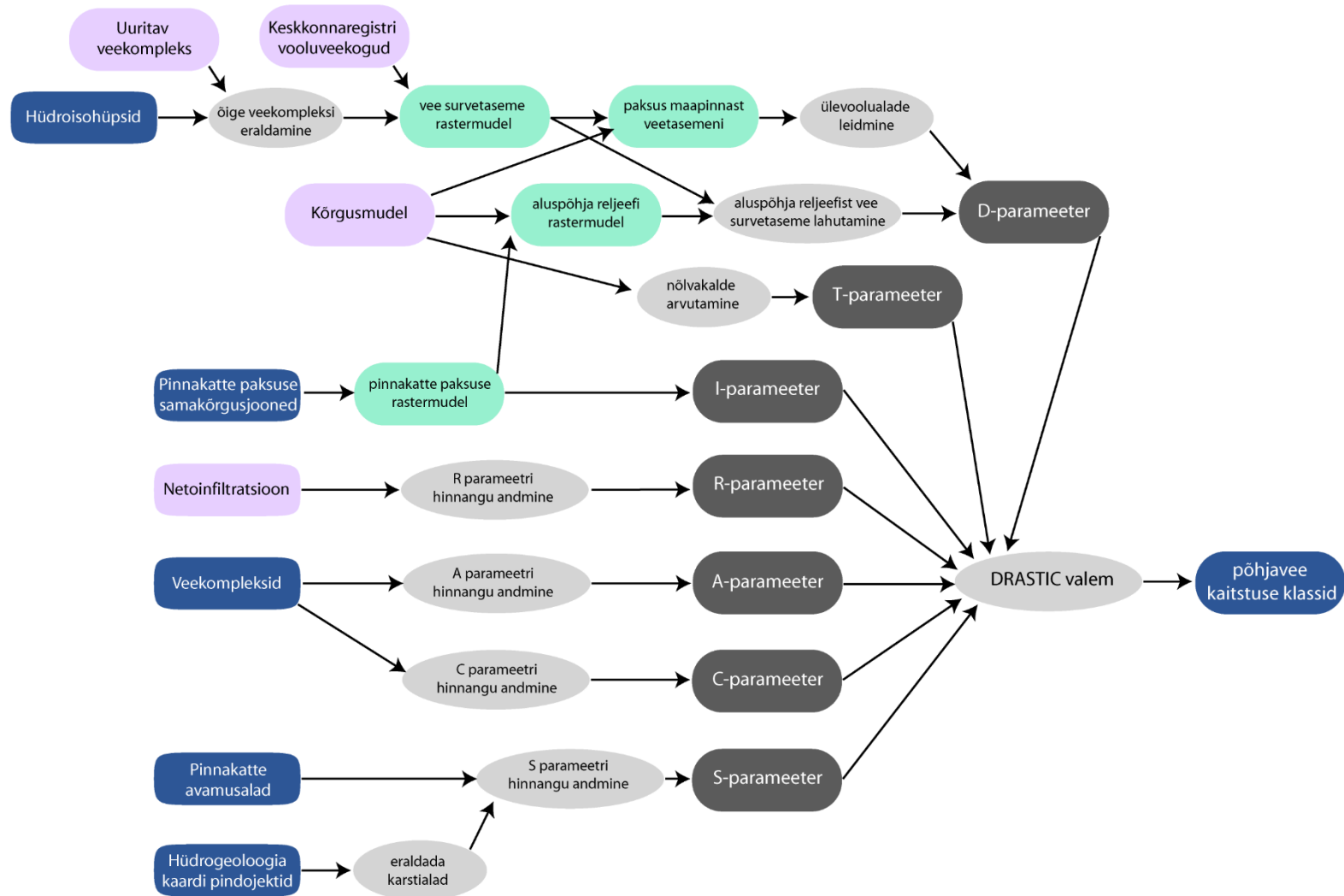
2.3 DRASTIC-metoodika andmetöötlusmudeli koostamine

DRASTIC-metoodikaga põhjavee kaitstuse kaartide koostamisel läbi tehtav protsess koos kasutatud QGIS'i tööriistadega on iga kaardilehe puhul sarnane. Uue kaardi koostamisel samade tövõtete manuaalse kordamise vältimiseks kasutati QGIS'i võimalust töövoog automaatseks muuta. QGIS'i graafilise protsesside modelleerija (ingl *processing modeler*) abil koostati andmetöötlusmudel (Joonis 9; Lisa 2), mille sisendiks on vajalikud andmekihid (Tabel 11) ja väljundiks vektorfail põhjavee kaitstuse klassidega.

Tabel 11. Andmetöötlusmudeli käivitamiseks vajalikud lähteandmed ning nende allikad

Sisend	Andmed
Jõesed	Keskkonnaregistri EELIS andmebaasi WFS teenuse andmekiht KKR_Vooluveekogud
Kõrgusmudel	Maa-ameti LiDAR-andmete DEM
Veekompleks	ArcGIS geoandmebaasi objektiklass HG_Veekompleks
Hüdroisohüpsid	ArcGIS geoandmebaasi objektiklass HG_Hüdroisohüps
Veekompleksi kood	ArcGIS geoandmebaasist tulenev vaadeldava põhjaveekompleksi hüdroisohüpside kood: Siluri-Ordoviitsiumi põhjaveekompleks – 32020, Kesk-Devoni põhjaveekompleks – 32018, Ordoviitsiumi-Kambriumi põhjaveekompleks – 32021.
Karstialad	ArcGIS geoandmebaasi objektiklass HG_Alad
Pinnakatte paksuse samakõrgusjooned	ArcGIS geoandmebaasi objektiklass QP_Isojoon
Pinnakatte avamus	ArcGIS geoandmebaasi objektiklass Q_Avamus
Netoinfiltratsioon	Shape-fail netoinfiltratsiooni aladega Eestis
Uuringuala	Shape-fail uuringualaga (kaardilehe ulatus)

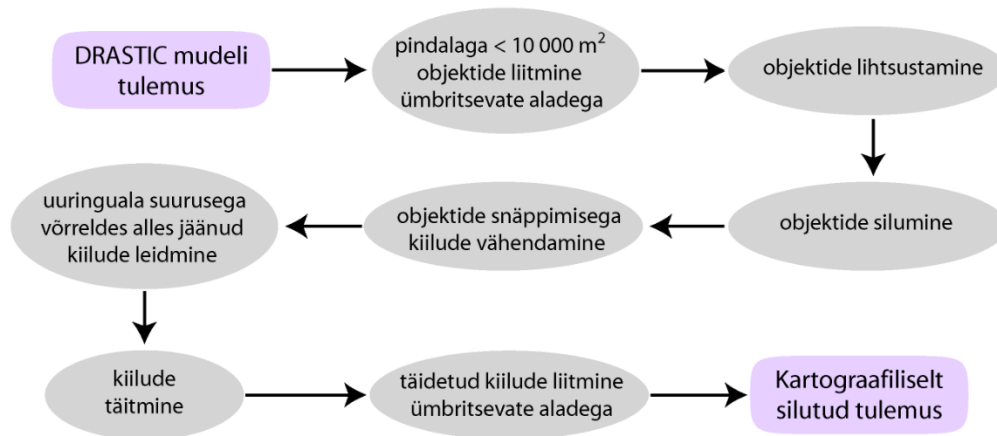
Erinevate parameetrite arvutamise protsesside läbi viimiseks oli vajalik eelnev andmete töötlus, kus vajaminevad ArcGIS'i geoandmebaasi kihid lõigati väiksemaks uuringuala suurus shape-faili taustaks võttes. Lisaks eemaldati HG_Hüdroisohüps objektiklassis nimedest täpitähed. Antud protsessid lisati andmetöötlusmudeli töövoogu.



Joonis 9. DRASTIC-metoodika andmetöötlusmudeli üldistatud tööahel. Tumesinisega märgitud objektid on osa ArcGIS'i geoandmebaasist, violetsega on märgitud mudelis kasutusel olevad lisaandmed ning rohelisega mudeli töövoos koostatud rastermudelid. Tumehallid on rastermudelid iga parameetri kohta.

2.4 Rasterarvutuse tulemuse kartograafiline silumine

QGIS'i graafilise modelleerija andmetötlusumodeli tulemuseks saadi QGIS'i tööriista *polygonize* (*raster to vector*) kasutades rasterfailist konverteeritud vektorfail, mis on kandiliste nurkadega (Joonis 11a). Tulemuse kartograafiliseks silumiseks koostati QGIS'i graafilise modelleerijaga andmetötlusumudel mitmete vektorfaili töötuse tööriistadega (Joonis 10; Lisa 3).

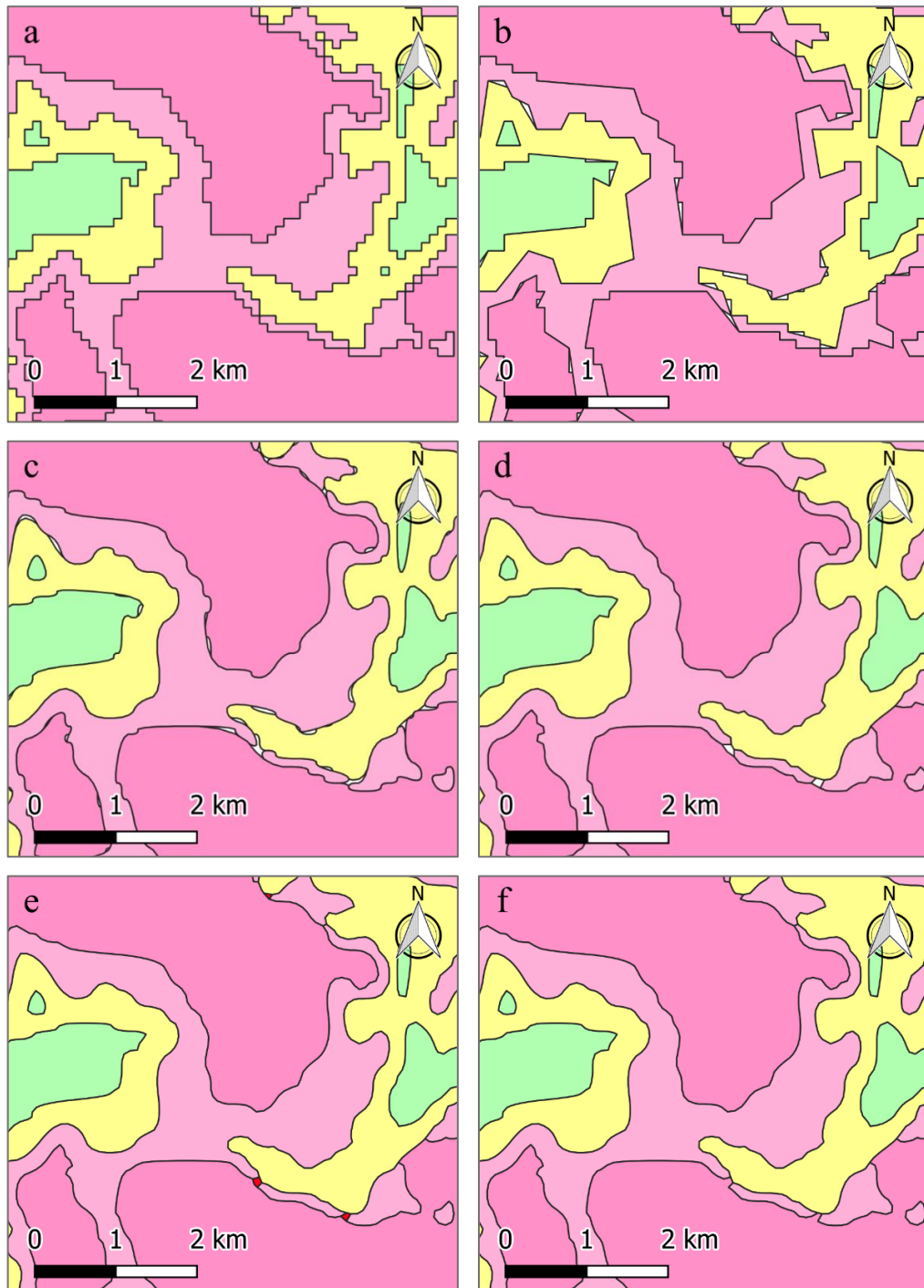


Joonis 10. Rasterarvutuse tulemuse kartograafilise silumise üldistatud töövoog

Esmalt lisati objektidele nende pindala väärtused QGIS'i tööriistaga *add geometry attributes*. Seejärel valiti *select by attribute* tööriistaga objektid pindalaga kuni 10 000 m², mis on Maa-ameti juhendis välja toodud pindobjektide puhul minimaalne (Maa-amet, 2015a). Antud objektid eemaldati *eliminate selected polygons* tööriistaga. Järgmise etapina kasutati tööriista *simplify* (Douglas-Peucker meetodiga, tolerantsiga 70 m), et lihtsustada rasterfailist vektorfaili konverteerimisel tekkinud nurgelist serva (Joonis 11b). Seejärel kasutati objektide silumiseks tööriista *smooth* (kahekordse iteratsiooniga; Joonis 11c). Tööriista *snap geometries to layer* (tolerantsiga 70 m) abil eemaldati sama kihi elementide külge snäppimisega eelnevate tööriistade kasutamise käigus tekkinud kiilud (Joonis 11d).

Kuna tulemus oli endiselt veidi nurgeline, oli vajalik silumise ja snäppimise protsesse korrata, seekord ühekordse iteratsiooni ja 50 m tolerantsiga. Viimased alles jäänud kiilud eemaldati vektorite tööriistaga *difference* kasutades vektorfaili ja uuringuala ulatust. Tulemus lahutati eraldi objektideks tööriistaga *multipart to singlepart* ning ühendati vektorfailiga tööriista *union* abil. Antud töövõtte tulemusel täideti kiilud pindobjektidega (Joonis 11e), mida eristab varasematele objektidele liidetud pindala atribuudi puudumine (väärtus NULL) ja antud teadmise abil oli võimalik neid selekteerida (tööriistaga *select by attribute*) ja liita ümbritsevate objektidega tööriista

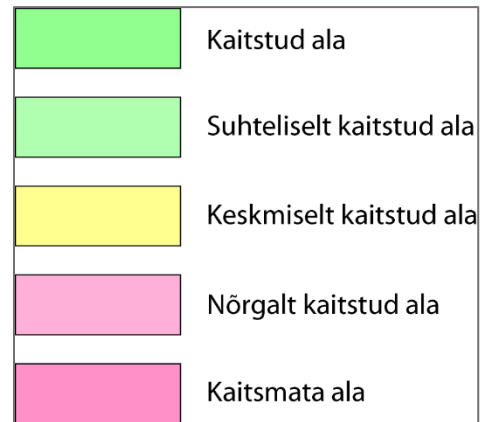
eliminate abil. Olulise etapina oli vajalik pea iga tööriista kasutamise järel rakendada tööriista *fix geometries*, et parandada objektide geomeetriat ja vältida veateateid järgnevate protsesside läbiviimisel. Kartograafilise silumise mudeli tulemusena saadi silutud vektorfail (Joonis 11f).



Joonis 12. A) rasterfailist konverteeritud nurgeline vektorfail; b) tulemus pärast alade lihtsustamist; c) tulemus pärast alade silumist; d) tulemus pärast snäppimist; e) punase värviga kiilud liidetakse kokku kõrval oleva alaga; f) lõpptulemus pärast kartograafilise silumise mudeli kasutamist.

3. Tulemused

Järvakandi, Rapla, Tartu ja Võru põhjavee kaitstuse kaartide koostamiseks kasutati muudetud DRASTIC-metoodikat ning selle jaoks loodud QGIS'i andmetöötlusmudeleid. Joonisel 12 on toodud kaartide legend. Tulemuseks saadud kaartide kõrval on esitatud võrdluseks Maa-ameti kaardistamise juhendi järgi koostatud põhjavee kaitstuse kaardid.



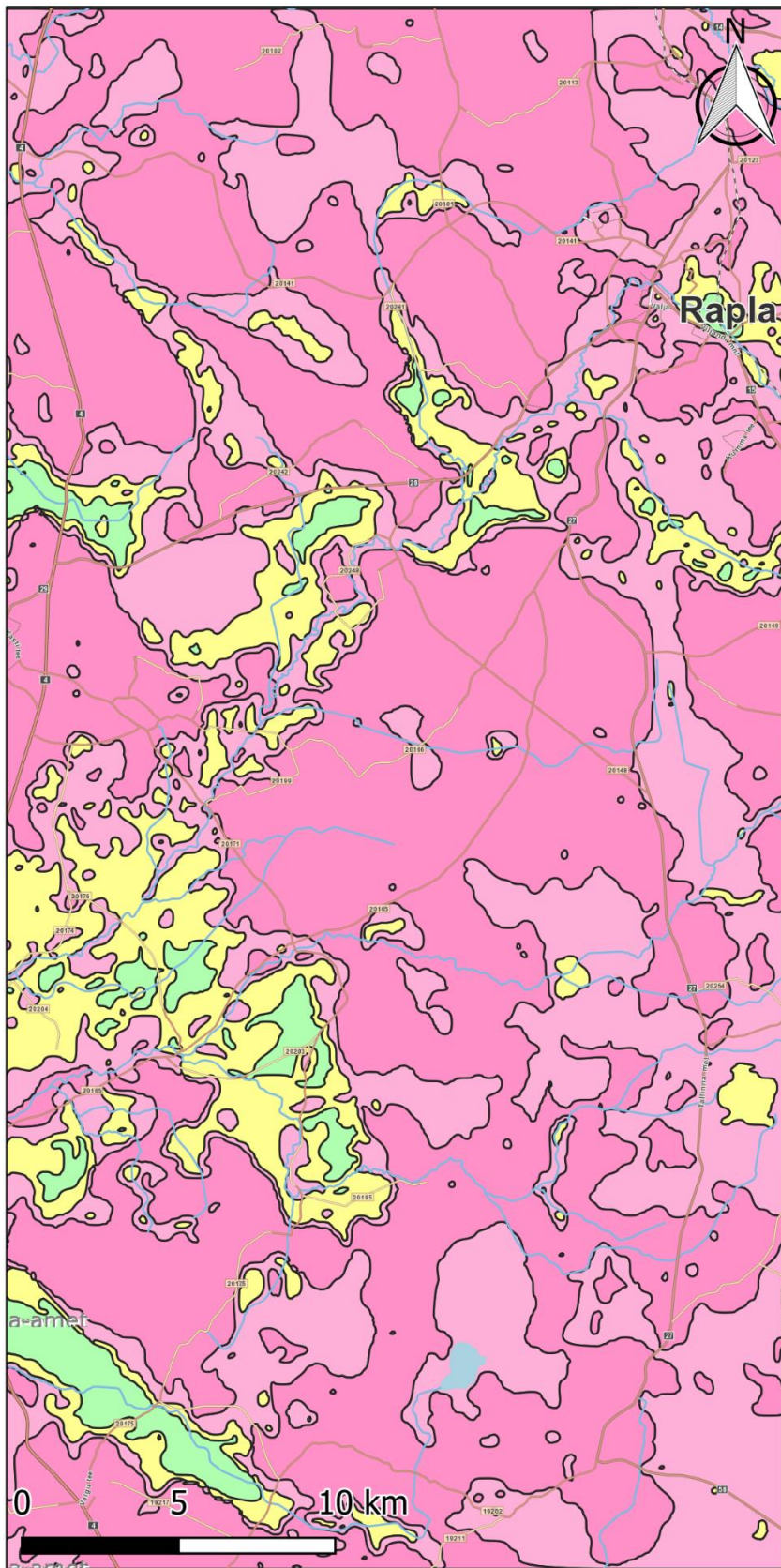
Joonis 12. Põhjavee kaitstuse kaartide legend

3.1 Rapla ja Järvakandi

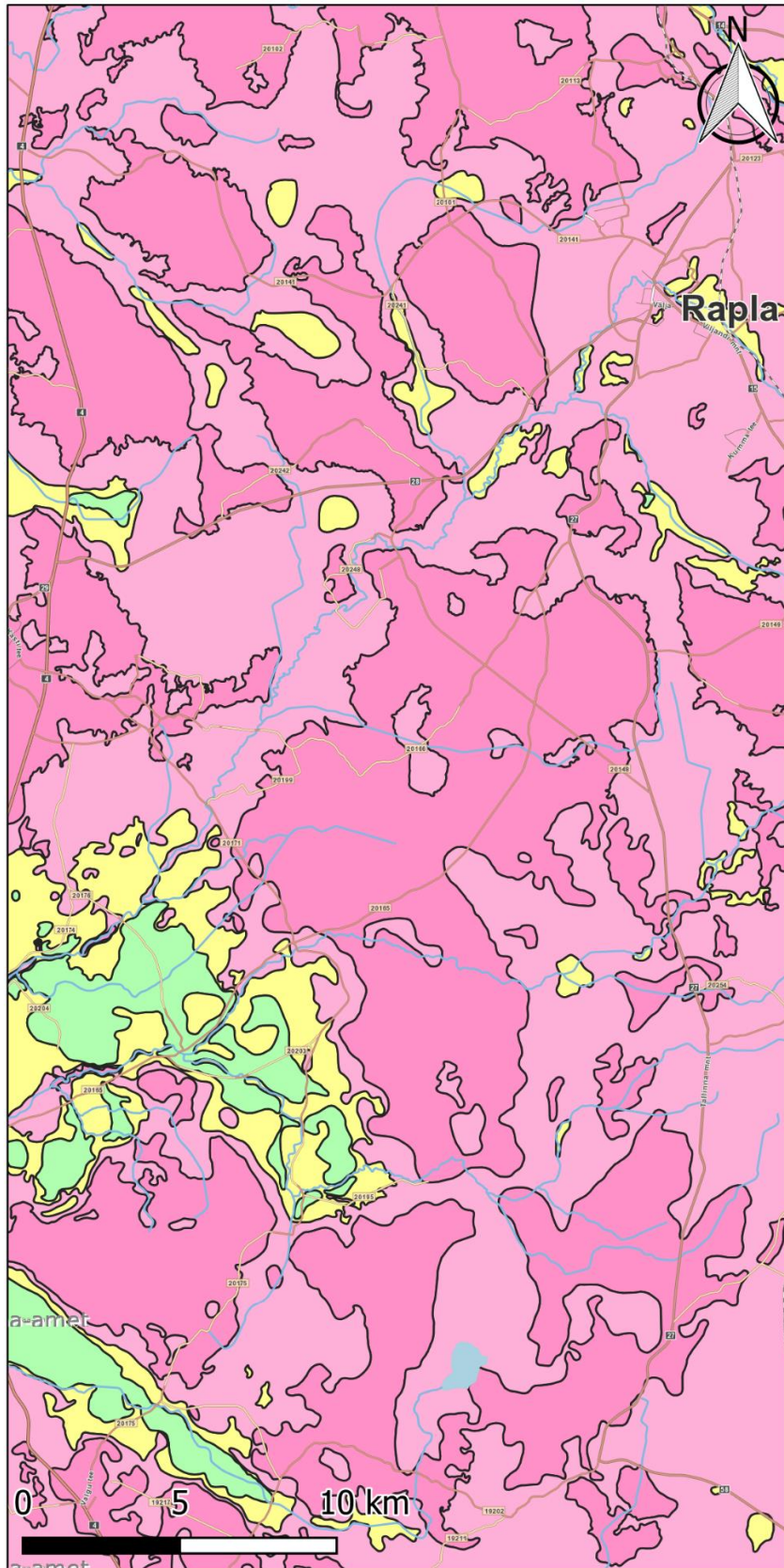
Rapla ja Järvakandi kaardilehtedele koostati QGIS'i andmetöötlusmudeleid kasutades põhjavee kaitstuse kaart (Joonis 13), mida võrreldi varasemalt Maa-ameti juhendi järgi koostatud põhjavee kaitstuse kaardiga (Joonis 14). Tulemuseks saadud kaardil levivad kaitsmata alad 11% võrra suuremal pindalal kui varasemalt koostatud kaardil. Kaitsmata alad esinevad peamiselt õhukese pinnakattega aladel ehk piirkondades, kus moreeni paksus jääb alla 2 meetri (vt Joonis 4). Võrreldes Maa-ameti juhendi järgi koostatud kaardiga, hõlmavad uuel kaardil kaitsmata alad kohati ka üle 2 meetri paksuse pinnakattega alasid.

Nõrgalt kaitstud alad esinevad muudetud DRASTIC-metoodikaga koostatud kaardil peamiselt 2–10 meetri paksuse moreeni aladel ning raba- ja madalsooturba levikupiirkonnas. Nõrgalt kaitstud alad levivad ka õhukese pinnakattega aladel, kus esineb põhjavee ülevool. Uuel kaardil on nõrgalt kaitstud alade ulatus 15% võrra väiksem võrreldes varasema põhjavee kaitstuse kaardiga.

Keskmiselt kaitstud alad levivad peamiselt 2–5 paksuse pinnakattega aladel, kus avamuseks on savi või viirsavi. Samuti levivad alad 10–20 meetri paksuse pinnakattega moreeni või aleuriidi avamusel. Keskmiselt kaitstud alasid on uuel kaardil 4% võrra rohkem kui varasemalt koostatud kaardil. Suhteliselt kaitstud alad levivad Rapla ja Järvakandi kaardilehtedel rohkem kui 20 meetri paksuse pinnakattega mattunud orgudes ning rohkem kui 5 meetri paksuse savi avamusel. Alade ulatus on protsentuaalselt sama, mis varasemalt koostatud kaardil. Kaitstud alasid Rapla ja Järvakandi kaardilehtedel ei ole, sest puuduvad regionaalsed veepidemed.

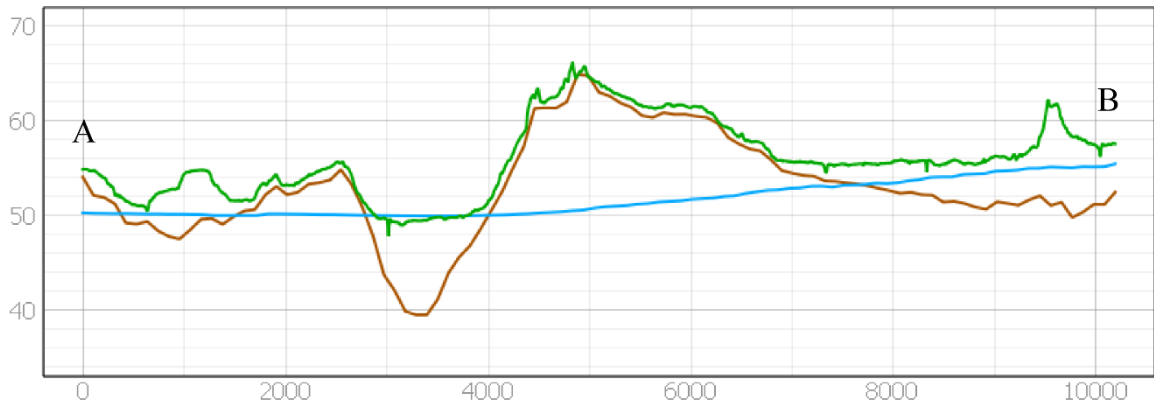


Joonis 13. Muudetud DRASTIC-metoodika kasutamisel saadud Rapla ja Järvakandi põhjavee kaitstuse kaart. Teede ja vooluveekogude andmed: Maa-amet, 2020.

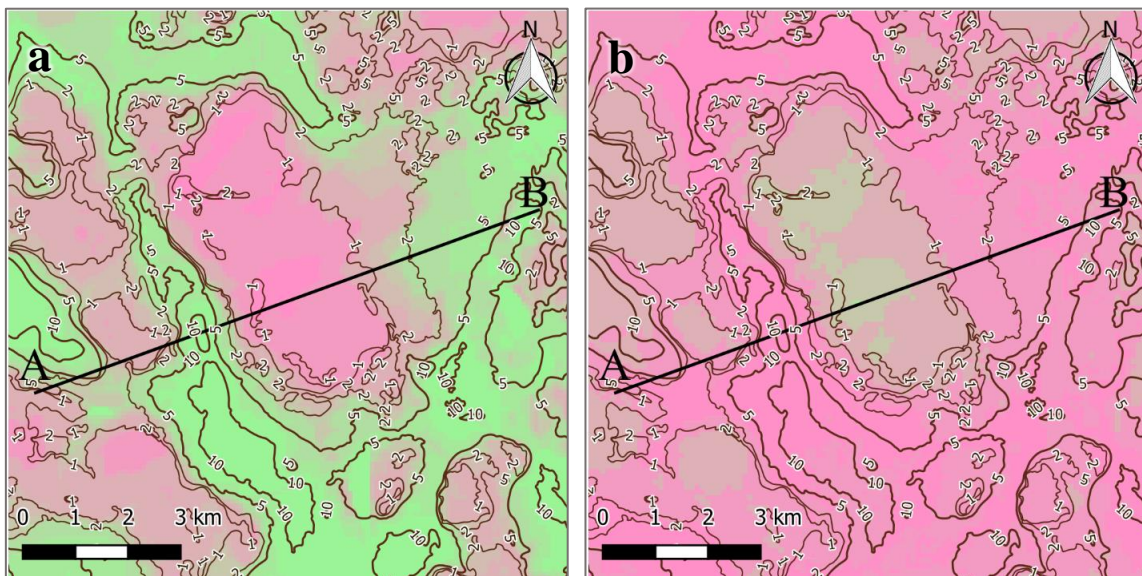


Joonis 14. Rapla ja Järvakandi põhjavee kaitstuse kaart, mis on koostatud geoloogilise baaskaardi jaoks Maa-ameti juhendi järgi. Teede ja vooluveekogude andmed: Maa-amet, 2020.

Muudetud D-parameetri väärtused näitavad kõrgemat kaitstust ülevoolu aladel ja aluspõhja pealispinnast kõrgemal asuva põhjavee survetasemega piirkondades ning madalat kaitstust juhul kui põhjaveetase on allpool aluspõhja pealispinda (Joonised 15 ja 16). Enne D-parameetri muutmist esinevad madala kaitstuse väärtused põhjavee ülevoolu piirkonnas ning piirkondades, kus põhjavee survetase on kõrgemal aluspõhja pealispinnast.

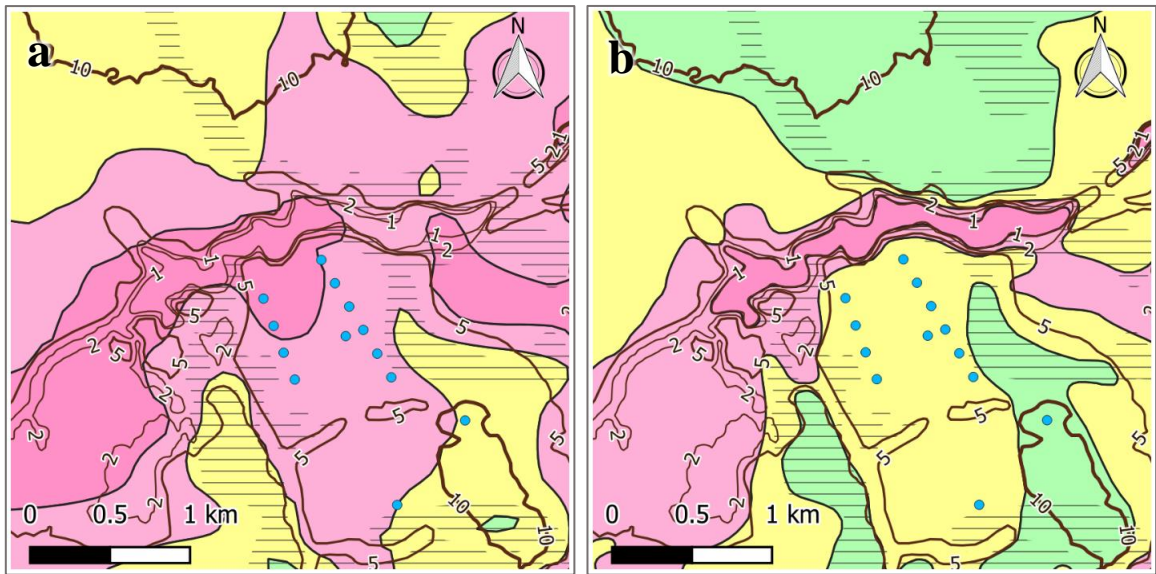


Joonis 15. Lääne-ida suunaline läbilõige Rapla kaardilehel. Sinisega on märgitud põhjaveetase, pruuniga aluspõhja pealispind ning rohelisega maapind. Läbilõige on 100-kordse ülekõrgendusega.



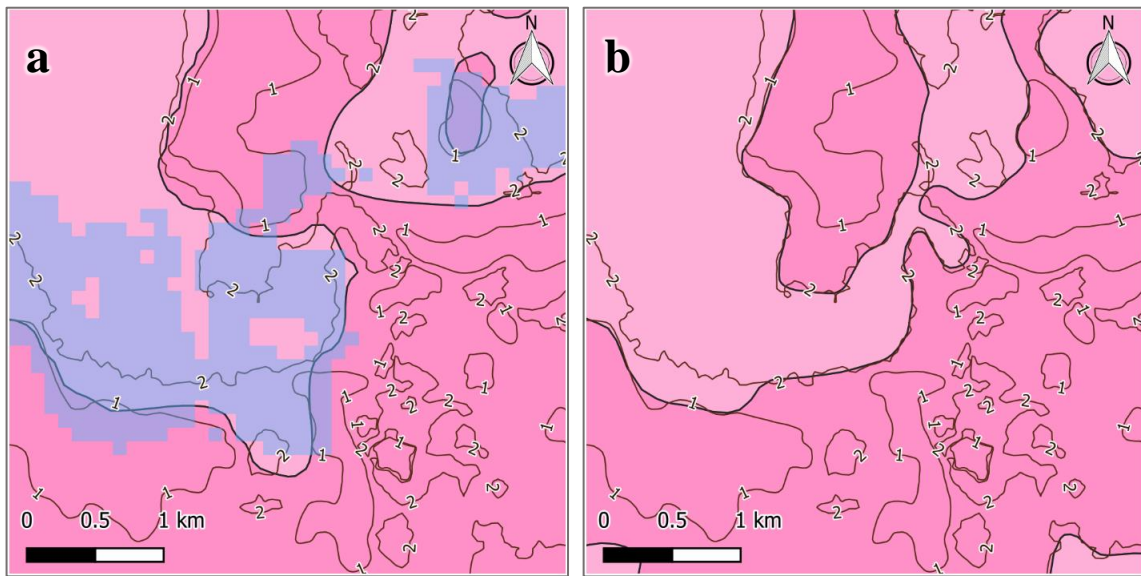
Joonis 16. A) muudetud DRASTIC-metoodika D-parameetri väärtuse vahemikud; b) DRASTIC-metoodika D-parameetri väärtused muutmata kujul. Roheline värv kujutab kõrgemat ja roosa värv madalamat põhjavee kaitstuse hinnangut. Pruuni joonega on märgitud pinnakatte paksuse samajooned.

Järvakandi kaardilehel esinevad piirkonnad, kus aleuriidi all levib 3–5 meetri paksune savikiht (Joonis 17). Seetõttu on antud piirkonnas Maa-ameti juhendi järgi koostatud kaardil märgitud ala keskmiselt kaitstuks. DRASTIC-metoodikaga koostatud kaardil liigitub piirkond üsna õhukese pinnakatte ja aleuriidi avamuse tõttu nõrgalt kaitstud alaks. Andmetöötlusmudel hindab pinnakatte setete omaduste parameetris vaid läbilõikes esimest pinnakatte settetüüpi, sest kasutab ArcGIS'i geoandmebaasi objektiklassi Q_Avamus.



Joonis 17. Põhjavee kaitstuse kaart Järvakandi kaardilehel. A) muudetud DRASTIC-metoodikaga koostatud kaart; b) varasemalt koostatud kaart. Pruunide joontega on märgitud pinnakatte paksuse samajooned, tumeda viirutusega savi levikualad ning siniste punktidega puurkaevud ja pinnakatte puuraugud, mille andmetel levib piirkonnas aleuriidi all 3–5 meetrine savi.

Õhukese pinnakattega aladel on varasemalt koostatud ja uutel kaartidel sarnane piir nõrgalt kaitstud ja kaitsmata alade vahel (Joonis 18). Kuna ülevoolualadele määratakse D-parameetri hinnangus automaatselt kõrgeim kaitstuse väärtus, muutub ka lõpptulemus kõrgema kaitstuse suunas ja kaitsmata alade asemel muutub piirkond nõrgalt kaitstud alaks.



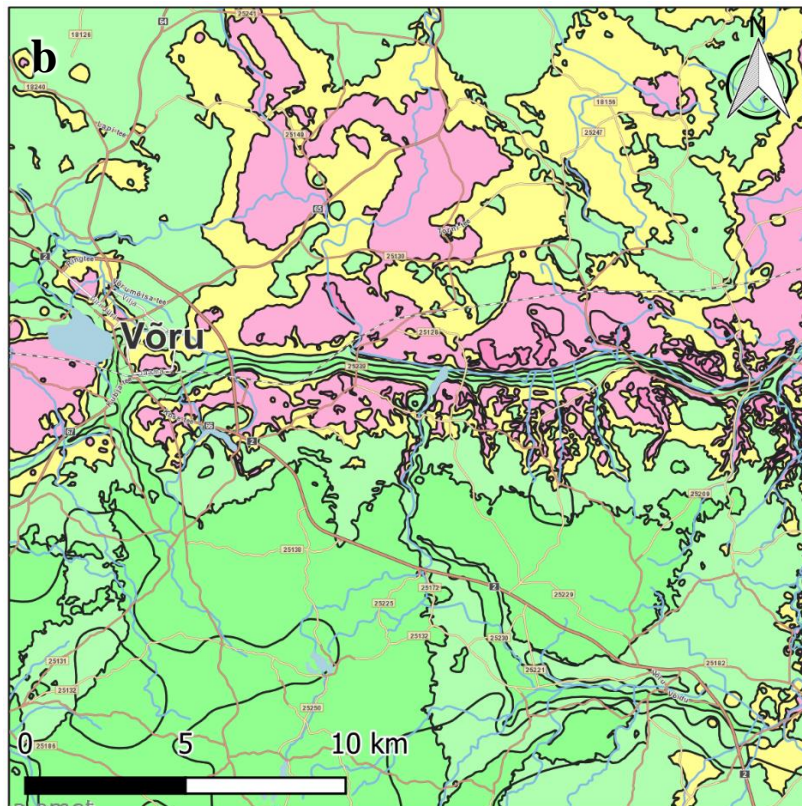
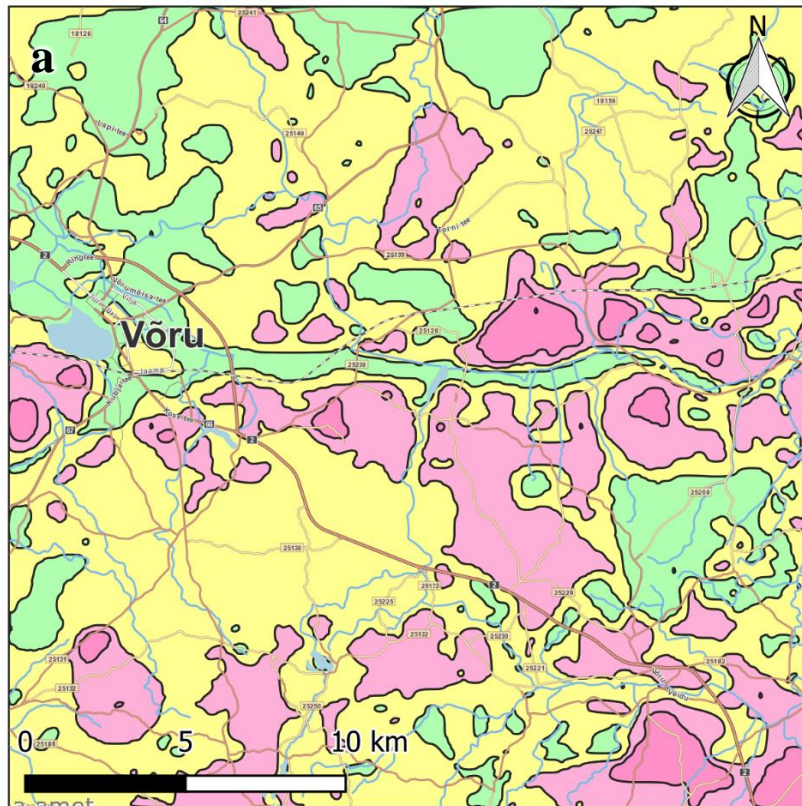
Joonis 18. Põhjavee kaitstuse kaart Järvakandi kaardilehel. A) muudetud DRASTIC-metoodikaga koostatud kaart; b) varasemalt koostatud kaart. Pruunide joontega on märgitud pinnakatte paksuse samajooned ning sinise varjutusega DRASTIC-metoodika mudeli protsessi käigus genereeritud ülevoolu alad.

3.2 Võru

Võru kaardilehel rakendati QGIS'i andmetöötlusmudeleid ning tulemuseks saadi põhjavee kaitstuse kaart (Joonis 19a), mida võrreldi varasemalt Maa-ameti juhendi järgi koostatud põhjavee kaitstuse kaardiga (Joonis 19b).

Kaitsmata alad levivad muudetud DRASTIC-metoodikaga genereeritud kaardil peamiselt kaardilehe keskel asuvast Võru orundist vahetult põhja ja lõuna pool õhukese pinnakattega moreeni ja liiva avamusel (vt Joonis 5). Varasemalt koostatud kaardil levivad kaitsmata alad samas piirkonnas, kuid nende ulatus on 3% võrra väiksem.

Nõrgalt kaitstud alad levivad muudetud DRASTIC-metoodikaga koostatud kaardil sarnaselt varasemalt koostatud kaardiga Võru orundist põhja ja lõuna pool. Lisaks levivad alad laiguti kaardilehe lõunaosas paksu pinnakattega (> 60 meetrit) aladel ning veidi õhema pinnakattega (> 40 meetrit) alal kagunurgas. Võrreldes varasemaga on uuel kaardil nõrgalt kaitstud alasid 7% võrra rohkem.

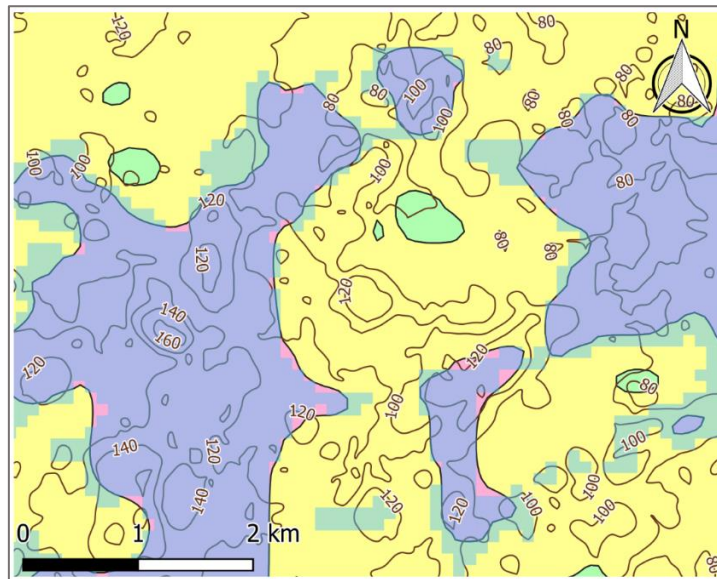


Joonis 19. A) muudetud DRASTIC-metoodikaga genereeritud Võru põhjavee kaitstuse kaart; b) Maa-ameti juhendi järgi koostatud põhjavee kaitstuse kaart. Teede ja vooluveekogude andmed: Maa-amet, 2020.

Keskmiselt kaitstud alad moodustavad üle poole kogu kaardilehest, levides nii moreenide kui ka liivade avamustel Võru orundist nii põhja kui ka lõuna pool. Võrreldes varasema kaardiga on keskmiselt kaitstud alasid 33% võrra rohkem.

Suhteliselt kaitstud alad levivad Võru orundi piirkonnas rohkem kui 20 meetri paksuse pinnakattega aladel ning Võrust põhja pool 15–30 meetri paksuse pinnakattega moreeni ja liiva avamustel. Võrreldes varasemaga on uuel kaardil suhteliselt kaitstud alasid 16% võrra rohkem. Kaitstud alad puuduvad, sest Võru kaardilehel pole regionaalseid veepidemeid. Varasemalt Maaameti juhendi järgi koostatud kaardil on kaitstud aladeks märgitud enam kui 50 meetrise pinnakattega alad.

Võru kaardilehe lõunaosas on DRASTIC-metoodika andmetöötlusmudel genereerinud aluspõhja pealispinnast allpool esineva põhjaveetaseme tõttu nõrgalt kaitstud alad (Joonis 20). Lisaks mõjutas DRASTIC-metoodikaga koostatud kaardil madalama kaitstuse väärtuse kujutamist ka kõrge netoinfiltratsiooni väärtus, kuna tegemist on põhjavee toitealaga (Haanja kõrgustik). Maaameti juhendi järgi koostatud kaardil on paksu pinnakatte (kuni 160 m) tõttu eristatud kaitstud alad.



Joonis 20. Võru kaardilehe lõunaosa. Pruuni joonega on märgitud pinnakatte paksus ja sinise varjutusega piirkond, kus genereeritud põhjaveetaseme pind esineb allpool aluspõhja pealispinda.

Võru kaardilehel on osade kaardiala lõunaossa moodustunud nõrgalt kaitstud alade põhjuseks ka seal leviv Ülem-Devoni karbonaatsete kivimite põhjaveekompleks. Põhjaveekihi omaduste ja filtratsioonimooduli parameetri hinnangu alusel on DRASTIC-metoodikas karbonaatsete kivimite veekihi oluliselt suurema reostusohklikkuse väärtusega kui liivakivide veekihi.

3.3 Tartu

QGIS'i andmetöötlusmudeli rakendamise tulemusena saadi Tartu kaardilehe põhjavee kaitstuse kaart (Joonis 21a), mida võrreldi varasemalt Maa-ameti juhendi järgi koostatud põhjavee kaitstuse kaardiga (Joonis 21b).

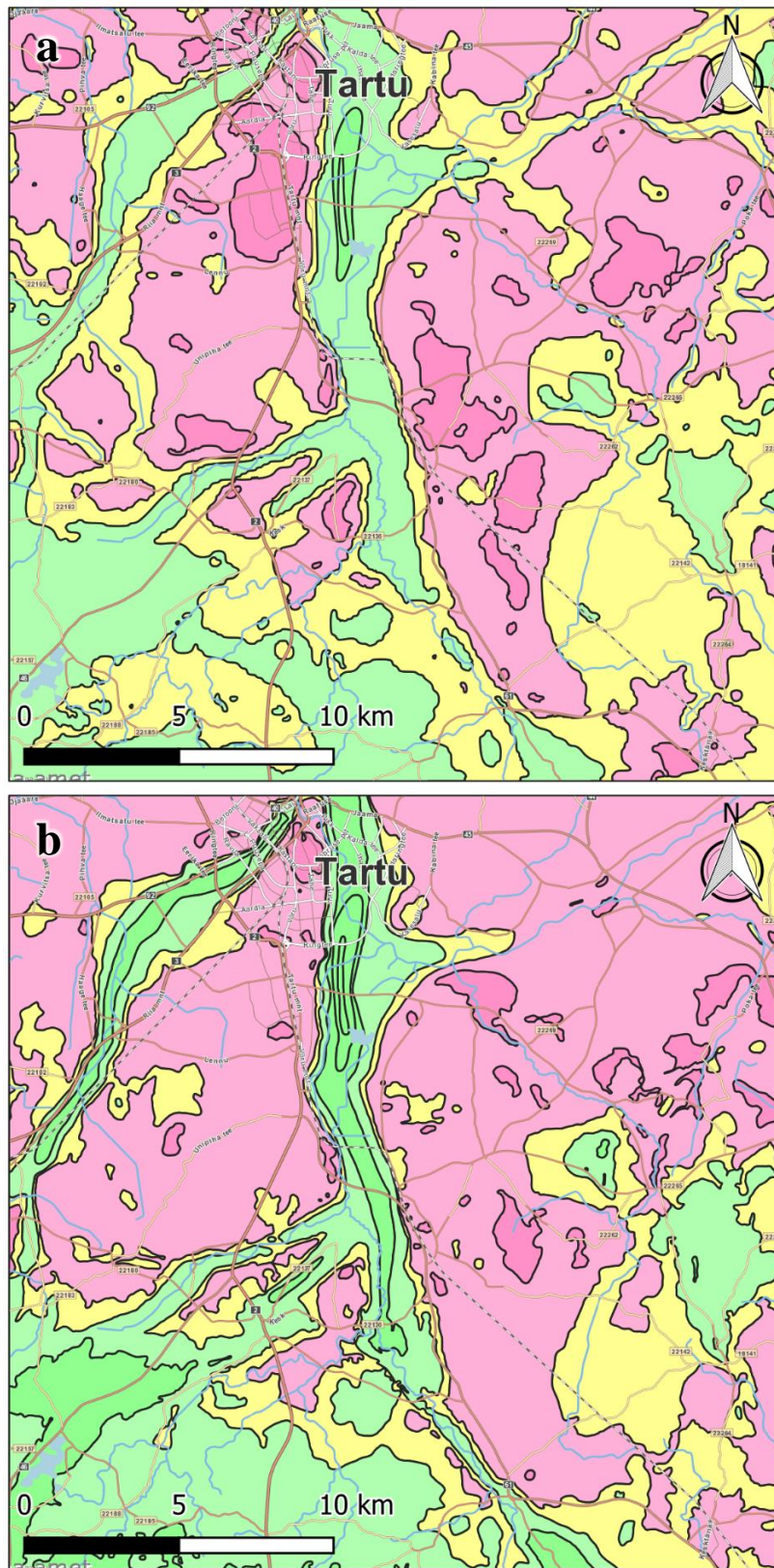
Tulemuseks saadud kaardil levivad kaitsmata alad üsna õhukese pinnakattega (alla 5 meetri) piirkondades laiguti üle kaardilehe (vt Joonis 6). Võrreldes varasemalt koostatud kaardiga on uuel kaardil alad 3% võrra suurema pindalaga.

Nõrgalt kaitstud alad levivad sarnaselt varasema kaardiga 5–10 meetrise moreeni avamustel üle kogu kaardilehe. Võrreldes varasemaga on uuel kaardil nõrgalt kaitstud alasid 13% võrra vähem.

Keskmiselt kaitstud alad levivad 10–20 meetri paksuse pinnakattega piirkondades ning lisaks ka raba- ja madalsooturba aladel. Uuel kaardil on keskmiselt kaitstud alasid 14% võrra rohkem võrreldes varasemalt koostatud kaardiga.

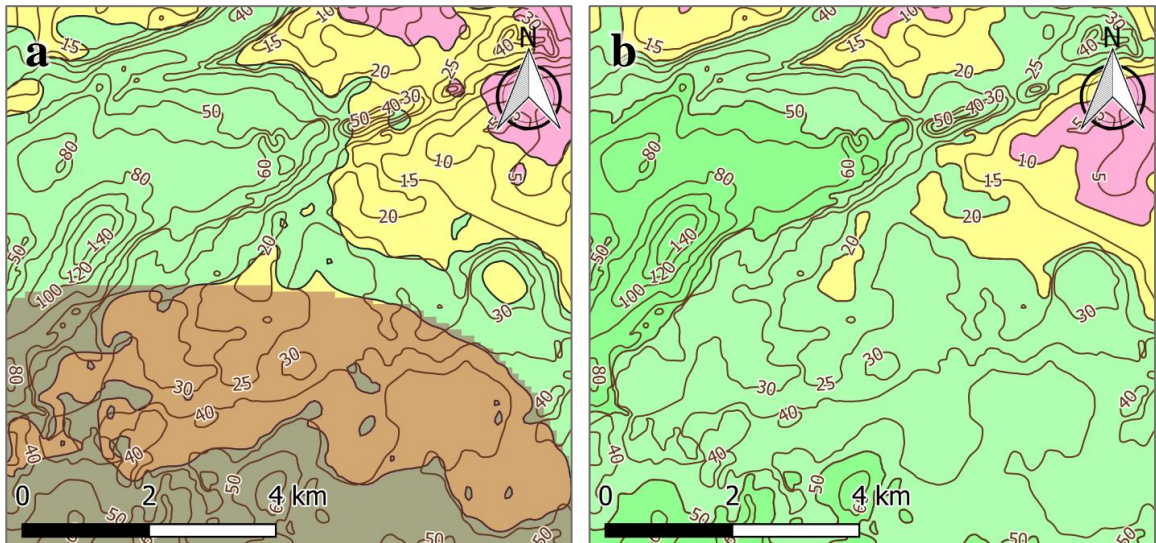
Suhteliselt kaitstud alad levivad mattunud orgudes ning rohkem kui 20 meetri paksuse pinnakattega piirkondades kaardilehe lõunaosas. Suhteliselt kaitstud alasid on uuel kaardil 3% võrra rohkem võrreldes varasemaga.

Kaitstud ala levib Tartu kaardilehe põhjaosas Narva lademe veepideme avamusel. Varasemalt koostatud kaardil on kaitstud aladeks märgitud ka enam kui 50 meetri paksuse pinnakattega alad.



Joonis 21. A) muudetud DRASTIC meetodikaga koostatud Tartu põhjavee kaitstuse kaart; b) Maaameti juhendi järgi koostatud põhjavee kaitstuse kaart. Teede ja vooluveekogude andmed: Maaamet, 2020.

DRASTIC-metoodikaga genereeritud Tartu põhjavee kaitstuse kaart on kõige sarnasem Maa-ameti juhendi järgi koostatud kaardiga. Peamine erinevus esineb kaardilehe lõunaosas Otepää kõrgustiku serval, kus on põhjavee toiteala ja seetõttu kõrgema netoinfiltratsiooni väärtusega ala. DRASTIC-metoodika hindab seetõttu piirkonda keskmiselt kaitstud alana, kuid varasemalt koostatud kaartidel on moodustatud suhteliselt kaitstud ala (Joonis 22).



Joonis 22. Põhjavee kaitstuse kaart Tartu kaardilehe edelaosas, Otepää kõrgustiku põhjaservas. A) muudetud DRASTIC-metoodikaga koostatud kaart; b) varasemalt koostatud kaart. Pruunide joontega on märgitud pinnakatte paksus ning pruuni varjutusega kõrgema netoinfiltratsiooniga ala.

3.4 DRASTIC-metoodika andmetöötlusmudel

Kuna põhjavee kaitstuse kaartide koostamisel läbi tehtav protsess on DRASTIC-metoodika puhul igal kaardilehel sarnane, koostati automatiseeritud töövoog QGIS'i graafilise modelleerijaga, mille abil oli võimalik kiirendada kaartide koostamise protsessi. Samuti võimaldab mudel uute andmete selgumisel kaarti kiirelt uuendada.

Andmetöötlusmudelid viivad automaatselt läbi kõik DRASTIC-metoodika põhjavee kaitstuse kaardi koostamiseks vajalikud protsessid. Eelnev andmete töötlus pole vajalik, kuna mudelid on spetsiaalselt koostatud töötamiseks Eesti geoloogilise baaskaardi ArcGIS'i geoandmebaasi andmetega kasutades selle nähtusklassidele määratud objektide identifitseerimise koode.

Kartograafilise silumise mudeli rakendamise tulemusena esinesid vektorfailis kohati mõned topograafia vead (topeltverteksid, ülekatvused), mistõttu on vajalik mudeli edasine arendus.

4. Arutelu

Käesoleva töö eesmärk oli välja töötada efektiivsem ja rohkem automatiseeritud meetod Eesti geoloogilise baaskaardi põhjavee kaitstuse kaardi koostamiseks. Kindlapiirilisel defineeritud põhjavee kaitstuse hindamise tingimusi ja parameetrite väärtusvahemikke kasutav meetodika sõltub vähem kaardi koostaja subjektiivsusest ning võimaldab uute andmete selgumisel kaarti kiirelt uuendada.

Töö käigus koostati andmetöötlusmudelid DRASTIC-metoodika rakendamiseks ning tulemuseks saadi põhjavee kaitstuse kaardid, mis Rapla, Järvakandi ja Tartu kaardilehtede puhul olid suures osas sarnased varasemalt Maa-ameti juhendi järgi koostatud aladele. Suuremad erinevused esinesid Võru kaardilehe puhul.

Maa-ameti põhjavee kaitstuse kaardistamise juhend võtab arvesse vähem aspekte kui töös kasutatud DRASTIC-metoodika. Olulisimad kaitstuse hindamise parameetrid Maa-ameti juhendis on pinnakatte paksus ja litoloogia. DRASTIC-metoodikas on tähtsal kohal ka veetaseme sügavuse parameeter. Lisaks vaadeldakse erinevalt Maa-ameti metoodikast põhjaveekihi filtratsiooniomadusi, netoinfiltratsiooni ja topograafiat. Metoodiline erinevus kaartide koostamisel toob välja ka erinevused tulemustes ja seetõttu ei saa uute kaartide õigsust hinnata ainult varasemalt koostatud kaardiga võrreldes.

Kuna põhjavee kaitstuse kaartide koostamisel läbi tehtav protsess on DRASTIC-metoodika puhul igal kaardilehel sarnane, koostati automatiseeritud töövoog QGIS'i graafilise modelleerijaga, mille abil oli võimalik kiirendada kaartide koostamise protsessi. Andmetöötlusmudel viib automaatselt läbi kõik põhjavee kaitstuse kaardi koostamiseks vajalikud protsessid. Eelnev andmete töötlus pole vajalik, sest mudel on spetsiaalselt koostatud töötamiseks Eesti geoloogilise baaskaardi ArcGIS'i geoandmebaasi andmetega. Samas viib see mudeli lõpptulemuse otsesesse sõltuvusse geoloogilise baaskaardi geoandmebaasi andmete kvaliteedist.

Kaartide loomiseks kasutatud DRASTIC-meetodit muudeti vastavalt Eesti (hüdro)geoloogilistele tingimustele. Peamine erinevus on D-parameetri ehk esimese aluspõhjalise põhjaveekompleksi veetaseme sügavuse hinnang põhjavee kaitstusele. Algses DRASTIC-metoodikas vaadeldi maapinnaga võrreldes põhjaveetaseme sügavust ja maapinnalähedane veetase viitas suurele reostusohklikkusele. Muudetud metoodikas võrreldi põhjaveetaseme pinda aluspõhja pealispinnaga ning suurema kaitstuse väärtuse said piirkonnad, kus põhjavee survetase on aluspõhja pealispinnast

kõrgemal ning reoaine liikumine põhjaveekihti on raskendatud. Järvakandi ja Rapla kaardilehede puhul tõi D-parameetri muutmine edukalt välja piirkonnad, kus põhjavee survetase on kõrgemal aluspõhja pealispinnast või on ülevoolualad ning väiksem reostusohhtlikkus.

Kuigi pinnakatte parameetril on kõrge kaalukus (5), ei mõjuta see paksu pinnakattega aladel lõpptulemust piisavalt, et piirkonda arvestada madalama reostusohhtlikkusega alaks. Võru kaardilehel mõjutas kõrge reostusohhtlikkusega D-parameetri väärtus tulemust ja kuni 160 m paksuste pinnakatte setete kihiga aladele moodustusid kohati nõrgalt kaitstud põhjaveega alad. Seetõttu on soovitatav pinnakatte paksuse parameetri kaalukus muuta sõltuvaks tema hinnangu väärtusest, mis võimaldaks paksema pinnakattega aladel muutuda parema kaitstusega piirkondadeks. Ka D-parameetri kaalukus võiks sõltuda pinnakatte paksusest, mis tähendaks kahe parameetri ühendamist funktsiooniga.

DRASTIC-metoodika andmetötlusmudelil kasutatakse pinnakatte setete omaduste parameetri hindamiseks ArcGIS'i geoandmebaasi objektiklassi Q_Avamus, mis kujutab endast läbilõikes esimest pinnakatte settetüüpi. Kaardilehtedel esineb aga mitmeid alasid, kus puurkaevude ja pinnakatte vaatluspunktide andmetel esineb läbilõikes mitu erinevat settetüüpi. Probleem tuleb ette näiteks Järvakandi kaardilehel, kus aleuriidi all levib 3–5 meetri paksune savikiht. Seetõttu on antud piirkonnas Maa-ameti juhendi järgi koostatud kaardil märgitud ala keskmiselt kaitstuks. DRASTIC-metoodikaga koostatud kaardil liigitub piirkond üsna õhukese pinnakatte ja aleuriidi avamuse tõttu nõrgalt kaitstud alaks.

Mudeli täiendusena on vajalik lisaks geoandmebaasi nähtusklassis välja toodud pinnakatte avamustele lisada täiendav kaardikiht piirkondadega, kus läbilõikes esineb teisi settetüüpe. Nii oleks võimalik arvestada näiteks madalama kaitstusega liivade puhul nende all levivate savidega, millel on kõrgem kaitstus. Täiendava kaardikihi loomine nõuab eelnevat piirkonna detailsemat läbitöötamist.

Kuna ülevoolualadele määratakse D-parameetri hinnangus automaatselt kõrgeim kaitstuse väärtus, muutub ka lõpptulemus parema kaitstuse suunas ja kaitsmata alade asemel muutub piirkond nõrgalt kaitstud alaks. DRASTIC-metoodikaga genereeritud ülevoolualade levik on ulatuslikum ja detailsem kui varasema kaardi geoandmebaasi objektiklassis HG_Alad välja toodud ülevoolualad ja seetõttu esinevad ka teatud erinevused nõrgalt kaitstud ja kaitsmata alade piiris.

Kuna DRASTIC-metoodika mudelil genereeritud ülevoolualad on saadud hüdroisohüpsidest ja jõgede andmetest koostatud põhjaveetaseme pinna rasterfaili lahutamisel maapinna

kõrgusmudelist, sõltub tulemus geoandmebaasis olevate hüdroisohüpside kvaliteedist. Parem oleks QGIS'i andmetöötlusmudeli arvutustes joontest uuesti interpoleeritud rasterpinna asemel kasutada algset rasterpinda, millest hüdroisohüpsid genereeriti.

DRASTIC-metoodika hindab kõrgema netoinfiltratsiooniga alasid suurema reostusohykkusega piirkondadeks. Näiteks Tartu kaardilehe lõunaosas Otepää kõrgustiku serval on põhjavee toiteala ja seetõttu kõrgema netoinfiltratsiooni väärtusega ala. Ala on uuel kaardil keskmiselt kaitstud, kuid Maa-ameti juhendi järgi koostatud kaardil on paksema pinnakatte tõttu moodustatud suhteliselt kaitstud ala. Kasutades Vallner ja Porman (2016) poolt koostatud kaarti Eesti netoinfiltratsiooni pindalalise jaotumise kohta, peab arvestama, et antud kaart on oluliselt väiksema mõõtkavaga kui 1:50 000 põhjavee kaitstuse kaart ning seetõttu võib selle kasutamine viia teatud ebatäpsusteni.

Kokkuvõte

Magistritöö eesmärk oli Eesti geoloogilise baaskaardi põhjavee kaitstuse kaardi koostamine muuta efektiivsemaks, automatiseeritumaks ning koostaja subjektiivsusest vähem sõltuvaks. Selleks kasutati DRASTIC-metoodikat, mida muudeti vastavalt Eesti (hüdro)geoloogilistele tingimustele.

Töö tulemusena koostati QGIS'i graafilise modelleerija andmetöötlusmudel, millega genereeriti põhjavee kaitstuse kaardid, mis Rapla, Järvakandi ja Tartu kaardilehtede puhul olid suures osas sarnased varasemalt Maa-ameti juhendi järgi koostatud aladele. Suuremad erinevused esinesid Võru kaardilehe puhul.

DRASTIC-metoodika vajab antud töö tulemuste põhjal Eesti geoloogilistes tingimustes täiendavat modifitseerimist. Peamise täiendusena on vajalik lisaks geoandmebaasi nähtusklassis välja toodud pinnakatte avamustele lisada täiendav kaardikiht piirkondadega, kus esineb läbilõikes ka teisi settetüüpe. Nii oleks võimalik arvestada näiteks liivade all levivate kõrgema kaitstusega savidega.

Käesoleva töö tulemuste põhjal on soovitatav pinnakatte paksuse parameetri kaalukus muuta sõltuvaks tema hinnangu väärtusest, mis võimaldaks paksema pinnakattega aladel muutuda kõrgema kaitstusega piirkondadeks. Ka D-parameetri kaalukus võiks sõltuda pinnakatte paksusest, mis tähendaks kahe parameetri ühendamist funktsiooniga.

Magistritöö tulemusena koostatud andmetöötlusmudel võimaldas kaartide koostamise protsessi kiirendada ning edaspidi uute andmete selgumisel kaarti kiirelt uuendada. Mudel viib automaatselt läbi kõik DRASTIC-metoodikal põhinevad põhjavee kaitstuse kaardi koostamiseks vajalikud protsessid ning on spetsiaalselt koostatud töötamiseks Eesti geoloogilise baaskaardi ArcGIS'i geoandmebaasi andmetega. Seetõttu on mudeli lõpptulemus otseses sõltuvus geoloogilise baaskaardi geoandmebaasi andmete kvaliteedist. Samas on kindlapiirilisel defineeritud põhjavee kaitstuse hindamise tingimusi ja parameetrite väärtusvahemikke kasutava metoodika abil võimalik uute andmete selgumisel kaarti kiirelt uuendada.

Mapping groundwater vulnerability using GIS-based DRASTIC method modified based on Estonian conditions

The aim of this master's thesis was to improve Estonian geological base map groundwater vulnerability mapping, to make it more efficient and automated and less dependent on the subjectivity of the map maker. For this, DRASTIC method modified according to Estonian geological and hydrogeological conditions was used.

QGIS graphical modeler was used to create a data processing model. The model was used to generate groundwater vulnerability maps for base map sheets including Rapla, Järvakandi, Tartu and Võru. The maps were mostly similar to previous maps created according to the Estonian Land Board mapping guide, but differences occurred in Võru map sheet.

According to the results of this thesis, the DRASTIC method requires additional modification when used in Estonia. The main addition includes adding an extra map layer including regions which have other sediments overlain. For example, this addition would make it possible to take into account clays with lower vulnerability which are overlain by sands with higher vulnerability to contamination.

It is recommended to change the weight of the impact of vadose zone parameter in relation to its rating. This would make it possible to evaluate areas with thick quaternary layer as regions with lower vulnerability. The weight of the depth to water table parameter could also be dependent on the thickness of the quaternary layer which would mean connecting these two parameters with a function.

The automated workflow created with QGIS graphical modeler made it possible to speed up map making process and allows the map to be updated quickly when new information becomes available. The model runs all the processes needed for creating a vulnerability map and is specifically made to work with the Estonian geological base map ArcGIS geodatabase which makes the results dependent on the quality of the data in the geodatabase. However, using definite vulnerability assessment terms and value ranges makes it possible to update the map when new information arrives.

Tänuavaldused

Täna oma juhendajaid Maile Polikarpust ja Tavo Ani suure abi, toetuse, heade nõuannete ning ideede eest. Lisaks täna suure toetuse ja ideede eest ka Andres Marandit ja Raul Paati.

Kirjanduse loetelu

- Ariva, K. & Rohtla, R. (2011). Eesti Geoloogiline Baaskaart. Pinnakate. Leht 5422 Võru. Eesti Geoloogiakeskus. Tallinn
- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J. H., Petty, R. J., & Hackett, G. (1987). DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings. *U.S. Environmental Protection Agency, EPA 600/2-87-035*
- Babiker, I. S., Mohamed, M. A. A., Hiyama, T., & Kato, K. (2005). A GIS-based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara Heights, Gifu Prefecture, central Japan. *Science of the Total Environment, 345*(1–3), 127–140.
- Barzegar, R., Asghari Moghaddam, A., Norollahi, S., Inam, A., Adamowski, J., Alizadeh, M. R., & Bou Nassar, J. (2019). Modification of the DRASTIC Framework for Mapping Groundwater Vulnerability Zones. *Groundwater*. <https://doi.org/10.1111/gwat.12919>
- Carreras, X., Fraile, J., Garrido, T., & Cardona, C. (2015). Groundwater Vulnerability Mapping Assessment Using Overlay and the DRASTIC Method in Catalonia. *Handbook of Environmental Chemistry*, 117-134. <https://doi.org/10.1007/698>
- Chitsazan, M., & Akhtari, Y. (2009). A GIS-based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kherran Plain, Khuzestan, Iran. *Water Resources Management, 23*(6), 1137–1155. <https://doi.org/10.1007/s11269-008-9319-8>
- Davis, A. D., Long, A. J., & Wireman, M. (2002). KARSTIC: A sensitivity method for carbonate aquifers in karst terrain. *Environmental Geology, 42*(1), 65–72. <https://doi.org/10.1007/s00254-002-0531-1>
- Doerfliger, N., Jeannin, P.-Y., & Zwahlen, F. (1999). Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method). *Environmental Geology, 39*(2), 165–176.
- Foster, S. S. D., (1987). Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: Duijvenbooden W. van, Waegeningh G. H. van (eds.) *Vulnerability of soil and groundwater to pollutants, Proceedings and Information 38*, The Hague: TNO Committee on Hydrological Research, lk 69-86.
- Gogu, R. C., & Dassargues, A. (2000). Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. *Environmental Geology, 39*(6), 549–559. <https://doi.org/10.1007/s002540050466>

- Grünberg, R., (2003). Eesti Geoloogiline Baaskaart. Põhjavee kaitstus. Leht 4444 Misso, Leht 4533 Laura. Eesti Geoloogiakeskus. Tartu
- Huan, H., Wang, J., & Teng, Y. (2012). Assessment and validation of groundwater vulnerability to nitrate based on a modified DRASTIC model: A case study in Jilin City of northeast China. *Science of the Total Environment*, 440, 14–23. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.08.037>
- Kadkhodaie, F., Asghari Moghaddam, A., Barzegar, R., Gharekhani, M., & Kadkhodaie, A. (2019). Optimizing the DRASTIC vulnerability approach to overcome the subjectivity: a case study from Shabestar plain, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 12(16). <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4647-y>
- Kajak, K., Kala, E., Koppelmaa, H., Perens, H., Pöldvere, A., Raudsepp, R., ... R, P. (1992). *Eesti geoloogiliste kaartide (mõõtkava 1:50 000) tugilegendid*. Tallinn-Keila. EGF 4615
- Kim, Y. J., & Hamm, S. Y. (1999). Assessment of the potential for groundwater contamination using the DRASTIC/EGIS technique, Cheongju area, South Korea. *Hydrogeology Journal*, 7(2), 227–235. <https://doi.org/10.1007/s100400050195>
- Klein, V. (2012). 75 aastat Eesti geoloogiateenistuse jalajälgedes. *Eesti Geoloogiakeskuse toimetised*, 11/1, 5-14. Eesti Geoloogiakeskus. Tallinn
- Maa-amet (2015a). Juhend Eesti geoloogiliseks digitaalkaardistamiseks mõõtkavas 1:50 000, Versioon 2.4. (2015). Maa-amet, Tartu
- Maa-amet (2015b). Eesti geoloogilise digitaalkaardistamise (mõõtkavas 1:50 000) juhendi seletuskiri, juhendi versioon 2.4. (2015). Maa-amet, Tartu, 55 lk.
- Mardim, T., (2002a). Eesti Geoloogiline Baaskaart. Põhjavee kaitstus. Leht 6343 Maardu. Eesti Geoloogiakeskus. Tallinn
- Mardim, T., (2002b). Eesti Geoloogiline Baaskaart. Põhjavee kaitstus. Leht 6344 Kehra. Eesti Geoloogiakeskus. Tallinn
- Mardim, T., (2002c). Eesti Geoloogiline Baaskaart. Põhjavee kaitstus. Leht 7321 Prangli. Eesti Geoloogiakeskus. Tallinn
- Mardim, T., (2002d). Eesti Geoloogiline Baaskaart. Põhjavee kaitstus. Leht 7322 Loksa. Eesti Geoloogiakeskus. Tallinn
- Mardim, T., (2003a). Eesti Geoloogiline Baaskaart. Põhjavee kaitstus. Leht 6342 Aegviidu. Eesti Geoloogiakeskus. Tallinn
- Mardim, T., (2003b). Eesti Geoloogiline Baaskaart. Põhjavee kaitstus. Leht 6341 Vaida. Eesti

- Geoloogiakeskus. Tallinn
- Mardim, T., (2005a). Eesti Geoloogiline Baaskaart. Põhjavee kaitstus. Leht 6433 Kadrina. Eesti Geoloogiakeskus. Tallinn
- Mardim, T., (2005b). Eesti Geoloogiline Baaskaart. Põhjavee kaitstus. Leht 7411 Võsu. Eesti Geoloogiakeskus. Tallinn
- Mardim, T., (2006a). Eesti Geoloogiline Baaskaart. Põhjavee kaitstus. Leht 6434 Rakvere. Eesti Geoloogiakeskus. Tallinn
- Mardim, T., (2006b). Eesti Geoloogiline Baaskaart. Põhjavee kaitstus. Leht 7412 Karepa. Eesti Geoloogiakeskus. Tallinn
- Mardim, T., (2007). Eesti Geoloogiline Baaskaart. Põhjavee kaitstus. Leht 6443 Kiviõli. Eesti Geoloogiakeskus. Tallinn
- Mardim, T., (2008). Eesti Geoloogiline Baaskaart. Põhjavee kaitstus. Leht 6444 Kohtla-Järve. Eesti Geoloogiakeskus. Tallinn
- Mardim, T., (2009a). Eesti Geoloogiline Baaskaart. Põhjavee kaitstus. Leht 6533 Sillamäe. Eesti Geoloogiakeskus. Tallinn
- Mardim, T., (2009b). Eesti Geoloogiline Baaskaart. Põhjavee kaitstus. Leht 6534 Narva. Eesti Geoloogiakeskus. Tallinn
- Mardim, T., (2010). Eesti Geoloogiline Baaskaart. Põhjavee kaitstus. Leht 6333 Paldiski. Eesti Geoloogiakeskus. Tallinn
- Mardim, T., (2011). Eesti Geoloogiline Baaskaart. Põhjavee kaitstus. Leht 6431 Tapa. Eesti Geoloogiakeskus. Tallinn
- Mardim, T., (2012). Eesti Geoloogiline Baaskaart. Põhjavee kaitstus. Leht 6332 Kohila. Eesti Geoloogiakeskus. Tallinn
- Mardim, T., (2013). Eesti Geoloogiline Baaskaart. Põhjavee kaitstus. Leht 6244 Pakri. Eesti Geoloogiakeskus. Tallinn
- Mardim, T., (2014a). Eesti Geoloogiline Baaskaart. Põhjavee kaitstus. Leht 6331 Keila. Eesti Geoloogiakeskus. Tallinn
- Mardim, T., (2014b). Eesti Geoloogiline Baaskaart. Põhjavee kaitstus. Leht 6432 Väike-Maarja. Eesti Geoloogiakeskus. Tallinn
- Mardim, T. & Vahtra, T., (2016). Eesti Geoloogiline Baaskaart. Põhjavee kaitstus. Leht 6413 Järva-Jaani. Eesti Geoloogiakeskus. Tallinn
- Mardim, T. & Vahtra, T., (2017). Eesti Geoloogiline Baaskaart. Põhjavee kaitstus. Leht 6424

- Paide. Eesti Geoloogiakeskus. Tallinn
- Moustafa, M. (2019). Assessing perched aquifer vulnerability using modified DRASTIC: a case study of colliery waste in north-east England (UK). *Hydrogeology Journal*, 1837–1850. <https://doi.org/10.1007/s10040-019-01932-1>
- Männik, M., (2020). Eesti Geoloogiline Baaskaart. Põhjavee kaitstus. Leht 6312 Järvakandi. Eesti Geoloogiateenistus. Rakvere
- Neshat, A., Pradhan, B., Pirasteh, S., & Shafri, H. Z. M. (2014). Estimating groundwater vulnerability to pollution using a modified DRASTIC model in the Kerman agricultural area, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 71(7), 3119–3131. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2690-7>
- Perens, R. (2001). Eesti põhjavee kaitstuse kaart 1:400 000. Eesti Geoloogiakeskus. Tallinn. EGF 7120
- Perens, R. (2007). Eesti Geoloogiline Baaskaart. Põhjavee kaitstus. Leht 5441 Tartu. Eesti Geoloogiakeskus. Tartu
- Perens, R., Parm, T., Savva, V., Lelgus, M. (2004). Saare maakonna põhjavee kaitstuse digitaalse kaardi 1:50 000 koostamine. Eesti Geoloogiakeskus. Tallinn. EGF 7571
- Perens, R. & Polikarpus, M. (2003). Pärnu maakonna põhjavee kaitstuse kaart. Tallinn. EGF 7542
- Perens, R., Savva, V., Polikarpus, M., Parm, T. (2002). Tallinna (6334) ja Rohuneeme (7312) kaardilehe hüdrogeoloogilised ja põhjavee kaitstuse kaardid mõõtkavas 1:50 000. Seletuskirjad. Eesti Geoloogiakeskus. Tallinn. EGF 7474
- Perens, R. & Vallner, L. (1997). VI Hydrogeology. Water-bearing formation. In: Raukas, A., Teedumäe, A (eds.) *Geology and mineral resources of Estonia*. Tallinn: Estonian Academy Publishers
- Ploom, K. (2016). Eesti Geoloogiline Baaskaart. Pinnakate. Leht 6314 Rapla. Eesti Geoloogiakeskus. Tallinn
- Ploom, K. (2017). Eesti Geoloogiline Baaskaart. Pinnakate. Leht 6312 Järvakandi. Eesti Geoloogiakeskus. Tallinn
- Polikarpus, M. (2001). Tartu maakonna põhjavee reostuskaitstuse kaart. Bakalaureusetöö, Tartu Ülikool.
- Põldvere, A., Põldvere, A., Grünberg, R., Rohtla, R., Ariva, K., All. T. (2016). Eesti geoloogilise baaskaardi Võru (5422) kaardilehe seletuskiri. Eesti Geoloogiakeskus. Tartu. EGF 8760
- Põldvere, A., Perens, R., Ariva, K., All. T., Rohtla, R. (2007). Eesti geoloogilise baaskaardi Tartu

- kaardilehe (5441) seletuskiri. Eesti Geoloogiakeskus. Tartu. EGF 7904
- Rahman, A. (2008). A GIS based DRASTIC model for assessing groundwater vulnerability in shallow aquifer in Aligarh, India. *Applied Geography*, 28(1), 32–53. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2007.07.008>
- Rohtla, R., (2014). Eesti Geoloogiline Baaskaart. Põhjavee kaitstus. Leht 5422 Võru. Eesti Geoloogiakeskus. Tallinn
- Rohtla, R. & Tilk, K. (2006). Eesti Geoloogiline Baaskaart. Pinnakate. Leht 5441 Tartu. Eesti Geoloogiakeskus. Tallinn
- Roosaare, J., Mõisja, K., Aunap, R. (2019). *Geoinformaatika*. Tartu: Tartu Ülikooli Kirjastus
- Savitskaja, L., Savva, V., Jashtshuk, S. (2003). Harju alamvesikonna põhjavee kaitstuse kaart mõõtkavas 1:50 000. Eesti Geoloogiakeskus. Tallinn. EGF 7507
- Savitskaja, L., Viigand, A., & Kulitshenko, G. (1982). Geologo-gidrogeologitsheskoje obosnovaniye ohranõ podzemnõh vod v uslovijah Estonskoi SSR. Tallinn. EGF 3954
- Shirazi, S. M., Imran, H. M., & Akib, S. (2012). GIS-based DRASTIC method for groundwater vulnerability assessment: A review. *Journal of Risk Research*, 15(8), 991–1011. <https://doi.org/10.1080/13669877.2012.686053>
- Stigter, T. Y., Ribeiro, L., & Dill, A. M. M. C. (2006). Evaluation of an intrinsic and a specific vulnerability assessment method in comparison with groundwater salinisation and nitrate contamination levels in two agricultural regions in the south of Portugal. *Hydrogeology Journal*, 14(1–2), 79–99. <https://doi.org/10.1007/s10040-004-0396-3>
- Struckmeier, W. F., & Margat, J. (1995). *Hydrogeological Maps A Guide and a Standard Legend* (17). Hannover: Verlag Heinz Haise.
- Suuroja, K., Kaljuläte, K., Mardim, T., Morgen, E., Ploom, K., Karimova, M., Vahtra, Veski, A., Shtokalenko, M. (2017a). Eesti geoloogilise baaskaardi Rapla (6314) leht. Seletuskiri. Eesti Geoloogiakeskus. Tallinn. EGF 8830
- Suuroja, K., Mardim, T., Kadastik, E., Eltermann, G. (1993). Hiiumaa kompleksse geoloogilise kaardistamise mõõtkavas 1:50 000 aruanne. Eesti Geoloogiakeskus. Tallinn. EGF 4696
- Suuroja, K., Ploom, K., Kaljuläte, K., Morgen, E., Karimova, M., Vahtra, T., Nezdoli, J., Shtokalenko, M. (2017b). Eesti geoloogilise baaskaardi Järvakandi (6312) leht. Seletuskiri. Eesti Geoloogiakeskus. Tallinn. EGF 8826
- Teiter, K., (1995). Geinfosüsteemide kasutamine Saaremaa põhjavee reostuskaitstuse kaardi koostamisel. Bakalaureusetöö, Tartu Ülikool.

- Vahtra, T., (2018). Eesti Geoloogiline Baaskaart. Põhjavee kaitstus. Leht 6314 Rapla. Eesti Geoloogiateenistus. Rakvere
- Vallner, L., & Porman, A. (2016). Groundwater flow and transport model of the Estonian Artesian Basin and its hydrological developments. *Hydrology Research*, 47(4), 814–834. <https://doi.org/10.2166/nh.2016.104>
- Van Stempvoort, D., Ewert, L., & Wassenaar, L. (1993). Aquifer vulnerability index: A gis - compatible method for groundwater vulnerability mapping. *Canadian Water Resources Journal*, 18(1), 25–37. <https://doi.org/10.4296/cwrj1801025>
- Vrba, J., & Zaporozec, A. (1994). Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability. *International Contributions to Hydrogeology* (16). Hannover: Verlag Heinz Haise.
- Zwahlen, F. (ed.) (2004). *COST Action 620 Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (Karst) Aquifers*. European Commission. <https://doi.org/PNR61>

Internetiallikad

Eesti Geoloogiateenistuse ruumiandmed seisuga 01.04.2020

<https://www.egt.ee/et/andmed-kaardid/rapla-ja-jarvakandi-hudrogeoloogia>

Maa-ameti ruumiandmed seisuga 28.07.2019

<https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/Geoloogilised-andmed/Geoloogiline-baaskaart/Geoloogilise-baaskaardi-allalaadimine-p534.html>

Keskonnaagentuur, EELIS andmebaasi avalik WFS-teenus.

Teenuse aadress: <https://gsavalik.envir.ee/geoserver/eelis/ows?> (Kasutatud 02.05.2020)

Maa-ameti kõrgusandmed, 2020

<https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/Korgusandmed/Laadi-korgusandmed-alla-p614.html> (Kasutatud 02.05.2020)

Maa-ameti geoportaal. Geoloogiline baaskaart 1:50 000

<https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/Geoloogilised-andmed/Geoloogiline-baaskaart-1-50000-p39.html> (Kasutatud 03.05.2020)

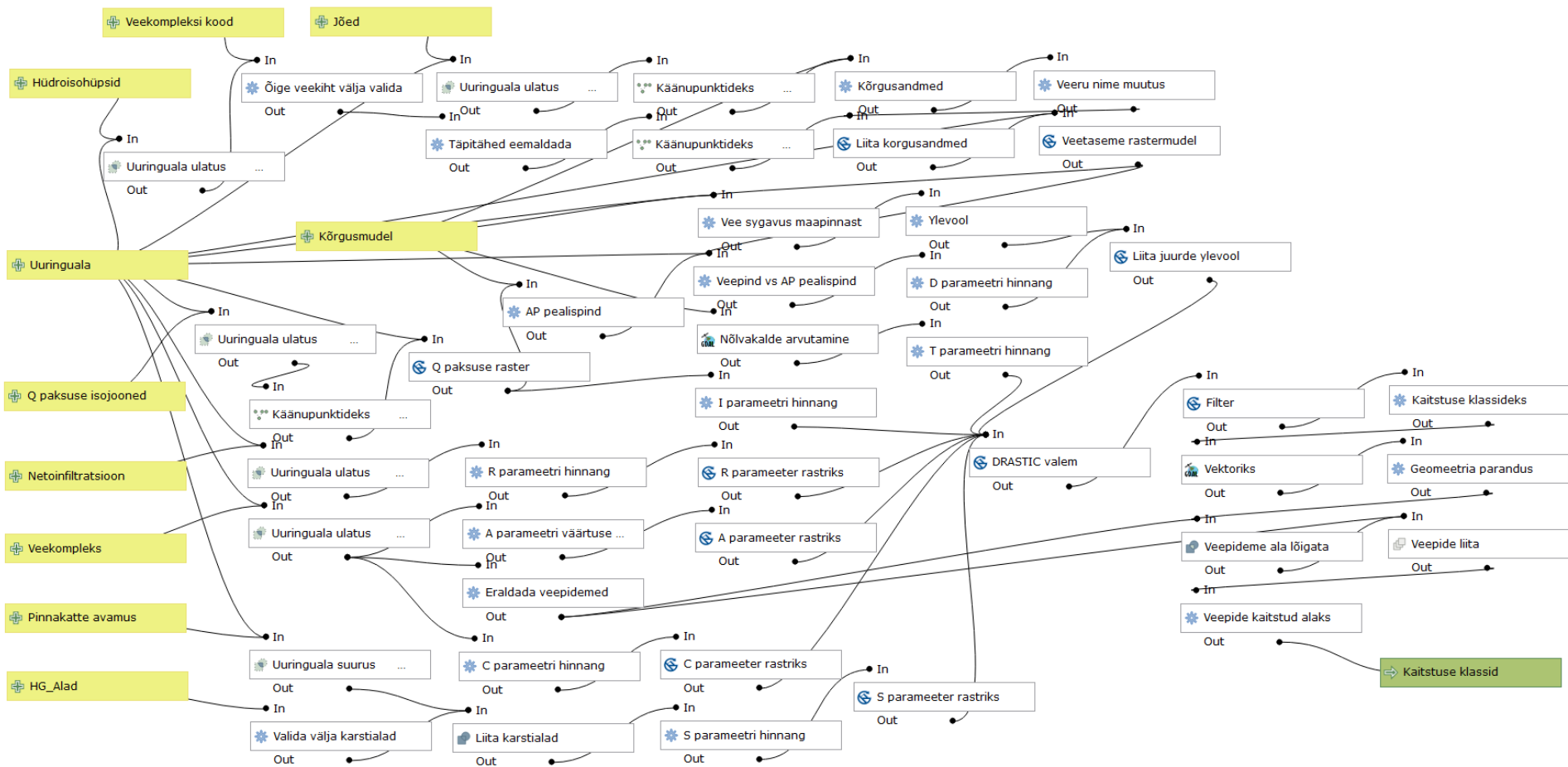
Veeseadus. (2019). RT I, 22.02.2019, 1. Loetud aadressil

<https://www.riigiteataja.ee/akt/122022019001> (Kasutatud 02.05.2020)

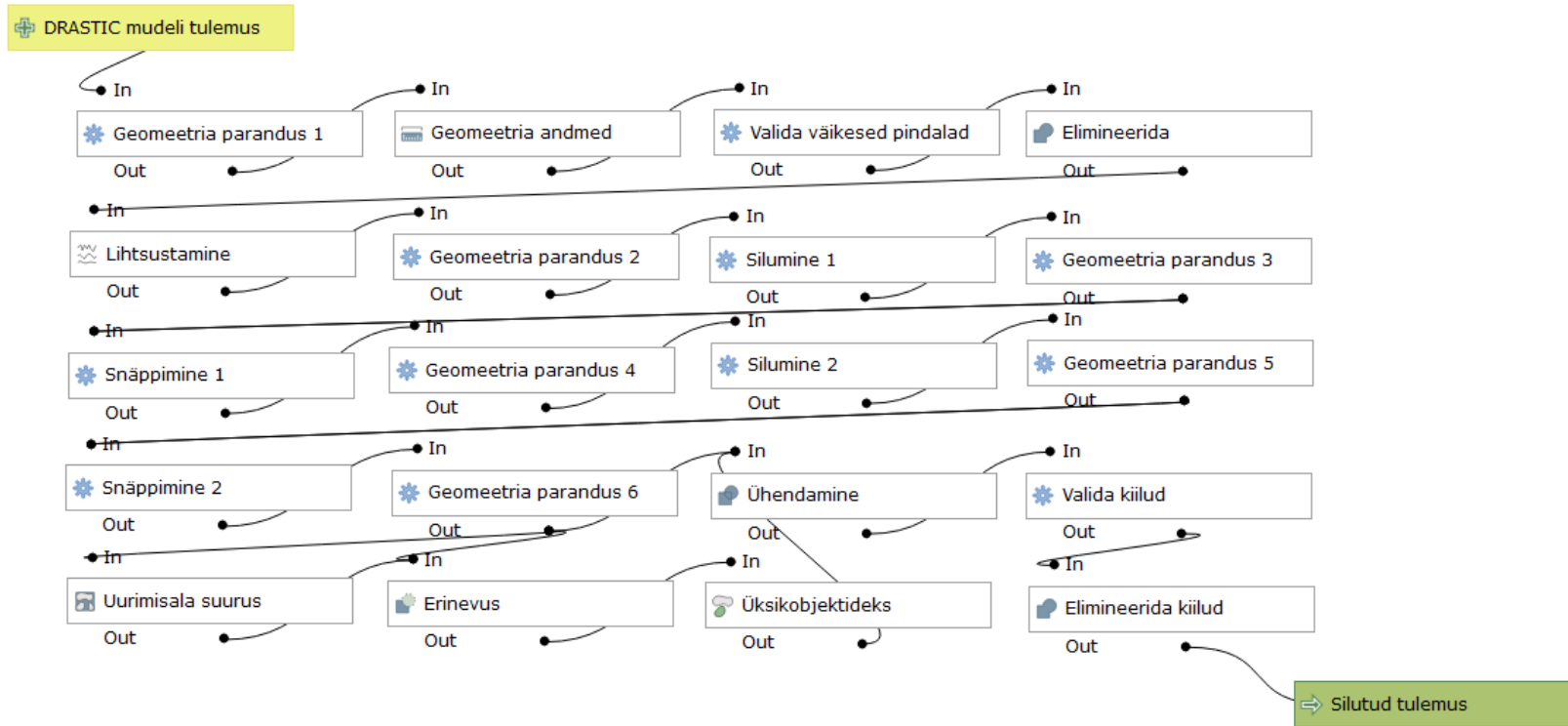
Lisa 1. Maa-ameti ArcGIS geoandmebaasi ülesehitus

- Geoloogiline_baaskaart_v2_4.gdb
 - Aluspõhi
 - AP_Avamus
 - AP_Avamus_indeks
 - AP_langatus_kerge
 - AP_Rike
 - AP_Rike_nimi
 - AP_Stratotüüp
 - Aluspõhja_reljeef
 - APR_Astang
 - APR_Isojoon_tekst
 - APR_Isojooned
 - APR_Nimed
 - APR_org
 - Geofüüsika
 - GRB_Isojoon
 - GRB_Isojoone_väärtus
 - GRB_Punktid
 - Kaudsed_Punktid
 - MG_Isojoon
 - MG_Isojoone_väärtus
 - MG_Punktid
 - Profiil
 - Seismojaam
 - Geomorfoloogia
 - GM_Joon
 - GM_Kujundus
 - GM_Nimi
 - GM_Pinnavorm
 - GM_Punkt
 - Hüdrogeoloogia
 - HG_Alad
 - HG_Hüdroisohüps
 - HG_Jooned
 - HG_Kirjad
 - HG_Pump
 - HG_Punktid
 - HG_PV_min_joon
 - HG_Veehaare
 - HG_Veekompleks
 - Läbilõiked
 - LL_AP_Alad
 - LL_AP_Jooned
 - LL_AP_Kirjad
 - LL_Asukohad
 - LL_HG_Alad
 - LL_HG_Jooned
 - LL_HG_Kirjad
 - LL_Q_Alad
 - LL_Q_Jooned
 - LL_Q_Kirjad
 - LL_Tähised
 - Läbilõike_jooned
 - Maavarad
 - MV_Leiuukoht
 - MV_Leviala
 - MV_Progn_Varu_kat
 - Pinnakate
 - Q_Avamus
 - QP_Isojoon
 - QP_Isojoon_tekst
 - QP_langujoon
 - Põhjavee_kaitstus
 - PVK_hyps_tekst
 - PVK_I_isohüps
 - PVK_Kaitstus
 - PVK_Tasakaaluala
 - FM_Geol
 - FM_Lisa
 - FM_LL_seos
 - FM_PA
 - FM_PA_Geol
 - FM_PA_Lisa
 - FM_PA_LL
 - FM_PA_PK
 - FM_PK
 - META_Juhend
 - META_Teemad
 - META_Teemakaart
 - MV_Progn_üldandmed
 - Settekehad
- Maavarad
 - Maavarad

Lisa 2. QGIS'i graafilise modelleerija DRASTIC-metoodika töövoog



Lisa 3. QGIS'i graafilise modelleerija kartograafilise silumise mudel



Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Magdaleena Männik

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose „**Põhjavee kaitstuse kaardi koostamine GIS-põhise Eesti näitel muudetud DRASTIC-metoodikaga**“, mille juhendajad on Maile Polikarpus ja Tavo Ani, reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 3.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Magdaleena Männik
01.06.2020