

Tartu Ülikool
Loodus- ja täppiseaduste valdkond
Ökoloogia ja maateaduste instituut
Geoloogia osakond

Bakalaureusetöö geoloogias (12 EAP)

Põhjavee kaitstuse kaardi valideerimine tuginedes nitraatide sisaldusele põhjavees

Lizet Tüvi

Juhendajad: Magdaleena Männik,
Enn Karro

Tartu 2024

Põhjavee kaitstuse kaardi valideerimine tuginedes nitraatide sisaldusele põhjavees

Põhjavee kaitstuse kaardid on abiks paljude maa kasutamise ja planeerimise otsuste langetamisel, seega on oluline, et need oleksid võimalikult täpsed. Eesti põhjavee kaitstuse kaardid on koostatud hüdrogeoloogilisi tingimusi arvestava meetodikaga, kuid varasemalt pole kaartide usaldusväärsust valideeritud. Käesoleva töö eesmärk oli kasutada mujal maailmas rakendatavat kaitstuse kaardi valideerimise meetodit, kus põhjavee nitraatide sisaldust võrreldakse põhjavee kaitsuse hinnanguga, et analüüsida meetodi toimimist Eesti tingimustes. Meetodi sobivuse uurimiseks analüüsiti Häädemeeste, Maardu ja Väike-Maarja 1:50 000 mõõtkavas põhjavee kaitstuse kaardilehtedele jäävate puurkaevude nitraatide sisaldusi esimeses aluspõhjalises põhjaveekompleksis.

Märksõnad: Hüdrogeoloogia, põhjavee kaitstus, nitraatide reostus

CERCS kood: P470 Hüdrogeoloogia, geoplaneering ja ehitusgeoloogia

Validating groundwater vulnerability map based on nitrate content in groundwater

Groundwater vulnerability maps are useful for making various land use and planning decisions, and therefore, it is important that they are as accurate as possible. The groundwater vulnerability maps of Estonia have been created using a methodology that takes into account hydrogeological conditions, but they have not been validated previously. The aim of this bachelor's thesis was to apply a groundwater vulnerability map validation method used elsewhere in the world, which is based on groundwater nitrate concentrations, to see if it works under Estonian conditions with Estonian groundwater vulnerability maps. To investigate the suitability of the method, the nitrate concentrations in wells within the 1:50 000 scale groundwater vulnerability map sheets of Häädemeeste, Maardu and Väike-Maarja in the first bedrock aquifer system were analyzed.

Keywords: Hydrogeology, groundwater vulnerability, nitrate pollution

CERCS code: P470 Hydrogeology, geographical and geological engineering

Sisukord

1. Sissejuhatus	4
2. Teoreetiline taust	5
2.1 Põhjavee kaitstus.....	5
2.2 Põhjavee kaitstuse hindamine	6
2.3 Nitraatide sisaldusega põhjavee kaitstuse hinnangu valideerimine	7
3. Andmed ja metoodika.....	9
3.1 Uuringuala iseloomustus.....	9
3.2 Andmetöötlus	13
3.2.1 Eesti looduse infosüsteem.....	13
3.2.2 ArcGIS Pro.....	13
3.2.3 R-Studio	14
4. Tulemused ja arutelu	15
4.1 NO ₃ sisaldused uuringualal.....	15
4.2 Korrelatsiooni graafikud	17
6. Kokkuvõte.....	21
Summary.....	22
Tänuavaldused	23
Kasutatud kirjandus.....	24

1. Sissejuhatus

Põhjavesi on oluline joogivee ressurss, mille kvaliteedi tagamine on hädavajalik jätkusuutlikuks arenguks. Põhjavee kaitseks on oluline põhjavee kaitstuse kaartide koostamine, et kaardistada alasid, mis on reostusele kõige vastuvõtlikumad. Põhjavee kaitstuse kaardid mängivad olulist rolli teadliku maakasutuse- ja planeerimisega seotud otsuste langetamisel, sest need aitavad vältida reostuse jõudmist põhjavette.

Eesti põhjavee kaitstuse kaartide koostamisel on kasutatud meetodikat, mis arvestab piirkonna pinnkatte tüüpi ja paksust. Seniste kaartide koostamise protsessis puudub aga valideerimise etapp, mis on oluline aspekt kaardistuste täpsuse ja usaldusväärsuse tagamiseks. Rahvusvaheliselt on levinud meetod põhjavee kaitstuse kaartide valideerimiseks, mis hõlmab põhjavee nitraadisisalduste analüüsimist. Nitraadid jõuavad põhjavette peamiselt inimtegevuse tulemusel, seega nende leidumine vihjab selgelt põhjavee kaitstuse tasemele antud piirkonnas.

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärk on valideerida Eesti põhjavee kaitstuse kaarte, kasutades selleks põhjavee nitraatide sisaldusi. Töö käigus uuritakse antud meetodi kasutamise võimalust Eesti tingimustes, analüüsitakse Eesti geoloogilise baaskaardi (mõõtkavas 1:50 000) raames Häädemeeste, Maardu ja Väike-Maarja kaardilehtedele koostatud põhjavee kaitstuse kaarte ning nende piires leiduvate puurkaevude nitraatide sisaldusi ja nende vastavust alal oleva põhjavee kaitstuse klassiga.

2. Teoreetiline taust

2.1 Põhjavee kaitstus

Kuigi põhjavee loodusliku kaitstuse mõiste (ingl *groundwater vulnerability*) võeti esmakordselt kasutusele 1960ndatel prantsuse hüdrogeoloog J. Margati poolt, hakati seda laialdasemalt hüdrogeoloogia valdkonnas kasutama 1980ndate lõpus. Terminoloogia kasutuselevõtu ajendiks oli tahe tutvustada üldsusele põhjaveereostusega kaasnevat probleemi. Kuna erinevates piirkondades on põhjavee kaitstuse olud erinevad, hakati selle illustreerimiseks välja töötama kaarte. (Xiong *et al.* 2022)

Põhjavesi on maakoore ülemise osa kivimite pooride ja lõhede sisene vesi, mis liigub raskusjõu toimel ning rõhu alanemise suunas. Kuna vesi imbub pinnasesse vihmamana või lumesulaveena, on see taastuv ressurss, kuid selle taastumise kiirus on piirkonniti erinev. (NGWA 2024)

Põhjavee kaitstuse uuringud on olulised, sest põhjavesi on maailmas üheks peamiseks joogivee allikaks (The United Nations... 2022). Seetõttu on pinnavee kvaliteedi halvenemisel põhjavesi, mis on paremini kaitstud reostuse eest, väga oluline geopoliitiline ressurss (Golovina, Grebneva 2021). Prognooside kohaselt tõuseb nõudlus põhjavee kui joogivee allika järele tulevikus märgatavalt. Seda põhjustab rahvastiku kasv, põllumajanduse intensiivistumine ja majandusliku jõukuse kasv. Sellega kaasneb suurenev põhjavee reostuse oht, sest inimtegevuse mõjul eraldub näiteks põllumajandusest ja tööstusest ohtlikke saasteaineid pinnasesse (Machiwal *et al.* 2018).

Põhjavee kaitstus on omadus, mida ei saa otseselt mõõta. Antud mõiste tugineb ideele, et iga piirkonna põhjavesi on reostusele tundlik, kuid mõned piirkonnad on suurema riskiga kui teised. Seega kaardistatakse ja hinnatakse kaitstuse astet, mis tuleneb erinevatest geoloogilistest ja hüdrogeoloogilistest tingimustest. (Gogu, Dassargues 2000)

Spetsiifilise piirkonna põhjavee kaitstuse astme hinnang reostuse suhtes on seda täpsem, mida rohkem on andmeid ja mida kvaliteetsemad need on. Kaitstuse taseme määrab teekond reostuse allikast põhjaveeni. Põhjavee saastatuse taset ja olemust võivad mõjutada füüsikalised protsessid ning keemilised reaktsioonid, mis toimuvad pinnase küllastumata ja küllastunud tsoonides. (Gogu, Dassargues 2000)

2.2 Põhjavee kaitstuse hindamine

Euroopa teadusprogrammi *COST Action 620* raames arendati välja Euroopa Liidu põhjavee kaitstuse käsitletus, mis annab juhised, mida tuleb arvesse võtta põhjavee kaartide koostamisel (Zwahlen 2004). Lisaks aitavad juhised edendada põhjavett säästvat maakasutust, ning kindlustada vee kvaliteedi säilimist (Zwahlen 2004). Põhjavee kaitstuse kaartide koostamine aitab kaasa põhjavee kaitsega seotud poliitika kujundamisele, sellega seonduvate otsuste langetamisele ning pakub lahendusi, kuidas olemasolevaid põhjaveeressursse säästvalt ja tõhusalt kasutada. Kaardid toovad esile reostuse osas kõige tundlikumad piirkonnad ehk kohad, kus põhjavee saastumise oht on kõige tõenäolisem (Council *et al.* 1993). Eestis koostatakse põhjavee kaitstuse kaarti mõõtkavas 1:50 000 geoloogilise kaardistamise raames.

Eesti põhjavee kaitstuse kaartidel jaotatakse veeseaduse §68 (Veeseadus 2019) põhjal Eesti territoorium kaitstuse hinnangu alusel viide klassi (tabel 1). Looduslikult tundlikumatel aladel ei kaitse põhjavett pinnakate ja aluspõhja kivimid piisavalt, mistõttu saasteained jõuavad kiirelt põhjavette. Kui panna põhjavee looduslikult kõige tundlikumate tsoonide kaart kokku kaardiga, kuhu on märgitud potentsiaalsete saastekohtade asukohad, saab genereerida reaalse reostusohu riski kaardid (Gogu, Dassargues 2000).

Kaardi koostamisel määratletakse kõigepealt esimese aluspõhjalise veekompleksi või Kvaternaari veekompleksi kuuluva põhjaveekihi leviku piirkond. Järgnevalt eraldatakse leviku piirkonnas setete litoloogia ja paksuse järgi alad (tabel 1). Seejärel tuuakse välja põhjavee kaitstust mõjutavad tegurid, nähtused ning nende levik. Nendeks on näiteks karstialad, regionaalsete veepidemete avamus või ülevoolualad. Viimasena antakse eelneva info põhjal piirkonnale kaitstuse klass. (Maaamet 2015)

Tabel 1. Põhjavee kaitstuse hindamiseks kasutatav klassifikatsioon, tuginedes pinnakatte paksusele ja piirkonna geoloogilistele omadustele (Maa-amet 2009)

Põhjavee kaitstuse klass	Reostus-ohhtlikkuse tase	Pinnakatte paksus (m)		Piirkonna kirjeldus
		Moreen, aleuriit, saviliiv	Savi, liivsavi	
Kaitsmata	Väga kõrge	< 2	-	Alvar, karstiaala, aluspõhja lõikuv vooluveekogu
Nõrgalt kaitstud	Kõrge	2 – 10	< 2	
Keskmiselt kaitstud	Keskmine	10 – 20	2 – 5	Aluspõhjaline veepide, mille paksus on üle 2 m, tasakaaluala
Suhteliselt kaitstud	Madal	20 – 50	5 – 10	Põhjavee ülevoolu piirkond
Kaitstud	Väga madal	> 50	> 10	Regionaalne veepide

2.3 Nitraatide sisaldusega põhjavee kaitstuse hinnangu valideerimine

Eesti põhjavee kaitstuse kaardi korrektsuse valideerimiseks kasutati uuringualadel paiknevatest puurkaevudest võetud veeproovide nitraatide sisaldusi. Nitraatide kontsentratsioon on tähtis joogivee kvaliteeti iseloomustav indikaator. Lämmastikureostus on nii Eestis kui mujal maailmas aktuaalne probleem, mis tuleneb peamiselt inimtegevusest ja põllumajanduslikust reostusest (Kalvans *et al.* 2021, Koit *et al.* 2023). Seetõttu on maailma eri piirkondades kasutatud just nitraadi sisaldusi põhjavee kaitstuse hinnangute valideerimiseks (Maqsoom *et al.* 2021, Goodarzi *et al.* 2022, Gupta, Kumari 2023). Valideerimisel lähtutakse eeldusest, et kaitsmata alade põhjavees on nitraatide sisaldus tänu aktiivsele veevahetusele ja sellest tulenevale reoaine intensiivsele infiltratsioonile kõrge ning kaitstud piirkondades, kus reoainete liikumine on takistatud, madalaim.

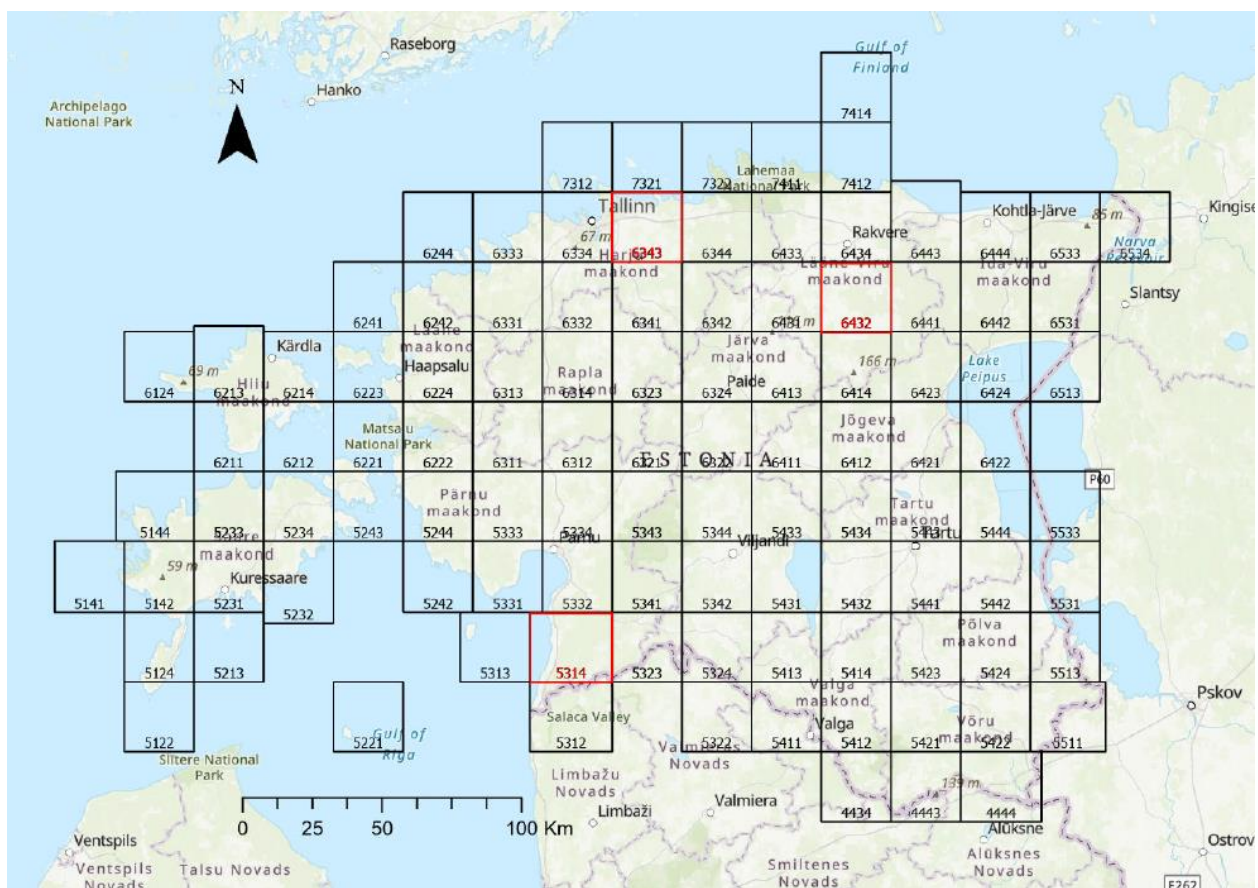
Euroopa Liidu nitraadidirektiivi alusel on nitraaditundlik ala piirkond, kus inimtegevus on põhjustanud või võib põhjustada nitraatide sisalduse põhjavees üle 50 mg/l (Council Directive 98/83/EC 1998). Nitraadidirektiivi peamine eesmärk on vähendada põllumajanduses lämmastikväetiste kasutamist. Eesti nitraadidirektiivi täitmise 2016-2019 a. aruande põhjal ei ole vaatamata rakendatud põhjavee kaitsemeetmetele nitraadisisalduse vähenemist lähitulevikus ette näha (Keskkonnaministerium... 2020). Seetõttu on Eestis olulisel kohal põhjavee nitraadisisalduse seire ja nitraadid asjakohane parameeter, mille abil valideerida hinnangut põhjavee kaitstusele.

Põhjavee kaitstuse kaarte kasutatakse maa planeerimisel ning keskkonnavalaseid otsuseid tehes, mistõttu on oluline, et need kirjeldaksid põhjavee kaitstust võimalikult täpselt. Eesti põhjavee kaitstuse kaardid on küll koostatud võttes arvesse pinnakatte tüüpi ja paksust arvestava meetodikaga, kuid seni ei ole kaarte varem valideeritud. Seega, antud töö eesmärgiks on rakendada maailmas laialdaselt kasutatust leidnud nitraatidega põhjavee kaitstuse kaardi valideerimise meetodit, et testida selle toimimist Eesti tingimustes Eestis kasutusel oleva põhjavee kaitstuse kaartide koostamise meetodikaga.

3. Andmed ja meetodika

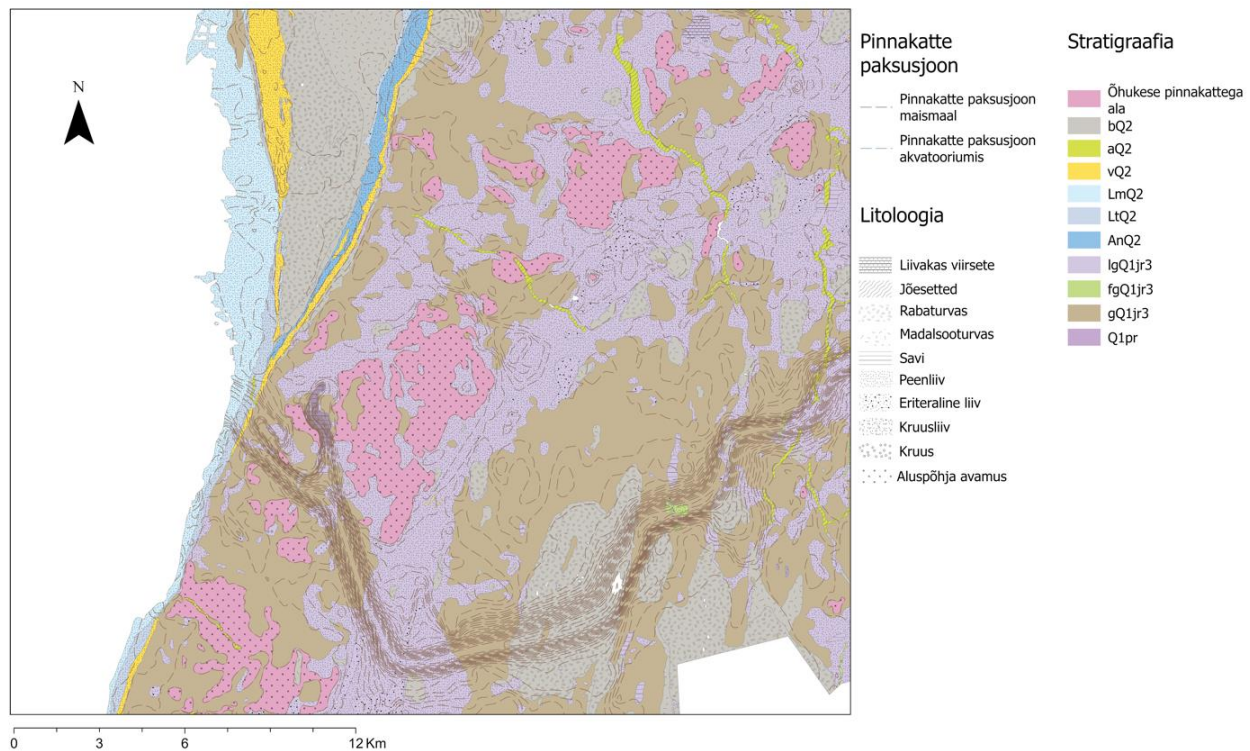
3.1 Uuringuala iseloomustus

Käesoleva töö uuringualadeks valiti kolm üksteisest erinevat ja seetõttu huvipakkuvat kaardilehte (joonis 1) Eesti geoloogiliselt baaskaardilt: Häädemeeste, Väike-Maarja ja Maardu. Häädemeeste kaardileht (nr 5314) valiti seal asuvate mattunud orgude ja geoloogilises läbilõikes esineva regionaalse veepideme tõttu. Maardu kaardileht (nr 6343) valiti, sest piirkonnas esineb ulatuslik inimtekkeline reostus ning klindias tang. Väike-Maarja kaardileht (nr 6432) valiti, kuna seal on piiritletud nitraaditundlik ala ja aastakümneid toimunud intensiivne põllumajandustegevus.



Joonis 1. Eesti geoloogilise baaskaardi kaardilehed, punase kirja ja raamiga on märgitud kaardilehed, mis valiti antud bakalaureusetöö uuringualadeks (Aluskaart: ArcGIS, Kaardilehede info: Maa-amet)

Kõigi kolme uuringuala kohta on koostatud põhjavee kaitstuse kaardid Maa-ameti geoloogilise baaskaardi koostamise juhendi seletuskirjas toodud meetodika alusel (Maa-amet 2015).

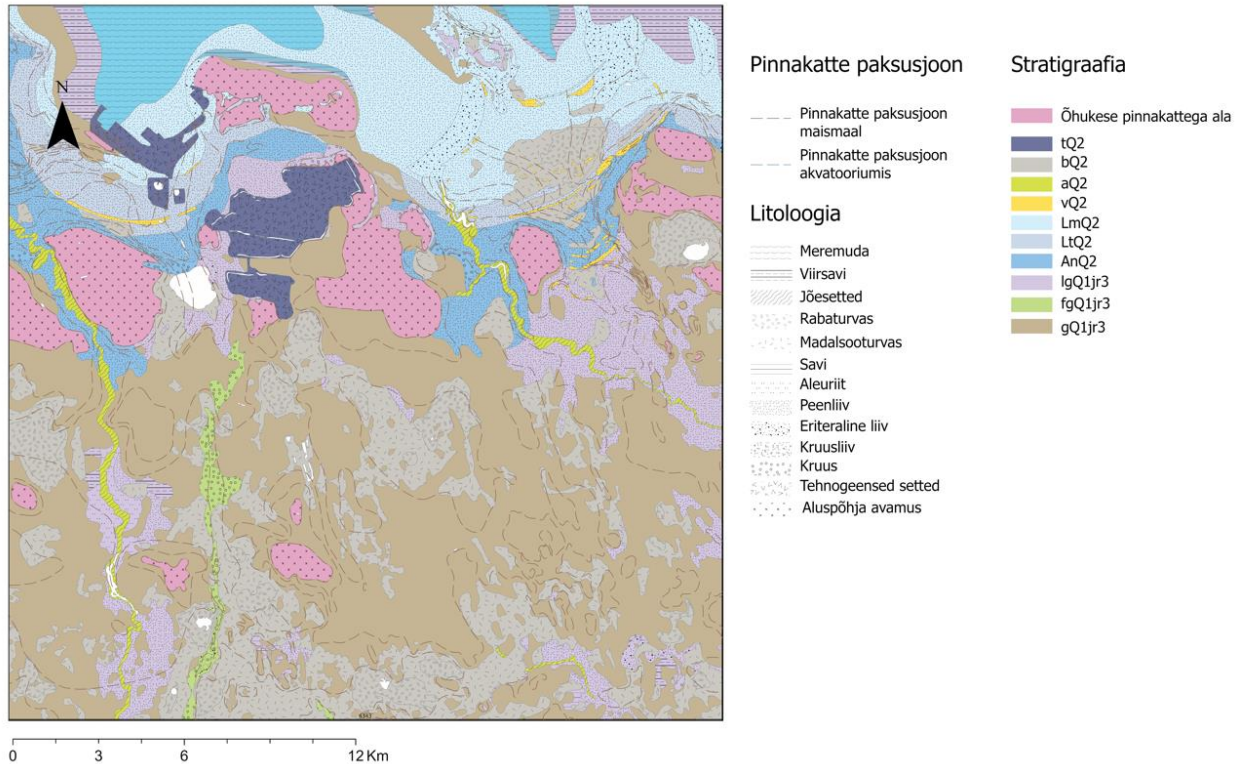


Joonis 2. Settetüübid Häädemeeste kaardilehe piires (Eesti Geoloogiateenistus 2024)

Häädemeeste kaardilehe piirkonnas on esimene aluspõhjaline veekompleks, kas Kesk-Alam-Devoni või Kesk-Devoni põhjaveekompleks. Häädemeeste kaardilehel (joonis 2) on pinnakatte paksused varieeruvad. Kaardilehe keskosas on pinnakatte paksus äärmiselt õhuke Balti jääpaisjärve kulutava tegevuse tõttu, kohati alla ühe meetri. Häädemeeste alal asuval Rannametsa luitealal võib pinnakatte paksus ulatuda 25-35 meetrini. Veel paksemad setted (75-200 m) esinevad mattunud orgudes, mis on Devoni avamusel aluspõhja kivimitesse lõikunud. Pinnakatte setetest on kaardilehe piirkonnas enim levinud glatsiaalsed setted (moreenid), limnoglatsiaalsed setted (liivad, savid), soosetted (rabaturvas) ja vähemal määral tuulesetted, Limneamere ja Antsülusjärve setted (liivad). (Ploom *et al.* 2021)

Maardu kaardilehe piirkonnas (joonis 3) on esimene aluspõhjaline veekompleks Siluri-Ordoviitsiumi või Ordoviitsiumi-Kambriumi põhjaveekompleks. Suuremal osal kaardilehest paikneb maapinnalt esimene põhjaveekiht Ordoviitsiumi karbonaatkivimeis, mis on lõhelised ja karstunud. Ordoviitsiumi veekompleksist kasutavad põhjavett valdavalt eratarbijad,

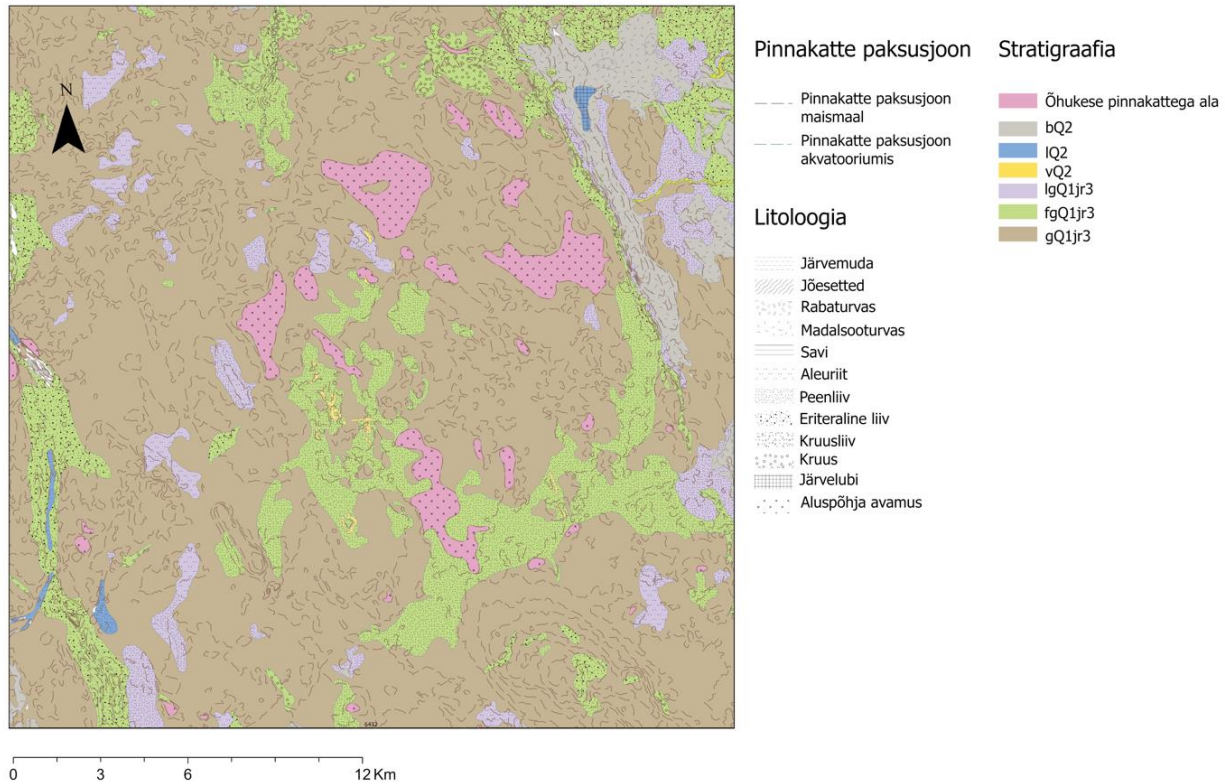
ühisveevarustuses veekompleksi eriti ei kasutata, kuna see on õhukese pinnakatte ja kiire veevahetuse tõttu tundlik reostuse suhtes. (Suuroja *et al.* 2002)



Joonis 3. Settetüübid Maardu kaardilehe piires (Morgen 2002)

Maardu kaardilehel on väga õhuke kiht pinnakatet või see puudub üldse (joonisel roosa värviga märgitud alad, kus aluspõhja kivimid). Geoloogilises läbilõikes esinevad lõhelised ja karstunud karbonaatsed kivimid. Ka neid katvat savikihti leidub ainult üksikutes kohtades, seega ala on väga soodne põhjavee reostumiseks. Valdavad pinnakatte setted on moreenid, soosetted, jääjärvesetted (liiv) ja Balti mere setted. Vähemal määral esineb jõesedteid ja glatsiofluviaalseid setteid. Moreeni paksus on enamuse alal kuni 10 m, kuid võib klindilahtedes olla kuni 70 m. Balti mere setted (siniste värvidega joonisel), kvarts-päevakivi peeneteralise liivad ja möllid, hõlmavad suurema osa kaardilehe põhjaosast, ning nende paksus on 2-5 m. Paeplatoo servaalal on pinnakatte paksused alla paari meetri ning esineb ka alvareid. (Suuroja *et al.* 2002)

Väike-Maarja kaardilehel (joonis 4) paikneb suur osa Pandivere kõrgustikust, kus esineb hulganisti karstialasid. Väike-Maarja kaardilehe piirkonnas paikneb esimene aluspõhjaline veekompleks Siluri-Ordoviitsiumi kivimeis, mis on lõhelised ja karstunud. (Suuroja *et al.* 2015)



Joonis 4. Settetüübid Väike-Maarja kaardilehe piires (Morgen 2015)

Lisaks asub Väike-Maarja kaardilehel Pandivere nitraaditundlik ala. Põllumajandusega kaasneva võimaliku lämmastikureostuse tõttu hinnatakse selle mõju põhjaveele puuraukude, allikate ja karstivee kaudu ning pikaajalise põhjavee keemilise koostise seire tulemusena on kogunenud suur hulk nitraadisalduse määranguid. Peale selle, et tegemist on intensiivse põllumajandustegevusega piirkonnaga, mõjutab põhjavee kaitstust oluliselt kaardilehe piires väga õhuke pinnakate. Valdavad settetüübid on moreenid, glatsiofluviaalsed setted (liivad, kruusad) ja soosetted, vähemal määral jääjärvelised peeneteralised setted, järvesetted ja tuulesetted. Moreenid levivad peaaegu kogu kaardilehe ulatuses, Pandivere kõrgustiku lael jääb nende paksus alla 2 m, mujal on see 15-20 m. Kohati moreenid puuduvad liustiku kulutava tegevuse tõttu, seega võivad moreenid puududa mitte ainult alvaritel, vaid ka glatsiofluviaalsete setete all. Glatsiofluviaalsed setted lasuvad moreenidel või aluspõhja lubjakividel ning on varieeruva paksusega, kõige rohkem kuni 45 m. (Suuroja *et al.* 2015)

3.2 Andmetöötlus

3.2.1 Eesti looduse infosüsteem

Uuringualadel paiknevate puurkaevude veeproovide analüüsitulemused saadi Eesti looduse infosüsteemist (EELIS). EELIS on andmebaas, mis koondab erinevaid Eesti loodust puudutavaid andmeid ning haldab neid. Lisaks andmete otsingule võimaldab EELIS tutvuda andmestiku põhjal tehtud statistiliste analüüsidega.

Parameetrid, mida iga puurkaevu kohta EELIS-est päriti, olid puurkaevu katastri nr, koordinaadid, sügavus (m), põhjaveekogumi nimetus ja proovivõtu aeg. Põhjavee saastuse indikaatorina ning põhjavee kaitstuse valideerimiseks kasutati EELIS-sse koondatud nitraatide sisaldusi.

Päringu tulemusena saadi andmestik, mida korrastati Excelis. Andmekogumist eemaldati analüütilised tulemused, mille puhul ei olnud tuvastatav, millisest põhjaveekogumist või põhjaveekihist veeproov oli võetud ja nitraadisaldus määratud. Lisaks, kui ühest puuraugust oli võetud aastate jooksul mitu veeproovi, siis andmestikku jäeti alles ainult viimase proovi tulemus.

3.2.2 ArcGIS Pro

EELIS-est saadud uuringualade puurkaevude analüüsitulemuste korrastatud Exceli tabelid lisati ArcGIS Pro programmi csv failidena (ArcGIS Pro). Tabelis olevad puurkaevude andmed lisati kaardile kasutades tööriista “XY Table To Point”.

Andmestikust eemaldati puurkaevud, mis ei kuulu esimesse aluspõhjalisse veekompleksi. Häädemeeste ja Maardu aladel, kuhu jääb kaks erinevat maapinnalt loetuna esimest veekompleksi, kasutati kõigepealt “Feature Class To Feature Class” tööriista, ning “Select” tööriista, et eraldada veekompleksid eraldi kihtidena ja kustutada ära puurkaevud, mille analüüsid olid pärit sügavamal lasuvatest veekompleksidest. Eraldi kihtidena sorteeritud veekompleksid ühendati uuesti kokku “Merge” tööriista kasutades. Väike-Maarja uuringualalt ei olnud tarvis sorteerimist teha, kuna ala piires levib üks esimene aluspõhjaline veekompleks.

Eesti põhjavee kaitstuse hinnangu kaardikiht (Eesti Geoloogiateenistus 2024) viidi “Polygon To Raster” tööriista kasutades raster-kujule. Puurkaevude atribuuttabelisse lisati väärtused, vastavalt millisesse põhjavee kaitstuse klassi alasse nad kuuluvad, kasutades tööriista “Extract Values to Points”. Väärtused lisati kaitstuse klassi põhjal järgnevalt: kaitstud alale vastab nr 1, suhteliselt kaitstud alale nr 2, keskmiselt kaitstud alale nr 3, nõrgalt kaitstud alale nr 4, ning kaitsmata alale nr 5.

Korrastamise tulemusel saadi kokku andmetöötlemiseks kokku Hädemeeste uuringuala kohta 176, Maardu uuringuala kohta 694 ja Väike-Maarja uuringuala kohta 462 NO₃ analüüsitulemust.

Andmetöötlemisel kasutati kõiki kaeve kuid valideerimist tehti ka kindla sügavusintervalliga, kus kasutati ainult kuni 30 m sügavusi kaeve. Kuna Väike-Maarja ja Maardu kaardilehtede esimene aluspõhjaline põhjaveekiht on Silur-Ordoviitsiumi veekompleks, siis eraldati välja kaevud, mis paiknevad aktiivses veevahetuse tsoonis kuni 30 m sügavusel (Perens, Vallner 1997). Et kaardilehti analüüsida sama meetodikaga, valiti ka Hädemeeste alal kuni 30 m sügavused kaevud. Kuni 30 m sügavusel puurkaeve oli Hädemeeste uuringuala kohta 39, Maardu uuringuala kohta 500 ja Väike-Maarja uuringuala kohta 177 ning seega sama palju ka NO₃ analüüsitulemusi.

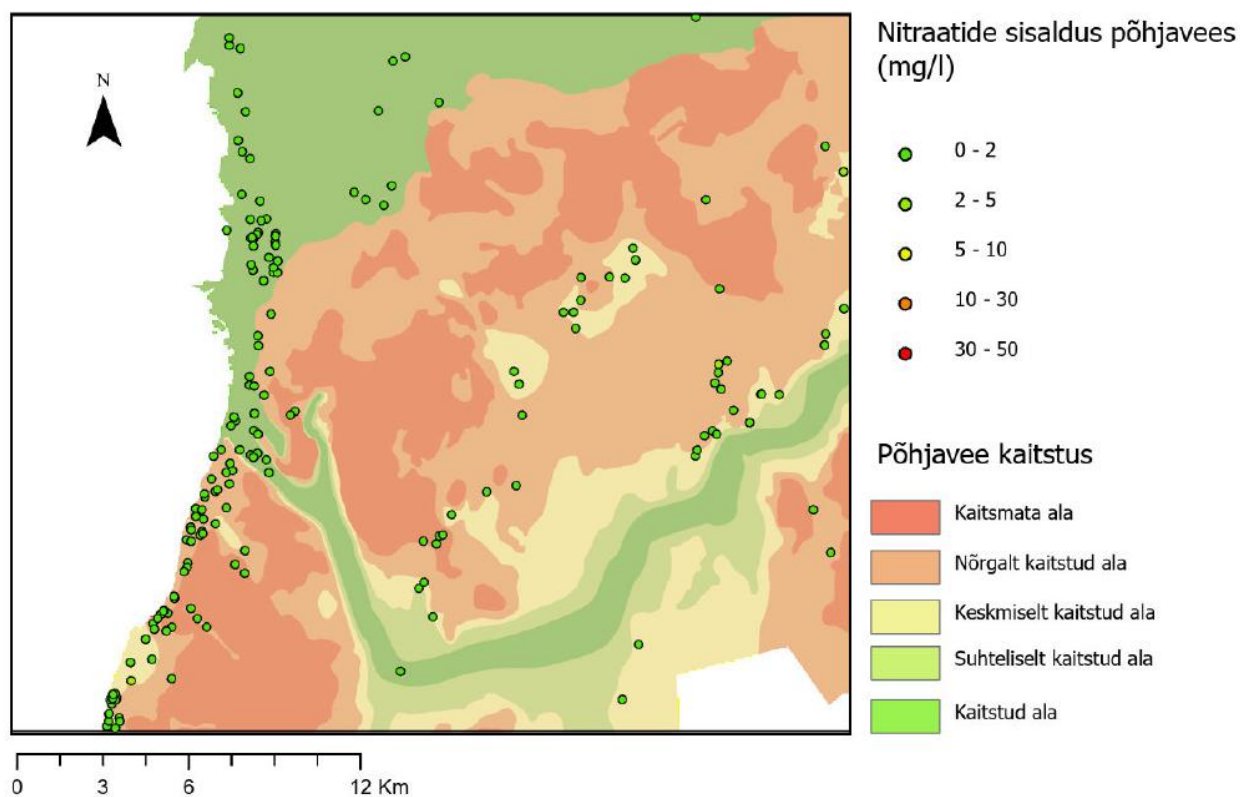
3.2.3 R-Studio

Saadud tulemuste statistiline analüüs viidi läbi R-Studio-ga (R Core Team 2011). Kaartide usaldusväärsuse valideerimiseks leiti uuringualadel korrastatud puurkaevude korrelatsioon põhjavee kaitstuse ja nitraatide sisalduse vahel. Leiti Spearmani korrelatsiooni kordaja ja determinatsiooni koefitsient. Valiti just Spearmani korrelatsioon, mis on vastupidav kõrvalekallete mõjule ja suudab hinnata erinevat tüüpi korrelatsioone, nii lineaarseid kui ka mittelineaarseid. R-i abil koostati ka korrelatsiooni graafikud. Arvutused tehti piirkonniti eraldi kõikide andmetöötlemiseks valitud kaevudega ning igal uuringualal ainult kuni 30 m sügavusteni ulatuvate kaevudega, aga ka kõigi kolme uuringuala andmeid koos kasutades.

4. Tulemused ja arutelu

4.1 NO₃ sisaldused uuringualal

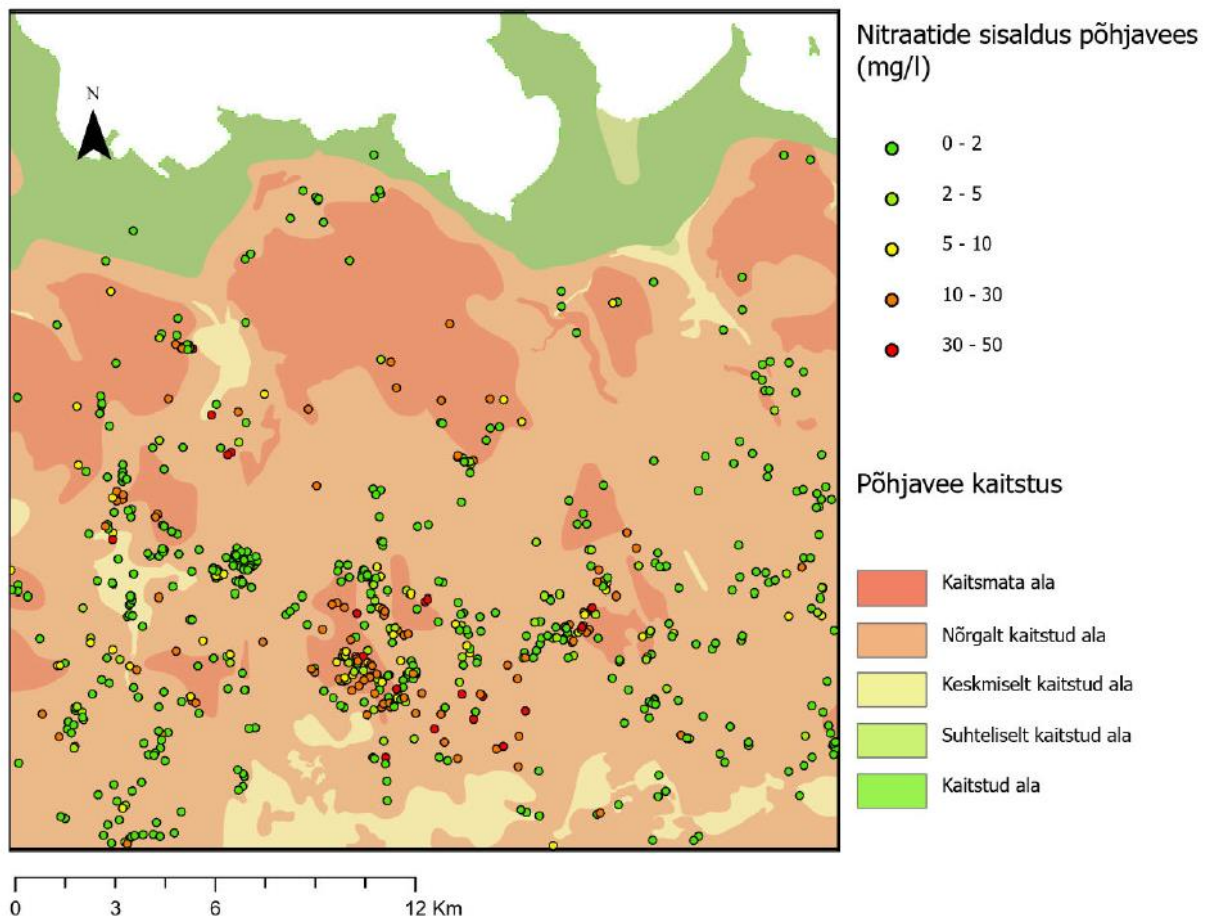
Uuringualade põhjavee kaitstuse ja esimese aluspõhjalise põhjaveekogumi kaevude nitraatide sisalduste jooniste põhjal on näha, et kõige madalamad on NO₃ sisaldused Häädemeeste piirkonnas (joonis 5), kus sisaldused jäävad enam jaolt vahemikku 0–5 mg/l. Maardu kaardilehe alal (joonis 6) jäävad sisaldused enamasti vahemikku 0–10 mg/l, kuid on ka kõrgema sisaldusega tulemusi (30–50 mg/l). Väike-Maarja uuringualal (joonis 7) on kõige rohkem kõrgemate NO₃ sisaldusega alasid.



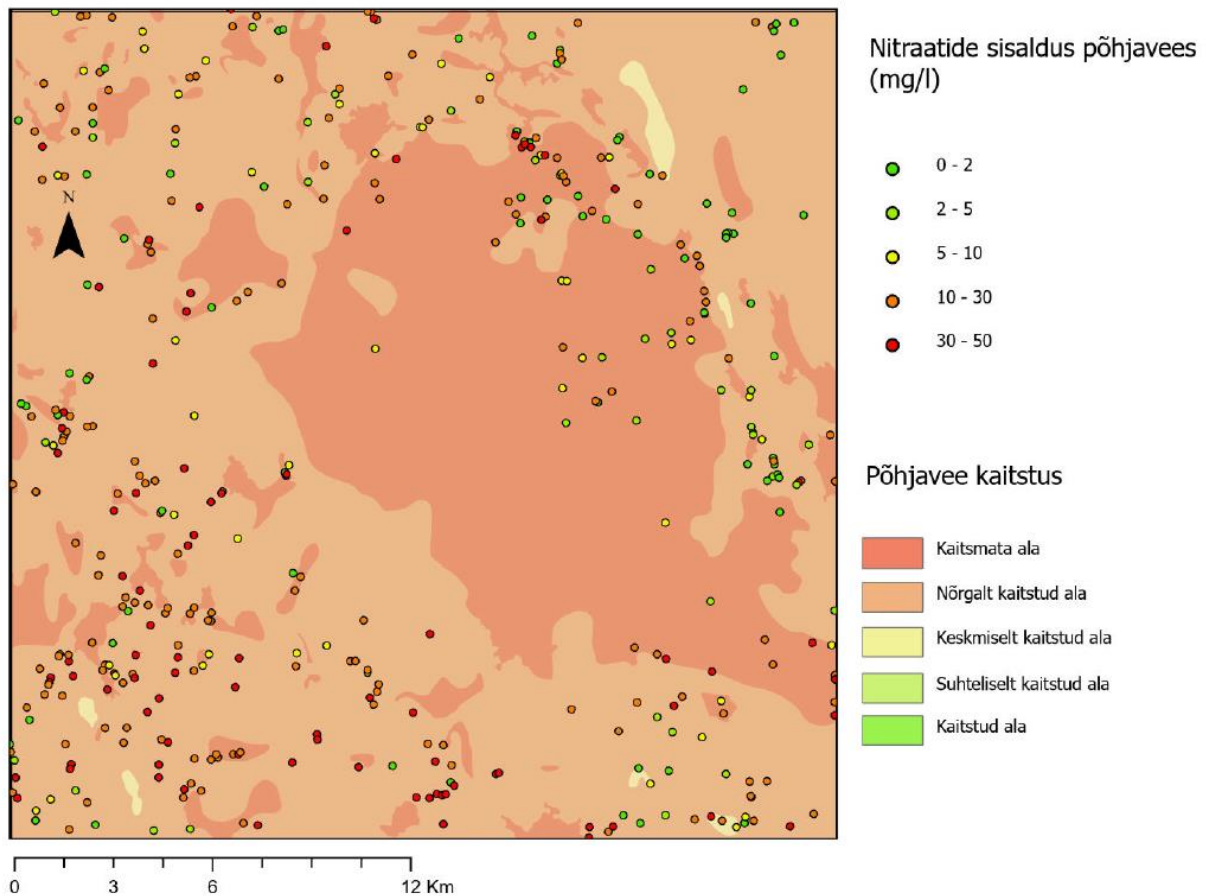
Joonis 5. Häädemeeste uuringuala kaart (Männik 2024), mis kirjeldab piirkonna põhjavee kaitstust (kaitsmata ala, nõrgalt kaitstud ala, keskmiselt kaitstud ala, suhteliselt kaitstud ala või kaitstud ala) ja puurkaevudest võetud põhjaveeproovide nitraatide sisaldusi (mg/l)

Kõigi kolme kaardilehel tuleb märkida, et suure osa territooriumi puhul on tegemist, kas kaitsmata või nõrgalt kaitstud alaga. Teistest eristub märkimisväärselt Väike-Maarja kaardileht (joonis 7),

kus esinevad vaid kaitsmata ja nõrgalt kaitsmata põhjavee piirkonnad. Kui vaadelda kaitstud või suhteliselt kaitstud piirkondi võib tõdeda, et nende piires ei esine kõrgeid nitraatide sisaldusi. Häädemeeste kaardilehe puhul (joonis 5) esinevad madalad nitraatide sisaldused ka kaitsmata alale jäävates puurkaevudes. Samas teiste kaardilehtede puhul, kus on paljudel juhtudel põhjavesi kaitsmata või nõrgalt kaitstud, põhjavee nitraadi sisalduse ja kaitstuse astme vahel seos puudub. Ehk ka piirkondades, kus põhjavesi on reostusohtlik, esineb kaevudest võetud põhjavee nitraatide sisaldused on alla 5 mg/l.



Joonis 6. Maardu uuringuala kaart (Mardim 2002), mis kirjeldab piirkonna põhjavee kaitstust (kaitsmata ala, nõrgalt kaitstud ala, keskmiselt kaitstud ala, suhteliselt kaitstud ala või kaitstud ala) ja puurkaevudest võetud põhjaveeproovide nitraatide sisaldusi (mg/l)



Joonis 7. Väike-Maarja uuringuala kaart (Mardim 2014), mis kirjeldab piirkonna põhjavee kaitstust (kaitsmata ala, nõrgalt kaitstud ala, keskmiselt kaitstud ala, suhteliselt kaitstud ala või kaitstud ala) ja puurkaevudest võetud põhjaveeproovide nitraatide sisaldusi (mg/l)

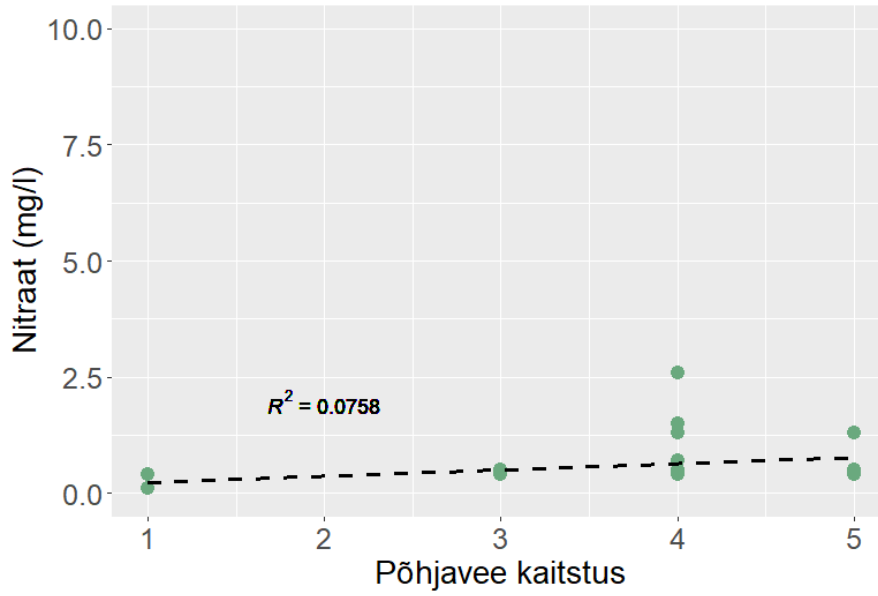
4.2 Korrelatsiooni graafikud

R-Studio abil tehtud korrelatsiooni analüüside tulemustes (tabel 2) on näha, et nii igal uuringualal eraldi kui ka kõikide alade puurkaevude tulemusi koos analüüsides, on nitraatide sisalduste ja põhjavee kaitstuse klassi vahel olev korrelatsioon väga nõrk või olematu.

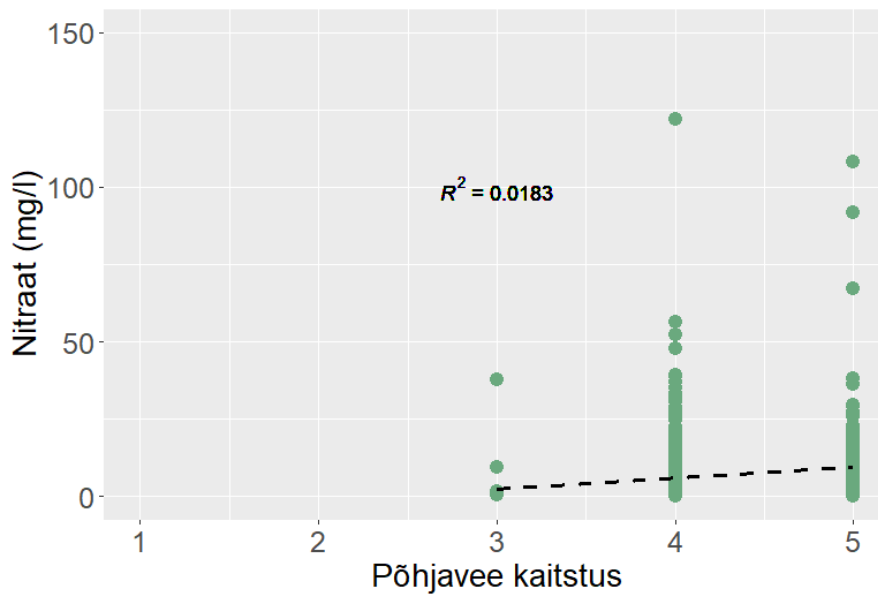
Tabel 2. R Studio-ga saadud uuringualade korrelatsioonikoefitsiendid põhjavee nitraatide sisalduse ja põhjavee kaitstuse klassi vahel

	p - väärtus	Spearman
Häädemeeste kõik kaevud	0.1806	0.1019656
Häädemeeste kuni 30 m sügavused kaevud	0.08905	0.2796556
Maardu kõik kaevud	0.00000057	0.1884621
Maardu kuni 30 m sügavused kaevud	0.00000097	0.2173198
Väike-Maarja kõik kaevud	0.8679	-0.008006851
Väike-Maarja kuni 30 m sügavused kaevud	0.1942	0.1009638
Kõik kaevud kokku	0.000000000000000022	0.2494218
Kõik kuni 30 m sügavused kaevud	0.00000000019	0.2369469

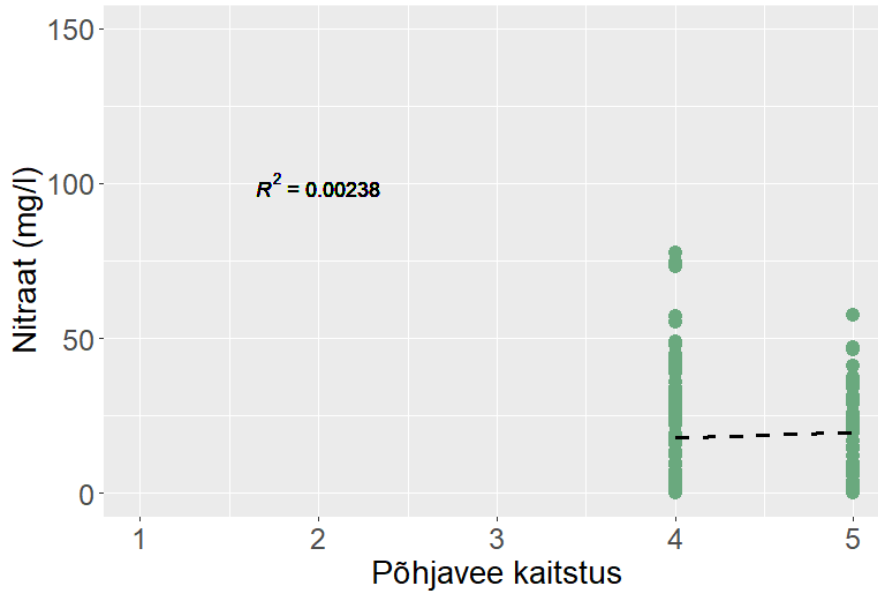
R-Studio abil tehti ka korrelatsiooni graafikud, millelt on näha, et uuritavate väärtuste vahelised korrelatsioonid on nõrgad. Uuringualadest kõige tugevama korrelatsiooniga on Häädemeeste (joonis 8), järgnevalt Maardu (joonis 9) ja kõige madalama Väike-Maarja (joonis 10). Kõigi kolme uuringuala kuni 30 m sügavuseni ulatuvate kaevude nitraatide sisalduste korrelatsiooni graafik (joonis 11) viitab samuti põhjavee nitraadi sisalduse ja kaitstuse klassi vahelisele nõrgale korrelatsioonile. Seega, käesolevas töös tehtud analüüs näitab selgelt, et Eesti tingimustes nitraatide sisaldused ei sobi olemasoleva põhjavee kaitstuse kaardi valideerimiseks. Antud juhul on arvestatud ainult kahe teguriga – põhjavee nitraadi sisaldus ja põhjavee kaitstus. Nitraatide sisalduse kirjeldamisel peab arvestama ka reaalsete reostusallikate (näiteks laudad, sõnnikuhoidlad jms) paiknemise ja maakasutusega (põllumaa, metsamaa, asulad) ning põhjavee liikumisega. Viimased seletaksid täpsemalt võimalikku nitraatse reostuse levikut kaardipildis, mis võib kuid ei pruugi olla otseselt seotud põhjavee kaitstusele antud hinnanguga antud piirkonnas.



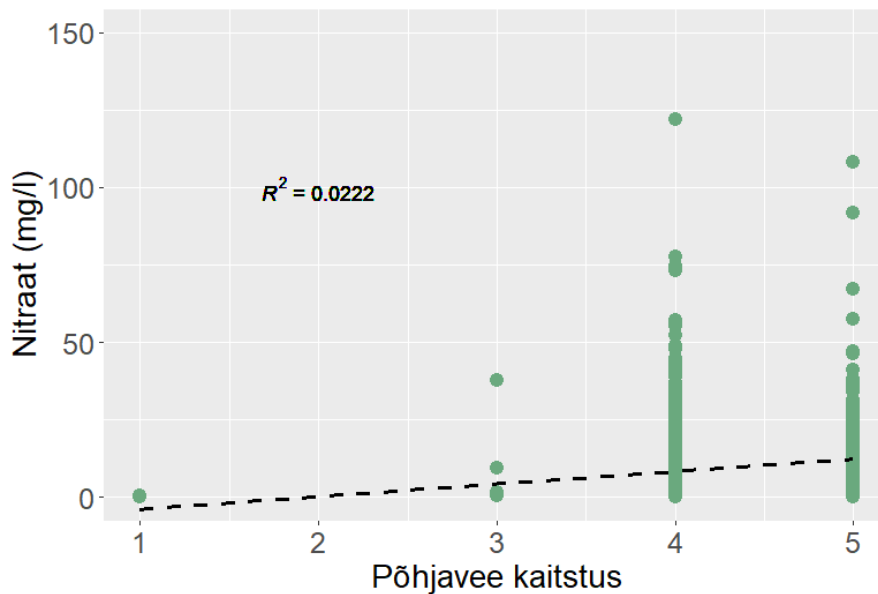
Joonis 8. Häädemeeste kaardilehe kuni 30 m sügavuseni ulatuvate puurkaevude nitraatide sisalduste korrelatsiooni graafik alal esineva põhjavee kaitstusega klassiga. Valimisse jäi 39 kaevu, kus nitraatide sisaldused jäid vahemikku 0–2,6 mg/l. Põhjavee kaitstuste klasside tähendused: 1 = kaitstud ala, 2 = suhteliselt kaitstud ala, 3 = keskmiselt kaitstud ala, 4 = nõrgalt kaitstud ala, 5 = kaitsmata ala



Joonis 9. Maardu kaardilehe kuni 30 m sügavuseni ulatuvate puurkaevude nitraatide sisalduste korrelatsiooni graafik alal esineva põhjavee kaitstusega klassiga. Valimisse jäi 500 kaevu, kus nitraatide sisaldused jäid vahemikku 0–125 mg/l. Põhjavee kaitstuste klassid vt joonis 8



Joonis 10. Väike-Maarja kaardilehe kuni 30 m sügavuseni ulatuvate puurkaevude nitraatide sisalduste korrelatsiooni graafik alal esineva põhjavee kaitstusega klassiga. Valimisse jäi 177 kaevu, kus nitraatide sisaldused jäid vahemikku 0–80 mg/l. Põhjavee kaitstuste klassid vt joonis 8



Joonis 11. Kõigi kolme uuringuala kuni 30 m sügavuseni ulatuvate kaevude nitraatide sisalduste korrelatsiooni graafik alal esineva põhjavee kaitstusega klassiga. Valimisse jäi 716 kaevu, kus nitraatide sisaldused jäid vahemikku 0 – 125 mg/l. Põhjavee kaitstuste klassid vt joonis 8

6. Kokkuvõte

Käesoleva töö eesmärk oli kasutada põhjavee kaitstuse kaardi valideerimise meetodit, mis toimub põhjavee nitraatide sisalduse analüüsil. Eesmärk oli kontrollida, kas antud meetod töötab Eesti põhjavee kaitstuse kaartide puhul, keskendudes Hädemeeste, Maardu ja Väike-Maarja kaardilehtedel hinnatud põhjavee kaitstuse klassidele ja nende piiresse jäävate puurkaevude nitraatide sisaldustele esimeses aluspõhjalises põhjaveekompleksis.

ArcGIS-i ja R-Studio abil koostatud joonised ning korrelatsioonikoefitsientide arvutused väljendavad, et põhjavee kaitstuse klasside ja nitraatide sisalduste vahel esineb teatav seos, kuid need korrelatsioonid on siiski üsna nõrgad. Sellest võib järeldada, et põhjavee kaitstuse kaardi valideerimise meetodika nitraatide sisalduse kaudu ei pruugi olla hea meetodika Eesti põhjavee kaitstuse kaardi jaoks.

Üheks võimalikuks põhjuseks võib olla asjaolu, et Eestis pole nitraatide reostus nii laialdane kui mujal maailmas, kus seda meetodikat on edukalt rakendatud. Nitraatidega valideerimismeetodi edukaks toimimiseks võiks teoreetiliselt eeldada lausalist nitraatide reostust. Vastasel juhul tekivad piirkonnad, kus põhjavee kaitstuse tase on madal, aga puudub reostuse allikas, mistõttu me ei näe reostust põhjavees ja korrelatsioon nõrgeneb.

Tulevikus oleks põhjavee kaitstuse kaartide valideerimiseks Eestis soovitatav uurida nitraaditundlikust lisaks geoloogiale ka maakasutuse aspektist. Lisaks põhjavee kaitstuse kaartidele oleks otstarbekas koostada ka reaalse reostusohu riski kaarte, mis võtavad arvesse lisaks geoloogilistele ja hüdrogeoloogilistele tingimustele ka inimõju. Antud kaartide puhul muutuvad looduslikult kõrge reostusohuga alad madalama riskiga aladeks kui maakasutuse poolest on näiteks tegemist inimõjust puutumatute metsaaladega.

Samuti võiks analüüsi läbiviies vaadata ka suuremaid sügavusintervalle, sest põhjavee nitraatide sisaldus sõltub keskkonna redokstingimustest. Maapinnalähedases pinnavees on rohkesti hapnikku, mis soodustab lämmastiku esinemist nitraadina. Sügavuse suunas hapniku sisaldus väheneb ja nitraat redutseeritakse ammooniumlämmastikuks.

Validating groundwater vulnerability map based on nitrate content in groundwater

Lizet Tüvi

Summary

The main objective of this thesis was to use groundwater vulnerability map validation method, which involves analyzing nitrate concentrations in groundwater, to determine if it works under Estonian conditions. The aim was to verify whether this method is effective for Estonian groundwater vulnerability maps by focusing on the vulnerability classes assessed in the Häädemeeste, Maardu and Väike-Maarja map sheets and the nitrate concentrations in wells within these classes in the first bedrock groundwater complex.

The diagrams and correlation coefficient calculations prepared using ArcGIS and R-Studio indicate that there is some relation between the groundwater vulnerability classes and nitrate concentrations, but these correlations are quite weak. From this, it can be concluded that the methodology of validating groundwater vulnerability maps based on nitrate content may not be a good method for the Estonian groundwater vulnerability map.

One possible reason could be that nitrate pollution is not as widespread in Estonia as it is in other countries in the world where this methodology has been successfully applied. For the nitrate validation method to work successfully, we could theoretically assume widespread nitrate pollution. Otherwise, areas with low groundwater vulnerability levels but no pollution sources will emerge, leading to no observed pollution in the groundwater and weakening the correlation.

Additionally, it would be beneficial to include deeper than 30 m wells and their nitrate concentrations in the analysis, because nitrate concentrations depend on the oxygen content in groundwater.

Tänuavaldused

Töö autor tänab oma juhendajaid Magdaleena Männikut ja Enn Karrot, kes olid toeks töö valmimisel, aitasid ideedega ning andsid häid nõuandeid.

Kasutatud kirjandus

- ArcGIS Pro | Uue põlvkonna ArcGIS Desktop tarkvara | AlphaGIS. <https://www.gisbaltic.eu/et-ee/product/arcgis-pro/overview> (vaadatud 2024-05-17)
- Council Directive 98/83/EC of 3 November 1998 on the quality of water intended for human consumption. 1998. <http://data.europa.eu/eli/dir/1998/83/oj/eng> (vaadatud 2024-05-22)
- Council, N. R., Studies, D. on E. and L., Resources, C. on G., Environment and and Vulnerability, C. for A. G. W. 1993. *Ground Water Vulnerability Assessment: Predicting Relative Contamination Potential Under Conditions of Uncertainty*. National Academies Press. <https://nap.nationalacademies.org/read/2050/chapter/3>
- EELIS. <https://infoleht.keskkonnainfo.ee/artikkel/-164545161> (vaadatud 2024-05-17)
- Gogu, R. C. and Dassargues, A. 2000. Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. *Environmental Geology*, **39**(6), 549–559. <https://doi.org/10.1007/s002540050466>
- Golovina, E. I. and Grebneva, A. V. 2021. Management of groundwater resources in transboundary territories (on the example of the Russian Federation and the Republic of Estonia). *Journal of Mining Institute*, **252**, 788–800. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.6.2>
- Goodarzi, M. R., Niknam, A. R. R., Jamali, V. and Pourghasemi, H. R. 2022. Aquifer vulnerability identification using DRASTIC-LU model modification by fuzzy analytic hierarchy process. *Modeling Earth Systems and Environment*, **8**(4), 5365–5380. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01408-4>
- Gupta, T. and Kumari, R. 2023. Assessment of groundwater nitrate vulnerability using DRASTIC and modified DRASTIC in upper catchment of Sabarmati basin. *Environmental Earth Sciences*, **82**(9), 216. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-10880-9>
- Kalvans, A., Popovs, K., Priede, A., Koit, O., Retike, I., Bikše, J., et al. 2021. Nitrate vulnerability of karst aquifers and associated groundwater-dependent ecosystems in the Baltic region. *Environmental Earth Sciences*, **80**. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09918-7>
- Keskkonnaministeerium, Maaeluministeerium, Keskkonnaagentuur. 2020. Nõukogu direktiivi 91/676/EMÜ, veekogude kaitsmise kohta põllumajandusest lähtuva nitraadireostuse eest, täitmine Eestis 2016-2019. Aruanne Euroopa Komisjonile. Tallinn.
- Koit, O., Retike, I., Bikše, J., Terasmaa, J., Tarros, S., Abreldaal, P., et al. 2023. Hydrochemical signatures of springs for conceptual model development to support monitoring of

- transboundary aquifers. *Groundwater for Sustainable Development*, **21**, 100927. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.100927>
- Maa-amet: Põhjavee kaitstuse teemakaardi koostamisel kasutatav klassifikatsioon. 2009. https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/Geoloogilised-andmed/Geoloogiline_baaskaart-1-50000/Teemakaartide-kirjeldused-p721.html (vaadatud 2024-05-20)
- Machiwal, D., Jha, M. K., Singh, V. P. and Mohan, C. 2018. Assessment and mapping of groundwater vulnerability to pollution: Current status and challenges. *Earth-Science Reviews*, **185**, 901–927. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.08.009>
- Maqsoom, A., Aslam, B., Alwetaishi, M., Awais, M., Hassan, U., Maqsoom, S., et al. 2021. A GIS-Based Groundwater Contamination Assessment Using Modified DRASTIC Geospatial Technique. *Water*, **13**(20), 2868. <https://doi.org/10.3390/w13202868>
- Mardim, T., (2002). Eesti Geoloogiline Baaskaart. Põhjavee kaitstus. Leht 6343 Maardu. Eesti Geoloogiakeskus. Tallinn
- Mardim, T., (2014). Eesti Geoloogiline Baaskaart. Põhjavee kaitstus. Leht 6343 Väike-Maarja. Eesti Geoloogiakeskus. Tallinn
- Männik, M., (2024). Eesti Geoloogiline Baaskaart. Põhjavee kaitstus. Leht 6343 Häädemeeste. Eesti Geoloogiateenistus. Rakvere
- NGWA. <https://www.ngwa.org/what-is-groundwater/About-groundwater> (vaadatud 2023-11-06)
- Ploom, K., Suuroja, K., Morgen, E., Kaljuläte, K., Shtokalenko, M., Plado, J. 2021. Eesti geoloogilise baaskaardi Pärnu-Jaagupi (5334), Pärnu (5332), Häädemeeste (5314) ja Ikla (53 12) kaardilehtede komplekt. Seletuskiri. Eesti Geoloogiateenistus, Rakvere.
- R Core Team. R Studio; R Core Team: Vienna, Austria, 2011.
- Suuroja, K., All, T., Kõiv, M., Mardim, T., Morgen, E., Ploom, K., Vahtra, T., 2002. Eesti geoloogiline baaskaart (mõõtkavas 1:50 000). 6343 Maardu. Seletuskiri, 99.
- Suuroja, K., Kaljuläte, K., Mardim, T., Morgen, E., Ploom, K., Shtokalenko, M., Vahtra, T. 2015. Eesti geoloogilise baaskaardi Väike-Maarja (6432) leht. Seletuskiri. Eesti Geoloogiakeskus. Kaardistamise osakond, Tallinn.
- The United Nations World Water Development Report 2022: groundwater: making the invisible visible - UNESCO Digital Library. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380721> (vaadatud 2024-05-24)

- Veeseadus–Riigi Teataja. 2019. <https://www.riigiteataja.ee/akt/122022019001> (vaadatud 2024-05-26)
- Xiong, H., Wang, Y., Guo, X., Han, J., Ma, C. and Zhang, X. 2022. Current status and future challenges of groundwater vulnerability assessment: A bibliometric analysis. *Journal of Hydrology*, **615**, 128694. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128694>
- Zwahlen, F. 2004. Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers, final report COST action 620. <https://libra.unine.ch/handle/123456789/14179> (vaadatud 2023-11-06)

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Lizet Tüvi,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose „**Põhjavee kaitstuse kaardi valideerimine tuginedes nitraatide sisaldusele põhjavees**“, mille juhendajad on Magdaleena Männik ja Enn Karro, 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.

Lizet Tüvi
27.05.2024