

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

Magistritöö geoinformaatikas ja kartograafias (30 EAP)

**Puurkaevuandmetel põhinev metoodika üle-eestiliseks põhjavee
kaitstuse hindamiseks ja visualiseerimiseks**

Liina Hints

Juhendajad: Magdaleena Männik
Raivo Aunap, PhD

Tartu 2025

Annotatsioon

Puurkaevuandmetel põhinev metoodika üle-eestiliseks põhjavee kaitstuse hindamiseks ja visualiseerimiseks

Põhjavee kaitstuse kaarte kasutatakse sisendina planeerimise, veemajanduse ja looduskaitse valdkondade otsustusprotsessides. Eesti aladest katab piisava detailsusega, 1 : 50 000 põhjavee kaitstuse baaskaart siiani aga ainult kolmandiku. Magistritöö eesmärk oli töötada välja puurkaevude andmestikule tuginev metoodika, mis võimaldaks põhjavee kaitstust hinnata ja visualiseerida automaatselt terve Eesti ulatuses. Metoodika töötati välja kogu puurkaevude andmebaasi peal, selle rakendamiseks loodi Pythonil ning QGIS-il põhinev töövoog. Töö tulemusena arvutati kaitstuse klass kõigile piisava andmestikuga Eesti puurkaevudele (22 686) ning valmis üle-eestilise katvusega adaptiivne põhjavee kaitstuse ruutkaart, mille võreruutude suurus sõltub alusandmete tihedusest piirkonnas. Tulemuste valideerimine võrdlusena olemasolevate kaitstuse kaartidega kinnitas metoodika ja ruutkaardi head toimimist enamikes Eesti piirkondades.

Märksõnad: põhjavee kaitstus, ruutkaart, DRASTIC

CERCS kood: P470 – Hüdrogeoloogia, geoplaneering ja ehitusgeoloogia; P510 – Füüsiline geograafia, geomorfoloogia, mullateadus, kartograafia, klimatoloogia

Abstract

Methodology for nationwide groundwater vulnerability assessment and visualization using drilled well data

Groundwater vulnerability maps are used as input in decision-making processes related to spatial planning, water management, and nature conservation. In Estonia, however, the existing 1:50,000 groundwater vulnerability map currently only covers about one-third of the country. The aim of this Master's thesis was to develop a methodology based on drilled well data that would allow for the automated assessment and visualization of groundwater vulnerability across the entire territory of Estonia. The methodology was developed using the entire drilled well database, and a workflow was created using Python and QGIS. As a result, vulnerability classes were calculated for all Estonian wells with sufficient data (22,686 in total). Additionally, a nationwide groundwater vulnerability grid map was created, with variable cell sizes based on input data density. Validation of the results through comparison with existing vulnerability maps confirmed good performance of the methodology and adaptive grid map in most regions of Estonia.

Keywords: groundwater vulnerability, adaptive grid map, DRASTIC

CERCS code: P470 – Hydrogeology, geographical and geological engineering; P510 – Physical geography, geomorphology, pedology, cartography, climatology

Sisukord

Sissejuhatus.....	5
1. Teoreetiline ülevaade.....	7
1.1 Põhjavee kaitstus.....	7
1.1.1 Enimlevinud põhjavee kaitstuse kaardistamise meetodikad.....	8
1.1.2 Põhjavee kaitstuse kaardistamine Eestis.....	12
1.1.3 Puurkaevu andmete kasutamine põhjavee kaitstuse hindamisel.....	14
2. Materjalid ja meetodika.....	17
2.1 Uurimisala iseloomustus ja piiritlemine.....	17
2.2 Lähteandmed.....	18
2.3 Meetodika ja töövoomudel.....	19
2.3.1 Puurkaevude andmestiku ettevalmistus kaitstuse hindamiseks.....	19
2.3.2 Põhjavee kaitstuse hindamine DRASTIC meetodikaga.....	21
2.3.2.1 D – Põhjaveekihi survetase.....	22
2.3.2.2 R – Netoinfiltratsioon.....	22
2.3.2.3 A – Põhjaveekihi omadused.....	24
2.3.2.3 S – Pinnakatte omadused.....	24
2.3.2.5 T – Reljeef.....	28
2.3.2.6 I – Pinnakatte paksus.....	29
2.3.2.7 C – Filtratsioonimoodul.....	30
2.3.2.8 Põhjavee kaitstuse indekseid klassifitseerimine.....	31
2.3.3 Põhjavee kaitstuse visualiseerimine.....	33
2.3.3.1 Adaptiivse kaardivõre loomine.....	33
2.3.3.2 Põhjavee kaitstuse hinnangute integreerimine adaptiivsele kaardivõrele.....	35
2.4 Tulemuste valideerimine ja analüüs.....	37
2.4.1 Võrdlus olemasolevate põhjavee kaitstuse kaartidega.....	37
2.4.2 DRASTIC parameetrite tundlikkusanalüüs.....	37
3. Tulemused ja arutelu.....	40
3.1 Puurkaevude põhine põhjavee kaitstus.....	40
3.2 Adaptiivne kaardivõre.....	43
3.3 Üle-eestiline põhjavee kaitstuse ruutkaart.....	44
3.3.1 Võrdlus olemasolevate põhjavee kaitstuse kaartidega.....	47
3.4 DRASTIC parameetrite tundlikkusanalüüs.....	53

3.4.1 Tundlikkus DRASTIC parameetrite eemaldamisele (MRSA).....	54
3.4.2 DRASTIC parameetrite tegelik kaalukus (SPSA)	55
3.5 Lähteandmestiku ja meetodika kitsaskohad	59
3.6 Võimalused ruutkaardi valideerimiseks ja edasiarenduseks.....	60
Kokkuvõte.....	62
Summary.....	63
Tänuavaldused	65
Kasutatud kirjandus.....	66
Lisad.....	73
Lisa 1. Põhjavee kaitstuse ruutkaardi loomise töövoog	73
Lisa 2. DRASTIC parameetrite tundlikkusanalüüsi tulemused (kogu Eesti)	76

Sissejuhatus

Pool maailma rahvastikust kasutab põhjavett oma peamise joogiveeallikana. Koos rahvastiku kasvu ja tarbimise intensiivistumisega on nõudlus puhta ja kättesaadava põhjavee järele suurenenud alates 1980. aastatest ligi 1% aastas (UNESCO, 2024). Euroopa Liidu riikides ohustab põhjavee kvaliteeti enim intensiivne põllumajanduslik tegevus (Foster ja Custodio, 2019), millele viimastel aastakümnetel on olulise tegurina lisandunud kliimamuutustega kaasnevad nähtused (Caretta jt, 2022), näiteks pikaajalised põuad ja üleujutused (Cisneros jt, 2014). Eesti kliimastenaariumid prognoosivad 21. sajandi lõpuks märkimisväärset sademete hulga kasvu ja sadude intensiivistumist (Luhamaa jt, 2015), mille tulemusel suureneb ka põhjavette infiltreeruvate toitainete hulk, mis võib põhjavee kvaliteeti mõjutada (Keskkonnaministeerium, 2015). Eestis kasutab põhjavett joogiveena ligi 60% elanikkonnast (Terviseamet, 2025), mistõttu on väga oluline põhjaveeressursse kaitsta ja seeläbi reostusriske maandada.

Kõrgema loodusliku reostusohuga piirkondade tuvastamiseks võeti 1960. aastate lõpus rahvusvaheliselt kasutusele põhjavee (reostus)kaitstuse (ingl *groundwater vulnerability*) kontseptsioon (Margat, 1968). Põhjavee kaitstus kirjeldab, kui kergesti saasteained looduslikes tingimustes maapinnalt põhjaveeni jõuavad (National Research Council, 1993). Reoainete põhjavette jõudmise tõenäosus sõltub paljuski piirkonna geoloogilisest iseloomust – näiteks pinnakattesetete paksusest ja vettpidavate kihtide esinemisest põhjaveekihi kohal. Tegu on kontseptsionaalse, dimensioonitu nähtusega – seda pole võimalik mõõta, vaid ainult hinnata (Fannakh ja Farsang, 2022).

Põhjavee kaitstuse hindamiseks on välja töötatud mitmesuguseid meetodeid, millest kõige laialdasemalt on tänu oma lihtsusele ja võimekusele kanda kinnitanud 1987. aastal USA Keskkonnakaitseagentuuri poolt välja pakutud DRASTIC meetodika (Aller jt, 1987; Barbulescu, 2020). DRASTIC meetodika võtab põhjavee kaitstuse hindamisel arvesse seitset hüdrogeoloogilist ja keskkonnaparametrit (Aller jt, 1987). Põhjavee kaitstuse hindamise väljundiks on üldjuhul kaitstuse kaardid, millel uurimisalune piirkond on jagatud paremini ja halvemini kaitstud aladeks. Põhjavee kaitstuse kaarte kasutatakse olulise keskkonnamõjuga planeerimisotsuste tegemisel, intensiivse põllumajandustegevuse piiramisel või muud tüüpi maakasutuse suunamisel (Fannakh ja Farsang, 2022), ning põhjaveeressursside majandamisel ja kaitsel (Witkowski jt, 2007).

Esimesed Eesti alasid kirjeldavad põhjavee kaitstuse kaardid valmisid 1980. aastatel (Savitskaja jt, 1982). Sel ajal väljatöötatud meetodika, mis lähtub kaitstuse hinnangu andmisel eelkõige pinnakattesetete paksusest ja tüübist, on tänapäevani kaitstuse kaardistamise aluseks (Maa-amet, 2015). Kõige täpsemat, 1 : 50 000 mõõtkavas põhjavee kaitstuse kaarti on Eesti geoloogilise baaskaardistamise raames toodetud alates 2002. aastast (Perens jt, 2002a; Suuroja jt, 2002a; Suuroja jt, 2002b; Suuroja jt, 2002c; Suuroja jt, 2002d). Paraku on suuremõõtkavaline kaitstuse kaardistamine aeganõudev protsess, mis lähtub andmeallikana teistest baaskaardi kihtidest, ning kaitstuse kaarti ei saa koostada aladele, kus näiteks pinnakattesetteid veel kaardistatud pole. Piisava detailsusega geoloogiliste kaardistusandmete puudumise tõttu katab põhjavee kaitstuse baaskaart tänaseks vaid kolmandiku Eestist (Eesti

Geoloogiateenistuse ruumiandmed, 2025). Vajadus usaldusväärsete ja võimalikult ajakohaste põhjavee kaitstuse kaartide järele on aga suur, sest neid kasutavad oma töös igapäevaselt nii kohalike omavalitsuste keskkonnaspetsialistid (Keskkonnaamet, 2025), keskkonnateemadega tegelevad ministriumid ja nende haldusasutused, ruumiplaneerijad kui ka keskkonnamõjude hindamist läbiviivad ettevõtted (Pöder, 2017).

Käesoleva magistr töö eesmärk on töötada välja meetodika, mis võimaldab põhjavee kaitstust hinnata ja visualiseerida automaatselt terve Eesti ulatuses, ning mis peamise andmeallikana kasutab puurkaevude andmeid. Eesti puurkaevude andmebaas on üleriigilise katvusega, pidevalt uuenev andmekogu, mis sisaldab hüdrogeoloogilist infot ja geoloogilisi läbilõikeid mitmekümne tuhande puurkaevu kohta ning kujutab endast seega alternatiivi traditsioonilistele, valmis kujul pinnakattekaartidele. Meetodika väljatöötamisel tuginetakse Eestile kohandatud DRASTIC meetodile (Männik jt, 2023; Männik ja Karro, 2023), mida rakendatakse esmakordselt punktandmete kontekstis. Töö tulemusena arvutatakse põhjavee kaitstuse klass kõigile Eesti puurkaevudele, mille andmestik seda võimaldab, ning valmib üle-eestiline põhjavee kaitstuse kaart, mida saab edaspidi kasutada praktilise lähtekohana põhjavee kaitstusega seotud otsuseid toetava töövahendi arenduseks.

Kõik magistr töö sisalduvad joonised on suuremas formaadis kättesaadavad aadressil <https://doi.org/10.5281/zenodo.15499475>.

1. Teoreetiline ülevaade

1.1 Põhjavee kaitstus

Põhjavee kaitstus (ingl *groundwater vulnerability*), mida aeg-ajalt nimetatakse ka põhjavee reostuskaitstuseks või reostusohutlikkuseks, on tänapäeval laialt levinud kontseptsioon, millega kirjeldatakse maapinnalt lähtuva reoainete põhjaveekihti jõudmise tõenäosust reostusjuhtumi korral (National Research Council, 1993). Kaitstuse mõiste tugineb eeldusele, et teatud piirkonnad on põhjavee reostumise suhtes vastuvõtlikumad kui teised (Majandang ja Sarapirome, 2013). Konkreetsemalt võib põhjavee kaitstust käsitleda kui aega, mis kulub maapinnalt lähtuvate reoainete infiltreerumiseks läbi aeratsioonivöö põhjaveeni (Focazio jt, 2002). Infiltratsioonija põhimõttele tuginev käsitlus oli põhjavee kaitstuse kaardistamise alguseks ka Eestis (Savitskaja jt, 1982; Savitskaja, 1992).

Põhjavee kaitstuse hindamiseks kasutatakse mitmeid erinevaid tegureid. Kõige tavapärasemaks on kujunenud lähenemine, mis keskendub looduslikele teguritele (Farjad jt, 2012). Looduslik kaitstus (ingl *intrinsic vulnerability*) põhineb sellistel hüdrogeoloogilistel ja keskkonnatingimustel, mis mõjutavad vee ja reoainete liikumist põhjaveeni: näiteks mullakihi või pinnakattesetete paksus ja koostis (Wachniew jt, 2016). Põhjavee loodusliku kaitstuse üldpõhimõtte seisneb selles, et piirkondades, kus põhjaveekihti katavad vettpidavad või vett nõrgalt läbilaskvad setted, on reoainete liikumine põhjaveekihti takistatud ning põhjaveekiht kaitstud (Perens, 2001). Ka Eestis levinud põhjavee kaitstuse definitsioon ning kaardistamis põhimõtted lähtuvad kaitstuse looduslikust käsitlusest (Veeseadus, 2019; Eesti Geoloogiateenistus, 2022). Siinkohal on oluline märkida, et loodusliku kaitstuse abil ei hinnata reostusstenaariumite esinemise tõenäosust, vaid ainult seda, kui haavatav on põhjaveekiht sarnase reostuskoormuse korral erinevates piirkondades (Majandang ja Sarapirome, 2013).

Mõnel juhul on aga otstarbekas hinnata põhjavee kaitstust koos reaalse reostusohuga. Sellisel juhul kaasatakse hindamisse sageli maakasutusandmed (Secunda jt, 1998; Huang jt, 2017) või konkreetsete punkt- ja hajureostusallikate asukohad (Kurwadkar, 2017). Üsna levinud on ka reostusobjektide kujutamine põhjavee kaitstuse kaardi lisakihina (Struckmeier ja Margat, 1995). Lisaks üldisele reostusallikate analüüsile on võimalik kaitstust hinnata ka konkreetse saasteaine põhisel. Sel juhul on tegu füüsikalise-keemilistel teguritel põhineva kaitstusega (ingl *specific vulnerability*), mille hindamiseks uuritakse konkreetsete saasteainete liikumist ja kaitumist infiltratsiooniprotsessis (Ribeiro jt, 2017; Douglas jt, 2018).

Põhjavett ohustavana käsitletakse põhjavee kaitstuse kontekstis eelkõige antropogeenseid reostusallikaid. Suurem osa põhjavee kvaliteeti ohustavast reostusest on põllumajanduslik hajureostus, mis tuleneb peaaesjalikult lämmastikväetiste kasutamisest (Rodriguez jt, 2020; Abascal jt, 2022). Põhjavee saastumine nitraatidega on Euroopa kontekstis tõsine probleem (Abascal jt, 2022), mistõttu on paljud Euroopas valmivad põhjavee kaitstust käsitlevad uuringud keskendunud just nitraatidele (Hansen jt, 2016; Serra jt, 2024). Eestis on nitraatide sisaldus põhjavees võrreldes nõukogudeaegse perioodiga küll vähenenud, ent põhjavee kaitseks on siiski määratletud nitraaditundlikud alad, mille kaitsmata ja nõrgalt kaitstud põhjaveega aladel on teatud põllumajandustegevused piiratud (Veeseadus, 2019;

Kliimaministerium, 2025). Ka suur osa punktreostusest on seotud põllumajandustegevusega ning lähtub näiteks loomalautadest ja sõnnikuhoidlatest (Harter jt, 2014). Lisaks kujutavad endast ohtu kohad, kus hoiustatakse või ladustatakse jäätmeid ja kemikaale (Slavinskienė ja Jurevičius, 2016; Chidichimo jt, 2020). Eestis on ohtlikud ka aheraine- ja tuhamäed. Samuti on ohtlikud peremeheta jäänud, halvas korras puurkaevud, mida pole tamponeeritud (Perens, 2001).

Just antropogeensetest reostusallikatest sai gi alguse põhjavee kaitstuse kontseptsioon – nimelt oli põhjavee kaitstuse hindamine ja kaardistamine hea vahend, mille abil näidata avalikkusele, kuidas inimtekkeline reostus võib põhjavee kvaliteeti mõjutada ning millised piirkonnad on seejuures kõige halvemini kaitstud (Albinet ja Margat, 1970). Sellest ajast alates on kaitstuse kaardid olnud oluline kommunikatsioonivahend hüdrogeoloogide, ruumiplaneerijate ja teiste sihtrühmade vahel (Machiwal jt, 2018). Põhjavee kaitstuse klassidel põhineva ülesehituse tõttu suudavad need kaardid keerulise hüdrogeoloogilise info tõlgendada lihtsasti mõistetavale ja kasutatavale kujule. Kuna põhjavee kaitstus on dimensioonitu ja mitmeti tõlgendatav nähtus, sõltub kaitstuse kaartide kasutatavus aga väga suurel määral kasutatud hindamis- ja visualiseerimismetoodikast.

1.1.1 Enimlevinud põhjavee kaitstuse kaardistamise meetodid

Põhjavee kaitstuse hindamiseks on välja töötatud mitmesuguseid meetodikaid, mille valik sõltub uurimisküsimusest, piirkondlikest hüdrogeoloogilistest isepärasustest ning uurimisala suurusel (Moges ja Dinka, 2020). Kaitstuse hindamise meetodikad jagunevad kolmeks: ülekatteoperatsioonidel põhinevad meetodid, mida tihti kutsutakse ka indeksipõhisteks meetoditeks (ingl *overlay-index methods*) (Aller jt, 1987; Gogu ja Dassargues, 2000), modelleerimispõhised meetodid (ingl *process-based (simulation) methods*) (Harbaugh, 2005) ning mitmesugused statistilised ja masinõppepõhised meetodid (Taghavi jt, 2022).

Kõige levinumad ja iseloomult lihtsakoelisemad on ülekatteoperatsioonidel põhinevad ehk indeksipõhised põhjavee kaitstuse hindamise meetodid (Pavlis jt, 2010; Moraru ja Hannigan, 2018). Gogu ja Dassarguesi järgi (2000) jagunevad indeksipõhised meetodid omakorda hüdrogeoloogiliste tingimuste meetoditeks (ingl *hydrogeological complex and settings methods*) ning parameetristeks meetoditeks (ingl *parametric system methods*). Hüdrogeoloogiliste tingimuste meetodi ajalugu on kõige pikem – kui Margat ja Albinet (1970) põhjavee kaitstuse kontseptsiooni esmakordselt välja pakkusid ning sellele tuginedes ka Prantsusmaa reostusohu kaardi koostasid, kasutasid nad just seda meetodikat. Hüdrogeoloogiliste tingimuste meetodi näol on tegemist kvalitatiivse lähenemisega, mille käigus valitakse eksperthinnangu alusel välja piirkonnas põhjavett mõjutavad hüdrogeoloogilised ja keskkonnategurid ning otsustatakse, kui suur on nende mõju ja kuidas neid mõjusid kombineerida (Albinet ja Margat, 1970; Civita ja De Maio, 2004). Ka Eestis kasutatakse põhjavee kaitstuse kaardistamiseks hüdrogeoloogiliste tingimuste meetodit (Perens, 2001; Maa-amet, 2015), mis tähendab, et suur roll on erialastel teadmistel ning kaardipilt kujuneb paljuski kaardistaja või meetodika väljatöötaja subjektiivsetest hinnangutest lähtuvalt. Komplekse geoloogiaga piirkondade kaitstuse kaardistamiseks võib hüdrogeoloogiliste tingimuste meetodika olla vahel aga parim valik (Gogu ja Dassargues, 2000).

Võrreldes hüdrogeoloogiliste tingimuste meetodiga on tänapäeval põhjavee kaitstuse hindamiseks palju laiemalt kasutust leidnud parameetrilised meetodid (Wachniew jt, 2016; Jang jt, 2017). Parameetriliste meetodite puhul koostatakse valim geoloogilistest parameetritest, mis kas uurimisalal või universaalselt põhjavee kaitstust võivad mõjutada, ning töötatakse välja väärtusvahemikud nende parameetrite kvantitatiivseks hindamiseks (Taghavi jt, 2022). Parameetrite hinnangud võib küll niisama kokku liita, ent sagedamini määratakse igale parameetrile ka oma kaal – kõik parameetrid ei mõjuta üldjuhul põhjavee kaitstust võrdselt palju – ning liidetakse kokku parameetrite hinnangud korrutatuna nende kaaludega (Taghavi jt, 2022). Üheks tuntuimaks, universaalseimaks parameetriliseks põhjavee kaitstuse hindamise meetodiks peetakse 1987. aastal USA Keskkonnakaitseagentuuri poolt välja töötatud DRASTIC meetodikat (Aller jt, 1987; Barbulescu, 2020). Meetodi nimetus on tuletatud seitsmest hüdrogeoloogilisest ja keskkonnaparameetrist, mida selle meetodi raames põhjavee kaitstuse hindamiseks kasutatakse:

D – Veetaseme sügavus (*Depth to water*)

R – Netoinfiltratsioon (*net Recharge*)

A – Põhjaveekihi omadused (*Aquifer media*)

S – Mulla omadused (*Soil media*)

T – Reljeef (*Topography*)

I – Aeratsioonivööndi mõju (*Impact of the vadoze zone*)

C – Filtratsioonimoodul (*hydraulic Conductivity*)

Kõigile seitsmele parameetrile antakse hinnang skaalal 1 – 10, kusjuures kõrgemad hinnangud tähistavad väiksemat kaitset reostuse vastu. Igale parameetrile on määratud ka kaal (1 – 5) (Aller jt, 1987). Üldjuhul kirjeldab iga parameetri ruumilist varieeruvust rasterkiht, kus iga piksli väärtus tähistab selle parameetri hinnangut konkreetsetes asukohtades (Maqsoom jt, 2020). Põhjavee kaitstuse hindamiseks kasutatakse DRASTIC valemit:

$$D_i = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w \quad (1)$$

kus D_i tähistab põhjavee kaitstuse indeksit, r parameetri hinnangut ning w parameetri kaalu (Aller jt, 1987). Nagu individuaalsete parameetrite puhul, tähistavad madalamad põhjavee kaitstuse indeksid paremat, kõrgemad aga halvemat põhjavee kaitstust vaadeldavas piirkonnas.

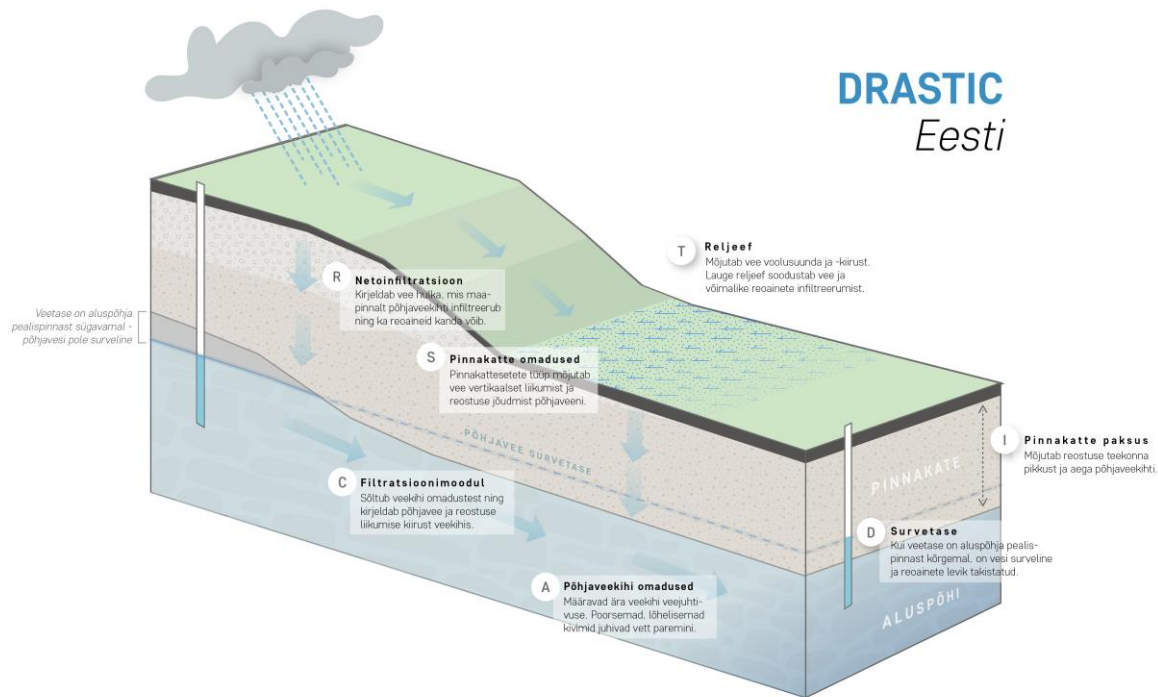
Põhjavee kaitstuse indeks on dimensioonitu väärtus, mis näitab ühe piirkonna suhtelist kaitstust võrreldes teiste aladega (Patel jt, 2022). Selleks, et põhjavee kaitstuse kaarte oleks otsustusprotsessides, aga ka kommunikatsioonivahendina lihtsam kasutada, klassifitseeritakse indeksi väärtusvahemikud lihtsasti mõistetavatesse kategooriatesse, mille arv sõltub piirkondlikest eripäradest, kasutusotstarbest ning tihtipeale ka seadusandlusest. Eestis eristatakse Veeseaduse §68-st lg-st 3 lähtuvalt viit põhjavee kaitstuse klassi: kaitsmata põhjaveega alad, nõrgalt kaitstud põhjaveega alad, keskmiselt kaitstud põhjaveega alad, suhteliselt kaitstud põhjaveega alad ning kaitstud põhjaveega alad (Veeseadus, 2019). Voudouris jt (2010) ning Hamza jt (2017) on kaitstuse indeksi jaganud nelja, Saidi jt (2011)

ning Vu jt (2019) kolme kaitstuse klassi. Klassifitseerimisel kasutatakse kõige sagedamini võrdseid väärtusvahemikke, ent kohati on täpsemaid tulemusi saavutatud hoopis geomeetrilisi väärtusvahemikke kasutades (Kazakis ja Voudouris, 2015).

DRASTIC meetodika ning teised indeksipõhised põhjavee kaitstuse hindamise meetodikad, näiteks EPIK (Doerfliger jt, 1999), KARSTIK (Davis jt, 2002) ja GOD (Foster, 1987), on leidnud laiapõhist kasutust seetõttu, et need kasutavad sisendina suhteliselt lihtsasti kättesaadavaid andmestikke (Patel jt, 2022), on arvutuslikult vähemahukad (Barbash ja Resek, 1996) ning sobivad nii väikese kui ka väga suure ulatusega põhjavee kaartide koostamiseks (Taghavi jt, 2022).

Indeksipõhiseid meetodeid on aga ka palju kritiseeritud. Ühe puudusena eeldavad indeksipõhised meetodid, et parameetrite mõju põhjavee kaitstusele on lineaarne, kuigi see ei pruugi olla tõsi (Neukum ja Azzam, 2009). Kritiseeritud on nii sobilike parameetrite kui ka parameetrite kaalude valimisega seotud subjektiivsus (Frind jt, 2006; Moraru ja Hannigan, 2018), ent samas on parameetrite ja nende kaalude muutmine sõltuvalt uurimisalast oluline, et regionaalseid hüdrogeoloogilisi eripärasid arvesse võtta (Kazakis ja Voudouris, 2015). Mitmed uuringud on näidanud, et DRASTIC parameetrite ja kaalude muutmine vastavalt uuritava piirkonna eripäradele annab võrreldes originaalse meetodikaga täpsemaid tulemusi ning on seega oluline samm põhjavee kaitstuse efektiivsemal hindamisel (Kazakis ja Voudouris, 2015; Hamza jt, 2017; Dizaji jt, 2020).

DRASTIC meetodikat on katsetatud ja kohalikele hüdrogeoloogilistele tingimustele vastavaks kohandatud ka Eestis (Männik jt, 2023; Männik ja Karro, 2023). Võrreldes originaalse DRASTIC meetodikaga muudeti Eesti ala meetodilises edasiarenduses kolme parameetrit. Kuna Eestis levivad ulatuslikud, kohati väga paksud, heterogeense iseloomuga pinnakattesetete kihid, asendati mulla omadusi kirjeldav parameeter pinnakattesetete omadustega ning aeratsioonivöö mõju parameeter pinnakatte paksusega. D parameetri puhul asendati põhjavee sügavuse parameeter põhjavee survetasemega, et määrata kaitstust täpsemalt aladel, kus vesi on paksude pinnakattesetete tõttu survealine ning tänu sellele paremini kaitstud (Männik jt, 2023; Männik ja Karro, 2023). Traditsiooniline DRASTIC meetodika ei sobi kuigi hästi kaitstuse hindamiseks survealistes põhjaveekihtides (Moraru ja Hannigan, 2018), ent muudetud D parameeter arvestab põhjavee survealisusega ning suurendab seeläbi meetodika rakendatavust kohalikus kontekstis. Eesti tingimustele kohandatud DRASTIC meetodika parameetrid on visualiseeritud joonisel 1.



Joonis 1. DRASTIC Eesti parameetrite kontseptuaalne joonis.

Teise põhjavee kaitstuse hindamise meetodikate rühma moodustavad hüdroloogilise modelleerimise põhised meetodid, kus kaitstuse hindamine põhineb vee ja saasteainete liikumise modelleerimisel ajas ja ruumis (Machiwal jt, 2018; Taghavi jt, 2022). Modelleerimis põhised meetodid võimaldavad kvantitatiivselt hinnata reoainete liikumise suunda ja kiirust (Abokifa jt, 2020), ent nõuavad ulatuslikku seireandmestikku, mistõttu kasutatakse neid enamasti piiratud aladel, kus vajaliku seireandmete hulga tagamine on võimalik (Machiwal jt, 2018).

Kolmandaks, kiiresti arenevaks meetodikate rühmaks on statistilised ja andmepõhised meetodid (Taghavi jt, 2022), mille hulka kuuluvad nii traditsioonilised statistilised meetodid (lineaarregressioon, dispersioonianalüüs) (Tesoriero ja Voss, 1997; Worrall jt, 2002) kui ka komplekssemad lähenemised. Ebamäärasuse kvantifitseerimiseks on viimastel aastatel aina enam hakatud kasutama hägusloogilisi ülekatteid, mis võimaldavad ühelt poolt kasutada levinud indeksipõhiseid põhjavee kaitstuse hindamise meetodikaid, aga teiselt poolt hinnata ka tulemustes esinevat ebamäärasust (Dixon jt, 2002; Duhalde jt, 2018). Üha populaarsemaks on saanud ka masinõppepõhised statistilised meetodid, näiteks närvivõrgud (Wang, 2003) ja otstustusmetsa algoritmid (Rodriguez-Galiano jt, 2014), mis suudavad sisendandmestikes tuvastada olulisi, tihtipeale keerulisi mustreid (Shih ja Chai, 2016), ent mille rakendamine eeldab kvaliteetset ja esinduslikku treeningandmestikku (Dounis, 2010).

Üha tavalisemaks on muutumas ka erinevat tüüpi põhjavee kaitstuse hindamise meetodikate kombineerimine (Kazakis ja Voudouris, 2015; Busico jt, 2017), kusjuures kõige sagedamini kombineeritakse omavahel indeksipõhiseid ja traditsioonilisi statistilisi meetodeid (Taghavi jt, 2022). Ehkki käesolevas töös kasutatakse Eestile tingimustele, puurkaevuandmete kasutamiseks

kohandatud DRASTIC meetodikat, mis on indeksipõhine meetod, viiakse tulemuste valideerimiseks ja kaitstuse klasside väärtusvahemike moodustamiseks läbi ka statistilised analüüsid. Lisaks viiakse DRASTIC parameetrite individuaalse mõju hindamiseks läbi parameetrite tundlikkusanalüüs. Seetõttu võib töös kasutatud lähenemist pidada kombineeritud meetodiks.

1.1.2 Põhjavee kaitstuse kaardistamine Eestis

Põhjavee kaitstuse kaardistamine sai Eestis alguse 1980. aastatel, mil valmis esimene, 1 : 200 000 mõõtkavas põhjavee kaitstuse kaart (Savitskaja jt, 1982). Savitskaja jt kasutasid põhjavee reostuskaitstuse hindamiseks pinnakattesetete tüüpi ja paksust – kaht geoloogilist parameetrit, mis mõjutavad olulisel määral reoainete infiltratsiooniga põhjavette. Kaitstus oli kaardil jagatud nelja klassi: kaitsmata, nõrgalt kaitstud, keskmiselt kaitstud ning kaitstud põhjaveega alad (Savitskaja jt, 1982).

1992. aastal avaldati Eesti põhjavee kaitstuse ja antropogeense koormuse kaardi tugilegend, milles Savitskaja defineeris juba väga selgepiirilisel ära pinnakatte litoloogilised omadused ja paksusvahemikud, mille abil põhjavee kaitstuse hindamist tulevikus läbi viia (Savitskaja, 1992). Struktureeritud tugilegend, mis kasvas välja Eesti esimesest põhjavee kaitstuse kaardist, pani aluse ühtlustatud põhjavee kaitstuse kaardistamise meetodikale ning leidis kasutust mitmetel 1990. aastatel valminud suuremõõtkavalistel kaartidel (Perens jt, 2001). Ehkki suur osa sel ajal valminud kaartidest on jäänud käsikirjalisteks (Perens jt, 2001) ning tehnoloogia hüppeline areng on hüdrogeoloogilise kaardistamise tööprotsesse pisut muutnud, on tugilegendis piiritletud meetodika püsinud peaaegu muutumatuna tänapäevani (Maa-amet, 2015).

Sajandivahetuse paiku sai põhjavee kaitstuse süstemaatiline kaardistamine sisse uue hoo, seda ilmselt paljuski tänu veepoliitika raamdirektiivi (2000/60/EÜ) rakendamisele, mis tõi endaga kaasa kohustuse tõhustada põhjavee kaitsemeetmeid ning koostada veemajanduskavasid. Detailsete geoloogiliste alusandmete vähesuse tõttu loodi esmalt väikesemõõtkavaline kaitstuse kaart mõõtkavas 1 : 400 000, mille põhikasutusala nähti ette esialgset veemajanduskavade koostamise toetamist (Perens jt, 2001). Ehkki 1 : 400 000 kaitstuse kaart on suure üldistusastmega ning koostatud praeguseks juba suuresti aegunud või ebatäielikke andmeid kasutades, on siiani tegi ainsa kogu Eestit katva põhjavee kaitstuse kaardiga, mistõttu leiab see endiselt kasutust põhjaveega seotud keskkonnaotsuste tegemisel (Keskkonnaamet, 2025).

Ühes väikesemõõtkavalise kaardiga valmisid 2000. aastate alguses ka esimesed 1 : 50 000 mõõtkavas põhjavee kaitstuse kaardid, mis moodustasid osa geoloogilise baaskaardi komplektist (Perens jt, 2002a; Suuroja jt, 2002a; Suuroja jt, 2002b; Suuroja jt, 2002c; Suuroja jt, 2002d). Süsteemse baaskaardistamise algusega kujunes lõplikult välja tänaseni kasutuses olev kaardilegend, millele võrreldes Savitskaja (1992) loodud klassifikatsiooniga lisandus veel üks kaitstuse klass (Perens jt, 2002a). Uue kaitstuse klassi lisandumisel liigitati kõik varasemalt "kaitstud" alad "suhteliselt kaitstuteks" ning kaitstud aladele seati rangemad piirid. Muus osas jäid pinnakatte litoloogia ja paksuse põhised liigitamise põhimõtted samaks ning on

muutumatu kujul kasutusel tänapäevani (Maa-amet, 2015). Siiani kehtivad põhjavee kaitstuse kaardistamise põhimõtted on toodud tabelis 1.

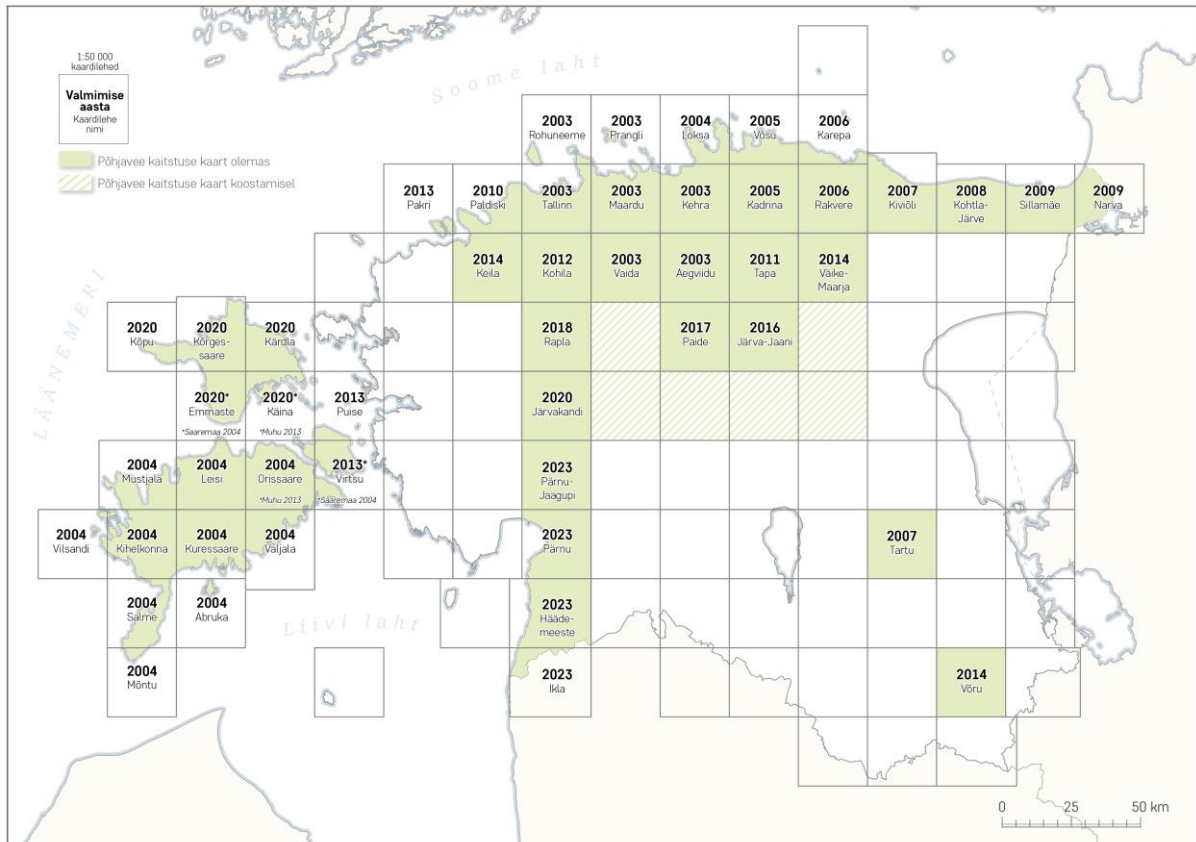
Tabel 1. Juhend põhjavee kaitstuse kaardistamiseks (Maa-amet, 2015 järgi).

KLASS	Põhjavee kaitstuse klassi üheselt määravad geoloogilised nähtusklassid			Klasside levikut korrigeerivad geoloogilised nähtusklassid	
	Pinnakatte paksus (m), litoloogia			+ 1 klass (kaitstuse poole)	- 1 klass (kaitsmatuse poole)
	Moreen, aleuriit või saviliiv	Savi või liivsavi			
Kaitsmata	0 – 2	-	Alvar, karstiaala, aluspõhja lõikuv vooluveekogu	* Savi või liivsavi esinemine kvaternaarisetetes	* Karstilehter/alang alvari lähedal * Glatsifluviaalsed setted aluspõhjal
Nõrgalt kaitstud	2 – 10	0 – 2	-	* Savi lamamiga sood * Tõusuallikate olemasolu	* Rikutud põhjaveeerežiimiga alad * Poorsete kivimite põhjaveekiht
Keskmiselt kaitstud	10 – 20	2 – 5	Aluspõhjalised veepidemed paksusega >2 m, tasakaalualad	* Tüsed (>1 m) järvelubja kihi või järvemuda esinemine	* Purdsetetega täitunud mattunud org aluspõhjas * Aluspõhja kivimeid avavad magistraalkraavid, vooluveekogude orundid
Suhteliselt kaitstud	20 – 50	5 – 10	Põhjavee ülevoolu piirkonnad		
Kaitstud	> 50	> 10	Regionaalsed veepidemed		

Tabelis 1 toodud viieklassiline jaotus kajastub põhjavee loodusliku kaitstuse ametliku määratlusena ka Veeseaduses (§68 lg 3). Veeseadus piiritleb kaitstuse klasse samade nähtusklasside – pinnakatte paksuse ja litoloogia – kaudu, ent erinevalt kaardistamisjuhendist liigitatakse klassi "kaitstud" seadusjärgselt ainult need alad, kus esimene aluspõhjaline veekompleks on kaetud regionaalse veepidemega (Veeseadus, 2019). Veeseadus ei käsitleni eraldi ka kaitstuse hinnangut korrigeerivaid nähtusklasse, mis tähendab, et põhjavee kaitstuse kaardistamisel võetakse võrreldes Veeseaduses määratletud miinimumnõuetega arvesse suuremat hulka hüdrogeoloogilisi parameetreid (Maa-amet, 2015). Kaardistusreeglite üldsõnalisus jätab kaardistajaile aga suhteliselt palju tõlgendamisruumi ning teeb kaitstuse kaardistamise subjektiivseks. DRASTIC meetodika esmakordne rakendamine Eestis (Männik, 2020) lähtus osaliselt vajadusest objektiivsema põhjavee kaitstuse kaardistamise meetodika järele.

Alates Eesti Vabariigi taasiseseisvumisest kuni 2017. aasta lõpuni tegeles geoloogilise baaskaardistamise, sh põhjavee kaitstuse kaardistamisega Eesti Geoloogiakeskus, tööde tellija oli alates 2003. aastast Maa-amet (Maa-amet, 2005; Maa-amet, 2019). 2018. aastal liikus baaskaardistamise ülesanne vastrajatud Eesti Geoloogiateenistuse kätte (Maa-amet, 2019). Ehkki suuremõõtkavaline kaardistamine sai alguse juba ligi 35 aastat tagasi, on suurem osa enne sajandivahetust valminud käsikirjalisi kaarte jäänud digitaliseerimata (Perens, 2001). Seetõttu võib tänapäeval funktsionaalselt kasutatavateks, otsustusprotsesse toetavateks

põhjavee kaitstuse kaartideks lugeda ainult digitaalsel kujul levitatavaid kaardikihte, mis on ligipääsetavad nii Eesti Geoloogiateenistuse geoportaalil, Maa- ja Ruumiameti geoportaalil (kuni 2025. aasta lõpuni) kui ka serverteenusena. Digitaalsel kujul kättesaadav suuremõtkavaline kaitstuse kaart on 2025. aasta seisuga valminud täpselt 1/3 baaskaardi lehtedel (Eesti Geoloogiateenistuse ruumiandmed, 2025). Kaardistamise hetkeseis on kujutatud joonisel 2.



Joonis 2. Eesti 1 : 50 000 mõõtkavas põhjavee kaitstuse kaardistamise seis 2025. aastal. Kaardi sisu: Maa-ameti ruumiandmed, 2024. Aluskaart: Maa-ameti ruumiandmed, 2025; OpenStreetMap ruumiandmed, 2025.

1.1.3 Puurkaevu andmete kasutamine põhjavee kaitstuse hindamisel

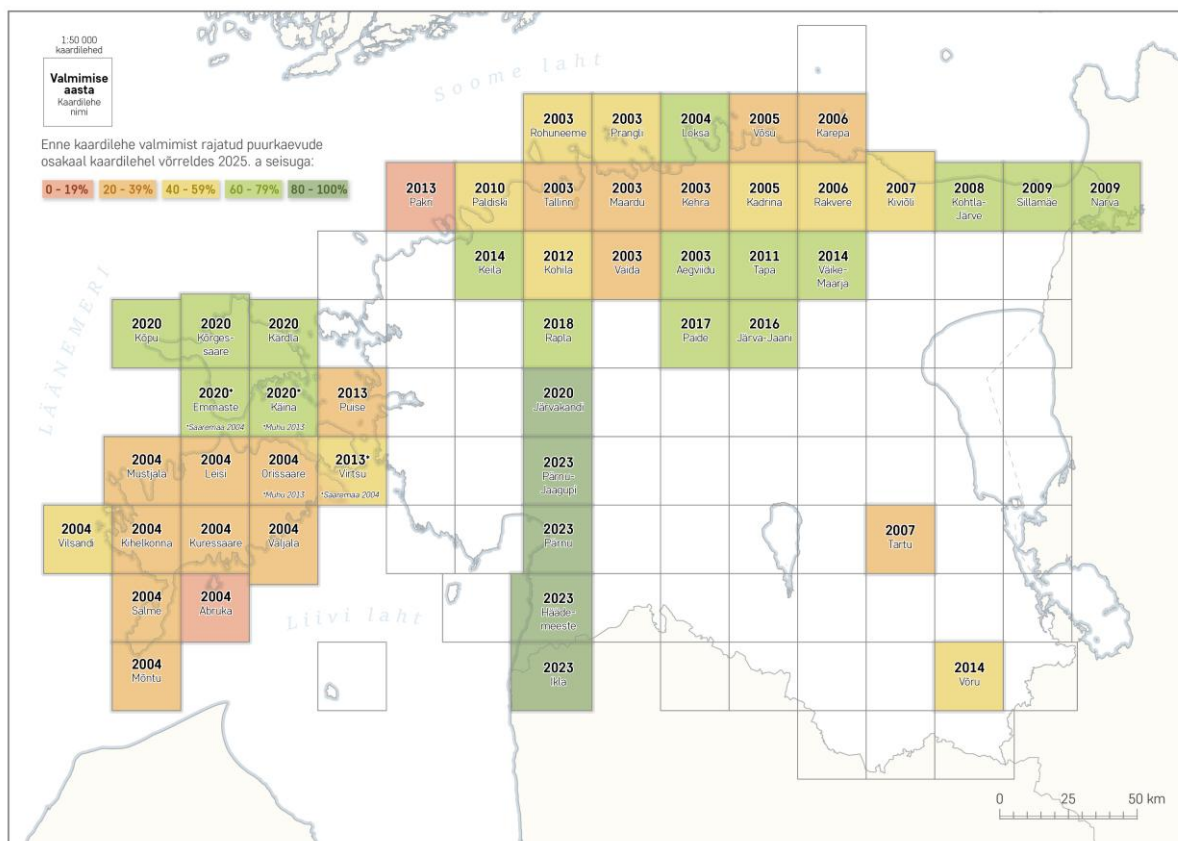
Eestis on põhjavee kaitstuse kaartide koostamisel algusest peale tuginetud aastakümnete jooksul kogutud väikese- kuni suuremõtkavalistele geoloogilistele ja hüdrogeoloogilistele kaardistusandmetele (Perens, 2001; Perens jt, 2007). Andmehulga pideva kasvu ning tehnoloogiliste arengute kontekstis on aga nii mõnegi piirkonna baaskaardi seletuskirjas viidatud kaardistusandmete vananemisele ning vajadusele info ajakohastamiseks teist tüüpi andmeallikate abil (Perens jt, 2002b; Perens jt, 2004). Kaardimaterjali täiendamiseks ja uuendamiseks on kasutatud seireandmeid ja muid põhjavee valdkonna aruandeid ja uuringuid (Perens jt, 2002b; Perens jt, 2007), ent kõige olulisemaks ajakohaseks hüdrogeoloogiliseks andmeallikaks võib pidada hoopis puurkaeve.

Puurkaevud on väärtuslik üle-eestilise katvusega andmeallikas (Perens, 2001), mille kohta on andmeid säilitatud juba enam kui sada aastat (VEKA andmebaas, 2025). Kui nõukogude ajal ning selle eelselt käis puurkaevudega seotud arvepidamine ainuüksi arvestuskaartide ja aruannete kaudu (Kukk, 1991), siis pärast taasiseseisvumist sai alguse ka digitaalne

põhjaveekataster, mille eesmärk oli talletada hüdrogeoloogilist infot ning mida pidas Eesti Geoloogiakeskus (Kukk, 1998). Alates 2012. aastast asuvad kõik puurkaevude andmed Eesti Veekasutuse (VEKA) andmebaasis, mis on osa Eesti Looduse Infosüsteemist (EELIS) ning mida haldab Keskkonnaagentuur. Avalik andmebaas hõlmab tänaseks andmeid enam kui 50 000 puurkaevu ning nende hüdrogeoloogiliste parameetrite, läbilõike, konstruktsiooni ja veekeemia kohta (VEKA andmebaas, 2025).

Seni kõige ulatuslikumalt on puurkaevuandmeid põhjavee kaitstuse hindamiseks kasutatud 1 : 400 000 kaitstuse kaardi loomise käigus: nimelt kasutati ligi 15 000 puurkaevu andmeid selleks, et täpsustada 1960. – 1980. aastatel valminud ning selleks ajaks vananenud pinnakattekaartide andmestikku, eeskätt pinnakattesetete paksusi (Perens, 2001). Puurkaeve on olulise andmeallikana kasutatud ka suuremõõtkavalise kaitstuse kaardistamise käigus, kusjuures puurkaevuandmete kasutamist on enamasti põhjendatud just vajadusega uuemate, tihedama katvusega andmestike järele (Perens jt, 2004; Perens jt, 2007). Ehkki üldiselt on pinnakattekaartide loomiseks samuti puurkaevuandmeid kasutatud, seisneb andmestiku ületöötamise vajadus selles, et puurkaeve on pinnakatte kaardistamise ning põhjavee kaitstuse kaardistamise vahepealsel ajal juurde puuritud ning pinnakattekaardi alusandmestik on seega ebatäielik.

Andmestiku ajakohasuse probleem on aktuaalne ka tänapäeval: kuna puurkaevude andmestik täieneb iga aastaga umbes 1000 – 2000 kaevu võrra (VEKA andmebaas, 2025), siis baaskaardistamise algusaegadel andmeallikana kasutatud puurkaevud moodustavad tänaseks vaid väikse osa kõigist puurkaevudest ning baaskaarti võib kohati pidada vananenuks. Joonis 3 näitab iga kaardilehe kohta, kui suur osa sel alal asuvatest puurkaevudest puuriti enne kaardilehe valmimisaastat ning kui palju andmeid on lisandunud pärast kaardilehe valmimist. Kui viimase viie aasta jooksul valminud kaardilehtede andmetäielikkus on võrdlemisi hea, siis 20 aasta tagusesse aega jäävad kaardilehed hõlmavad alusandmetena vaid umbes kolmandiku tänapäeval kättesaadavast infost. Puurkaevud pole baaskaardistamisel küll ainus andmeallikas (Maa-amet, 2019), kuid siiski viitab andmestiku pidev kasv vajadusele ka baaskaarti aeg-ajalt uuendada.



Joonis 3. Enne kaardilehe valmimist rajatud puurkaevude osakaal kaardilehel võrreldes 2025. aasta seisuga. Arvesse on võetud need puurkaevud, mille puurimisaasta eelnes kaardi avaldamise aastale vähemalt ühe võrra – näiteks 2003. aastal avaldatud kaardilehe puhul läksid arvesse kõik puurkaevud, mis puuriti aastal 2002 või varem. Kaardi sisu: Maa-ameti ruumiantmed, 2024; VEKA andmebaas, 2025. Aluskaart: Maa-ameti ruumiantmed, 2025; OpenStreetMap ruumiantmed, 2025.

Baaskaardistamise töövooge on aastate jooksul optimeeritud ning viimasel ajal puudub põhjavee kaitstuse kaardistajail vajadus puurkaevuandmete massiivseks kasutamiseks, sest pinnakatte- ja muud lähteandmetena kasutatavad kaardid koostatakse vahetult enne põhjavee kaitstuse kaarte ning on seega ajakohased. Küll aga kasutatakse puurkaevuandmeid ning muid väliskaardistamise andmeid, sh puurauke ja vaatluspunkte, pinnakattekaardi koostamiseks. Baaskaardistamise juhendis on nii pinnakattekaardile kui seeläbi ka põhjavee kaitstuse kaardile seatud andmetiheduse nõue, mille kohaselt aluspõhja ulatuva andmepunkti kaugus lähimast sarnasest punktist võib olla maksimaalselt 3 kilomeetrit, pinnakatet kirjeldavate punktide puhul 0,25 kilomeetrit (vastavalt 1 punkt 9 km² ja 0,25 km² kohta) (Maa-amet, 2019); näiteks Tartu kaitstuse kaardi koostamisel kasutati põhiantmeallikana puurkaeve keskmise tihedusega 1 puurkaev 1 km² kohta (Perens jt, 2007).

Senine praktika näitab, et puurkaevude andmeid on Eestis nii tugi- kui ka põhiantmestikuna edukalt rakendatud erineva mõõtkavaga kaitstuse kaartide koostamisel. Samas toob puurkaevuandmestiku pidev kasv kaasa vajaduse kaardimaterjale regulaarselt uuendada, et vältida nende sisulist vananemist. See omakorda toob esile vajaduse uute meetodiliste ja tehnoloogiliste lahenduste järele, mis võimaldaksid baaskaardi ajakohastamise protsessi tõhustada ning hõlbustaksid kaardistamist ka siiani kaardistamata aladel.

2. Materjalid ja meetodika

Käesoleva magistr töö põhieesmärk oli välja töötada puurkaevude andmestikule tuginev meetodika, mis võimaldaks põhjavee kaitstust Eesti ulatuses automaatselt hinnata ja visualiseerida. Kuna meetodika väljatöötamine moodustas suure osa magistr tööst, võib valminud meetodikat käsitleda töö ühe tulemusena. Töö struktuuri selguse huvides on kogu meetodika ja selle välja töötamise protsess kirjutatud lahti selles peatükis („Materjalid ja meetodika“), mitte peatükis „Tulemused ja arutelu“ – nii on meetodika eraldatud selle põhiväljunditest ja nende analüüsist. Meetodika väljatöötamise käigus tekkinud vahetulemused, aga ka küsimused, mille sisuline lahendamine oli vajalik meetodika kallal tööga jätkamiseks, on samuti lahti kirjutatud selles peatükis, mitte peatükis „Tulemused ja arutelu“. Meetodika osad, mis tuginevad teiste autorite töödele, on töös selgelt ära märgitud.

2.1 Uurimisala iseloomustus ja piiritlemine

Töö uurimisalaks oli terve Eesti maismaa-ala, välja arvatud väikesaared, millel ei asunud ühtki puurkaevu ning kus põhjavee kaitstust polnud seega võimalik hinnata ega usaldusväärselt interpoleerida.

Kõige üldisemalt võib Eesti hüdrogeoloogilises mõttes jagada kolmeks põhjaveekomplekside grupiks: karbonaatsete kivimite veekompleksid, liivakivide veekompleksid ning Kvaternaari veekompleks. Veekompleksiks loetakse „fatsiaalselt ja litoloogiliselt mitmekesisest, sarnase veeläbilaskvusega, kuid erinevate filtratsiooniomadustega kivimkeha“ (Eesti Geoloogiateenistus, 2022). Pinnakattes leviv Kvaternaari veekompleks katab peaaegu kogu Eesti territooriumi. Lõuna- ja Kesk-Eestis levivad pinnakatte all aluspõhjas nii karbonaatsete kivimite põhjaveekompleks (Ülem-Devoni põhjaveekompleks) kui ka liivakivide kompleksid (Kesk- ja Kesk-Alam-Devoni põhjaveekompleksid). Põhja-Eestis on esimeseks aluspõhjaliseks põhjaveekompleksiks Siluri-Ordoviitsiumi karbonaatsete kivimite kompleks. Sellest sügavamal, Siluri-Ordoviitsiumi regionaalse veepideme all paiknevad Ordoviitsium-Kambriumi ja Kambriumi-Vendi liivakivide põhjaveekompleksid, mis on esindatud peaaegu kogu Eesti ulatuses. Lisaks Siluri-Ordoviitsiumi regionaalsele veepidemele levib Eestis ka teine, Narva regionaalne veepide (Marandi jt, 2019).

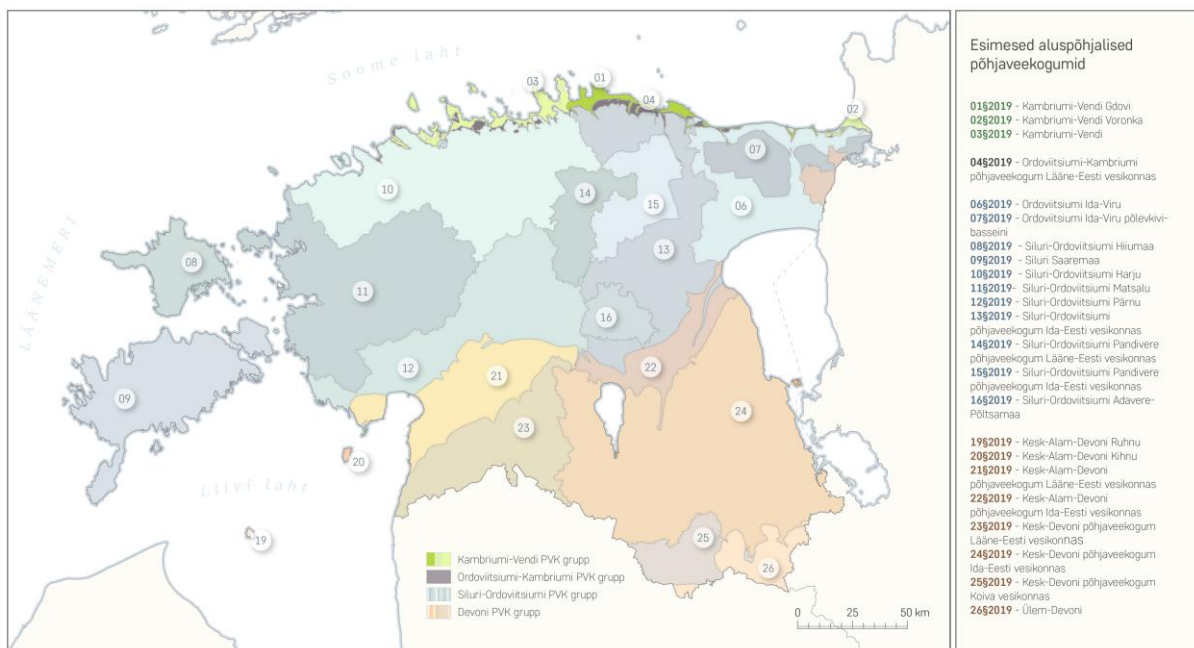
Eestis kaardistatakse põhjavee kaitstust lähtuvalt maapinnalt esimesest aluspõhjalisest veekompleksist või Kvaternaari põhjaveekompleksist (Eesti Geoloogiateenistus, 2022). Sügavamad põhjaveekompleksid on kaetud vett pidavate või nõrgalt vett läbilaskvate aluspõhja kihtidega ning sealne veevahetus on väga aeglane, mistõttu peetakse neid maapinnalt lähtuva reostuse suhtes kaitstuks. Kvaternaari põhjavee kaitstuse hindamine, ehkki oluline, eeldab võrreldes esimese aluspõhjalise veekompleksi kaitstuse hindamisega pisut teistsuguse meetodika väljatöötamist, mistõttu Kvaternaari kaitstust käesolevas töös ei käsitletud.

Lisaks põhjaveekompleksidele on Eesti põhjaveekihid nende paremaks majandamiseks jagatud 31 põhjaveekogumiks. Põhjaveekogumite piiritlemise ja seire kohustus lähtub veepoliitika raamdirektiivist (2000/60/EÜ) ning selle eesmärk on põhjavee koguselise ja keemilise seisundi parandamine ning kaitse. Põhjaveekogumite piiritlemisel lähtutakse eeldusest, et ühe kogumi

piires valitseksid sarnased looduslikud tingimused, põhjavee tasemerežiim ning saasteainete koormused (Veeseadus, 2019).

Põhjaveekogumid olid käesolevas töös metoodiliselt olulised uurimisala piiritlemiseks. Kuna tegu on põhjavee kontekstis suhteliselt standardsete ruumiüksustega, on peaaegu kõigi Eesti puurkaevude andmetes kirjas selle põhjaveekogumi nimi ja kood, millest puurkaevuga vett ammutatakse. Võrreldes puurkaevu põhjaveekogumi koodi selle asukohas oleva esimese aluspõhjalise põhjaveekogumi koodiga, on võimalik tuvastada puurkaevud, mis avavad esimest aluspõhjalist põhjaveekompleksi ning sobivad kaitstuse hindamiseks.

Võrdluseks valmistati kaardikiht esimeste aluspõhjaliste põhjaveekogumite avamustest (joonis 4), kasutades selleks põhjaveekogumite ruumikujusid ning 1 : 50 000 mõõtkavas geoloogilise baaskaarti põhjaveekompleksi kihti, ning valminud kihti võrreldi seejärel puurkaevude andmestikuga. Niisiis – kui kahedimensioonilises mõistes oli uurimisalaks Eesti, siis põhjaveekogumite info põhjal määratleti ka uurimisala kolmas ehk sügavusdimensioon, mis vastas igas piirkonnas esimese aluspõhjalise põhjaveekompleksi vertikaalsele ulatusele.



Joonis 4. Esimeste aluspõhjaliste põhjaveekogumite avamused Eestis. Lühend PVK viitab mõistele "põhjaveekogum". Parempoolsel paneelil on põhjaveekogumite gruppide kaupa toodud välja esimeste aluspõhjaliste põhjaveekogumite nimed ja koodid. Kaardi sisu: EELIS, 2025 (Põhjaveekogumid); Eesti Geoloogiateenistus, 2024 (Põhjaveekompleks). Aluskaart: Maa-ameti ruumiandmed, 2025; OpenStreetMap ruumiandmed, 2025.

2.2 Lähteandmed

Töö põhiandmestiku moodustas Eesti puurkaevude andmebaas (VEKA). VEKA andmebaasist tehti EELIS süsteemi kaudu väljavõtte seisuga 19.03.2025. Väljavõttesse kaasati kõik andmebaasis olevad kaevud, kokku 57 692 kaevu. Ülevaade kaasatud andmeveergudest on põhjavee kaitstuse hindamise ja visualiseerimise töövooskeemil (lisa 1). Puurkaevude andmebaasi väljavõtet kasutati töötlemata kujul sisendina Pythoni-põhisele töövoole.

Lisaks puurkaevuandmetele kasutati nii andmete kvaliteedikontrollil kui ka põhjavee kaitstuse hindamisel 10-meetrise eraldusvõimega maapinna kõrgusmudelit (Maa- ja Ruumiamet, 2024). Netoinfiltratsiooni hindamiseks kasutati netoinfiltratsiooni võrkandmeid üle-eestilise hüdroteoloogilise mudelist, mis valmis Eesti Geoloogiateenistuses 2024. aastal (Hunt jt, 2024). Sisendandmetena kasutati ka karstialasid (EELIS, 2025) ning Eesti ruumikuju (Eesti topograafia andmekogu, edaspidi ETAK, 2025).

Metoodika rakendamiseks töötati välja Pythonil ja QGIS-il põhinev töövoomudel. Mudelit arendati ning skripte jookutati JupyterLab arenduskeskkonnas, põhjavee kaitstuse hindamiseks vajalikud lisakaardikihid valmistati ette QGIS-is (versioon 3.32.3) ning SAGA GIS-is (versioon 7.8.2).

Python valiti töövoorenduskeeleks selle andmetöötlusvõimekuse ning ruumiandmete töötlust ja analüüsi võimaldavate teekide tõttu. Valikut toetas ka varasem JupyterLab keskkonna kasutuskogemus. Töövoomudel töötati välja vabavaraliste lahenduste baasil ning suurem osa tulemuste statistilisest analüüsist viidi läbi RStudios, mis on samuti vabavaraline lahendus. Tulemuste visualiseerimisel kasutati ka ArcGIS Pro tarkvara (versioon 3.4.0), mis ei ole vabavaraline.

Magistritöö käigus välja töötatud kaitstuse hindamise ja visualiseerimise töövoomudeli skript avaldatakse GitHubis (<https://github.com/liinah>) koos dokumentatsiooni, juhendmaterjalide ja toetavate sisendandmekihtidega hiljemalt 31. juuliks 2025.

2.3 Metoodika ja töövoomudel

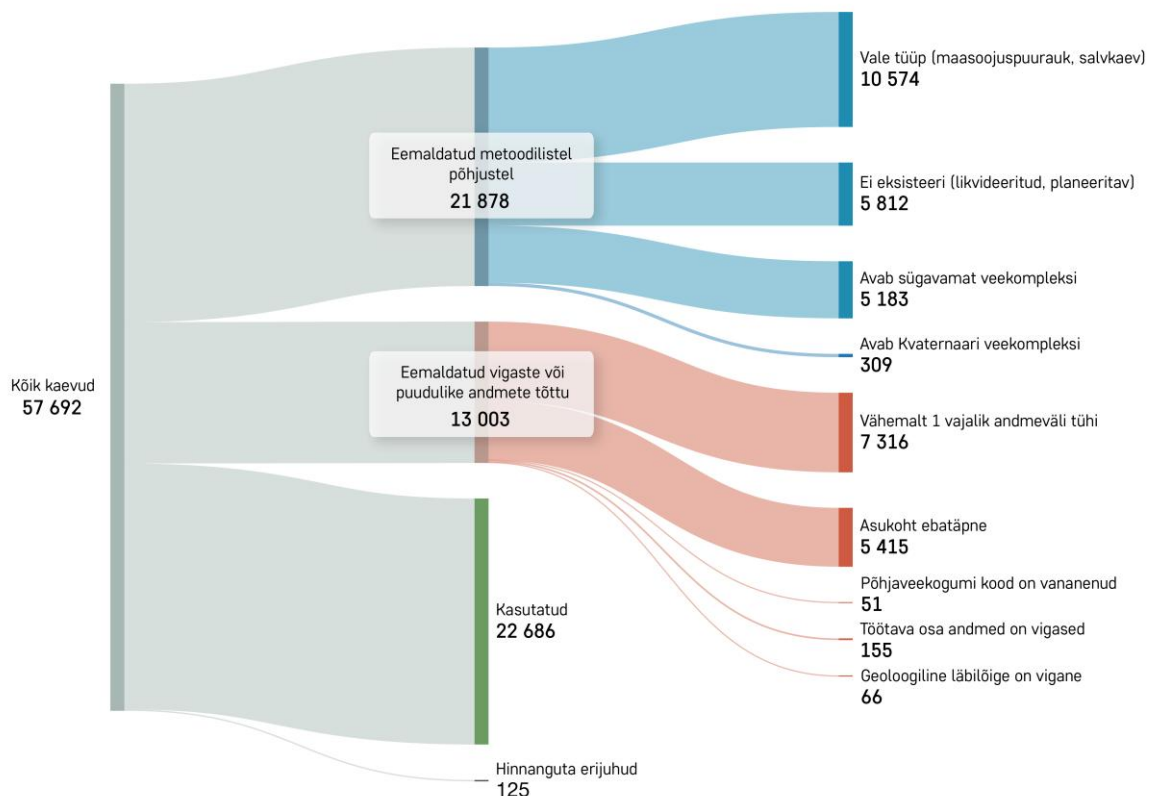
Puurkaevu andmebaasi väljavõtte puhastamiseks, kvaliteedikontrolliks, töötamiseks, puurkaevudele põhjavee kaitstuse indeksite arvutamiseks ning ruutkaardi loomiseks koostati JupyterLab keskkonnas Pythoni-põhine töövoomudel. Mudel kasutab sisendandmestikuna puurkaevude andmebaasi töötlemata kujul väljavõtet ning kaitstuse hindamiseks ettevalmistatud kaardikihte. Mudeli väljundiks on a) andmetabel puurkaevude põhiandmete, DRASTIC parameetrite väärtuste, hinnangute ning igale puurkaevule määratud kaitstuse indeksi ja klassiga, ning b) põhjavee kaitstuse ruutkaardi kaardikiht. Kuna töövoomudelil kasutati osalt ka metoodika väljatöötamiseks ja viimistlemiseks, on mudeli oluliseks osaks kontrollmehhanismid, mis aitavad mõista, millistes etappides ja millistel põhjustel andmed edasisest analüüsist välja jäetakse või ümbertöötlemist vajavad.

Järgnev peatükk annab ülevaate töövoomudeli põhietappidest ning metoodilistest valikutest, mis mõjutasid selle kujunemist. Kogu alapeatükki illustreeriv töövooskeem on toodud lisa 1.

2.3.1 Puurkaevude andmestiku ettevalmistus kaitstuse hindamiseks

VEKA puurkaevude andmebaas on mitmekesine ja mahukas andmekogu, mis sisaldab enam kui saja aasta vältel rajatud puurkaevude andmeid (VEKA andmebaas, 2025). Paraku kaasneb sellise mitmekesisusega ka andmete võrdlemisi vähene struktureeritus ja ebatäielikkus, mis tuleneb nii andmestiku iseloomust kui ka andmebaasi ülesehitusest. Lisaks sisaldab andmebaas olulises koguses selliseid puurkaeve, mis metoodiliselt põhjavee kaitstuse hindamiseks ei sobi. Selleks, et põhjavee kaitstuse hindamine oleks puurkaevuandmete põhjal tehniliselt võimalik ning ka sisu poolest korrektne, viidi läbi andmestiku kvaliteedikontroll ja filtreerimine. Kõigist

andmebaasis kajastuvatest puurkaevudest sobiliku valimi kujunemine on visualiseeritud joonisel 5.



Joonis 5. Kõigest andmebaasis kajastuvatest puurkaevudest valimi kujunemine põhjavee kaitstuse hindamiseks. Alusandmed: VEKA andmebaas, 19.03.2025.

Esmalt puhastati andmestik korduvmõõtmiste väärtustest. Korduvmõõtmisi esines staatilise veetaseme, alanduse ja deebiti andmete puhul, ning nende esinemisel säilitati ainult esimese mõõtmise väärtus. Seejärel kontrolliti, kas puurkaevu põhjaveekogumi kood vastab uusimale, 2019. aastal kinnitatud põhjaveekogumite jaotusele. Kuna põhjaveekogumite piire hinnatakse ning vajadusel muudetakse iga kuue aasta tagant (Veeseadus, 2019), on vananenud koodiga põhjaveekogum tõenäoliselt ka teise ruumikujuga ega võimalda usaldusväärselt läbi viia esimest aluspõhjalist põhjaveekompleksi avavate puurkaevude tuvastamist. 2013. aastal kinnitatud põhjaveekogumite nimed ja koodid teisendati 2019. aasta omadeks, võttes arvesse põhjaveekogumite piirides toimunud muutusi. Veel vanema põhjaveekogumi koodiga puurkaevud eemaldati edasisest analüüsist.

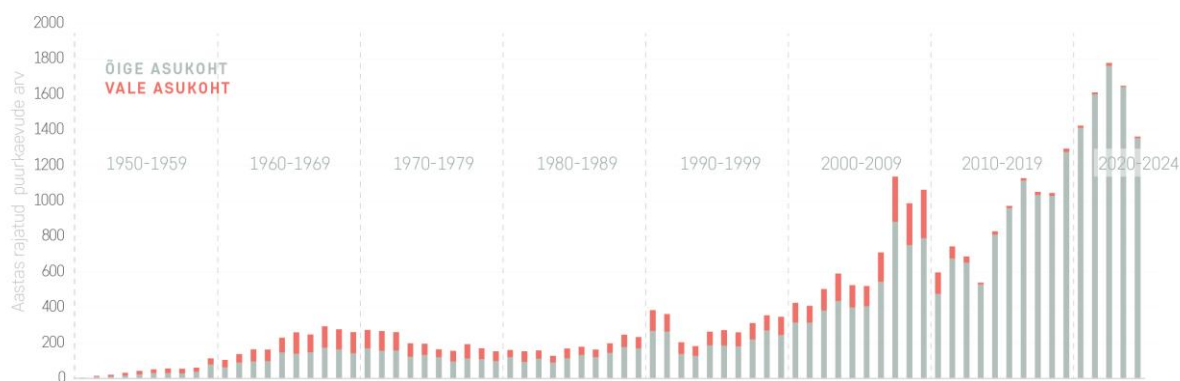
Järgmise sammuna eemaldati andmestikust kinnise soojussüsteemi puuraugud ja salvkaevud, sest nende põhjal pole võimalik esimese aluspõhjalise põhjaveekompleksi kaitstust hinnata – selleks puuduvad piisavad hüdrogeoloogilised alusandmed. Lisaks eemaldati andmestikust avatud soojussüsteemi puurkaevud, mille olulisust kaitstuse hindamise kontekstis pole varasemalt käsitletud. Edasisest analüüsist kõrvaldati ka kõik likvideeritud ja likvideerimisele kuuluvad puurkaevud. Ehkki suur osa likvideeritud kaevudest oleks kaitstuse hindamiseks muul moel sobinud, otsustati võimalikult kõrge andmekvaliteedi ning täpsemate põhjavee

kaitstuse hinnangute tagamiseks neid mitte kasutada. Samamoodi toimiti puurkaevudega, mille staatus oli „planeeritav“.

Kasutades selleks otstarbeks loodud esimeste aluspõhjaliste põhjaveekogumite avamuste kaardikihti, kontrolliti järgmiseks seda, millised kaevud avavad esimest aluspõhjalist põhjaveekompleksi. Puurkaevud, mille põhjaveekogumi kood ei ühtinud esimese aluspõhjalise põhjaveekogumi omaga, eemaldati andmestikust.

DRASTIC meetodika abil põhjavee kaitstuse hindamiseks oli oluline, et täidetud oleksid kõik järgmised andmeväljad: „Katastrinumber“, „Idapikkus (L-EST)“, „Põhjalaius (L-EST)“, „Maapinna absoluutkõrgus“, „Alandus“, „Deebit“, „Staatiline veetase“, „Põhjaveekogum“, „Läbilõige“ ning „Konstruktsioon“. Vähemalt ühe eelnevalt nimetatud andmevälja väärtuse puudumisel puurkaev eemaldati.

Andmestiku ettevalmistuse viimase sammuna viidi läbi lihtsakoeline andmekvaliteedi kontroll. Andmekvaliteedi kontrollimiseks võrreldi iga puurkaevu puhul selle andmebaasis olevat maapinna absoluutkõrgust maapinna kõrgusmudelilt päritud kõrgusega. Andmestikust eemaldati kõik puurkaevud, mille puhul erinevus andmebaasis oleva ning maapinna kõrgusmudelilt tuleneva kõrguse vahel oli enam kui ± 2 meetrit. Maapinna kõrguste võrdlemisel tugineti eeldusele, et suurte kõrgusvahedega puurkaevude asukohad on andmebaasis suurema tõenäosusega ebatäpsed. Ehkki kõrguste vahe ei pruugi alati tuleneda kaevu valest asukohast, viitab see siiski andmekvaliteedi probleemile, mistõttu neid kaeve põhjavee kaitstuse hindamiseks ei kasutatud. Joonis 6 illustreerib kvaliteedikontrolli järgselt eemaldatud ning lõppvalimisse jäänud puurkaevude jaotust puurimisaasta kaupa.



Joonis 6. Aasta kohta rajatud puurkaevude arv ning andmebaasi vale asukohaga kantud kaevude osakaal. Joonisel on ainult need puurkaevud, mis läbisid ülejäänud kontrollsammud; tegelikkuses on igal aastal rajatud puurkaevude arv suurem. Tuleb arvestada ka sellega, et joonis näitab ainult praegu kasutuses olevate puurkaevude rajamise aega, likvideeritud kaevud joonisel ei kajastu.

2.3.2 Põhjavee kaitstuse hindamine DRASTIC meetodikaga

Puurkaevuandmete põhjal põhjavee kaitstuse hindamiseks kasutati Eesti tingimustele kohandatud DRASTIC meetodikat (Männik jt, 2023; Männik ja Karro, 2023), mis omakorda kohandati sobivaks kättesaadavatele puurkaevuandmetele. Meetodika valik lähtus suuresti selle varasemast edukast rakendamisest Eesti kontekstis ning sellest, et puurkaevude andmestik sisaldas esmase hinnangu põhjal piisavalt parameetrite arvutamiseks vajalikke andmevälju. Kuna DRASTIC on parameetiline indeksipõhine meetod ning põhjavee kaitstuse indeks

arvutatakse seitsme parameetri hinnangute kaaludega korrutamisel ja omavahelisel liitmisel, hinnati võimalikuks ka selle rakendamist punktandmetele.

Käesolevas alapeatükis kirjeldatakse DRASTIC parameetrite väärtuste arvutamise ja hindamise protsessi DRASTIC parameetrite tavapärasel esitusjärjekorras. Parameetrite töötlemise ja arvutamise tegelik järjestus on esitatud töövooskeemil (lisa 1). Ülevaade DRASTIC parameetrite väärtusvahemikest, hinnangutest ja kaaludest on toodud kokkuvõtvalt tabelis 2.

2.3.2.1 D – Põhjaveekihi survetase

D parameetrina käsitleti Männik jt (2023) poolt välja pakutud põhjavee survetaseme käsitlust. Põhjavee survetaseme parameeter avaldub staatilise – loodusliku, pumpamisvabades tingimustes – põhjaveetaseme (möödetuna sügavusena maapinnalt) ning aluspõhja pealispinna sügavuse suhtena. Kui veetase puurkaevus on aluspõhja pealispinnast kõrgemal, loetakse põhjavesi surveks ning ala paremini kaitstuks, sest reoainete põhjaveekihti liikumine on takistatud.

Põhjavee survetaseme hindamiseks kasutati puurkaevude staatilist veetaset (veerg „Staatiline veetase“) ning aluspõhja pealispinna sügavust, mis tuletati puurkaevu läbilõikest kui kõige sügavamale ulatuva pinnakattekihi lõppsügavus. Aluspõhja pealispinna sügavuse lahutamisel staatilisest veetasemest saadi survetaseme parameetri väärtused, mille puhul negatiivsed väärtused viitasid survele põhjaveele. Väärtused klassifitseeriti ja hinnati Männik jt (2023) väljapakutud väärtusvahemike alusel.

2.3.2.2 R – Netoinfiltratsioon

R parameeter ehk netoinfiltratsioon kaasati põhjavee kaitstuse hindamisse originaalkujul vastavalt Aller jt (1987) poolt välja pakutud DRASTIC meetodikale. Netoinfiltratsioon kirjeldab pindalaühiku kohta läbi aeratsioonivööndi põhjavette jõudva vee kogust aastast (mm aastas⁻¹). Netoinfiltratsiooni usaldusväärne hindamine on suhteliselt keeruline ning nõuab palju lähteandmeid (Healy, 2010). Kuni viimase ajani oli kõige täpsem üle-eestiline netoinfiltratsiooni hinnang saadud Vallneri ja Pormani (2016) väikesemõõtkavalise hüdrokeoloogilise mudeli põhjal. 2024. aastal valmis Eesti Geoloogiateenistuses aga uus hüdrokeoloogiline mudel, mille väljundit käesolevas töös kasutati (Hunt jt, 2024).

Netoinfiltratsiooni andmete kasutamiseks viidi mudelist saadud tihe punktivõrgustik QGIS-is rasterkujule, kasutades selleks läheduskaalude meetodil (IDW) interpolatsiooni. Loodud rasterkihti kasutati töövoomudeli ühe sisendina. Puurkaevupõhiste netoinfiltratsiooni hinnangute saamiseks päriti rastrilt väärtus iga puurkaevu asukohas ning anti sellele hinnang Aller jt (1987) väärtusvahemikke ja hinnanguid kasutades.

Tabel 2. Töös kasutatud hüdrogeoloogiliste ja keskkonnaparameetrite väärtusvahemikud, hinnangud ja kaalukus

Põhjaveekihi survetase (Männik jt, 2023)		Netoinfiltratsioon (Aller jt, 1987)		Veekihi omadused (Aller jt, 1987)		Pinnakatte omadused (Männik jt, 2023)		Reljeef		Pinnakatte paksus (Männik jt, 2023)		Filtratsioonimoodul (Aller jt, 1987)	
Vahemik (m)	Hinnang	Vahemik (mm/a)	Hinnang	Tunnus	Hinnang	Pinnakattetüüp	Hinnang	Vahemik (TWI)	Hinnang	Vahemik (m)	Hinnang	Vahemik (m/d)	Hinnang
< -5	1	0-50	1	Liivakivide kompleks veeandvusega <0,1 l/s/m	3	Savi, >5 m	1	<12	1	>40	1	0,04 – 4	1
-5...-3	2	50 – 100	3	... 0,1 – 0,5 l/s/m	5	Järvemuda	2	12 – 13	2	20 – 40	3	4 – 12	2
-3...-1	3	100 – 175	6	... 0,5 – 1 l/s/m	6	Savi, 2-5 m	3	13 – 14	4	10 – 20	5	12 – 28	4
-1...0	5	175 – 250	8	... >1 l/s/m	7	Savi, 0-2 m	5	14 – 15	7	5 – 10	7	28 – 40	6
				Karbonaatsete kivimite kompleks veeandvusega <1 l/s/m	9	Aleuriit, turvas	6						
0 – 1	6	>250	9	... >1 l/s/m	10	Moreen	7	15 – 16	9	2 – 5	9	40 – 80	8
1 – 5	7					Liiv, kruus	8	>16	10	0 – 2	10	>80	10
5 – 10	9					Veerised ja munad	9						
>10	10					Karstiaala, aluspõhja avamus	10						
D parameetri kaal: 5		R parameetri kaal: 4		A parameetri kaal: 3		S parameetri kaal: 5		T parameetri kaal: 1		I parameetri kaal: 5		C parameetri kaal: 3	

2.3.2.3 A – Põhjaveekihi omadused

A parameeter ehk põhjaveekihi omadused kaasati põhjavee kaitstuse hindamisse originaalkujul vastavalt Aller jt (1987) poolt välja pakutud DRASTIC meetodikale. Põhjaveekihi kivimite omadused, näiteks nende lõhelisus ja poorsus, määravad ära veekihi veejuhti vuse ehk selle, kui efektiivselt vesi põhjaveekihi edasi liigub. Põhjaveekihi omaduste parameeter on oma olemuselt kvalitatiivne ning Alleri jt (1987) meetodikas on omaduste klassid ja hinnangud jäetud suhteliselt lahtiseks, mistõttu on parameetri hindamine üsna keeruline.

Olemasolevatest puurkaevuandmetest lähtudes otsustati põhjaveekihi omaduste hindamiseks arvutada puurkaevudele erideebit. Erideebit näitab, kui palju vett saab kaevust pumbata ühe veetaseme alanduse meetri kohta, ning kirjeldab seega puurkaevu veeandvust ($l s^{-1} m^{-1}$). Puurkaevude veeandvuste põhjal on võimalik anda hinnang ka veekihi veeandvusele, mis omakorda viitab sealsete kivimite omadustele. Erideebiti arvutamiseks jagati iga puurkaevu deebit (veerg „Deebit“) selle alandusega (veerg „Alandus“).

Erideebiti väärtusklassidesse jagamisel lähtuti sarnaselt Männiku magistratööga (2020) geoloogilise baaskaardistamise veekompleksi kihi kaardistusjuhendist. Veekompleks on kaardistusjuhendis defineeritud kui „fatsiaalselt ja litoloogiliselt mitmekesine, sarnase veeläbilaskvusega, kuid erinevate filtratsiooniomadustega kivimkeha“ (Eesti Geoloogiateenistus, 2022). Sellest definitsioonist lähtuvalt võrdsustati iga puurkaevu erideebit sellele vastava põhjaveekompleksi tüübiga, mis sõltus veeandvusest ja sellest, kas tegu oli karbonaatsete või liivakivide veekompleksiga. Karbonaatsete ja liivakivide veekompleksid eristati põhjaveekogumi koodi põhjal: kogumid 1 – 4 ning 19 – 25 liigitati liivakivide veekompleksiks, ülejäänud põhjaveekogumid karbonaatsete kivimite veekompleksiks.

2.3.2.3 S – Pinnakatte omadused

S parameetri puhul lähtuti Männik jt (2023) poolt välja pakutud pinnakatte omaduste käsitlusest. Pinnakattesetete omaduste arvesse võtmine põhjavee kaitstuse hindamisel on eriti oluline Eesti kontekstis, kus heterogeensed pinnakattesetted esinevad põhjaveekihi peal ja on seetõttu ka väga erineva veeläbilaskvusega.

Puurkaevude andmebaas sisaldab enamike Eesti puurkaevude läbilõikeid ja kihtide litoloogilisi kirjeldusi, mis teeb sellest kõige ajakohasema üle-eestilise andmeallika pinnakattesetete tüübi ja paksuse kohta. Sarnaselt põhjaveekihi omadusi kirjeldava parameetriga on ka pinnakatte omaduste parameeter kvalitatiivne, mis muudab selle hindamise metodoloogiliselt keerukaks. Hindamist raskendab asjaolu, et puurkaevude andmebaasis esitatud litoloogilised kirjeldused ei järgi ühtset formaati. Kui Männik jt (2023) meetodikas kasutati parameetri hinnangute andmiseks ligikaudu kümmet pinnakattetüüpi, mis tulenesid pinnakattesetete geoloogilisel baaskaardil esindatud litoloogilistest tüüpidest, siis puurkaevude andmebaasis esineb üle 3000 unikaalse litoloogilise kirjelduse, milles tihtipeale sisalduvad ka kirja- ja formaadivead. Niisiis moodustavad puurkaevude läbilõiked suhteliselt ebauhtlase kvaliteediga andmestiku, mille kasutamiseks põhjavee kaitstuse hindamisel oli vajalik ulatuslik eeltöötlus.

Puurkaevude läbilõigete andmestiku puhastamiseks, töötamiseks ning pinnakattesetete litoloogiliste kirjelduste klassifitseerimiseks töötati välja mitmeetapiline, põhilisse meetodilisse töövõomudellisse integreeruv Pythoni-põhine töövoog.

Töövoo esimese sammuna viidi läbi veeru „Läbilõige“ eeltöötlus. EELIS andmebaasist väljavõtte tegemisel liidetakse kogu ühe puurkaevu läbilõike kohta käiv info ühele andmeväljale. Selle tulemuseks on keerulise struktuuriga pikad kirjed. Kirjete struktuur sarnaneb üldjuhul alltoodud näitele:

*„0-2m gQIII Liivsavimoreen;13-17m O3on Savikas lubjakivi, mergel;17-30m O3kl
Lubjakivi,savikas lubjakivi;2-13m O3rk Lubjakivi,savikas lubjakivi“.*

Originaalandmete keerulise, töötuseks sobimatu vormingu tõttu jagati kihtide info eraldi veergudeks semikooloni alusel. Sealjuures eraldati kihid üksteisest vaid juhul, kui semikoolonile järgnes number, mis viitas uue kihi sügavusvahemiku algusele. Kui semikoolonile järgnes tekst või muu mittenumbriline sümbol, käsitleti seda sama litoloogilise kirje jätkuna.

Järgmise sammuna jagati iga kihi info omakorda viieks veeruks: algsügavus, lõppsügavus, kihi paksus, indeks ja kirjeldus. Algsügavuse määramisel lähtuti eeldusest, et esimene number kihi kirjes tähistab algust, sellele järgneb sidekriips ja seejärel lõppsügavus. Kihi paksus arvutati kahe sügavusväärtuse vahena. Indeksi piiritlemisel lähtuti eeldusest, et sügavusvahemikule järgnev tekstiüksus on indeks. Võtmaks arvesse mitmeid erandeid, lisati klausel, mille kohaselt tuleb Kvaternaarile viitavat indeksit otsida kogu kihi info seest ning indeksi esinemisel muu kirjelduse sees tõsta see õigesse kohta. Indeksi piiritlemisel lähtuti ka eeldusest, et indeks ei sisalda tühikuid ning sellele järgneb litoloogiline kirjeldus. Kuna mõnel juhul esines siiski tühikuid ka indeksite sees, lisati töövoogu klausel, mille kohaselt tuleb mitmeosalise, tühikut sisaldava indeksi lõppu otsida mitte esimese tühiku, vaid kombinatsioonide ”iii” või ”qiv” esinemise järgi. Neid kombinatsioone käsitleti pikemate indeksite lõpumärkidena.

Seejärel kontrolliti, kas puurkaev asub regionaalse veepideme alal ning kas sel juhul ammutatakse põhjavett veepideme alusest veekihist või veepideme kihist endast. Veepideme kihist vett ammutavad kaevud tuvastati eeldusega, et nende läbilõikes esineb veepidemele viitav indeks (kombinatsioonid 'nr', 'c1ln', 'c1in', 'cm1ln', 'cm1in', 'ca1ln', 'ca1in', 'cmln', 'c1lk-ln', 'ca1lk-ln', 'c11n') läbilõike sügavaimas kihis. Veepideme alt asuvast veekihist põhjavett ammutavad kaevud tuvastati eeldusega, et nende läbilõikes esineb küll veepidemele viitav indeks, ent see ei esine läbilõike sügavaimas kihis. Kontrolli tulemused salvestati uude veergu ”Veepide”. Veepideme all asuvast veekihist põhjavett ammutavad puurkaevud liigitati põhjavee kaitstuse hindamisel automaatselt kaitstuks. Veepidemest endast vett ammutavaid kaeve käsitleti võrdsena kõigi teiste puurkaevudega.

Kaevu läbilõike abil vigaste või puudulike andmetega puurkaevude tuvastamiseks teostati kontroll. Kontrolli tulemusena loeti vigaseks kõik puurkaevud, mille puhul kehtis vähemalt üks järgmistest tingimustest:

- Kihi algsügavus või lõppsügavus oli puudu;
- Kihi info kogupikkus oli alla 10 tähemärgi – see viitas sellele, et vähemalt osa infot kihi kohta oli puudu;
- Kihi infos oli vähem kui 2 tühikut – see viitas samuti piisava info puudumisele;
- Maapinnalt esimese kihi algsügavus oli 1 meeter või enam – see viitas sellele, et osa läbilõikest on jäänud kirjeldamata;

- Vähemalt ühe kihi lõppsügavuse ja järgmise kihi algsügavuse vahe ei olnud 0 – see viitas samuti info osalisele puudumisele või muule andmekvaliteedi probleemile.

Kvaliteedikontrolliks kasutati nii kihtide koordinfot sisaldavaid veerge kui sügavuste kontrolliks ka kihtide infot viie eraldi veeru kaupa. Kvaliteedikontroll viidi läbi suhteliselt paindlikke, paljuski kirjete struktuurist lähtuvaid reegleid kasutades. Indeksite või kirjelduste puudumist oli keeruline muul moel kindlaks teha, sest andmebaasis ei ole andmete sisestamisel järgitud ühtset formaati. Tuvastatud vead märgiti uude veergu „Vigane“, kuhu lisati ka vigade kirjeldused. Vigased kirjed salvestati eraldi tabelisse ning eemaldati koos veeruga algsest andmestikust.

Viimase sammuna enne pinnakattesetete klassifitseerimist eemaldati andmestikust ebavajalikud ehk aluspõhja kihtide andmed. Pinnakattekihtide tuvastamisel lähtuti eeldusest, et pinnakattekihi indeks sisaldab vähemalt mõnd Kvaternaari viitavatest kombinatsioonidest: 'q', 'iii', 'miv'. Enne aluspõhja kihtide andmestikust eemaldamist kontrolliti, et iga kaevu puhul järgneks läbilõikes pinnakattekihtidele vähemalt üks aluspõhja kiht. Kaevud, mille läbilõikes aluspõhja kihte ei esinenud, eemaldati andmestikust, sest tegu oli Kvaternaari veekompleksist vett ammutavate kaevudega. Kui andmestikku olid alles jäänud ainult pinnakattekihid, seati veerud, mida mõnede puurkaevude puhul oli 50+ tükki, õigesse järjekorda sügavuse poole kasvavalt.

Järgmises etapis rakendati pinnakattekihtide litoloogilistele kirjeldustele järk-järgult tekstipõhiseid klassifitseerimisreegleid, mis lakoonilisel kujul on esitatud tabelis 3. Klassifitseerimisreeglite väljatöötamine oli pikk ja iteratiivne protsess. Klassifitseerimine toimus viies etapis ning reeglistik ehitati üles põhimõttele, et igas etapis liigitatakse osa kirjeldusi kindlasse kategooriasse ning neid kirjeid järgmistes etappides enam ei käsitleta. Näiteks: kui klassifitseerimise esimeses etapis liigitati kirje "saviliivmoreen" moreeniks seetõttu, et see sisaldas sõnaosa "moreen", siis järgmises etapis, kus esitatakse reeglid sõnaosa "saviliiv" põhjal kirjete klassifitseerimiseks, ei pea enam lisama reeglit saviliiva ja moreeni koos esinemise kohta, sest kõik sellised kirjed on juba ära klassifitseeritud.

Klassifitseerimata jäi 34 kirjeldust, mis sisaldasid kas kirjavigu või olid liiga ebastandardised, et neid eranditena reeglistikku lisada. Sellised puurkaevud eemaldati andmestikust. Samuti eemaldati andmestikust kaevud, mis sattusid klassifitseerimise käigus klassi "info puudub".

Andmete klassifitseerimise järgselt üldistati neid veelgi – näiteks ühendati klassid "peenliiv", "eriteraline liiv", "jämeliiv" ja "kruusliiv" kõik üldistatud klassi "liiv". Klassifitseerimismudel koostati võrreldes DRASTIC meetodikas kasutamise vajadusega pisut täpsem, et seda oleks tulevikus võimalikult mugav kasutada ka mõneks muuks otstarbeks peale põhjavee kaitstuse hindamise. Karstialade ruumikujude abil kontrolliti ka puurkaevude esinemist karstil ning sellekohane info kanti uude veergu "Asub karstil". Lõplikele pinnakattetüüpidele anti hinnangud sarnaselt Männik jt (2023) meetodikaga. Erandiks olid savid, mis jagati paksuse põhjal kolme klassi (0 – 2 m, 2 – 5 m ja üle 5 m), et võtta paremini arvesse nende varieeruvat kaitsevõimet.

Tabel 3. Pinnakattesetete litoloogiliste kirjelduste klassifitseerimisreeglid etappide kaupa.

Sõna või sõnaosa	Esineb koos; (märkused)	Klass
Etapp 1		
”moreen”	-	moreen
	”muld” kõik muu (kui kirjelduses on ”moreen”, on alati tegu moreeniga, v.a kui esineb sõnaosa ”muld”)	muld moreen
”liivsavi”	-	savi
	”kruus”, ”munaka”, ”veeris”, ”rahn”, ”tükk”, ”klibu”, ”lahmaka”, ”täite”, ”turvas”, ”räh”	moreen
	”savi” (ainult juhul, kui koos ei esine ka eraldi sõna ”liiv”)	savi
”saviliiv”	-	aleuriit
	”kruus”, ”munaka”, ”veeris”, ”rahn”, ”tükk”, ”klibu”, ”lahmaka”, ”täite”, ”räh”	moreen
	”savi” (ainult juhul, kui koos ei esine ka eraldi sõna ”liiv”)	savi
Etapp 2		
”savi”	-	savi
	”viir”, ”liiv”, ”aleuriit”	savi
	”kruus”, ”munaka”, ”veeris”, ”rahn”, ”tükk”, ”klibu”, ”lahmaka”, ”täite”, ”räh”	moreen
”liiv”	-	eriteraline liiv
	”kruus” JA (”peen” VÕI ”aleuriit”) (koos), ”sega”, ”eri”	eriteraline liiv
	”peen”, ”kesk”, ”aleuriit”, ”vesi”, ”tolm”, ”pisi”, ”ühtlase”, ”kvarts”	peenliiv
	”jäme”	jämeliiv
	”kruus” JA kuni 1 järgmisest: ”munaka”, ”veeris”, ”rahn”, ”tükk”, ”klibu”, ”lahmaka”, ”täite”, ”räh”	kruusliiv
”kruus”	rohkem kui 1 järgmistest: ”munaka”, ”veeris”, ”rahn”, ”tükk”, ”klibu”, ”lahmaka”, ”täite”, ”räh”	kruus
	-	kruus
	kuni 1 järgmistest: ”munaka”, ”veeris”, ”rahn”, ”tükk”, ”klibu”, ”lahmaka”, ”täite”, ”räh”	kruus
”pinnakate puudub”	rohkem kui 1 järgmistest: ”munaka”, ”veeris”, ”rahn”, ”tükk”, ”klibu”, ”lahmaka”, ”täite”, ”räh”	veerised ja munakad
	(”Pinnakate puudub” määratakse automaatselt kaevudele, mille maapinnalt esimene kiht on aluspõhjaline.)	aluspõhja avamus
”kruus”, ”munaka”, ”veeris”, ”rahn”, ”tükk”, ”klibu”, ”lahmaka”, ”kill”		veerised ja munakad
”turva”		turvas
”muld”, ”kultuur”, ”huumus”, ”kasvu”		muld
Etapp 4		
”rähk”	(juhul kui pole sõna ”rähkne”, mida klassifitseerimisel eiratakse)	moreen
”aleuriit”, ”möll”		aleuriit
”muda”		järvemuda
”täide”, ”täite”		eriteraline liiv
Etapp 5		
”lubjakivi”		aluspõhja avamus
”puudu”, ”kvaternaar”		info puudub

Puurkaevude läbilõigetel põhineva kaitstuse hindamise meetodika oluline eelis võrreldes nii klassikalise DRASTIC meetodika kui ka Eesti baaskaardistamisel kasutatava meetodikaga seisneb selles, et läbilõikeid kasutades on võimalik kaitstuse hindamisel arvesse võtta kõiki pinnakattekihte. See võimaldab kaitstuse hinnangu anda alati kõige vettpidavama kihi alusel, mitte ilmtingimata maapinnalt esimese pinnakattekihi põhjal. Tulemuseks on tõesem kaitstuse hinnang piirkondades, kus vettpidavad kihid levivad vähem vettpidavate kihtide all. Tagamaks, et kaitstuse hinnang antakse kõige vettpidavama kihi alusel, hinnati kõiki kihte algul eraldi ning seejärel määrati iga kaevu hinnanguks selle kõige vettpidavama kihi hinnang.

2.3.2.5 T – Reljeef

T parameeter ehk reljeef kaasati põhjavee kaitstuse hindamisse vastavalt Aller jt (1987) DRASTIC meetodikale, kuid selle sisuline käsitus erines mõnevõrra oma algsest versioonist. Aller jt lisasid reljeefi meetodikasse lähtuvalt põhimõttest, et mida järsem on reljeef, seda väiksem on vee akumulatsioon ja infiltreerumise tõenäosus ning seeläbi ka reoainete liikumine põhjaveeni. Seetõttu loetakse põhjavesi sellistel aladel paremini kaitstuks. Nii alguses kui ka Eestile kohandatud DRASTIC meetodikas käsitletakse reljeefi nõlvakalde kaudu, mis arvutatakse digitaalselt kõrgusmodelilt (Männik, 2020).

Puurkaevuandmetel põhineva ehk punktijärgse meetodika kontekstis otsustati, et üksnes nõlvakalde kasutamisest ei piisa reljeefi mõju hindamiseks. Ühe punkti nõlvakalde väärtus ei pruugi adekvaatselt kajastada, kas kaev asub ümbritsevast kõrgemal või madalamal, ega anna teavet selle kohta, kuhu vesi reljeefi arvestades tegelikult liigub. Reljeefi mõju paremaks hindamiseks otsustati nõlvakalde asemel kasutada TWI ehk reljeefi märguse indeksit (*Topographic Wetness Index*), mille pakkusid 1979. aastal välja Beven ja Kirkby. Lihtsustatult näitab TWI seda, kuhu vesi reljeefi arvestades liigub ning kus akumulatsioon. Kõige sagedamini kasutatakse TWI indeksit mulla niiskusesisalduse ning teiste sellega seotud parameetrite prognoosimiseks (Sørensen jt, 2006; Kmoch jt, 2021). TWI arvutamisel kasutatakse küll nõlvakallet, kuid lisaks nõlvakaltele võetakse arvesse ka seda, kui suur hulk vett konkreetse punkti kaudu mööda reljeefi allapoole liigub. TWI valem on

$$TWI = \ln\left(\frac{a}{\tan b}\right) \quad (2)$$

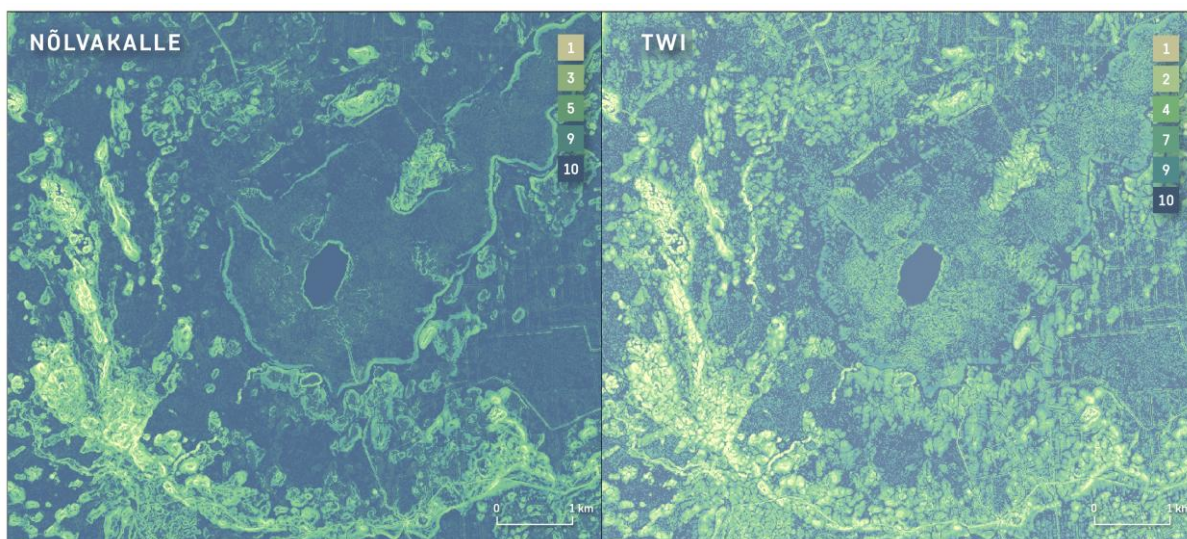
kus a tähistab äravoolu akumulatsiooni ($m^2 m^{-1}$) ning b nõlvakallet kraadides.

TWI raster arvutati 10-meetrise eraldusvõimega digitaalset kõrgusmodelit kasutades. Esmalt täideti QGIS-is lohud (*GDAL Fill nodata*), seejärel arvutati nõlvakalde rasterkraadides (*GDAL Slope*) ning teisendati see radiaanidesse. Äravoolu akumulatsiooni raster arvutati SAGA GIS-is, kasutades *Flow Accumulation* tööriista. Lõpuks arvutati QGIS *Raster Calculator* tööriista abil nõlvakalde ja äravoolu akumulatsiooni rastreid kasutades TWI.

TWI on dimensioonitu indeks (Beven ja Kirkby, 1979), mis näitab küll vee kogunemise potentsiaali ühes piirkonnas võrreldes teistega, ent ei anna tulemuseks mingisugust põhjavee kaitstuse seisukohalt otseselt tõlgendatavat väärtust, mille abil oleks võimalik väärtusvahemikke moodustada ja neile hinnanguid anda – ehkki TWI väärtus on teada, on ilma lisakontekstita võimatu öelda, kas see väärtus on põhjavee kaitstuse seisukohalt hea või halb.

TWI tähenduse täpsustamiseks kaasati metoodikasse täiendav indeks, TPI (*Topographic Position Index*), mille pakkus välja Weiss (2002). TPI võimaldab hinnata, kas mingi punkt maastikul asub suhteliselt kõrgemal või madalamal võrreldes teda ümbritseva reljeefiga teatud otsinguraadiuses. TPI-d otsustati kasutada TWI väärtusvahemike moodustamiseks, lähtudes eeldusest, et ümbritsevast piirkonnast madalamad alad on Eesti maastike omapärasid arvesse võttes tõenäolisemad kohad vee akumulatsiooniks, ning ümbritsevast oluliselt kõrgematele aladele akumulatsioon vähem vett.

TWI väärtusvahemike moodustamiseks klassifitseeriti TWI raster QGIS-is ümber täisarvuliseks (*Reclassify by Table*) ning iga väärtust (vahemikus 9 kuni 26) käsitleti eraldi tsoonina, mille sees arvutati välja keskmine TPI väärtus (*Zonal Statistics*). TPI keskmine väärtus tsooni kohta langes alla nulli tsoonis, kus $TWI = 15$, ent oli suhteliselt kõrge tsoonides, kus TWI jäi alla 12. TWI jagati väärtusvahemikesse nendest tulemustest lähtuvalt. Joonisel 7 on kujutatud T parameetri hinnangud samas piirkonnas klassikalise DRASTIC metoodika järgi (vasakul) ning TWI-d kasutava metoodika järgi (paremal). Kui nõlvakalde paanil on madala hinnangu ehk kõrge kaitstuse poolest esile tõstetud ainult piirkonnad, kus reljeef muutub, siis TWI paani vaade on pisut mitmekesisem.



Joonis 7. T parameetri hinnang originaalse DRASTIC metoodika ehk nõlvakalde põhjal (vasakul) ning suurkaevupõhise metoodika ehk TWI põhjal (paremal). Alusandmed: 10 m kõrgusmodel, Maa-amet, 2024.

Siiski jäi reljeefi parameetri puhul alles murekoht, et punktipõhise andmestiku puhul ei pruugi üksiku piksli TWI väärtus anda usaldusväärset teavet piirkonna üldise kaitstuse kohta. Seetõttu kasutati reljeefi parameetri puhul kombineeritud lähenemist: kaevude kaitstuse hinnang määrati konkreetse kaevu asukohapiksli TWI väärtuse põhjal, aga ruutkaardi tasandil kaitstuse hindamiseks arvutati välja keskmine TWI väärtus võreruudu sees. See lähenemine aitas üle-eestilisel skaalal tõsta esile piirkonnad, kus vesi reljeefi tõttu kõige rohkem akumulatsioon. TWI rastrit kasutati kaitstuse hindamise töövoomudeli sisendina, ent keskmistatud TWI väärtuste raster loodi osana töövoost, seda pärast ruutkaardi võre loomist.

2.3.2.6 I – Pinnakatte paksus

I parameetri puhul lähtuti Männik jt (2023) poolt välja pakutud pinnakatte paksuse käsitlest. Pinnakatte paksus mõjutab seda, kui pikk on maapinnalt infiltreeruva vee ning potentsiaalsete

reoinete teekond põhjaveekihti. Mida paksemad on pinnakattesetted, seda pikem on teekond ja seetõttu on põhjaveekiht paremini kaitstud. Väga varieeruva paksusega pinnakattesetete tõttu on see Eesti kontekstis kaitstuse hindamiseks üks olulisim parameeter.

Pinnakatte paksus leiti puurkaevu läbilõigete töötlemise käigus (kirjeldatud ptk 2.3.2.4) loodud pinnakattekihtide alg- ja lõppsügavuse andmeveergude seast, tuvastades iga kaevu puhul suurima lõppsügavuse (aluspõhja pealispinna sügavuse). Pinnakatte paksuse väärtused klassifitseeriti ja hinnati üheselt Männik jt (2023) väljapakutud väärtusvahemikega.

2.3.2.7 C – Filtratsioonimoodul

C parameeter ehk filtratsioonimoodul kaasati põhjavee kaitstuse hindamisse originaalkujul vastavalt Aller jt (1987) poolt välja pakutud DRASTIC meetodikale. Filtratsioonimoodul ehk filtratsioonikoefitsient näitab, kui hästi suudab põhjaveekiht vett läbi lasta, ning määrab ära põhjavee voolamise kiiruse (Aller jt, 1987). Kuna vee liikumise kiirus mõjutab ka reostusaine levikut põhjavees, on suurema filtratsioonimooduliga piirkonnad halvemini kaitstud. Filtratsioonimooduli määravad suures osas ära põhjaveekihi omadused (A parameeter). Filtratsioonimooduli hindamine on keerukas protsess ning parima meetodika valik sõltub vaadeldavale piirkonnale omasest hüdrogeoloogiast (Niemann ja Rovey, 2000). Üldjuhul hinnatakse filtratsioonimoodulit pumpamiskatsete tulemuste põhjal (Aller jt, 1987).

Puurkaevude andmebaasis oleva info põhjal filtratsioonimooduli hindamine on küll võimalik, ent selleks tuleb teha mitmeid mööndusi. Ainus viis puurkaevude andmebaasi põhjal filtratsioonimooduli väärtusi hinnata on sarnaselt põhjaveekihi omaduste parameetri ga lähtuda erideebiti väärtusest. Eestis on mitmete hüdrogeoloogiliste uuringute käigus (Savitskaja, 2007; Maves, 2009) veekihi veejuhtivuse hindamiseks rakendatud 1975. aastal Šestakovi jt poolt välja pakutud empiirilise valemi edasiarendust:

$$T = 130 \times q, \quad (3)$$

kus T on veekihi veejuhtivus ($m^2/\text{ööpäevas}$) ning q on erideebit ($l s^{-1} m^{-1}$) (Šestakov jt 1975, *cit.* Marga 2014). Veekihi veejuhtivuse jagamisel põhjaveekihi paksusega saadakse filtratsioonimoodul ($m/\text{ööpäevas}$). Erideebiti kaudu põhjaveekihi veejuhtivuse ning seega ka filtratsioonimooduli hindamine võib anda häid tulemusi juhul, kui pumpamiskatsed on läbi viidud vajalike protokolle järgides ning kestnud piisavalt kaua. Lisaks töötab valem paremini surveelistes põhjaveekihtides (Tamm ja Metsur, 2017). Ehkki paljud puurkaevud nendele tingimustele ei vasta, annab selle või sarnase lähenemise kasutamine tõenäoliselt siiski lokaalseid põhjavee kaitstuse tingimusi paremini peegeldava tulemuse kui üksnes üldistavatele töödele tuginemine.

Filtratsioonimooduli hindamiseks kasutati puurkaevuandmestikust veergusid „Erideebit“ (loodud A parameetri hindamise käigus) ning „Konstruktsioon“. Puurkaevude andmestik ei sisalda veekihi paksuse andmeid, mistõttu asendati veekihi paksus iga kaevu puhul kaevu töötavate osade (filtrite, manteldamata osade) kogupikkusega. Kuna põhjavee kaitstuse hindamisel keskenduti reostuse suhtes kõige tundlikuma, ülemise aluspõhjalise põhjaveekihi kaitstusele, peeti sellist lähenemist meetoodiliselt sobivaks.

Selleks, et teada saada kaevu avatud osade kogupikkus, lisati skripti osa, mis töötle s puurkaevu konstruktsioonelementide välja. Konstruktsioonelementid ning nende sügavusvahemikud

olid sarnaselt puurkaevu läbilõigetega kantud kõik ühele väljale, mistõttu töötuse esimese etapina lahutati need eraldi veergudesse semikoolonite kohalt. Seejärel tuvastas ja klassifitseeris skript iga puurkaevu kõik elemendid avatud (ehk töötavateks) ning suletud osadeks märksõnade põhjal. Sõnaosa „toru“ sisaldavad elemendid klassifitseeriti suletuteks, sõnaosaid „filt“ ning „manteldamata“ sisaldavad elemendid avatuteks. Juhul kui konstruktsioonelementidel ei olnud kirjeldusi ning kaevu kõik elemendid olid andmebaasi kantud sellisel või sarnasel kujul – „P: 0-2m“ –, lähtuti eeldusest, et kõige sügavamal asuv konstruktsioonelement on kaevu töötav osa. Juhul kui kaevul oli mitu töötavat osa, liideti töötavate osade kogupikkuste saamiseks nende osade pikkused kokku, pidades sealjuures silmas, et avatud konstruktsioonelementide sügavusvahemike kattumisel võetakse kattuvat osa arvesse vaid ühe korra.

Skriptis rakendati ka kaht kontrollmehhanismi. Esiteks eemaldati andmestikust kõik puurkaevud, mille avatud osa pikkus oli null. Teiseks eemaldati sellised kaevud, mille avatud osa kogupikkus ületas kaevu kogusügavust.

Pärast kaevu avatud osade kogupikkuse tuvastamist rakendati valemit (3), et leida igale puurkaevule filtratsioonimooduli väärtused. Andmete usaldusvärsuse suurendamiseks valiti puurkaevude seast välja ainult need kaevud, mille proovipumpamine kestis vähemalt 12 tundi (7406 kaevu). Nende kaevude seast eemaldati omakorda kaevud, mis ei mahtunud 95% usaldusintervalli sisse. Saadud puurkaevude valimi filtratsioonimoodulite põhjal viidi läbi tavakriitinguga interpoleerimine, kasutades teeki *PyKrige*. Viimase sammuna viidi läbi saadud rastri silumine. Puurkaevupõhiste filtratsioonimooduli hinnangute saamiseks päriti valminud rastrilt väärtus iga puurkaevu asukohas ning anti sellele hinnang Aller jt (1987) väärtusvahemikke ja hinnanguid kasutades.

2.3.2.8 Põhjavee kaitstuse indeksite klassifitseerimine

Kõigi DRASTIC parameetrite väärtused ja hinnangud salvestati eraldi tabelitena. Pärast parameetrite individuaalset hindamist ühendati tabelid veeru „Katastrinumber“ alusel puurkaevude põhiantmestikuga – tulemuseks andmetabel, mis sisaldas infot nii puurkaevude üldandmete kui ka kõigi parameetrite kohta. Seejärel kasutati parameetrite hinnanguid sisaldavaid veergusid, et DRASTIC valemi (valem (1)) abil arvutada igale puurkaevule põhjavee kaitstuse indeks.

Põhjavee kaitstuse indeksid jäid vahemikku 41 kuni 212, kusjuures madalaim võimalik indeks, mis kasutatud parameetri kaalude puhul saanuks tulemuseks tulla, on 26, ning kõrgeim võimalik indeks 260. Kuna põhjavee kaitstuse indeks on dimensioonitu näitaja, jagatakse indeksid üldiselt väärtusvahemikesse ehk klassidesse, millele antakse kvalitatiivne, lihtsasti mõistetav hinnang. Eesti kontekstis põhjavee kaitstuse hindamisel tähendab see seda, et kaardi efektiivse kommunikatsioonivahendina kasutamiseks tuleks lähtuda Veeseaduses (2019) sätestatud viiest kaitstuse klassist: kaitsmata, nõrgalt kaitstud, keskmiselt kaitstud, suhteliselt kaitstud ning kaitsud põhjaveega alad.

Põhjavee kaitstuse indeksite klassifitseerimiseks pole välja pakutud ühtset meetodikat – klassifitseerimismeetodi valik sõltub põhjavee kaitstuse kaardi konkreetsemast kasutuseesmärgist ja kasutajaskonnast. Männik jt (2023) kasutasid Eestis DRASTIC

metoodika katsetamisel indeksite klassifitseerimiseks Hamza jt (2017) väljapakutud metoodikat, mille puhul kaitstuse indeksid klassifitseeritakse protsentiilide põhisel. Kaitstuse indeksite miinimum- ja maksimumväärtuste vahemik jagunes seadusest tulenevateks klassideks järgmiselt: 0 – 10% kaitstud, 11 – 28% suhteliselt kaitstud, 29 – 46% keskmiselt kaitstud, 47 – 64% nõrgalt kaitstud, > 65% kaitsmata. Kõige levinum viis kaitstuse indeksite klassidesse jaotamiseks on aga neist võrdsete väärtusvahemike moodustamine. Edukalt on kasutatud ka geomeetrilisi väärtusvahemikke (Kazakis ja Voudouris, 2015).

Puurkaevupõhiste põhjavee kaitstuse indeksite klassifitseerimiseks katsetati töö käigus kõiki eelnevaid lähenemisi. Tulemusi hinnati kaardipildi visuaalsel hinnangul ning võrdlusele olemasolevate kaitstuse kaartidega. Nimetatud metoodikatest ei hinnatud ühtki täies mõõdus sobivaks. Võrdsete väärtusvahemike kasutamisel hinnati kaitstust oluliselt madalamaks kui olemasolevatel kaitstuse kaartidel, kusjuures üle tähtsustati keskmisi väärtusi, mistõttu domineerisid ka kaardil peaaesjalikult nõrgad ja keskmiselt kaitstud alad. Geomeetriliste väärtusvahemike kasutamisel oli tulemus vastupidine – kaitstust hinnati võrreldes olemasolevate kaartidega kõrgemaks ning kaitsmata alasid oli kaardil väga vähe. Hamza jt (2017) metoodikast lähtuvalt Eestis katsetatud protsentiilide põhise jaotusega (Männik jt, 2023) saadud kaardil olid rõhutatud äärmuslikud kaitstuse indeksite väärtused ning nõrgalt kuni suhteliselt kaitstud alasid oli vähe.

Leidmaks nii kartograafiliselt kui ka sisuliselt parim viis kaitstuse indeksite klassifitseerimiseks, koostati RStudios skript, mis rakendas ruutkaardile erinevaid väärtusvahemike kombinatsioone. Saamaks teada, mis indeksi väärtusest alates võiks üks kaitstuse klass muutuda teiseks, katsetati kõigi nelja klassiülemineku (ing k *breakline*) puhul mitmeid väärtusi 5-punktise sammuga. Iga leitud väärtusvahemike kombinatsiooni kohta arvutati statistilised näitajad, mis lähtusid võrdlusest 1 : 50 000 ja 1 : 400 000 kaitstuse kaartidega: Pearsoni ja Spearmani korrelatsioonikoefitsiendid, RMSE (ruutkeskmine viga), MAE (keskmine absoluutviga), MedAE (mediaan-absoluutviga) ning kaitstuse klasside pindalaline kattuvus olemasolevate kaartidega sama, ± 1 ja ± 2 klassi piires. Võrdluseks kasutatud kaartide ettevalmistus on kirjeldatud alapeatükis „2.4.1 Võrdlus olemasolevate põhjavee kaitstuse kaartidega“. Kokku katsetati veidi üle 1000 väärtusvahemike kombinatsiooni.

Saadud tulemuste hulgast valiti välja kümme parimat väärtusvahemike kombinatsiooni, lähtudes peamiselt võimalikult madalatest RMSE ja MAE väärtusest ning võimalikult suurest klasside kattuvusest olemasolevate kaartidega. Valitud kombinatsioonide alusel koostati kaitstuse kaardist 10 varianti, millest visuaalse hindamise teel valiti välja kartograafiliselt sobivaim versioon. Moodustatud väärtusvahemikud on toodud tabelis 4.

Tabel 4. Põhjavee kaitstuse indeksite klassifitseerimise tulemus

<i>Kaitstud</i>	<i>Suhteliselt kaitstud</i>	<i>Keskmiselt kaitstud</i>	<i>Nõrgalt kaitstud</i>	<i>Kaitsmata</i>
41 – 75	76 – 100	101 – 125	126 – 160	161 – 212

2.3.3 Põhjavee kaitstuse visualiseerimine

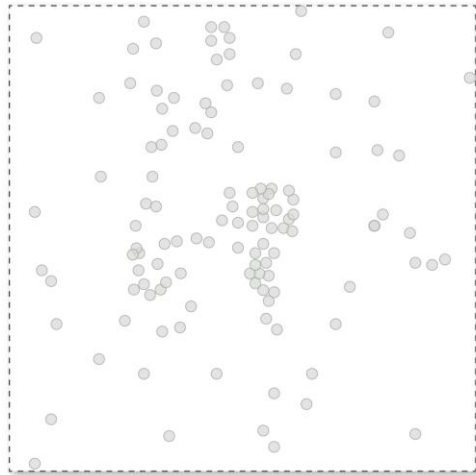
Kartograafiliste visualiseeringute puhul on üks olulisemaid küsimusi see, kuidas kujutada andmeid viisil, mis peegeldaks usaldusväärselt nende ruumilist iseloomu. Hüdrogeoloogiliste andmete puhul, eriti kui tegemist on tuletatud näitajatega nagu põhjavee kaitstus, võib traditsiooniline interpoleeritud pindade kasutamine jätta kasutajaile eksitava mulje alusandmete tegelikust tihedusest. Käesolevas töös kasutati punktandmetel põhinevat, tihedusest lähtuvat adaptiivset kaardivõret, mille eesmärk on tagada, et kaart esindaks võimalikult tõetruult puurkaevuandmete ruumilist jaotust ja tihedust.

2.3.3.1 Adaptiivse kaardivõre loomine

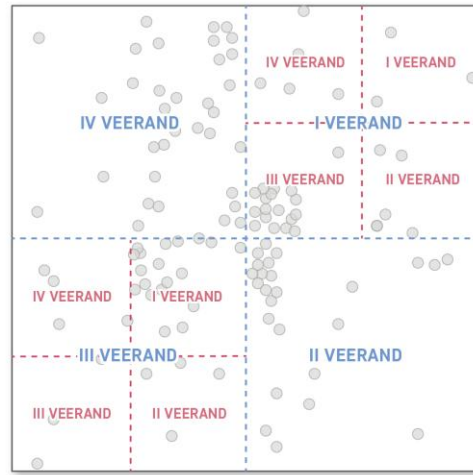
Puurkaevude paiknemise klastrilist iseloomu ning kaardi automaatse loomise ja uuendamise vajadust arvesse võttes otsustati põhjavee kaitstuse visualiseerimiseks kasutada adaptiivset kaardivõret, mille puhul ruudu suuruse määrab andmepunktide tihedus piirkonnas. Võre otsustati 1*1 km võretasandil ühildada Eesti 1 : 2000 kaardilehtede ruudustikuga, et võimaldada tulevikus ruutkaardi lihtsamat integreerimist teiste ruumiliste andmekihtidega.

Adaptiivse kaardivõre genereerimiseks koostati skript, mis integreeriti üldisesse töövoomudelisse. Skript kasutab sisendina puurkaevude kaardikihti, Eesti ruumikuju kaardikihti ning võre loomiseks QGIS-is ette valmistatud 512 * 512 km ruutu, mis ümbritseb terve Eesti ala ning on ühildatud 1 : 2000 kaardivõrguga. Võre jagamine toimub järgmisel põhimõttel (joonis 8):

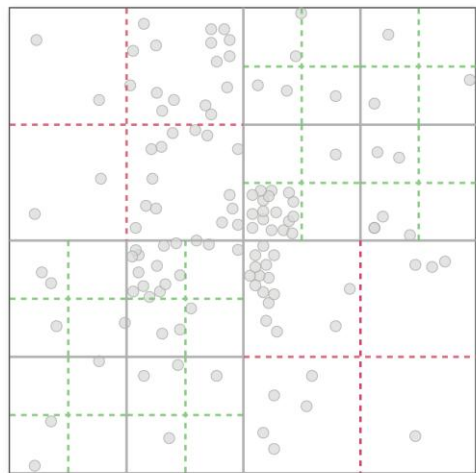
- 1) 512 * 512 ruut jagatakse neljaks põhimõttel, et igasse neljandikku peab jääma vähemalt kolm andmepunkti. Tekkinud väiksemaid üksusi jaotatakse sellel põhimõttel edasi, kuni võre väiksemaks tegemine ei ole enam võimalik ehk pole enam selliseid ruute, mille neljaks jagamisel oleks igas uues ruudus endiselt kolm punkti.
- 2) Teises etapis jagatakse kõik varasemalt moodustatud ruudud veel üks kord neljaks, sõltumata sellest, kas igas uues alamruudus on vähemalt kolm andmepunkti või mitte. Selline "sundjagamine" on vajalik, kuna esimese sammu lõpuks jäävad kaardile mõned väga suured ruumiüksused, kus punktitihe on teatud osas väga kõrge, vähemalt ühes neljandikus aga nii madal, et ruutu pole võimalik kolme punkti reeglil järgides jagada. See toob küll kaasa vajaduse mõnedesse ruutudesse väärtused interpoleerida, ent on eelistatum variant võrreldes sellega, et mõnes ruumiüksuses asub kolm, teises aga tuhat punkti. Kui piirduda sammuga 1, tekiks kaart, mille puhul ei saaks eeldada, et sama suurusega ruumiüksused esindavad sarnast andmetihedust. Sellega kaoks adaptiivse võre kasutamise eesmärk.
- 3) Ühes "sundjagamise" sammuga tekib arvukalt ruumiüksusi, mida on võimalik edasi jagada. Võre jagamist jätkatakse varasema loogika järgi – ruut jagatakse edasi ainult juhul, kui igas uues osas on vähemalt kolm puurkaevu.
- 4) Viimases etapis kontrollitakse andmepunktide arvu igas ruudus. Kui mõnes ruudus on kümme või enam kaevu, jagatakse seda ruutu edasi, sõltumata sellest, kas kõik uued ruudud vastavad varasemale kolme kaevu kriteeriumile. Eesmärk on saavutada olukord, kus igas võreruudus on 0 – 9 ruutu.



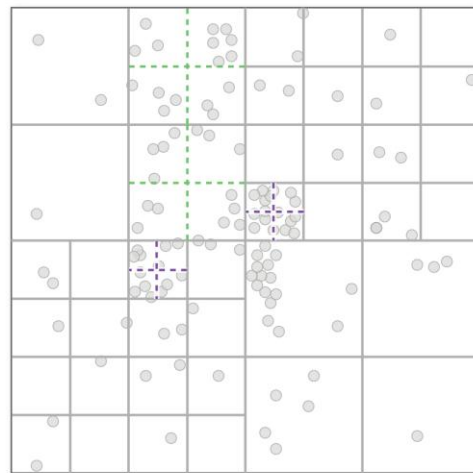
1 Andmepunktide ümber luuakse ruudu- (või ristküliku) kujuline ala, mida hakatakse punktiheduse põhjal väiksemateks osadeks jagama.



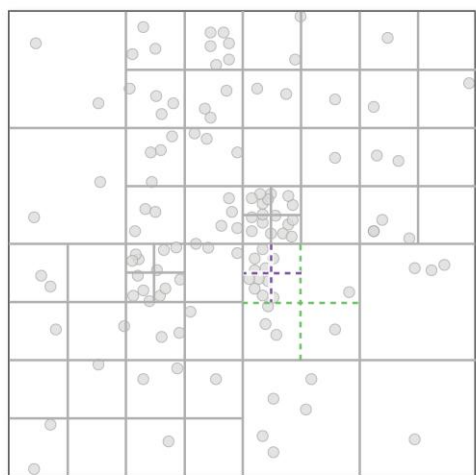
2 Ruutu hakatakse jagama järjest väiksemateks üksusteks. Jagamine toimub ainult juhul, kui ruudu igas veerandis asub vähemalt kolm andmepunkti. Jagamine toimub senikaua, kuni ühtki ruutu ei saa enam edasi jagada, sest kolme andmepunkti reeglit ei täidetak.



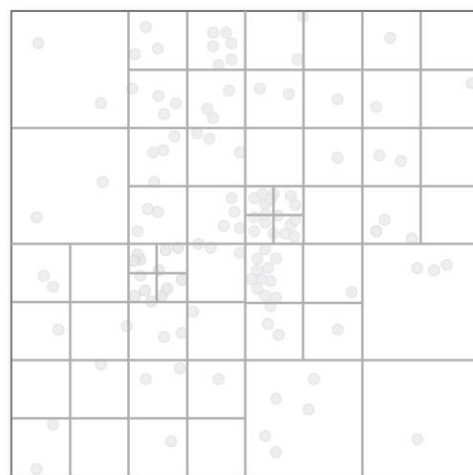
3 Kõik ruudud jagatakse veel ühe tasandi võrra väiksemaks, et vabaneda suurtest ruumiüksustest, mille ühes osas on suur, teises väike andmetihedus. Mõned ruudud jäävad selle tulemusel tühjaks, nende väärtused interpoleeritakse lähimatest andmepunktidest.



4 Ühe tasandi võrra väiksemaks jagamine loob mitmeid ruute, mida saaks suure andmetiheduse tõttu edasi jagada. Nende ruutude jagamine jätkub punktis 2 kirjeldatud põhimõttel, kuni ühtki ruutu ei saa enam edasi jagada.



5 Kui ruute pole kolme punkti põhimõttel võimalik edasi jagada, kontrollitakse andmepunktide arvu igas ruudus. Ruudud, milles on 10 või enam andmepunkti, jagatakse väiksemaks, et vabaneda liiga suure suhtelise andmetihedusega ruutudest. Tühjaks jäävate ruutude väärtused interpoleeritakse.



6 Valmib kvadropuu põhimõttel ruutkaardi võrk, mille igas ruumiüksuses on 0-9 andmepunkti.

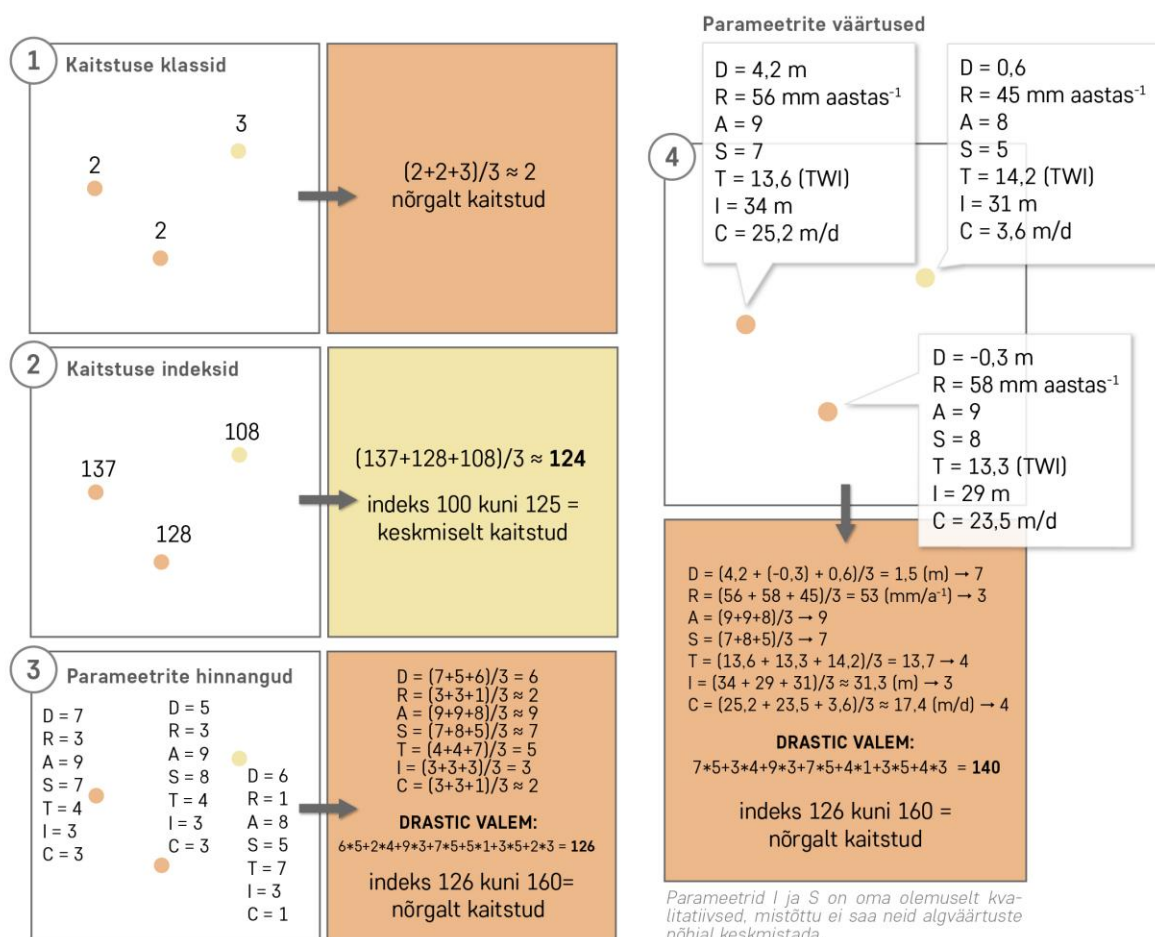
— loodud ruumiüksused
- - - loodavad ruumiüksused

Joonis 8. Punktihedusel põhineva adaptiivse kaardivõre loomise põhimõtte.

Skript kasutab Eesti ruumikuju, et hinnata, kui suur osa igast jagatavast ruudust paikneb Eesti territooriumil. Juhul kui ruut ulatub osaliselt merre või väljapoole Eesti piiri, arvestatakse ruudu jagamisel vaid Eesti-sisest osa. See tähendab, et kui ruudu Eestisse jäävas osas on piisavalt andmepunkte, toimub selle jagamine sõltumata sellest, et ruudu igas neljandikus pole piisavalt punkte. Eesti ruumikuju kasutatakse pärast võre genereerimist ka selle lõikamiseks Eesti ruumikujule vastavaks.

2.3.3.2 Põhjavee kaitstuse hinnangute integreerimine adaptiivsele kaardivõrele

Selleks, et loodud kaardivõrest saaks põhjavee kaitstuse ruutkaart, tuli kaardivõre igale ruudule omistada kaitstuse väärtus neis asuvate puurkaevude kaitstuse andmete põhjal. Kuna iga parameetri kohta oli andmestikust mitu tasandit kaitstust iseloomustavaid väärtusi, alates parameetrite toorväärtustest kuni puurkaevu kaitstuse klassini välja, ning väärtuste keskmistamiseks valitud tasand mõjutas lõpptulemust, katsetati töös nelja agregeerimisvariandi sobivust ruutkaardi loomiseks (joonis 9).



Joonis 9. Näide neljast põhjavee kaitstuse hinnangute agregeerimise võimalusest ning nende erinevusest.

Väärtuste keskmistamiseks katsetatud variandid olid järgmised:

- 1) Ruudu kaitstus kujunes selles asuvate puurkaevude kaitstuse klasside (1 – 5, kus 1 tähistab kaitsmata alasid) keskmistamisel.

- 2) Ruudu kaitstus kujunes selles asuvate puurkaevude kaitstuse indeksite (41 – 212) keskmistamisel. Kaitstuse klass määrati ruudukeskmise indeksi põhjal.
- 3) Ruudu kaitstus kujunes selles asuvate puurkaevude individuaalsete parameetrite (D, R, A, S, T, I, C) hinnangute põhjal selliselt, et iga parameetri jaoks arvutati ruudukeskmine hinnang ehk igale ruudule omistati 7 keskmistatud väärtust. Ruudukeskmsed hinnangud paigutati DRASTIC valemisse, mille abil arvutati välja ruudukeskmine indeks ja määrati kaitstuse klass.
- 4) Ruudu kaitstus kujunes selles asuvate puurkaevude individuaalsete parameetrite toorväärtuste põhjal. Väärtused keskmistati ja anti neile ruudukeskmine hinnang. Ruudukeskmsed hinnangud pandi DRASTIC valemisse, mille abil arvutati välja ruudukeskmine indeks ja määrati kaitstuse klass.

Kõigi nelja klassifitseerimismeetodiga loodi eraldi põhjavee kaitstuse ruutkaart, mida võrreldi olemasolevate, 1 : 50 000 ja 1 : 400 000 kaitstuse kaartidega. Kuna erinevate väärtuse keskmistamise meetodikatega loodud ruutkaardid ei olnud üheselt võrreldavad, sest ühe variandi puhul tähistasid madalamad väärtused madalat kaitstust, aga kolme variandi puhul kõrgemat kaitstust, viidi kõik kaardid normaliseeritud skaalale, kus madalaim väärtus ("1") tähistas ka kõige madalamat kaitstust.

Võrdluse hõlbustamiseks viidi ka olemasolevad kaardid skripti abil ruutkaardi kujule. Selleks teisendati vektorkujul kaardid esmalt rastriteks, millel iga piksel kandis endas kaitstuse klassi väärtust (1 – 5), ning seejärel arvutati iga võreruudu kohta välja keskmine kaitstuse väärtus, kasutades selleks teegi *rasterstats* tsonaalstatistika funktsiooni. Kui nii loodud ruutkaardid kui ka ruutkaardi kujule teisendatud 1 : 50 000 ja 1 : 400 000 kaardid olid viidud samale alusele, liideti kõigi kuue kaardi andmed ühte tabelisse, kus iga andmerida esindas üht ruutkaardi ruutu. See võimaldas ruutude kaupa võrrelda loodud ruutkaartide väärtusi olemasolevate kaartidega. Tabeli põhjal arvutati välja mitmesugused statistilised näitajad: Pearsoni ja Spearmani korrelatsioonikoefitsiendid, RMSE, MAE, MedAE ning pindalaline kokkulangevus $\pm 0,25$, $\pm 0,5$ ja ± 1 klassi piires (tabel 5).

Tabel 5. Põhjavee kaitstuse hinnangute agregeerimisvariantide statistiline võrdlus 1 : 50 000 baaskaardi (50k) ja 1 : 400 000 kaitstuse kaardiga (400k).

Variant	Kaart	Pearson	Speaman	RMSE	MAE	MedAE	Pindala $\pm 0,25$	Pindala $\pm 0,5$	Pindala ± 1
1	50k	0,63	0,62	0,91	0,67	0,52	30,0	51,1	82,1
	400k	0,72	0,69	0,89	0,68	0,58	24,8	46,1	78,5
2	50k	0,72	0,65	0,77	0,60	0,52	26,8	50,2	83,9
	400k	0,66	0,69	0,77	0,59	0,48	29,0	54,8	84,4
3	50k	0,61	0,62	0,83	0,67	0,60	20,3	43,7	81,3
	400k	0,71	0,69	0,71	0,58	0,50	27,8	55,8	87,1
4	50k	0,42	0,47	1,16	0,92	0,77	16,4	34,4	71,2
	400k	0,51	0,51	1,04	0,80	0,64	23,5	46,8	78,3

Statistilise analüüsi tulemusel valiti andmete agregeerimisviisiks variant number kaks. Kõige nõrgema tulemuse olemasolevate kaartidega võrdluses andis kõige keerukam, neljas agregeerimisviis, mille puhul hinnati kaitstust oluliselt madalamaks, seda tõenäoliselt mõnede

väga kõrgete toorväärtuse tõttu, mis omakorda mõjutasid ruudukeskmi lõpphinnangut. Põhjavee kaitstuse hindamisel andis paremad tulemused selliste äärmuste silumine.

Pärast sobiliku agregeerimisvariandi valimist lisati töövoomudeli skripti osa, mis kasutas loodud DRASTIC andmetabelit ja adaptiivset kaardivõret, et arvutada iga võreruudu kohta kaitstuse indeksite keskmised väärtused ja standardhälbed. Väärtuste interpoleerimiseks nendele ruutudele, milles ühtki puurkaevu ei asunud, loodi neile ruutudele tsentroidid ning tuvastati tsentroididele kaheksa lähimat puurkaevu kuni 12 km raadiuses. Kaitstuse indeksid keskmistati lähimate naabrite alusel. Selle, töövoomudeli viimase sammu tulemuseks oli .shp formaadis põhjavee kaitstuse ruutkaardi kaardikiht, mille atribuuttabelis on iga ruudu kohta olemas ka vajalikud statistilised näitajad.

2.4 Tulemuste valideerimine ja analüüs

Kaevudele põhjavee kaitstuse hinnangud antud ning ruutkaart loodud, viidi läbi tulemuste analüüs, mis koosnes kahest olulisemast etapist: esmalt võrreldi ruutkaarti nii visuaalselt kui ka statistiliste näitajate abil kolme olemasoleva põhjavee kaitstuse kaardiga, ning seejärel viidi läbi parameetrite tundlikkusanalüüs. Lisaks koostati üldine statistiline ülevaade põhjavee kaitstuse klasside jaotumisest nii ruutkaardil kui ka puurkaevude kaupa.

2.4.1 Võrdlus olemasolevate põhjavee kaitstuse kaartidega

Ruutkaardi tulemusi võrreldi olemasolevate põhjavee kaitstuse kaartidega mõõtkavades 1 : 50 000 ja 1 : 400 000. Võrdluse eesmärk oli tuvastada piirkonnad, kus kaitstuse hinnangud kõige rohkem erinevad, ning analüüsida, millest need erinevused võivad tuleneda. Lisaks kaasati võrdlusesse EU-Waterres projekti raames koostatud Eesti-Läti piiriala kaart mõõtkavas 1 : 200 000. See on ainus olemasolevatest, digitaalsel kujul kättesaadavatest kaarditest, mis tugineb samuti DRASTIC metoodikale – küll selle traditsioonilises, mitte puurkaevudele põhinevas käsitluses.

Kaartide lihtsamaks võrdlemiseks viidi kõik kolm olemasolevat kaarti ruutkaardi kujule; otsene võrdlemine interpoleeritud pindadega oleks olnud keeruline. Erinevalt eelnevas alapeatükis kirjeldatud metoodikast ei kasutatud seekord ruudupõhist keskmistamist pidevate väärtuste saamiseks, vaid iga ruudu väärtus määrati selle põhjal, milline põhjavee kaitstuse klass oli selle sees pindalaliselt kõige suurema osakaaluga. Selline lähenemine võimaldas säilitada põhjavee kaitstuse diskreetsed klassid.

Kõik neli kaarti viidi rasterkujule ning loodud kaitstuse ruutkaardi raster lahutati üksikhaaval võrdluskaartide rastritest (ArcGIS Pro, tööriist *Minus*). Selle sammu tulemuseks oli kolm rastrit, mis näitasid puurkaevupõhise ruutkaardi ja kolme olemasoleva kaitstuse kaartide vahelisi kõige suuremaid erinevusi. Kasutatud metoodika puhul tuleb arvestada, et kuna olemasolevate kaartide ruutkaardi kujule viimisel võeti arvesse iga ruudu kohta ainult selles pindalaliselt domineerivat klassi, tulenes teatud osa tuvastatud erinevustest tõenäoliselt just sellest. Üldiste ruumimustrite hindamiseks oli tegu aga sobiliku lähenemisega.

Statistilise võrdluse alusena kasutati peatükis „2.3.2.8 Põhjavee kaitstuse indeksite klassifitseerimine“ loodud andmetabelit kõigi katsetatud väärtusvahemike statistiliste näitajatega.

2.4.2 DRASTIC parameetrite tundlikkusanalüüs

Põhjavee kaitstuse hindamise mudelite tundlikkust hinnatakse mitut tüüpi tundlikkusanalüüsidega, millest levinuimad on tundlikkus parameetrite ühekaupa eemaldamine (ingl *Map removal sensitivity analysis*, edaspidi MRSA) ja parameetrite tegeliku kaalukuse hindamine (ingl *Single parameter sensitivity analysis*, edaspidi SPSA) (Vu jt, 2019). Käesolevas töös viidi läbi mõlemad analüüsid, et mõista, mis parameetrid põhjavee kaitstuse hinnangute kujunemist kõige enam mõjutavad ning kas mõni parameeter on meetoodiliselt üleliigne.

MRSA on Lodwick jt 1990. aastal välja pakutud analüüsimeetod, mille puhul eemaldatakse analüüsist korraga üks parameeter ning hinnatakse, kuidas põhjavee kaitstuse hinnangud muutuksid, kui vastavat parameetrit mudelis ei kasutataks. Meetodit rakendatakse mitmest kaardikihist koosnevate mudelite puhul, et mõista iga parameetri mõju lõpptulemusele. MRSA valem on

$$S = \frac{V_i - \frac{V_{xi}}{n}}{V_i} \times 100 \quad (4)$$

kus V_i on kaitstuse indeks kõigi parameetrite kaasamisel, V_{xi} on kaitstuse indeks ühe parameetri eemaldamisel, N on kõigi parameetrite arv (7) ning n parameetrite arv siis, kui üks parameeter on eemaldatud (6). S on variatsiooniindeks, mida väljendatakse protsentides ning mis arvutatakse välja kõigile DRASTIC parameetritele. Kõrgeima keskmise variatsiooniindeksiga parameetrid on need, mille eemaldamine põhjustaks kõige suurema muutuse kaitstuse hinnangutes. MRSA tulemused aitavad hinnata, kui võrd oluline on iga parameeter kogu mudeli jaoks ning kas kõik seitse DRASTIC parameetrit on põhjendatult kaasatud või võiks mõne eemaldamine toimuda ilma sisulise mõjuta lõpphinnangule.

SPSA on Napolitano ja Fabbri 1996. aastal välja pakutud analüüsimeetod, mis aitab paremini hinnata DRASTIC parameetrite tegelikku kaalukust võrreldes nende teoreetilise, mudelis paika seatud kaaluga. Selle valem on

$$W_{xi} = \frac{P_{ri} \times P_{wi}}{V_i} \quad (5)$$

kus P_{ri} on parameetri hinnang (1 – 10), P_{wi} on parameetri teoreetiline kaal (1 – 5), V_i on kaitstuse indeks ning W_{xi} on parameetri tegelik kaal. Kui parameetri tegelik kaal on kõrgem tema teoreetilisest kaalust, viitab see sellele, et vastava parameetri väärtused on uurimisalal keskmisest kõrgemad ning avaldavad lõpphinnangu kujunemisele suuremat mõju. Tegelik kaal peegeldab seega iga parameetri suhtelist panust kaitstuse hindamisse.

Tundlikkusanalüüs viidi läbi RStudios, kasutades alusena puurkaevude DRASTIC andmetabelit. Kuna iga parameetri variatsiooniindeks ja tegelik kaal võivad piirkonniti olulisel määral varieeruda, viidi tundlikkusanalüüs läbi kolmel astmel: 1) terve Eesti kohta, 2) karbonaatsetest veekompleksidest ja liivakivide veekompleksidest vett ammutavad kaevud eraldi, ning 3) kõik põhjaveekogumid eraldi. Selline lähenemine võimaldas tuvastada ka piirkondlikult olulisi parameetreid, mille mõju ei pruugi olla märgatav üle-eestilisel tasandil, kuid mille eemaldamine avaldaks suurt mõju kaitstuse hinnangutele lokaalselt.

Ehkki DRASTIC parameetrid on oma olemuselt üksteisest sõltuvad muutujad (Aller jt, 1987) – osade parameetrite väärtused on tuletatud teistest või kasutavad sama alusandmestikku –, võivad parameetrid paljudel juhtudel siiski käituda üksteisest sõltumatutena. Et parameetrite vahelisi seoseid paremini mõista ja toetada MRSA tulemuste tõlgendamist, viidi tundlikkusanalüüsi osana läbi ka Spearmani korrelatsioonianalüüs kõigi seitsme parameetri vahel.

3. Tulemused ja arutelu

Magistritöö tulemusel valmis meetodika, mis võimaldab Eesti puurkaevude andmestikule tuginedes automaatselt hinnata ja visualiseerida põhjavee kaitstust üle-eestilisel skaalal. Meetodika põhiväljunditena arvatati põhjavee kaitstuse klassid kõigile piisava andmestikuga Eesti puurkaevudele ning loodi riikliku katvusega põhjavee kaitstuse kaart, mis tugineb kaitstuse visualiseerimiseks adaptiivsele kaardivõrele.

3.1 Puurkaevude põhine põhjavee kaitstus

Põhjavee kaitstuse indeks ja klass arvatati töö tulemusena 22 686 puurkaevule, mis moodustas 99,5% kõigist piisava andmekvaliteediga puurkaevudest andmebaasis. Hinnanguta jäi 125 puurkaevu, mille pinnakattekihtide litoloogilised kirjeldused sisaldasid kirjavigu, muul moel ebaregulaarseid kirjeldusi või polnud piisavalt täpsed pinnakatte omaduste parameetri hindamiseks.

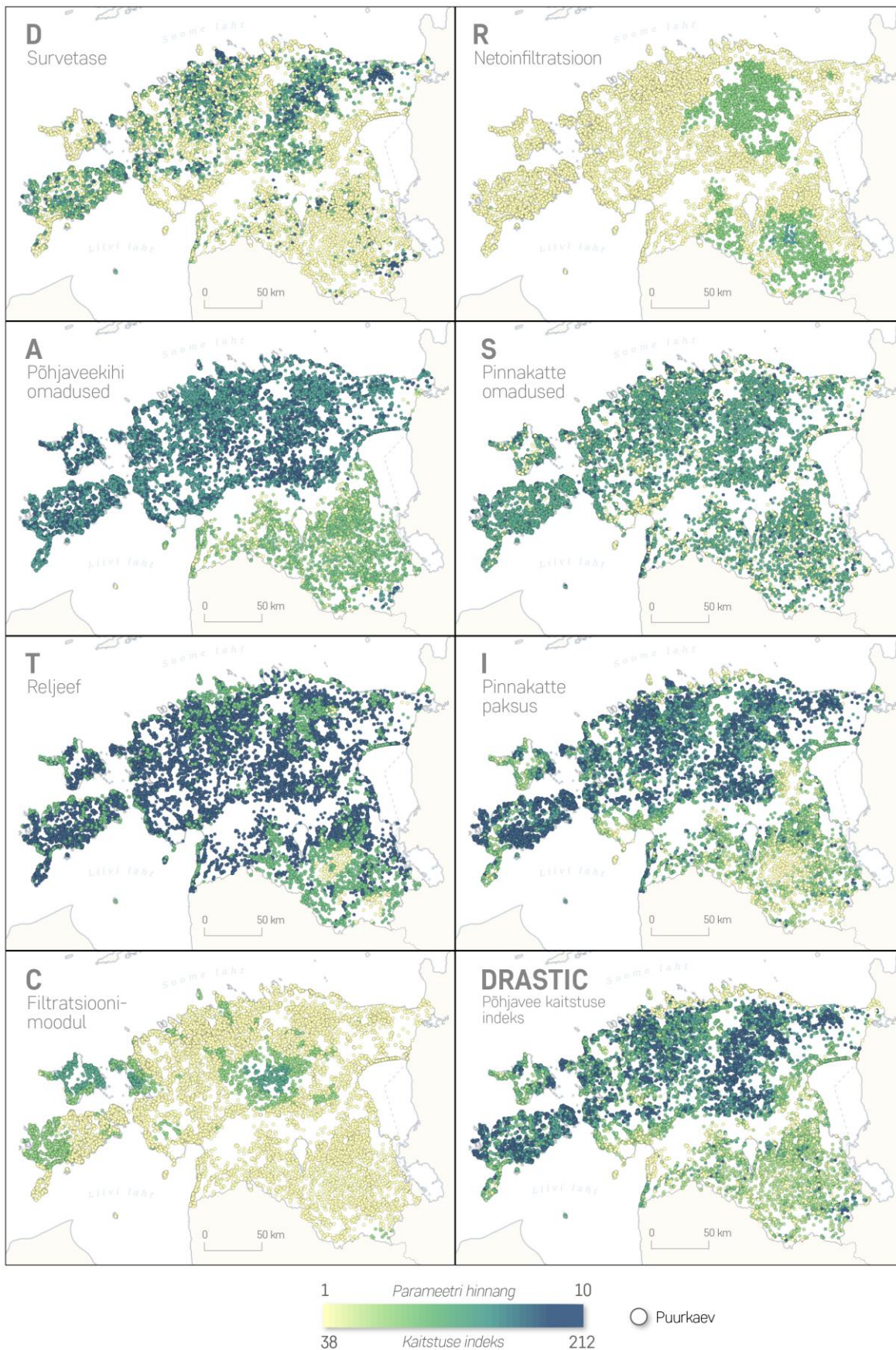
Puurkaevudele arvatatud põhjavee kaitstuse klassid jaotuvad Eesti lõikes järgnevalt: 22,6% puurkaevude asukohtades anti esimesele aluspõhjalisele veekompleksile hinnang „kaitsmata“, 35,5% „nõrgalt kaitstud“, 20,6% „keskmiselt kaitstud“, 13,7% „suhteliselt kaitstud“ ning 7,7% „kaitstud“. Tabel 6 annab ülevaate põhjavee kaitstuse klasside jagunemisest ka esimeste aluspõhjaliste põhjaveekogumite avamusalade lõikes.

Puurkaevude sagedasem esinemine kaitsmata ning nõrgalt kaitstud asukohtades ei viita põhjavee kaitstuse klasside pindalalisele jaotusele, vaid sellele, et inimesed ja inimtegevus – ning ühes nendega ka puurkaevud – on koondunud halvema loodusliku kaitstusega piirkondadesse, Siluri-Ordoviitsiumi põhjaveekompleksi avamusele. Puurkaevude ülesindatust kaitsmata ja nõrgalt kaitstud põhjaveega aladel täheldas 1 : 400 000 kaitstuse kaardi koostamisel ka Perens (2021), kes põhjendas ülesindatust sellega, et õhema pinnakattega paepealseid alasid on ehitus-, tööstus- ja põllumajandusprojektide jaoks peetud atraktiivsemaks. Inimeste ja inimtegevuse koondumine halvema loodusliku kaitstusega aladele suurendab neil aladel aga ka reaalselt reostusohu, sest inimtegevusega kaasnevad antropogeensed reostusallikad ning ühtlasi on põhjavee reostumisstrenaariumi korral mõjutatud suurem arv inimesi. Niisiis on Siluri-Ordoviitsiumi põhjaveekompleksi jätkuv kaitse sihipärase ruumilise planeerimise ja keskkonnakorralduslike otsuste kaudu eriti tähtis.

Põhjaveekogumitest asub kõige rohkem puurkaevusid kaitsmata asukohades Siluri-Ordoviitsiumi Pandivere põhjaveekogumis Lääne-Eesti vesikonnas (62,9% kaitsmata), Ordoviitsiumi Ida-Viru põlevkivibasseini põhjaveekogumis (60,1%), Siluri-Ordoviitsiumi Pandivere põhjaveekogumis Ida-Eesti vesikonnas (50,4%) ning Siluri-Ordoviitsiumi Adavere-Põltsamaa põhjaveekogumis (40,8%). Ühtlasi on nende põhjaveekogumite kaevude keskmised kaitstuse klassid põhjaveekogumite lõikes kõige madalamad. Pandivere ja Adavere-Põltsamaa piirkondi iseloomustavad seal põhjavee kaitseks kehtestatud nitraaditudlikud alad, mille põhiliste piirangualade moodustamisel on lähtutud põhjavee kaitstuse hinnangutest (Veeseadus, 2019) ning Ordoviitsiumi Ida-Viru põlevkivibasseini põhjaveekogumi keemiline

Tabel 6. Puurkaevude jaotumine põhjavee kaitstuse klassi ja põhjaveekogumi (avamuse) põhjal.

Põhjaveekogum (PV K)	Puur- kaeve	Kaitstuse klass, % puurkaevudest					Keskmine	Mediaan
		Kaitsmata	Nõrgalt kaitstud	Keskmiselt kaitstud	Suhteliselt kaitstud	Kaitstud		
1. Kambriumi–Vendi Gdovi PVK	18	0,0	5,6	0,0	11,1	83,3	4,7	5
2. Kambriumi–Vendi Voronka PVK	202	0,0	0,0	1,0	5,9	93,1	4,9	5
3. Kambriumi–Vendi PVK	390	3,1	2,1	2,6	6,9	85,4	4,7	5
4. Ordoviitsiumi–Kambriumi PVK Lääne-Eesti vesikonnas	104	19,2	24,0	33,7	18,3	4,8	2,7	3
6. Ordoviitsiumi Ida-Viru PVK	611	4,4	15,1	60,2	16,7	3,6	3,0	3
7. Ordoviitsiumi Ida-Viru põlevkivibasseini PVK	321	60,1	33,3	5,6	0,9	0,0	1,5	1
8. Siluri–Ordoviitsiumi Hiiumaa PVK	1017	15,7	27,4	37,4	19,0	0,5	2,6	3
9. Siluri Saaremaa PVK	3851	35,0	49,2	12,5	3,0	0,3	1,8	2
10. Siluri–Ordoviitsiumi Harju PVK	5019	21,0	49,2	25,4	3,8	0,5	2,1	2
11. Siluri–Ordoviitsiumi Matsalu PVK	2938	26,9	42,4	21,9	6,5	2,2	2,1	2
12. Siluri–Ordoviitsiumi Pärnu PVK	1570	16,0	30,3	22,8	18,0	12,9	2,8	3
13. Siluri–Ordoviitsiumi PVK Ida-Eesti vesikonnas	941	25,3	35,4	23,9	11,4	4,0	2,3	2
14. Siluri–Ordoviitsiumi Pandivere PVK Lääne-Eesti vesikonnas	652	62,9	33,1	3,5	0,5	0,0	1,4	1
15. Siluri–Ordoviitsiumi Pandivere PVK Ida-Eesti vesikonnas	865	50,4	42,3	6,7	0,6	0,0	1,6	1
16. Siluri–Ordoviitsiumi Adavere-Põltsamaa PVK	346	40,8	48,8	9,2	0,9	0,3	1,7	2
19. Kesk-Alam-Devoni Ruhnu PVK	3	0,0	33,3	33,3	33,3	0,0	3,0	3
20. Kesk-Alam-Devoni Kihnu PVK	36	0,0	0,0	2,8	2,8	94,4	4,9	5
21. Kesk-Alam-Devoni PVK Lääne-Eesti vesikonnas	215	0,0	2,8	2,8	8,8	85,6	4,8	5
22. Kesk-Alam-Devoni PVK Ida-Eesti vesikonnas	78	0,0	7,7	9,0	16,7	66,7	4,4	5
23. Kesk-Devoni PVK Lääne-Eesti vesikonnas	599	1,2	16,9	24,5	42,2	15,2	3,5	4
24. Kesk-Devoni PVK Ida-Eesti vesikonnas	2729	1,2	9,2	20,3	53,6	15,8	3,7	4
25. Kesk-Devoni PVK Koiva vesikonnas	138	0,7	3,6	15,9	57,2	22,5	4,0	4
26. Ülem-Devoni PVK	43	4,7	7,0	44,2	39,5	4,7	3,3	3
EESTI	22686	22,6	35,5	20,6	13,7	7,7	2,5	2



Joonis 10. DRASTIC parameetrite hinnangute varieeruvus puurkaevude kaupa. Aluskaart: Maa-ameti ruumiandmed, 2025; OpenStreetMap ruumiandmed, 2025.

ja koguseline seisund on hinnatud halvaks (Marandi jt, 2020). Madalad kaitstuse hinnangud nende põhjaveekogumite puurkaevudes on seega ootuspärased ning kinnitavad välja töötatud meetodika korrektset toimimist.

Ehkki puurkaevudel põhineva põhjavee kaitstuse hindamise põhieesmärk oli tulemuste esitamine ruutkaardil, võib ka individuaalsete puurkaevude kaitstuse klasside info olla edaspidi väärtuslik – seda näiteks uutele puurkaevudele sanitaarkaitsealade määramiseks või vajadusel olemasolevate puurkaevude sanitaarkaitsealade suuruse ümberhindamiseks. Suure keskkonnamõjuga otsuste tegemiseks üksikute kaevude kaitstuse hinnangutele tugineda ei saa, sest puurkaevuandmete kvaliteet on üsna kõikuv, ent lisaandmestikuna on see kahtlemata väärtuslik.

Joonis 10 kujutab DRASTIC parameetrite hinnangute ruumilist jaotust puurkaevude kaupa, ning annab korraga ülevaate põhjavee kaitstuse hindamise kaasatud puurkaevude paiknemisest ja sellest, kuidas põhjavee kaitstuse hinnangud välja kujunesid.

3.2 Adaptiivne kaardivõre

Selleks, et puurkaevudele arvatud kaitstuse hinnanguid oleks võimalik kujutada kaardina, loodi adaptiivne, punktihedusel põhinev kaardivõre. Loodud kaardivõrel on 9 tasandit, mis on nummerdatud lähtuvalt nulltasandist, millest võre loomist alustati (512*512 km). Kõige suuremate, 4. tasandi ruumiüksuste pindala on 1024 km², ning kõige väiksemate, 12. tasandi ruumiüksuste pindala on 0,016 km². Kõige rohkem esineb kaardivõres 1 km² ja 4 km² suuruseid üksusi. Kaardivõre loomisel lähtuti eeldusest, et ruutkaarti kasutatakse peamiselt digitaalsel, interaktiivsel kujul, mistõttu jäeti kaardivõresse alles 11. ja 12. tasandi ruumiüksused, mis staatilisel kaardil kujutamiseks on liiga väikesed.

Kaardivõre koosneb 6728 ruudust, millest 1116 ruudus (16,6%) ei asu ühtki andmepunkti ning millele tuli väärtused seetõttu interpoleerida. Keskmiselt asub kaardivõre igas ruudus 3,36 andmepunkti (mediaan 3). Ülevaade adaptiivse kaardivõre tasanditest ning nendel põhinevast statistikast on toodud tabelis 7.

Tabel 7. Adaptiivse kaardivõre tasandid ja statistika.

<i>Tase</i>	<i>Külje pikkus (km)</i>	<i>Pindala (km²)</i>	<i>Keskmine andmetihedus (punkti / km²)</i>	<i>Üksuste arv</i>	<i>Keskmine kaitstuse indeksi standardhälve</i>
4	32	1024	0,003	2	8,9
5	16	256	0,010	34	14,5
6	8	64	0,065	226	17,0
7	4	16	0,239	1394	14,8
8	2	4	0,840	2540	12,7
9	1	1	3,087	1662	9,5
10	0,5	0,25	12,247	615	8,8
11	0,25	0,063	47,635	219	8,1
12	0,125	0,016	195,767	36	6,0

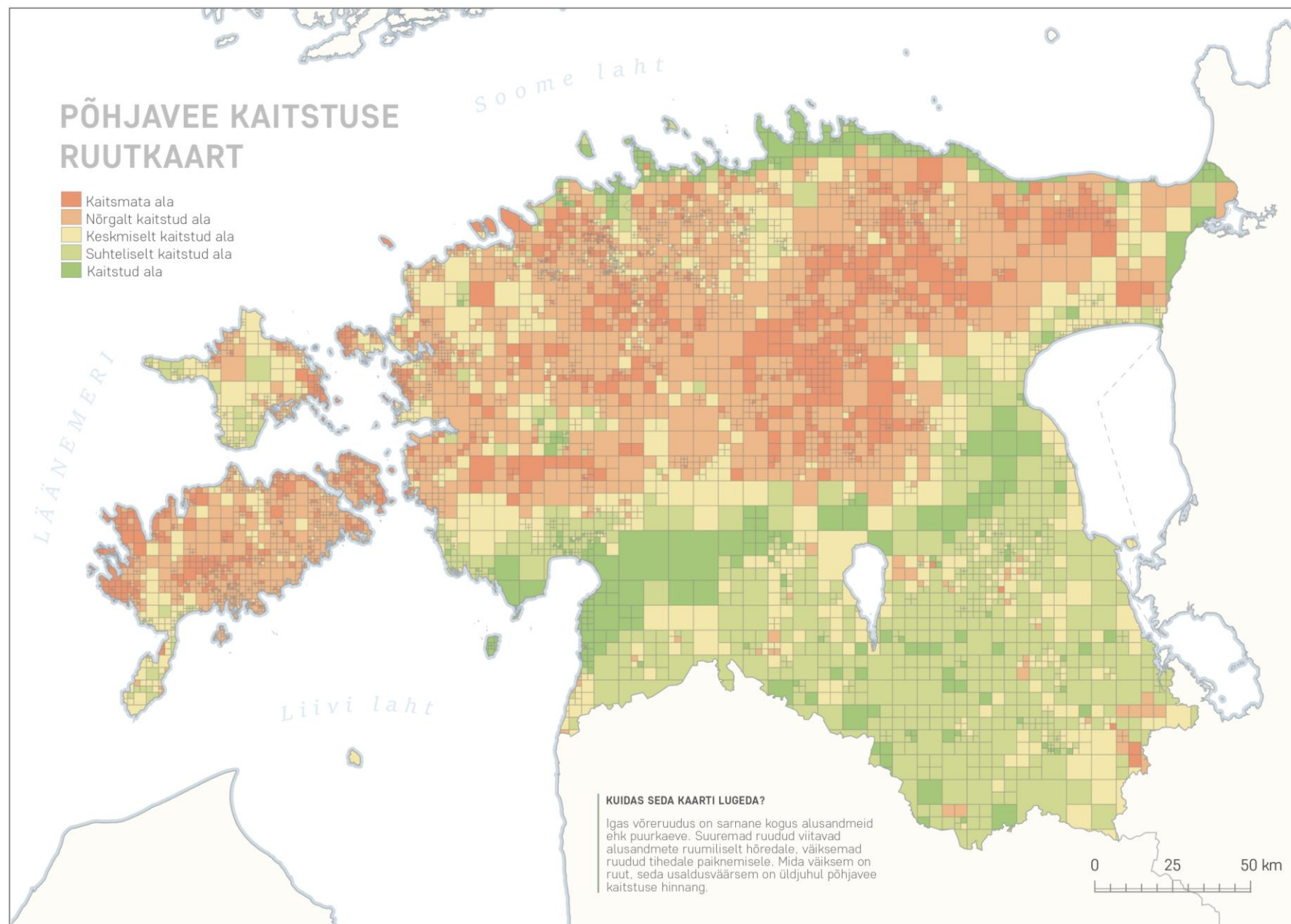
Kui võrrelda keskmisi andmetihedusi võre eri tasanditel 1 : 50 000 geoloogilise baaskaardistamise juhendis nõutud minimaalse andmetihedusega, võib baaskaardi kriteeriumitele vastavaks lugeda tasandid 7 kuni 12, mille puhul on vähemalt iga 9 km² peale üks andmepunkt, mis avab aluspõhja. Kuna väiksem andmetihedus on baaskaardistamise juhendi põhjal aktsepteeritav ulatuslikel sooladel ning enamik suuremaid võreruute asub just seal, võib needki kriteeriumile vastavaks lugeda. Andmetihedust hinnates tuleb arvestada ka sellega, et suurimad võreüksused asuvad Eesti piirialadel ning on Eesti kontuuriga ära lõigatud, mistõttu nende tegelik pindala on võretasandile omasest pindalast palju väiksem ning keskmine andmetihedus seega suurem.

Juhul kui võtta arvesse ka baaskaardi juhendis pinnakattesetete ja põhjavee kaitstuse kaartide jaoks nõutud pinnakatet avavate punktide tihedust – vähemalt üks andmepunkt 0,25 km² kohta –, täidavad andmetiheduse nõuet ainult 10. – 12. taseme ruudud. Võrreldes traditsioonilise põhjavee kaitstuse kaardiga tuleneb puurkaevude tihedusel põhineva ruutkaardi eripära aga sellest, et ruutkaart on tihedam piirkondades, kus tegutseb rohkem inimesi ning mis on seega nii majanduslikus mõttes kui ka põhjavee kaitstuse ja kaitse kontekstis olulisemad. Kuna tagatud on suurem andmetihedus peamistes aktiivse inimtegevusega seotud ehk huvialastes piirkondades, pole kõigi võreüksuste keskmine andmetihedus nii oluline.

Samas esineb tõepoolest piirkondi, kus esimesest aluspõhjalisest põhjaveekihist vett ammutavaid puurkaeve on väga hõredalt, seda kas hõreda asustuse või sügavamatest veekihtidest põhjavee ammutamise tõttu. Adaptiivsel kaardivõrel põhineva kaardi tugevus on see, et põhjavee kaitstuse kaardi loomise ja uuendamise protsess on võimalik täielikult automatiseerida, mis omakorda tähendab seda, et uute puurkaevude lisandumisel andmebaasi muutub kaart järjest täpsemaks. Ruutkaardi interaktiivseks tööriistaks edasi arendamisel võib kasulikuks osutada ka võimalus alusandmete usaldusvääruse hindamiseks võrekeskmiste väärtuste põhjal – näiteks oleks niimoodi võimalik "välja lülitada" kaardiruudud, mille sees pinnakatte parameetri hinnangute standardhälve on liiga suur või kus kaevu keskmine puurimisaasta ei vasta soovitud tingimustele.

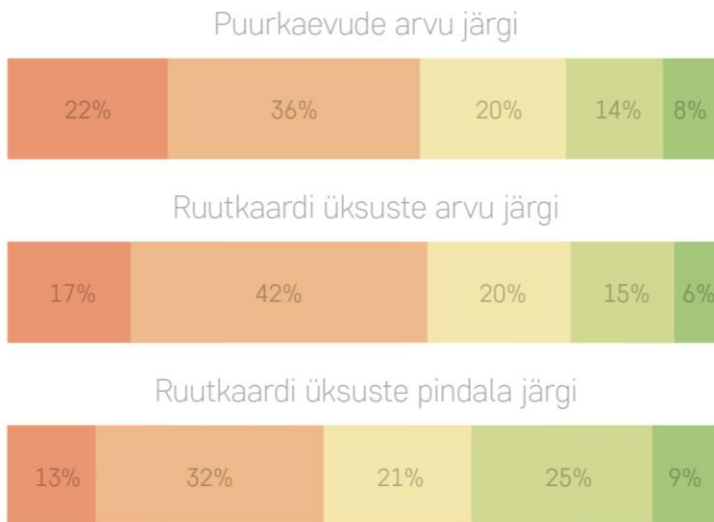
3.3 Üle-eestiline põhjavee kaitstuse ruutkaart

Puurkaevu kaitstuse indekse keskmistamisel ja interpoleerimisel kaardivõresse valmis üle-eestilise katvusega kaitstuse ruutkaart (joonis 11). Ootuspäraselt asuvad kõige parema põhjavee kaitstusega alad regionaalsete veepidemete avamustel, veepidemete all. Lõuna-Eestit kirjeldab suhteliselt hea kaitstus, Põhja-Eestit ja saari aga keskmine ja nõrk kaitstus, kusjuures kaitsmata aladena eristuvad selgelt ka nitraaditundlikud alad.



Joonis 11. Põhjavee kaitstuse ruutkaart. Aluskaart: Maa-ameti ruumiandmed, 2025; OpenStreetMap ruumiandmed, 2025.

PÕHJAVEE KAITSTUSE KLASSIDE OSAKAAL



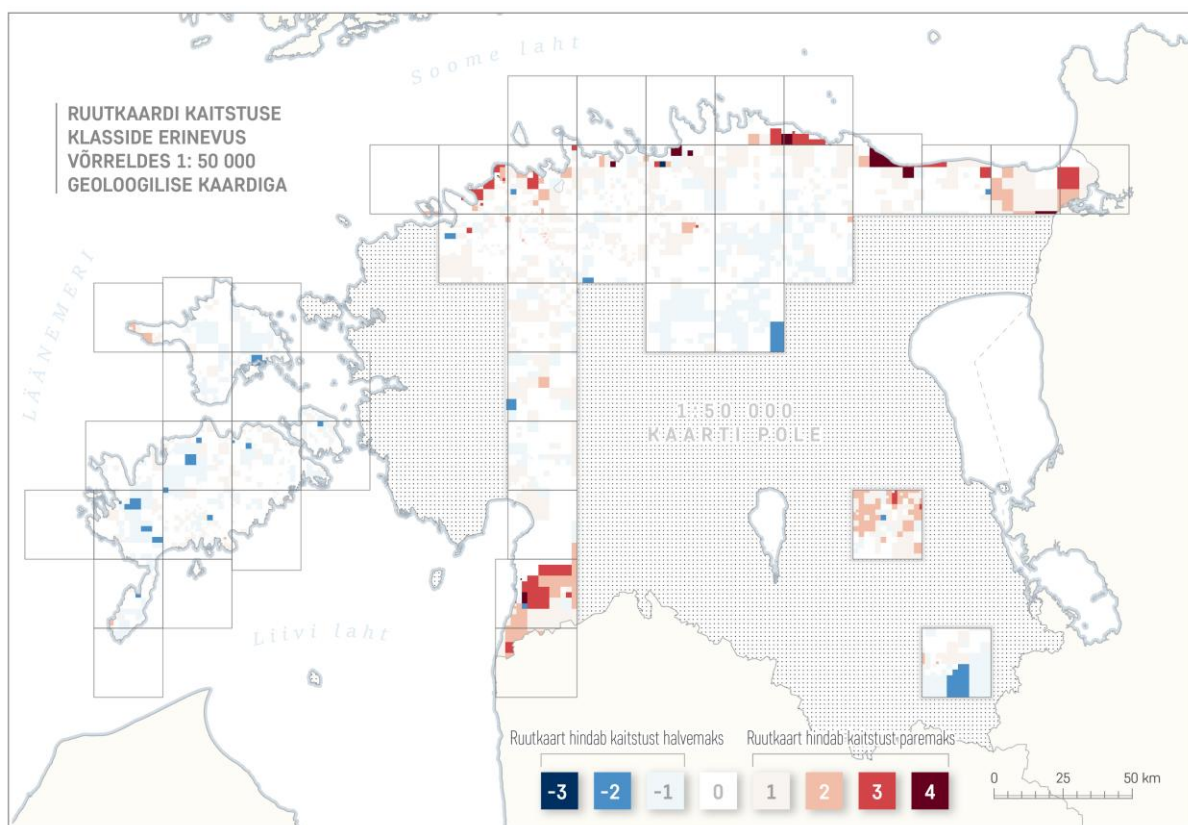
Joonis 12. Põhjavee kaitstuse klasside osakaal puurkaevude arvu, ruutkaardi üksuste arvu ning ruutkaardi üksuste pindala järgi.

Võrreldes puurkaevude kaitstuse klasside jaotumisega on pindalaline kaitstuse klasside jaotus palju võrdsem: 13% aladel on esimene aluspõhjaline veekompleks kaitsmata, 32% nõrgalt kaitstud, 21% keskmiselt kaitstud, 25% suhteliselt kaitstud ning 9% kaitstud (joonis 12).

Tulemused kinnitavad taaskord, et puurkaevud – ja koos nendega ka inimesed – paiknevad Eestis pigem halvema loodusliku kaitstusega piirkondades; puurkaevupõhiste hinnangute puhul on kaitstuse klasside ebavõrdne jaotus seega loogiline. Kaitstuse ruutkaardi puhul võib aga esitada küsimuse, miks kaitsmata ja nõrgalt kaitstud alasid esineb Eestis pindalaliselt rohkem kui suhteliselt kaitstud ja kaitstud alasid. On võimalik, et selline kaitstuse klasside jaotus peegeldabki tõetruult Eesti põhjavee kaitstuse mustreid. Kuna kaitstuse indeksid jagati väärtusvahemikeks ja klassideks lähtuvalt võimalikust heast kattuvusest 1 : 50 000 põhjavee kaitstuse kaardiga, on võimalik ka see, et nõrgalt kaitstud alade klassi väärtusvahemikku hinnati vajalikust veidi laiemaks – katab 1 : 50 000 kaart ju peaaesjalikult vaid Põhja-Eesti, kus levivad eelkõige kaitsmata ja nõrgalt kaitstud alad – ning tegelikult peaksid hinnangud olema tasakaalus. Siinkohal on oluline, et kaitstuse indeksid ja klassid on suhtelised, kontseptuaalsed väärtused, mistõttu peaks klasside moodustamine sõltuma analüüsi eesmärgist.

3.3.1 Võrdlus olemasolevate põhjavee kaitstuse kaartidega

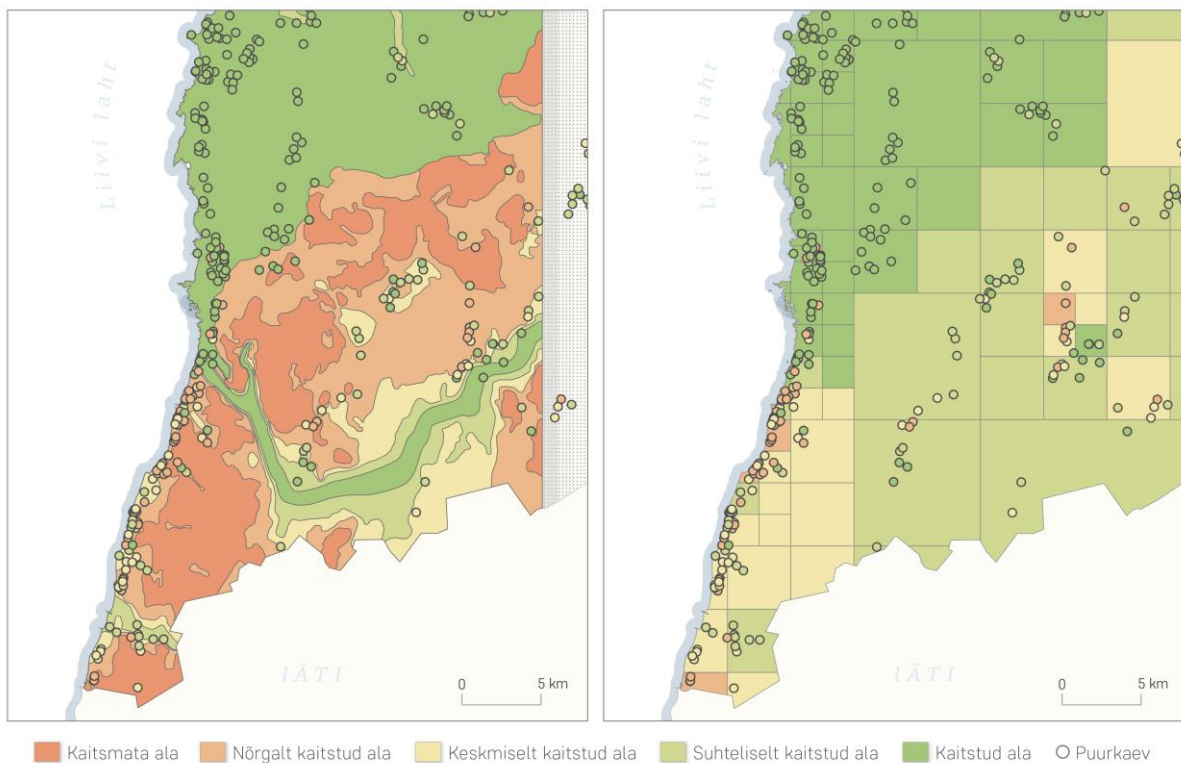
Põhjavee kaitstuse ruutkaarti võrreldi kolme erineva meetodika, katvuse ja vanusega põhjavee kaitstuse kaardiga: 1 : 50 000 mõõtkavas põhjavee kaitstuse baaskaart, 1 : 400 000 mõõtkavas põhjavee kaitstuse kaart ning 1 : 200 000 mõõtkavas Eesti-Läti piiriala põhjavee kaitstuse kaart. Tulemuste analüüsil lähtuti eelkõige erinevustest 1 : 50 000 kaitstuse kaardiga, kusjuures kaitstuse klasside erinevuse analüüsil keskenduti ainult sellistele piirkondadele, kus kaitstuse hinnang erines vähemalt kahe klassi võrra. Meetodilistest erinevustest lähtuvalt ei peetud ühe klassi piires kõikumist – näiteks sellises olukorras, kui ühel kaardil oli ala kaitstuse klass ”keskmiselt kaitstud” ning teisel ”suhteliselt kaitstud” – oluliseks.



Joonis 13. Ruutkaardi ja 1 : 50 000 põhjavee kaitstuse baaskaardi võrdlus. Punaste toonidega on kujutatud need alad, mille kaitstust puurkaevuandmete põhjal koostatud ruutkaart hindab baaskaardi omast paremaks, sinistes toonides halvemaks. Aluskaart: Maa-ameti ruumiaandmed, 2025; OpenStreetMap ruumiaandmed, 2025.

Joonisel 13 on kujutatud ruutkaardi ning 1 : 50 000 põhjavee kaitstuse kaardi võrdluse tulemus. Kaitstuse klasside kattuvus kahe kaardi vahel oli järgmine: 48,7% aladest olid sama kaitstuse klassiga, 88,1% aladest jäid ühe klassi erinevuse piiresse, ning 96% aladest kahe klassi erinevuse piiresse. Pearsoni korrelatsioonikoeffitsient oli $r = 0,63$ ning Spearmani korrelatsioonikoeffitsient oli $\rho = 0,59$. Arvestades nii alusandmestiku kui ka kaardistamise meetodika erisustega ning kaartide võrdlemisel kasutatud üldistava meetodikaga võib selliseid tulemusi pidada heaks. Puurkaevupõhise meetodika üldiselt head toimivust kinnitab ka kaardivisuaal, ent samuti torkavad kaardilt silma mõned piirkonnad, kus ruutkaardi kaitstuse hinnangud erinevad oluliselt baaskaardi omadest.

Üks selline piirkond asub baaskaardi Ikla ja Häädemeeste kaardilehtedel (joonis 14) – seal hindab ruutkaart põhjavee kaitstust baaskaardist oluliselt paremaks. Vaadates lisaks kaitstuse kaartidele ka ruutkaardi loomisel alusandmetena kasutatud puurkaevude ruumilist paiknemist ning puurkaevudele endile määratud põhjavee kaitstuse klasse, on üsna selge, et kahe kaardi vaheline erinevus tuleneb ruutkaardi iseloomust. Puurkaevude asukohad kattuvad ka baaskaardil paremini kaitstud aladega, kuid neid alasid ümbritsevad väga õhukese pinnakattega alad, kus ei paikne mitte ühtki puurkaevu ning mida seetõttu pole võimalik ruutkaardi loomisel arvesse võtta. Kuna tühjadele võreruutudele tuleb kaitstus interpoleerida ja kaitsmata aladel selles piirkonnas kaevusid ei paikne, interpoleeritakse väärtused lähimate, keskmiselt kuni kaitstud kaevude põhjal ning ala kujuneb suhteliselt kaitstuks.



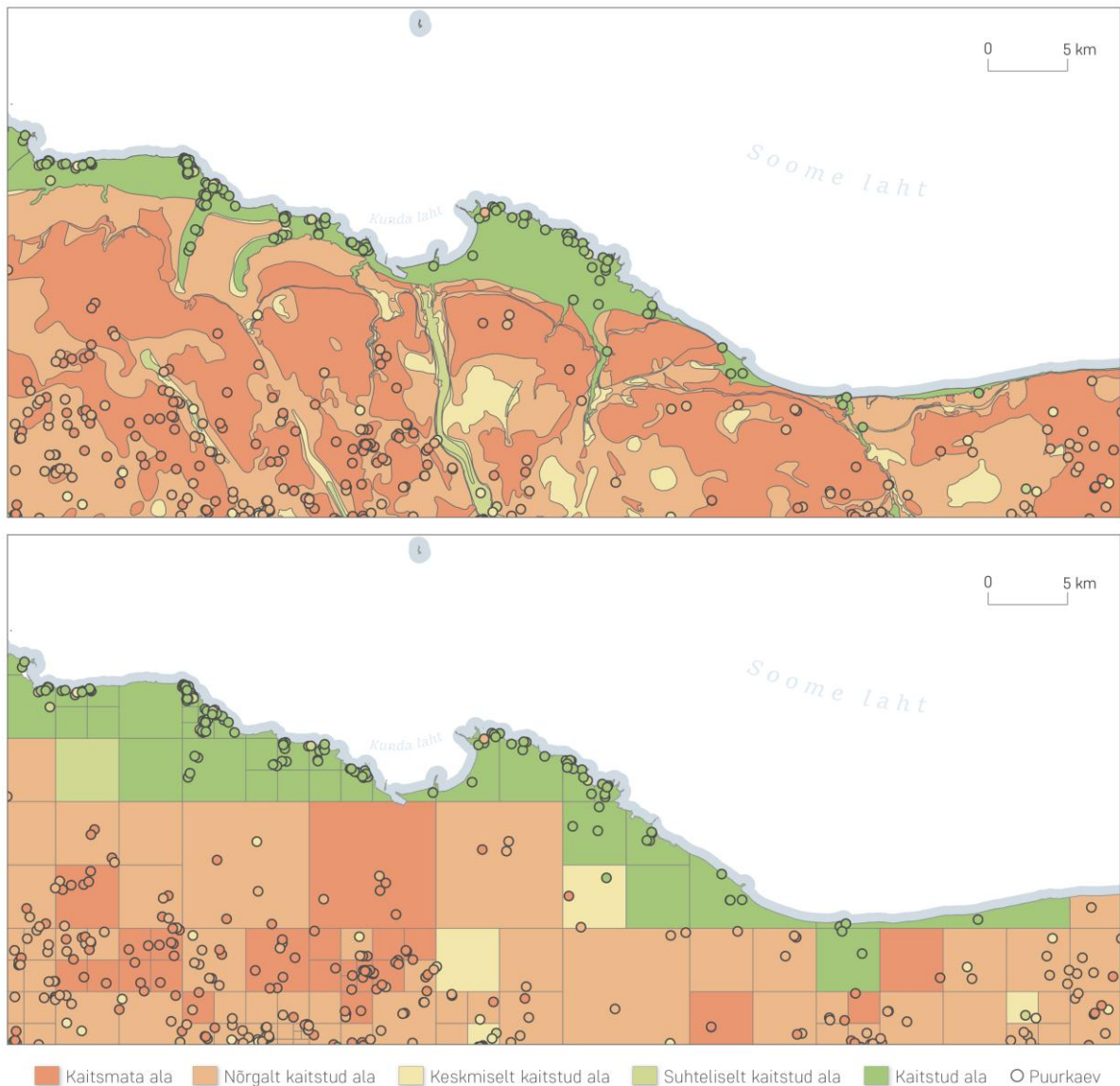
Joonis 14. 1 : 50 000 põhjavee kaitstuse baaskaardi (vasakul) ja kaitstuse ruutkaardi (paremal) võrdlus Häädemeeste piirkonnas. Aluskaart: Maa-ameti ruumiandmed, 2025; OpenStreetMap ruumiandmed, 2025.

Niisiis tulenevad erinevad kaitstuse hinnangud selles piirkonnas valitud visualiseerimismeetodi, adaptiivse ruutkaardi iseloomust. Kuna ruutkaardi ruudud on loodud tehnilikult, ilma looduses jooksvaid piire järgimata, ning ruumiüksused on andmetihedusest tulenevalt erineva suurusega, ei suuda need alati väärtuste kaudu looduslikke piire imiteerida. Ruutkaardi võre on tihe seal, kus on palju andmepunkte, ning mida tihedam on kaardivõre, seda paremini saab see järgida hüdrogeoloogilisi või muid looduslikke piire. Väikese andmetihedusega aladel ei suuda väga suured võreüksused aga looduslikke üleminekuid ära kirjeldada.

Selle, elementaarüksuste probleemi klassikalise näite lahendamiseks tuleks andmestikku lisada uusi andmepunkte – mis on uute puurkaevude lisandumisel välja töötatud meetodikaga lihtne, ent mida madala inimtegevusega piirkondades tõenäoliselt ei juhtu. Lihtsaim viis vähendada

ruutkaardi valesti tõlgendamise võimalust on interaktiivse kaardirakenduse välja töötamise korral kuvada ühes ruutkaardiga ka kõigi kasutatud puurkaevude asukohad.

Ka Põhja-Eesti rannikul tingib puurkaevude ebahühtlane paiknemine erinevused ruutkaardi ja baaskaardi vahel (joonis 15). Vahetult mere ääres asuvad, veepideme alt vett ammutavad kaitstud kaevud avaldavad interpolatsiooni kaudu mõju neile lähedal asuvatele tühjadele võreruutudele, mis baaskaardi järgi võiksid kuuluda hoopis nõrgalt kaitstud või kaitsmata alade hulka.



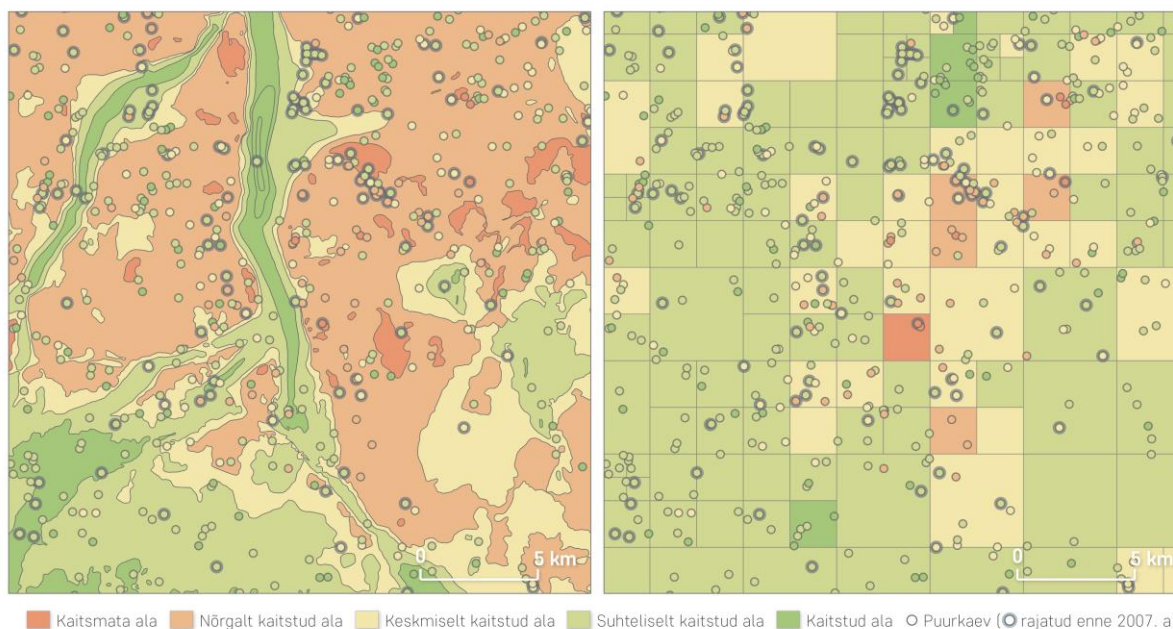
Joonis 15. 1 : 50 000 põhjavee kaitstuse baaskaardi (ülal) ja kaitstuse ruutkaardi (all) võrdlus Põhja-Eesti rannikul, Kunda piirkonnas. Aluskaart: Maa-ameti ruumiandmed, 2025; OpenStreetMap ruumiandmed, 2025.

Klindieelsel alal ja klindil toimuvad järsud geoloogilised muutused, sest lubjakivide avamus vahetub liivakivide avamusega ning seetõttu muutub ka esimene aluspõhjaline veekompleks. See tähendab, et kui ruutkaart annab kaitstusele hinnangu klindi all asuvate puurkaevude põhjal, aga ruutkaardi ruut katab ka klindist ülespoole jäävat ala, siis antakse sellele alale kaitstuse hinnang teise veekihi põhjal. Mida suurem on sellistel aladel andmetihedus, seda

paremini suudab kaart järgida tegelikke hüdrogeoloogilisi piire, ent selles piirkonnas tingib puurkaevude kohati hõre paiknemine geoloogilisel üleminekualal vale kaitstuse hinnangu. Ruutkaardi edasiarendamise korral tuleb põhjalikult läbi mõelda, kuidas selliste komplekssete geoloogiliste situatsioonidega kaardil arvestada või kas teatud – näiteks klindialused – alad peaksid jääma ruutkaardilt täiesti välja.

Kui Häädemeestes ja Põhja-Eesti Kunda piirkonnas esinevad ruutkaardi ja baaskaardi vahelised kaitstuse hinnangute erinevused on põhjendatavad adaptiivse kaardivõre kasutamisega, siis Tartu piirkonna erinevused ei näi tulenevat ruutkaardist, vaid hoopis alusandmestikust või puurkaevupõhisest kaitstuse hindamise meetodikast.

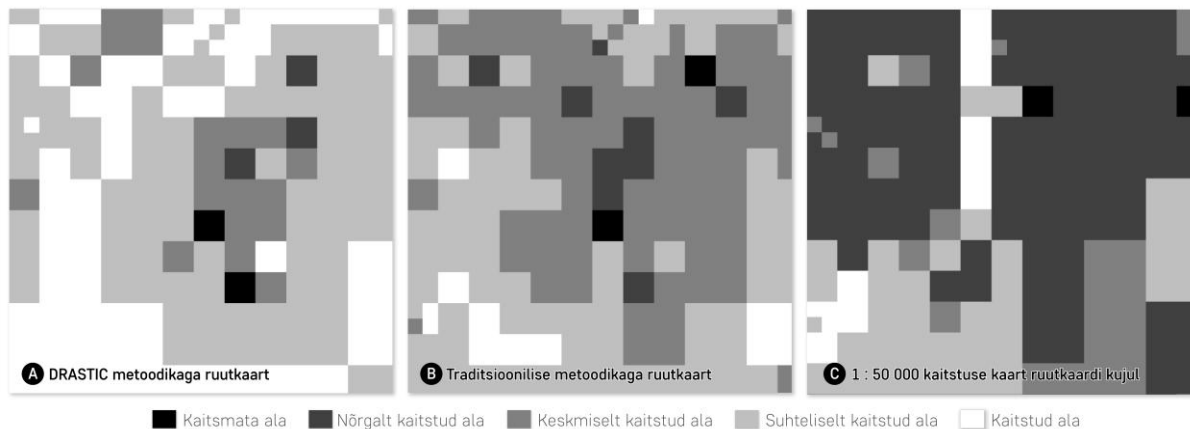
Joonisel 16 on eraldi esile tõstetud need puurkaevud, mis on puuritud enne Tartu kaardilehe valmimist 2007. aastal ehk teisisõnu, mida kaardistajail oli võimalik kaitstuse kaardi tegemisel arvesse võtta. Enne 2007. aastat rajatud puurkaevud moodustavad Tartu kaardilehel 37% kõigist puurkaevudest, mis tähendab, et ruutkaardi loomisel on võetud kasutusele umbes kolm korda rohkem puurkaevude andmeid. Ehkki baaskaardistamisel polnud tegu ainsa andmestikuga, oli see põhiandmestik (Perens jt, 2007). Tähelepanuväärne on see, et ka enne 2007. aastat rajatud puurkaevude kaitstuse hinnangud ei klapi kuigi hästi baaskaardiga. On võimalik, et puurkaevupõhine kaitstuse hindamise meetodika või Eestile kohandatud DRASTIC meetodika oma tavakujul (Männik jt, 2023) ei tööta Lõuna-Eestis võrdväärselt hästi muude piirkondadega.



Joonis 16.1 : 50 000 põhjavee kaitstuse baaskaardi (vasakul) ja kaitstuse ruutkaardi (paremal) võrdlus Tartu kaardilehel. Kaardilehe ulatus on toodud joonisel 1. Joonisel on eraldi esile tõstetud enne 2007. aastat (enne Tartu piirkonna kaardi valmimist) rajatud puurkaevud. Aluskaart: Maa-ameti ruumiandmed, 2025; OpenStreetMap ruumiandmed, 2025.

Saamaks teada, kas Tartu piirkonnas esivad erinevused tulevad meetodika halvemast toimimisest Lõuna-Eestis, koostati võrdluseks veel üks kaardikiht – põhjavee kaitstuse ruutkaart, mis ei kasuta kaitstuse hindamisel DRASTIC meetodikat, vaid lähtub seaduses defineeritud pinnakattesetete paksusest ja tüübist (tabel 1, lk 13). Selliselt koostatud kaardikiht

kasutab küll uusi andmeid, ent vana meetodikat. Võimalus rakendada kaitstuse hindamiseks peale DRASTIC-u efektiivselt ka muid meetodikaid on magistritöö käigus loodud töövoogu tugevus. Kolme kaardi võrdlus lihtsustatud, ühtsele alusele viidud kujul on joonisel 17.



Joonis 17. Põhjaveekaitstus Tartu kaardilehel kolme erineva meetodiga. Võrdlemise lihtsustamiseks on kasutatud mustvalget värviskeemi ning 1 : 50 000 põhjavee kaitstuse baaskaart viidud ruutkaardi kujule.

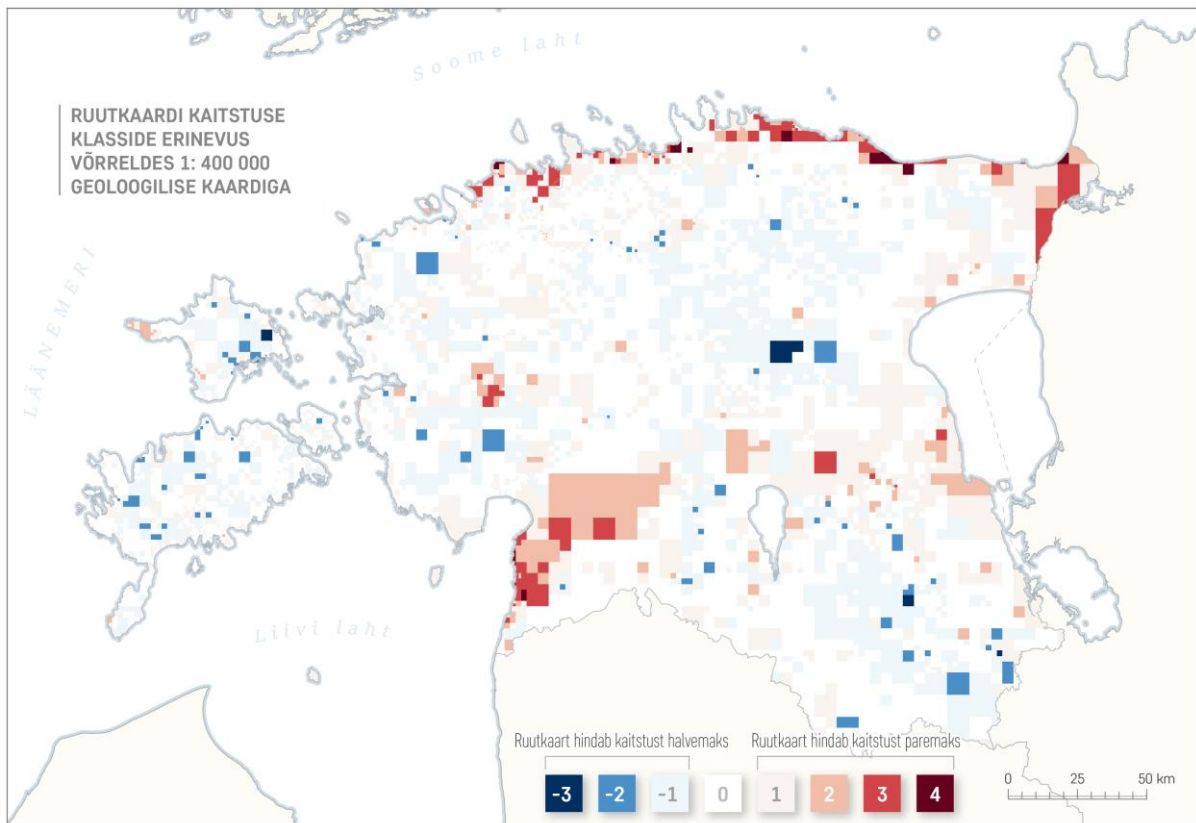
Erinevused joonise 17 paneelide A ja B vahel illustreerivad täies ulatuses meetodilist erinevust puurkaevupõhise DRASTIC meetodika ja traditsioonilise kaitstuse kaardistamise meetodika vahel. Kuna mõlemad kaardid tuginevad täpselt samale alusandmestikule, tulenevad erinevused ainult sellest, milliseid parameetreid kaitstuse hindamiseks kasutati. Paneel A puhul on arvesse võetud seitset, paneel B puhul kaht parameetrit, kusjuures DRASTIC meetodikaga hinnatakse kaitstust Tartu piirkonnas paremaks kui traditsioonilise meetodikaga. Traditsioonilise meetodika puhul võetakse arvesse pinnakattesetete paksust ja tüüpi, ning kuna Tartus on pinnakattesetete paksus kohati väike, hinnatakse suurem osa Tartu kaardilehest keskmiselt kaitstuks. DRASTIC meetodika puhul antakse neile parameetritele küll samamoodi kõrge hinnang, ent kaitstuse lõpphinnangut mõjutavad ka teised, madalate hinnangutega parameetrid nagu survetase ja netoinfiltratsioon.

Erinevused paneelide B ja C vahel tulenevad seevastu peaaegu täies ulatuses erinevast lähteandmestikust (sh alusandmete paiknemisest) ning kaardistaja subjektiivsete hinnangute puudumisest paneelil B. Suuri erinevusi põhjustavad pinnakattesetete paksuse erinevused puurkaevude läbilõigetel ja pinnakattekaardil – puurkaevude läbilõigetel on pinnakattesetete paksust üsna ühtlaselt hinnatud palju suuremaks kui pinnakatte paksuse kaardil.

Kolme kaardikihi võrdluse põhjal võib väita, et erinevused ruutkaardi ja baaskaardi kaitstuse hinnangutes ei tulene suure tõenäosusega mudeli halvemast toimimisest Lõuna-Eestis – kui põhjus seisneks selles, oleks sama meetodika alusel loodud kaardid (paneelid B ja C) omavahel sarnasemad. Pigem tulenevad erinevused ruutkaardi ja baaskaardi vahel erinevast kaardistamise ajast, pisut teistsugusest alusandmestikust, kaitstuse hindamisel arvesse võetud hüdrogeoloogiliste parameetrite arvust ning kaardistaja subjektiivsest panusest või selle puudumisest.

Võrdlus 1 : 400 000 kaardiga viidi läbi eesmärgiga tuvastada sellised piirkonnad, kus põhjavee kaitstuse hinnang erineb ruutkaardi omast oluliselt nii baaskaardil kui ka 1 : 400 000 kaardil. Sellistena tulevad kaardilt (joonis 18) välja nii Häädemeeste kui ka Põhja-Eesti klindiala – see

viitab taaskord vajadusele arvestada adaptiivse ruutkaardi kui visualiseerimisvahendi eripäragna ning võtta kasutusele lisameetmed, et neis piirkondades kaardi vale tõlgendamise ohtu vähendada, näiteks kuvades kaardil ka alusandmepunktide paiknemine. Tartu piirkonnas selle võrdluse põhjal nii suuri erinevusi ei esine, küll aga kerkivad erinevuste poolest esile Narva ja Pärnu piirkond. Narva puhul tuleneb hinnangute erinevus alusandmete klasterduvast paiknemisest, Pärnu piirkonnas põhjustab erinevusi aga erinev meetodika. Nimelt ei käsitletud 1 : 400 000 kaardi koostamisel Narva regionaalse veepideme avamust kui automaatselt kaitstud ala, vaid anti sellele hinnang pinnakattesetete tüübist ja paksusest lähtuvalt (Perens, 2001).

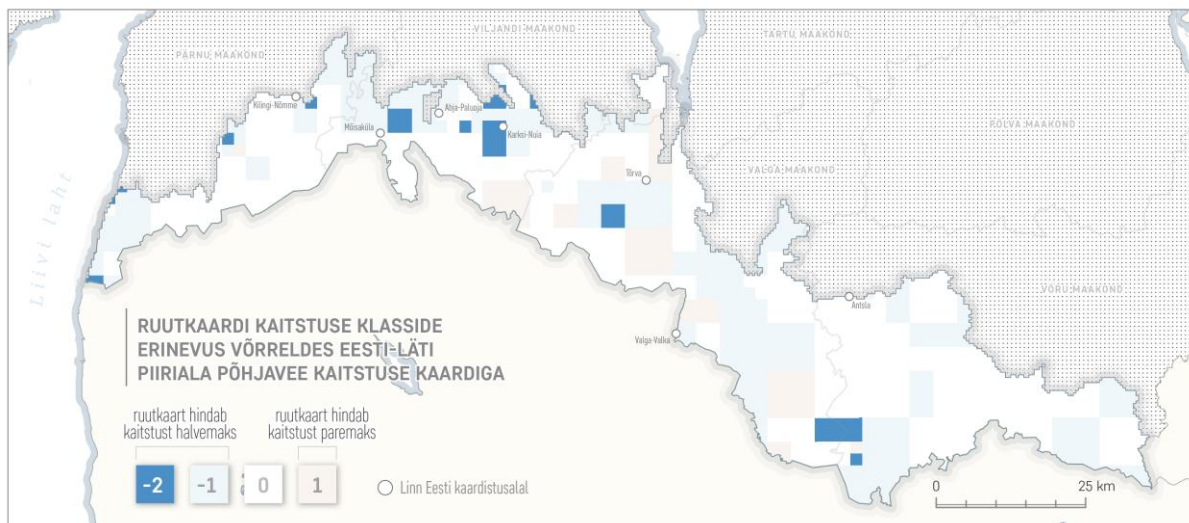


Joonis 18. Ruutkaardi ja 1 : 400 000 põhjavee kaitstuse kaardi võrdlus. Punaste toonidega on kujutatud need alad, mille kaitstust puurkaevuandmete põhjal koostatud ruutkaart hindab 1 : 400 000 kaardi omast paremaks, sinistes toonides halvemaks. Aluskaart: Maa-ameti ruumiaandmed, 2025; OpenStreetMap ruumiaandmed, 2025.

Ainuüksi ruutkaardi ja väikesemõõtkavalise põhjavee kaitstuse kaardi võrdluse põhjal ei saaks mudeli kohta teha kuigi põhjanevaid järeldusi, ent tugiandmekihina on see väärtuslik. Võrdlus on oluline ka seetõttu, et 1 : 400 000 kaitstuse kaart on siiani ainus üle-eestilise ulatusega kaart ning seega ainuke võimalus tulemuste valideerimiseks aladel, kuhu kaitstuse baaskaart ei ulatu. Kuna parema andmeallika puudumisel tehakse siiani mõningaid keskkonnaalaseid otsuseid 1 : 400 000 kaardist lähtuvalt (Keskkonnaamet, 2025), aitab võrdluskaart mõista ka seda, kuidas muutuksid hinnangud selle alternatiivina või sellega paralleelselt ruutkaarti kasutades.

Võrdlus Eesti-Läti piiriala põhjavee kaitstusega kaardiga, mis on ainus digitaalsel kujul kättesaadav DRASTIC meetodikat kasutav kaart Eesti ala kohta, näitab kaitstuse hinnangute suhteliselt head ühtivust (joonis 19) – sarnase meetodika ja alusandmestiku kasutamise tõttu on see ootuspärane. Siiski on kaardil piirkondi, kus kaitstuse hinnangud erinevad kahe klassi

võrra, kusjuures ruutkaart hindab kaitstust võrreldes piiriala kaardiga madalamaks. See on märkimisväärne erinevus võrdluses 1 : 50 000 kaardiga, mille puhul Häädemeeste ja Ikla kaardilehel hinnati kaitstust hoopis oluliselt kõrgemaks. Ehkki väikese katvusega, on piiriala kaart oluline tulemuste valideerimiseks nendes Lõuna-Eesti piirkondades, kuhu suuremõtkavaline kaart veel ei ulatu.



Joonis 19. Ruutkaardi ja EU-Waterres projekti käigus valminud Eesti-Läti piiriala põhjavee kaitstuse kaardi võrdlus. Punaste toonidega on kujutatud need alad, mille kaitstust suurkaevuandmete põhjal koostatud ruutkaart hindab piiriala kaardi omast paremaks, sinistes toonides halvemaks. Aluskaart: Maa-ameti ruumiandmed, 2025; OpenStreetMap ruumiandmed, 2025.

3.4 DRASTIC parameetrite tundlikkusanalüüs

Töö osana viidi läbi DRASTIC parameetrite varieeruvuse statistiline analüüs, kontrolliti parameetrite omavahelist korrelatsiooni ning viidi läbi kaht tüüpi tundlikkusanalüüsid. Iga etapi tulemused on toodud kahe tabelina, millest üks on terve Eesti ülevaattetabel, teine aga võrdleb karbonaatsete põhjaveekomplekside ja liivakivide põhjaveekomplekside tulemusi. Üle-eestilised tabelid on toodud Lisas 1.

Spearmani korrelatsioonianalüüs DRASTIC parameetrite vahel näitas, et nõrk, ent statistiliselt oluline korrelatsioon esineb peaaegu kõigi parameetrite vahel. Suurte andmemahutude korral on selline tulemus ootuspärane ega oma sisulist tähendust, juhul kui korrelatsioonikoefitsiendid jäävad madalaks. Erandiks on survetaseme (D) ja pinnakatte paksuse (I) parameetrite vaheline seos korrelatsioonikoefitsiendiga $\rho = 0,75$. Tugev positiivne korrelatsioon võib viidata võimalusele prognoosida põhjavee survetaseme parameetri väärtusi piirkondades, kus mingil põhjusel puuduvad staatilise veetaseme andmed survetaseme arvutamiseks.

Tabel 8. Statistika DRASTIC parameetrite hinnangute ja nende varieeruvuse kohta, karbonaatsete kivimite veekompleksid (KK) võrdluses liivakivide veekompleksidega (LK).

Parameeter	Madalaim hinnang		Kõrgeim hinnang		Keskmine hinnang		Standardhälve		Variatsiooni-kordaja (%)	
	KK	LK	KK	LK	KK	LK	KK	LK	KK	LK
D	1	1	10	10	4,1	2,3	2,8	2,6	67,8	114,2
R	1	1	6	6	1,3	1,7	0,7	1,0	53,6	61,5
A	9	3	10	7	9,4	6,1	0,5	1,7	5,1	20,2
S	1	1	10	10	6,6	5,9	1,7	2,4	25,5	39,9
T	1	4	10	10	8,3	7,6	1,0	1,3	12,2	17,6
I	1	1	10	10	7,4	3,9	2,2	2,4	29,6	60,9
C	1	1	8	4	2,6	1,7	1,4	0,5	55,5	31,1

Statistiline ülevaade DRASTIC parameetrite hinnangutest on esitatud tabelis 8. Üheks olulisemaks näitajaks selliste parameetrite kontekstis on variatsioonikordaja, mis väljendab, kui võrd suur on andmete suhteline hajuvus. Suurima hajuvusega parameeter oli nii karbonaatsete kui ka liivakivimite komplekside puhul põhjavee survetaseme parameeter (D). Põhjavee survetaseme väärtuste suur hajuvus on loogiline, sest tegu on lokaalsetest (hüdro)geoloogilistest tingimustest sõltuva parameetriga. See tulemus on kooskõlas ka Eestis varasemalt läbiviidud tööga (Männik jt, 2023), kusjuures Rapla ja Võru kaardilehtede statistilisel võrdlusel esines Männik jt töös survepinna parameetri hinnangute suurem hajuvus samuti Lõuna-Eestis, liivakivide veekompleksi avamusel. Kõrge variatsioonikordajaga on karbonaatsete kivimite veekomplekside avamusel ka filtratsioonimooduli ja netoinfiltratsiooni väärtus, liivakivide veekompleksi puhul pinnakatte paksuse ja netoinfiltratsiooni väärtus.

3.4.1 Tundlikkus DRASTIC parameetrite eemaldamisele (MRSA)

Tabel 9. MRSA tulemused DRASTIC parameetrite ühekaupa eemaldamisel.

Eemaldatud parameeter	Variatsiooniindeks (%)									
	Madalaim		Kõrgeim		Keskmine		Standardhälve		Mediaan	
	KK	LK	KK	LK	KK	LK	KK	LK	KK	LK
D	0,0	0,0	5,0	5,4	1,2	1,4	0,5	0,6	1,2	1,4
R	0,0	0,0	2,1	4,9	1,8	1,2	0,3	0,7	1,9	1,5
A	0,0	0,0	5,8	6,1	1,1	1,0	0,9	0,9	0,9	0,7
S	0,0	0,0	4,8	6,8	1,7	3,0	0,7	1,4	1,5	3,4
T	0,0	0,0	2,4	2,0	1,3	1,0	0,3	0,4	1,4	1,0
I	0,0	0,0	4,4	5,3	2,0	1,4	0,7	1,0	2,1	1,4
C	0,0	0,1	2,1	2,1	1,5	1,5	0,5	0,4	1,6	1,4

Tundlikkus parameetrite ühekaupa eemaldamisele näitab, kui palju muutuksid vaadeldavas piirkonnas kaitstuse hinnangud siis, kui eemaldada mudelist üks parameeter ning arvutada kaitstuse indeks ülejäänud kuuest parameetrist lähtuvalt. Mida kõrgem on variatsiooniindeks, seda suurem muutus kaasneks kaardipildis parameetri eemaldamisega (Lodwick jt, 1990). Väike variatsiooniindeks seevastu viitab sellele, et kuigi parameeter on teoreetiliselt oluline, mõjutab see hinnangut vähe – sageli seetõttu, et selle väärtused on ruumiliselt ühtlased ning toimivad mudelis sisuliselt nagu konstant.

MRSA tulemused – toodud tabelis 9 – näitasid, et kõige suuremat mõju avaldaks kaitstuse kaardile pinnakatte omaduste parameetri (S) eemaldamine liivakivide veekompleksi avamusel ning pinnakatte paksuse (I) parameetri eemaldamine karbonaatsete kivimite veekompleksi avamusel. Nimetatud tulemused on kooskõlas Männik jt (2023) tööga ning kinnitavad varasemat teadmist Eesti piirkondliku geoloogia mõjust parameetrite tähtsusele. Karbonaatsete kivimite veekompleksi avamuse puhul mängivad kaardipildi kujunemises suurt rolli ka netoinfiltratsiooni ja pinnakatte omaduste parameetrid. Liivakivide veekompleksi alal domineerib selgelt ainult pinnakatte omaduste parameeter. Filtratsioonimoodul, pinnakatte paksus ja põhjavee survetase mängivad seal keskmise tähtsusega rolli. Põhjavee survetase, millel on kõrge variatsioonikordaja ja suur teoreetiline kaal, ei mõjutanud kaardipilti ootuspäraselt palju, eriti karbonaatsete kivimite veekompleksi avamusel. See võib olla osaliselt seletatav survetaseme ja pinnakatte paksuse vahelise korrelatsiooniga.

Väikseimat mõju põhjavee kaitstuse kaardi kujunemisele omab mõlema veekompleksi tüübi lõikes põhjavee kihi omaduste parameeter (A). A parameetri väike mõju tuleneb tõenäoliselt peaaegu terve Eesti lõikes ühtlaselt kõrgetest parameetri hinnangutest, mis omakorda sõltub kasutatud alusandmestikust ja väärtusklasside moodustamise põhimõttest. Ehkki üle-eestilisel skaalal on A parameetri mõju väike, esineb mitu põhjaveekogumit (Kambriumi-Vendi Voronka, Kambriumi-Vendi, Siluri–Ordoviitsiumi Pärnu põhjaveekogumid), kus A parameeter on üks olulisim kaardipildi mõjutaja. Asjaolu, et eri piirkondades mõjutavad kaardipildi kujunemist erinevad parameetrid, viitab sellele, et kõik seitse DRASTIC parameetrid on Eestis kaitstuse hindamise seisukohast olulised ning ühe parameetri eemaldamine üle-eestilisest mudelist võib kaasa tuua olulise täpsuse kaotuse nendes piirkondades, kus just eemaldatud parameeter on määrava kaaluga. Niisiis – ehkki üle-eestilisel skaalal võib mõne parameetri mõju kaardipildi kujunemisele marginaalne, mängib iga parameeter olulist rolli vähemalt mõnes piirkonnas ja on seega väärtuslik.

3.4.2 DRASTIC parameetrite tegelik kaalukus (SPSA)

Kui parameetrite ühekaupa eemaldamine aitab mõista, kas ja millised parameetrid võivad olla metodoloogiliselt üleliigsed, siis parameetrite tegelik kaalukus iseloomustab seda, kui suur on iga parameetri roll kaitstuse indeksi väljakujunemisel. Mida suurem on parameetri teoreetiline kaal ja mida kõrgemad on parameetri keskmised väärtused, seda suurem on parameetri tegelik kaal.

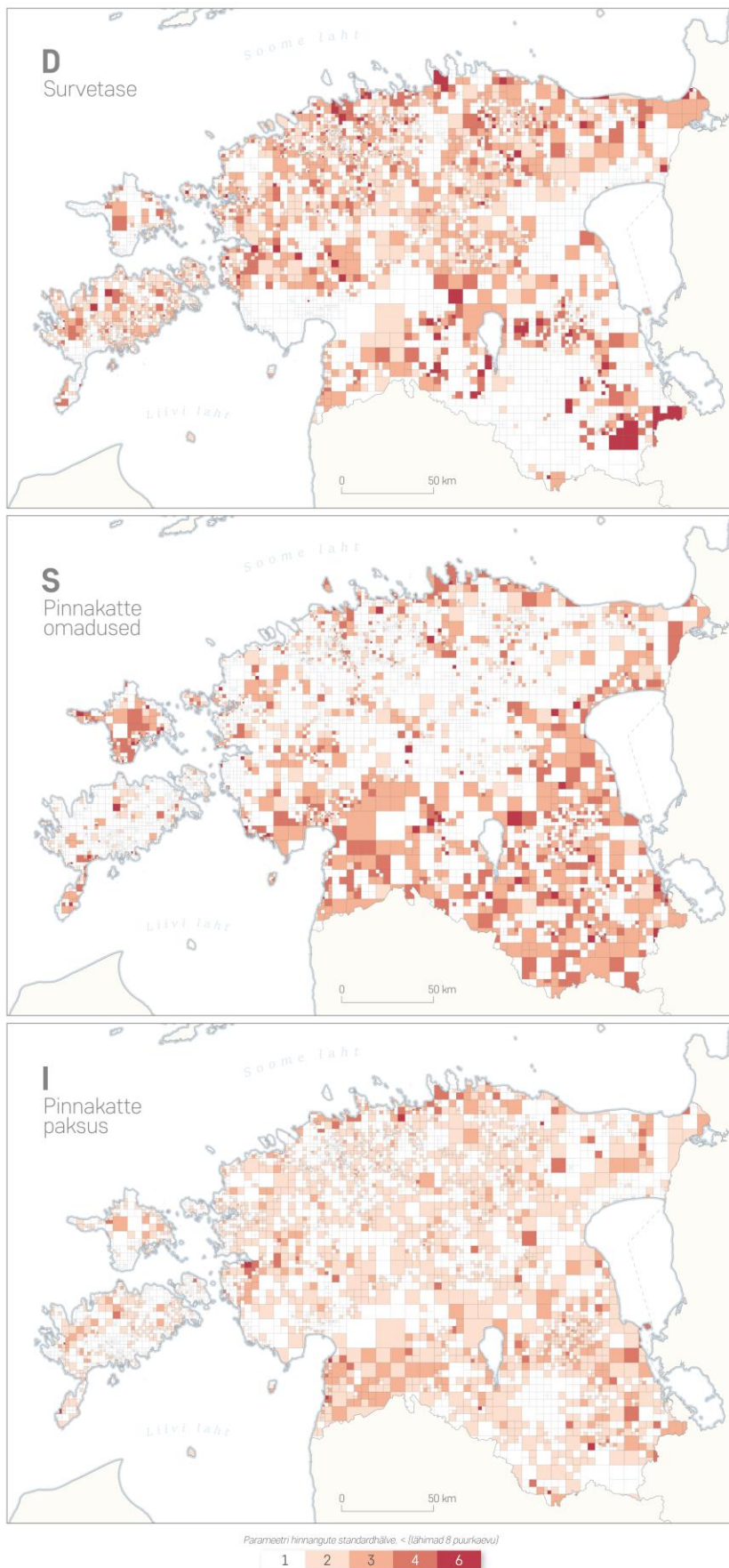
Tabel 10. SPSA tulemused. DRASTIC parameetrite (P) teoreetilised ja tegelikud kaalud, karbonaatsete kivimite veekompleksid (KK) võrdluses liivakivide veekompleksidega (LK)

P	Teoreetiline kaal	Teoreetiline kaal, %	Tegelik kaal, %							
			Madalaim		Kõrgeim		Keskmine		Standardhälve	
			KK	LK	KK	LK	KK	LK	KK	LK
D	5	19,2	3,5	3,8	44,2	46,7	13,6	9,6	7,6	7,6
R	4	15,4	2,0	2,1	20,9	43,6	3,7	8,2	2,0	5,5
A	3	11,5	13,3	5,7	49,2	50,8	21,2	19,0	5,3	6,4
S	5	19,2	3,5	3,7	42,9	54,8	23,6	30,3	6,3	12,0
T	1	3,8	2,3	2,4	15,5	22,5	6,2	8,5	1,7	2,6
I	5	19,2	3,8	3,9	40,7	46,1	26,0	18,9	5,1	8,9
C	3	11,5	1,5	1,7	22,2	18,5	5,7	5,5	3,3	2,2

SPSA tulemused on toodud tabelis 10. Karbonaatsete kivimite veekompleksi avamusel on kõige kõrgema tegelikuga kaaluga pinnakatte paksuse, liivakivimite veekompleksi avamusel aga pinnakatte omaduste parameeter – vastavalt 26,0% ja 30,3% kaitstuse indeksist. Needki tulemused langevad suurusjärgude poolest kokku Männik jt (2023) tööga. Põhjavee survetaseme, netoinfiltratsiooni ja filtratsioonimooduli parameetrite tegelik kaalukus on teoreetilisest kaalukusest väiksem. See viitab nende parameetrite võrdlemisi ühtlaselt madalatele väärtustele, ehkki survetaseme puhul esineb kohati ka väga kõrgeid väärtusi. Vaadates nende parameetrite olulisust põhjaveekogumite tasandil, leidub aga selliseid põhjaveekogumeid, kus just need parameetrid mängivad kaitstuse hinnangu kujunemisel keskmiselt suuremat rolli. Selline piirkondlik varieeruvus annab veelkord kinnitust kõigi parameetrite olulisusele.

Reljeefi parameeter (T), millel on küll madal teoreetiline kaal, oli ainus parameeter, mille tegelik kaal ületas teoreetilise kaalu kõigis põhjaveekogumites. See tuleneb Eesti lamedast reljeefist, mis tingis ühtlaselt kõrged TWI väärtused ja parameetri hinnangud. Põhjaveekihi omaduste parameetri tegelik kaal ületas oma teoreetilise kaalu kõigis põhjaveekogumites (v.a Ruhnu). Kuigi põhjaveekihi parameetri variatsioonikordaja oli MRSA põhjal üldiselt madal, viitab see pigem väärtuste stabiilsusele kui ebaolulisusele – A parameeter mõjutab tulemust ühtlaselt kogu uurimisalal.

Kõige kõrgema keskmise tegeliku kaaluga parameetrid viitavad sellele, millised andmestikud mõjutavad konkreetses piirkonnas põhjavee kaitstuse hinnangu kujunemist enim. Sellest lähtuvalt võib järeldada, et just nende andmestike ajakohasus, täpsus ja detailsus on eriti kriitilise tähtsusega. Uute põhjavee kaitstuse kaartide loomisel või kaartide uuendamisel ja parandamisel tuleks seega keskenduda nende andmeallikate usaldusväärsuse ja kvaliteedi tagamisele.



Joonis 20. Kolme DRASTIC parameetri hinnangute standardhälve iga võreruudu tsentroidile lähima 8 punkti põhjal. Aluskaart: Maa-ameti ruumiantmed, 2025; OpenStreetMap ruumiantmed, 2025.

Joonisel 20 on kujutatud D, S ja I parameetrite hinnangute (skaalal 1 – 10) võreruudu põhised standardhälbed, mis arvutati iga võreruudu keskpunkti lähima kaheksa puurkaevu põhjal. Standardhälbe määramisel kasutati vajadusel andmepunkte väljaspool ruutu, et võimaldada hinnangu andmist ka nendele ruutudele, mille sees leidis vähem kui kaks puurkaevu. Valik keskenduda just nendele kolmele parameetrile tulenes sellest, et pinnakatte omadused (S) ja paksuse (I) parameetrid omasid kõrgeimat variatsiooniindeksit ja tegelikku kaalu ning põhjavee survetasemel (D) esines kõige suurem variatsioonikordaja. Ülejäänud DRASTIC parameetreid analüüsi ei kaasatud, sest nende väärtused pärinevad juba eelnevalt interpoleeritud või silutud andmetest (netoinfiltratsioon, reljeef, filtratsioonimoodul), mille tõttu esineb väärtustes niigi sujuv ruumiline üleminek. Veekihi omaduste (A) puhul olid hinnangud peaaegu üle-eestiliselt ühtlaselt kõrged.

Parameetri hinnangute suur standardhälve võreruudu sees võib viidata – ning paljudel juhtudel viitabki – vaadeldava piirkonna komplekssele geoloogiale. Samas võib kõrge standardhälve viidata ka potentsiaalsetele puudustele alusandmete kvaliteedis, eriti väiksemate ruumiüksuste puhul. Võiks eeldada, et mida suurem on võreruudu pindala ning mida kaugemal andmepunktid üksteisest paiknevad, seda suurem on keskmiselt ka ruudusiseste väärtuste standardhälve. Spearmani korrelatsioonianalüüsi käigus ei tuvastatud D parameetri standardhälvete ja ruumiüksuste suuruse vahel aga mingisugust statistiliselt olulist seost. S ja I parameetrite puhul ilmnas võreüksuste suurusega nõrk positiivne korrelatsioon (vastavalt $\rho = 0,15$ ja $\rho = 0,16$).

Niisiis – ehkki üksnes standardhälbe suuruse põhjal ei saa teha järeldusi andmete ebamäärasuse kohta, pakub ruudukeskmine parameetrite standardhälve siiski väärtuslikku tuge andmekvaliteedi kontrolliks. Ruutudes, kus parameetrite hinnangute hajuvus on suur, tuleks andmestikku hinnata kriitilisemalt ning vajadusel piirkonna geoloogilist konteksti täiendavalt analüüsida. Mida lähemal paiknevad üksteisele väga erinevate hinnangutega puurkaevud ehk mida väiksem on kõrge standardhällbega ruumiüksus, seda põhjalikum peaks olema täiendav analüüs. Üheks adaptiivse ruutkaardi eeliseks on võimalus selline statistika automaatselt välja arvutada ning muuta see tulevikus tööriista osaks.

Kokkuvõttes võib kaartide võrdleva analüüsi ning DRASTIC parameetrite tundlikkusanalüüsi tulemuste põhjal väita, et DRASTIC meetodika sobib oma kohandatud kujul hästi põhjavee kaitstuse hindamiseks ning omab piisavat puutepinda ka praegu kasutusel oleva, Veeseaduses (2019) määratletud põhjavee kaitstuse kaardistamise meetodikaga. Kuigi baaskaardistamise raames võetakse kaitstuse hindamisel arvesse ainult pinnakattesetete paksust ja omadusi, kujundavad need kaks parameetrit SPSA tulemuste põhjal ka üle poole DRASTIC meetodikaga saadud põhjavee kaitstuse hinnangust. Seetõttu on tõenäoline, et paljudes piirkondades kirjeldavad baaskaardi ja ruutkaardi kaitstuse hinnangud sisuliselt ära sama hüdroteoloogilise informatsiooni.

3.5 Lähteandmestiku ja metoodika kitsaskohad

Magistritöö käigus välja töötatud metoodikal on ka mõningaid kitsaskohti, mis lähtuvad nii sisendandmete kvaliteedist kui ka tehtud metoodilistest valikutest. Põhiliseks kitsaskohaks võib pidada töö peamise alusandmestiku – VEKA puurkaevude andmebaasi – kõikevat kvaliteeti. Suur osa töö metoodilisest arendusprotsessist keskendus andmebaasis esinevate erandite ja vigade tuvastamisele ning nendest möödapääsemiseks või kõrvaldamiseks vajalike kontrollimehhanismide lisamisele. Metoodika väljatöötamine oleks olnud oluliselt lihtsam, kui VEKA andmebaasi struktuur oleks olnud ühtlasem ning võimaldanud mugavalt teha suuremahulisi andmeväljavõtteid.

Väljatöötatud ruutkaardi töövoog on kohandatud olemasolevate andmeprobleemidega toimetulekuks, kuid tulevikus võiks andmesisestust suunata konkreetsema malli abil ning täiendada andmebaasi automaatsete andmekontrollidega. Nii välditaks näiteks selliseid olukordi, kus kaev asub valet pidi sisestatud ristkoordinaatide tõttu Eesti alalt väljas või kaevu filter asub andmete põhjal sügavamal kui kaevu lõppsügavus.

Puurkaevuandmete kõikevast kvaliteedist lähtuvaks metoodiliseks kitsaskohaks võib pidada filtratsioonimooduli (C) parameetrit. Filtratsioonimooduli väärtuste hindamisel lähtuti puurkaevude erideebitist, ent kasutatud valem ei tööta kõigis piirkondades üheselt hästi (Maves, 2017) ning proovipumpamiste käigus saadud erideebiti väärtused ei ole enamasti kuigi täpsed. Ehkki ka põhjaveekihi omaduste parameetritele anti hinnang erideebitist lähtuvalt, olid selle parameetri väärtusklassid moodustatud moel, mis silus ära väga kõrgete erideebiti väärtustega kaevude suure mõju. Vaatamata sellele, et käesolevas töös arvutati filtratsioonimooduli väärtused ainult piisava kestvusega proovipumpamistega puurkaevude põhjal ning saadud raster siluti tulemuste ühtlustamiseks, on tegu metoodiliselt liiga keerulise lähenemisega keskpärase usaldusväärsusega tulemuse saamiseks. Seetõttu võiks metoodika parendamiseks tulevikus katsetada ka lihtsamaid lähenemisi, mis annaksid enam-vähem võrdväärse tulemuse.

Parameetrite hindamiseks kasutatud metoodikatest võib proportsionaalselt ehk liiga keeruliseks pidada ka reljeefi (T) parameetri hindamise metoodikat. Magistritöös võeti lihtsa nõlvakalde (Aller jt, 1987) asemel kasutusele reljeefi märguse indeks (TWI). TWI sobib kontseptuaalselt paremini kirjeldama vee liikumist ja akumulereerumist reljeefil, ent Eesti reljeef on ühtlaselt lauge ning selle parameetri kaal on DRASTIC metoodikas nii madal, et ainult nõlvakalde kasutamisel saadud kaitstuse indeksid erineksid keskmiselt vaid 2 punkti vahemikus 41 – 212. Suuremat mõju avaldaks nõlvakalde asendamine TWI-ga tõenäoliselt siis, kui kaitstust hinnatakse reljeefsematel aladel. Kuna TWI ei sõltu puurkaevude andmestikust ning selle põhjal reljeefi parameetri hindamiseks on töövoomudelile sisendkiht juba loodud, ei ole vajadust metoodika ümbertegemiseks. Eestiga reljeefi poolest sarnastes piirkondades põhjavee kaitstuse hindamiseks pole keerulisema metoodika kasutamine aga ilmselt vajalik.

Mitte ilmtingimata kitsaskohaks, vaid pigem tulevikuperspektiiviks võib pidada põhjaveekihi omaduste (A) parameetri sisu. Kui magistritöös hinnati põhjaveekihi omadusi erideebiti kaudu, siis tegelikult oleks võimalik selle parameetri hindamine ka puurkaevude läbilõigete abil, nagu seda tehti käesolevas töös pinnakatte omaduste parameetriga. Kuna aluspõhja kihtide indeksid

ja litoloogilised kirjeldused on pinnakattesetete omast oluliselt keerulisemad, oleks tegu mahuka tööga, ent siiski peaks selle võimalikkust hindama.

3.6 Võimalused ruutkaardi valideerimiseks ja edasiarenduseks

Selles töös kasutatud meetodikad põhjavee kaitstuse ruutkaardi valideerimiseks tuginesid eelkõige võrdlusele olemasolevate kaartidega. Selle lähenemise peamiseks puuduseks on asjaolu, et varasemad kaardid põhinevad teistsugustel – ning sageli üksteisest erinevatel – meetodikatel, mis on aja jooksul ja kaardistajate lõikes muutunud. Lisaks ei kata detailne põhjavee kaitstuse kaart ligikaudu kahte kolmandikku Eesti territooriumist ning olemasolevad kaardid on mõnes piirkonnas kuni 25 aastat vanad ja sealjuures veel vanematele andmestikele tuginevad.

Üks võimalus senisest objektiivsemaks valideerimiseks oleks kaitstuse hinnangute võrdlemine põhjavee nitraadisisaldusega, mida on DRASTIC meetodika kontekstis rahvusvaheliselt laialdaselt kasutatud. Heade tulemustega on nitraatide sisaldusel põhinevat valideerimist rakendanud näiteks Huan jt (2012), Baghapour jt (2016) ja Voutchkova jt (2021). Nitraadipõhist valideerimist on rakendatud ka DRASTIC meetodika kohandamise kontekstis, et võrrelda originaalse ja kohandatud DRASTIC meetodika võimet nitraaditundlike alade täpseks tuvastamiseks ning anda hinnang sellele, kas kohandatud DRASTIC meetodika töötab kaitstuse hindamiseks paremini või mitte (Javadi jt, 2011; Kazakis ja Vourouris, 2015). Eesti kontekstis on nitraatide põhist põhjavee kaitstuse kaardi valideerimist varasemalt katsetanud Männik jt (2023). Võru ja Rapla kaardilehtedel leiti põhjavee nitraadisisalduse ja alade kaitstuse vahel küll korrelatsioon, ent selle tugevus jäi tagasihoidlikuks madalate nitraadisisalduste ning väheintensiivse põllumajanduse tõttu piirkonnas. Tüvi (2024) katsetas bakalaureusetöös sarnast lähenemist Häädemeeste, Maardu ja Väike-Maarja piirkondades, kuid ei leidnud korrelatsiooni. Niisiis ei pruugi varasematele töödele tuginedes põhjavee kaitstuse kaardi nitraatide abil valideerimine Eestis toimida. Ruutkaardi kasutamine võimaldaks võrdlust teostada aga üle-eestilisel tasandil või näiteks ainult nitraaditundlikel aladel või ainult uuemate puurkaevude andmeid kasutades. Seetõttu võiks põhjavee nitraadisisalduse põhist valideerimist siiski katsetada. Võrdlust saaks läbi viia ka konkreetselt puurkaevude põhiselt.

Põhjavee kaitstuse ruutkaardi edasiarendamisel oleks oluline lisada ka maakasutuse parameeter, mis võimaldaks eristada looduslikku kaitstust ja tegelikku reostusriski. Kuigi piirkonnas võib looduslik kaitstus olla madal, ei tähenda see automaatselt suurt ohutaset – kui piirkonnas ei toimu inimtegevust ega esine probleeme jääkreostusega, on põhjavesi reostuse eest sisuliselt kaitstud, seni kuni maakasutus püsib muutumatuna. Lõppkasutajate, sh planeerijate seisukohalt oleks ideaalne, kui ruutkaardi põhjal oleks võimalik kõrvuti vaadelda nii looduslikku kaitstust kui ka reostusohu taset. Nii oleks võimalik tuvastada piirkonnad, kus kehva loodusliku kaitstuse tingimustes on vaja maakasutust suunata, piirata või tähelepanelikult jälgida, ja ka piirkonnad, mille säilitamine praegusel kujul aitab põhjavee kvaliteeti pikaajaliselt hoida.

Kolmanda sisulise edasiarendusena võiks kaaluda võimalust kohandada käesolevas töös kasutatud DRASTIC meetodikat ning välja töötatud töövõumudelit selliselt, et need võimaldaksid hinnata ka Kvaternaari veekompleksi kaitstust. Ehkki Kvaternaari põhjaveekihte kasutatakse ühisveevärkides ja tootmises vähem kui sügavamaid veekomplekse, on neil oluline

roll maapiirkondade joogiveevarustuses ning neid tuleks käsitleda väärtusliku põhjaveeressursina. Samas iseloomustab Kvaternaari veekompleksi kerge reostatavus ja sellest tingitud võimalik halb kvaliteet. (Perens, 2001) Veekompleksi kergest reostatavust arvesse võttes oleks seda olulisem kaitstust kaardistada ka Kvaternaari veekompleksi käsitlevalt. Käesolevas magistritöös ei käsitletud Kvaternaari veekompleksi kahel peamisel põhjusel: esiteks on puurkaevude andmebaasis võrdlemisi vähe Kvaternaari veekompleksist vett ammutavaid puurkaeve, ning teiseks eeldab Kvaternaari veekihtide kaitstuse hindamine eraldi meetodilist lähenemist. Kuna Kvaternaari veekompleksi kaevud ei ava aluspõhja, puuduvad andmed mitme DRASTIC meetodika jaoks vajaliku parameetri – sealhulgas põhjavee survetaseme ja pinnakatte omaduste – hindamiseks. Lisaks oleks meetodika rakendamisel vaja käsitleda Kvaternaari kaitstust eraldi ruutkaardina.

Edasise arendusetapina võiks põhjavee kaitstuse ruutkaardist kujuneda interaktiivne tööriist, mis võimaldab kasutajatel nii ruutkaarti kui ka selle alusandmestikku detailsemalt uurida. Kuna ruutkaardi kõige väiksemad üksused on suurusega 0,016 km², ei ole nende visualiseerimine staatilisel kaardil otstarbekas ega informatiivne. Kaardivõre loomise meetodika ehitati töös ülesse eeldusel, et lõpptulemust kasutatakse interaktiivses keskkonnas. Ehkki interaktiivne tööriist on võimalik välja töötada ka juba olemasolevate andmete ja kaardikihtide põhjal, oleks kõige parem lahendus see, kui kaart uueneks automaatselt. Sellise lahenduse jaoks oleks vaja töövoog automatiseerida alates andmete pärimisest kuni kaardi uuendamiseni. Käesolevas töös välja töötatud töövoog eeldab, et kasutaja loeb mudelisse ise sisse puurkaevude andmebaasi väljavõtte ning visualiseerib tulemusena saadud kaardikihi ise. Arvestades EELIS andmebaasi vanust ja ülesehitust, võib just andmepäringute automatiseerimine osutada tehniliselt kõige keerukamaks. Interaktiivses rakenduses peaks olema võimalik lisaks ruutkaardi kihile kuvada ka vähemalt puurkaevude kihti ning vaadelda iga puurkaevu kaitstuse hinnangu kujunemist ka parameetrite kaupa. Täiendavate funktsioonidena võiks tööriist võimaldada puurkaevude otsingut, sanitaarkaitsealade ulatuse määramist vja teisi põhjavee kaitsega seotud funktsioone.

Ehkki puurkaevuandmetel põhinev kaitstuse ruutkaart ei asenda traditsioonilisi, eksperthinnangute kaasamisel loodud suuremõõtkavalisi põhjavee kaitstuse kaarte, pakub see alternatiivset võimalust põhjavee kaitstuse hindamiseks aladel, kus suuremõõtkavalist kaitstuse kaarti veel pole. Automatiseeritud kujul saaks ruutkaardist pidevalt uuenev, ajakohane andmekiht, mille täpsus ajas suureneks, mitte ei väheneks.

Kokkuvõte

Magistritöö eesmärk oli töötada välja puurkaevude andmestikule tuginev põhjavee kaitstuse kaardistamise meetoodika, mis võimaldaks kaitstust hinnata ja visualiseerida automaatselt terve Eesti ulatuses.

Töö eesmärgid saavutati läbi kolme väljundi ehk põhitulemuse. Esmalt töötati töö eesmärkidest lähtuvalt välja meetoodika ning Pythoni- ja QGIS-i põhine töövoomudel selle meetoodika rakendamiseks. Seejärel arvutati mudeli abil kaitstuse klass kõigile sobivatele Eesti puurkaevudele. Viimaks valmis puurkaevude kihi põhjal üle-eestilise katvusega põhjavee kaitstuse ruutkaart.

Magistritöö oli oma olemuselt meetoodiline, sest kuigi aluseks võeti DRASTIC meetoodika, rakendati seda uues – punktipõhises – formaadis, kasutades puurkaevude andmebaasi. Meetoodika rakendamiseks valminud töövoomudeli sisend on puurkaevude andmebaasi töötlemata väljavõte ühes tugikihtidega, ning väljundid 1) tabel puurkaevude parameetrite, DRASTIC parameetrite hinnangute ning kaitstuse klassiga, ja 2) adaptiivsel ruutvõrel põhinev põhjavee kaitstuse kaardikiht. Töö olulisimateks meetoodilisteks uuendusteks olid järgmised sammud:

- Üle 3000 unikaalse pinnakattesete litoloogilise kirjelduse klassifitseerimiseks DRASTIC meetoodikaks sobivatesse rühmadesse töötati välja keelereeglitel põhinev mudel. Pinnakattesetete automaatse klassifitseerimise võimalus parandab märkimisväärselt puurkaevuandmete kasutusvõimalusi, sh kaitstuse hindamiseks.
- Reljeefi parameetri sisu asendati andmete iseloomu arvesse võttes maastiku märgusindeksiga (TWI), mis kirjeldab nõlvakaldega võrreldes paremini punktipõhiseid hüdrooloogilisi tingimusi.
- Punktipõhiste kaitstuse hinnangute automaatseks visualiseerimiseks pinnana töötati välja adaptiivse ruutkaardi lahendus, mille puhul võreruutude suurus sõltub alusandmete tihedusest piirkonnas.

Kaitstuse klass arvutati töös 22 686 puurkaevule, mis moodustas 99,5% kõigist piisava andmekvaliteediga puurkaevudest. Puurkaevu hinnangutele tuginedes valmis adaptiivne ruutkaart resolutsiooniga 0,016 km² kuni 1024 km². Koostatud ruutkaardi andmetel on kaitsmata alasid Eesti koguterritooriumist 13%, nõrgalt kaitstud alasid 32%, keskmiselt kaitstud alasid 21%, suhteliselt kaitstud alasid 25% ning kaitstud alasid 9%. Valideerimisel olemasoleva, 1 : 50 000 põhjavee kaitstuse kaardiga saavutati 88% kattuvus ±1 kaitstuse klassi piires, mis näitab ruumimustrite väga head kattuvust. Tuvastatud erinevused olid piirkondlikud ja seotud peamiselt adaptiivse ruutkaardi ning alusandmete eripäradega.

Kokkuvõttes kinnitab magistritöö tulemus, et puurkaevude andmestikul põhinev automatiseeritud põhjavee kaitstuse hindamine ja visualiseerimine on kogu Eesti ulatuses teostatav. Ehkki puurkaevupõhine ruutkaart ei asenda traditsioonilist kaitstuse kaardistamist, kujutab see endast paindlikku ja ajakohastatavat andmekihti, millel on tulevikus potentsiaali toetada otsustusprotsesse seal, kus traditsiooniline kaitstuse kaart puudub või on vananenud. Edasise arenduse korral võiks töövoog areneda praktiliseks ja interaktiivseks tööriistaks.

Methodology for nationwide groundwater vulnerability assessment and visualization using drilled well data

Liina Hints

Summary

The aim of this Master's thesis was to develop a methodology for assessing and visualizing groundwater vulnerability across Estonia using drilled well data. The thesis focused on adapting a modified DRASTIC method to be used with point-based data, and on automating the analysis and mapping using open datasets.

The theoretical chapter focused on defining groundwater vulnerability and explaining the DRASTIC framework. Existing Estonian mapping approaches were evaluated, and the relevance of incorporating well data into vulnerability assessments was analysed.

The methodological part of the thesis focused on developing an automated and scalable workflow for groundwater vulnerability assessment based on drilled well data. Particular emphasis was placed on overcoming limitations related to unstructured, low quality input data, adapting DRASTIC parameters for point-based analysis, and designing a spatial output that reflects the irregular distribution of drilled wells. The workflow was implemented in Python, with supporting spatial inputs prepared in QGIS. The following highlights present the three most significant methodological innovations developed in the course of the thesis:

- A custom lithology parser was developed to classify over 3,000 unique lithological descriptions into a very limited number of DRASTIC-compatible categories. The lithology parser accounts for irregularities in the database and performs classification in five stages, significantly improving data usability for groundwater vulnerability assessments, including but not limited to those based on the DRASTIC method.
- The topography parameter was redefined using the Topographic Wetness Index (TWI), which better captures point-based hydrological conditions compared to the traditional slope-based measure.
- An adaptive grid-based visualization approach was used to translate point-level vulnerability estimates into a continuous spatial layer, with data point density determining the resolution of the grid.

As a result, vulnerability classes were determined for 22,686 wells (99,5%) out of a total of 22,811 that met the minimum data requirements. 125 wells remained unclassified due to highly irregular lithological descriptions. The results of the point-based vulnerability assessment aligned closely with existing maps and status assessments of the corresponding groundwater bodies, indicating consistency between model output and observed hydrogeological conditions.

Using the same dataset, an adaptive square grid-based map of groundwater vulnerability was generated, featuring nine resolution levels ranging from 0.016 km² to 1024 km². According to the resulting classification, 13% of Estonia was assessed as unprotected, 32% as weakly protected, 21% as moderately protected, 25% as relatively protected, and 9% as protected. Validation against the existing 1:50,000 vulnerability map, covering one-third of Estonia,

showed a 49% match within the same vulnerability class and an 88% match within ± 1 vulnerability class, indicating strong spatial agreement despite underlying methodological and data differences.

Discrepancies were largely attributable to the distinct nature of the adaptive grid map and were concentrated in a couple of areas, such as H ademeeste and the coastal zone of North Estonia. In general, well-level assessments aligned closely with the vulnerability values in the 1:50,000 map. A mismatch on the Tartu map sheet stemmed from differences in the underlying input data rather than methodological inconsistencies. Parameter sensitivity analysis further confirmed that all DRASTIC parameters contributed meaningfully across hydrogeological contexts.

Overall, the methodology developed in this thesis confirms that a drilled well-based, automated vulnerability assessment and visualization approach can be scaled nationally and as such, presents a viable alternative to traditional vulnerability mapping approaches. Though not intended to replace traditional mapping, the developed methodology has clear potential to support groundwater policy and planning, especially in underrepresented or unmapped areas, since it provides an easily updateable, data-driven layer that reflects current conditions and enables continuous refinement. With further development, the workflow could potentially be expanded into a usable, interactive tool.

Tänuavaldused

Suur aitäh minu juhendajatele, Magdaleena Männikule ja Raivo Aunapile, kes magistritöö valmimisele oma erialase ekspertiisiga igakülselt kaasa aitasid ning kelle poole võisin alati küsimustega pöörduda. Lisaks soovin tänada Andres Marandit, kelle osalusel magistritöö teema välja kujunes ning kes toetas innustunult ruutkaardi rakendamise ideed. Aitäh ka Maile Polikarpusele ja Raul Paadile kasulike nõuannete, Marlen Hundile netoinfiltratsiooni sisendandmete jagamise, ning Tiia-Linda Purgele sisukate küsimuste esitamise eest eelretsentsioonis.

Kasutatud kirjandus

- Abascal, E., Gómez-Coma, L., Ortiz, I., Ortiz, A. (2022). Global diagnosis of nitrate pollution in groundwater and review of removal technologies. *Science of the total environment*, 810, 152233.
- Abokifa, A. A., Biswas, P., Hodges, B. R., Sela, L. (2020). WUDESIM: A toolkit for simulating water quality in the dead-end branches of drinking water distribution networks. *Urban Water Journal*, 17(1), 54-64.
- Albinet, M. (1973). Cartes de vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine.
- Allende-Prieto, C., Roces-García, J., Sañudo-Fontaneda, L. Á. (2024). The high-resolution calibration of the topographic wetness index using PAZ satellite radar data to determine the optimal positions for the placement of smart sustainable drainage systems (SuDS) in urban environments. *Sustainability*, 16(2), 598.
- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J., Petty, R. J., Hackett, G. (1987). DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. US Environmental Protection Agency. Washington, DC, 455.
- Baghapour, M. A., Fadaei Nobandegani, A., Talebbeydokhti, N., Bagherzadeh, S., Nadiri, A. A., Gharekhani, M., Chitsazan, N. (2016). Optimization of DRASTIC method by artificial neural network, nitrate vulnerability index, and composite DRASTIC models to assess groundwater vulnerability for unconfined aquifer of Shiraz Plain, Iran. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 14, 1-16.
- Barbash, J. E., Resek, E. A. (1996). Pesticides in ground water: distribution, trends, and governing factors (pp. xxvii+-588).
- Barbulescu, A. (2020). Assessing groundwater vulnerability: DRASTIC and DRASTIC-like methods: a review. *Water*, 12(5), 1356.
- Beven, K. J., Kirkby, M. J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology/Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. *Hydrological sciences journal*, 24(1), 43-69.
- Caretta, A. M. M. A., Arfanuzzaman, R. B. M., Morgan, S. M. R., Kumar, M. (2022). Water. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Chidichimo, F., De Biase, M., Straface, S. (2020). Groundwater pollution assessment in landfill areas: Is it only about the leachate?. *Waste Management*, 102, 655-666.
- Civita, M., De Maio, M. (2004). Assessing and mapping groundwater vulnerability to contamination: the Italian combined approach. *Geofísica internacional*, 43(4), 513-532.
- Davis, A. L. M. W. A., Long, A., Wireman, M. (2002). KARSTIC: a sensitivity method for carbonate aquifers in karst terrain. *Environmental Geology*, 42, 65-72.
- Dizaji, A. R., Hosseini, S. A., Rezaverdinejad, V., Sharafati, A. (2020). Groundwater contamination vulnerability assessment using DRASTIC method, GSA, and uncertainty analysis. *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 1-15.

- Dixon, B., Scott, H. D., Dixon, J. C., Steele, K. F. (2002). Prediction of aquifer vulnerability to pesticides using fuzzy rule-based models at the regional scale. *Physical geography*, 23(2), 130-153.
- 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, 165-176.
- Douglas, S. H., Dixon, B., Griffin, D. (2018). Assessing the abilities of intrinsic and specific vulnerability models to indicate groundwater vulnerability to groups of similar pesticides: a comparative study. *Physical Geography*, 39(6), 487-505.
- Dounis, A. I. (2010). Artificial intelligence for energy conservation in buildings. *Advances in Building Energy Research*, 4(1), 267-299.
- Duhalde, D. J., Arumí, J. L., Oyarzún, R. A., Rivera, D. A. (2018). Fuzzy-based assessment of groundwater intrinsic vulnerability of a volcanic aquifer in the Chilean Andean Valley. *Environmental monitoring and assessment*, 190, 1-14.
- Eesti Geoloogiateenistus. (2022). Eesti geoloogilise baaskaardi (1:50 000) reaalsus- ja andmemudel. Versioon 1.0. Rakvere.
- Fannakh, A., Farsang, A. (2022). DRASTIC, GOD, and SI approaches for assessing groundwater vulnerability to pollution: a review. *Environmental Sciences Europe*, 34(1), 77.
- Farjad, B., Shafri, H. Z. B. M., Mohamed, T. A., Pirasteh, S., Wijesekara, N. (2012). Groundwater intrinsic vulnerability and risk mapping. In *Proceedings of the institution of civil engineers-water management* (Vol. 165, No. 8, pp. 441-450). Thomas Telford Ltd.
- Focazio, M. J., Reilly, T. E., Rupert, M. G., Helsel, D. R. (2002). Assessing ground-water vulnerability to contamination: Providing scientifically defensible information for decision makers (U.S. Geological Survey Circular No. 1224). U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey. <https://pubs.usgs.gov/circ/2002/circ1224/>
- Foster, S. S. D. (1987). *Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy*.
- Foster, S., Custodio, E. (2019). Groundwater resources and intensive agriculture in Europe—can regulatory agencies cope with the threat to sustainability?. *Water Resources Management*, 33, 2139-2151.
- Frind, E. O., Molson, J. W., Rudolph, D. L. (2006). Well vulnerability: a quantitative approach for source water protection. *Groundwater*, 44(5), 732-742.
- Gogu, R. C., Dassargues, A. (2000). Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. *Environmental geology*, 39, 549-559.
- Hamza, S. M., Ahsan, A., Imteaz, M. A., Ghazali, A. H., Mohammed, T. A. (2017). GIS-based FRASTIC model for pollution vulnerability assessment of fractured-rock aquifer systems. *Environmental Earth Sciences*, 76, 1-21.
- Hansen, B., Sonnenborg, T.O., Møller, I., Bernth, J.D., Høyer, A.S., Rasmussen, P., Sandersen, P.B., Jørgensen, F. (2016). Nitrate vulnerability assessment of aquifers. *Environmental Earth Sciences*, 75, 1-15.

- Harter, T., Kourakos, G., Lockhart, K. (2014). Assessing potential impacts of livestock management on groundwater (NI R 14-03 Supplemental Paper 2). Nicholas Institute for Environmental Policy Solutions, Duke University.
- Healy, R. (2010). *Estimating groundwater recharge*. Cambridge university press.
- 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.
- Huang, L., Zeng, G., Liang, J., Hua, S., Yuan, Y., Li, X., Dong, H., Liu, J., Nie, S., Liu, J. (2017). Combined impacts of land use and climate change in the modeling of future groundwater vulnerability. *Journal of Hydrologic Engineering*, 22(7), 05017007.
- Hunt, M., Osjamets, M., Pärn, J., Raidla, V., Kuusma, E., Hints, L., Marandi, A. (2024). Joogiveehaarde toiteala riskihindamise ja -juhtimise teostamiseks vajalike eeltööde läbi viimine vastavalt joogiveehaarde toiteala riskihindamise ja riskijuhtimise nõuetele. Eesti Geoloogiateenistus. EGF:9932.
- Jang, W. S., Engel, B., Harbor, J., Theller, L. (2017). Aquifer vulnerability assessment for sustainable groundwater management using DRASTIC. *Water*, 9(10), 792.
- Javadi, S., Kavehkar, N., Mousavizadeh, M. H., Mohammadi, K. (2011). Modification of DRASTIC model to map groundwater vulnerability to pollution using nitrate measurements in agricultural areas. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 13(2), 239-249.
- Jiménez Cisneros, B. E., Oki, T., Arnell, N. W., Benito, G., Cogley, J. G., Doll, P., Mwakalila, S. S. (2014). Freshwater resources.
- Kazakis, N., Voudouris, K. S. (2015). Groundwater vulnerability and pollution risk assessment of porous aquifers to nitrate: Modifying the DRASTIC method using quantitative parameters. *Journal of Hydrology*, 525, 13-25.
- Keskkonnaamet. (2025). Põhjavee moodustumine, põhjaveekihid ja kaitstus. Kohaliku omavalitsuse keskkonnaspetsialisti käsiraamat. Kasutatud 19.04.2025, <https://keskkonnaamet.ee/kasiraamat-kohaliku-omavalitsuse-keskkonnaspetsialistile/pohjavee-moodustumine-pohjaveekihid-ja-kaitstus>
- Keskkonnaministeerium. (2020). Kliimamuutustega kohanemise arengukava aastani 2030.
- Kliimaministeerium. (2025). Pandivere ja Adavere Põltsamaa nitraaditundliku ala tegevuskava 2025-2028.
- Kmoch, A., Kanal, A., Astover, A., Kull, A., Virro, H., Helm, A., Pärtel, M., Ostonen, I., Uuema, E. (2021). EstSoil-EH: a high-resolution eco-hydrological modelling parameters dataset for Estonia. *Earth System Science Data*, 13(1), 83-97.
- Kukk, M. (1991). Puuraukude ja kaevude kataster (1990). Kõide I, seletuskiri. Eesti Geoloogiakeskus. Tallinn.
- Kukk, M. (1999). Puurkaevude ja puuraukude kataster (1998). Kõide I, seletuskiri. Eesti Geoloogiakeskus. Tallinn.
- Kurwadkar, S. (2017). Groundwater pollution and vulnerability assessment. *Water Environment Research*, 89(10), 1561-1577.
- Lodwick, W. A., Monson, W., Svoboda, L. (1990). Attribute error and sensitivity analysis of map operations in geographical information systems: suitability analysis. *International Journal of Geographical Information System*, 4(4), 413-428.

- Luhamaa, A., Kallis, A., Mändla, K., Männik, A., Pedusaar, T., Rosin, K. (2014). Eesti tuleviku kliimastenaariumid aastani 2100: Lepingulise töö aruanne projekti “Eesti riikliku kliimamuutuste mõjuga kohanemise strateegia ja rakenduskava ettepaneku väljatöötamine” lisana. Keskkonnaagentuur.
- Maa-amet. (2005). Juhend Eesti geoloogiliseks digitaalkaardistamiseks mõõtkavas 1 : 50 000. Tartu.
- Maa-amet. (2015). Juhend Eesti geoloogiliseks digitaalkaardistamiseks mõõtkavas 1 : 50 000. Versioon 2.4. Tartu.
- Maa-amet. (2019). Juhend Eesti geoloogiliseks digitaalkaardistamiseks mõõtkavas 1 : 50 000. Versioon 2.5. Tartu.
- Machiwal, D., Jha, M. K., Singh, V. P., Mohan, C. (2018). Assessment and mapping of groundwater vulnerability to pollution: Current status and challenges. *Earth-Science Reviews*, 185, 901-927.
- Majandang, J., Sarapirome, S. (2013). Groundwater vulnerability assessment and sensitivity analysis in Nong Rua, Khon Kaen, Thailand, using a GIS-based SINTACS model. *Environmental earth sciences*, 68, 2025-2039.
- Maqsoom, A., Aslam, B., Khalil, U., Ghorbanzadeh, O., Ashraf, H., Faisal Tufail, R., Farooq, D., Blaschke, T. (2020). A GIS-based DRASTIC model and an adjusted DRASTIC model (DRASTICA) for groundwater susceptibility assessment along the China–Pakistan economic corridor (CPEC) route. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(5), 332.
- Marandi, A., Karro, E., Osjamets, M., Polikarpus, M., Hunt, M. (2020). Eesti põhjaveekogumite seisund perioodil 2014-2019. EGF 9416. Eesti Geoloogiateenistus, Rakvere.
- Marandi, A., Osjamets, M., Polikarpus, M., Pärn, J., Raidla, V., Tarros, S., Vallner, L. (2019). Põhjaveekogumite piiride kirjeldamine, koormusallikate hindamine ja hüdrogeoloogiliste kontseptuaalsete mudelite koostamine. Eesti Geoloogiateenistus, Rakvere.
- Marga, S. (2014). Pinnakatte paksuse kaardistamine ja Kesk-Devoni põhjaveekihi veejuhtivuse määramine ülenurme ja haaslava valla piirkonnas lähtuvalt tarbepuurkaevude andmetest. Magistritöö. Tartu Ülikool, keskkonnatehnoloogia õppekava.
- Margat, J. (1968). Vulnerabilite des nappes d’eau souterraine a la pollution [Groundwater vulnerability to contamination]. *Bases de al cartographie*, 68.
- Maves. (2009). AS Viljandi Veevärk poolt Viljandi linnas kasutatavate põhjaveevarude ümberhindamine. Tallinn.
- Mendoza, J. A., Barmen, G. (2006). Assessment of groundwater vulnerability in the Río Artiguas basin, Nicaragua. *Environmental Geology*, 50, 569-580.
- Moges, S. S., Dinka, M. O. (2022). Assessment of groundwater vulnerability mapping methods for sustainable water resource management: An overview. *Journal of water and land development*.
- Moraru, C., Hannigan, R., Moraru, C., Hannigan, R. (2018). Overview of groundwater vulnerability assessment methods. *Analysis of hydrogeochemical vulnerability*, 1-16.
- Männik, M. (2020). Põhjavee kaitstuse kaardi koostamine GIS-põhise Eesti näitel muudetud DRASTIC-metoodikaga. Magistritöö. Tartu Ülikool, geoloogia õppekava.

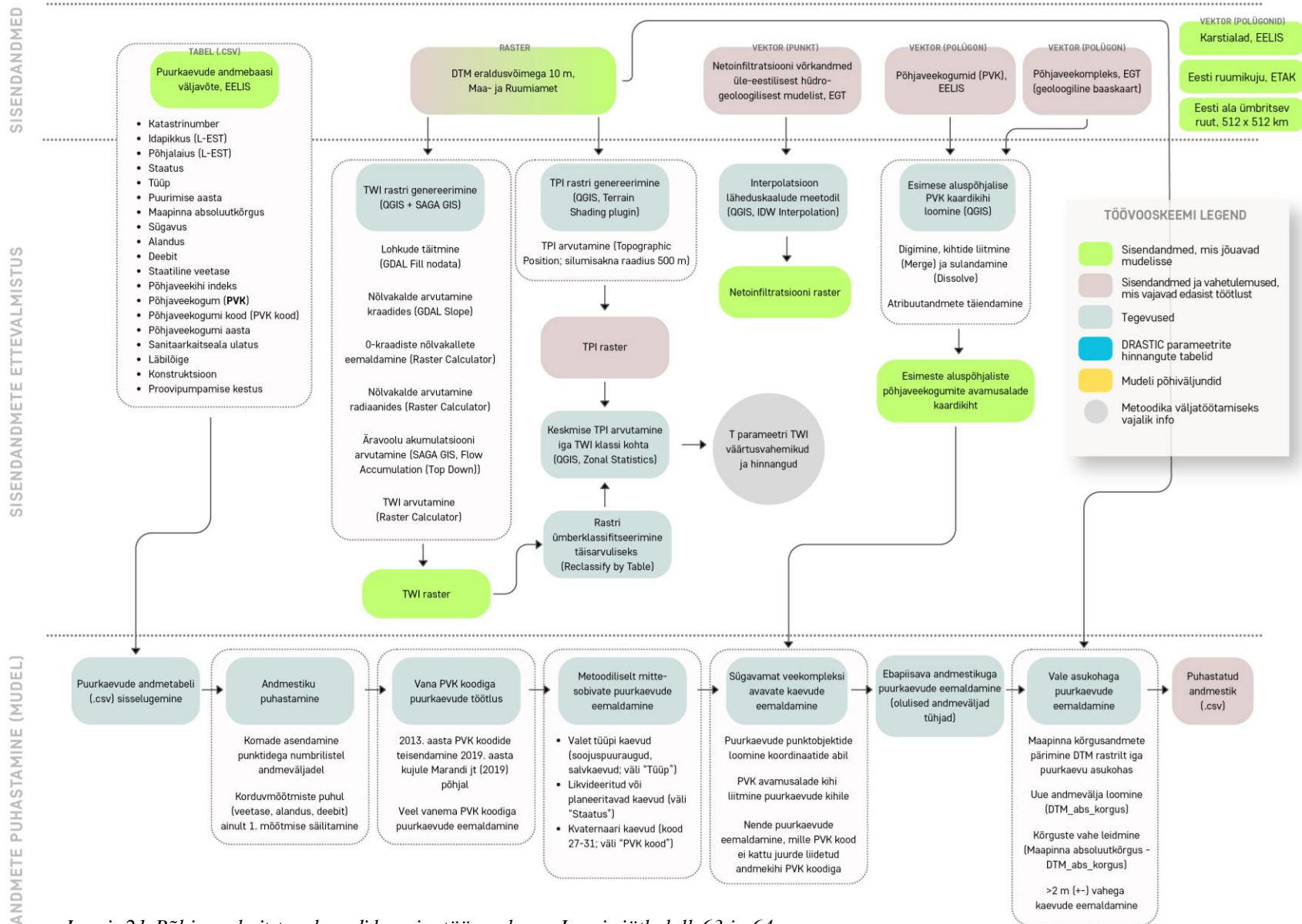
- Männik, M., Karro, E. (2023). Application of Modified DRASTIC Method for the Assessment and Validation of Confined Aquifer Vulnerability in Areas with Diverse Quaternary Deposits. *Water*, 15(20), 3585.
- Männik, M., Karro, E., Marandi, A., Polikarpus, M., Ani, T., Rosentau, A. (2023). Modified DRASTIC method for groundwater vulnerability assessment in areas with diverse Quaternary deposits. *Hydrology Research*, 54(7), 840-854.
- Napolitano, P., Fabbri, A.G. (1996). Single-parameter sensitivity analysis for aquifer vulnerability assessment using DRASTIC and SINTACS. In Proceedings of the 2nd HydroGIS Conference, Vienna, Austria, 16–19 April 1996; Volume 235, pp. 559–566.
- National Research Council. (1993). Ground water vulnerability assessment: Contamination potential under conditions of uncertainty. National Academy Press.
- Neukum, C., Azzam, R. (2009). Quantitative assessment of intrinsic groundwater vulnerability to contamination using numerical simulations. *Science of the total environment*, 408(2), 245-254.
- Niemann, W. L., & Rovey, C. W. (2000). Comparison of hydraulic conductivity values obtained from aquifer pumping tests and conservative tracer tests. *Groundwater Monitoring & Remediation*, 20(3), 122-128.
- Patel, P., Mehta, D., Sharma, N. (2022). A review on the application of the DRASTIC method in the assessment of groundwater vulnerability. *Water Supply*, 22(5), 5190-5205.
- Pavlis, M., Cummins, E., McDonnell, K. (2010). Groundwater vulnerability assessment of plant protection products: A review. *Human and Ecological Risk Assessment*, 16(3), 621-650.
- Perens, R. (2001). Eesti põhjavee kaitstuse kaart 1 : 400 000. Eesti Geoloogiakeskus. Tallinn. EGF7120.
- Perens, R., Parm, T., Savva, V., Lelgus, M. (2004). Saare maakonna põhjavee kaitstuse digitaalse kaardi 1:50 000 koostamine. Eesti Geoloogiakeskus, hüdrogeoloogia osakond. Tallinn.
- Perens, R., Polikarpus, M., Savva, V., Leigus, M., Parm, T. (2002b) Tartu maakonna geoloogiliste digitaalkaartide koostamine. Eesti Geoloogiakeskuse hüdrogeoloogia osakond. Tallinn.
- Perens, R., Savva, V., Polikarpus, M., Parm, T. (2002a). Tallinna (6334) ja Rohuneeme (7312) kaardilehe hüdrogeoloogilised ja põhjavee kaitstuse kaardid mõõtkavas 1:50 000. Eesti Geoloogiakeskus. Tallinn.
- Pöder, T. (2017). Keskkonnamõju hindamise käsiraamat (uuendatud 2018). Keskkonnaministeerium.
- Pöldvere, A., Perens, R., Ariva, K., All, T., Rohtla, R. (2007). Eesti geoloogilise baaskaardi Tartu kaardilehe (5441) seletuskiri. Eesti Geoloogiakeskus. Tartu Regionaalosakond, Tartu.
- Ribeiro, L., Pindo, J. C., Dominguez-Granda, L. (2017). Assessment of groundwater vulnerability in the Daule aquifer, Ecuador, using the susceptibility index method. *Science of the total environment*, 574, 1674-1683.
- Rodriguez, J., Perez, B., Nebot, C., Falque, E., Simal-Gandara, J. (2020). Food production link to underground waters quality in A Limia river basin. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 297, 106969.

- Rodriguez-Galiano, V., Mendes, M. P., Garcia-Soldado, M. J., Chica-Olmo, M., Ribeiro, L. (2014). Predictive modeling of groundwater nitrate pollution using Random Forest and multisource variables related to intrinsic and specific vulnerability: A case study in an agricultural setting (Southern Spain). *Science of the Total Environment*, 476, 189-206.
- Saidi, S., Bouri, S., Dhia, H. B., Anselme, B. (2011). Assessment of groundwater risk using intrinsic vulnerability and hazard mapping: application to Souassi aquifer, Tunisian Sahel. *Agricultural Water Management*, 98(10), 1671-1682.
- Savitskaja, L. (1992). Eesti põhjavee kaitstuse ja antropogeense koormuse kaardi legendi seletuskiri. Mõõtkava 1:50 000. Eesti Geoloogiakeskus. Tallinn–Keila.
- Savitskaja, L. (2007). Rapla linna põhjavee tarbevaru ümberhinnang. Eesti Geoloogiakeskus, Tallinn.
- Savitskaja, L., Viigand, A., Kulitschenko, G. (1982). Geologo-gidroteoloogitsheskoje obosnovaniye ohranõ podzemnõh vod v uslovijah Estonskoi SSR. Tallinn.
- Secunda, S., Collin, M. L., Melloul, A. J. (1998). Groundwater vulnerability assessment using a composite model combining DRASTIC with extensive agricultural land use in Israel's Sharon region. *Journal of environmental management*, 54(1), 39-57.
- Serra, J., Marques-dos-Santos, C., Marinheiro, J., Cruz, S., Cameira, M.R., De Vries, W., Dalgaard, T., Hutchings, N.J., Graversgaard, M., Giannini-Kurina, F., Garnier, J. (2024). Assessing nitrate groundwater hotspots in Europe reveals an inadequate designation of Nitrate Vulnerable Zones. *Chemosphere*, 355, 141830.
- Shih, W., Chai, S. (2016). Data-driven vs. hypothesis-driven research: making sense of big data. In *Academy of management proceedings* (Vol. 2016, No. 1, p. 14843). Briarcliff Manor, NY 10510: Academy of Management.
- Slavinskienė, G., Jurevičius, A. (2016). The influence of landfills located in different hydrogeological systems on Lithuanian groundwater quality. *Baltica*, 29(1), 33-46.
- Struckmeier, W. F., Margat, J. (1995). Hydrogeological maps: a guide and a standard legend (Vol. 17). Hannover: Heise.
- Suuroja, K., All, T., Kõiv, M., Mardim, T., Morgen, E., Ploom, K., Vahtra, T. (2002a). Eesti geoloogiline baaskaart (mõõtkavas 1:50 000). 6343 Maardu. Seletuskiri, 99.
- Suuroja, K., All, T., Kõiv, M., Mardim, T., Morgen, E., Ploom, K., Vahtra, T. (2002b). Eesti geoloogiline baaskaart (mõõtkavas 1:50 000). 6344 Kehra. Seletuskiri, 102.
- Suuroja, K., All, T., Kõiv, M., Mardim, T., Morgen, E., Ploom, K., Vahtra, T. (2002c). Eesti geoloogiline baaskaart (mõõtkavas 1:50 000). 7321 Prangli. Seletuskiri, 72.
- Suuroja, K., All, T., Kõiv, M., Mardim, T., Morgen, E., Ploom, K., Vahtra, T. (2002d). Eesti geoloogiline baaskaart (mõõtkavas 1:50 000). 7322 Loksa. Seletuskiri, 85.
- Sörensen, R., Zinko, U., Seibert, J. (2006). On the calculation of the topographic wetness index: evaluation of different methods based on field observations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 10(1), 101-112.
- Šestakov, B., Kravtsenko, I., Pasakovski, I. (1975). Põhjavee dünaamika praktikum. Moskva Ülikooli Kirjastus, Moskva, 141-142 lk.
- Taghavi, N., Niven, R. K., Paull, D. J., Kramer, M. (2022). Groundwater vulnerability assessment: A review including new statistical and hybrid methods. *Science of the Total Environment*, 822, 153486.
- Tamm, I., Metsur, M. (2017). Põhjaveevaru hindamise juhend. AS Maves. Tallinn.

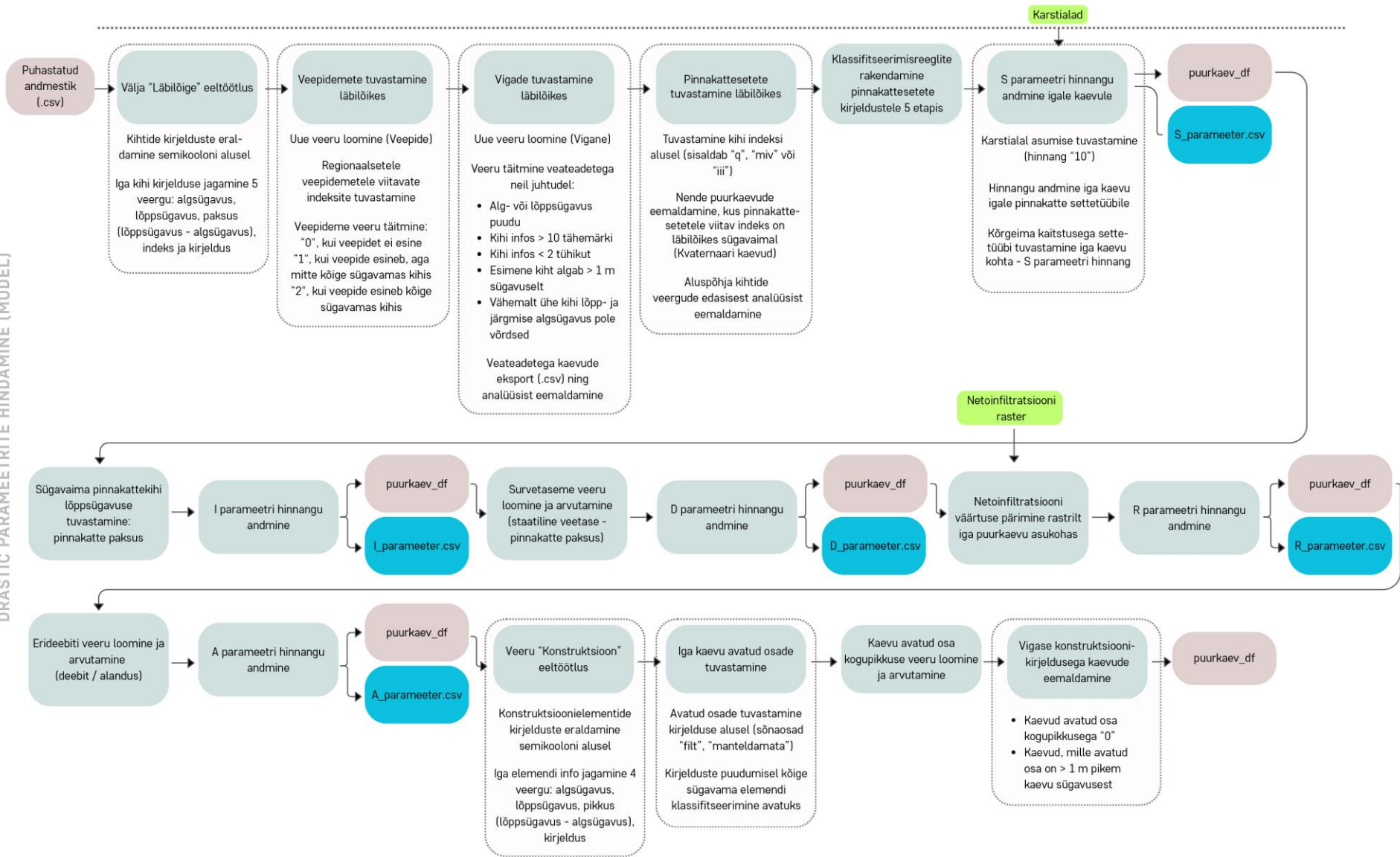
- Terviseamet. (2025). Joogivee kvaliteet Eestis: Kokkuvõte 2024. Kasutatud 15.04.2025, https://www.terviseamet.ee/sites/default/files/documents/2025-02/Joogivee_kvaliteet_Eestis_kokkuvote_2024.pdf
- Tesoriero, A. J., Voss, F. D. (1997). Predicting the probability of elevated nitrate concentrations in the Puget Sound Basin: Implications for aquifer susceptibility and vulnerability. *Groundwater*, 35(6), 1029-1039.
- UNESCO World Water Assessment Programme. (2024). The United Nations world water development report 2024: Water for prosperity and peace. UNESCO Publishing. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000388948>
- 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.
- Veepoliitika raamdirektiiv (2000/60/EÜ). Euroopa Parlamendi ja Nõukogu direktiiv 2000/60/EÜ 23. oktoober 2000, millega kehtestatakse ühenduse veepoliitika alane tegevusraamistik.
- Veeseadus. (2019). RT I, 22.02.2019, 1. Kasutatud 21.04.2025, <https://www.riigiteataja.ee/akt/122022019001>
- Voutchkova, D. D., Schullehner, J., Rasmussen, P., & Hansen, B. (2021). A high-resolution nitrate vulnerability assessment of sandy aquifers (DRASTIC-N). *Journal of Environmental Management*, 277, 111330.
- Wachniew, P., Zurek, A. J., Stumpp, C., Gemitzi, A., Gargini, A., Filippini, M., Witczak, S. (2016). Toward operational methods for the assessment of intrinsic groundwater vulnerability: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 46(9), 827-884.
- VEKA andmebaas. (2025). Puurkaevude andmed. Kasutatud 06.05.2025, <https://veka.keskkonnainfo.ee/veka.aspx>
- Voudouris, K., Kazakis, N., Polemio, M., Kareklas, K. (2010). Assessment of intrinsic vulnerability using the DRASTIC model and GIS in the Kiti aquifer, Cyprus. *European water*, 30(1), 13-24.
- Vu, T. D., Ni, C. F., Li, W. C., Truong, M. H. (2019). Modified index-overlay method to assess spatial-temporal variations of groundwater vulnerability and groundwater contamination risk in areas with variable activities of agriculture developments. *Water*, 11(12), 2492.
- Wang, S. C. (2003). Artificial neural network. In *Interdisciplinary computing in java programming* (pp. 81-100). Boston, MA: Springer US.
- Weiss, A. (2001, July). Topographic position and landforms analysis. *In Poster presentation, ESRI user conference*, San Diego, CA (Vol. 200)
- Witkowski, A. J. (2007). Groundwater vulnerability assessment and mapping important current issues in groundwater protection. *Environmental Geology*, 53(3), 477-478.
- Worrall, F., Besien, T., Kolpin, D. W. (2002). Groundwater vulnerability: interactions of chemical and site properties. *Science of the Total Environment*, 299(1-3), 131-143.

Lisad

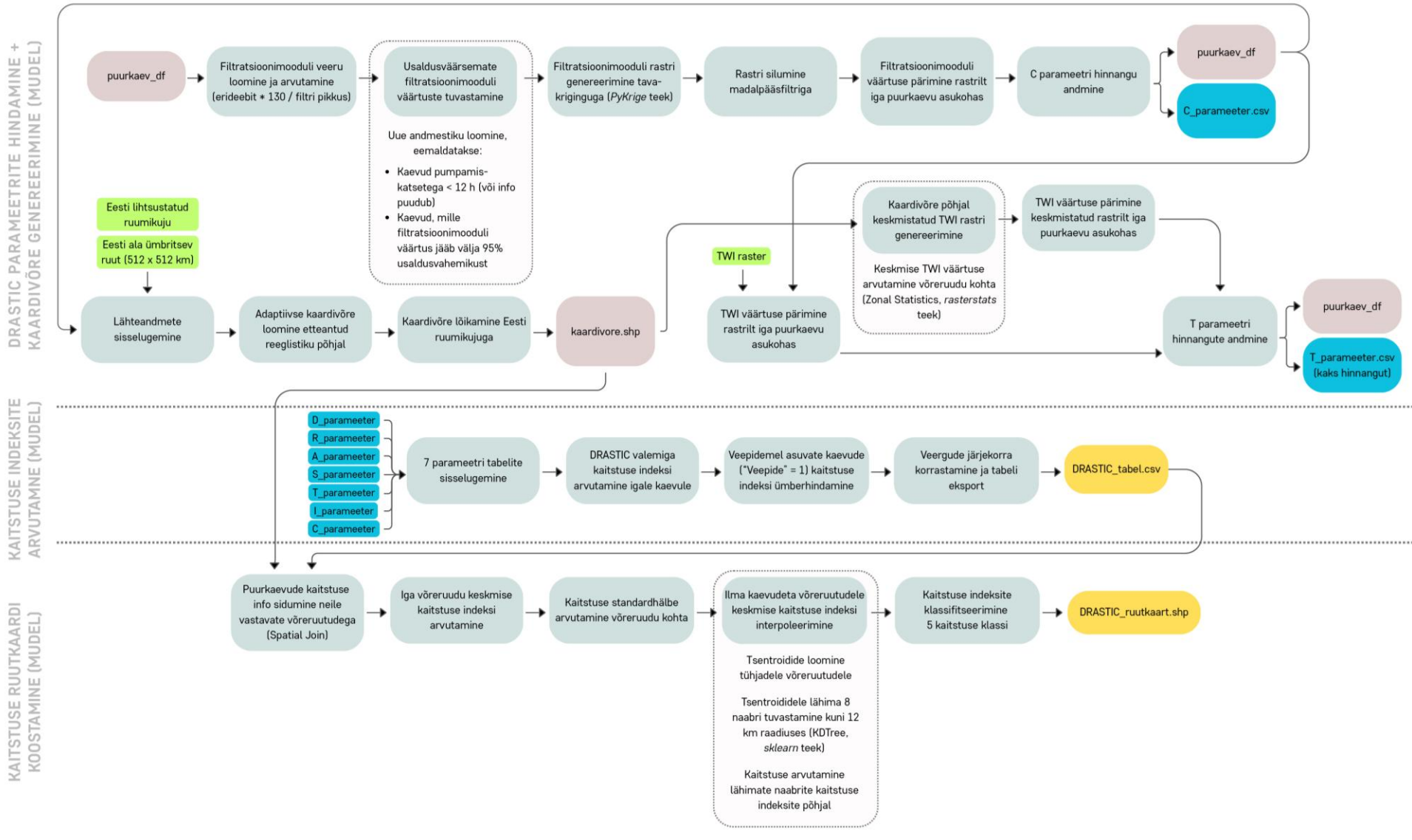
Lisa 1. Põhjavee kaitstuse ruutkaardi loomise töövoog



Joonis 21. Põhjavee kaitstuse kaardi loomise töövooskeem. Joonis jätkub lk 63 ja 64.



Joonis 20, jätk.



Joonis 20, jätk.

Lisa 2. DRASTIC parameetrite tundlikkusanalüüsi tulemused (kogu Eesti)

Tabel 11. Statistika DRASTIC parameetrite ja nende varieeruvuse kohta, kogu Eesti.

Parameeter	Madalaim hinnang	Kõrgeim hinnang	Keskmine hinnang	Standardhälve	Variatsiooni-kordaja (%)
D	1	10	3,8	2,9	76,0
R	1	6	1,3	0,8	58,0
A	3	10	8,7	1,6	18,0
S	1	10	6,4	1,9	28,7
T	1	10	8,2	1,1	13,7
I	1	10	6,7	2,6	39,1
C	1	8	2,4	1,3	55,9

Tabel 12. MRSA tulemused. Mõju kaitstuse kaardile DRASTIC parameetrite ühekaupa eemaldamisel, kogu Eesti.

Eemaldatud parameeter	Variatsiooniindeks (%)				
	Madalaim	Kõrgeim	Keskmine	Standardhälve	Mediaan
D	0,0	5,4	1,2	0,5	1,2
R	0,0	4,9	1,7	0,5	1,9
A	0,0	6,1	1,1	0,9	0,9
S	0,0	6,8	2,0	1,0	1,7
T	0,0	2,4	1,3	0,3	1,4
I	0,0	5,3	1,9	0,8	2,1
C	0,0	2,1	1,5	0,5	1,6

Tabel 13. SPSA tulemused. DRASTIC parameetrite teoreetilised ja tegelikud kaalud, kogu Eesti.

Parameeter	Teoreetiline kaal	Teoreetiline kaal, %	Tegelik kaal, %				
			Madalaim	Kõrgeim	Keskmine	Standardhälve	Mediaan
D	5	19,2	3,5	46,7	12,9	7,8	10,6
R	4	15,4	2	43,6	4,5	3,4	3,2
A	3	11,5	5,7	50,8	20,8	5,5	19,5
S	5	19,2	3,5	54,8	24,7	8	24,3
T	1	3,8	0,3	22,5	6,6	2,1	6,1
I	5	19,2	3,8	46,1	24,8	6,5	26,6
C	3	11,5	1,5	22,2	5,7	3,1	4,7

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Liina Hints,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose „Puurkaevuandmetel põhinev meetodika üle-eestiliseks põhjavee kaitstuse hindamiseks ja visualiseerimiseks“, mille juhendajateks on Magdaleena Männik ja Raivo Aunap, reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni;
2. annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Liina Hints

26.05.2025