

TARTU ÜLIKOOL
ÖKOLOOGIA JA MAATEADUSTE INSTITUUT
GEOLOOGIA OSAKOND

Hüdrogeoloogiline uuring Pandivere ja Adavere- Põltsamaa nitraaditundliku alal põhjavee ning saasteainete liikumise ja veehaarete toitealade määramiseks modelleerimise meetodil

Aruanne

Argo Jõelet, Raul Paat, Enn Karro, Kristjan Piirimäe

Tartu 2024

Kokkuvõte

Jõelegt, A, Paat, R., Karro, E., Piirimäe, K. 2024. Hüdrokeoloogiline uuring Pandivere ja Adavere-Põltsamaa nitraaditundliku alal põhjavee ning saasteainete liikumise ja veehaarete toitealade määramiseks modelleerimise meetodil. Tartu Ülikool.

Uuringu eesmärgiks on hüdrokeoloogilise modelleerimise teel kindlaks teha Pandivere ja Adavere-Põltsamaa nitraaditundliku ala (NTA) piires välja valitud pilootalal paiknevate veehaarete (puurkaevude) toitealad, selgitamaks millisest suunast ning alalt põhjavesi, sh saasteained veehaaretesse (puurkaevudesse) liiguvad.

Pilootalaks valiti Väike-Maarja läheduses 20 x 17 km suurune territoorium, mis ulatub Tamsalust Simunani. Ala valikul lähtuti juba olemasolevast andmestikust, seirepunktide olemasolust ning haritava maa katvusest. Valiku tegemisel mängis rolli ka Vaikmäe jt. (2020) uuring, milles lisaks tavapärasele põhjavee keemilise koostise uurimisele tehti isotoopanalüüse vee vanuse ja nitraadi päritolu selgitamiseks.

Uuringu käigus analüüsiti kahel korral 21 puurkaevu ja 3 allika põhjavee keemilist ja isotoopkoostist. Üldiselt on nitraadi sisaldus pilootalal mõnevõrra väiksem (20–40 mg/l) Tartu–Rakvere maanteest läänes ja pilootala idaosas suurem olles peamiselt vahemikus 30–60 mg/l (piirväärtus 50 mg/l), erandlike juhtumitega (0–20 mg/l) Avanduse ja Äntu külades. Nitraadisalduse ja puurkaevude sügavuse vahel ei ilmne selget korrelatsiooni.

Veeproovides määratud nitraadi lämmastiku ($\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$) ja hapniku ($\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$) isotoopkoostis võimaldab pidada põhjavee kõrgeenenud nitraadi põhjustajaks mitut algallikat, kuna lämmastikvæetistest, mullast ning sõnnikust ja heitveest tulenevad nitraadid võivad kujuneda koostiselt sarnasteks. Veeproovide lahustunud hapniku sisaldus näitab, et põhjavees toimub mõningane denitrifikatsioon, mille tulemusena $\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ muutub positiivsemaks (kaugeneb ammooniumvæetistele iseloomulikest väärtustest).

Vee hapniku ja vesiniku isotoopkoostis annab tunnistust sademeveelise päritolust, kuid selles ei ole näha hooajalist muutlikkust ehk vee koostis ei kujune hooaja jooksul. See on kooskõlas Vaikmäe jt. (2020) triitium-heelium meetodil määratud infiltratsiooni näivvanusega, mis enamasti

on vahemikus 7–26 aastat, erandjuhtudel null ja 37 aastat. Vee näivvanus ei sõltu puurkaevu sügavusest, kuid on täheldatav, et vanem vesi on väiksema nitraadisisaldusega.

Hüdrokeoloogiline mudel tugineb Virumudelil ja võtab arvesse, et nitraaditundlikul alal on aluspõhja karbonaatkivimid ülemise 20 m ulatuses karstumise tõttu väga heade filtratsiooniomadustega. Mudeli kohaselt asub maapinnalähedaste põhjaveekihtide veelahkmeala pilootala põhjaosas Tamsalu–Pandivere lähisel, uuritud puurkaevudesse voolab vesi põhja- ja kirdekaarest. Veelahkmele lähemal on puurkaevude toiteala väiksem ulatuses kuni 1–2 km kaugusele, pilootala keskosas tüüpiliselt 2–4 km kaugusele, kohati kuni 5–6 km kaugusele puurkaevust. Kõigi puurkaevude toitealadele jäävad põllumassiivid. Ülemises, hästi vettjuhtivas osas on põhjavee maksimaalne vanus tüüpiliselt 10–20 aastat (kuni 25 aastat). Puurkaevudega avatud sügavamates veekihtides on vee liikumine aeglasem ning sisaldab vett, mis infiltreerus enam kui 30 aastat tagasi. Puurkaevudesse ja allikatesse jõudev vesi kujuneb erineval kaugusel ja ajal infiltreerunud sademeveest ning seejuures domineerib maapinnalähedase hästi vettjuhtiva kihi vesi. Modelleerimise tulemused on heas kooskõlas Vaikmäe jt. (2020) põhjavee näivvanuse määrangutega.

Majanduspoliitilise konteksti järgi võiks eristada kolme perioodi, mis Eesti põllumajanduses saasteainete heidet on suunanud: (1) plaanimajanduse periood kuni aastani 1991, millele oli iseloomulik intensiivne väetiste ja kemikaalide kasutus, (2) vaba turumajanduse periood 1991–2003, kui põllumajandus kiratses ja väetisi kasutati vähem, ning (3) Euroopa Liidu ühtse põllumajanduspoliitika (ÜPP) periood, mil on rakendatud keskkonnasõbraliku majandamise (KSM) ja mahetootmise meetmeid, kuid ka ühtse pindalatoetuse (ÜPT) meedet alates 2004. aastast, mille tulemusena on kasvanud üldine lämmastikväetiste kasutamine. Kuigi nõukogude ajast on põhjavee seireandmeid vähem, võib täheldada sarnaseid trende nitraadi sisalduse andmetes.

Perioodi 2013–2023 pilootala põllumajandusliku maakasutuse analüüs näitab ainult väikesi muutusi. Valdav osa põllumassiividest on põllukultuuride all ja ainult 10% on püsirohumaad. Kümne aasta jooksul ei ole oluliselt muutunud PRIA toetuseluste põllumassiivide paiknemine ega pindala, umbes võrdselt põlde lisandus ja jäi välja. Rohumaastamine või ülesharimine on toimunud suhteliselt väikeste eraldipaiknevate põldude kaupa, tervikuna vähem kui kümnel protsendil maast. Puurkaevude toitealade ümber on põllumaad, millele valdavalt taotletakse keskkonnasõbraliku majandamise toetust.

Sisukord

KOKKUVÕTE	2
1. SISSEJUHATUS	5
2. TAUST	6
2.1. VEEUURINGUD NITRAADITUNDLIKUL ALAL	6
<i>NTA seirevõrgu ajaline dünaamika</i>	<i>13</i>
2.2. PÕLLUMAJANDUSLIK NITRAATIDE HEIDE NTA-L	16
<i>Veekaitsemeetmed põllumajanduses</i>	<i>16</i>
<i>Saasteainete põllumajandusliku hajuheite trendid</i>	<i>17</i>
3. METOODIKA	20
3.1. PÕHJAVEE KOOSTIS	20
3.2. PÕHJAVEE MODELLEERIMINE	23
3.3. PÕLLUMAJANDUSKESKKOND NING RAKENDATUD MEETMED	25
<i>Meetmete ajaline ja ruumiline kaardistamine</i>	<i>25</i>
<i>Lähteandmed</i>	<i>28</i>
4. TULEMUSED JA ARUTELU	29
4.1. NITRAADI LEVIK JA TRENDID	29
<i>Põhielemendid, nitraat ja isotoobid pilootalal võetud veeproovides</i>	<i>29</i>
<i>Nitraadisisalduse pikaajalised trendid pilootalal</i>	<i>37</i>
4.2. PÕHJAVEE VOOLAMINE	41
4.3. MAAKASUTUSE JA LÄMMASTIKU HEITE MUUTUSED	47
<i>Põllumajandusliku maakasutuse üldiseloostus</i>	<i>47</i>
<i>Põllumajandustootjad ja nende maakasutus</i>	<i>50</i>
<i>Põllumajanduskoormuse vähendamise meetmed</i>	<i>51</i>
5. JÄRELDUSED	54
<i>Soovitused edasisteks tegevusteks</i>	<i>55</i>
SUMMARY	57
KASUTATUD KIRJANDUS	59

1. Sissejuhatus

Pandivere kõrgustiku ja Adavere-Põltsamaa piirkonna geoloogiline ehitus ja reljeefsus tingivad selle, et maapinnalt lähtuv reostus jõuab kiiresti pinna- ja põhjavele. Nendes piirkondades esinevad viljakad mullad ning suured põllumassiivid, mille läheduses paiknevates puurkaevudes on ajalooliselt olnud probleemiks joogiveele kehtestatud piirväärtusi ületavad nitraatide ja taimekaitsevahendite kontsentratsioonid ja nende kasvusuundumused.

Käesoleva uuringu, mille tellijaks on Keskkonnaamet, eesmärgiks on hüdrogeoloogilise modelleerimise teel kindlaks teha Pandivere ja Adavere-Põltsamaa nitraaditundliku ala (NTA) piires välja valitud pilootalal paiknevate veehaarete (puurkaevude) toitealad, selgitamaks millisest suunast ning alalt põhjavesi, sh saasteained veehaaretesse (puurkaevudesse) liiguvad. Vastavalt uuringu lähteülesandele kaardistati toitealal veekvaliteeti mõjutavad tegevused ning kirjeldati meetmed nendele veehaarete toitealadele, kus on tõendatud nitraatide sisalduse kasvu suundumused.

Pilootalaks valiti 20x17 km suurune territoorium Väike-Maarja läheduses. Uuringu käigus võeti veeproove põhjavee keemilise ja isotoopkoostise analüüsimiseks, modelleeriti põhjavee toitumist ning liikumissuundi. Lisaks analüüsiti põllumajandustegevusega seotud maakasutuse muutmist ning võimalikke suundumusi pinna- ja põhjavee nitraadi sisalduses. Tuvastamaks ja eristamaks üksteisest erinevaid nitraatse reostuse allikaid (mineraalväetised, sõnnik, heitveed) mõõdeti veeproovide nitraadist hapniku ($\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$) ja lämmastiku ($\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$) sisaldusi ja analüüsiti nende suhted.

2. Taust

2.1. Veeuringud nitraaditundlikul alal

Pandivere ja Adavere-Põltsamaa nitraaditundlik ala (NTA) on tänu oma geoloogilisele ehitusele üks põhilisi põhjavee varude moodustumise piirkondi Eestis. Sealt saavad alguse nii majandusliku kui looduskaitseliku tähtsusega jõed: Pärnu, Põltsamaa, Pedja, Kunda jõgi jt. Piirkonna olulisust on riiklikul tasemel mõistatud alates 1988. aastast kui moodustati Pandivere riiklik veekaitseala. Sellele järgnevatel aastatel on laiendatud kaitseala piire, kehtestatud nitraaditundliku ala kaitse-eeskiri, koostatud tegevusplaane hea veeseisundi saavutamiseks ja tagamiseks. Kui mitmed suuremad punktreostuskolded (reoveekäitlus, lekked loomakasvatushoonetest) on suudetud tänaseks päevaks likvideerida, siis põllumajanduslik hajureostus on jätkuvalt probleemiks veekogude hea seisundi saavutamisel (Sall jt., 2012).

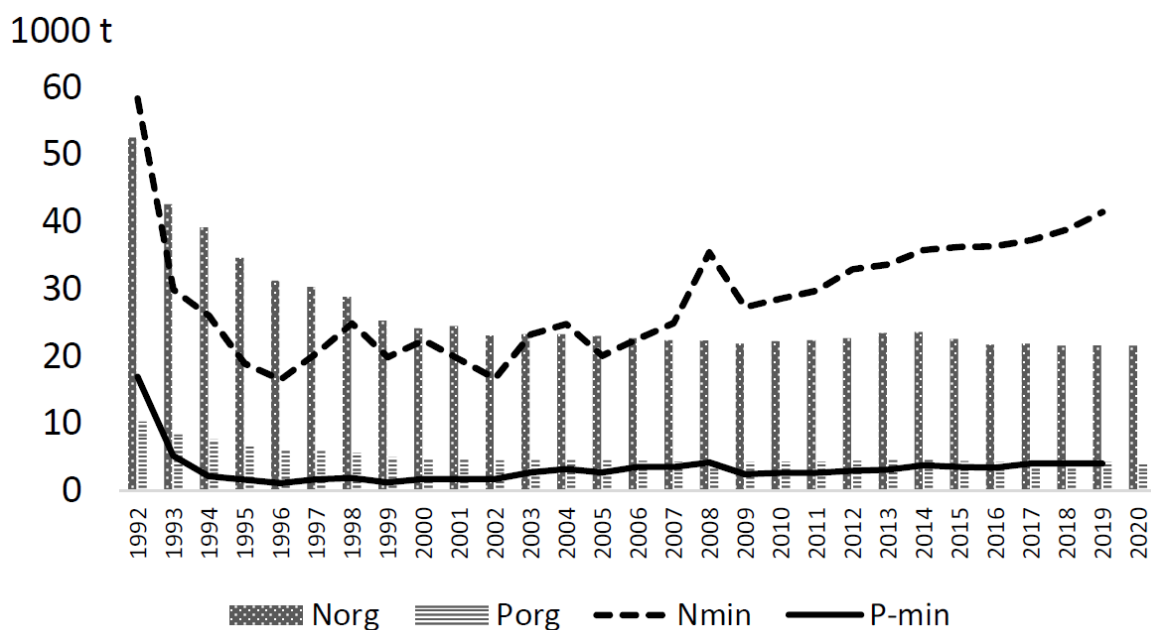
Kuna üheks oluliseks surveteguriks veekeskkonnale, mis mõjutab tugevalt Eesti vete seisundit, on põllumajandus, on tähtis reguleerida põllumajanduslikest punkt- ja hajuallikatest tulenevat saastet. Euroopa Liidu nõukogu direktiiv veekogude kaitse kohta põllumajandusest lähtuva nitraadireostuse eest, lühidalt nitraadidirektiiv (91/676/EMÜ), on seadnud eesmärgiks vähendada põllumajandusest lähtuvatest nitraatidest põhjustatud või tingitud veereostust ning takistada sellise reostuse jätkumist. Direktiivi nõuete kohaselt peavad Euroopa Liidu liikmesriigid määratlema nitraaditundlikud alad, et kaitsta neid põllumajandusest tuleneva reostuskoormuse eest.

Eestis on välja valitud lämmastikureostuse suhtes eriti tundliku alana Pandivere ja Adavere-Põltsamaa piirkond, mille kaitse-eeskiri koostati 2003. aastal. Vabariigi Valitsuse määrusega nr 17 (Pandivere ja Adavere-Põltsamaa..., 2003) kehtestati Pandivere ja Adavere-Põltsamaa NTA, määrati nitraaditundliku ala piires asuvad kaitsmata põhjaveega pae- ja karstialad pinnakatte paksusega kuni 2 meetrit ning kehtestati kitsenduste ulatus allikate ja karstilehtrite ümbruses ning kaitsmata põhjaveega aladel. Veeseadus (VeeS) defineerib NTA kui ala, kus põllumajanduslik tegevus on põhjustanud või võib põhjustada põhjavees nitraatiooni sisalduse, mis ületab 50 mg/l, või kus põllumajanduslik tegevus on põhjustanud veekogu eutrofeerumise või eutrofeerumisohu (VeeS § 37 lg 1). NTA määramise eesmärk on intensiivsema põllumajandustootmisega piirkondades põhja- ja pinnavee kaitse.

Nitraadidirektiivi eesmärkide saavutamiseks peavad liikmesriigid koostama tundlike alade tegevuskavad. NTA tegevuskava eesmärk on põllumajandustootmisest pärineva pinna- ja põhjavee reostuse piiramine, säästva põllumajandustootmise arengule ja hea vee seisundi saavutamisele

kaasaaitamine ning inimese tervisele ohutu joogivee tagamine NTA-l. Tegevuskavas on loetletud tegevused, mis on vajalikud vee kvaliteedi tõstmiseks, koos ajakava ja ligikaudse maksumusega.

Kõik EL-i liikmesriigid esitavad Euroopa Komisjonile iga nelja aasta tagant nitraadidirektiivi täitmise aruande. Kuigi põllumajanduse intensiivsus võib regiooniti olla äärmiselt erinev, võimaldab ühtne andmekogumine teha võrreldavaid järeldusi direktiivi elluviimise edukuse kohta ning õppida parimate tavade rakendajatelt. Komisjoni aruandest (EC, 2010) selgus, et väetiste kasutamisest tulenev koormus veekeskkonnale on jätkuvalt suur. Sama tendents on jätkunud ka aastaid hiljem (Nõges jt., 2021). Pärast Eesti taasiseseisvumist vähenes põllumajanduses nii orgaaniliste- kui ka mineraalväetiste kasutamine tuntavalt (Joonis 2.1). Koos loomade arvu vähenemisega kahanes ka tekkinud sõnniku hulk ning alanesid sõnnikuga mulda viidud lämmastiku (N) ja fosfori (P) kogused. Aastatuhande vahetuseks see kahanemine peatus ja sellel sajandil viiakse sõnnikuga mulda suhteliselt stabiilselt üle 20 000 tonni N ja üle 4000 tonni P aastas. Mineraalväetistega on olukord teistsugune. Elujärje tõustes ja eriti peale Euroopa Liiduga ühinemist 2004. aastal olukord muutus ning viimastel aastatel viiakse mineraalväetistega mulda rohkem N (ca 40 000 tonni aastas) kui orgaaniliste väetistega. Samal ajal on mineraalväetistega mulda viidavad P kogused jäänud samasse suurusjärku orgaanilise väetisega lisatuga (Joonis 2.1).



Joonis 2.1. Mineraalväetiste (Nmin ja Pmin) ning sõnnikus sisalduvate toitainete (Norg ja Porg) kasutamine Eestis 1992–2020 (Nõges jt., 2021).

Ka Pandivere ja Adavere–Põltsamaa nitraaditundliku ala tegevuskavas 2021–2024 (Pandivere..., 2020) on välja toodud, et NTA-l ilmneb põllumajandustootmise mõju põhjaveele kõige selgemalt,

kuna veeseire on selles piirkonnas tihedam kui ülejäänud Eestis. Nii põhja- kui ka pinnavee NO₃ sisaldust mõjutab kasutatud lämmastikväetiste hulk, väetamise tehnoloogia ja aeg ning ilmastik, eriti sügis-talvise perioodi veerohkus ja talvede temperatuur. Mineraalväetisega antava lämmastiku kogus väetatava pinna kohta kasvab üle-eestiliselt aasta aastalt. Alates 1993. aastast on esinenud märkimisväärsed kõikumisi, kuid üldine trend on kasvav (Statistikaamet, 2020).

Pandivere veekaitseala 2006. aasta põhjavee kvaliteedi seire aruandes (Maves, 2007) märgiti, et kuigi tervikuna ei saa veel täheldada põllumajandusest tingitud otsest mõju nitraatioonide sisalduse suurenemisele maapinnalähedases põhjavees, on arvestades ka kontrollseire tulemusi olemas tendents nitraatioonisisalduse suurenemisele just intensiivse põllumajandusega piirkondades. Keskmine nitraatioonide sisaldus 2006. aastal jäi tervikuna vahemikku 15–20 mg/l.

Säästva Eesti Instituut poolt teostatud töösse (Sall jt., 2012) on koondatud andmed selleks hetkeks NTA-l tehtud veekeskkonna ja põllumajandussektori uuringute tulemustest. Samuti on antud ülevaade põllumajandustootjate arvamusküsitlusest ning võrreldud seda teiste Läänemere-äärsete riikide tootjate hinnangutega. Töö tulemusena võib kokkuvõtvalt märkida, et veekaitse korraldus NTA-l ei ole piisavalt tõhus ega võimalda veepoliitika raamdirektiivi eesmärgi – hea veeseisund aastaks 2015 – saavutamist. Põhjuseks toodi asjaolu, et NTA veemajanduse korraldus on administratiivselt liiga keeruline (paralleelselt toimub kahe vesikonna ja viie alamvesikonna meetmekava ning NTA tegevuskava rakendamine), erinevad kavad on omavahel sidustamata ja järelevalve NTA-l kehtestatud piirangute üle on nõrk. Vajakajäämisena toodi välja, et NTA kohta ei koguta eraldi põllumajandusandmed (väetisekasutus, saagikus, põllumajandusmeetmed maaelu arengukavast), mida aga oleks hädasti vaja NTA tegevuskava rakendamisel ja meetmete tõhususe hindamisel. Samas on keskkonnaandmed, nii põhja- kui pinnavee seire NTA-l hästi kättesaadavad.

Samas uuringus (Sall jt., 2012) rõhutatakse, et vaatamata teostatud reostuskoormuse uuringutele, on veekvaliteeti mõjutavad tegurid mitmel pool siiski ebaselged. Kui punktkoormusallikad on valdavalt kaardistatud, siis hajureostuskoormuse täpsem päritolu on jäänud ebamääraseks. Praegu on väetiste kasutamise andmed leitavad Statistikaameti andmebaasist, kuid vastav info on avaldatud maakondliku täpsusega, võimaldades teha vaid kaudseid järeldusi väetisemajanduse kohta NTA-l. Paber kandjal põlluraamatutest on andmete kättesaamine komplitseeritud. Ka saagikuse andmed ei võimalda hinnata tootmist NTA tasemel. Seega oleks vajalik korraldada täpsem andmekogumine NTA tasemel.

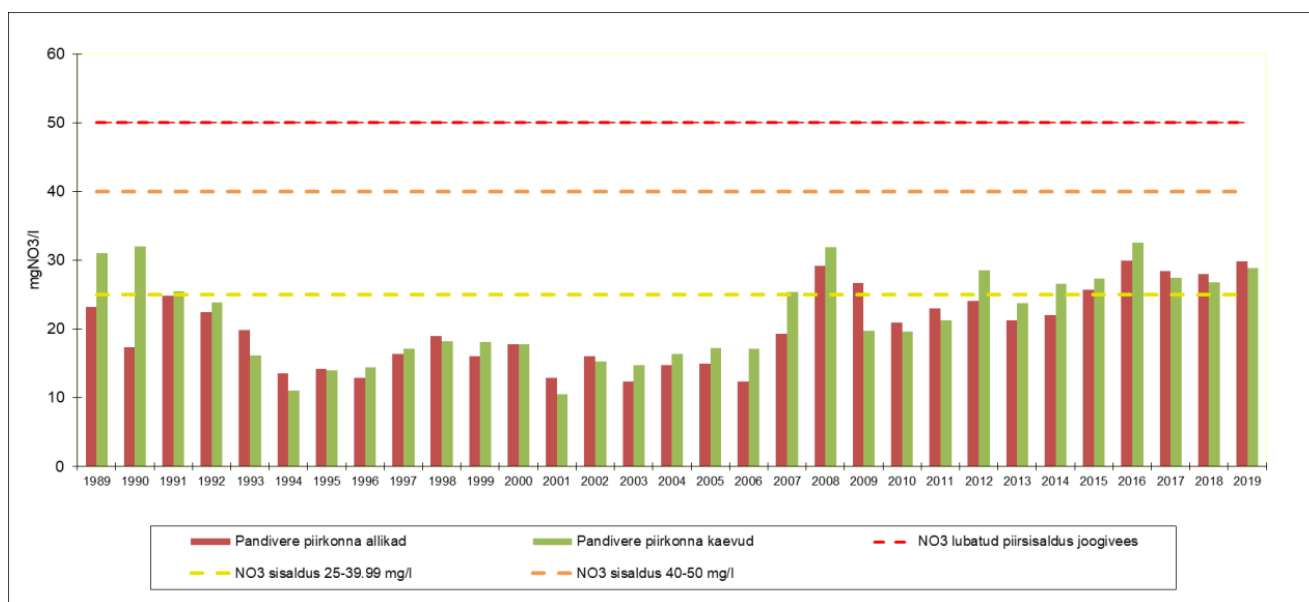
Nitraaditundlikul alal teeb põhjavee regulaarseiret Eesti Keskkonnauuringute Keskus, kelle 2012. aasta seirearuanne (Eesti Keskkonnauuringute Keskus, 2012) näitab, et selleaegsed aastakeskmised kontsentratsioonid ei ületanud üldjuhul, välja arvatud paari erandiga, joogiveele määratud nitraatide kontsentratsiooni piirväärtust 50 mg/l. Samas oli nitraatide sisaldus põhjavees äärmiselt

sõltuv sügis-talvistest ilmastikuoludest ning ka majanduslikust olukorrast. Seireandmetele tuginedes täheldati, et nitraatioonide kontsentratsiooni kasv toimus hoogsalt perioodil 2007–2009, mida mõjutasid nii ilmastiku- kui ka majandusolud. 2010. aastal toimunud nitraatioonide kontsentratsiooni langust seostati külma ning lumerohke talvega ja vähenenud mineraalväetiste kasutamisega majanduslanguse tõttu. Tulenevalt majandusolukorra stabiliseerumisest ning põllumeeste kindlustundest ja võimalusest osta väetisi, näitasid NO₃ kontsentratsioonid taas mõningast tõusutrendi 2011. aastal (Eesti Keskkonnauuringute Keskus, 2012).

Võrreldes omavahel erinevaid nitraadidirektiivi tegevusprogrammi perioode (2008–2011, 2012–2015 ja 2016–2019), mille üheks tulemuslikkuse hindamiseks on Eestis rakendatud riikliku põhjaveeseire NTA seire alamprogramm, on pigem kasvanud selliste seirepunktide osakaal, mille aastakeskmised NO₃ sisaldused ületavad 40 mg/l või ka 50 mg/l (EKUK, 2020). Tõusnud on ka selliste seirepunktide osakaal, kus vähemalt üks analüüsitulemustest on ületanud 50 mg/l. Pandivere alal näitavad pikaajalised (üle 20 aasta pikkused) seireandmed NO₃ sisalduse tõusu (Keskkonnaministeerium, Maaeluministeerium, Keskkonnaagentuur, 2016), mis vaid ajutiselt on olnud langevas trendis mõni aasta pärast majandussurutisi (1997 ja 2007 a.). Üldiselt on läbi aastate määratud kõrgeid NO₃ sisaldusi samadest põhjavee seirepunktidest (KESE, 2020) ning suurimad kontsentratsioonid (>50 mg/l) esinevad just NTA nende piirkondade seirepunktides, kus põllumaa osakaal ja loomühikute arv on suurem. Sama seose võib välja tuua ka seirepunktide aastakeskmise ja maksimaalse NO₃ sisalduse kasvusuundumuste kohta (Keskkonnaministeerium, Maaeluministeerium, Keskkonnaagentuur, 2016, 2020).

Viimane Eesti nitraadidirektiivi täitmise aruanne Euroopa Komisjonile (Keskkonnaministeerium, Maaeluministeerium, Keskkonnaagentuur, 2020) käsitleb ajavahemikku 2016–2019 a. Aruandes tõdetakse taas, et mineraalväetiste kasutamine sh mineraalväetistega antava lämmastiku ja fosfori kogus on viimastel aastatel Eestis veidi kasvanud, laienenud on ka mineraalväetistega väetatud pind. Koostatud ülevaade tugineb riikliku keskkonnaseire programmi põhjaveeseire allprogrammi käigus kogutud andmestikule – perioodil 2016–2019 võeti kogu NTA-lt põhjaveeproove 117 seirepunktist, sealhulgas 22 allikast ja 2 karstist. Seiretulemuste põhjal järelitati, et NTA Pandivere piirkonnas on hüdrogeoloogiliste tingimuste tõttu kõrge nitraadisisaldusega seirekohti oluliselt vähem kui Adavere-Põltsamaa piirkonnas. Pandivere puhul mõjutab põhjavee liikumist ja põllumajanduskoormuse levikut veel karsti ulatuslik levik. Kui Pandiveres ületas maksimaalne NO₃ sisaldus aruandlusperioodil 50 mg/l piiri 28% seirekohtades, siis Adavere-Põltsamaa piirkonnas oli see näitaja 39%. Enamus kõrge nitraadisisaldusega seirekohti on koondunud Adavere-Põltsamaa piirkonnas Põltsamaa valda.

Võrreldes eelmise aruandeperioodiga (2012–2015) oli NO₃ keskmise sisalduse järgi suure tõusuga (kasv üle 5 mg/l) seirepunktide osakaal NTA-l tervikuna 34%. Väikese tõusuga (1–5 mg/l) seirepunktid moodustasid 23% ning langeva trendiga seirepunktid 24% seirepunktide koguarvust. Perioodi keskmiste NO₃ sisaldusega 50 mg/l ületanud seirepunktide osakaal pole viimase aruandlusperioodi jooksul Pandivere piirkonnas oluliselt muutunud, kuid Adavere-Põltsamaa osas on ka nende punktide osakaal vähenenud ligi veerandi võrra. Ehk siis, kui eelmisel perioodil oli Adavere-Põltsamaa piirkonnas rohkem NO₃ piirnормi ületavaid ja tõusutrendiga seirejaamasid, siis perioodil 2016–2019 on hakanud Adavere-Põltsamaa piirkonnas NO₃ sisaldus vähenema, samas Pandivere piirkonnas on varasemate aastatega võrreldes just rohkem nitraatiooni piirnормi ületamisi ja esinevad tõusutrendid (Keskkonnaministeerium, Maaeluministeerium, Keskkonnaagentuur, 2020). Nitraadisalduse üldist tõusutendentsi kolmel viimasel NTA aruandlusperioodil Pandivere kaevudes ja allikates näitab Joonis 2.2.



Joonis 2.2. Pandivere piirkonna põhjavee nitraadisalduse dünaamika 1989–2019 (Keskkonnaministeerium, Maaeluministeerium, Keskkonnaagentuur, 2020).

Nitraatide sisalduse vertikaalses levikupildis suurt muutlikkust ei täheldata, mis viitab sellele, et nitraadireostus uhutakse sademeveega kiiresti sügavamatesse põhjaveekihtidesse – nii Pandivere kui Adavere-Põltsamaa allikates ja madalates kaevudes (kuni 15 m sügavused) on keskmine nitraatide sisaldus 22–25 mg/l. Pandivere piirkonnas on 15–30 m ja üle 30 m sügavuste kaevude keskmine NO₃ sisaldus 28 mg/l, Adavere-Põltsamaa piirkonnas varieerub see 17–30 mg/l (Keskkonnaministeerium, Maaeluministeerium, Keskkonnaagentuur, 2020). Kokkuvõtteks järeldatakse, et oluline osa nitraadi jõudmisel sügavamatesse veekihtidesse on lumevaestel

talvedel, mida on Eestis viimasel perioodil sagedamini esinenud. Samas märgitakse, et järgmise perioodi jooksul tuleb neid võimalikke seoseid täpsemalt uurida, kuid arvestades lämmastikväetise kasutamise kasvu, kasutuses oleva põllumajandusmaa pindala suurenemise ja loomade arvu kasvu prognoosi ning ilmastikutingimuste seost, ei ole nitraadisisalduse vähenemist võimalik järgmistel aruandlusperioodidel ette näha.

2023. aasta on Euroopa Liidu nitraadidirektiivi aruandlusperioodi 2020–2023 viimane aasta ning sellega seondult on NTA seireandmetele tuginedes koostatud ülevaade (Leisk, 2023a) põhjavee talvisest ja kevadisest nitraatide sisaldusest võrreldes eelmise aruandlusperioodiga (2016–2019). Artiklis tuuakse välja, et nitraaditundliku ala Pandivere ja Adavere piirkondade põhjavee nitraadi sisaldusel on olnud erinev tase ja ajalise muutuse trend. Adavere-Põltsamaa piirkonnas oli NTA seire algul (1990ndatel) nitraadi sisaldus põhjavees oluliselt suurem, seejärel on olnud üldine trend langev, kuid viimastel aastatel taas tõusev. Pandivere piirkonnas oli keskmine nitraatide sisaldus NTA seire algul oluliselt madalam kui Adavere-Põltsamaa piirkonnas ning sisaldus on enam kasvanud samuti viimastel aastatel.

NTA seire 2022. a keskmiste väärtuste võrdlus pikaajalise keskmisega (2000–2022) näitas, et NO_3 sisaldus on Pandivere piirkonnas kasvanud 74% ja vähenenud 21% seirepunktidest, Adavere piirkonnas kasvanud 49% ja vähenenud 36% seirepunktidest. Kõige rohkem on nitraatide sisaldus kasvanud allikates ja sügavates kaevudes. Nitraatide sisalduse kasv on täheldatav just talvise ja kevadise proovivõtu ajal, mil sügisel põllule viidud sõnnikust ja vedelsõnnikust leostunud lämmastik on nitraadina jõudnud põhjavette. Seega tuleb tunnistada, et kasvavate nitraadisisalduste tõttu kehtestatud NTA tegevuskavas rakendatavad meetmed ei ole seni olnud piisavad (Leisk, 2023a).

Keskkonnaagentuuri poolt teostatud töös (Marja jt., 2017) uuriti põhja- ja pinnaveest leitud pestitsiidi (glüfosaat ja selle derivaat AMPA) ning nitraatiooni võimalikke allikaid NTA põhja- ja pinnavees. Uuringus tugineti NTA põhjavee riikliku seire ning jõgede hüdrokeemilise seire andmetele. Uuringu tulemuste põhjal on nitraatiooni sisaldus põhjavees kõrgeim kevadisel perioodil (märts, aprill) ning pinnavees aasta alguses (jaanuarist aprillini) ja aasta lõpus (novembris ja detsembris). NTA-l on nii põhjavee kui ka pinnavee nitraatiooni sisalduse aasta keskmised väärtused statistiliselt usaldusväärselt seotud vastava aasta sademete hulga. Sademeterohketel aastatel esinevad nii põhja- kui ka pinnavees suuremad nitraatiooni sisaldused.

Vastupidiselt oodatule oli turvasmuldade levik, mis võiks näidata nitraatiooni loodusliku fooni leostumist, hoopis negatiivselt seotud nii põhja- kui ka pinnavee nitraatiooni sisaldusega. Seega pole alust arvata, et suurem turvasmuldade levik mõjutaks märkimisväärselt põhja- ning pinnavee

nitraatiooni sisaldust NTA-l. Ka ei leitud põhja- ja pinnavee nitraatiooni sisalduse ja loomade poolt sõnnikuga eritatud lämmastiku koguse vahel selget seost (Marja jt., 2017).

Põhja- ja pinnavee nitraatiooni sisaldused korreleerusid positiivselt teraviljade ja teiste kasvuks rohket lämmastikväetist vajavate põllukultuuride kasvupindalaga NTA-l. Uuringu tulemused näitasid, et mida suurem on teraviljade ja teiste kasvuks rohket lämmastikväetist vajavate põllukultuuride kasvupindala NTA-l, seda kõrgemad on olnud nitraatiooni sisalduse aasta keskmised ja maksimaalsed väärtused põhjavee toitealadel ja pinnavee valgaladel (Marja jt., 2017).

Tallinna Tehnikaülikooli geoloogia instituudi (Vaikmäe jt., 2020) poolt teostatud hüdrogeoloogiline uuring nitraatide ja pestitsiidide kõrgendatud sisalduse põhjuste ja leviku ulatuse väljaselgitamiseks Siluri–Ordoviitsiumi Pandivere põhjaveekogumis Ida-Eesti vesikonnas on üks viimaseid NTA põhjavee nitraatide sisaldusi käsitlevaid töid. Uuring hõlmas pilootala suurusega 10 x 10 km, mille piires valiti 20 NTA põhjavee seirega, vee erikasutusloa või kompleksloaga seotud puurkaevu (10 sügavusega 15–30 m ja 10 sügavusega 30–50 m) ning 3 allikat (Simuna, Kiltsi ja Äntu). Keemilised analüüsid näitasid, et kaevude ja allikate vee NO₃ kontsentratsioonid varieerusid vahemikus 26 kuni 87 mg/l. Enamikul juhtudest tuvastati kõrgeimad nitraatide kontsentratsioonid kevadise lumesulamise järel maikuus. Kuna ³H/³He suhte alusel hinnati kõikides uuritud kaevudes põhjavee vanus väiksemaks kui 20 aastat, siis järeldati, et nii nitraatide kui ka pestitsiidide saaste pärineb uuemast ajast, mitte nn kolhooside perioodist enne 1990-ndaid aastaid (Vaikmäe jt., 2020). Koos põhjavee stabiilsete isotoopide analüüsi tulemustega lubas see järeldada, et veevahetus uuritud kaevudes on väga kiire ja mõne aastaga infiltreeruvad sademeveed ka sügavamatesse põhjaveekihtidesse. Samas nenditi, et puudub teave võimaliku varasema päritoluga saaste pinnases säilimise kohta, mis võib olla leostunud põhjavette hilisema sademete infiltratsiooni käigus.

Nimetatud uuringu põhiliseks eripäraks, võrreldes nitraaditundliku ala põhjavee varasemate uuringute ja ka seirega, oli isotoopmeetodite kasutamine eesmärgiga täpsustada nitraadireostuse võimalikke allikaid. Põhjavees erineva päritoluga nitraatide $\delta^{18}\text{O}$ ja $\delta^{15}\text{N}$ väärtuste varieerumispiirid on üsna kitsad, mistõttu on saasteallika ühene määramine keeruline. Vaikmäe jt. (2020) uuring näitas, et NO₃ lämmastiku isotoopkoostise $\delta^{15}\text{N}$ väärtused jäid vahemikku 4,3–7,8‰ ning $\delta^{18}\text{O}$ omad vahemikku +0,2 kuni -6,0‰. See omakorda viis järelduseni, et nitraadireostus võib pärineda sõnnikust või reovetest, aga ei välistatud ka selle päritolu mineraalväetistest. Kokkuvõtteks kinnitati, et ühte aastaringi hõlmav uuring saab anda vaid esialgse väga ligikaudse hinnangu võimalike saasteallikate päritolu kohta ja sellisena tuleks selle uuringu tulemusi ka

käsitleda. Ka selle uuringu tulemused näitasid, et lämmastikureostus uuringualal on kasvanud, mis kinnitab vajadust seiret jätkata.

NTA seirevõrgu ajaline dünaamika

Nitraaditundliku ala (NTA) seire eesmärk on põllumajandusest lähtuva lämmastikureostuse mõju hindamine ning lämmastikuühendite sisalduste muutuste selgitamine eri sügavusintervallides ja allikates. Seireprogramm on üheks teabe- ja kontrollimehhanismiks nii Pandivere põhjavee alamvesikonna veemajanduskava kui ka nitraaditundliku ala tegevuskava ellu rakendamisel ning meetmete edukuse hindamisel. Seiretööd teostab OÜ Eesti Keskkonnauuringute Keskus (EKUK), kellel on riikliku põhjaveeseire tegemiseks hüdrogeoloogiliste tööde tegevusluba hüdrogeoloogiliste uuringute valdkonnas KHY000054.

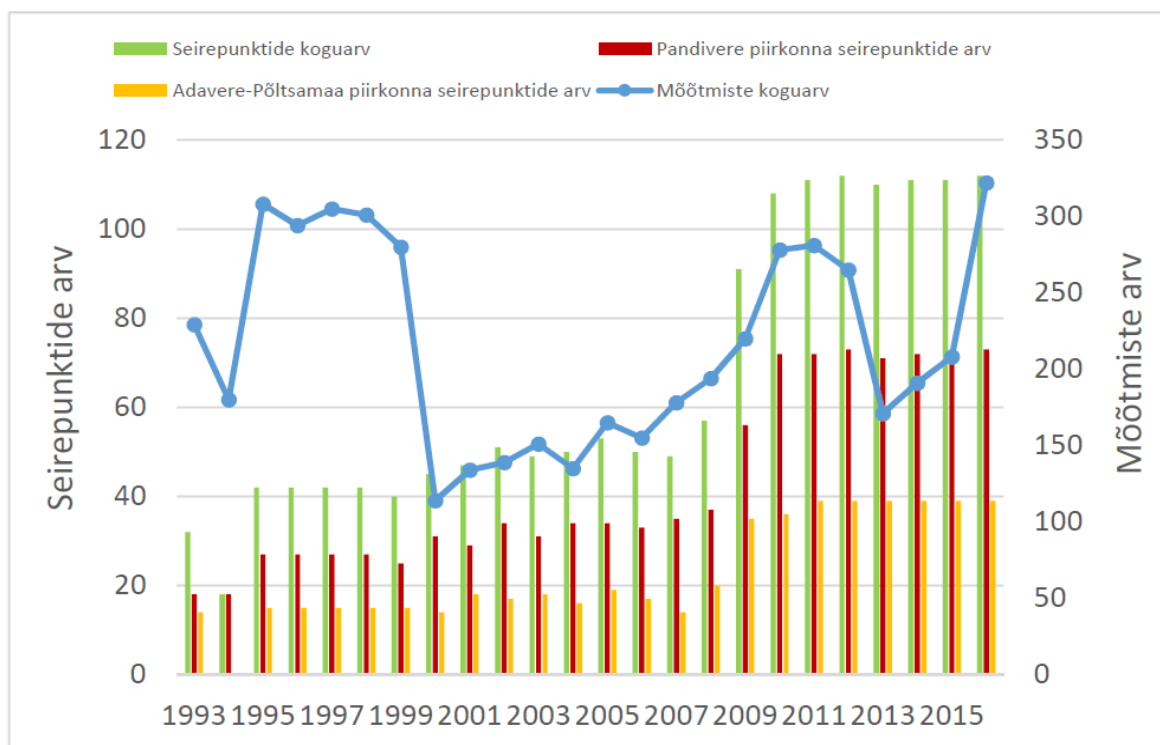
Nitraaditundliku ala seire toimub riikliku seireprogrammi raames juba alates 1995. aastast, kuid põllumajanduspiirkondade põhjaveeseire uuringute raames on piirkonnas veekvaliteedi uuringuid läbi viidud juba 1988. aastast. Seoses Eesti astumisega Euroopa Liitu tuli ka keskkonnaseire erinevate programmide lähtealused ühtlustada ning vastavusse viia Euroopa Liidu nõudmistega. Nitraadidirektiiv (91/676/EMÜ) ei reguleeri seire korraldamist nitraaditundlikul alal. Seda peavad tegema liikmesriigid ise lähtuvalt sellest, kas ohustatud on pinnaveekogude või põhjavee kvaliteet (või mõlemad). Eestis lähtuti vaatlusvõrgu kujundamisel seisukohast, et nitraaditundlikuks alaks valitud kaitsmata põhjaveega aladel on nitraadireostusest ohustatud eelkõige põhjavee ülemistest kihtidest toituvad salv- ja madalad puurkaevud. Põhjuseks oli siinjuures asjaolu, et suurem osa nitraaditundlikuks arvatud territooriumist paikneb Pandivere kõrgustikul, mille keskosa on tugevalt karstunud ning kus pinnaveekogude võrk praktiliselt puudub (Nitraaditundliku ala..., 2024).

Alates 2010. aastast toimub nitraaditundliku ala seire uue, 2008–2011 aruandlusperioodi korrigeeritud seireprogrammi järgi. Nitraaditundliku ala seire jaguneb neli korda aastas tehtavaks regulaarseireks ning selle täiendamiseks tehtavaks ühekordseks seireks. Põhjaveeseire vaatluspunktide valikuprintsiip nitraaditundlikul alal tuleneb looduslikest tingimustest. Pandivere nitraaditundliku ala ääreala on hästi iseloomustatud allikatega, võlvialal tuleb allikate puudumise tõttu kasutada põhjavee iseloomustamiseks kaeve. Kaev iseloomustab võrreldes allikaga märksa väiksema pindalaga piirkonda, lisaks on kaevu vee kvaliteet otseselt sõltuv kaevu konstruktsioonist ning samuti kergemini mõjutatav kohalike reostusallikate poolt. Adavere–Põltsamaa piirkonnas on veerohkeid allikaid vähem, ning seetõttu on seires rohkem madalaid kaeve. Selgitamaks põllumajandustootmise mõju ka väljaspool NTA territooriumi ja nitraadisisalduse foonilist taset ülemises põhjaveekihis, võetakse võrdluseks ja taustinfo saamiseks

1 kord aastas põhjaveeproove kuni 20 seirepunktist muudest Eesti piirkondadest (Nitraaditundliku ala..., 2024).

Pika seireperioodi jooksul on seirepunktide (kaevude, allikate, karsti) arv ja nende omavaheline proportsioon ajas muutunud sõltudes nii sisulistest seire tulemustest (saasteainete ja reostusallikate dünaamika), veepoliitikast (muudatused seoses Euroopa Liitu astumisega) kui ka ajas muutunud majanduslikest teguritest (keskkonnaseire rahastamine).

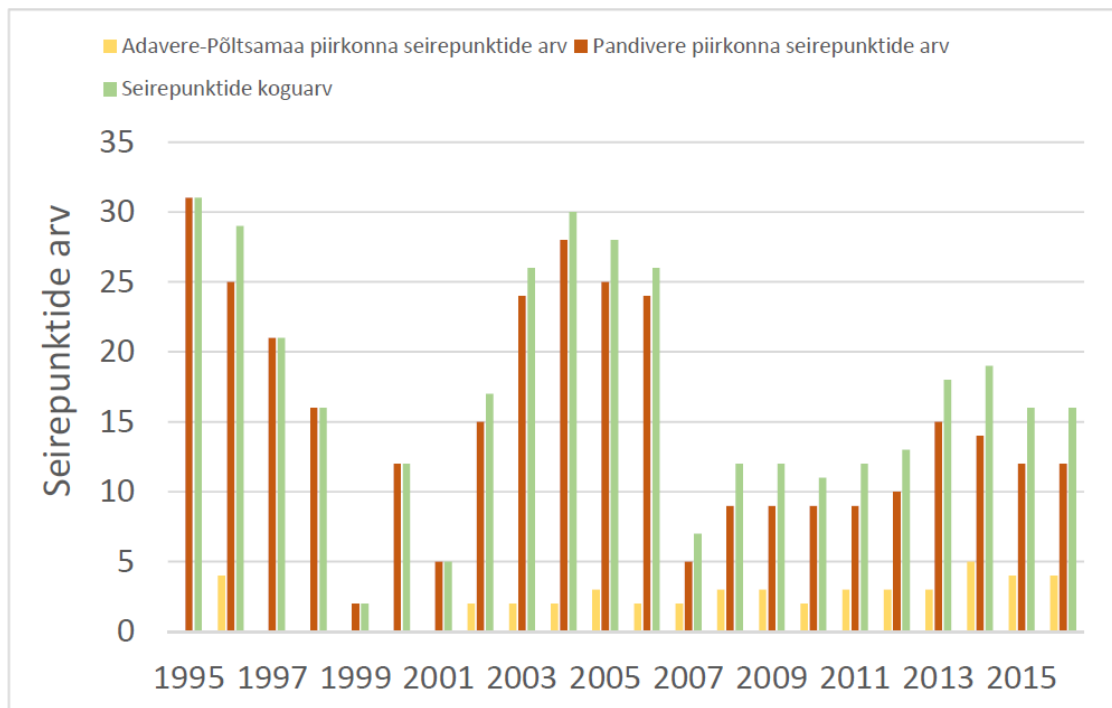
Keskkonnaagentuuri uuring (Marja jt., 2017), mis selgitas saasteainete võimalikke allikaid NTA põhja- ja pinnavees, tugines muuhulgas ka Eesti Keskkonnauuringute Keskuse poolt riikliku keskkonnaseire põhjaveeseire allprogrammi alusel koostatud andmebaasile (aastad 1993–2016). Nimetatud andmestik võimaldas anda ülevaate NTA seirejaamade ajalisest muutusest (Joonis 2.3), mis peegeldab eelnevalt loetletud põhjuste koosmõju. Jooniselt on selgelt näha, et 2010. aastal toimus oluline muutus seoses seire uue, 2008–2011 aruandlusperioodil korrigeeritud seireprogrammi elluviimisega, mis muuhulgas kajastub seirejaamade arvu märkimisväärses kasvus.



Joonis 2.3. NTA põhjavee seirepunktide ning toimunud mõõtmiste arv aastatel 1993–2016 piirkondade kaupa (Marja jt., 2017).

Lisaks sellele on ajas toimunud muudatused ka seirataavates sügavusintervallides ehk muutunud on erinevate sügavustega seirepunktide arv. Marja jt. (2017) märgivad, et sügavaimate seirekaevude (kaevude sügavus 40–60 m) hulk oli suurim vaadeldava perioodi alguses (1995–1996), kui

põhjavee seiret tehti ligi 30 kaevus. Aastatel 2013–2016 varieerus seirepunktide arv 16–19 piires (Joonis 2.4).



Joonis 2.4. Sügavaimate kaevude (sügavus üle 40 m) arv aastatel 1995–2016 piirkondade kaupa (Marja jt., 2017)

Jooniselt 2.3 on näha, et alates 2010. aastast on NTA põhjavee seirepunktide arv olnud püsivalt 110 ringis ning samasugusena püsinud ka viimastel aastatel. Näiteks 2022. aastal koosnes NTA seirevõrk 53 põhivõrgu seirejaamast (neist 34 Pandiveres ja 19 Adavere-Põltsamaa piirkonnas) ning 58 tugivõrgu seirejaamast (38 Pandiveres ja 20 Adavere-Põltsamaa piirkonnas) (Leisk, 2023b).

Tänagi jaguneb NTA põhjaveeseire neli korda aastas tehtavaks põhivõrgu seireks (53 seirejaama: Pandivere piirkonnas 15 allikat, 2 karsti ja 17 kaevu; Adavere-Põltsamaa piirkonnas 4 allikat ja 15 kaevu) ning proovivõtuga kord aastas tehtavaks tugivõrguseireks (58 seirejaama, Pandivere piirkonnas 4 allikat ja 34 kaevu, Adavere piirkonnas 20 kaevu). Üks kord aastas võetakse proovid 7 allikast ja 7 kaevust (nn võrdlusseirejaamadest) põllumajanduslikes piirkondades väljaspool NTA-d. Näiteks 2023. a. võeti NTA põhjaveeseire raames 281 proovi, 180 proovi Pandivere piirkonnast ja 101 proovi Adavere-Põltsamaa piirkonnast (Tamm ja Leisk, 2024).

Viimase 13–14 aasta jooksul toiminud tihedam seirevõrk ning kogutud analüütiline andmestik tõstab kindlasti NTA piirkonnas tehtavate uuringute täpsust ja usaldusväärsust. Samas tuleb pikaajalisi muutusi tõlgendades silmas pidada, et teatud osa neist on mingil määral mõjutatud algandmetest ehk seirevõrgu konfiguratsioonist sel hetkel. Valdavalt mõjutab selline oht erinevate

keskmiste väärtuste arvutamist (piirkondade, aastate lõikes). Samas on õnneks üksjagu seirepunkte (kaeve, allikaid), mis on seireprogrammis püsinud aastakümneid ja evivad seetõttu pikaajaliste trendide hindamise seisukohast olulist väärtust.

2.2. Põllumajanduslik nitraatide heide NTA-I

Nitraaditundliku ala kaevudest on leitud pestitsiidide ja nitraatidega saastunud vett, mis viitab sellele, et joogiks tarvitataav põhjavesi võib olla tervisele ohtlik. Probleemiga on seotud ajaline aspekt: kuna suurkaevu veevõtu sügavusele jõuab vesi tüüpilisel juhul mitmekümne aastaga, siis võime nii praegusel ajal kui ka tulevikus kannatada varasemal ajal toimunud saasteainete heite käes.

Veekaitsemeetmed põllumajanduses

Tänapäeval rakendatavad keskkonnameetmed – sh nii vabatahtlikud kui kohustuslikud – võivad aga soovitud mõju kasutatavale joogiveele avaldada samuti alles mitme dekaadi pärast. Seetõttu on nende keskkonnameetmete tõhususe mõõtmine keeruline. Üheks lahenduseks on analüüsida pinnalähedaste põhjaveekihtide saasteainete sisalduse dünaamikat, sest see peaks põldudel toimuvatele muutustele kiiremini reageerima. Käesolev analüüs keskendub kas osaliselt või täielikult veekaitsele suunatud põllumajanduse keskkonnameetmete tõhususe hindamisele. Olulisimad nendest meetmetest kaasnevad Veeseaduse, nitraaditundliku ala ja PRIA vabatahtlike toetusmeetmetega.

- Veeseadus kehtestati esimest korda aastal 2002. See sätestab mh kohustuslikke nõudeid väetamisele ning väetiste ja silo hoidmisele. Veeseadust on muudetud palju kordi, kusjuures üldise tendentsina nõudeid on järk järgult lisandunud või on need karmistunud. Olulised muutused olid näiteks aastal 2019, mil küll lõdvendati veekaitsevööndiga seotud piiranguid (sh nii selle vööndi enda ulatust kui ka vööndisse jäävaid piiranguid), kuid samas karmistati karistusi – eriti juriidilistele isikutele – rikkumiste eest, karmistati heitvee pinnasele ja pinnasesse juhtimise korda, pinnase erosiooni, maalihke või liigniiskuse põhjustamist jpm.
- Nitraaditundliku ala kaitse-eeskiri kehtestati esimest korda aastal 2003. See sätestab uurimisalale võrreldes muu Eestiga rangemad põllumajanduse veekaitseenõuded.
- Alates aastast 2009 tekkis muude ÜPP põllumajandustoetuste kõrvale keskkonnasõbraliku majandamise toetus, sh taimekaitsevahendite kasutamise piirang. Sellest ajast saadik on

hästi dokumenteeritud selle toetuse rakendamise ajalugu, sh PRIA põllumassiivide ja põldude kaupa.

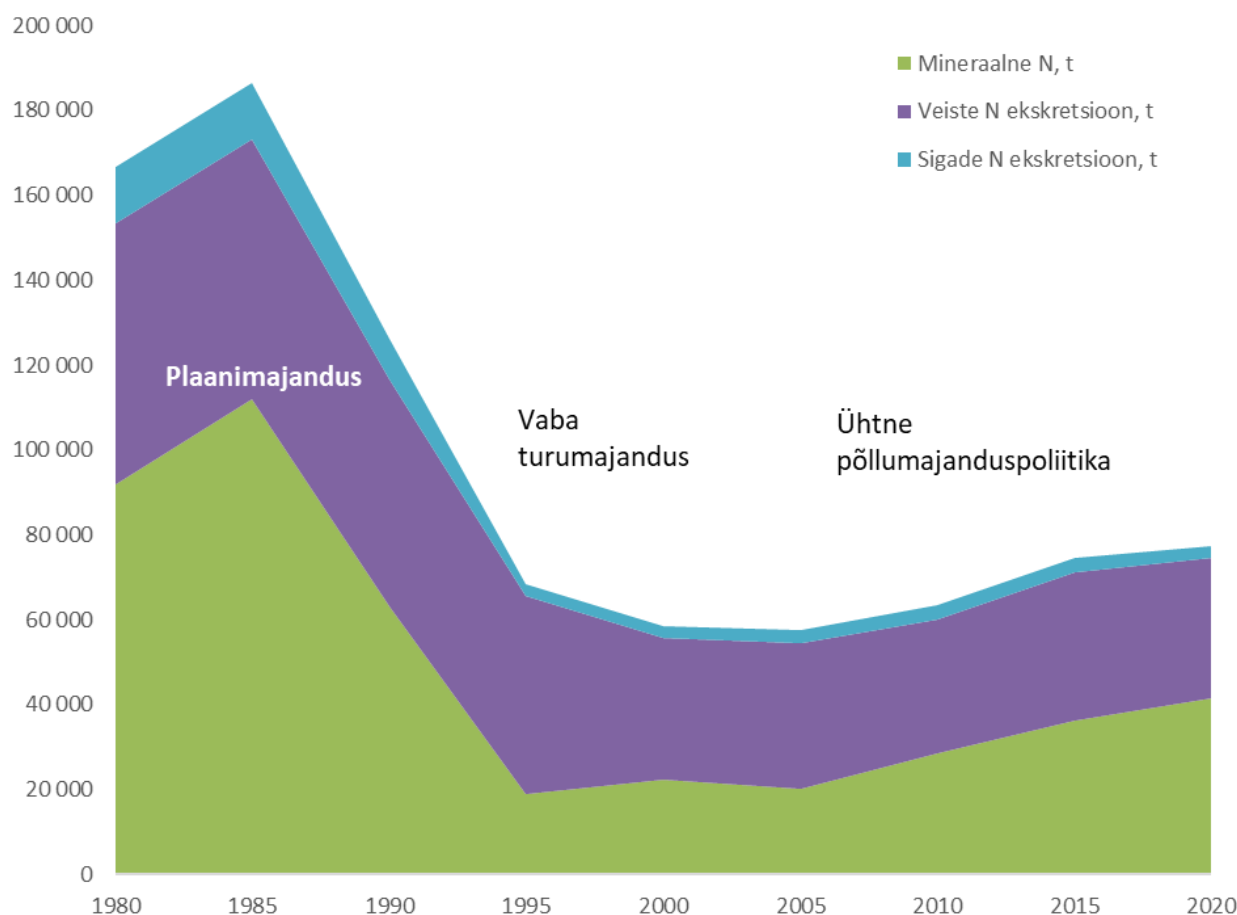
Küsimus on, kuivõrd need meetmed on vähendanud nitraatide heidet põhjavette, parandanud tänapäeva maapinnalähedaste põhjaveekihtide veekvaliteeti ning tagavad tulevikus puhta joogivee puurkaevude veevõtu kihtides.

Saasteainete põllumajandusliku hajuheite trendid

Mourad (2008) eristas Peipsi valgla Eesti osal toiteelementide põllumajandusliku heite juures vahemikus 1945 kuni 2005 kolm perioodi: (1) kiire heite kasvu periood 1945–1990, (2) järsk langus 1991–2000 ning (3) väike tõus alates aastast 2000. Samas, andmete järgi ulatus heite kasvu periood ainult aastani 1985 ning järsk langus lõppes juba aastal 1995. Mourad (2008) ei erista aastail 1995 kuni 2005 kestnud madala heite perioodi.

Majanduspoliitilise konteksti järgi võiks eristada kolme perioodi, mis põllumajanduses saasteainete heidet on suunanud: (1) plaanimajanduse periood kuni aastani 1991, (2) vaba turumajanduse periood 1991–2003 ning (3) Euroopa Liidu ühtse põllumajanduspoliitika (ÜPP) periood, mil on rakendatud mh ühtse pindalatoetuse (ÜPT) meedet alates 2004. aastast.

Aasta 1980 paiku valitses Eesti põllumajanduses intensiivne kemikaalide kasutus (Joonis 2.5). Mineraalset lämmastikku kasutati aastal 1980 väetistena kokku ca 92 000 t (ligi 2,5 korda rohkem kui tänapäeval). Samas täheldati põllumajanduses palju väetiste ja pestitsiidide ebaratsionaalset kasutust (Maastik, 1984). Põllumajandusloomade arvud olid võrdlemisi suured: 0,8 milj veist ja 1,1 milj siga, kes ühiselt tekitasid sõnnikut suurusjärgus kuni 75 000 t lämmastikku aastas. Tavaliseks oli sõnniku, aga ka mineraalväetise laotamine lumele või külmunud maale, väetise külvamine lennukilt jm. Hinnati, et 80% Eesti pinnavette jõudnud lämmastikust pärines põllumajanduslikust hajureostusest. Vette jõudis haritavalt maalt hinnanguliselt $3000 \text{ kg N} / (\text{km}^2 \times \text{a})$. Kasutatud mineraalväetistest jõudis pinnavette lumele laotamise korral toonase hinnangu järgi kuni 80% ehk $7000 \text{ kg} / (\text{km}^2 \times \text{a})$. See tähendab, et heite määr võis olla isegi suurem kui tänapäeval üldse põllumajanduses kasutatav N kogus.



Joonis 2.5. Lämmastiku aastased vood põllumajanduses kogu Eestis. Allikad: Statistikaamet, 2023; Mourad, 2008.

Pestitsiide kasutati mh kraavikallaste puhastamiseks, veekogudes nn „prügikalade“ hävitamiseks ja joogivee desinfitseerimiseks (Maastik, 1984). Seadusandluses (1977) oli kehtestatud kontsentratsioonide piirnormid pinnavees ca 30 erinevale pestitsiidile. Nende kontsentratsioonide piirnormid jäid enamasti 0,01 ja 5 mg/l vahele. Toimeained selles nimekirjas erinevad peaaegu täielikult tänapäeval kasutatavatest.

Vaba turumajanduse perioodi iseloomustab põllumajanduse kiratsemine, kusjuures mineraalse lämmastiku kasutamine oli ligi pool võrreldes tänapäevaga ja 15% võrreldes plaanimajanduse tippajaga (Statistikaamet, 2020; Mourad, 2008; määrad on näidatud joonisel 2.5). Veiste ja sigade arv vähenes 71%, sh veiste arv 0,8-lt miljonilt aastal 1980 vaid 0,25 miljonini aastal 2000. Paralleelselt vähenes nende loomade sõnnikuga tekkiva N kogus 75-lt tonnilt 36-le tonnile aastas (samas).

ÜPP perioodil on toimunud taimekasvatuse intensiivsuse stabiilne kasv, sh on see olnud lämmastikväetise kasutamise kasvu periood (Joonis 2.5). Kui aastal 2005 kasutati mineraalset väetist 20 083 t, siis aastal 2020 juba 41 486 t (Statistikaamet, 2020). Kasv oli seega 107%.

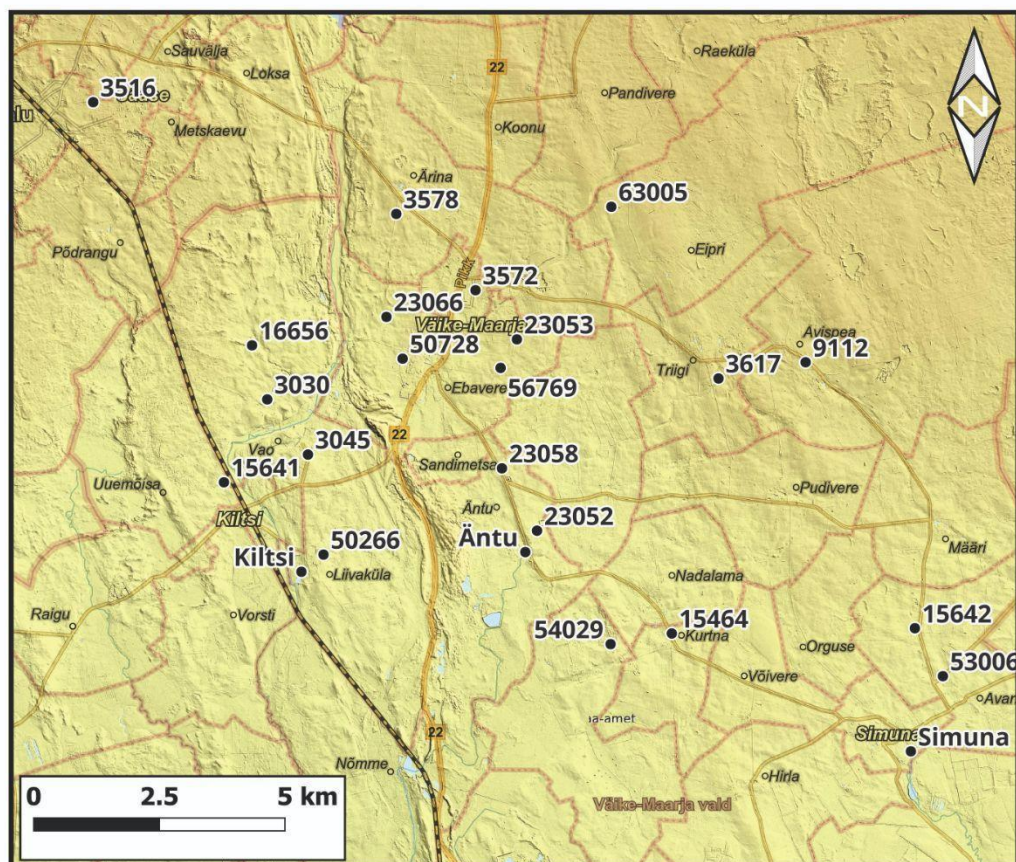
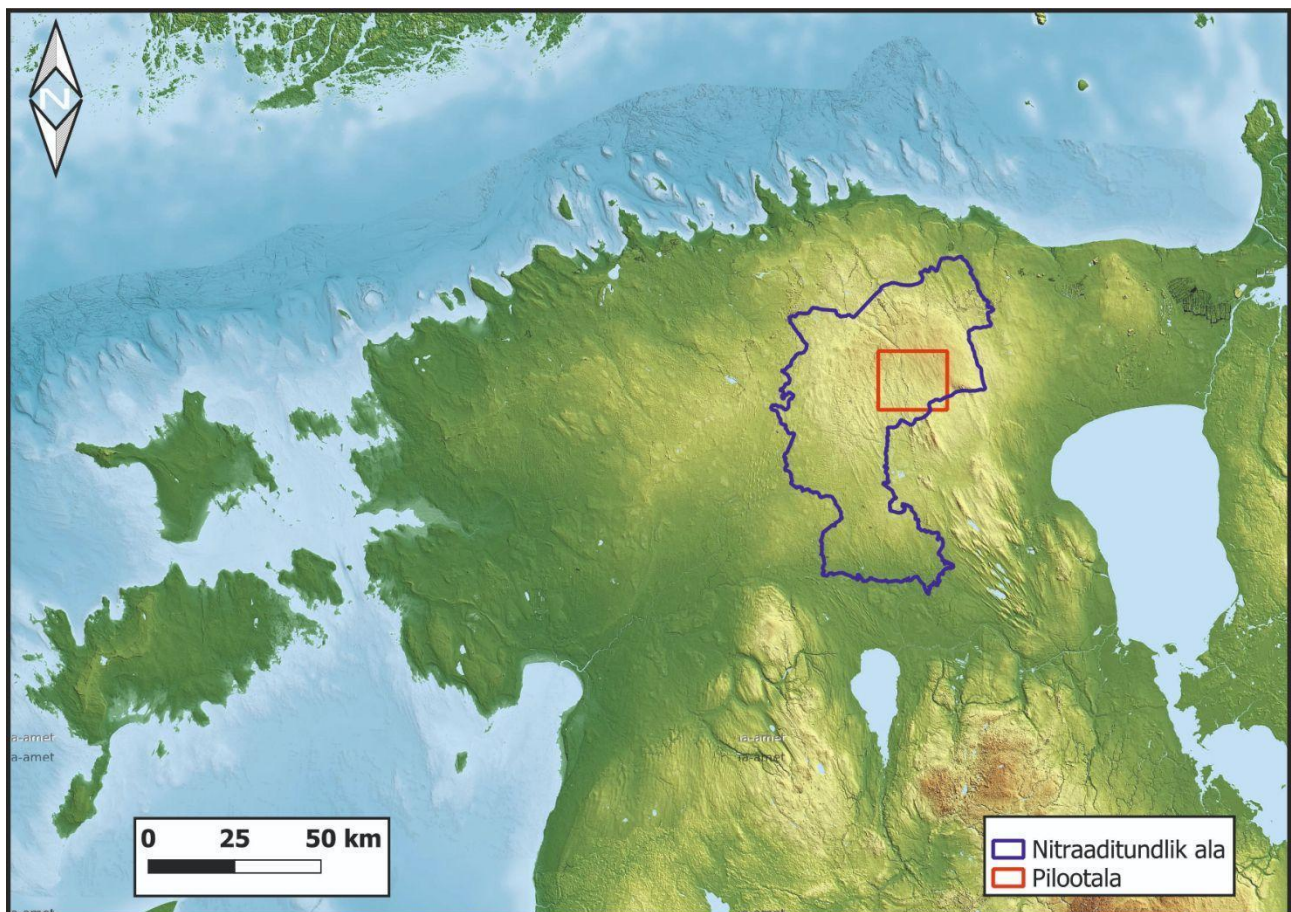
Samasse aega langeb aga ka põllumajanduse keskkonnameetmete rakendamine, sh vabatahtlikult valitavad keskkonnasõbralik majandamine, mahepõllumajandus, püsirohumaastamine jm ning kohustuslikud veekaitsenõuded, mis kehtivad väetamisele, väetiste hoidmisele jm (veekaitsemeetmetest põllumajanduses ülevaade Kasak jt. (2016) käsiraamatus). Tänu nendele meetmetele ei tarvitse väetamise intensiivistamine olla toonud kaasa heite suurendamist. Samal ajal veiste ja sigade arv pole oluliselt kasvanud, küll aga on muudetud rangemaks ja kehtestatud uusi loomakasvatusele ja sõnnikukäitlusele rakendatavaid kohustuslikke veekaitsemeetmeid. Näiteks on kehtestatud normid sõnnikuhoidla ehitamisele, selle mahule ja paiknemisele (vältida veekaitsevööndit), samuti sõnnikuaunadele (Kasak jt., 2016).

3. Metoodika

3.1. Põhjavee koostis

Uuringu läbiviimiseks valitud pilootala asub Lääne-Virumaal ning hõlmab endas Väike-Maarja alevikku, seda ümbritsevat Väike-Maarja valda, ulatudes osaliselt ka Tapa valda (joonis 3.1.1). Pilootala mõõtmed on 20 x 17 km ning ala valimisel lähtuti juba olemasolevast andmestikust, seirepunktide olemasolust ning haritava maa katvusest. Valiku tegemisel mängis rolli ka Vaikmäe jt. (2020) uuring, kus lisaks tavapärasele põhjavee keemilise koostise uurimisele tehti mitmesuguseid isotoopkoostise analüüse. Lisaks eelnevalt mainitud uuringu puurkaevudele otsiti sobivaid uuringupunkte ka KESE ja EELISE andmebaaside põhjal. Koostatud üldise veekeemia analüüsise andmebaasi alusel pilootala ja puurkaevude valiku kriteeriumiks oli võimalikud pikad keemiliste analüüsise, ennekõike NO_3^- , andmerekad. Potentsiaalsete proovivõtu kohtade valimist arvati välja kõik puurkaevud, kust oli võetud ainult kaevu puurimise järgne veeproov. Lõplik puurkaevude valik kujunes proovikogumise käigus, sest osad algselt valimis olnud puurkaevud polnud proovivõtmiseks kõlbulikud või ei suudetud kaevu valdajaga kontakti saada. Lõplikku valimisse jäänud 21 puurkaevu ja 3 allikat on toodud joonisel 3.1.1 ning nende nimekiri Tabelis 1. Valimisse lisati ka antud ala piires asuvad Kiltsi, Äntu ja Simuna allikad, mis on riikliku seire nimekirjas ning väga pikkade keemiliste analüüsise andmeridadega.

Veeproove võeti uuringupunktidest projekti käigus kahel korral, suvel ning sügise alguses, ajavahemikus 11.–12. juuli ja 13.–14. september 2023. Sügisese proovivõtmise käigus Äntu allikast veeproovi ei võetud, sest asukohas oli seisev vesi, allikast toitumine ja seega vee voolamine oli peatunud, mistõttu poleks proov olnud esinduslik. Kokku võeti ühe proovivõtmise käigus igast punktist kolm veeproovi põhielementide, vesiniku ($\delta^2\text{H}$) ja hapniku ($\delta^{18}\text{O}$) isotoopide ning nitraadist N ja O isotoopide ($\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$, $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$) määramiseks. Kohapeal mõõdeti portatiivse multimeetriga (WTW Multi 3320) väliparameetrid (pH, elektrijuhtivus, temperatuur, lahustunud hapniku sisaldus ja redokspotentsiaal).



Joonis 3.1.1. Pilootala asukoht nitraaditundlikul alal ning valitud kaevud (kat nr) ja allikad veeproovide võtmiseks.

Tabel 1. Proovitud puurkaevude ja allikate asukohad ja sügavused.

ID	SJA kood	Y	X	Sügavus (m)	Avatud vahemik (m)
PRK0003030		625077	6554308	53.0	20–53
PRK0003045		625893	6553239	50.0	25–50
PRK0003516	SJA1240000	621618	6560228	60.5	30–60.5
PRK0003572	SJA5205000	629223	6556482	73.0	30–73
PRK0003578		627646	6558001	29.5	0–7
PRK0003617		634060	6554726	45.0	25–45
PRK0009112	SJA5850000	635794	6555048	35.0	22.6–35
PRK0015464		633130	6549649	30.0	8–30
PRK0015641		624214	6552659	30.0	6.8–30
PRK0015642		637969	6549753	30.0	8.5–30
PRK0016656		624774	6555384	32.0	20–32
PRK0023052		630447	6551695	41.0	20–41
PRK0023053		630047	6555504	50.0	30–50
PRK0023058		629749	6552937	50.0	20–50
PRK0023066		627450	6555951	50.0	30–50
PRK0050266		625879	6550988	51.0	20–51
PRK0050728		627771	6555119	33.0	14.5–33
PRK0053006		638527	6548799	25.0	14.3–25
PRK0054029		631912	6549437	21.0	5.9–21
PRK0056769		629722	6554935	33.0	23.7–33
PRK0063005	SJA2593000	631926	6558142	33.0	15–33
Simuna allikas	SJA8551000	637889	6547303		
Äntu allikas	SJA1411000	630214	6551268		
Kiltsi allikas	SJA3851000	625757	6550877		

Veeproov põhielementide analüüsiks võeti 1L plastikpudelitesse, EKUK-i laboris mõõdeti veeproovide anioonide (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^- , PO_4^{3-}), katioonide (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , NH_4^+),

üldlämmastiku ja üldfosfori sisaldused ning pH, elektrijuhtivus ja keemiline hapnikutarve (KHT_{Mn}). Proovid hapniku ja vesiniku isotoopkoostise määramiseks võeti eraldi 15 ml suurusesse proovitaarasse ning saadeti analüüsimiseks Läti Ülikooli Geograafia- ja maateaduste teaduskonna keskkonna dateerimise laborisse. Lämmastiku ja hapniku isotoopide mõõtmiseks nitraadist võeti veeproovid eraldi HDPE plastikust proovipudelitesse, mis sügavkülmutati analüüside teostamise ajani. Lämmastiku ja hapniku isotoobid määrati Tartu Ülikooli geoloogia osakonna isotoopgeokeemia laboris.

Varasemate ja uuringu käigus võetud veekeemia analüüside tulemuste põhjal uuriti nitraadireostuse ajalisi ja ruumilisi levikumustreid pilootalal, et tuvastada kasvu- või langustrende. Nendele lisati ka isotoopanalüüsid, mida kasutati ennekõike nitraadireostuse päritolu selgitamisel.

3.2. Põhjavee modelleerimine

NTA alal põhjavee voolamise ja saasteainete liikumise välja selgitamiseks koostati hüdrogeoloogiline mudel. Modelleerimiseks kasutati tarkvarasid Modflow6 ja Modelmuse. Uuringusse kaasatud puurkaevude toitealade ja põhjavee vanuse selgitamiseks kasutati moodulit Modpath7.

Koostatud hüdrogeoloogiline mudel tugineb Virumudelil (Polikarpus, 2018), mida kohandati uuringu eesmärkidest lähtuvalt. Mudeli peamised erinevused võrreldes Virumudeliga on:

- a) Mudeli ala on 120 x 125 km (joonis 3.2.1), mis on oluliselt suurem kui pilootala 20 x 17 km ja katab täielikult toite- ja väljavoolualad Pandivere kõrgustikul ja selle ümbruses. Mudeli võrgu samm on pilootalal 100 m, pilootala ümbruses 30 x 27 km on samm 200 m ja kaugemal 800 m.
- b) Virumudeliga võrreldes on vähendatud kihtide arvu 16-ni (Tabel 2) jättes välja Lontova veepideme ja selle all lamavad Ediacara kihid. Varasem analüüs (Jõeleht ja Polikarpus, 2018) ja isotoop uuringud (Pärn, 2018) näitavad, et sügavamates kihtides on põhjavee liikumine väga aeglane ning pilootala veeliikumist ei mõjuta oluliselt, kuid mudeli üldise toimimise huvides on need kihid jäetud sisse.
- c) Võrreldes Virumudeliga muudeti kontseptuaalselt aluspõhja pealmiste kihtide käsitlemist NTA piires. Puurkaevude vooluhulga karotaaži tulemused näitavad, et Siluri–Ordoviitsiumi põhjaveekompleksis on statistiliselt kõige parema lateraalse veejuhtivusega pindmised kihid (Perens ja Vallner, 1997). Ligikaudu pool kaevudesse jõudvast veest tuleb ülemise 15 m sügavuselt. Sügavuti vettjuhtivate tsoonide arv väheneb ning sügavamal kui

50–75 m esineb neid harva. Seda nähtust saab selgitada karbonaatkivimite kihilise ehitusega, kus kihipindasid pidi on läbilõike ülaosas soodsad tingimused vee voolamiseks mööda kihipindu samas kui sügavuti litostatiline rõhk surub kihipinna lõhed kinni.



Joonis 3.2.1. Põhjavee mudeli ala koos pilootala asukohaga ning NTA piiriga.

- d) Maapinnalähedase hästijuhtiva aluspõhja simuleerimiseks kasutati mudeli kihte 2 ja 3 (D_{2ar} ja D_{2nr}), mis Virumudel is NTA piires on minimaalse paksusega, kuna vastavaid kivimeid alal ei esine. NTA piires suurendati nende paksust vastavalt 5 ja 15 meetrini

(kihid kiilduvad välja 5 km laiuses vööndis) ning kihtidele omistati $K_x = 48$ m/d ja $K_x = 28$ m/d.

Vooluteekondade arvutamisel lähtuti kivimite poorsusest 10%. Vooluteekond lõpetati, kui joon jõudis aluspõhja pealispinnani.

Tabel 2. Põhjaveemudeli kihid.

Nr	Kiht	Lade	Kihistu / Kommentaar
1	Q	Kvaternaar	
2	D2ar / S–O	Aruküla / karstunud kiht NTA-l	5 m paks, NTA-l $K_x = 53$ m/d
3	D2nr / S–O	Narva / karstunud kiht NTA-l	15 m paks, NTA-l $K_x = 38$ m/d
4	D1pr	Pärnu	
5	S1rk	Raikküla	
6	S1jr	Juuru	
7	O3prk-prg	Porkuni, Pirgu	Ärina, Adila, Moe
8	O3vr	Vormsi	Kõrgessaare, Tudulinna
9	O3-2nb-rk	Nabala, Rakvere	Saunja, Paekna, Rägavere, Tõrremäe
10	O2on	Oandu	Hirmuse
11	O2kl-jh-id- kk	Keila, Jõhvi, Idavere, Kukruse	Kahula 2 ja Kahula 1
12	O2kk	Kukruse põlevkivi	
13	O2uh	Uhaku	Kõrgekalda
14	O2ls-as-kn	Lasnamäe, Aseri, Kunda	
15	O1-tl-lt-vr	Toila-Leetse, Latorpi, Volhovi, Varangu, Türisalu	Kalvi, Künnapõhja, Saka, Mäeküla, Joa, Klooga
16	O1pk-Ca1pr	Pakerordi, Pirita	Kallavere, Tsitre, Ülgase, Tiskre, Rannamõisa, Kakumäe

3.3. Põllumajanduskeskkond ning rakendatud meetmed

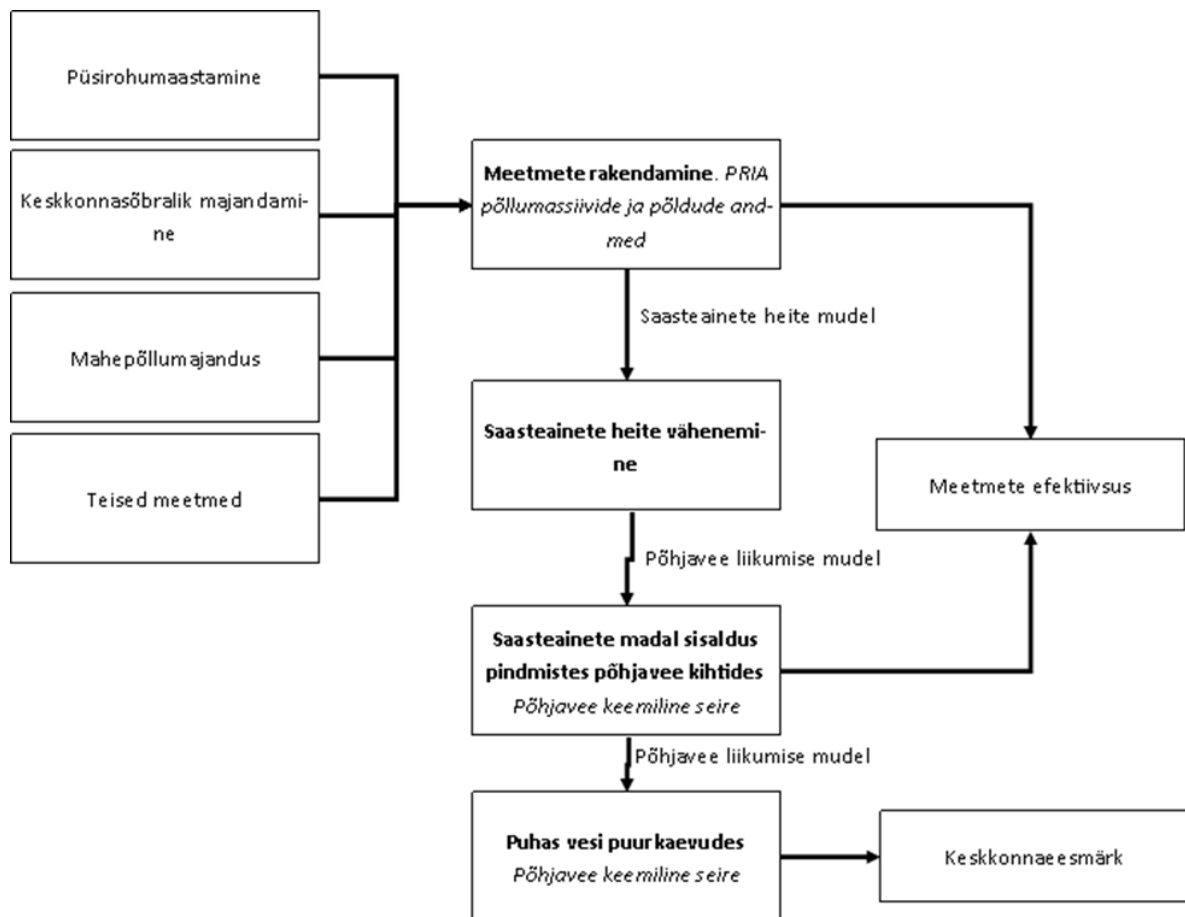
Meetmete ajaline ja ruumiline kaardistamine

Põllumajanduskeskkonna meetmete efektiivsuse hindamiseks analüüsiti, kuidas meetmete rakendamine vähendab saasteainete sisaldust madalas põhjavees, mille vanus on kuni 15 a. Kuna põllumajanduse mõjud põhjavee seisundile on eelkõige pikaajalised, siis analüüsiti ka pikaajalisi trende, valides selleks 10-aastase ajasammu. Selleks analüüsiti erinevate meetmete rakendamist põllu või põllumassiivi tasandil vahemikus 2004 kuni 2023. Selleks sõeluti selles ajavahemikus rakendatud ÜPP keskkonnameetmeid ja valiti nende seast välja need, mis võiksid oluliselt

mõjutada lämmastiku heidet pinnasesse ja veekeskkonda. Nendeks osutusid alljärgnevad kolm toetusmeetet.

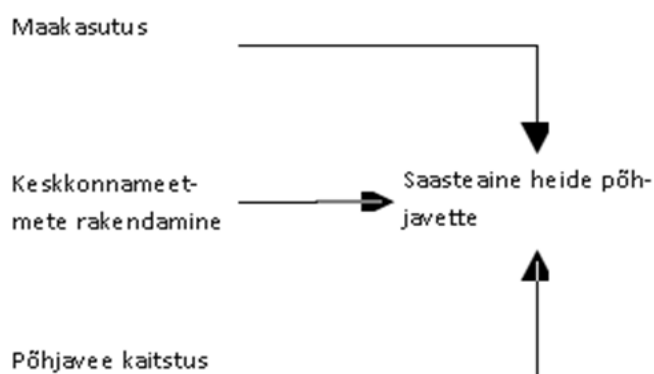
- **Püsirohumastaamine.** Püsirohumana mõistetakse põllumajanduslikku maad, mida kasutatakse rohu või muude rohttaimede kasvatamiseks ning millele vähemalt viis aastat külvikorda ei rakendata. Võrreldes haritava maaga, püsirohumad väetatakse vähem või üldse mitte (Kasak et al., 2016). Tänu stabiilsele pinnasele on nii lämmastiku leostumise kui ka erosiooni oht väiksem.
- **Keskkonnasõbralik majandamine (KSM).** KSM on vabatahtlik meetmete kompleks, mille eesmärkide seas on elurikkuse ja maastikulise mitmekesisuse suurendamine, kuid ka veekaitse. Näiteks on siin rangemad piirangud mustkesale. Ajaperioodil 2009–2023 on KSM baasnõuded ja lisategevused muutunud. Veekaitse kontekstis on need muutused olnud suures osas seotud seadusandluse (Veeseadus, nitraaditundliku ala kaitse-eeskiri) muudatustega. Teiseks, ilmselt tootjate tagasiside tulemusena on tehtud täpsustusi. Siiski ei tuvastatud selle toetusmeetme muudatustest ühtegi niisugust, mis võiks lämmastiku koormust põhjavette oluliselt muuta.
- **Mahepõllumajandus.** Mahepõllumajanduse toetusmeetmes on taimekasvatuses keelatud sünteetilise mineraalse lämmastiku kasutamine. Sellisel moel püütakse takistada lämmastiku kadu, sh selle hajuheidet põhjavette (Vetemaa & Mikk, 2016).

Lisaks võtsime arvesse seadusandlusest, sh veeseaduse (2002) ja nitraaditundliku ala (2003) kehtestamisest tulenevaid piirangute ja nõuete karmistumisi maakasutusele. Olulised on ülaltoodud daatumid, mis võiksid tähistada ajalisi pöördepunkte põhjavee saastamises lämmastikuga. Tööhüpoteesis oletasime, et meetmete rakendamine toob kaasa saasteainete heite vähenemise ja see omakorda saasteainete võrdlemisi madala sisalduse maapinnalähedastes põhjaveekihtides (joonis 3.3.1). Seega veekaitsemeetmeid ja nende muutuseid võeti arvesse kui konteksti, mille abil interpreteeriti viimasel kahel dekaadil toimunud muutusi põhjavees. Põhjavee muutuste kaudu omakorda kirjeldati meetmete tõhusust. Samal ajal võtsime arvesse, et tõenäoliselt suurenes ÜPP perioodil uurimisalal mineraalse lämmastiku kasutamine haritavatel põldudel (vt peatükk 2.2). Järelikult näiteks olukorras, mil lämmastiku koormus põhjavette kasvas, võisid veekaitsemeetmed sellegipoolest tõhusad olla.



Joonis 3.3.1. Põllumajandusliku maakasutuse vabatahtlike ja kohustuslike veekaitsemeetmete efektiivsuse hindamise kontseptsioon.

Vastavalt Normak jt. (2019) kontseptsioonile, põhjaveele avalduvat põllumajandusest lähtuva hajukoormuse hindamisel arvestati lisaks maakasutusele ja keskkonnameetmetele ka põhjavee kaitstust (joonis 3.3.2). Oletati, et kaitsmata põhjaveega alalt jõuab põhjavette proportsionaalselt rohkem põldudele kantavast lämmastikust ehkki neid proportsioone pole kvantifitseeritud.



Joonis 3.3.2. Saasteainete heite kontseptuaalne mudel

Lähteandmed

Andmed põllumajandusliku maakasutuse ja rakendatud meetmed kohta saadi PRIA andmebaasidest (Tabel 3). Täiendavalt kasutati põhjavee kaitstuse (Maa-amet, 2024) andmekihti.

Tabel 3. Kasutatud (normaalne tekst) ja edaspidi kasutatavad (*kursiiv*) põllumajandusliku maakasutuse andmed

Andmekogu	Ajaperiood	Näitajad
PRIA pindalatoetuste ajaloolised ruumiandmed: põllumassiivid	2004 – 2023	Maakasutus (põllukultuurid vs püsirohumaa), kultuur
PRIA pindalatoetuste ajaloolised ruumiandmed: põllud	2018 – 2023	Taotleja, veekaitsemeetmed (KSM, mahe), maakasutus, kultuur
<i>Tsentraalse põlluraamatu andmed</i>	2025 –	<i>Väetiste ja taimekaitsevahendite kasutus põllu kaupa</i>

Põllumajandusloomade arvude põhjal arvutati välja nende sõnnikuga tekkivad lämmastiku kogused vastavalt Maastiku (1984) ja Hou et al. (2016) näidatud ekskretsioonikoefitsientidele. Maastiku (1984) näidatud tekkiva sõnniku kogused ja selle N sisaldust rakendati ajavahemiku 1980–1990 (plaanimajanduse periood) kirjeldamiseks, Hou et al. (2016) määrasid rakendati ajavahemikule 1995–2020.

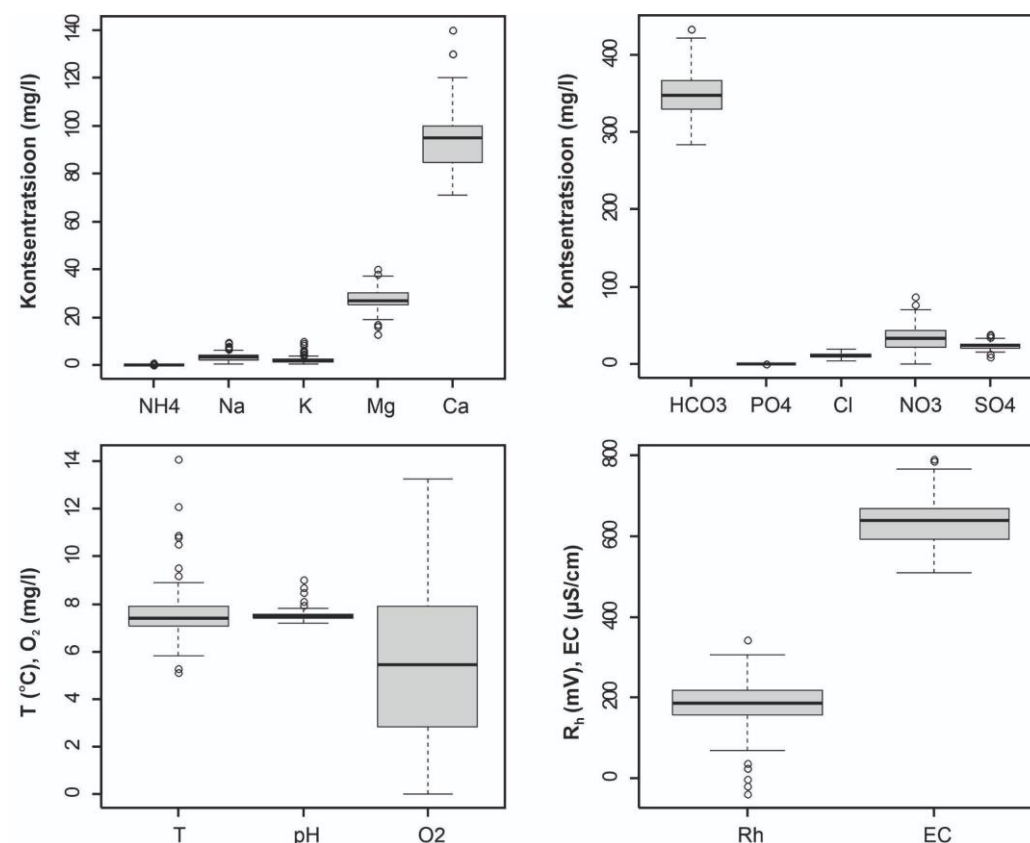
Meetmete mõju põhjaveele hinnati pilootalal (Joonis 3.2.1). Meetmeid kaardistati pilootala põhjavee valgla (Joonis 4.3.1). Oletasime, et pilootalal ja selle valgla leitud muutused ja nendevahelised seosed võiksid kirjeldada kogu nitraaditundikku ala.

4. Tulemused ja arutelu

4.1. Nitraadi levik ja trendid

Põhielemendid, nitraat ja isotoobid pilootalal võetud veeproovides

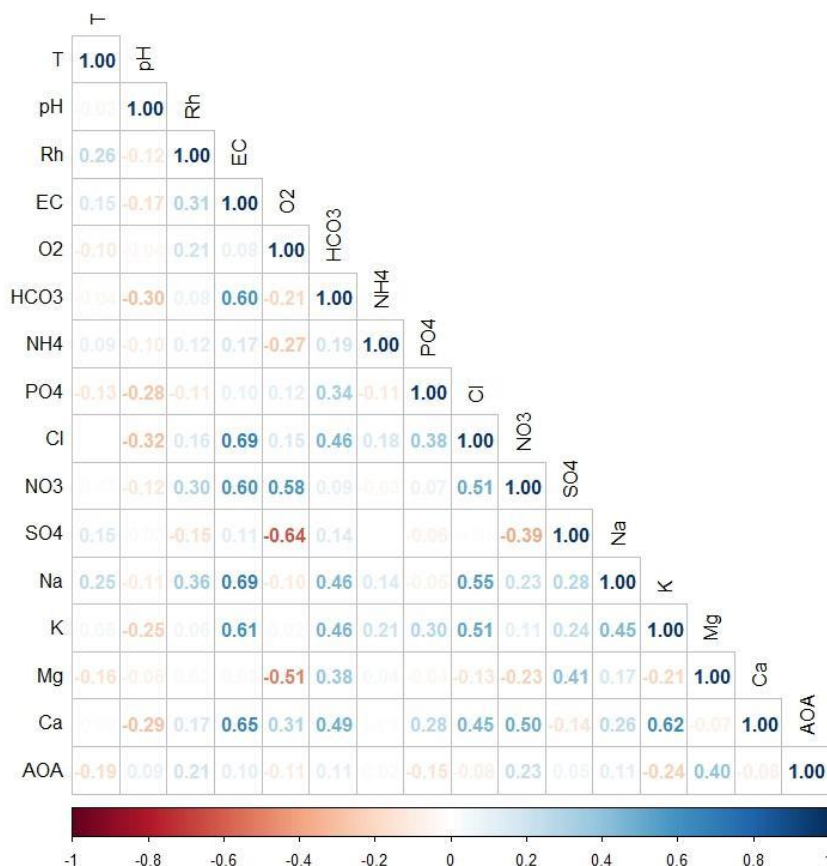
Uuringu käigus võetud veeproovide keemiliste analüüside tulemused on toodud Lisas 1. Samas on esitatud ka Vaikmäe jt. (2020) uuringu raames saadud analüüside tulemused, sest suuremalt osalt kattub käesoleva töö kaevude valim varasemaga ning seetõttu on need olulised tulemuste interpreteerimisel ning järelduste tegemisel. Põhjavee keemilise koostise põhikomponentide sisalduse varieeruvus kahe uuringu käigus võetud proovide lõikes on toodud joonisel 4.1.1. Eesti lubjakivides olevale põhjaveele omaselt on kõige kõrgemad Ca, Mg ja HCO_3 ionide kontsentratsioonid. Nitraaditundlikule alale omaselt kerkivad anioonide seas esile ka kõrgemad NO_3 sisaldused.



Joonis 4.1.1. Karpdiagrammid põhielementide sisalduste ja väliparameetrite väärtustega, mis iseloomustavad nii selle uuringu kui ka Vaikmäe jt. (2020) poolt kogutud veeproovide keemilist koostist. Y-telg on graafikutel erinev.

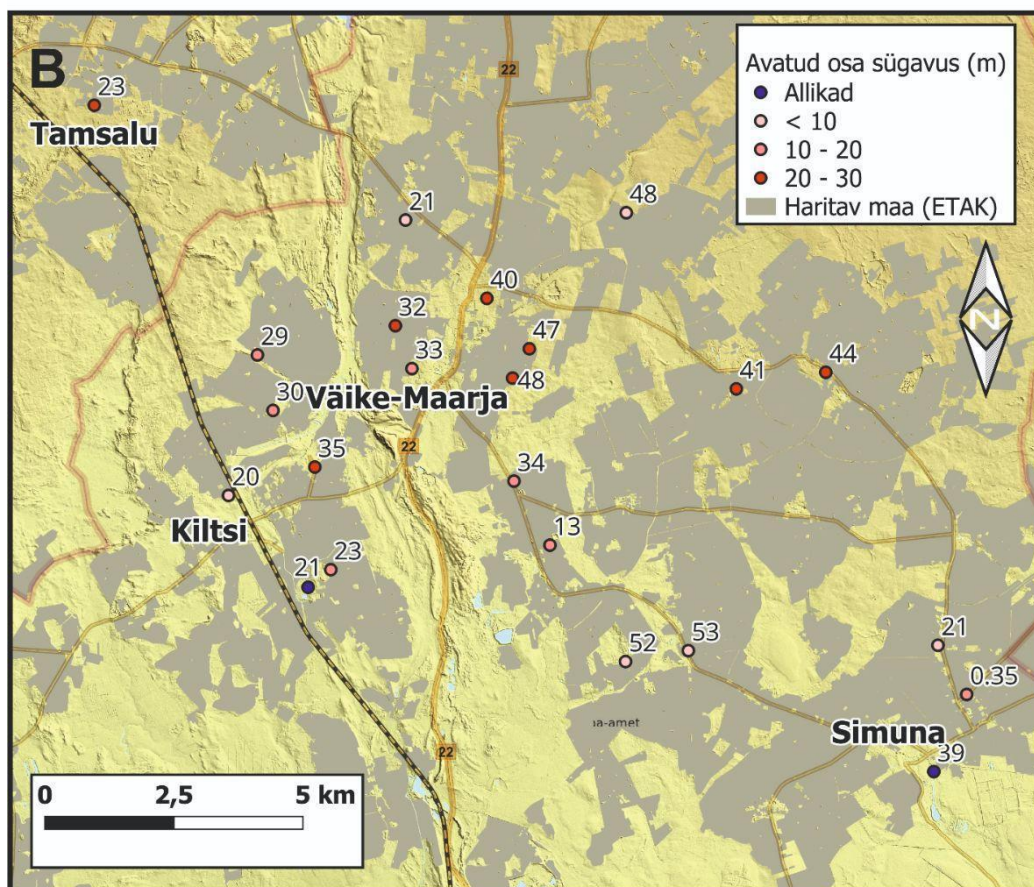
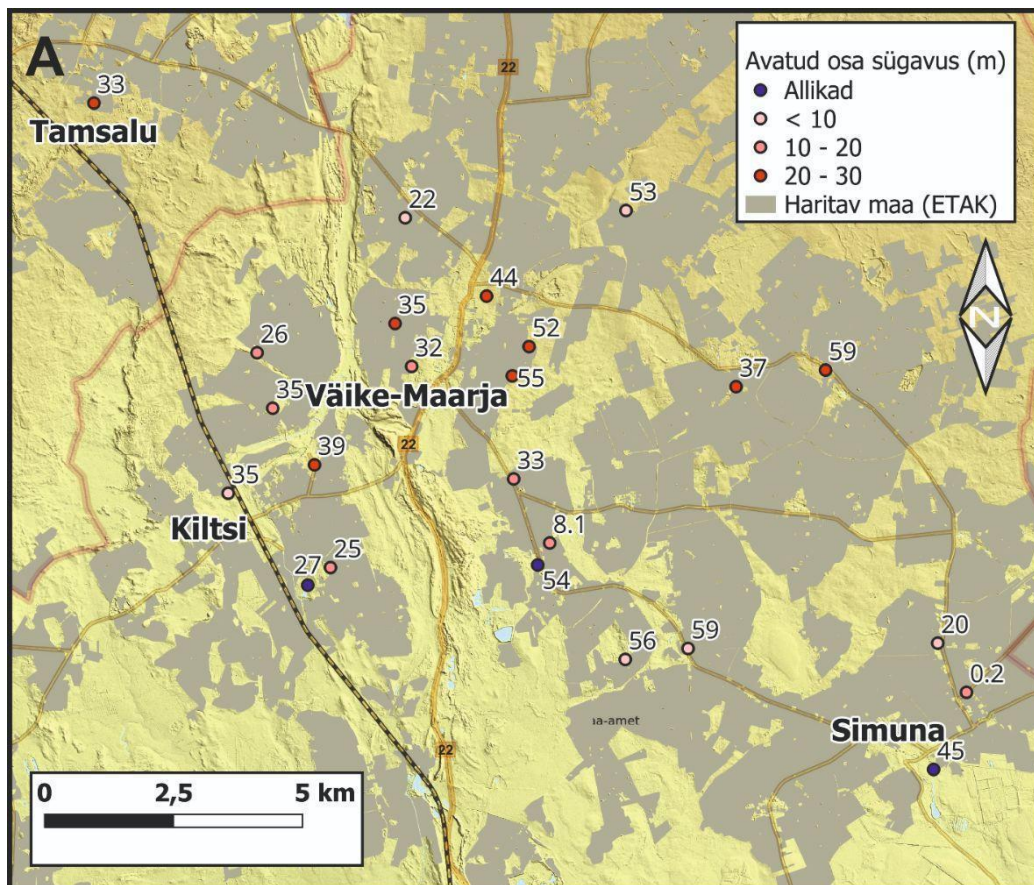
Ioonide ja väliparameetrite omavahelises korrelatsioonis (Joonis 4.1.2) võib esile tõsta nitraadi kontsentratsiooni positiivset sõltuvust põhjavee elektrijuhtivusest ja lahustunud hapniku sisaldusest. Lisaks sellele on mõõdukas korrelatsioon ka NO_3 ning Ca ja Cl sisalduste vahel,

millest viimast võib samuti seostada markerina põhjavee põllumajanduslikule reostusele (Geilfus, 2019). Teiste põhikomponentide ja väliparameetritega on nitraadi korrelatsioon mitteoluline.



Joonis 4.1.2. Põhjavee põhikomponentide ja väliparameetrite omavaheline korrelatsioonimaatriks antud uuringu ja Vaikmäe jt. (2020) poolt kogutud põhjavee keemiliste analüüside põhjal. AOA - tähistab puurkaevu Avatud Osa Algussügavust maapinnast.

Nitraadi sisaldus seiratud puurkaevudes on toodud joonisel 4.1.3. Tinglikult võib nitraadi sisalduse levikumustri järgi jaotada pilootala kaheks piki Tartu–Rakvere maanteed. Nitraadi levikumustris paistab silma, et mõnedes pilootala idaküljele jäävates puurkaevudes on sisaldused üle lubatud piirväärtuse 50 mg/l, eriti suvel (juulis) võetud proovides. Ala lääneosas on mõõdetud nitraadisisaldused väiksemad, jäädes mõlemal proovivõtu perioodil alla 40 mg/l. Nitraadi sisalduse pindalaline erinevus langeb näiliselt kokku ka haritava maa osakaaluga maastikus pilootala lääne- ja idaküljel. Idaosas on haritava maa osakaal suurem kui ala lääneosas. Lisaks paistab enamuses seirekohtades silma ka nitraadisisalduse vähenemine septembris kogutud proovides võrreldes suviste veeproovidega.



Joonis 4.1.3. Nitraadi sisaldus veeproovides (mg/l) juulis 2023 (A) ja septembris 2023 (B). Punktide värvus näitab seiratud kaevude avatud osa alguse sügavust maapinnast.

Väga selgelt eristuvad mõõdetud nitraadisisaldused pilootala kagunurka jäävates kahes madalas (sügavus <30 m) puurkaevus, millest ühes, puurkaevus kat.nr. 53006 jäävad sisaldused alla 1 mg/l. Samas tuleb välja tuua, et selles puurkaevus eristuvad selgelt ka veeproovi võtmisel määratud parameetrid, eriti just lahustunud hapnik ja redokspotentsiaal (sügisel mõõdetud $O_2 = 0,1$ mg/l ja $E_h = -19,6$ mV), mis viitavad hapnikuvaesematele tingimustele võrreldes teiste puurkaevudega. Redutseerivatel tingimustel võib olla mitu põhjust. Seda võib põhjustada puurkaevu vees proportsionaalselt suurem sügavama põhjavee osakaal võrreldes maapinnalähedase, tugevalt karstunud kivimite veega. Samas võivad redutseerivad tingimused viidata bakteriaalsele reostusele, mis on ära tarbinud vaba hapniku, millele järgnevalt tarbitakse nitraati, mistõttu hakkavad vähenema ka NO_3^- sisaldused. Bakteriaalse reostuse välistamiseks oleks mõistlik võtta puurkaevust 53006 veeproov ka mikrobioloogiliste analüüside jaoks. Tuleb märkida, et pilootala kagu- ja lõunaosas on maapinnalähedastes puurkaevudes nitraadi sisaldus muutlik. Lähedal asuvas puurkaevus 15642 on nitraadi sisaldus 20–21 mg/l ning vähem usaldusväärse infoallikana on ümbruskonnas puurkaeve, mille rajamise järgselt võetud ainsas veeproovis on nitraadi sisaldus alla 10 mg/l. Teisalt Kurtina ja Kärša küla puurkaevudes 15464 ja 54029 vastavalt vahemikes 53–59 mg/l ja 52–56 mg/l ning Simuna allikas 39–45 mg/l.

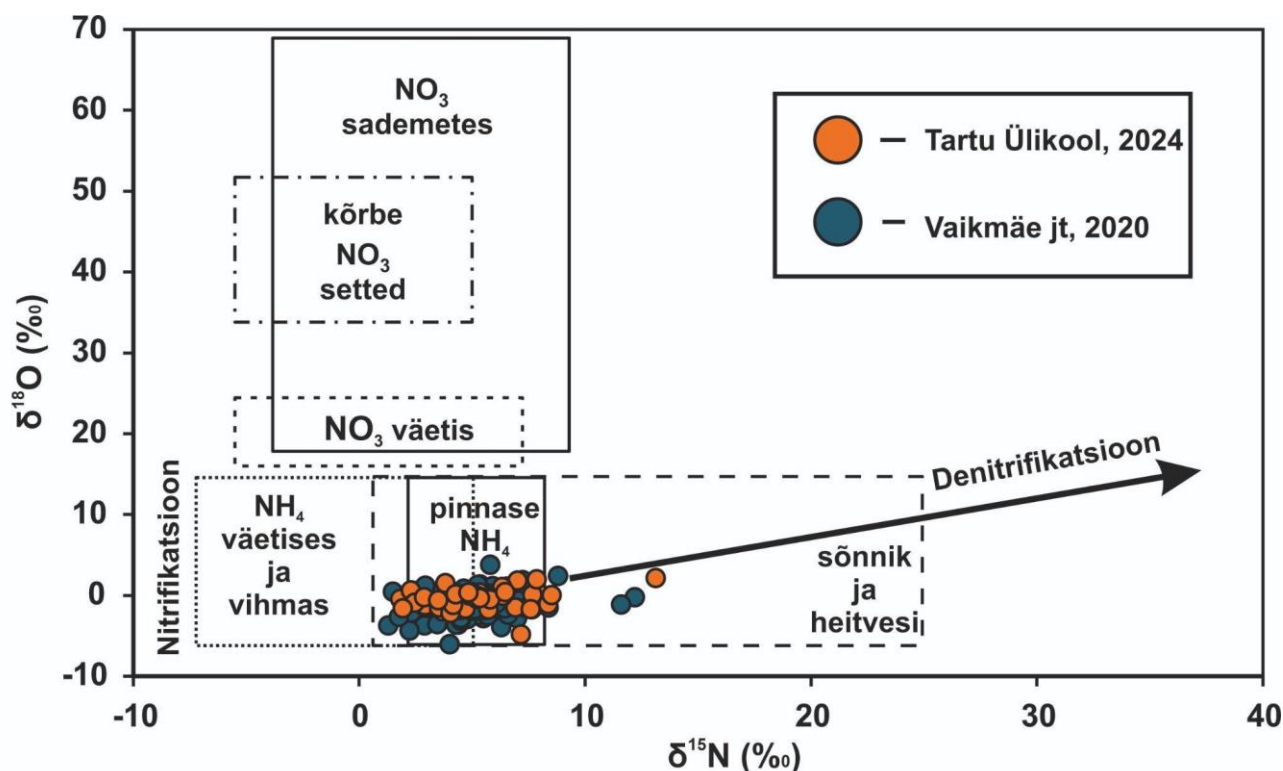
Kui vaadata veeproovide nitraadisisaldust puurkaevude sügavuse suhtes, siis selget korrelatsiooni ei paista. Piirväärtust (50 mg/l) ületavaid või selle lähedasi nitraadi sisaldusi on mõõdetud nii maapinnale lähemal avatud (<10 m) kui ka sügavamal (10–20 m ja 20–30 m) avatud kaevudes (joonis 4.1.3). Nitraatide kõrgendatud sisaldusega põhjavett leiab nii pinnalähedasemalt avatud kaevudes kui ka nendes, mille avatud intervall jääb sügavamale. Sellega langevad käesolevad tulemused kokku varasemalt tehtud uuringutega (Keskkonnaministeerium, Maaeluministeerium, Keskkonnaagentuur, 2020), kus on tõdetud, et nitraadid jõuavad kiiresti ka maapinna suhtes sügavamalt avatud puurkaevudesse.

Nitraadi isotoopkoostis

Põllumajanduskultuuride poolt kasutamata jäänud lämmastikväetisest pärinev ammooniumlämmastik infiltreerub põllumaade all olevasse põhjavette. Aeroobses keskkonnas toimub nitrifikatsiooni protsess, kus bakterite ja arhede abil oksüdeeritakse väetises olev lämmastik nitraadiks, mis levib kogu aeratsioonivöö ja aeroobse veekihi ulatuses. Põhjavee liikudes sügavuse suunas tingimustesse, kus põhjavees ei ole piisavalt hapnikku, toimub denitrifikatsioon, kui anaeroobsed mikroorganismid kasutavad energia saamiseks hapniku allikana nitraate, taandades neid üha väiksema hapniku osakaaluga ühenditeks (NO_2 , NO , N_2O) kuni gaasilise lämmastikuni (N_2). Seega sõltub muuhulgas NO_3 esinemise sügavus põhjavees hapnikurikka (oksüdeeriva) vöö paksusest geoloogilises läbilõikes.

Tuvastamaks nitraatse reostuse allikaid kasutatakse isotoopmeetodeid ja lähtutakse eeldusest, et erinevatest saasteallikatest (mineraalväetised, sõnnik, heitveed jne) pärineva nitraadi lämmastiku ja hapniku isotoopkoostis on erinev ning võib lisaks muutuda ka lämmastikuringe käigus (Kendall & McDonnell, 1998; Kendall et al., 2007). Mikroorganismid kasutavad eelistatult keemiliste elementide kergemaid isotoope ning seetõttu muutub lämmastiku ühendite isotoopkoostis nitrifikatsiooni ($\text{NH}_4 > \text{NO}_3$) ja denitrifikatsiooni ($\text{NO}_3 > \text{N}_2$) protsesside käigus.

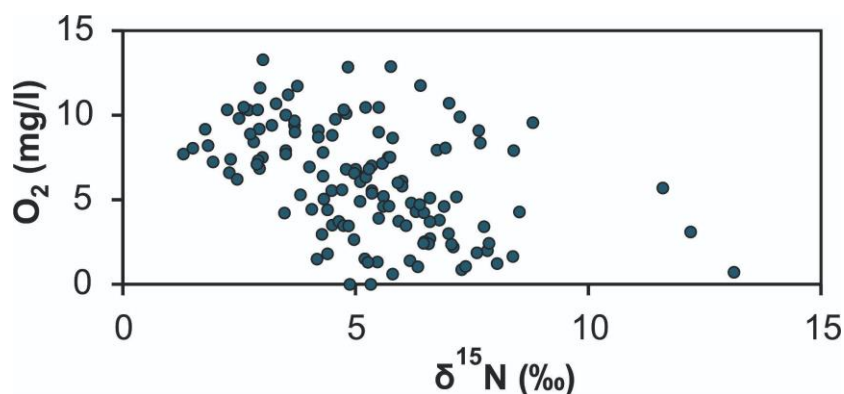
Jooniselt 4.1.4 on näha, et nii käesoleva kui ka varasema uuringu (Vaikmäe jt., 2020) käigus teostatud määrangud langevad hästi kokku ja viitavad sarnastele potentsiaalsetele nitraatiooni allikatele põhjavees. Tartu Ülikoolis teostatud laborianalüüside põhjal varieeruvad pilootala nitraadi isotoopkoostise $\delta^{15}\text{N}$ väärtused vahemikus 1,8‰ kuni 8,5‰ (va üks erandlik määrang väärtusega 13,1‰) ning nitraadi hapniku isotoopkoostise $\delta^{18}\text{O}$ väärtused vahemikus -4,8 kuni 2,2‰. Tuginedes joonisel 4.1.4 kujutatud nitraadi võimalike allikate isotoopkoostist iseloomustavatele väljadele võime pilootala puhul välistada nii NO_3 -rikkad sademed kui ka nitraatväetised põhjavee nitraatse reostuse põhjustajatena. Mõlemat nimetatud allikat iseloomustab märkimisväärselt kõrgemad $\delta^{18}\text{O}$ väärtused, mis varieeruvad vahemikus 17–70‰.



Joonis 4.1.4. Uuringu käigus võetud veeproovide ja Vaikmäe jt. (2020) poolt kogutud veeproovide nitraadist mõõdetud hapniku ($\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$) ja lämmastiku ($\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$) isotoopsuhted.

Analüüsitulemused asetsevad diagrammil alal, kus omavahel kattuvad nii ammooniumväetiste, pinnases oleva NH_4^+ kui ka sõnniku ning reovee isotoopkoostist iseloomustavad väljad. Nagu eespool mainitud, ei sõltu nitraadi isotoopkoostis ainult lämmastiku allika algsest koostisest, vaid ka hilisematest protsessidest. Denitrifikatsioon on anaeroobne protsess, mille toimimiseks on vaja nitraati, mida redutseerida ja orgaanilist ainet, mida oksüdeeritakse. Bakterid saavad energiat orgaanilise aine lagunemisest, mis toimub nitraadi redutseerimise kaasabil. Denitrifikatsiooni tulemusena “nihkuvad” punktid joonisel 4.1.4 denitrifikatsiooni tähistava noole suunas ($\delta^{15}\text{N}$ suureneb).

Veeproovide võtmisel mõõdetud lahustunud hapniku sisaldus viitab osalisele denitrifikatsioonile. Joonisel 4.1.5 moodustavad enamik punktidest võõndi, kus hapniku sisalduse vähenedes suureneb lämmastiku isotoopsuhe ligikaudu 3‰ võrra. See vihjab, et nitraadi algne $\delta^{15}\text{N}$ on väiksem kui 5‰. Põhipilvest kõrgemal moodustub üksikutest punktides jada, mis võib viidata teistsugusele, veidi suurema $\delta^{15}\text{N}$ väärtusega nitraadi allikale.

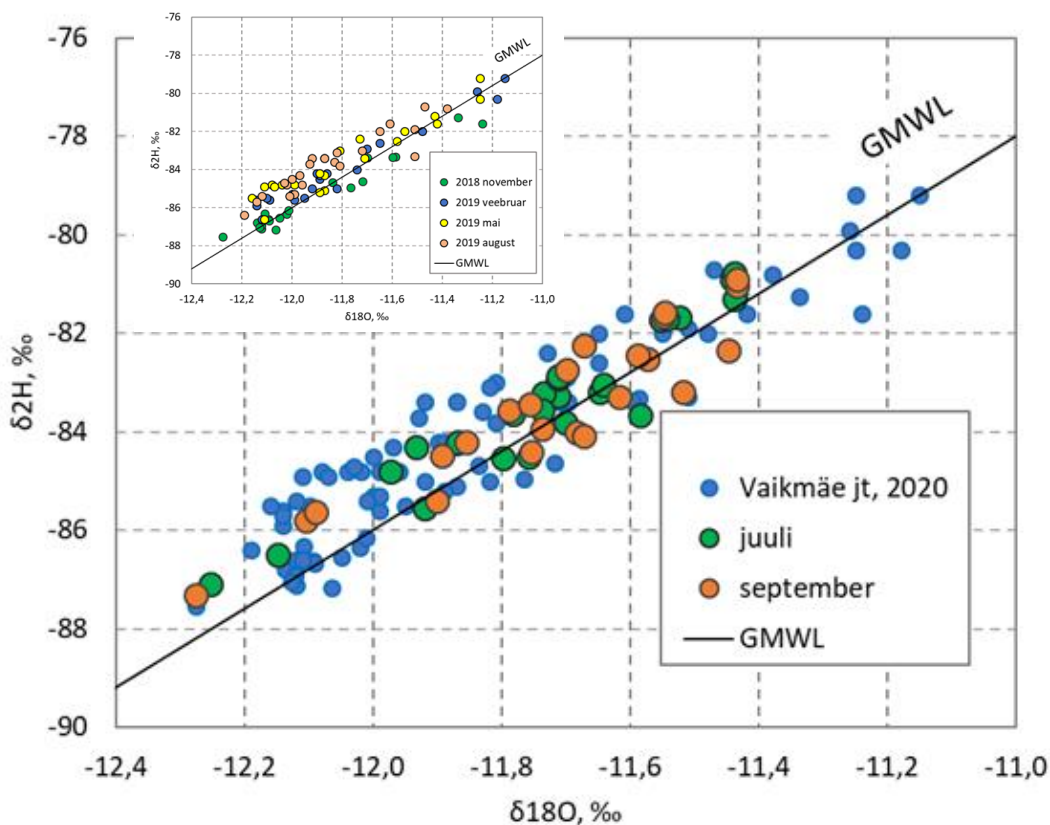


Joonis 4.1.5. Veeproovi võtmisel mõõdetud lahustunud hapniku sisaldus ja nitraadi lämmastiku isotoopsuhe.

Tulemused näitavad, et osad punktid joonisel 4.1.4 on denitrifikatsiooni tõttu “nihkunud” ammooniumväetiste väljalt sõnniku ja heitvee isotoopkoostist iseloomustavale väljale. Tänu uuringualal esinevate kivimite lõhelisusele ja karstumusele ning sellest tulenevale heale veejuhtivusele on ka veevahetus maapinnalähedases vöös intensiivne, mistõttu näiteks lokaalsed eramajapidamiste punktreostusallikad (heitvesi, sõnnik) ei mõjuta oluliselt põhjavee nitraadisaldust või on selle mõjuraadius väike. Varasema isotoopuuringu (Snow, 2018) ja ka joonise 4.1.4 põhjal peaks sõnniku ja heitvee mõju olulisust nitraatse reostuse allikana rõhutama proovipunktide paiknemine $\delta^{15}\text{N}$ vahemikus +10 kuni +25‰. Käesoleva uuringu ning ka Vaikmäe jt. (2020) analüütilised tulemused kuuluvad kergema isotoopkoostisega veele ning viitavad ammooniumväetistele kui peamistele nitraatse reostuse põhjustajatele.

Vee hapniku ja vesiniku isotoopkoostis

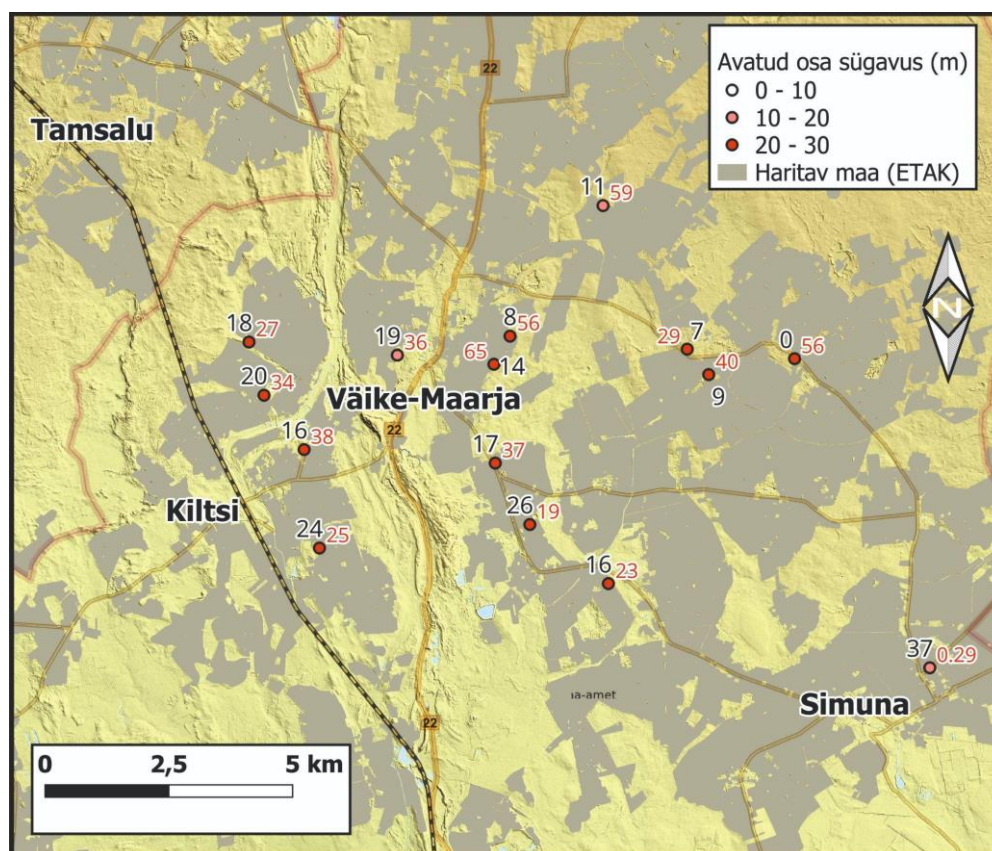
Veeproovide hapniku ($\delta^{18}\text{O}$) ja vesiniku ($\delta^2\text{H}$) isotoopkoostise tulemused langevad kokku Vaikmäe jt. (2020) aruande lisas toodud mõõtmistulemustega (Joonis 4.1.6). Tulemused näitavad, et uuritud puurkaevude ja allikate vesi on sademeveelise päritoluga, millest annab tunnistust graafikul punktide paiknemine globaalse sademetevee keskmise (GMWL) trendi lähistel, kuid puudub hooajaline variatsioon. Külmal ja soojal perioodil on sademed vastavalt negatiivsemate ja positiivsemate $\delta^{18}\text{O}$ ja $\delta^2\text{H}$ väärtustega, kuid pilootala veeproovide tulemustes sellist variatsiooni ei ole. Seda ka mitte allikavee proovides erinevalt näiteks Tuhala karstialast, kus allikavee $\delta^{18}\text{O}$ ja $\delta^2\text{H}$ koostise erinevus talvise kõrgvee ja suvise madalvee vahel ületas vastavalt 1‰ ja 10‰ (Koit et al., 2020; Koit, 2022). Pilootalal vee isotoopkoostise vähene varieeruvus võib allikate puhul tuleneda vähesest proovide hulgast, kuid puurkaevude puhul pigem viitab asjaolule, et vesi iseloomustab ülehooajalisi keskmisi.



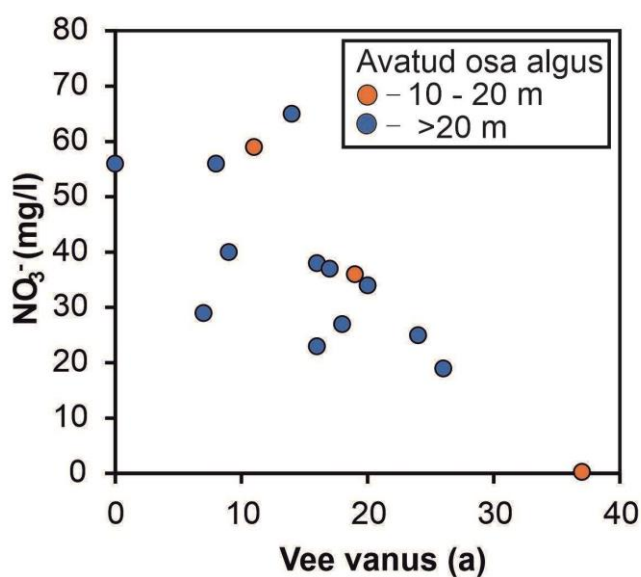
Joonis 4.1.6. Käesoleva uuringu ja Vaikmäe jt. (2020) veeproovide hapniku ja vesiniku isotoopkoostis. Pisipildil on toodud Vaikmäe jt (2020) andmed proovikordade kaupa. GMWL - Global Meteoric Water Line (globaalne sademetevee keskmine isotoopvahekord).

Põhjavee vanus

Vaikmäe jt. (2020) uuringu käigus määrati põhjavee vanust tritium-heelium ($^3\text{H}/^3\text{He}$) meetodil, kuid tulemused jäid detailsemalt analüüsimata. Puurkaevude puhul on õigem rääkida põhjavee näiv-vanusest, kuna puurkaevu vesi on segu erinevatelt sügavustelt ja seega erineval ajal infiltreerunud vetest (Gilmore et al. 2021). Joonisel 4.1.7 on esitatud Vaikmäe jt. (2020) poolt 2019. aasta suvel mõõdetud põhjavee näivvanused ning samaaegselt määratud põhjavee nitraadisisaldus. Põhjavesi on noorem pilootala kirde- ja keskosas, kus vee vanused jäävad vahemikku 0–14 aastat. Kõige vanem põhjavesi, 37 aastat, saadi pilootala kagunurgas paiknevas kaevus kat. 53006, kus ühtlasi on vesi anomaalselt väikese nitraadi sisaldusega. Üldiselt võib vee vanuseliste määrangute põhjal öelda, et sügavamal paikneva avatud intervalliga (20–30 m) puurkaevudes ei ole vesi ilmtingimata vanem kui maapinnale lähemal (10–20 m) avanevates puurkaevudes. Nagu eelnevalt mainitud, näitab ka põhjavee vanuse andmestik, et maapealne reostus võib kohati kiiresti jõuda ka maapinnast sügavamate veekihtideni. Joonis 4.1.8 näitab, et kõrgem nitraadisisaldus esines pigem nooremates vetes. Samas, andmepunktide vähesuse ning vee näivvanuse määramatuse tõttu pole korrelatsioon ühene. Põhjavee näivvanused pilootalal (joonis 4.1.7) viitavad, et veekihtide põhiline toiteala jääb pilootala kirdeossa, Pandivere kõrgustiku võlvile, ja et põhjavee regionaalne voolamine toimub kirdest kagu- ja lõuna suunas.



Joonis 4.1.7. Vaikmäe jt. (2020) mõõdetud põhjavee näivvanuse (mustas kirjas) ja nitraadi sisaldused (punases kirjas). Punktide värvid markeerivad puurkaevu avatud osa algussügavust.

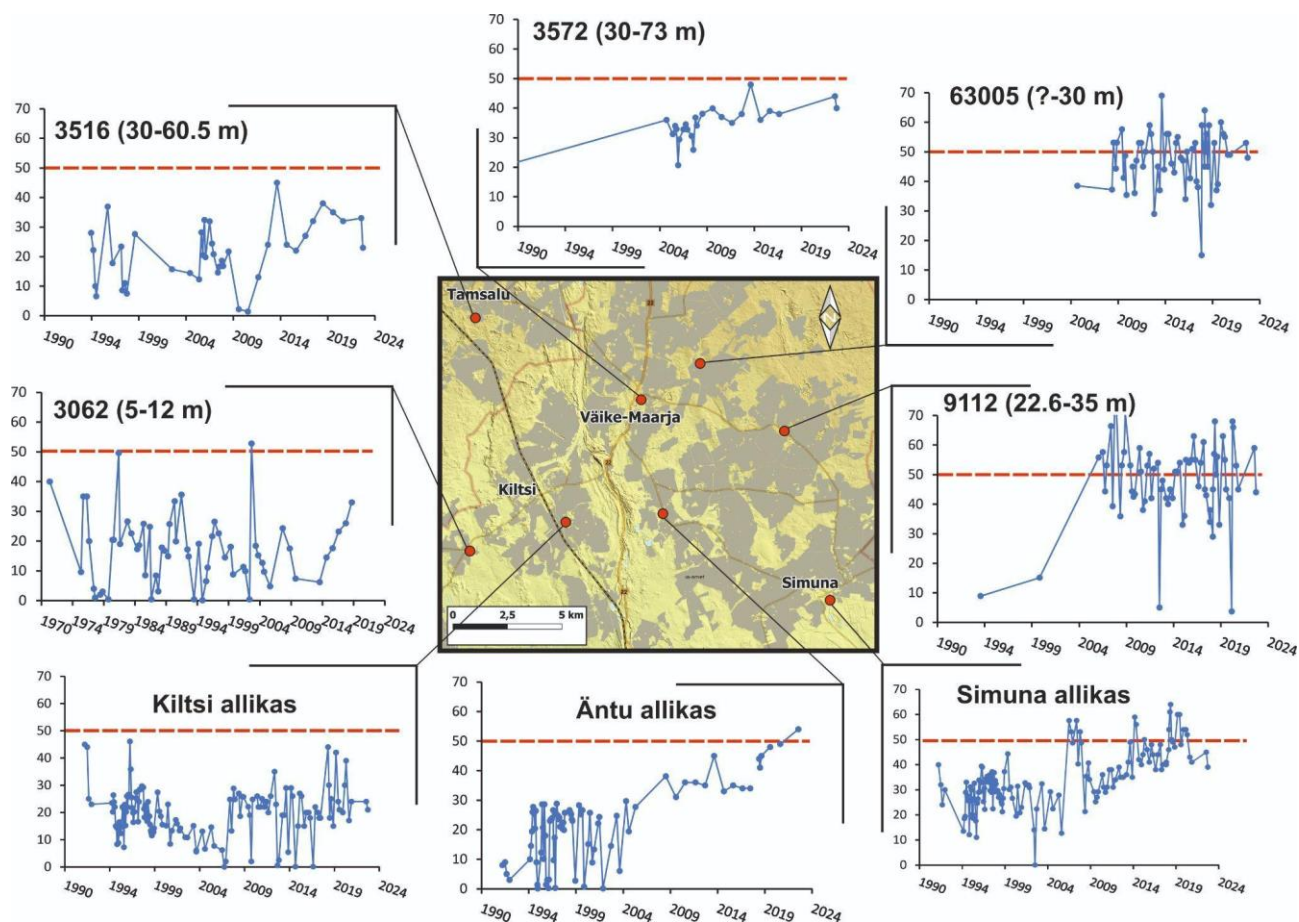


Joonis 4.1.8. Põhjavee nitraadi kontsentratsiooni ja vee näivvanus Vaikmäe jt. (2020) andmetel.

Nitraadisisalduse pikaajalised trendid pilootalal

Põhjavee nitraadi sisalduse suundumuste analüüsimiseks kasutati KESE ja EELISE andmebaaside andmeid, mida on täiendatud Maves OÜ poolt kogutud andmetega. Joonisel 4.1.9 on toodud seirepunktid pilootalal, kus on nitraadi sisaldust põhjavees seiratud pikema perioodi vältel. Nagu ka eespool täheldatud, paistavad kõrgema nitraadi kontsentratsiooniga silma pilootala idapoolsed seirepunktid, kus nitraatide sisaldused ületavad piirväärtust (50 mg/l) kas perioodiliselt või pikaajaseks. Läänepoolsetes seirepunktides on olnud sisaldused seireaja vältel valdavalt allpool kehtestatud piirväärtust. Kogu pilootala kontekstis paistab aga silma, et nitraadi sisaldus kõigub kas püsivalt kehtestatud piirväärtuse ümbruses või on see pöördunud viimase paarikümne aasta jooksul tõusule.

Simuna ja Äntu allikate puhul paistab silma nitraadi sisalduse süstemaatiline tõus viimase umbes 20 aasta jooksul võetud veeproovides. Enne 2007ndat aastat oli Simuna ja Äntu allikate puhul nitraadi sisaldus põhjavees pigem stabiilne, kui mitte kergelt langeva suundumusega. Ajavahemikul 2007–2009 on Simuna allika vees jälgitav konkreetne nitraadi sisalduse kasv, millele järgnes teatav langus, kuid mis asendus edaspidise kasvutrendiga. Äntu allikas sarnast nitraadi sisalduse äkilist tõusu nagu Simuna allikas näha ei ole. Samas tuleb nentida, et Äntu allika seireandmetes on ajaperioodil 2007–2009 lünk. Sarnaselt Simuna allikaga võib aga ka Äntu allika puhul näha nitraadi sisalduse tõusu põhjavees viimaste aastate jooksul, kusjuures mõlema allika puhul on nitraadi sisaldus vaatlusperioodi jooksul kasvanud üle piirväärtuse.



Joonis 4.1.9. Pikemate NO_3^- kontsentratsioonide (mg/l) aegridadega seirepunktid pilootalal. Punase katkendjoonega on märgitud seadusega kehtestatud NO_3^- piirväärtus põhjavees. Sulgudes on toodud kaevude avatud intervalli sügavus maapinnast.

Pilootala läänekülge jäävas Kilti allikas on nitraadi sisalduse muutumise dünaamika põhjavees erinev idapoolsest Äntu ja Simuna allikatest. Kuni aastani 2007 võis Kilti allika puhul täheldada nitraadi sisalduse langustrendi, peale mida alates 2008 aastast on näha äkiline sisalduse tõus. Viimase kümnendi jooksul võib aga nitraadi sisaldusi veeproovides lugeda üsna stabiilseks, kus baastase kõigub vahemikus 20–30 mg/l, jäädes selgelt alla sisaldustele Äntu ja Simuna allikates. Väga konkreetne nitraatide sisalduse tõus 2007 aastal ning uue baastaseme tekkimine võib olla seotud seirepunkti asukoha või üldise seiremetoodika muutumisega, sest Kilti mõisapargis on mitu allikat. 2008. a. lõpuga vahetus antud asukohas seire teostaja (nähtav KESE andmestikust), mis samas ei lange kokku nähtava muutusega nitraadi sisalduses ning seega ei ole sellega otseselt seostatav.

Puurkaevude puhul tuleb selgelt esile, et pilootala kahes kõige idapoolsemas kaevus kõigub nitraadisaldus kehtestatud piirväärtuse ümbruses. Kõige suurem kõikumise amplituud on nähtav Avispea küla puurkaevus 9112. Sarnane, kuid näiliselt väiksema amplituudiga nitraadisalduse

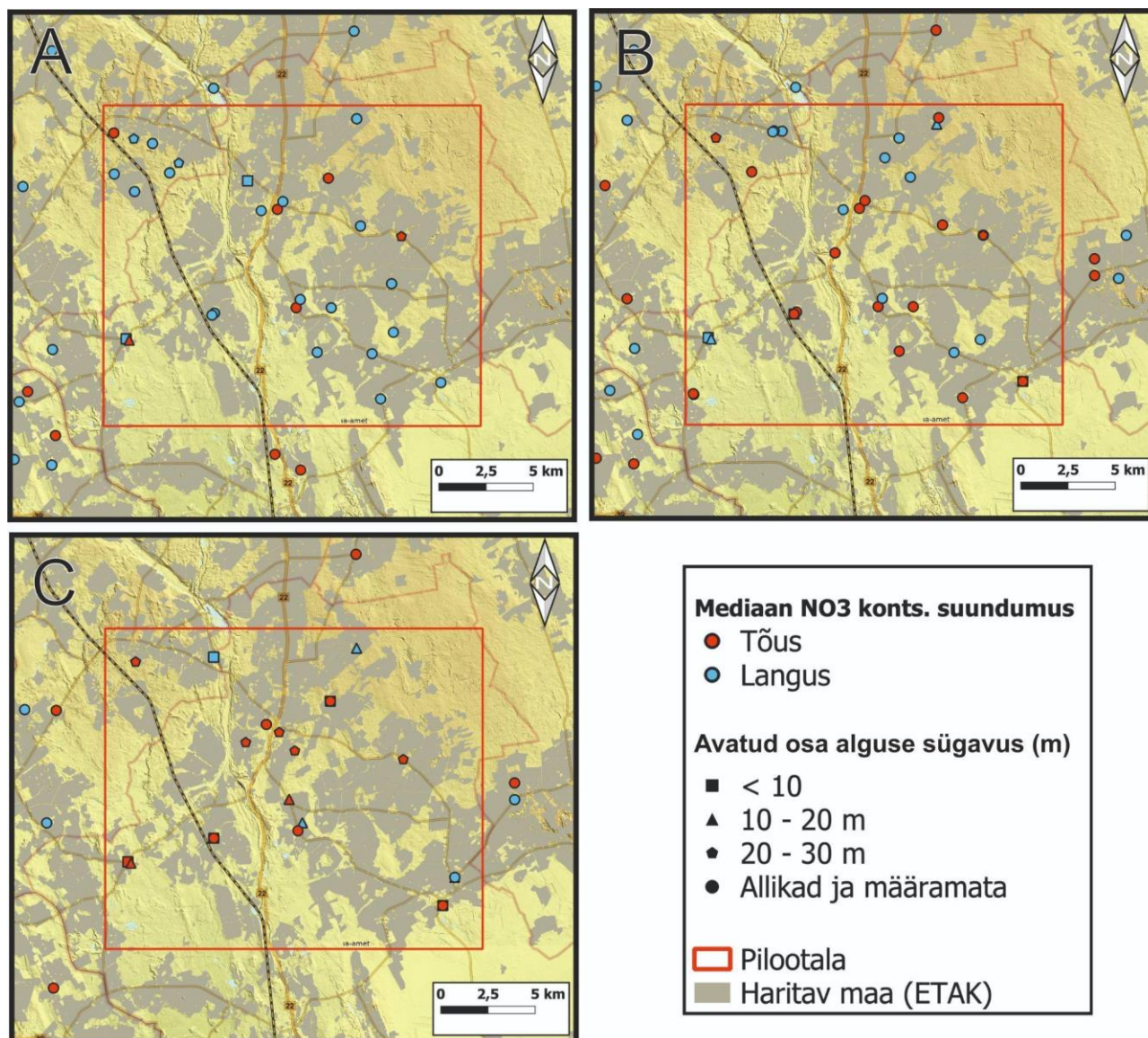
kõikumine on ka Eipri küla puurkaevus 63005. Väike-Maarjas asuvas puurkaevus 3572 on nitraadi sisaldus põhjavees jäänud alla kehtestatud piirväärtuse 50 mg/l, aga viimase 20 aasta jooksul võib täheldada kerget sisalduse kasvu umbes 10 mg/l võrra. Pilootala läänekülge jäävates kaevudes on nitraadi kontsentratsioonid põhjavees madalamad ja üldiselt selgelt alla piirväärtuse. Tamsalu linnas asuvas kaevus 3516 on täheldatav nitraadi sisalduse langus ajavahemikus 2009–2011, peale mida on hakanud kontsentratsioonid järsult tõusma, jõudes aastaks 2014 piirväärtuse lähedusse 45 mg/l. Sealt edasi on nitraadi kontsentratsiooni üldine tase jäänud kõrgemale enne 2009ndat aastat mõõdetud sisaldustest.

Pilootala edelanurga puurkaevus 3062 on nitraadi sisaldused põhjavees ületanud kehtestatud piirväärtust 2003. aastal võetud veeproovis, peale mida on kuni 2007nda aastani toimunud sisalduse vähenemine. Ajavahemikus 2007–2010 on samuti näha nitraadi sisalduse kasv ja sellele järgnev langus. Alates 2014ndast aastast võib täheldada selles puurkaevus nitraadisalduse kasvu aastast-aastasse. Paraku piirduvad veeproovid aastaga 2019 ning hetkeseisuga puudub informatsioon nitraadi sisaldusest põhjavees. Selles punktistuleks veeseire taastada, et saada edaspidiselt informatsiooni antud piirkonna põhjavee kvaliteedi üle.

Kui vaadata nitraadi sisalduse muutust ühe kalendriaasta lõikes, siis saab järeldusi teha valitud seirekohtade seast vaid allikate ning puurkaevude 63005 ja 9112 osas, kust on võetud proove igal aastaajal. Teistes puurkaevudes on valdavalt võetud üks proov aastas, mistõttu on nitraadi kontsentratsiooni muutumised põhjavees palju sujuvamad. Kõigi allikate puhul paistab eelkõige silma nitraadi sisalduse kasv sügisest alates, kulmineerudes enamasti hilistalvel-kevadadel. Madalaimad tasemed ühe kalendriaasta jooksul on mõõdetud enamasti suve lõpus (proovi võtmise kuupäev langeb üldiselt augustikuusse). Seega langeb nitraadi sisalduse tõus allikates üsna hästi kokku kevadise suurveega, mistõttu on suurenenud sademevee pindmine äravool ning samas ka põhjaveekihtide toitumine. Selle tõttu on pindmise reostuse äravool lähedalasuvatesse allikatesse ning imbumine põhjaveekihtidesse kõige potentsiaalsem just kevadel, mis võib lühiajaliselt tõsta nitraadi kontsentratsiooni üldisest “baastasemest” kõrgemale. Väheste sademete lisandumine põhjaveekihtidesse suvel ning olematu pindmine äravool toob mõõdetud nitraadisaldused allikates aga jällegi madalamale. Kaevu 9112 ja 63005 puhul järgib nitraadi kontsentratsiooni kõikumine üsna sarnast tsüklilisust allikatega, tõustes aasta esimeses pooles ja langedes sügiseks madalamale.

Joonisel 4.1.10 on toodud NO₃ mediaan kontsentratsioonide suundumused võrrelduna erinevate kümne aastaste perioodide vahel. Mediaanide arvutamiseks on võetud andmed alates 1985ndast aastast kuni viimaste andmeteni 2023. aasta sügise seisuga. Nitraadi kontsentratsiooni muutumiste ja suundumuste iseloomustamiseks on kasutatud seireandmeid laiendatult pilootalalt, ehk lisaks 5

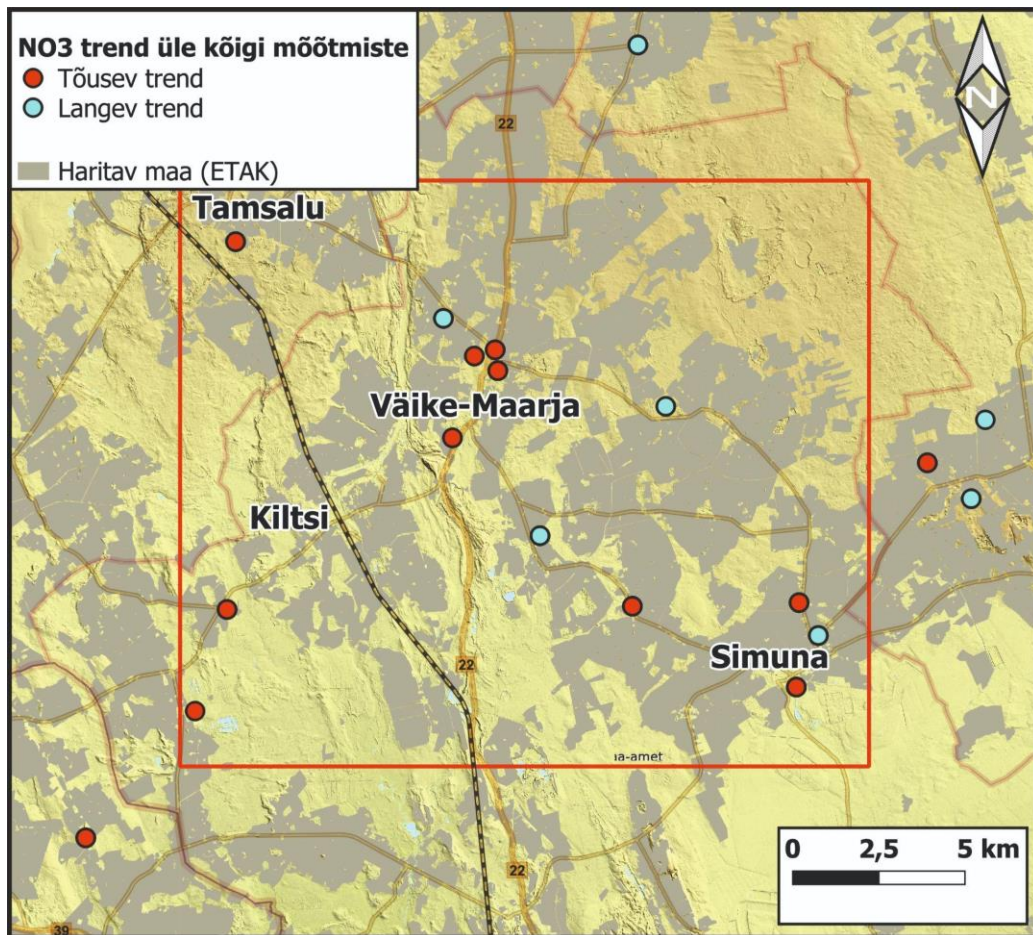
km raadiuses ümber pilootala. Mediaanid on arvatud aastate 1985–1995, 1995–2005, 2005–2015 ja 2015–2023 lõikes. Joonisel 4.1.10 on toodud ühe “kümnendi” mediaani võrdlus eelneva kümneaastase perioodi suhtes, alustades 1995–2005 võrrelduna 1985–1995, et näha NO₃ kontsentratsioonide suundumust antud alal. Tuleb tõdeda, et perioodil 1985–2023 on seirekohtade ja sellest tulenevalt ka NO₃ mõõtmiste arv antud alal vähenenud, mistõttu on jooniselt näha ka ala seirepunktidega katvuse vähenemine.



Joonis 4.1.10. NO₃⁻ kontsentratsiooni mediaanväärtuste võrdlus eri kümnendite vahel laiendatud pilootalal: 1995–2005 vs 1985–1995 (A), 2005–2015 vs 1985–1995 (B), 2015–2025 vs 2005–2015 (C). Erinevad kujundid markeerivad kaevude avatud intervall algust maapinnalt.

Aastatel 1995–2005 võrrelduna 1985–1995 domineerib laiendatud pilootala seirepunktides nitraadi kontsentratsiooni alanemine. Kaevude avatud osa sügavuse ja nitraadi kontsentratsiooni suundumuse vahel konkreetsed seosed silma ei paista, seejuures tuleb tõdeda, et enamus proovivõtu kohti pole kas puurkaevud või puudub informatsioon nende konstruktsiooni kohta.

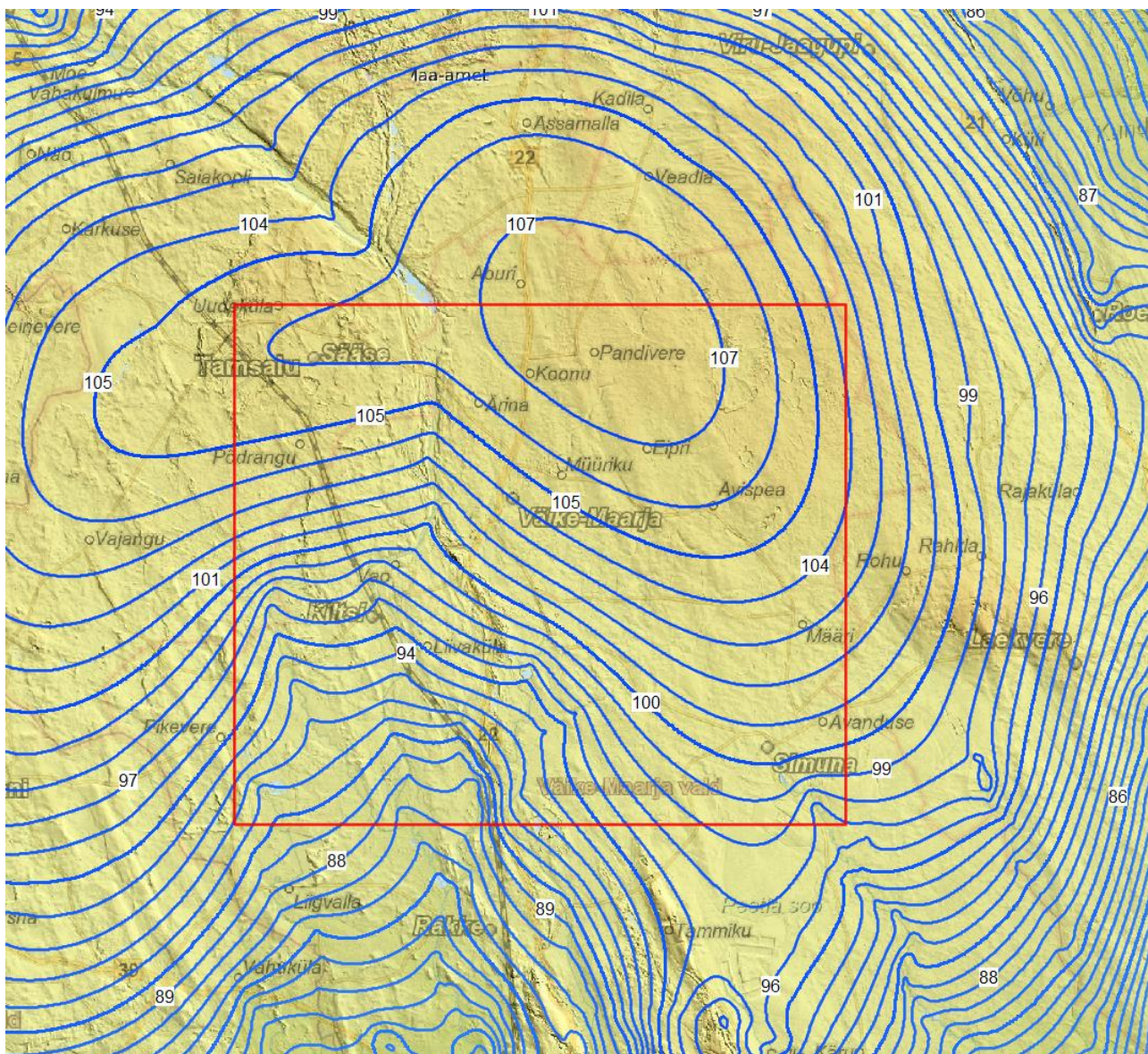
2005–2015 perioodil mõõdetud nitraadi mediaanväärtuste võrdlus aastatega 1995–2005 annab aga selgelt erineva tulemuse. Antud aastate võrdluses domineerib laiendatud pilootalal nitraadi mediaanväärtuste kasv. Sarnased suundumused prevaleerivad ka lähiminevikus (2015–2023) võetud veeproovides mõõdetud nitraadi mediaanväärtuste võrdluses aastatega 2005–2015. Jooniste 4.1.9 ja 4.1.10 põhjal tuleb selgelt esile, et viimase 20 aasta jooksul on pilootalal ning selle lähiümbruses nitraadisaldus põhjavees valdavalt kasvanud. Seda kinnitab ka joonis 4.1.11, kus on näha NO₃ sisalduste valdav kasv kogu andmerea põhjal.



Joonis 4.1.11. Seirepunktide asukohad laiendatud pilootalal, kus nitraadi kontsentratsiooni suundumus, mis on arvutatud üle kõigi mõõdetulemuste aegridade lõikes, on statistiliselt olulise ($p < 0.05$) trendiga.

4.2. Põhjavee voolamine

Koostatud hüdrogeoloogilise mudeli alusel esinevad pealmises aluspõhjalises veekihi suurimad survetasemed pilootala põhjaosas (Joonis 4.2.1), kus paiknev veelahed ühendab Pandivere kõrgustiku kaks kuplit Tamsalu ja Pandivere küla vahel. Seega põhjavesi voolab pilootalal peamiselt lõunakaarde Põltsamaa jõe suunas.

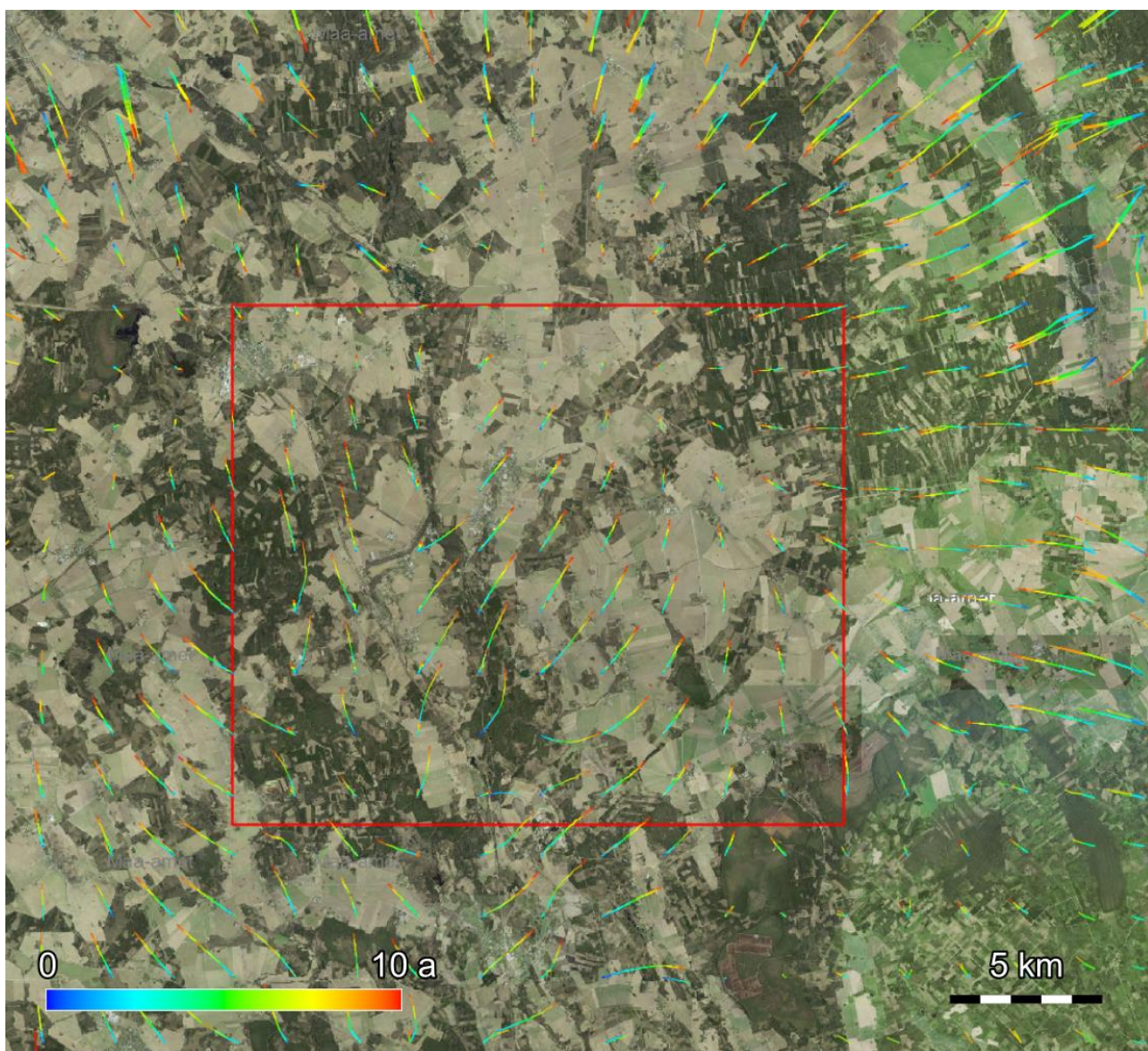


Joonis 4.2.1. Modelleeritud survetasemed maapinnalähedases veekihi. Pilootala asukoht on märgitud punase kastiga.

Põhjavee voolu suundade ja liikumiskiiruse illustreerimiseks lisati mudelisse 2 km võrgustikuna virtuaalsed puurkaevud sügavusega 30 meetrit ning arvutati vooluteekonnad nendesse eelneva 10 aasta jooksul (Joonis 4.2.2). Veelahkmealal ja kõrgustikku ümbritseval tasasel alal on vooluteekonnad lühikesed, samas kui kõrgustiku nõlvade lähistel võivad 10 aasta teekonnad ulatuda 2–4 kilomeetrini.

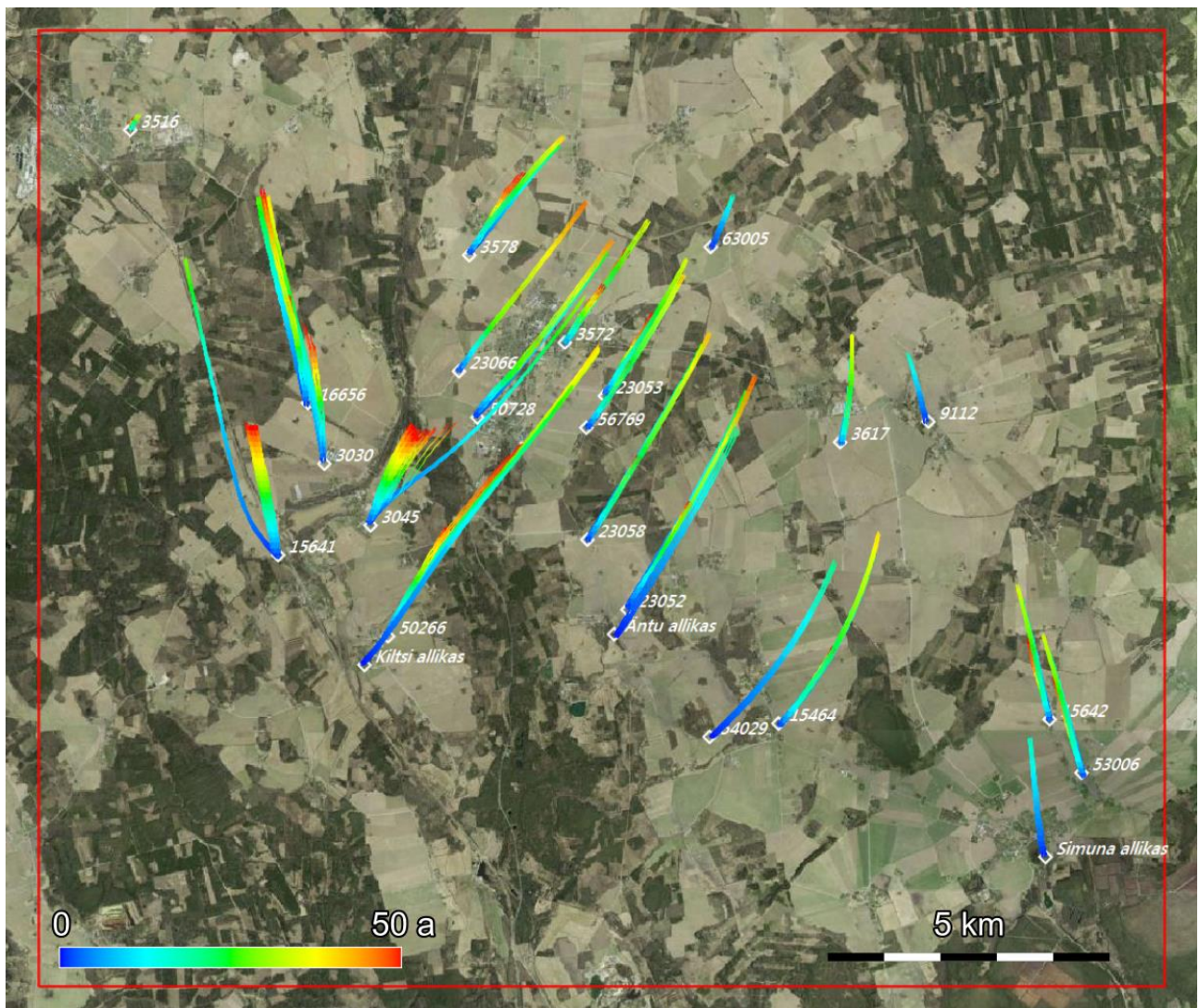
Voolusuundi ja -teekondi tuleb käsitleda indikatiivsetena mitmel põhjusel. Mudel on koostatud statsionaarne ning ei arvesta hooajaliste survetaseme kõikumistega, mis võivad ulatuda 4–8 meetrini ning seetõttu võib ka veelahkmeala asukoht mõneti ajas liikuda. Mudeli koostamisel

puudus ka detailne info karsti ja lõhelisusvööndite esinemise kohta, mis samuti võivad põhjavee voolusuundi oluliselt mõjutada.



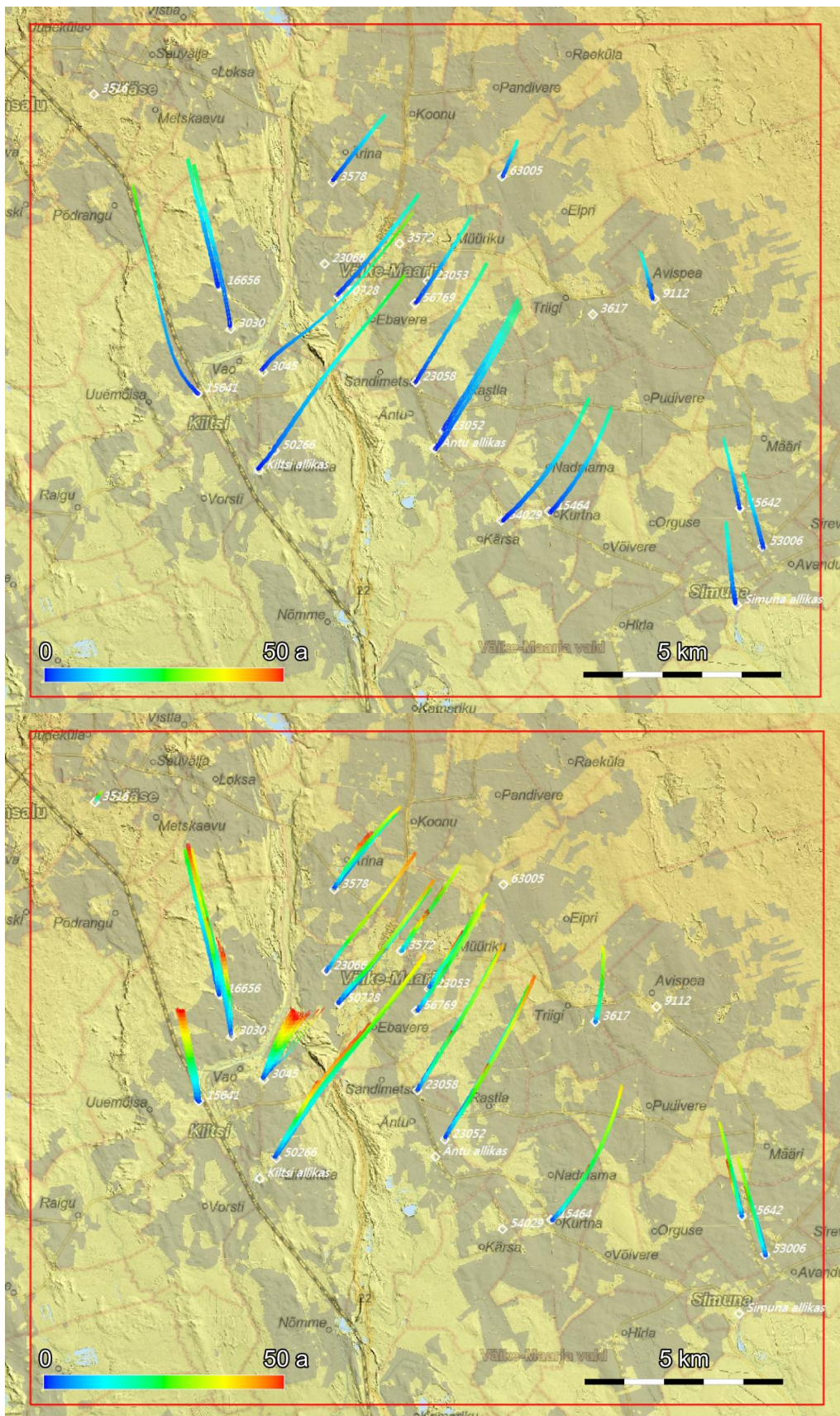
Joonis 4.2.2. Modelleeritud vooluteekonnad 10-aastase perioodi jooksul. Voolujoonte sinine ots markerib virtuaalseid 30 meetri sügavuste puurkaevude asukohti ning punane ots vee asukohta 10 aastat varem.

Uuritud puurkaevude valglate selgitamiseks arvutati põhjavee teekonnad mudeli kihtides, mida need puurkaevud avavad. Teekonnad arvutati kuni 50aastase perioodi kohta, kuid voolujooned võivad lõppeda ka varem, juhul kui teekond viib maapinnale. Kui vaadata vooluteekondi sama puurkaevu kõigis avatud kihtides, siis on näha, et erinevates kihtides teekondade pikkused ja suunad võivad erineda (Joonis 4.2.3).



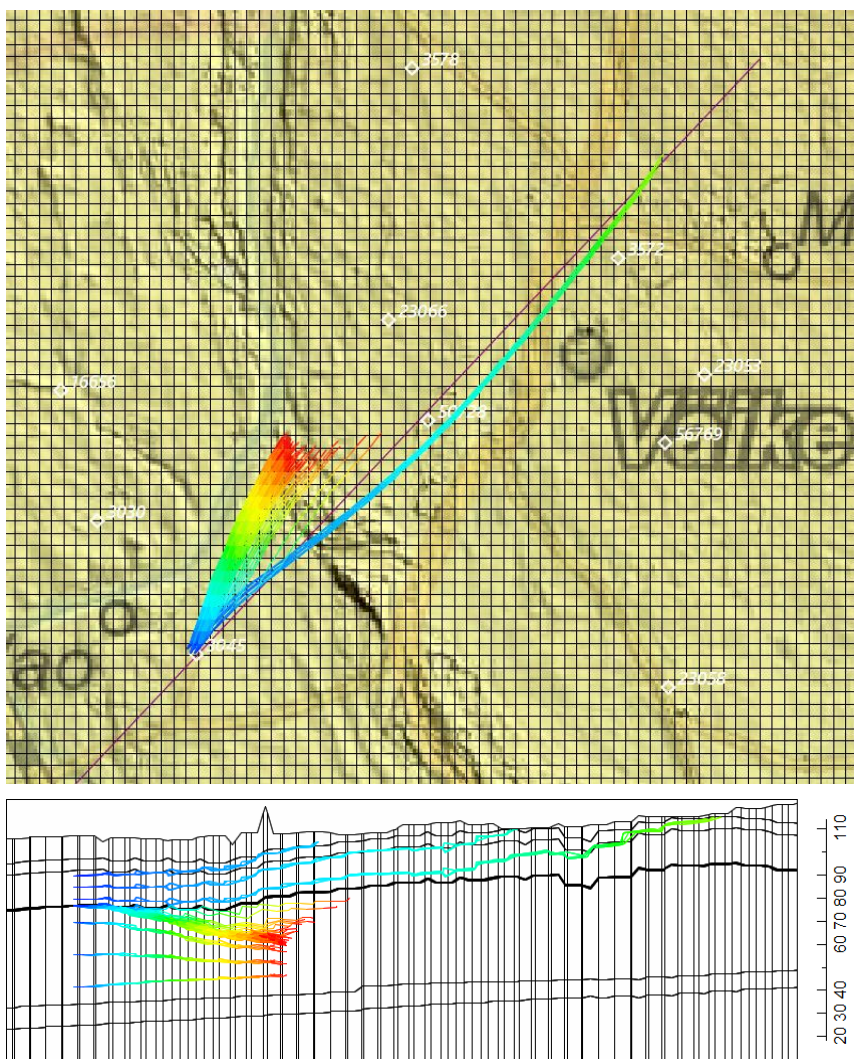
Joonis 4.2.3. Uuritud puurkaevudesse voolava vee päritolu.

Kui võrrelda vooluteekondi maapinnalähedases hästi vettjuhtivas vööndis (mudeli kihid 2 ja 3, joonis 4.2.4A) ja sügavamates kihtides (joonis 4.2.4B), siis hakkab silma erinevus vee maksimaalses vanuses. Maapinnalähedases hästi juhtivas osas on suurimad vanused vahemikus 10–20 aastat, kolmel juhul üle 25 aasta, kuid sügavamas osas on enamikel juhtudel maksimaalne vanus üle 30 aasta, sügavamate kihtide puhul ilma, et voolujooned jõuaksid maapinnale ka 50 aasta juures.



Joonis 4.2.4. Vooluteekonnad maapinnalähedastes kihtides (ülemine joonis; mudeli kihid 2 ja 3) ning sügavamal (alumine joonis; kihid 4–7).

Ülaltoodud vanused kirjeldavad maksimaalse vanusega komponenti läbilõike erinevates osades. Joonis 4.2.5 näitlikustab, et puurkaevu jõuab seguvesi erinevatel kaugustel infiltreerunud sademevee ja sügavama põhjavee komponentidest. Seega saame rääkida vee näivast vanusest, mis sõltub nende komponentide suhtvahekorrast, seejuures eeldatavasti domineerib väiksema vanusega vesi, sest see voolab suurema veejuhtivusega osas, mille tõttu jõuab seda puurkaevu suuremal hulgal. Väärib märkimist, et hoolimata mõningatest vanuselistest erinevustest avavad kõik puurkaevud kiire veevahetuse vööndit.



Joonis 4.2.5. Põhjavee voolujooned kaardi- ja külgvaates. Läbilõike asukoht on kaardipildil lilla joonega. Võrgustiku mõõt kaardil on 100 m.

Uuritud puurkaevude ja allikate toitealadele, mis võivad ulatuda lähiümbrusest kuni 1–6 km kaugusele, jäävad haritavad maad. Mudel näitab justkui Tamsalu puurkaevus on lokaalselt infiltreerunud vesi, sest see puurkaev on veelahkmele lähedal ja modelleeritud vooluteekonnad on väga lühikesed. Teistsuguse kalibratsiooniga mudel tõenäoliselt paigutaks veelahkme teise kohta ning muudaks toiteala suuremaks. Ilmselt ka tegelikkuses veelahe paigutub ümber mõnevõrra hooaja ja aastate lõikes seoses põhjavee tasemete kõikumisega.

Modelleeritud vooluteekonnad jätavad petliku mulje, et puurkaevudesse jõudev vesi pärineb kitsast koridorist. Tegelikuses moodustub puurkaevu või allikasse jõudev vesi laiemalt alalt, sest vee voolamist ja keemilise koostise kujunemist mõjutavad dispersioon, veetaseme kõikumised ja karst.

4.3. Maakasutuse ja lämmastiku heite muutused

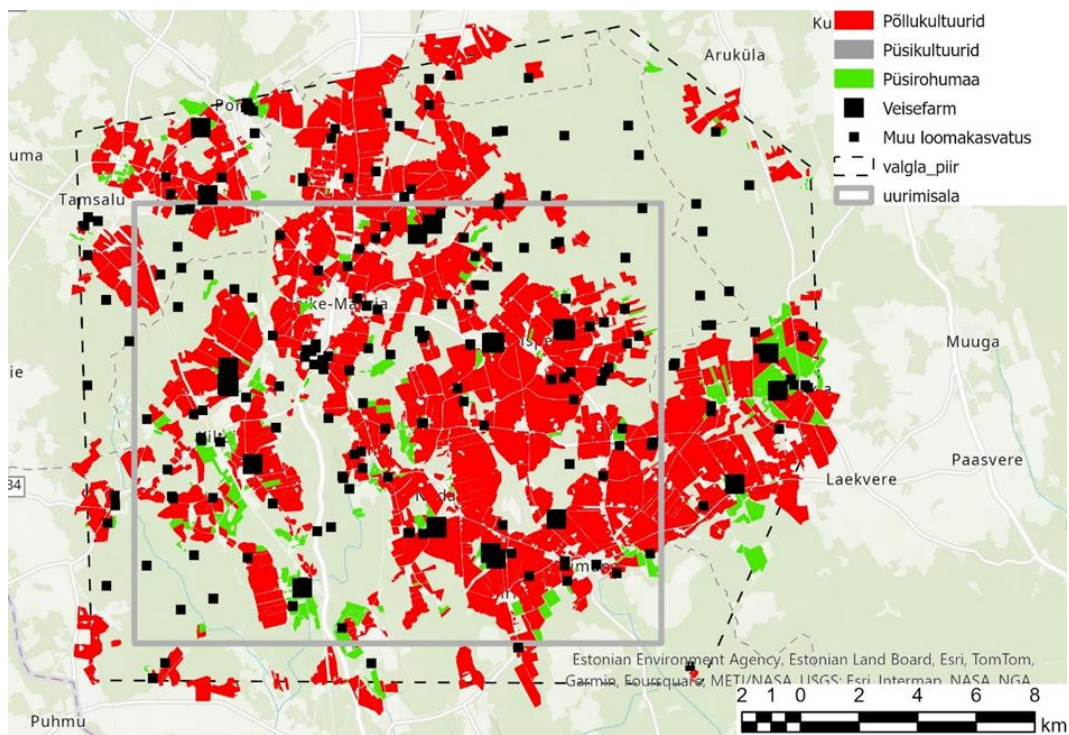
Analüüsi eesmärgiks oli hinnata põllumajanduse kohustuslike ja vabatahtlike keskkonnameetmete tulemuslikkust pilootala põhjavee kvaliteedi parandamisel ning soovitada tõhusamaid meetmeid. Selleks oli tarvis jõuda sammhaaval järgmiste tulemusteni.

- Pilootala põllumajandusliku maakasutuse üldiseloostus, sh analüüs või andmed, mis iseloomustavad võimalikku põllumajanduskoormust valgalal.
- Nimekiri pilootalal toimetavatest põllumajandustootjatest ja nende maakasutuse analüüs sh info esitamine kaardimaterjalil aastate kaupa.
- Pilootalal rakendatud põllumajanduskoormuse vähendamise meetmete analüüs (PRIA registrite andmed, põldude andmed), sh info esitamine kaardimaterjalil aastate kaupa.
- Meetmed olukorra parandamiseks, kui veehaarete nitraatide/pestitsiidide sisaldus näitab kasvusuundumust.
- Tegevused, mis on aidanud olukorda parandada juhul, kui nitraatide/pestitsiidide sisaldus viitab langustrendile.

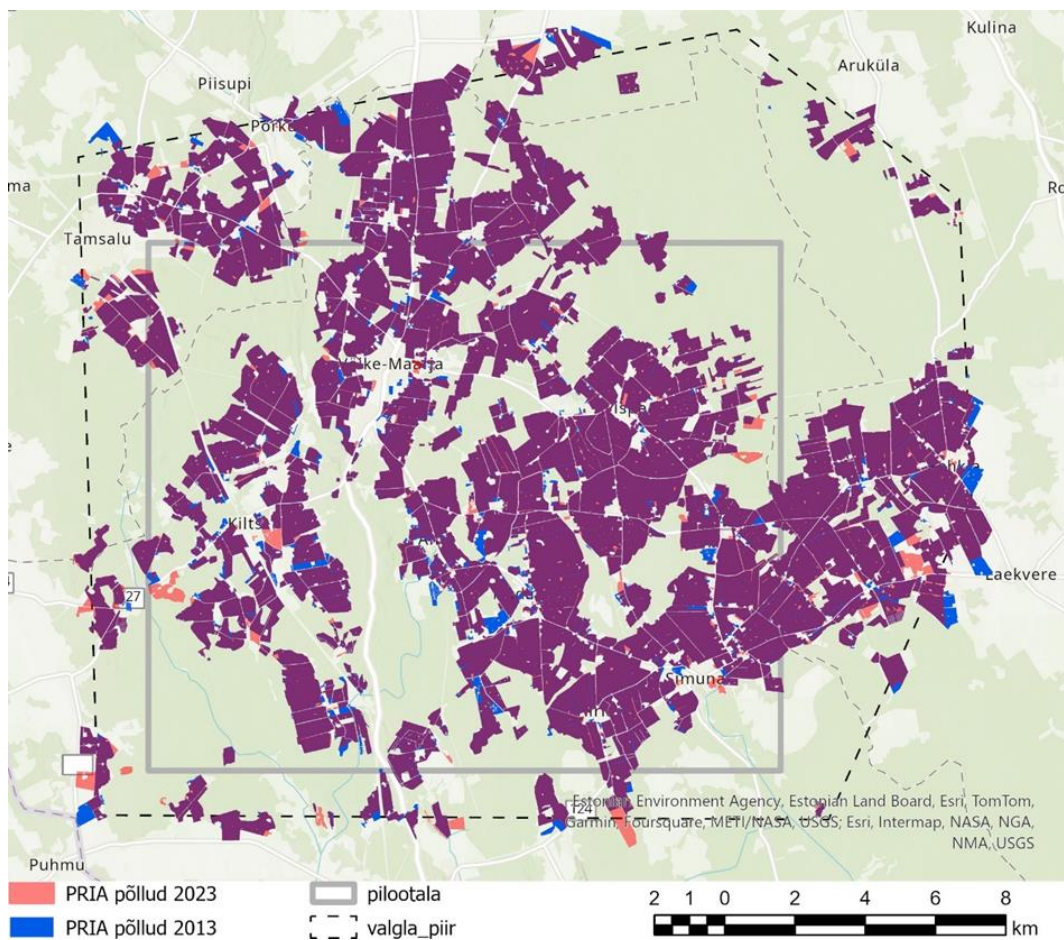
Võttes arvesse muutusi põllumajanduse intensiivsuses, oletati tööhüpoteesina, et (i) plaanimajanduse perioodil toimus väga suur põhjavee koormamine nitraatide ja tolleaegsete pestitsiididega, (ii) vaba turumajanduse perioodil oli niisugune põhjavee koormamine plaanimajanduse perioodiga võrreldes väga väike, ja (iii) ÜPP perioodil põllumajanduses kasutatavate lämmastiku ja pestitsiidide suurenenud koguseid võisid põhjavee koormamise osas kompenseerida rangemad veekaitsenõuded ja vabatahtlikud veekaitsemeetmed.

Põllumajandusliku maakasutuse üldiseloostus

Analüüsil vaadeldi maakasutust pilootalast mõnevõrra laiemal alal, nö. valglal (Joonis 4.3.1), mis erinevates veerežiimides võiks potentsiaalselt panustada põllumajandusliku reostuse kujunemisse. Valgla üldpindala on 493 km². Sellest 193 km² (39%) oli aastal 2023 kantud põllumassivide registrisse. Sellest omakorda 174 km² (90%) oli põllukultuuride all ja 19 km² (10%) püsirohumaa all. Seega tegemist on intensiivse põllumajandusmaaga, kus püsirohumaad on vähe.



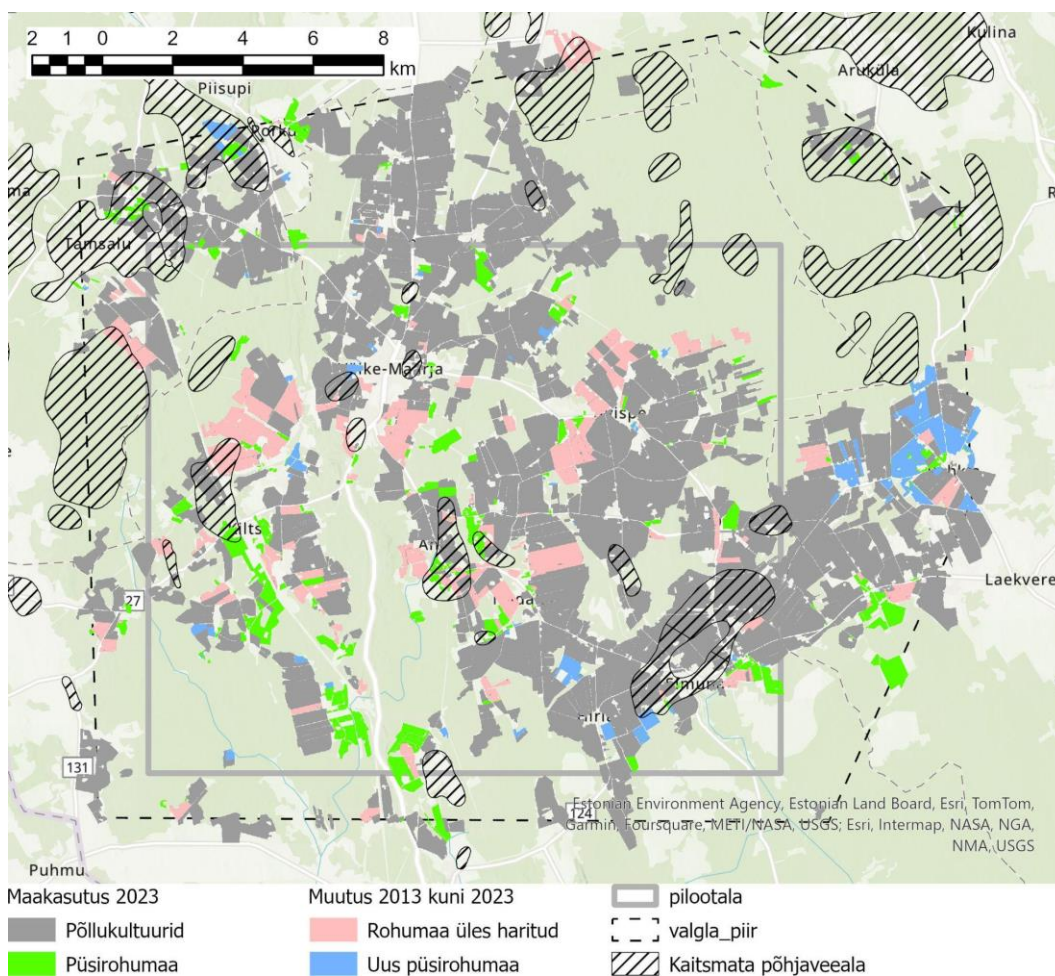
Joonis 4.3.1. Uurimisala põllumajanduslik maakasutus 2023.



Joonis 4.3.2. PRIA toetusalused põllud uurimisalal. Lilled alad on need, kus põllud olid nii 2013 kui ka 2023; punase või sinisega on põllud, mis oli ainult ühel nendest aastatest.

Kümne aasta jooksul 2013–2023 ei muutunud oluliselt PRIA toetusaluste põllumassiivide paiknemine ega pindala (Joonis 4.3.2). Umbes võrdselt põlde lisandus ja jäi välja.

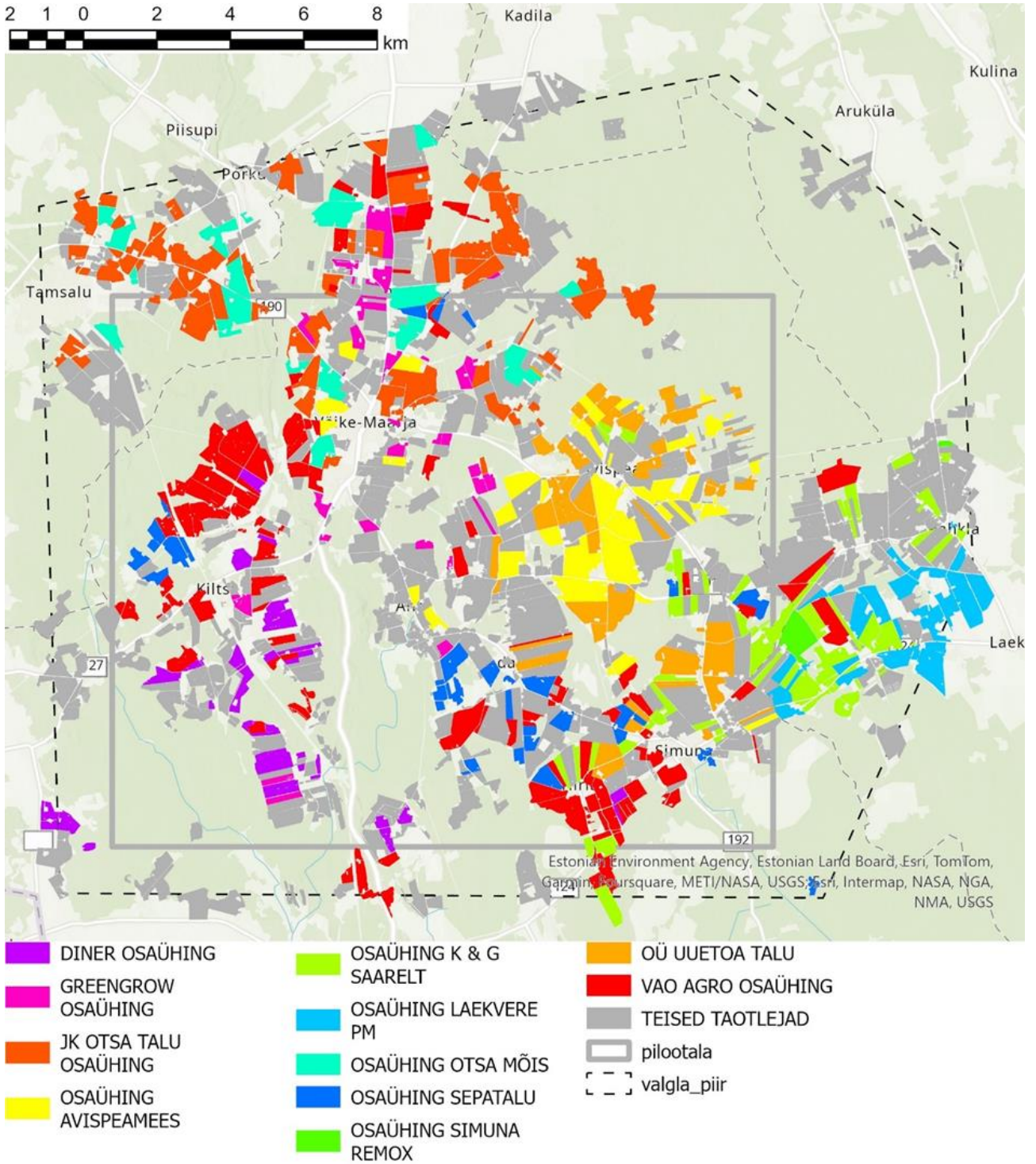
Võrreldes aastaga 2013 viidi valgla piires püsirohumaa alla 6,3 km² haritavat maad, kuid hariti põllukultuuride alla 19,6 km² püsirohumaaid (Joonis 4.3.3). Kõige suurem põllukultuuride ala uurimisala kagunurgas Simuna külas on ühtlasi suures osas kaitsmata põhjaveega alal. Kõige enam kadus püsirohumaaid Väike-Maarja aleviku külje all Vao ja Ebavere külades. Kõige enam rajati püsirohumaaid Rahkla ja Rohu külades valgla idaserval. Kaitsmata põhjaveega aladest suurim muutus toimus Vao külas, kus 61 ha suurune püsirohumaa üles hariti.



Joonis 4.3.3. Põllumajandusliku maakasutuse muutus uuringualal 2013–2023. “Rohumaa üles haritud” – aastal 2013 püsirohumaa all olnud põllumajandusmaa on muudetud aastal 2023 haritavaks maaks. “Uus püsirohumaa” – aastal 2013 haritav maa on muudetud aastal 2023 püsirohumaaks. Kaitsmata põhjaveeala kiht põhineb 1:400 000 geoloogilisel kaardistusel.

Põllumajandustootjad ja nende maakasutus

Kokku taotles pilootalal PRIA taimekasvatustoetusi 67 ettevõtet ning valglal 101 ettevõtet, millele lisanduvad FIE-d ja eraisikud (Lisa 2). Nendest 36 ettevõtet tegutses pindalal üle 100 ha, mis moodustas 87% põldudest (Joonis 4.3.4). Kõigi nende maakasutus keskendus põllukultuuridele, samas kui püsirohumaade säilitamisega tegelesid peamiselt väiksemad tegijad: FIE-d ja eraisikud.



Joonis 4.3.4. Uurimisalal taotleti 2023 aastal PRIA toetusi enam kui 400 hektaril.

Põllumajanduskoormuse vähendamise meetmed

Praegune olukord

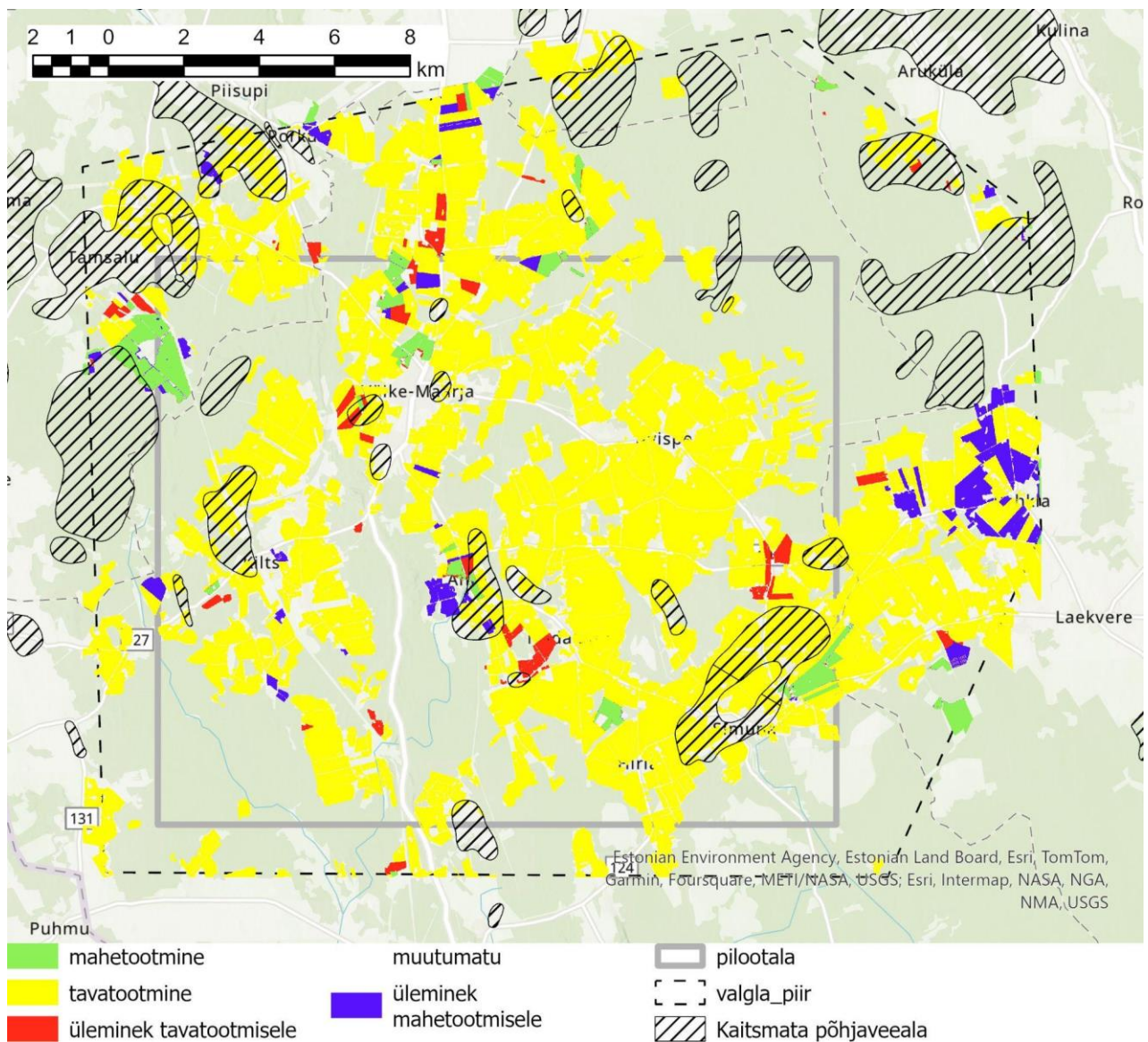
Keskkonnasõbraliku majandamise (KSM) toetust taotleti uuritud valglal aastal 2023 kokku 106 hektaril ehk pindalaliselt 87%-l kõikides PRIA-s registreeritud põldudest ja põllumassiividest. Mahetootmise (MAHE) all oli aastal 2023 kokku 1493 hektarit ehk 8% kõikidest põldudest. Need olid peamiselt rohumaad. Keskkonnasõbraliku majandamise toetust taotleti 15 566 hektaril, mis moodustas 84% kõikidest taotletud põldudest.

Meetmete trendid

Vabatahtlike meetmete pikaajalisi trende analüüsiti vahemikus 2013–2023. Hinnati mahepõllumajanduse ökokava ja keskkonnasõbraliku majandamise trende. Püsirohumaad säilitamise trende on kirjeldatud alapeatükis “Põllumajandusliku maakasutuse üldiseloostus”.

Mahepõllumajanduse ökokava

Mahetoetuse taotlemine suurenes neto 263 hektaril (Joonis 4.3.5). See suurenes 1231-lt hektarilt aastal 2013 kokku 1494-le hektarile aastal 2023. Peamine muutus oli seotud üleminekuga põllumaalt püsirohumaale valgla idaserval. Kaitsmata põhjaveega aladel ühemõttelisi ja laialdasi muutusi selles osas ei toimunud.



Joonis 4.3.5. Mahepõllumajanduse ökokava taotlemine uurimisalal aastal 2023 ja muudatused võrreldes aastaga 2013. Kaitsmata põhjaveeala kiht põhineb 1:400 000 geoloogilisel kaardistusel.

Keskkonnasõbralik majandamine

KSM või MAHE toetusele üleminekut vahemikus 2013 kuni 2023 tuvastati kokku 3441 hektaril (Joonis 4.3.6). Sellest 468 hektaril (14%) toimus see rohumaadel ja ülejäänud 2973 hektaril (86%) põllumaadel. Kõige rohkem lisandus KSM ja MAHE toetusega põlde uurimisala edelaosas. Seevastu nendest toetustest loobumist tuvastati 1006 hektaril. Nendest toetustest välja jäi maid kõige enam Rohu külas valgla idaosas. Seega, KSM ja MAHE toetuse alla jääva põllumajandusmaa osakaal suurenes 13%. Kaitsmata põhjaveega aladest suurim loobumine KSM ja MAHE toetusest toimus Määri külas pilootala idaserval 113-l hektaril. Seevastu Äntu külas pilootala keskosas liikus ligi 100 ha põlde kaitsmata põhjaveega aladel KSM ja MAHE toetuse alla.

5. Järeldused

Pilootala asub Pandivere kõrgustikul valdavalt õhukese pinnakattega piirkonnas, kus maapinnalähedased põhjaveekihiid koosnevad valdavalt lõhelistest ja karstunud lubjakividest. Tulenevalt ala geoloogiast on tegemist tähtsa veelahkmealaga ning suure sademete netoinfiltratsiooniga piirkonnaga. Seda kinnitavad ka uuritavatest kaevudest ja allikatest võetud veeproovide hapniku ja vesiniku isotoopkoostis, mis näitab selgelt pilootalal põhjavee sademeveelist päritolu. Esimese aluspõhjalise veekihi maapinna läheduse ja halva kaitstuse tõttu asub see aktiivse ja kiire veevahetuse vööndis, kus põhjavee kvaliteet oleneb väga palju inimreostusest. Kiire veevahetus ja veekihtide sademetest toitumise mõjud paistavad hästi silma ka alal asuvatest allikatest ning puurkaevudest võetud veeproovides. Seireandmete põhjal muutub põhjavee nitraadi sisaldus tsükliliselt olles veidi suurem kevadise (märts-aprill) suurvee ajal ja väiksem suvise madalvee perioodil.

Hüdrogeoloogiline mudel näitab, et pilootala põhjaosas asub veelahe ning pilootalal voolab põhjavesi põhjast–kirdest edela- ja lõunasuunda, peamiselt Põltsamaa jõe poole. Modelleerimise tulemuste põhjal on uuritud puurkaevude põhjavesi aluspõhja pindmises (kuni paarkümmend meetrit) osas mõne aasta kuni paarikümne aasta vanune, sügavamal võib vee näivvanus olla enam kui 50 aastat. Need tulemused on kooskõlas Vaikmäe jt. (2020) triitium-heeliumi meetodil määratud veeproovide näivvanustega. Sesoonsed nitraadi sisalduse kõikumised on seostatavad hüdraulilise režiimi muutuste ja maapinnalähedase, põllumajanduslike nitraatidega rikastunud tugevalt karstunud veekihi aktiveerumisega suurvee perioodil, samas kui keskmise ja madalvee perioodil on puurkaevude vees suhteliselt rohkem sügavat, nitraadivaesemat vett.

Modelleerimistulemused näitavad, et sõltuvalt puurkaevu asukohast on vesi infiltreerunud toitealal, mis ulatub puurkaevust kuni mõne kilomeetri kaugusele (vt joonised 4.2.3–4.2.4). Kõigi uuritud puurkaevude toitealale jäävad suured põllumassiivid. Pilootala pikemate seireridade analüüs ning 10-aastaste perioodide mediaanväärtused näitavad NO₃ kontsentratsioonide kasvamist põhjavees viimase paari aastakümne jooksul (2005–2023). Antud ajavahemikku iseloomustab ühtsete põllumajandustoetuste (ÜPP) rakendamine Eestis, pärast mida on näha ka selge lämmastikväetiste ja loomse päritoluga lämmastiku kasutamise kasvamine põllumajanduses üle Eesti, peale taasiseseisvumise järgset suurt langust. Sellele lisaks tuleb ära märkida, et maakasutus pilootalal pole viimase kümne aasta jooksul oluliselt muutunud. Pindalaliselt on haritava maa osakaal maakasutuses 2023ndal aastal võrdlusena aastaga 2013 veidi muutunud, kuid proportsioonid on jäänud enam-vähem samaks. Antud kokkulangevused viitavad, et nitraatide tõus põhjavees on tõenäoliselt seotud ennekõike reostuskoormuse suurenemisega, mitte maakasutuse muutusega. Lisaks tuleb nentida, veeseaduse kehtestamine, nitraaditundliku ala kaitse-eeskiri ning

keskkonnasõbraliku majandamise toetus ei ole vähendanud nitraadireostust NTA põhjavees pilootala lõikes. Keskkonnasõbraliku majandamise meede toetab küll glüfosaadi kasutamise vähendamist, kuid ei suuna lämmastikväetiste kasutamise vähendamisele. Nitraaditundliku ala põllumajandusliku tegevuse piirangud rakenduvad ainult kaitsmata põhjaveega aladele, mis alahindab tegelikke põhjavee reostamisega seotud riske.

Uuringu tulemustele tuginedes saab pilootala nitraadireostuse päritolu seostada piirkonna intensiivse põllumajandusega. Veeproovide nitraadi lämmastiku ja hapniku isotoopkoostis ei näita ühte kindlat nitraadi allikat, vaid jätab võimalikeks kandidaatideks (i) ammoonium väetised, (ii) pinnase ammooniumi ja (iii) sõnniku ja heitvee. Kiire veevahetuse võõndis ei ole tõenäoline, et talude lokaalsed heitvee reostused suudaks suurel alal põhjustada ulatuslikku nitraadisisalduse tõusu, seejuures üha kasvavas ulatuses. Teised kandidaadid on otseselt seotud põllumajandusega. Arvestades põhjavees toimuva denitrifikatsiooni protsessiga viitab nitraadi isotoopkoostise signaal lämmastikväetisele kui peamisele nitraadisisalduse kasvu põhjusele.

Soovitused edasisteks tegevusteks

Pikaajaliste seireandmete põhjal toimus allikate ja puurkaevude põhjavee suurim dokumenteeritud nitraadi sisalduse langus vabaturumajanduse perioodil, kui põllumajanduses mineraalse ja loomset päritolu lämmastikväetiste kasutamine oli väike. Praegused lämmastikväetiste kasutamise piirangud ei ole piisavad ning **suundumus on põhjavee seisundi halvaks muutumisele, mille ennetamiseks tuleks kasutusele võtta täiendavaid piiranguid.**

Maapinnalähedase põhjavee kiire liikumine tähendab, et põhjavee reostumine kujuneb suurel alal ning seetõttu ka **lämmastiku kasutamise piirangud tuleb rakendada suurel pindalal, soovitatavalt kogu NTA-l.**

Keskkonnaministri määrusega nr. 49 (05.11.2021) on määratud nitraaditundlik ala ning selle piires asuvad kaitsmata põhjaveega pae- ja karstialad pinnakatte paksusega kuni 2 meetrit ning olulised allika- ja karstialad, millel kehtivad põllumajandusliku tegevuse piirangud. Geoloogilisel kaardistamisel on koostatud põhjavee kaitstuse kaardid mõõtkavas 1:400 000 ja 1:50 000 (viimane katab ainult osa NTAst) ning pinnakatte paksuse andmestik (punktandmed ja isojooned). Kõik need andmestikud on omavahel suuresti vastuolus kaitsmata põhjavee alade piiride määratlemisel. Samas põhjavee kaitstuse kaartidel on NTA klassifitseeritud kui kaitsmata või nõrgalt kaitstud põhjavee ala mõningate eranditega (näiteks sood, kus (i) põllumajandamist ega (ii) põhjavee toitumist ei toimu). Klassifitseerimine kaitsmata või nõrgalt kaitstud põhjavee alaks ei väljenda põhimõtteliselt erinevaid põhjavee toitetingimusi, vaid sõltub tõlgendajale saada olevate andmete hulgast ja kasutatud kriteeriumitest, seejuures mõlemad väljendavad NTA-l leviva pinnakatte

vähemast võimet takistada reoainete jõudmist põhjavette. Eelnevalt tulenevalt **tuleks kaaluda põllumajanduslike tegevuste piirangute rakendamist kogu NTA-l**, mitte piiritleda piiranguid ainult kaitsmata põhjaveega alade ja karstialadega.

Uuringu autorite hinnangul on karsti iseloom ebapiisavalt uuritud ja levik NTA-l alahinnatud. Selle ja varasemate uuringute tulemused näitavad ühest küljest nitraadi sisalduse hooajalisi muutuseid allikates ja puurkaevudes, kuid samas põhjavee näivvanused ja modelleerimistulemused näitavad vee pikemaajalist tekkimist. Esmapilgul vastuolulised tulemused viitavad karstisüsteemi lülitumisele erinevatesse režiimidesse vastavalt põhjaveetasemete kõikumistele, mille käigus muutuvad kiirelt infiltreeruva ja pikemaajaliselt kujuneva vee osakaalud nii kaevudes kui ka allikates. Toiteala ulatuse ja voolusuuna muutumist, karsti vormide levikut ja käitumist saab selgitada kasutades valitud kohtades mõne hooaja kestel komplekselt tänapäevaseid uuringu meetodeid nagu näiteks multiparameetriline seire allikates ja puurkaevudes, vee isotoopkoostise mõõtmine (vähemalt 12x aasta kohta), georadariga profileerimine koos reljeefanalüüsiga pinnakatte paksuse ja karsti selgitamiseks.

Summary

Jõelegt, A., Paat, R., Karro, E., Piirimäe, K. 2024. Hydrogeological Study of Groundwater and Contaminant Movement and Delineation of Recharge Areas for Groundwater Abstraction Wells in the Nitrate Vulnerable Zones of Pandivere and Adavere–Põltsamaa using Modelling Methods. University of Tartu.

The aim of the study is to determine, through hydrogeological modelling, the recharge areas of groundwater abstraction wells located within the pilot area of the nitrate vulnerable zone (NVZ) of Pandivere and Adavere–Põltsamaa, to elucidate the direction and area from which groundwater, including contaminants, flows into the groundwater abstraction wells.

The pilot area chosen is a 20 x 17 km territory near Väike-Maarja, extending from Tamsalu to Simuna. The selection of the area was based on the existing data, the presence of monitoring sites, and the coverage of cultivated land. The study by Vaikmäe et al. (2020), which included isotope analyses for determining water age and nitrate origin alongside the usual chemical composition analysis of groundwater, also played a role in the selection.

During the study, the chemical and isotopic composition of groundwater from 21 wells and 3 springs was analyzed twice. Generally, the nitrate concentration in the pilot area is somewhat lower (20–40 mg/l) west of the Tartu–Rakvere road and higher in the eastern part of the pilot area, mainly ranging from 30–60 mg/l (threshold value 50 mg/l), with exceptional cases (0–20 mg/l) in Avanduse and Äntu villages. There is no clear correlation between nitrate concentration and well depth.

The nitrogen ($\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$) and oxygen ($\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$) isotopic compositions of the nitrates determined in water samples suggest multiple sources for the elevated nitrate in groundwater, as nitrates from nitrogen fertilizers, soil, manure, and wastewater can become compositionally similar. The dissolved oxygen content indicates that some denitrification occurs in the groundwater, resulting in a more positive $\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ values (deviating from values typical of ammonium fertilizers).

The groundwater oxygen and hydrogen isotopic compositions indicate a precipitation origin, without showing seasonal variability, suggesting the water composition does not change over the seasons. This aligns with the apparent infiltration ages determined by Vaikmäe et al. (2020) using the tritium-helium method, mostly ranging from 7 to 26 years, with exceptional cases of zero and

37 years. The apparent water age is not dependent on well depth, but older water tends to have lower nitrate concentrations.

The hydrogeological model takes into account that the carbonate rocks in the nitrate vulnerable zone have very good filtration properties due to karstification in the upper 20 meters. According to the model, the watershed area of near-surface groundwater layers is located in the northern part of the pilot area near Tamsalu and Pandivere villages, with water flowing into the studied wells from the north and northeast. Closer to the watershed, the recharge area of the wells extends to a distance up to 1–2 km, typically 2–4 km in the central part of the pilot area, and up to 5–6 km in some cases. All recharge areas of the wells are located within agricultural fields. In the upper, highly permeable layer, the maximum age of groundwater is typically 10–20 years (up to 25 years). In deeper water layers opened by the wells, water movement is slower and contains water that infiltrated more than 30 years ago. The water reaching the wells and springs forms from precipitation infiltrated at different distances and times, with water from the near-surface, highly permeable layer dominating. The modelling results are in good agreement with the apparent groundwater age determinations by Vaikmäe et al. (2020).

From an economic policy context, three periods can be distinguished that have influenced the emission of pollutants in Estonian agriculture: (1) the planned economy period until 1991, characterized by intensive use of fertilizers and chemicals, (2) the free market economy period from 1991 to 2003, when agriculture was declining and fertilizer use was reduced, and (3) the period of the European Union's Common Agricultural Policy, when different aid measures were implemented resulting in increased overall use of nitrogen fertilizers. Although groundwater monitoring data from the Soviet era is sparse, similar trends in nitrate concentration data can be observed.

An analysis of agricultural land use in the pilot area for the period 2013–2023 shows only minor changes. The majority of fields are under crops, with only 10% being permanent grassland. Over ten years, the location and area of fields eligible for support have not significantly changed. Conversions from fields to grassland and vice versa have occurred relatively in small, isolated fields, overall affecting less than ten percent of the land. Fields around the recharge areas of the wells mostly get farming support.

Kasutatud kirjandus

91/676/EMÜ. Euroopa Liidu Nõukogu Direktiiv 91/676/EMÜ 12. detsember 1991 veekogude kaitsmise kohta põllumajandusest lähtuva nitraadireostuse eest. Euroopa Liidu Teataja, L375, 31/12/1991.

EC 2010. Report from the Commission to the Council and the European Parliament. On implementation of Council Directive 91/676/EEC concerning the protection of waters against pollution caused by nitrates from agricultural sources based on Member State reports for the period 2004–2007.

EKUK 2012. Nitraaditundliku ala põhjavee seire 2011. a. Eesti Keskkonnauuringute Keskus OÜ, Tallinn.

EKUK 2020. Nitraaditundliku ala põhjavee seire 2019. Eesti Keskkonnauuringute Keskus OÜ, Tallinn.

Geilfus, C.M. 2019. Chloride in soil: From nutrient to soil pollutant. Environmental and Experimental Botany.

Gilmore, T., Cherry, M., Gastmans, D., Solomon, D. K., Humphrey, E. C. 2021. The $^3\text{H}/^3\text{He}$ Groundwater Age Dating Method And Applications. Papers in Natural Resources. 1472. DOI 10.14295/derb.v42.740

Hou, Y., Bai, Z., Lesschen, J.P., Staritsky, I.G., Sikirica, N., Ma, L., Velthof, G.L. and Oenema, O., 2016. Feed use and nitrogen excretion of livestock in EU-27. Agriculture, Ecosystems & Environment, 218, pp.232-244.

Kasak, K., Piirimäe, Kr., Vahtrus, S. 2016. Veekaitsemeetmed põllumajanduses. Käsiraamat tootjale. SA Eestimaa Looduse Fond.

Kendall, C., Mc Donnell, J.J. (Eds) 1998. Isotope Tracers in Catchment Hydrology. Elsevier, Amsterdam, 839 pp.

Kendall, C., Elliott, E.M., Wankel, S.D. 2007. Tracing anthropogenic inputs of nitrogen to ecosystems. In: R. Michener, K. Lajtha (Eds), Stable Isotopes in Ecology and Environmental Science, Wiley-Blackwell, 375-449.

KESE 2020. Keskkonnaseire infosüsteem KESE. <https://kese.envir.ee/kese/welcome.action>

Keskkonnaministeerium, Maaeluministeerium, Keskkonnaagentuur. 2016. Nõukogu direktiivi 91/676/EMÜ, veekogude kaitsmise kohta põllumajandusest lähtuva nitraadireostuse eest, täitmine Eestis 2012-2015. Aruanne Euroopa Komisjonile. Tallinn.

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. 2022. Surface water and groundwater interaction in shallow karst aquifers of lower Estonia. PhD dissertation. Tallinn University.

Koit, O., Barberá, J.A., Marandi, A., Terasmaa, J., Kiivit, I.-K., Martma, T. 2020. Spatiotemporal assessment of humic substance-rich stream and shallow karst aquifer interactions in a boreal catchment of northern Estonia. *Journal of Hydrology*, 580, 124238. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.124238

Leisk, Ü. 2023a. Nitraaditundliku ala seire nitraatide sisalduste tulemusi 2016–2023. R. Lillak, M. Toom, L. Talgre, E. Peetsmann (toim), *Põllumajandus ja keskkond, Toimetised 2023* (lk 18-22). Eesti Maaülikool, SA Eesti Maaülikooli Mahekeskus, Tartu.

Leisk, Ü. 2023b. Nitraaditundliku ala põhjavee seire 2022. Lõpparuanne. Eesti Keskkonnauuringute Keskus OÜ, Tallinn.

Maastik, A. 1984. Veekaitse põllumajanduses. Valgus, Tallinn.

Marja, R., Seevri, K., Elken, R., Klasen, H. 2017. Nitraatiooni ja taimekaitsevahendite võimalikud allikad nitraaditundliku ala põhja- ja pinnavees. *Keskkonnaagentuur, Tartu*, 127 lk.

Maves 2007. Pandivere veekaitseala põhjavee kvaliteedi seire 2006. aastal. Töö nr 6073 aruanne. AS Maves, Tallinn, 28 lk.

Mourad, D. 2008. Patterns of nutrient transfer in lowland catchments. A case study from northeastern Europe. *Netherlands Geographical Studies* 370. Facultet Geowetenschappen Universitet Utrecht. Utrecht.

Nitraaditundliku ala põhjavee seire 2024. Seireprogramm. Programmi üldandmed. Keskkonnaseire infosüsteem KESE. <https://kese.envir.ee/kese/viewProgramNew.action?uid=473789>

Normak, K., Vreimann, T., Kupits, K., Metsur, M. 2019. Vesikonna pinnavett mõjutava inimtegevuse koormuse ülevaade. Ida-Eesti vesikond, Lääne-Eesti vesikond, Koiva vesikond. AS Maves.

Nõges, T., Vilbaste, S., Nõges, P. 2021. Põlluväetiste kasutamise muutused taasiseseisvunud Eesti Vabariigis ja selle kajastumine jõgede vees. L. Metspalu, A. Luik, L. Talgre (toim), *Põllumajandus ja keskkond, Toimetised 2021* (lk 111-217). Eesti Maaülikool, SA Eesti Maaülikooli Mahekeskus, Tartu.

Pandivere ja Adavere-Põltsamaa nitraaditundliku ala kaitse-eeskiri. 2003. Riigi Teataja I, 10, 49.

Pandivere... 2020. Pandivere ja Adavere-Põltsamaa nitraaditundliku ala tegevuskava 2021–2024. Tallinn.

Perens, R., Vallner, L. 1997. Water-bearing formation. In: *Geology and Mineral Resources of Estonia* (Raukas A., Teedumäe A., eds). Estonian Academy Publishers, Tallinn, Estonia, pp. 137–145.

Põllumajandusminister, 2014. Eri tüüpi sõnniku toitaime sisalduse arvestuslikud väärtused, sõnnikuhoidlate mahu arvutamise meetoodika ja põllumajandusloomade loomühikuteks ümberarvutamise koefitsiendid. Määrus nr 71.

Pärn J., 2018. Origin and Geochemical Evolution of Palaeogroundwater in the Northern Part of the Baltic Artesian Basin. PhD dissertation, TTÜ.

Sall, M., Peterson, K., Kuldna, P. 2012. Veekaitsest Pandivere ja Adavere-Põltsamaa nitraaditundlikul alal. *Säästva Eesti Instituudi väljaanne nr 20*, Tallinn, 80 lk.

Snow, D. 2018. Nitrate-N Isotope Results and Interpretation. Report prepared for Eastern Research Group Prime Contract #EP-W-15-006. University of Nebraska, Water Sciences Laboratory, Lincoln, USA, 11 pp.

Statistikaamet 2020. PM065: Mineraalväetiste kasutamine aruandeaasta saagile.

Tamm, I., Leisk, Ü. 2024. Põhjaveekogumite ja nitraaditundliku ala põhjavee seire 2023.a. Eesti Keskkonnauuringute Keskus OÜ, Tallinn, 149 lk.

Vaikmäe, R., Ivask, J., Kaup, E., Martma, T. 2020. Hüdrogeoloogiline uuring nitraatide ja pestitsiidide kõrgendatud sisalduse põhjuste ja leviku ulatuse väljaselgitamiseks Siluri-Ordoviitsiumi Pandivere põhjaveekogumis Ida-Eesti vesikonnas. Tallinna Tehnikaülikooli geoloogia instituut, Tallinn.

Veeseadus. Vastu võetud 30.01.2019. RT I, 22.02.2019, 1.

Vetemaa, A. & Mikk, M. 2016. Mahepõllumajandus Eestis 2015. Maaeluministeerium.

Lisa 1. Veeproovide analüüside tulemused (elektrooniline lisa)

Lisa 2. Nimekiri pilootalal ÜPT-d taotlenud põllumajandustootjatest

Taotleja	Pindala, ha	Prevaleeriv kultuur
VAO AGRO OSAÜHING	2023,93	suviuder allakülvita
JK OTSA TALU OSAÜHING	1642,22	talinisu allakülvita
Erinevad FIE-d	1455,97	rohttaimed
OÜ UUETOJA TALU	1088,14	suviuder allakülvita
OSAÜHING AVISPEAMEES	973,72	talioder allakülvita
OSAÜHING K & G SAARELT	867,17	talinisu allakülvita
OSAÜHING SIMUNA IVAX	731,39	[Erinevad põllud]
OSAÜHING OTSA MÕIS	677,99	suviuder allakülvita
OSAÜHING LAEKVERE PM	632,53	taliraps allakülvita
OSAÜHING SEPATALU	518,54	talinisu allakülvita
DINER OSAÜHING	467,22	talinisu allakülvita
GREENGROW OSAÜHING	421,67	talinisu allakülvita
OSAÜHING RAHKLA FARM	363,43	rohttaimed
AVANDUSE AGRO OÜ	346,03	talinisu allakülvita
EBAVERE ST OSAÜHING	327,45	suvinisu allakülvita
PÕDRANGU PÕLLUMAJANDUSÜHISTU	300,61	rukis, v.a sangaste rukis, liblikõieliste allakülviga
OÜ VÕIVERE MÕIS	294,87	talinisu allakülvita
OSAÜHING ULVI AGRO	290,11	suviuder allakülvita
OSAÜHING VAO ADER	265,92	rohttaimed
OSAÜHING ÄNTU MÕIS	246,22	punane ristik (ristikut 50-80%, teisi heintaimi 20-50%)
Eraisikud	225,66	rohttaimed
KARU AGRO OÜ	216,69	rohttaimed
LUTTERI LÄÄNE TALU OÜ	201,71	[Erinevad põllud]
OSAÜHING TROVADOR	183,75	talinisu allakülvita
OSAÜHING MÄEMÕISA	177,09	taliraps allakülvita
KH TEENUSED OÜ	155,43	[Erinevad põllud]
ANDRES KAEVU TALU OÜ	149,61	[Erinevad põllud]
ROHUJA OÜ	148,15	taliraps allakülvita
LEPIKU AGRO OÜ	139,23	[Erinevad põllud]
LIINEMÕISA OÜ	136,83	talinisu allakülvita
LEPIKU VEIS OÜ	133,73	[Erinevad põllud]
RELIGRAIN OÜ	129,75	talinisu allakülvita
MUUGA PM OSAÜHING	125,23	liblikõieliste ja kõrreliste segu (30-80% liblikõielisi)
LUHAMAA PM OÜ	121,64	talinisu allakülvita
JÄRVAMÄGI OÜ	113,94	põldhernes, v.a "Mehis" (100% põldhernest)
SECALE OÜ	103,58	talinisu allakülvita
OSAÜHING HANNORA	97,89	talinisu allakülvita
GREENGROW TEENUSED OÜ	93,79	suviuder allakülvita
RANFIELD OÜ	93,43	põldhernes, v.a "Mehis" (100% põldhernest)
LUHA AGRO OÜ	91,06	suviuder allakülvita
OSAÜHING ÄNTU FARM	87,62	rohttaimed

Taotleja	Pindala, ha	Prevaleeriv kultuur
OSAÜHING SIMUNA REMOX	86,91	punane ristik (100% ristikut)
OSAÜHING ALLIK AGRO	85,34	taliraps allakülvita
NIINEMÄE FARM OÜ	82,95	rohttaimed
OÜ JAANIVESKI	79,8	talinisu allakülvita
VÖNNUSVERE AGRO OÜ	69,83	talinisu allakülvita
OSAÜHING PIHLASPÄ TALU	68,72	suvioder allakülvita
OSAÜHING REINPAUL AGRO	68,27	rohttaimed
PALASI PM OÜ	67,25	talinisu allakülvita
RAIGU AGRO OÜ	65,98	talinisu allakülvita
KADILA PÖLLUMAJANDUSE OSAÜHING	65,43	talinisu allakülvita
KINGU AGRO OSAÜHING	58,87	taliraps allakülvita
OÜ KOLM TERA	58,17	suvioder allakülvita
HENSUN OÜ	57,45	suvinisu allakülvita
OÜ KAIVERE	55,73	kaer liblikõieliste allakülviga
KRUUDID OÜ	55,43	põldhernes, v.a "Mehis" (100% põldhernest)
OÜ AVORE	54,66	[Erinevad põllud]
KAHTOR OÜ	52,05	[Erinevad põllud]
OSAÜHING HESEKA	50,39	taliraps allakülvita
KURTNA PM OÜ	49,59	rohttaimed
OSAÜHING REMGREIVEL	49,15	[Erinevad põllud]
OÜ EHE MESI	39,01	kaer allakülvita
OSAÜHING SÕSTRAMAA	36,39	rohttaimed
HANSUJÜRI PÖLLUMAJANDUSÜHISTU	35,7	talirüps allakülvita
MMS INVEST OÜ	35,53	rohttaimed
KODUKOILA OÜ	34,67	[Erinevad põllud]
OÜ BEILRA	33,92	talinisu allakülvita
IDAKESKUS OÜ	33,41	rukis, v.a sangaste rukis, allakülvita
MERLINE HOLDING OÜ	32,79	[Erinevad põllud]
AKTSIASELTS VIOLA PM	27,77	talinisu allakülvita
MÄÄRI MÕIS OSAÜHING	25,09	rohttaimed
LIIVAKÜLA PÖLLUMAJANDUS OÜ	22,31	[Erinevad põllud]
NURMETU CHAROLAIS OÜ	21,33	rohttaimed
OSAÜHING KORTEEXO	19,18	aedmaasikad avamaal või madala katte all
SAARA LIHAMEISTRID OÜ	18,85	talinisu allakülvita
LAEKVERE AGRO OÜ	18,72	[Erinevad põllud]
AGROFLEET OÜ	18,23	[Erinevad põllud]
KAARLI AGRO OÜ	18	põldhernes, v.a "Mehis" (100% põldhernest)
LIIVALA AGRO OSAÜHING	17,8	talinisu allakülvita
TUISUMÄE OÜ	17,53	talioder allakülvita
OSAÜHING SALPEETER	16,37	rohttaimed
PORKUNI PÖLLUMAJANDUSÜHISTU	15,95	[Erinevad põllud]
KÕBU AGRO OÜ	14,73	talirüps allakülvita
MULLAST OÜ	14,22	[Erinevad põllud]

Taotleja	Pindala, ha	Prevaleeriv kultuur
OSAÜHING TEHNOFIX	12,22	kõrreliste rohumaa (vähemalt 80% kõrrelisi)
OSAÜHING PANDIVERE KARTULIKASVATUS	11,93	[Erinevad põllud]
OSAÜHING JONNI VILI	10,46	kõrreliste rohumaa (vähemalt 80% kõrrelisi)
SONTAR OÜ	10,43	rohttaimed
ÖÖPIKU AGRO OÜ	9	rohttaimed
OSAÜHING ROELA AGRO	7,97	[Erinevad põllud]
KÕBU TOOMA TALU OÜ	7,86	liblikõieliste ja kõrreliste segu (30-80% liblikõielisi)
MUGULEID OÜ	6,75	[Erinevad põllud]
VINKYMON OÜ	5,6	[Erinevad põllud]
ALP MAA OÜ	5,31	kartul v.a "Ando"
OÜ PRECISION AGRI	5,24	talnisu allakülvita
OSAÜHING KARINU PM	4,09	rohttaimed
KIIGEPARGI OÜ	3,35	rohttaimed
VAHTRA PÕLLUMAJANDUS OÜ	2,3	tondipea, moldaavia
OSAÜHING TAALI MESILA	1,98	rohttaimed
OTSA AED OÜ	1,89	rohttaimed
OÜ KUUKALA	1,88	[Erinevad põllud]
MITTETULUNDUSÜHING SALUTEM	1,75	rohttaimed
NURME VARA OÜ	0,6	rohttaimed