



# **Lõuna-Eesti ja Põhja-Läti Kesk-Alam-Devoni põhjaveekompleksi põhjavee päritolu ja selle keemilise koostise kujunemine**

Bakalaureusetöö

Üliõpilane: Kaarl Rudolf Tamm

Üliõpilaskood: 206223LARB

Juhendajad: Joonas Pärn, hüdrokeoloog (Eesti Geoloogiateenistus), PhD  
Rein Vaikmäe, TTÜ GI nõunik, PhD

Õppekava: Maa süsteemid, kliima ja tehnoloogiad (LARB17/17)

## Autorideklaratsioon

Kinnitan, et olen koostanud antud lõputöö iseseisvalt ning seda ei ole kellegi teise poolt varem kaitsmisele esitatud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on töös viidatud.

Autor: Kaarl Rudolf Tamm, 27.05.2024

[allkiri ja kuupäev]

Töö vastab bakalaureusetööle esitatavatele nõuetele.

Juhendaja: [nimi]

[allkiri ja kuupäev]

## Sisukord

Annotatsioon .....	4
Abstract .....	5
Jooniste loetelu .....	7
Tabelite loetelu.....	8
1. Sissejuhatus .....	9
2. Uuringuala tutvustus .....	11
2.1 Põhjavee kujunemine.....	11
2.2 Geoloogiline kirjeldus .....	14
2.3 Hüdrogeoloogiline kirjeldus .....	15
2.4 Põhjavee keemilise koostise kujunemine .....	18
3. Materjal ja meetodika .....	20
3.1 Kasutatud andmed.....	20
3.2 Põhjavee keemiliste tüüpide määramise meetodika .....	27
4. Tulemused ja arutelu.....	31
4.1 Erinevate põhjaveetüüpide esinemine Kesk-Alam-Devoni põhjaveekompleksis.....	31
4.2 Erinevate veetüüpide levik ja kujunemine.....	37
4.3 Aktiivse ja aeglase veevahetuse vööndite piiritlemine põhjaveekompleksis ja sellega seotud põhjaveekogumites.....	42
5. Kokkuvõtte .....	46
Tänuavaldused .....	48
Kirjanduse loetelu.....	49
Lisad.....	52
Lisa 1. Lihtlitsents .....	52

## Annotatsioon

Bakalaureusetöös uuritakse ja analüüsitakse varem avaldatud andmestiku põhjal (kokku 106 analüüsi) Kesk-Alam-Devoni veekompleksis esinevaid põhjaveetüüpe, nende päritolu ja levikut ning kujunemist. Nende tunnuste põhjal eristatakse Kesk-Alam-Devoni põhjaveekompleksis aktiivse ja aeglase veevahetuse vööndid. Bakalaureusetöö uurimispiirkonnaks on Lõuna-Eesti ja Põhja-Läti Kesk-Alam-Devoni põhjaveekompleks.

Põhjaveetüüpide väljaeraldamiseks kasutatakse Pieter Jan Stuyfzandi väljatöötatud meetodit, mis kirjeldab lisaks põhjavees esinevatele peamistele kationidele ja anioonidele ka vee mineraalsust, leelisust ja kationvahetuse indeksit. Esmalt määrati veeproovide valimis olevale geokeemilisele andmestikule tuginedes Kesk-Alam-Devoni põhjaveekompleksis esinevad üldisemad veetüübid vee peamiste kationide ja anioonide alusel. Stuyfzandi meetodiga eraldati seejärel välja detailsed veetüübid, mille põhjal uuriti täpsemalt põhjavee keemilise koostise kujunemist.

Aktiivse ja aeglase veevahetuse vööndi eristamiseks kasutati uuringus lisaks põhjavee tüüpidele ka olemasolevaid põhjavee isotoopkoostise andmeid. Sellest tulenevalt kirjeldatakse erinevate veevahetuse vööndite esinemist Kesk-Alam-Devoni põhjaveekompleksi majandamiseks loodud põhjaveekogumites.

## Abstract

### Origin and chemical composition of groundwater in the Lower-Middle Devonian aquifer system in southern Estonia and northern Latvia

The thesis studied and analysed the chemical types of groundwater in Lower-Middle Devonian aquifer system. The types of groundwater were found by using available data from previous studies that provide necessary geochemical information. The dataset consisted of a total of 106 water samples. The data was used to delineate the main water types and characterize their origin and spatial distribution. Furthermore, the extent of active and slow water exchange zones was investigated. The latter is an important feature to assess the sustainability of groundwater abstraction from the aquifer system. The study area comprises the Lower-Middle Devonian groundwater system in southern Estonia and northern Latvia.

The investigation of water types is done by using a method developed by Pieter Jan Stuyfzand (Stuyfzand 1986, 1989, 1993). The method uses and provides information about four important aspects of groundwater quality. The aspects are the following: groundwater salinity, hardness/alkalinity, the most abundant cations and anions, and the cation exchange index also known as BEX. By using the method general groundwater types (main cations and anions) and detailed water types (Stuyfzand method) were delineated.

In the course of the research, the distribution of  $\delta^{18}\text{O}$  values in groundwater was also investigated. The  $\delta^{18}\text{O}$  isotopic values can help to determine, whether a water sample is located in the zone of active or slow water exchange and also gives indirect information about the groundwater age. Data from 37 previously published isotopic analyses was used in this analysis. The  $\delta^{18}\text{O}$  value of -14‰ was used as a threshold to distinguish between active and slow water exchange zones as suggested by Pärn (2018).

The results of the analysis showed that five main groundwater types occur in the Lower-Middle Devonian aquifer system:  $\text{Ca-HCO}_3$ ,  $\text{Mg-HCO}_3$ ,  $\text{Na-HCO}_3$ ,  $\text{Ca-SO}_4$  and  $\text{Na-Cl}$ . The  $\text{Ca-HCO}_3$  and  $\text{Ca-SO}_4$  water types were mainly found in and around the uplands of Southern Estonia and the outcrop of the aquifer system.  $\text{Ca-HCO}_3$  type groundwater was fresh with high alkalinity and was not affected by cation exchange processes (water types of  $\text{G3Ca-HCO}_3\text{O}$  või  $\text{g3Ca-HCO}_3\text{O}$ ).

The  $\text{Mg-HCO}_3$  water type was found in the northeastern part of the aquifer system and in the southern part of the aquifer system further away from the main recharge areas. This water type was affected by cation exchange (water type  $\text{g3Mg-HCO}_3+$ ). The  $\text{Na-HCO}_3$  water type occurred in the coastal areas of southwestern Estonia and inland around ancient buried valleys.  $\text{Na-HCO}_3$  water type had average alkalinity and was affected by cation exchange of the freshening type that occurs when fresh recently formed groundwater flows into the aquifer previously containing groundwater with higher salinity (water type  $\text{F2Na-HCO}_3+$ ).

The Na-Cl water type occurs in the islands of Kihnu and Ruhnu in the Gulf of Riga. Na-Cl type groundwater had high salinity, low alkalinity and negative cation exchange index (water types B2Na-Cl- and f2Na-Cl-). Na-Cl type groundwater with even higher salinity was found in central Latvia (water types b1Na-Cl- and b0Na-Cl-). Negative cation exchange index in both cases refers to salination type cation exchange, which is caused by intrusion of the saltwater into the aquifer previously containing fresh groundwater.

The  $\delta^{18}\text{O}$  isotopic values clearly showed the occurrence of older groundwater of glacial origin in the islands in the Gulf of Riga and in the northeastern part of the aquifer system in the Tartu County. The groundwater in the central Latvia is also probably very old and those three areas represent the slow water exchange zone in the aquifer system. The transition from slow to active water exchange zone occurs in western mainland part of the Lower-Middle Devonian aquifer system and in the eastern part aquifer system in areas that are located farther away from the main recharge areas. The active water exchange zone occurs in and around the South-Estonian uplands and in the outcrop area of the Lower-Middle Devonian aquifer system.

## Jooniste loetelu

- Joonis 1.** Eesti põhjavee toitumise kaart koos netoinfiltratsiooni isojoontega (Vallner, 1997).
- Joonis 2.** Eesti aluspõhja kivimite ja nendega seotud põhjaveekomplekside leviku kaart (Perens ja Vallner, 1997).
- Joonis 3.** Eesti aluskorra hüdrokeoloogilised läbilõiked (Perens ja Vallner, 1997).
- Joonis 4.** Stuyfzandi veetüüpide hüdrokeemilise klassifikatsiooni meetoodika (Stuyfzand 1993 põhjal).
- Joonis 5.** Põhjaveekompleksis levivate üldiste veetüüpide sageduse graafik.
- Joonis 6.** Ca-HCO<sub>3</sub> veetüübi erinevate liikide esinemissageduse graafik.
- Joonis 7.** Ca-SO<sub>4</sub> veetüübi erinevate liikide esinemissageduse graafik.
- Joonis 8.** Mg-HCO<sub>3</sub> veetüübi erinevate liikide esinemissageduse graafik.
- Joonis 9.** Na-HCO<sub>3</sub> veetüübi erinevate liikide esinemissageduse graafik.
- Joonis 10.** Na-Cl veetüübi erinevate liikide esinemissageduse graafik.
- Joonis 11.** Kesk-Devoni ja Alam-Devoni üldise veetüübi ülevaatekaart.
- Joonis 12.** Kesk-Devoni ja Alam-Devoni Stuyfzandi veetüübi ülevaatekaart.
- Joonis 13.** Kesk-Alam-Devoni veekogude põhjavee hapniku isotoopkoostise ( $\delta^{18}\text{O}$ ) leviku kaart.

## **Tabelite loetelu**

**Tabel 1.** Uuringus kasutatud põhjavee keemia andmed koos veeproovi asukoha kirjelduse ja peamiste veetüüpidega.

**Tabel 2.** Stuyfzandi peamiste tüüpide jaotus kloriidi kontsentratsiooni alusel.

**Tabel 3.** Stuyfzandi veetüübi põhitüüpide jaotus leelisuse alusel.



## 1. Sissejuhatus

Põhjavee ressursside päritolu ja põhjavee koostise kujunemise uurimine on oluline, kuna selle põhjal saab hinnata põhjavee kaitstust reostuse eest ja põhjavee tarbimise ohutust. Lisaks võimaldab põhjavees toimuvate keemiliste protsesside uurimine mõista erinevate põhjavees esinevate ainete päritolu ja vajadusel välja töötada meetmeid põhjavee seisundi parandamiseks.

Põhjaveeressursside keemiline ja koguseline seisund Lõuna-Eesti põhjaveekogumites, mis on Euroopa Liidu veepoliitika raamdirektiivi alusel loodud põhjavee ressursside majandamise ja kaitse korraldamiseks loodud üksused, on viimaste hinnangute alusel hea. Ka Kesk-Alam-Devoni põhjaveekogumid on 2022. aasta seisuga keemiliselt ja koguseliselt heas seisundis, aga sealjuures hinnatakse osade kogumite keemilisi seisundeid ohustatuteks (Marandi jt, 2020). Aastate jooksul ei ole Kesk-Alam-Devoni põhjaveekogumite seisundites esinenud suuri muutusi.

Kesk-Alam-Devoni põhjaveekompleksis on suuremateks vett tarbivateks veehaareteks Põlva põhjaveemaardlas asuvad Piiri ja Ähnioru põhjaveevaruga alad ning Tõrva põhjaveemaardlas asuv Kaarlimäe põhjaveevaruga ala. Eesti Keskkonnaagentuuri poolt oli määratud Kesk-Alam-Devoni põhjaveekompleksis 2022. aasta seisuga põhjaveetarbimine kolmes põhjaveehaardes kokku 1051,4 m<sup>3</sup>/ööpäevas. Kesk-Alam-Devoni põhjaveekompleksis oli 2022. aasta seisuga põhjaveevõtt muutunud väiksemaks (Hass, 2023). Eesti Keskkonnaagentuuri poolt kogutud põhjaveevõtu andmeid näitavad, et aastate 2021 ja 2022 vahel on veevõtu muutuse võrdlus -187 m<sup>3</sup>/ööpäevas.

Seni ei ole täpsemalt uuritud mis ulatuses toimub Kesk-Alam-Devoni põhjaveekompleksis põhjavee toitumine tänapäeval infiltreeruva veega ehk milline osa sellest kuulub aktiivse veevahetuse vööndisse. Aktiivse veevahetuse vööndi all mõistetakse töös seda põhjaveekompleksi osa, mis on mõjutatud tänapäevasesest põhjavee toitumisest ja kus põhjavett võib lugeda taastuvaks ressursiks. Aktiivsest veevahetuse vööndist väljaspool olevat vett iseloomustab oluliselt aeglasem veevahetus. Viimasel juhul jõuab põhjaveekihti väga vähe tänapäevasesest põhjavee toitest või kui seda sinna üldse ei jõua, loetakse selliste põhjaveekihtide vesi taastumatuks ressursiks.

Lõuna-Eestis võib esineda piirkondi, kus põhjavesi taastub väga aeglaselt või on põhjaveekihtid maapinnast nii hästi isoleeritud, et tänapäeval infiltreeruv vesi ei pruugi üldse selle kihtide veevarusid piisavalt taastada. Sellisel juhul tuleb oluline osa tarbitud veest põhjaveekihtide veemahutavusest ja see võib viia põhjavee survetasemete olulise alanemiseni. Põhjavee kihi veevahetuse kiirus määrab ära ka selle, kas ja kui hästi on põhjaveekompleks kaitstud maapinnalt pärineva reostuse eest. Teades vee päritolu, saab hinnata selle vanust, planeerida vee säästlikku kasutamist ja kaitset ning rakendada meetmeid põhjaveekompleksiga seotud veekogumite hea seisundi säilitamiseks.

Bakalaureusetöö on kirjutatud eesmärgiga uurida ja analüüsida olemasolevate andmete põhjal Kesk-Alam-Devoni veekompleksis esinevaid põhjaveetüüpe, nende päritolu, levikut ning kujunemist. Nende tunnuste põhjal eristatakse Kesk-Alam-Devoni põhjaveekompleksis aktiivse ja aeglase veevahetuse vööndid. Bakalaureusetöö uurimispiirkonnaks on Lõuna-Eesti ja Põhja-Läti Kesk-Alam-Devoni põhjaveekompleks. Põhjaveekompleksi viimane põhjalik regionaalne uuring sellel teemal tehti aastal 1996 (Savitskaja jt, 1996).

Uurimistöös analüüsitakse Kesk-Alam-Devoni veekompleksis erinevate põhjaveetüüpide esinemist tuginedes Pieter Jan Stuyfzandi meetodile, mis toob välja nii üldised kui ka detailsed veetüübid. Pieter Jan Stuyfzandi poolt loodud detailsemate veetüüpide eristamise meetodika (Stuyfzand, 1986, 1989, 1993) hõlmab endas põhjavee erinevate tunnuste kirjeldamist nagu vee mineraalsus, leelisus, põhjavees enimesinevad katioone ja anioone ning katioonvahetuse indeksit. Erinevate veetüüpide leviku kirjeldamiseks on töös esitatud vastavad ülevaatekaardid.

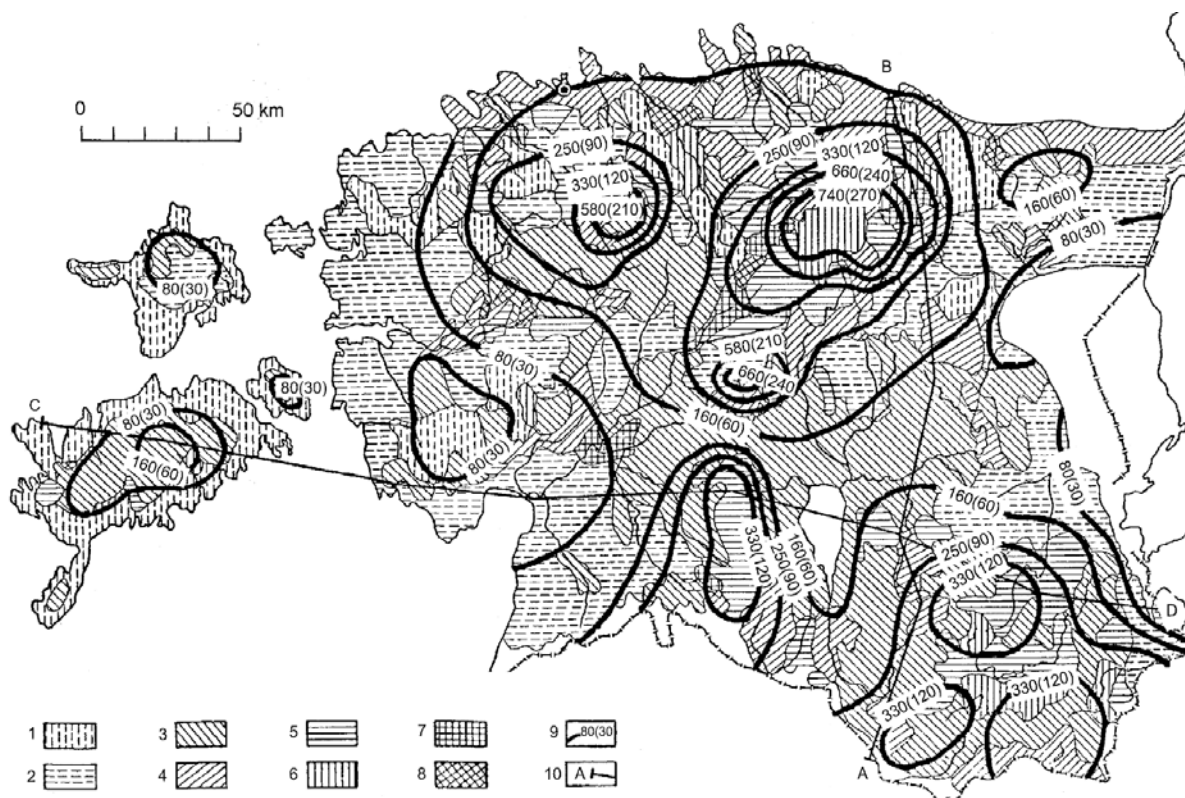
## 2. Uuringuala tutvustus

### 2.1 Põhjavee kujunemine

Bakalaureusetöö uuringualaks on Kesk-Alam Devoni põhjaveekompleksi levikuala Lõuna-Eestis ja Põhja-Lätis. Aasta keskmine sademete hulk piirkonnas jääb vahemikku 500-750 mm. Rannikul on aasta keskmine sademete hulk väiksem ja kõrgustikel on see umbes 10-20% suurem (Vallner, 1997).

Põhjavee varude taastumise seisukohast on oluline põhjavee toitumine ja aktiivse veevahetuse tsooni ulatus, kus maapõues ringlev põhjavesi on seotud tänapäevaste sademete ja pinnaveekogudega (Vallner, 1997). Maapõue infiltreeruv vesi pärineb peamiselt sademetest ja kevadisest lumesulaveest. Põhjaveekihi toitumise juures tuleb eristada infiltatsiooni ja põhjaveekihtide toitumist ehk netoinfiltatsiooni (Healy, 2011). Infiltratsiooniks loetakse vee hulka, mis jääb üle aurumisest ja pindmisest äravoolust ning liigub mullast sügavamale maapõue. Põhjavee toitumiseks ehk netoinfiltratsiooniks loetakse vee hulka, mis jõuab tegelikult põhjaveetasemeni. Need kaks suurust ei ole võrdsed, sest mullas ja aeratsioonivöös võib osa vett liikuda evapotranspiratsiooni protsessi kaudu tagasi atmosfääri või vaheäravooluna aeratsioonivöös veekogudesse enne põhjaveetasemeni jõudmist. Põhjaveekihtide toitumine väljendub muuhulgas nende põhjaveetasemete muutuses (Healy ja Cook, 2002). Põhjaveetaseme muutusi seostatakse tihti kas põhjavee toitumisega, looduslikult esinevate kliimamuutustega või põhjavee tarbimisega.

Eestis ja Põhja-Lätis on maapinnalähedase põhjavee tase mõjutatud sademetest ja lume sulaveest. Sealjuures toimub netoinfiltratsioon peamiselt kevadise lumesula ja sügisvihmade perioodi (Vallner ja Järvet, 1998). Suvisel ajal põhjaveetasemed langevad ja olulist netoinfiltratsiooni ei toimu, sest evapotranspiratsioon on enamasti suurem kui sademete hulk, mistõttu ei teki infiltatsiooni jaoks vajalikku vee ülejääki. Sademete infiltreerumisel tekkinud põhjavesi on Eesti põhjaveekompleksides kõige laiemalt levinud ning joogi- ja tarbevee allikana enim kasutatav põhjaveetüüp. Eesti alale langevatest sademetest kulub põhjavee toitumisele keskmiselt 10% ehk 70 mm aastas. Kõige intensiivsem on põhjavee toitumine Pandivere kõrgustikul, ulatudes 200–300 mm aastas, väikseim aga Lääne-Eestis ning Võrtsjärve ja Peipsi madalikul ning raba aladel, jäädes vahemikku 0–50 mm aastas (Vallner, 1997). Vee infiltreerumise ja põhjavee liikumise kaart on esitatud joonisel 1. Kaardil on ka olemas netoinfiltratsiooni hulka kujutavad isojooned.



**Joonis 1.** Eesti põhjavee toitumise kaart koos netoinfiltratsiooni isojoontega (Vallner, 1997). Legendis olevad numbrid 1-8 näitavad erinevaid netoinfiltratsiooni väärtusi. Legendis olev tingmärk number 9 näitab netoinfiltratsiooni isojooni. Legendis olev tingmärk number 10 näitab hüdrogeoloogiliste läbilõigete asukohta, mis on esitatud joonisel 3.

Põhjavesi liigub raskusjõu ja hüdrostaatilise rõhu mõjul kõrgemal paiknevatele toitealadele madalamal paiknevate väljavoolualade suunas, jõudes filtratsioonivooluna allikatesse, pinnaveekogudesse või merre. Sademete tekkeline põhjavesi on väikese mineraalsusega ja sobib üldiselt hästi joogi- ja tarbeveeks. Ohuks on selle põhjavee avatus inimtegevusest pärinevale reostusele (Marandi jt, 2019). Lisaks on piirkonniti alates 1960ndatest aastatest põhjaveevoolule olulist mõju avaldanud põhjaveevõtt (Vallner, 1997).

Regionaalselt liigub põhjavesi Kõrg-Eestist Madal-Eesti suunas. Olulisteks regionaalseteks põhjaveekihtide toitealadeks Lõuna-Eestis on Haanja, Otepää ja Sakala kõrgustikud, kus põhjavee tase on 180–280 m üle merepinna ja kust lähtub peamine tänapäevane põhjavee toide ka Kesk-Alam Devoni põhjaveekompleksi. Varasemad uurijad on arvanud, et kõik Devoni põhjaveekompleksid kuuluvad aktiivse veevahetuse vööndisse (Vallner, 1997). Viimasel ajal on aga avaldatud ka arvamust (Pärn, 2018), et põhjaveekompleksi lääneosa võib kuuluda hoopis aeglase veevahetuse vööndisse.

Eesti põhjaveekompleksides leidub ka liustikutekkelist ehk glatsiaalset põhjavett (Vaikmäe jt, 2001). Kvaternaari jääaegadel on Eestit katnud mitme kilomeetri paksune mandriliustik, millest tekkis nn liustikutekkeline ehk glatsiaalne põhjavesi. Liustik tekitas Eesti põhjaosas oma pealetungi ajal suure hüdrostaatilise rõhu, mis surus liustiku alt ja pinnalt pärinevad sulaveed Eesti aluspõhja kivimitesse (Marandi jt, 2019). Liustikulise põhjavee vanust on varasemalt uurinud näiteks Pärn jt (2019) ja Raidla jt (2012). Nende uuringute tulemusel on leitud, et glatsiaalse põhjavee formeerumise aeg oli 12000

kuni >25000 aastat tagasi, mida on radiosüsiniku ( $^{14}\text{C}$ ) meetodiga ja teiste põhjavee vanust kirjeldavate isotoopidega (triitium ehk  $^3\text{H}$  ja  $^4\text{He}$ ) uuritud.

Liustikutekkelist põhjavett iseloomustab väike mineraalsus, ehk selles vees lahustunud ainete sisaldus on väike ning vesi on äärmiselt kerge O ja H isotoopkoostisega. Glatsiaalse päritoluga põhjaveed levivad Eestis eelkõige sügavamates Kambriumi-Vendi ja Ordoviitsiumi-Kambriumi põhjaveekompleksides Põhja-Eestis. Liustikutekkelist põhjavett, mis on segunenud pärast jääaja lõppu moodustunud sademete tekkelise põhjaveega, on leitud maapinnalähedastes Siluri-Ordoviitsiumi ja Kesk-Alam-Devoni põhjaveekihtides (Pärn, 2018; Savitskaja jt, 1996), aga selle levikut ei ole seni detailsemalt uuritud.

## 2.2 Geoloogiline kirjeldus

Kesk-Alam Devoni põhjaveekompleksi moodustab Alam-Devoni ladestiku ja Kesk-Devoni Pärnu lademe kivimites olev põhajvesi. Varem loeti põhjaveekompleksi osaks ka Devoni kivimite all lasuvad lõhelised Siluri ladestuse alal paiknevad põhjaveekihid (Savitskaja jt, 1996), ent praegu kehtivas hüdrostratigraafilistes jaotustes (Perens ja Vallner, 1997) on sellest loobutud, sest Siluris on esindatud terrigeensete kivimite asemel karbonaatkivimid. Kogu põhjaveekompleksi moodustavate kivimite paksus suureneb põhjast lõuna suunas ulatudes Põhja-Lätis 120 m-ni (Borozdins jt, 2022).

Lätis ja vähemal määral ka Lõuna-Eestis on levinud Alam-Devoni ladestik (Kleesment ja Mark-Kurik, 1997). Alam-Devoni kihid koosnevad kolmest erineva vanusega stratigraafilisest üksusest, milleks on Tilže lade, Kemerilade ja Rēzekne lade. Peamise osa Lõuna-Eesti Kesk-Alam Devoni veekompleksist moodustavad Kesk-Devoni Pärnu lademe kivimid (Perens ja Vallner, 1997).

Tilže lade on levinud Kagu-Eestis ja kaetud Rēzekne lademe kivimitega. Balti regioonis esindab Tilže ladet Tilže kihistu. Tilže kihistu moodustavad hallikad ja lillakashallid paralleelkihilised aleuoliidid ja liivakivid dolomiidi vahekihtidega. Aleuoliidid- ja liivakivid on valdavalt tugevalt tsementeeritud dolomiidi või kipsi maatriksiga (Kleesment ja Mark-Kurik, 1997). Kihistu paksus Kagu-Eesti ja Läti aladel jääb vahemikku 2 kuni 60 meetrit, olles suurim Ida-Lätis (Lukševičs jt, 2012).

Kemerilade levib peamiselt Lätis ja Eestis on see esindatud vaid väga piiratud alal Lõuna- ja Edela-Eesti puursüdamikes, kus selle paksus on vahemikus 5-8 m (Kleesment ja Mark-Kurik, 1997; Lukševičs jt, 2012). Kemerilade kihistust iseloomustavad helehalli ja roosakat värvi liivakivid, ning kihistuses leidub ka konglomeraatse koostisega liivakivi, milles sarnaselt Tilže kihistuga esineb ka dolomiitset tsementi (Kleesment ja Mark-Kurik, 1997).

Rēzekne lade on laiemalt levinud Lõuna-Eestis, kus see on kaetud Pärnu lademe kivimitega. Rēzekne lademe kivimid on Alam-Devoni ladestikust kõige paksema lasumusega ning kogupaksus on vahemikus 0,7-51,5 meetrit. Rēzekne lademele on iseloomulik rohekas-, lillakas- ja helehall liivakivi. Kagu-Eesti moodustavad lademe ülemise osa domeriidid. Lademe alumises osas esineb liivakivides dolomiitne tsement (Kleesment ja Mark-Kurik, 1997).

Pärnu lade paksus Lõuna-Eestis on 15–47 meetrit. Pärnu ladet iseloomustab helekollane peeneteraline põimjaskihiline liivakivi, mille alumine osa on tugevalt tsementeerunud dolomiitse maatriksiga (Tori kihistu). Lademe ülemise osa moodustavad horisontaalkihilised dolomiitse maatriksiga peeneteralised liivakivid, milles esineb aleuoliidi ja savikaid vahekihte (Tamme kihistu; Kleesment ja Mark-Kurik, 1997).

Pärnu lademe kohal paiknevad Narva lademe kivimid, mis moodustavad olulise regionaalse veepideme. Narva lade on väikese ulatusega esindatud ka Kirde-Eestis, aga teine ning suurem osa paikneb ja levib Lõuna-Eestis ja Lätis. Narva lademes esineb väga varieeruva litoloogiaga Narva kihistu. Kihistu alumises osas esineb dolomiitne mergel, mille vahekihid on dolomiidist ja dolomiitset savist. Kihistus esineb ka aleuriiti ning väga peeneteralist ja aleuriitset liivakivi. Narva lademe kogupaksus jääb vahemikku 30–109 m (Kleesment ja Mark-Kurik, 1997).

## 2.3 Hüdrokeoloogiline kirjeldus

Eesti põhjaveed saab päritolust lähtuvalt jagada kolmeks (Marandi jt, 2019):

- sademete tekkelised
- liustikutekkelised ehk glatsiaalsed
- merelise tekkega

Eesti territoorium asub Balti settebasseini põhjaosas, kus kivimikihid paiknevad rõhtsalt peaaegu rikkumata lasumusega ja on kallutatud 2-3 kraadise nurgaga lõuna suunas. Eestis levivad põhjaveekihi jälgivad üldist litoloogiliste kihtide lasumust ja nende sügavus suureneb basseini keskosa suunas (Marandi jt, 2019).

Põhjaveekihi moodustab poorsetes ja lõhelistes kivimites või pinnastes ulatuslikul alal leviv põhjavesi. Maapinnalt lasuvat esimest põhjaveekihti, mille veetase kujuneb netoinfiltratsiooni ja evapotranspiratsiooni vastastikmõjus, nimetatakse vabapinnaliseks. Sügavamal kahe veepideme vahel paiknevaid põhjaveekihte nimetatakse survealisteks. Eestis levivad põhjaveekihi on hüdrosratigraafilisel põhimõttel jagatud gruppidesse, mida nimetatakse veekompleksideks (ka veeladestuteks või veeladestikeks). Põhjaveekihi oluline tunnus on selle veejuhtivus ehk vee läbilaskevõime, mis on veekihi filtratsioonikoefitsienti ja veekihi paksuse korrutis (Põhjaveekomisjon, 2004). Põhjaveekihi omadust anda ära gravitatsioonilist vett nimetatakse vabapinnalises põhjaveekihi veeanniks ja survealises põhjaveekihi rõhuveeanniks (Tamm ja Metsur, 2017).

Devoni põhjaveekompleksid on seotud nii terrigeensete kui ka karbonaatsete sette kivimitega (Savitskaja jt, 1996). Lõuna-Eestis ja piiratud alal ka Kirde-Eestis levivad aluskorra sette kivimite Ülem-Devoni, Kesk-Devoni ja Kesk-Alam-Devoni põhjaveekompleksid. Samade põhjaveekomplekside leviala jätkub ka lõuna pool Põhja-Lätis. Devoni Eesti ala hüdrokeoloogilist ehitust on ka lähemalt käsitletud näiteks Perens ja Vallner (1997) ja Perens jt (2012).

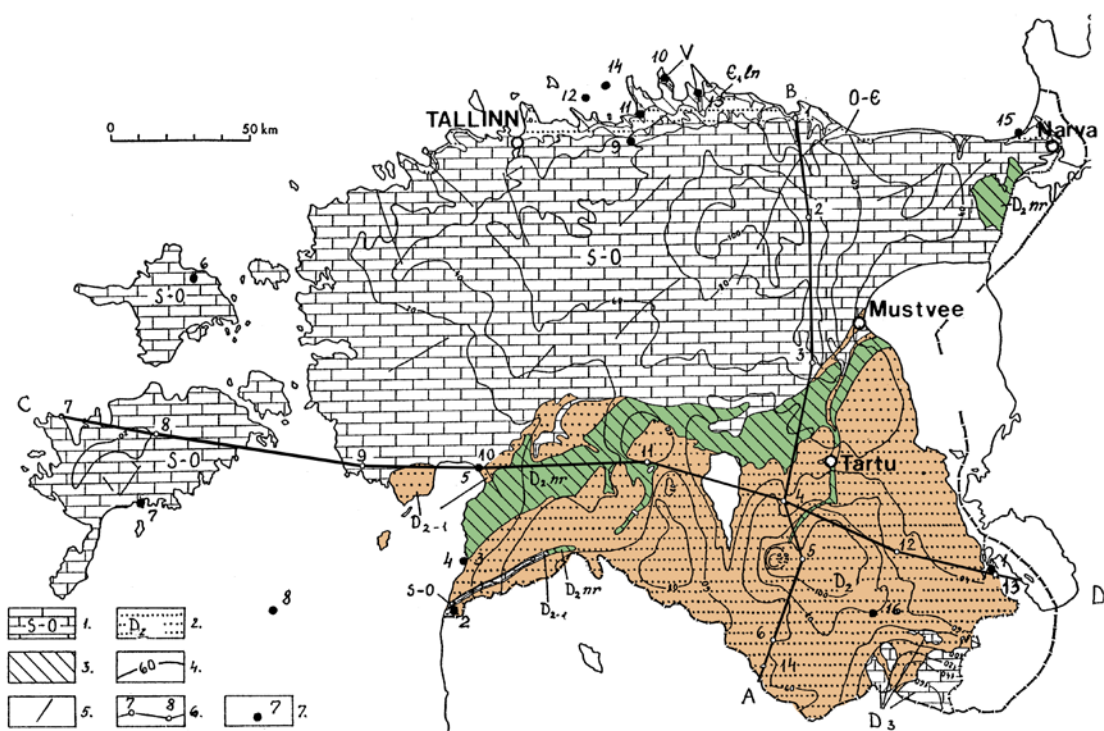
Kesk-Alam-Devoni põhjaveekompleksi põhjavesi paikneb Alam- ja Kesk-Devoni Tilže, Kemeri, Rēzekne ja Pärnu lademe kivimites. Nende kivimite filtratsioonikoefitsient jääb vahemikku 1–3 m/ööpäevas (Perens ja Vallner, 1997). Põhjaveekompleksi üldine veejuhtivus on 50 kuni 500 m<sup>2</sup>/ööpäevas, olles suurem Lõuna-Eesti kõrgustike piirkonnas (Savitskaja jt, 1996; Perens ja Vallner, 1997). Veekompleksi põhjavee rõhuveeand jääb vahemikku 5·10<sup>-5</sup> kuni 10<sup>-3</sup> (Perens ja Vallner, 1997)

Üldises pildis on Lõuna-Eestis põhjavee liikumise suunad ära määratud kõrgustike paiknemisega. Ka Kesk-Alam-Devoni põhjaveekompleksi tähtsamateks toitealadeks on Lõuna-Eesti kõrgustikud Haanja, Otepää ja Sakala. Veekompleks toitub avamusalal läbi pinnakatte infiltreeruvast sademeveest ja survealal lasuva Kesk-Devoni põhjaveekompleksi veest, mille vertikaalset liikumist pärsib kahte veekompleksi eraldav Narva regionaalne veepide (Marandi jt, 2019). Narva regionaalne veepide koosneb Narva lademe aleuriit-, dolomiidi-, mergli- ja savikihtidest ning kivimikihtide kogupaksus on kuni 90 m. Narva regionaalse veepideme vertikaalne filtratsioonikoefitsient on 10<sup>-4</sup>–10<sup>-5</sup> m/ööpäevas, kohati 10<sup>-6</sup> m/ööpäevas. (Perens ja Vallner, 1997)

Kesk-Alam-Devoni põhjaveekompleksi peamisteks tänapäevasteks toitealadeks olevad kõrgustikud paiknevad selle kesk- ja idaosas. Seal esinevad põhjaveekompleksi veetasemete suurimad absoluutkõrgused vahemikus 60–80 meetrit üle merepinna ning survetase langeb põhja suunas

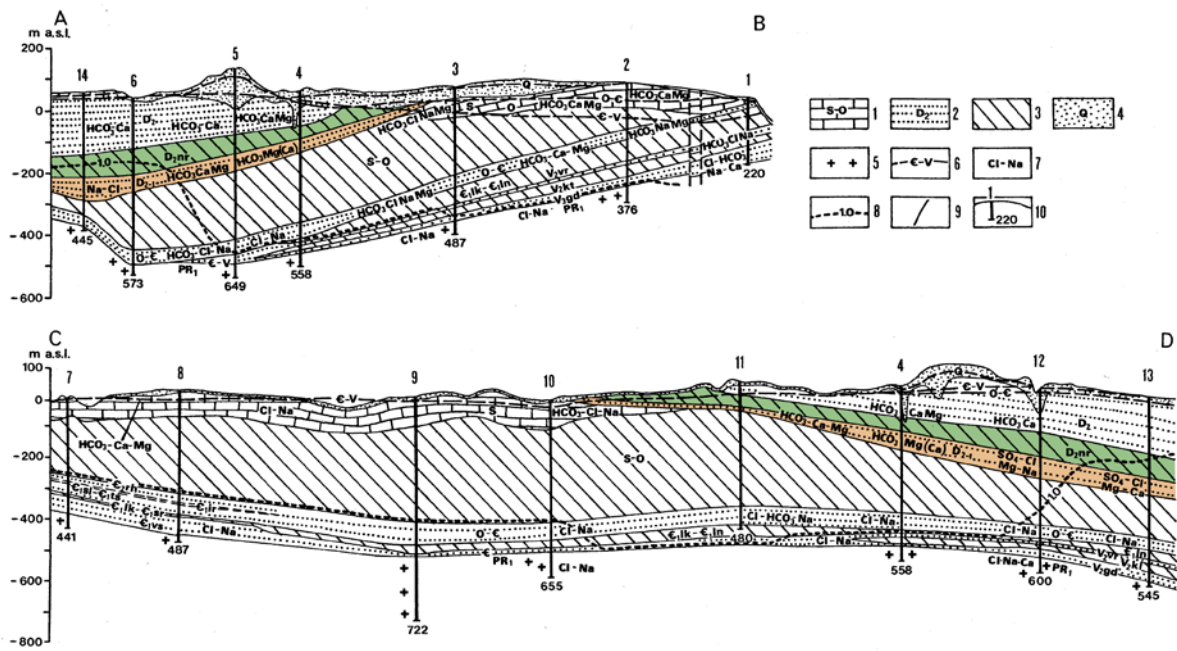
absoluutkõrgusele umbes 50 meetrit ja lääne suunas Liivi lahe rannikul kuni 0-10 m ehk peaaegu merepinna tasemele (Tšeban, 1966). Üldiselt on põhjavee toitumine aeglane, kuna põhjavee toitumise intensiivsus on pärsitud veekompleksi katvate lasundite (Kvaternaari setted, Kesk-Devoni ladestu settekivimid) suure paksuse ja Narva regionaalse veepideme väikese vertikaalse filtratsioonikoefitsendi tõttu.

Lääneosas on Kesk-Alam-Devoni põhjaveekompleksi väljavoolualadeks kohalik hüdrograafiline võrk (nt Pärnu ja Halliste jõed, Liivi laht) ning põhjavesi väljub tihti maapinnale allikate või arteesiakaevudena. Põhjavee liikumise suunad on siin määratud eelkõige veelahkmelise Sakala kõrgustiku poolt, mis on põhjaveekompleksi lääneosa peamine toiteala ning sealt liigub põhjavesi loode- ja lääne suunas. Sakala kõrgustikul on survepind kuni 35 meetri sügavusel maapinnast ja absoluutkõrgusel umbes 80 meetrit. Kõrgustikul on põhjavee toitumiseks hinnatud 100–120 mm aastas ning seal on toitumine aeglane, sest valdavas osas on põhjaveekogum kaetud Narva regionaalse veepidemega. Põhjavee tase on 10–15 meetri sügavusel maapinnast, kuid survepind on otseses sõltuvuses kohalikest reljeefist. Eesti põhjaveekomplekside (sh Narva lade) ruumilist levikut ja Kesk-Alam-Devoni põhjaveekompleksi avamusala paiknemist on kujutatud joonisel 2 ning Kesk-Alam-Devoni (sh Narva lade) põhjaveekompleksi asukohta Eesti hüdroteoloogilisel läbilõikel on kujutatud joonisel 3.



**Joonis 2.** Eesti aluspõhja kivimite ja nendega seotud põhjaveekomplekside leviku kaart (Perens ja Vallner, 1997). Kesk-Alam-Devoni põhjaveekompleks on märgitud joonisel oranži värviga ja Kesk-Devoni põhjaveekompleksil lasuv Narva regionaalne veepide on märgitud joonisel rohelse värviga.





**Joonis 3.** Eesti aluskorra hüdrogeoloogilised läbilõiked (Perens ja Vallner, 1997). Kesk-Alam-Devoni põhjaveekompleks on märgitud joonisel oranži värviga ja Kesk-Devoni põhjaveekompleksil lasuv Narva regionaalne veepide on märgitud joonisel rohelse värviga.

## 2.4 Põhjavee keemilise koostise kujunemine

Eestis levib väga eriilmelise keemilise koostisega põhjavesi. Põhjavee keemiline koostis sõltub eelkõige veekihti moodustavate kivimite ja setendite mineraloogilisest koostisest (Marandi jt, 2019). Põhjavee keemiline koostis kujuneb välja erinevates looduslikes protsessides. Standardne vee keemiline analüüs sisaldab endas välitingimustest mõõdetavaid parameetreid nagu vee temperatuuri, elektrijuhtivust (inglise keeles *electrical conductivity*, tähistatakse EC, mis väljendab vee mineraalsust ehk selles lahustunud ainete sisaldust), vees lahustunud hapniku sisaldust ja pHd. Laboratoorselt määratavate anorgaaniliste komponentide hulgas on olulisemad nn 8 põhiiooni ehk makrokomponendid, mille moodustavad neli peamist katiooni (naatrium, kaalium, magneesium ja kaltsium) ja neli peamist aniooni (kloriid, vesinikkarbonaat, sulfaat ja nitraat; Appelo ja Postma, 2005). Analüüsis arvestatakse samuti ka mikrokomponentidega. Eesti põhjavees levivad peamised mikrokomponendid on raud, fluoriid, mangaan, baarium ja boor (Marandi jt, 2019).

Värskelt tekkinud põhjavees ehk magedas väikese lahustunud ainete sisaldusega põhjavees on peamised lahustunud ioonid kaltsium, magneesium ja vesinikkarbonaat. Merelise päritoluga põhjavees (soolane põhjavesi) esineb kõige enam naatriumi ja kloriidi-ioone. Seal on lahustunud ainete sisaldus ehk mineraalsus oluliselt suurem.

Põhjavee keemilist koostist kirjeldatakse põhjavee tüübi abil. Põhjavee tüüp väljendab oma lihtsamal kujul vees enamlevinud katiooni ja aniooni (nt  $\text{Ca-HCO}_3$ ,  $\text{Na-Cl}$ ). Selle määramiseks arvutatakse makrokomponentide hulka kuuluvate kationide ja anioonide protsentuaalsed sisaldused ühikutes milli-ekvivalenti liitris (mg-ekv/l; Appelo ja Postma, 2005). Eestis on kasutatud põhjavee keemilise koostise üldiseloomustuse täpsustamiseks Kurlovi valemit (Tamm ja Metsur, 2017).

Kurlovi valemis esitatakse vee keemilise koostise põhinäitajad mg-ekv/l osakaalu protsentidena ja selle hulka ei arvestata komponente, mille väärtused on vähem kui 10% määratud ühendite mg-ekv/l summast (Tamm ja Metsur, 2017). Valemi abil antakse veele vastav nimetus esimese kahe aniooni ja kahe katiooni järgi kahanevas järjekorras, nimetuse ette lisatakse vee mineralisatsioon grammides või kuivjäägina. Põhjaveevarude hindamiseks on Kurlovi valemist sobivamaks Piperi graafikud. Piperi graafikute eeliseks on paljude analüüsides korruga visualiseerimine ning saadud tulemusi on võimalik kasutada vee tüübi määramisel ühtaegu nii koostise järgi kui ka vaadelda veekihtide segunemist ajas (Tamm ja Metsur, 2017).

Põhjaveetüübi alusel on võimalik eristada peamisi keemilisi protsesse, mille kaudu uuritav põhjavesi on kujunenud. Põhjavees esinevateks peamisteks keemilisteks protsessideks on mineraalide lahustumine ja väljasettimine, erineva päritoluga põhjavee segunemine, ionvahetuse reaktsioonid ja redoksreaktsioonid.

Eesti põhjavee kvaliteeti mõjutavad peamiselt karbonaatsete ja vähem silikaatsete mineraalide lahustumine. Mineraalide lahustumine sõltub selle pH-st, mille määrab ära enamasti lahustunud  $\text{CO}_2$  osarõhk aga ka püriiti sisaldavate kivimite puhul püriidi oksüdatsioonil tekkivad  $\text{H}^+$  ioonid ehk prootonid (Appelo ja Postma, 2005). Mineraalide lahustumisel tarbitakse  $\text{H}^+$  ioone ja toimub esialgse happelise pH puhverdamine. Olulisemateks karbonaatseteks mineraalideks, mille lahustumine põhjavee koostist mõjutab on kaltsiit ( $\text{CaCO}_3$ ) ja dolomiit ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ), harvem sideriit ( $\text{FeCO}_3$ ).

Silikaatide (nt vilgud, päevakivid) lahustumine on märgatavalt aeglasem kui karbonaatidel ja vees domineerivad üldjuhul karbonaatide lahustumisest pärinevad ioonid. Silikaatide lahustumisel on neil tugev sõltuvus pH-st, sest kõigi silikaatsete porsumisprotsesside puhul tarbitakse prootoneid (Appelo ja Postma, 2005). Põhjavees esinevad mineraalide väljasettimised on osa samast protsessist, mis esineb koos mineraalide lahustumisega, kui ionide sisaldus põhjavees jõuab mõne mineraali maksimaalse lahustuvuseni ehk toimub lahuse üleküllastumine mõne mineraali suhtes.

Erineva päritoluga põhjavee segunemist esineb enam rannikuäärsetel aladel, kus mage maismaal tekkinud põhjavesi seguneb soolase mereveest tekkinud põhjaveega või merevee endaga. Erineva päritoluga põhjavee segunemist võib esineda ka allikates, eriti kui need paiknevad suuremate tektooniliste lõhede piirkonnas (Appelo ja Postma, 2005). Samuti võib esineda põhjavee segunemist kaevudes, kui kaev avab mitut erinevat põhjaveekihti või suur põhjavee tarbimine on tarbitava veekihi põhjaveetasel nii suurel määral alandanud, et hakkab toimuma põhjavee sissevool ümbritsevatest põhjaveekihtidest või merest (Stuyfzand, 1993).

Ioovahetuse ehk absorptsiooni protsessidest on põhjaveetüübi kujunemisel olulisim katioonvahetus, kus toimub katioonide liikumine vesilahuse ja savi või orgaanilise aine pindade vahel (Appelo ja Postma, 2005). Katioonivahetuse protsessid toimuvad erineva mineraalsusega põhjavee segunemisel näiteks olukorras kus väikese mineraalsusega maismaal tekkinud põhjavesi seguneb soolase mereveest tekkinud põhjaveega või vastupidi. Katioonivahetus on oluline, sest see viitab veekihi toimunud erineva päritolu vee segunemisele ning see väljendub ka põhjavee tüübis (Appelo ja Postma, 2005). Esimesel eelpool kirjeldatud juhul (*freshening* ehk magestumise tüüpi katioonvahetus) liiguvad vesilahuses olevad  $\text{Ca}^{2+}$  ja vähemal määral  $\text{Mg}^{2+}$  ioonid põhjaveekihi esinevate savimineraalide ja orgaanilise aine pinnale, mille tulemusena vabanevad sealt vette  $\text{Na}^+$  ja väiksemal määral ka  $\text{K}^+$  ioonid. Selle tulemuseks on  $\text{Na-HCO}_3$  veetüübi kujunemine, mis on Eesti sügavamates põhjaveekihtides laialt levinud (Perens jt, 2001; Pärn jt, 2016). Juhul kui soolane põhjavesi või merevesi tungib varem väikese mineraalsusega põhjavett sisaldanud põhjaveekihti (*salinization* ehk sooldumise tüüpi katioonvahetus) toimub vastupidine ionide liikumine ja tulemuseks on  $\text{Ca-Cl}$  tüüpi põhjavee kujunemine.

Põhjavees toimuvad ka redoksreaktsioonid, mis mõjutavad põhjaveekihtides esineva orgaanilise aine ja püriidi ning vees lahustunud hapniku, raua (ja ka mangaani), sulfaadi ja metaani looduslikke kontsentratsioone (Appelo ja Postma, 2005). Redoksreaktsioonides kanduvad elektronid üle ühelt elemendilt teisele ehk toimub nende oksüdatsioonistme muutus. Ühendeid, milles esinevad elemendid loovutavad elektrone, nimetatakse elektronide doonoriteks ja need oksüdeeruvad. Elektrone liitvaid ühendeid nimetatakse elektronide aktseptoriteks ja need redutseeruvad. Põhjavees toimuvad redoksreaktsioonid tavaliselt orgaanilise aine või püriidi oksüdeerumise tõttu, mille arvel toimub sõltuvalt põhjavee koostisest kas hapniku, nitraadi, raua (ja mangaani) ja sulfaadi redutseerumine ning metaani teke. Kui põhjavees enam hapniku ei esine, lagunevad seal redoksprotsesside tõttu teatud sügavusel nitraatioonid ja kujunevad suured rauasisaldused. Tugevalt redutseeruvates tingimustes hakkab redutseeruma sulfaat ja tekib väävelvesinik ( $\text{H}_2\text{S}$ ) gaas, millel on iseloomulik nn mädamuna lõhn. Sulfaadi redutseerumine võib toimuda ka juhul kui sulfaadirikas merevesi tungib hapnikuvabasse rannikul paiknevasse põhjaveekihti.

### 3. Materjal ja meetodika

#### 3.1 Kasutatud andmed

Uuringus kasutatakse Kesk-Alam-Devoni põhjavee keemilise koostise kirjeldamiseks ja selle kujunemise selgitamiseks varasemates aruannetes, teadusartiklites ja avalikes andmebaasides avaldatud hüdrokeemilist andmestikku (Savitskaja jt, 1996; Vaikmäe jt, 2020; Babre jt, 2016). Valimisse on lisatud ka põhjavee keemilise koostise analüüsid Kesk-Alam-Devoni põhjaveekompleksi avavatest kaevudest, mis pärinevad riiklikest EELISE ja KESE andmebaasidest ja on kogutud riikliku põhjaveeseire raames perioodil 2004 – 2017. See andmestik on varem avaldatud aruandes Marandi jt (2019). Kui ühest proovipunktist oli antud perioodil võetud rohkem kui üks põhjavee keemilise koostise analüüs, siis kasutati andmeanalüüsis nende keskväärtust. Põhjavee keemilise koostise iseloomustamiseks on veeproovidest määratud järgmised ioonid:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{SiO}_2^{4+}$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{Ba}^{2+}$ , üldise  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ . Osade veeproovidel puhul on määratud ka nende isotoopkoostis ( $\delta^{18}\text{O}$  ja  $\delta^2\text{H}$ ).

Uuringu andmestiku valimis on kokku 106 proovi. Põhjavee analüüsi kvaliteeti hinnati veeproovi laengutasakaalu abil. Taoline kvaliteedikontroll lähtub põhimõttest, et vesilahus on oma kogulaengult neutraalne ja makrokomponente moodustavate kationide ja anioonide kontsentratsioonid ühikutes mg-ekv/l ei tohiks kvaliteetse keemilise analüüsi puhul erineda rohkem kui 10%. Esialgselt andmebaasist arvati välja proovid, mille laengutasakaalu (CMB) viga oli >10% ja mis loeti edasise analüüsi jaoks ebausaldusväärseks. Laengutasakaalu arvutamiseks kasutatakse järgnevat valemit:

$$\frac{\text{Kationide summa} - \text{Anioonide summa}}{\text{Kationide summa} + \text{Anioonide summa}} * 100\%$$

Andmeanalüüsiks koondati keemilise analüüsi tulemused Exceli tabelisse ning arvutati allpool kirjeldatud Stuyfzandi meetodikale tuginedes põhjavee peamised tüübid, tüübid, alatüübid ja nende moodustamiseks kasutatud indeksid.

**Tabel 1.** Uuringus kasutatud põhjavee keemia andmed koos veeproovi asukoha kirjelduse ja peamiste veetüüpidega.

Kaevu number	Kaevu asukoht	Kaevu sügavus (m)	Koordinaadid (X ja Y, L-EST)	Proovivõtu kuupäev	Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	Na <sup>+</sup> (mg/L)	K <sup>+</sup> (mg/L)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	Cl <sup>-</sup> (mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	SiO <sub>2</sub> <sup>4+</sup> (mg/L)	üld-Fe (mg/L)	Mn <sup>2+</sup> (mg/L)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	Mineraalsus (mg/L)	Viide	Veetüüp	Lõplik veetüüp (Stuyfzand, 1993)
1286	Lohkva	132	662798.00, 6473435.00	03/06/1996	22.0	18.8	34.4	8.7	220	25.5	16.0	7.9	0.1	<0.05	<0.01	<0.1	355	Savitskaja jt, 1996	Mg-HCO <sub>3</sub>	g2Mg-HCO <sub>3</sub> +
3536	Kuningaküla	37	719228.00, 6562901.00		49.9	17.1	2.7	3.4	245.8	7.5	3.3	7.7	2.3		0.20	1.1	341	EELIS 2004-2017	Ca-HCO <sub>3</sub>	g3Ca-HCO <sub>3</sub> 0
4629	Vasara	83	604054.00, 6468956.00		46.1	28.2	20.0	10.0	330	2.7	10						447	EELIS 2004-2017	Mg-HCO <sub>3</sub>	G3Mg-HCO <sub>3</sub> +
4930	Kääriku	210	641401.00, 6431186.00	10/06/1996	61.1	32.2	5.1	5.7	366	5.3	10.7	13	0.4		0.00		501	Savitskaja jt, 1996a	Ca-HCO <sub>3</sub>	g3Ca-HCO <sub>3</sub> 0
5087	Võru	230	678724.00, 6416000.00	10/06/1996	56.1	29.8	4.8	6.9	299	7.4	30.0	11.2	0.5		0.00		446	Savitskaja jt, 1996a	Ca-HCO <sub>3</sub>	g3Ca-HCO <sub>3</sub> 0
5190	Tobraselja	70	593076.00, 6475676.00		52.5	29.6	9.9	4.3	323.4	10.5	8	13.2	0.9		0.10	0.4	453	Marandi jt, 2019	Ca-HCO <sub>3</sub>	g3Ca-HCO <sub>3</sub> 0
5253	Suure-Jaani	90	585193.00, 6488512.00	12/06/1996	71.1	21.3	6.4	2.3	287	16.3	30.7	15.4	2.1	<0.05	0.09	0.1	454	Savitskaja jt, 1996a	Ca-HCO <sub>3</sub>	g3Ca-HCO <sub>3</sub> 0
5266	Tohvri	80	579132.00, 6473318.00		64.6	23.6	16.0	6.6	350	2.9	6.1						470	Marandi jt, 2019	Ca-HCO <sub>3</sub>	G3Ca-HCO <sub>3</sub> +
6143	Polli	190	590929.00, 6443638.00	28/02/1986	50.1	40.1	5.0		354	3.9	5.1		0.2		0.24	0.2	459	Marandi jt, 2019	Ca-HCO <sub>3</sub>	G3Ca-HCO <sub>3</sub> 0
6450	Seliste	50	502661.00, 6460964.00	8/10/1971	45.1	41.3	25.1		378	15.5	5.0						510	Marandi jt, 2019	Ca-HCO <sub>3</sub>	g3Ca-HCO <sub>3</sub> +
6555	Lemsi	115	499564.00, 6443713.00	4/08/1976	30.1	30.4	223.2		189	310.0	90.0						873	Marandi jt, 2019	Na-Cl	B2Na-Cl+
6556	Sääre	81.5	499205.00, 6444323.00	11/05/2016	48.4	40.2	192.5	13.3	166	377.7	64.3	5.9	1.0		0.53	<0.4	912	Savitskaja jt, 1996a; Marandi jt, 2019; Vaikmäe jt, 2020	Na-Cl	B2Na-Cl-
6566	Häädemeeste	105	529295.00, 6438480.00	16/05/2016	43.1	30.4	33.6	10.4	360	20.2	11.5	7.7	1.3	<0.05	<0.01	<0.1	523	Savitskaja jt, 1996	Mg-HCO <sub>3</sub>	g3Mg-HCO <sub>3</sub> +
6575	Kabli	140	524742.00, 6427745.00	11/03/2003	36.1	43.8	41.2		396	23.5	2.0		0.1		0.14	0.4	544	Marandi jt, 2019	Mg-HCO <sub>3</sub>	g3Mg-HCO <sub>3</sub> +
6578	Krundiküla	36.8	527793.00, 6432248.00	20/10/2014	32.9	32.3	28.8	8.5	366	9.9	0.0	7.3	2.6		0.13		489	EGK, 2014	Mg-HCO <sub>3</sub>	g3Mg-HCO <sub>3</sub> +
6616	Arumetsa	126	530761.00, 6436935.00	11/03/2003	34.1	29.2	57.5		366	11.0	4.0		0.8		0.45	0.5	504	Marandi jt, 2019	Mg-HCO <sub>3</sub>	g3Mg-HCO <sub>3</sub> +
6687	Uulu	55	533889.00, 6460868.00	11/03/2003	36.1	29.2	42.5		317	26.5	5.0						457	Marandi jt, 2019	Mg-HCO <sub>3</sub>	g3Mg-HCO <sub>3</sub> +

Kaarl Rudolf Tamm, Lõuna-Eesti ja Põhja-Läti Kesk-Alam-Devoni põhjaveekompleksi põhjavesi

6694	Leina	60	530332.00, 6453981.00	11/03/2003	44.1	21.9	61.8		256	88.2			0.6		0.43		473	Marandi jt, 2019	Mg-HCO <sub>3</sub>	F3Mg-HCO <sub>3</sub> +
6881	Elva	200	641966.00, 6455804.00	12/06/1996	40.1	35.8	16.4	11.0	330	5.3	4.7	11.5	0.4	<0.05	0.06	<0.1	456	Savitskaja jt, 1996	Mg-HCO <sub>3</sub>	g3Mg-HCO <sub>3</sub> +
6943	Kõpu	110	576340.00, 6465463.00	24/05/1965	68.1	23.1	4.6		269	24.2	20.0		0.1		0.20		409	Marandi jt, 2019	Ca-HCO <sub>3</sub>	g3Ca-HCO <sub>3</sub> 0
7040	Teilma	100	642257.00, 6472140.00		20.7	14.0	39.5	5.4	191.9	22.3	15	6.4	0.3		0.10	0.5	316	Marandi jt, 2019	Na-HCO <sub>3</sub>	g2Na-HCO <sub>3</sub> +
7073	Põlde	170	580276.00, 6443188.00		74.3	16.6	4.1	2.7	329.4	3.5	16.1	12.1	0.9		1.20	1.0	462	Marandi jt, 2019	Ca-HCO <sub>3</sub>	G3Ca-HCO <sub>3</sub> 0
7134	Vara	110	668133.00, 6489521.60	26/02/1981	34.1	23.1	5.3		214	8.1	5.0						289	Marandi jt, 2019	Mg-HCO <sub>3</sub>	g2Mg-HCO <sub>3</sub> 0
7350	Võnnu	205	679032.80, 6464619.10	10/06/1996	50.1	34.6	105.0	10.3	146	231.5	44.0	8.2	1.2	<0.05	0.02	<0.1	632	Savitskaja jt, 1996	Na-Cl	f2Na-Cl-
7568	Tammuru	43.3	543345.00, 6466188.00	20/10/2014	37.1	31.1	66.0	10.0	354	53.9	20.2	8.9	5.2		0.15		586	EGK, 2015	Mg-HCO <sub>3</sub>	F3Mg-HCO <sub>3</sub> +
7574	Pulgoja	17.1	529819.00, 6441027.00	20/10/2014	32.9	39.9	94.0	11.7	183	235.4	0.0	2.4	11.2				611	EGK, 2015	Na-Cl	f2Na-Cl-
7653	Saarde	170	556935.60, 6445006.60	20/10/2014	65.7	33.7	18.9	9.5	415	11.7	3.3	7.9	0.3		<0.07	<0.4	566	EGK, 2015	Ca-HCO <sub>3</sub>	g3Ca-HCO <sub>3</sub> +
7715	Ikla	150	521476.20, 6415299.10	3/02/1966	60.1	41.3	38.4		445	20.0	10.0		0.8				616	Marandi jt, 2019	Mg-HCO <sub>3</sub>	g3Mg-HCO <sub>3</sub> +
7768	Linaküla	115	499205.00, 6444323.00	11/05/2016	30.0	27.9	145.1		207	230.0	10.0		0.2				651	Marandi jt, 2019	Na-Cl	f2Na-Cl+
7769	Valga	100	456552.00, 6404955.00	10/06/2012	134.8	83.8	108.0	12.0	148	1011.5	36.2		0.1		0.00	1.5	1540	Vaikmäe jt, 2020; Marandi jt, 2019	Na-Cl	b2Na-Cl-
8513	Valga	230	622748.00, 6404839.00	10/06/1996	84.2	53.5	29.0	11.3	281	102.1	150.2		1.2		0.00		713	Savitskaja jt, 1996	Mg-HCO <sub>3</sub>	F3Mg-HCO <sub>3</sub> -
8570	Põlva	300	681646.00, 6439205.00	3/06/1996	126.3	40.1	93.4	12.1	146	153.2	372.0		2.0		0.00		946	Savitskaja jt, 1996	Ca-SO <sub>4</sub>	f2Ca-SO <sub>4</sub> +
8574	Põlva	300	679976.00, 6438157.00	3/06/1996	112.2	36.5	88.8	11.4	140	143.9	313.2	8.5	1.3	<0.05	<0.01	<0.1	857	Savitskaja jt, 1996	Ca-SO <sub>4</sub>	F2Ca-SO <sub>4</sub> +
8705	Tõrva	260	614745.00, 6429751.00	12/06/1996	39.1	21.3	34.3	7.5	214	43.6	24.0	10.7	1.0	<0.05	0.01	<0.1	397	Savitskaja jt, 1996	Na-HCO <sub>3</sub>	F2Na-HCO <sub>3</sub> +
10799	Ikla	162	522767.00, 6415189.00	11/03/2003	60.1	42.5	7.0		397	9.5	0.5		0.1		1.00	0.2	517	Marandi jt, 2019	Mg-HCO <sub>3</sub>	g3Mg-HCO <sub>3</sub> 0
11050	Põlva	300	681925.00, 6440501.00		104.0	35.0	79.0	12.0	140	140	350						860	Marandi jt, 2019	Ca-SO <sub>4</sub>	F2Ca-SO <sub>4</sub> 0
12936	Ruhnu	41	456531.00, 6406647.00		92.2	60.8	27.2		585.8	28.5	14		3.6		1.30	0.5	814	Marandi jt, 2019	Mg-HCO <sub>3</sub>	g4Mg-HCO <sub>3</sub> 0
14282	Tõrva	275	612664.00, 6430343.00		23.0	14.4	59.1	9.3	160.7	53.2	53.1	6.1	0.2		0.10	0.4	380	Marandi jt, 2019	Na-HCO <sub>3</sub>	F2Na-HCO <sub>3</sub> +

## Kaarl Rudolf Tamm, Lõuna-Eesti ja Põhja-Läti Kesk-Alam-Devoni põhjaveekompleksi põhjavesi

15000	Kolkja	90	687026.00, 6494307.00		56.7	28.6	3.5	6.0	336.7	6	3.3	7	1.4		0.10	0.7	450	Marandi jt, 2019	Ca-HCO <sub>3</sub>	g3Ca-HCO <sub>3</sub> 0
18124	Auvere	8.9	722179.00, 6576723.00		96.8	30.9	15.0	10.0	378.3	41.8	52.7	6.5	6.9		0.10	0.4	639	Marandi jt, 2019	Ca-HCO <sub>3</sub>	F3Ca-HCO <sub>3</sub> 0
19222	Elva	200	641972.00, 6456322.00		46.1	34.7	17.0	13.0	360	3.5	4.7						479	Marandi jt, 2019	Mg-HCO <sub>3</sub>	G3Mg-HCO <sub>3</sub> +
19511	Auvere	20.8	725705.00, 6577868.00		39.5	21.5	66.8	7.6	357.2	34.9	5.5	8.2	0.7		0.20	0.4	543	Marandi jt, 2019	Na-HCO <sub>3</sub>	F3Na-HCO <sub>3</sub> +
20267	Räni	150	656127.00, 6471688.00		79.0	34.5	4.0	4.0	414.9	10.3	14.8	8.3	1.2		0.20	0.4	572	Marandi jt, 2019	Ca-HCO <sub>3</sub>	g3Ca-HCO <sub>3</sub> 0
20321	Lohkva	135	664240.00, 6472670.00		43.0	31.0	32.7		344.8	11	9		0.5		0.20	0.1	472	Marandi jt, 2019	Na-HCO <sub>3</sub>	g3Na-HCO <sub>3</sub> +
20387	Kodavere	80	681467.00, 6511767.00		79.2	27.2	3.0	1.2	366	10.3	6	9	0.1		0.10	0.4	503	Marandi jt, 2019	Ca-HCO <sub>3</sub>	g3Ca-HCO <sub>3</sub> 0
20708	Ruhnu	33	681586.00, 6475577.00		32.8	33.6	22.6		285.9	12.5	12.1		0.1		0.10	0.3	400	Marandi jt, 2019	Na-HCO <sub>3</sub>	g3Na-HCO <sub>3</sub> +
20718	Kavastu	127	681586.00, 6475577.00		23.4	17.9	45.0	8.7	213.6	37.9	15.6	6.8	0.3		0.10	0.4	370	Marandi jt, 2019	Mg-HCO <sub>3</sub>	F2Mg-HCO <sub>3</sub> +
20743	Vallapalu	140	627786.00, 6458804.00		40.5	27.8	22.8		311.2	3.3	7		0.7		0.20	0.1	414	Marandi jt, 2019	Mg-HCO <sub>3</sub>	G3Mg-HCO <sub>3</sub> +
20812	Linaküla	60	498303.00, 6444831.00		34.1	36.5	174.5		183	333	2		0.9		1.90	0.4	766	Marandi jt, 2019	Na-Cl	B2Na-Cl-
20850	Lemsi	66	500423.00, 6443196.00		22.0	17.0	118.8		213.5	149	2		0.5		1.10	0.4	524	Marandi jt, 2019	Na-Cl	F2Na-Cl+
20866	Kakumetsa	135	666279.00, 6473203.00		54.1	45.2	24.4		445.4	7	2		0.2		0.20	0.1	579	Marandi jt, 2019	Mg-HCO <sub>3</sub>	g3Mg-HCO <sub>3</sub> +
20954	Kuningaküla	22	715188.00, 6569874.00		22.0	15.6	57.7		256	21	5.8		0.4		1.00	0.6	380	Marandi jt, 2019	Na-HCO <sub>3</sub>	g3Na-HCO <sub>3</sub> +
21000	Lemmatsi	176	654720.00, 6468690.00		86.2	30.4	17.0		439.3	5	6.7		0.8		0.50	0.5	586	Marandi jt, 2019	Ca-HCO <sub>3</sub>	G3Ca-HCO <sub>3</sub> +
21189	Vorbuse	87	656235.00, 6478783.00		26.5	19.3	28.0	7.0	231.9	12.4	6.4	9.8	0.1		0.10	0.4	342	Marandi jt, 2019	Mg-HCO <sub>3</sub>	g2Mg-HCO <sub>3</sub> +
21402	Vorbuse	70	653925.00, 6480116.00		79.0	33.5	4.1	7.4	423	2.4	2.8		1.3		0.10	0.5	554	Marandi jt, 2019	Ca-HCO <sub>3</sub>	G3Ca-HCO <sub>3</sub> 0
21477	Laane	105	574236.00, 6468108.00		56.5	30.6	13.8	6.1	359.9	10.3	3.3	9	0.1		0.10	0.5	490	Marandi jt, 2019	Ca-HCO <sub>3</sub>	g3Ca-HCO <sub>3</sub> +
21544	Arumetsa	126	530415.00, 6436045.00		36.1	32.8	44.0		372.2	13	1		1.5		0.30	0.4	501	Marandi jt, 2019	Mg-HCO <sub>3</sub>	g3Mg-HCO <sub>3</sub> +
21690	Kokanurga	90	672945.00, 6511270.00		60.3	23.6	4.0	3.0	329.5	3.5	3.3	12	0.4		0.10	0.4	440	Marandi jt, 2019	Ca-HCO <sub>3</sub>	G3Ca-HCO <sub>3</sub> 0
21722	Saarjärve	80	660555.00, 6506552.00		66.3	42.6	12.6	3.5	366	23.7	49.4		1.6		0.10	0.4	566	Marandi jt, 2019	Mg-HCO <sub>3</sub>	g3Mg-HCO <sub>3</sub> 0
22573	Räni	130	655257.00, 6470332.00		79.0	33.5	31.9		451.5	25	2.8		1.4		0.40	0.2	626	Marandi jt, 2019	Ca-HCO <sub>3</sub>	g3Ca-HCO <sub>3</sub> +

Kaarl Rudolf Tamm, Lõuna-Eesti ja Põhja-Läti Kesk-Alam-Devoni põhjaveekompleksi põhjavesi

22620	Saadjärve	60	655168.00, 6492933.00		64.3	32.0	6.0	6.0	366.1	9.6	16		0.9		0.10	0.4	501	Marandi jt, 2019	Ca-HCO <sub>3</sub>	g3Ca-HCO <sub>3</sub> 0
22815	Kõduküla	31	647626.00, 6493937.00		100.6	21.9	6.0	2.5	341.6	27.7	50.2		0.5		0.10	0.4	552	Marandi jt, 2019	Ca-HCO <sub>3</sub>	g3Ca-HCO <sub>3</sub> 0
23204	Sääritsa	60	677945.00, 6516368.00		20.4	24.3	62.1		306.4	25	3.6		0.9		0.50	0.2	443	Marandi jt, 2019	Na-HCO <sub>3</sub>	g3Na-HCO <sub>3</sub> +
23440	Leina	63	531096.00, 6454803.00		42.1	23.1	56.4	11.3	274.5	76.6	3.3		2.2		0.10	0.4	490	Marandi jt, 2019	Ca-HCO <sub>3</sub>	F3Ca-HCO <sub>3</sub> +
23628	Lemsi	72	500308.00, 6443184.00		22.0	31.6	85.3		189.1	154.6	2		0.7		1.00	0.1	486	Marandi jt, 2019	Na-Cl	f2Na-Cl0
23708	Metsäääre	50.3	540829.04, 6458772.53		28.1	36.5	42.6		292.8	51	2		0.4		0.20	0.1	454	Marandi jt, 2019	Mg-HCO <sub>3</sub>	F3Mg-HCO <sub>3</sub> +
24031	Auvere	5.2	722539.00, 6577745.00		78.2	53.9	14.6	15.8	506.5	18.4	40.3		0.1		0.10	4.1	732	Marandi jt, 2019	Mg-HCO <sub>3</sub>	g4Mg-HCO <sub>3</sub> +
24032	Auvere	5	722483.00, 6577935.00		90.8	58.1	20.6	14.4	427	15.2	122.6		0.1		0.10	22.6	772	Marandi jt, 2019	Mg-HCO <sub>3</sub>	g3Mg-HCO <sub>3</sub> +
24050	Arumetsa	123	530714.00, 6435714.00		46.0	36.5	21.6		384	4	0.4		3.6		0.30	0.1	497	Marandi jt, 2019	Mg-HCO <sub>3</sub>	G3Mg-HCO <sub>3</sub> +
24281	Sääre	60	500216.00, 6445880.00		48.1	51.7	247.1		192.2	511	0.1		1.2		1.90	0.0	1053	Marandi jt, 2019	Na-Cl	B2Na-Cl-
24455	Lohkva	135	663162.00, 6473026.00		24.0	21.3	20.0		201.4	18	14		0.8		0.20	0.5	300	Marandi jt, 2019	Mg-HCO <sub>3</sub>	g2Mg-HCO <sub>3</sub> 0
24868	Ristiküla	81	545509.00, 6450315.00		37.5	25.2	28.3	10.0	299	34.4	3.3		1.8		0.20	0.4	440	Marandi jt, 2019	Mg-HCO <sub>3</sub>	F3Mg-HCO <sub>3</sub> +
25014	Rannametsa	92	529281.00, 6442426.00		33.7	22.2	73.8	10.0	292.8	77.6	3.3		0.5		0.10	0.4	514	Marandi jt, 2019	Na-HCO <sub>3</sub>	F3Na-HCO <sub>3</sub> +
25081	Laadi	54	535377.00, 6457551.00		36.1	21.3	55.0	9.0	305.1	37.2	9.9		0.6		0.20	0.4	479	Marandi jt, 2019	Na-HCO <sub>3</sub>	F3Na-HCO <sub>3</sub> +
25113	Halliku	66	670140.00, 6510393.00		66.5	25.9	3.2	5.7	341.6	6.7	3.3		0.5		0.10	0.4	454	Marandi jt, 2019	Ca-HCO <sub>3</sub>	g3Ca-HCO <sub>3</sub> 0
25117	Valma	71	613423.00, 6468374.00		22.8	15.7	45.0	8.5	244	8.5	27.2		0.1		0.30	0.4	373	Marandi jt, 2019	Na-HCO <sub>3</sub>	g2Na-HCO <sub>3</sub> +
25126	Leina	62	531157.00, 6454589.00		19.8	8.9	23.8	5.0	146.1	8.5	4		0.6		0.10	0.4	217	Marandi jt, 2019	Ca-HCO <sub>3</sub>	g2Ca-HCO <sub>3</sub> +
25127	Piirumi	76	528567.00, 6447298.00		36.7	24.1	69.2	10.7	225.7	111.3	4		0.5		0.20	0.4	483	Marandi jt, 2019	Na-HCO <sub>3</sub>	F2Na-HCO <sub>3</sub> +
25133	Metsküla	84	582643.00, 6474772.00		70.3	24.7	4.7	4.4	335.5	8.5	14		0.3		0.10	0.4	463	Marandi jt, 2019	Ca-HCO <sub>3</sub>	g3Ca-HCO <sub>3</sub> 0
25275	Kokanurga	81	673812.00, 6511365.00		45.3	27.5	3.5	5.3	305.1	8.5	3.3	9.4	0.2		0.10	0.4	409	Marandi jt, 2019	Mg-HCO <sub>3</sub>	g3Mg-HCO <sub>3</sub> 0



Kaarl Rudolf Tamm, Lõuna-Eesti ja Põhja-Läti Kesk-Alam-Devoni põhjaveekompleksi põhjavesi

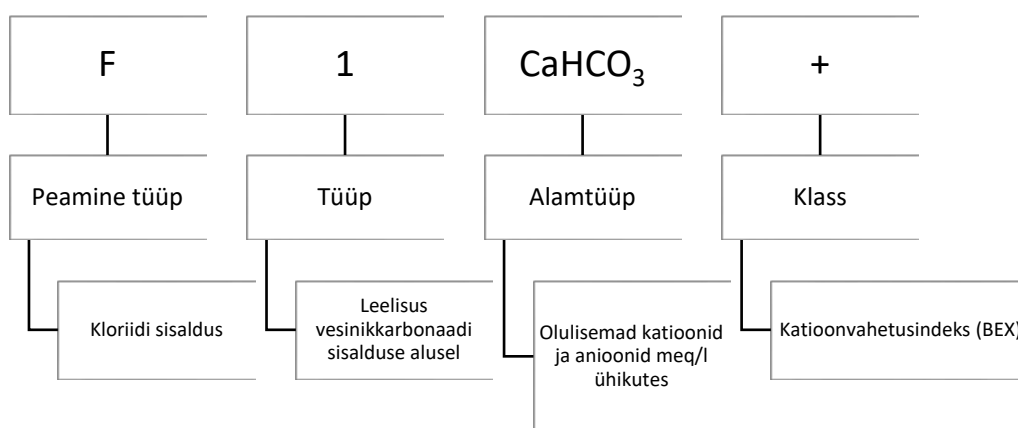
25431	Jõusa	74	662107.00, 6492099.00		46.7	34.3	12.1	10.0	353.8	5	3.3		1.1		0.10	0.4	467	Marandi jt, 2019	Mg-HCO <sub>3</sub>	G3Mg-HCO <sub>3</sub> +
25442	Kalda	86	545428.00, 6450641.00		41.3	33.8	35.0	8.7	372.2	20.2	3.3		0.1		0.50	0.4	516	Marandi jt, 2019	Mg-HCO <sub>3</sub>	g3Mg-HCO <sub>3</sub> +
25553	Kolkja	81	687068.00, 6495032.00		53.3	26.0	3.8		319	2.5	1.7		0.5		0.10	1.5	408	Marandi jt, 2019	Ca-HCO <sub>3</sub>	G3Ca-HCO <sub>3</sub> 0
25749	Lemsi	73.5	499754.00, 6442829.00		21.0	30.0	83.5		189	145	1.5		0.6		0.70	0.1	471	Marandi jt, 2019	Na-Cl	F2Na-Cl0
25841	Rootsiküla	69	498959.00, 6440750.00		20.0	23.0	99.8		180	153	1.5		0.5		0.70	0.1	479	Marandi jt, 2019	Na-Cl	f2Na-Cl+
25889	Sääre	63.5	499518.00, 6444684.00		36.5	31.0	157.9		179	296	1.4		0.5		1.20	0.1	704	Marandi jt, 2019	Na-Cl	f2Na-Cl0
25961	Laadi	43	535845.00, 6461695.00		32.7	19.8	67.8	9.5	263.2	52.8	3.3		0.1		0.10	0.5	450	Marandi jt, 2019	Na-HCO <sub>3</sub>	F3Na-HCO <sub>3</sub> +
26019	Rootsiküla	71.8	499430.00, 6442062.00		22.0	17.0	111.2		204	142	2		0.5		0.60	0.1	500	Marandi jt, 2019	Na-Cl	F2Na-Cl+
26020	Sääre	64	499827.00, 6444942.00		40.0	42.5	176.9		182	366	2		0.8		2.20	0.1	813	Marandi jt, 2019	Na-Cl	B2Na-Cl-
26021	Sääre	62.5	500469.00, 6445021.00		38.0	36.0	157.5		190	311	2		0.6		3.40	0.1	739	Marandi jt, 2019	Na-Cl	B2Na-Cl-
26026	Reiu	42.5	535191.00, 6461382.00		28.9	14.6	68.7	7.0	256.2	59.2	3.3		0.2		0.10	0.4	439	Marandi jt, 2019	Na-HCO <sub>3</sub>	F3Na-HCO <sub>3</sub> +
26070	Rootsiküla	70	499192.00, 6442261.00		21.0	24.0	97.2		205	139	1.2		0.5		0.50	0.1	489	Marandi jt, 2019	Na-Cl	F2Na-Cl+
30418	Tahkuranna	65	528466.00, 6456337.00		30.1	35.1	28.2		244	58.1	2		1.0		0.30	0.1	399	Marandi jt, 2019	Mg-HCO <sub>3</sub>	F2Mg-HCO <sub>3</sub> 0
30691	Auvere	24	721741.00, 6576439.00		37.5	18.1	58.4		297.1	34	5		0.4		0.30	0.2	451	Marandi jt, 2019	Na-HCO <sub>3</sub>	F3Na-HCO <sub>3</sub> +
52955	Kobruvere	81	584288.00, 6481300.00	15/10/2014	60.7	27.2	10.1	7.0	367	1.9	6.9		0.1		0.28	<1	482	Marandi jt, 2019	Ca-HCO <sub>3</sub>	G3Ca-HCO <sub>3</sub> +
1489 LV	Inčukalns	365	539055.70, 6331259.60	17/06/2011	256.3	87.9	734.2	21.3	110	1496.0	428						3134	Babre jt, 2016	Na-Cl	b1Na-Cl-
1506 LV	Baldone	424	524571.64, 6289342.19	15/09/2012	933.0	237.0	1330.0	35.0	73	3022.0	1615.0						7245	Babre jt, 2016	Na-Cl	b1Na-Cl-
50191 LV		816.8	539056.31, 6327479.03	23/05/2012	1329.8	454.9	4362.9	49.7	89	9762.0	656						16704	Babre jt, 2016	Na-Cl	b1Na-Cl-
50199 LV	Jürmala, Vaivari	400	479329.13, 6312795.97	21/03/2012	550.3	205.6	924.0	41.5	35	2813.0	831.9						5401	Babre jt, 2016	Na-Cl	b0Na-Cl-
50203 LV	Jürmala, Dzintari	507.5	489607.12, 6315305.16	24/03/2012	971.8	318.8	2948.6	56.1	10	6685.0	437						11428	Babre jt, 2016	Na-Cl	b0Na-Cl-

Kaarl Rudolf Tamm, Lõuna-Eesti ja Põhja-Läti Kesk-Alam-Devoni põhjaveekompleksi põhjavesi

50344 LV		330.3	439160.78, 6361095.63	20/03/2012	56.7	36.6	6.8	6.8	374	6.6	18.2						506	Babre jt, 2016	Ca-HCO <sub>3</sub>	g3Ca-HCO <sub>3</sub> 0
50442 LV	Mangali-3	435	507878.15, 6319801.57	20/02/2015	588.0	219.0	1510.0	56.3		3870.0	489.0						6744	Vaikmäe jt, 2020	Na-Cl	b0Na-Cl-
6698 LV	Salacgrīva	192.9	520978.00, 6401915.00	20/12/2010	29.3	23.1	67.6	11.7	343	41.4	3.7						520	Babre jt, 2016	Na-HCO <sub>3</sub>	F3Na-HCO <sub>3</sub> +
6700 LV	Salacgrīva	220	521045.57, 6402080.89	5/06/2012	39.1	25.2	63.7	12.5	345	40.1	3.8						530	Babre jt, 2016	Mg-HCO <sub>3</sub>	F3Mg-HCO <sub>3</sub> +
9635 LV	Aloja	265	548769.64, 6403504.86	10/06/2011	71.9	22.0	6.1	5.0	346	2.8	1.9						456	Babre jt, 2016	Ca-HCO <sub>3</sub>	G3Ca-HCO <sub>3</sub> 0
9639 LV	Rencēni (Seda)	260	584789.52, 6405873.54	20/10/2017	23.8	14.2	49.2	8.9	151	56.2	11.7						315	Babre jt, 2016	Na-HCO <sub>3</sub>	F2Na-HCO <sub>3</sub> +

### 3.2 Põhjavee keemiliste tüüpide määramise meetodika

Põhjaveetüüpide arvutamiseks on eri meetodikaid, millest üks põhjalikumaid on Pieter Jan Stuyfzandi 1986. aastal loodud meetodika (Stuyfzand, 1986, 1989, 1993). Stuyfzandi meetodikaga määratud põhjavee tüüp annab lisaks selle makrokomponentide vahekorrale infot ka vee mineraalsuse, leelisuse ja selle kujunemist mõjutanud katioonvahetuse protsesside kohta. Meetodika ühendab loogilises järjestuses neli olulist põhjavee kvaliteeti kirjeldavat aspekti: mineraalsus (kloriidi sisalduse alusel), leelisus (vesinikkarbonaadi sisalduse alusel), põhjavees enimesinevad katioonid ja anioonid ning katioonvahetuse indeks ehk BEX (Stuyfzand, 1993). Viimane kirjeldab katioonvahetuse protsessi toimumist või mittetoimumist antud põhjaveeproovi kujunemisel ja tüüpi (magestumine või sooldumine). Näitena saab tuua veetüübi, mille välja uurimiseks on tuginetud kriteeriumitele ning lõplik veetüüp on kirjutatud kui F1CaHCO<sub>3</sub>+. Sellist põhjavett saab kirjeldada kui "mage keskmisest väiksema leelisusega Ca-HCO<sub>3</sub> tüüpi põhjavesi, mille kujunemist on mõjutanud magestumise tüüpi katioonvahetuse protsessid" (Stuyfzand, 1993). Allpool kirjeldatakse põhjaveetüübi nelja komponendi määramist täpsemalt joonisel 4.



**Joonis 4.** Stuyfzandi veetüüpide hüdrokeemilise klassifikatsiooni meetodika (Stuyfzand 1993 põhjal).

Esimene kriteerium lõpliku veetüübi määramisel on "peamine tüüp" (inglise keeles *main type*). Peamist tüüpi hinnatakse kloriidi sisalduse põhjal, mille aluseks on Stuyfzand (1993) loodud liigitus. Tähistused on toodud välja tabelis 2.

**Tabel 2.** Stuyfzandi peamiste tüüpide jaotus kloriidi kontsentratsiooni alusel.

Peamine tüüp	Tähistus	Cl <sup>-</sup>	
		meq/l	mg/l
väga väikese soolsusega ( <i>oligohaline</i> )	G	< 0,141	0 – 5
väikese soolsusega ( <i>oligohaline-fresh</i> )	g	0,141 – 0,846	5 – 30
mage ( <i>fresh</i> )	F	0,846 – 4,231	30 – 150
mage-riimveeline ( <i>fresh-brackish</i> )	f	4,231 – 8,462	150 – 300
riimveeline ( <i>brackish</i> )	B	8,462 – 28,206	300 – 1000
riimveeline-soolane ( <i>brackish-salt</i> )	b	28,206 – 282,064	1000 – 10 000
soolane ( <i>salt</i> )	S	282,064 – 564,127	10 000 – 20 000
väga soolane ( <i>hyperhaline</i> )	H	> 564,127	> 20 000

Teine kriteerium lõpliku veetüübi määramisel on “tüüp” (inglise keeles *type*). Tüüpi määratakse leelisuse baasil, mis väljendab kaudselt põhjavee karedust. Selle tüübi puhul arvestatakse hüdrokeemilises analüüsis HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> sisaldusega mg-ekv/l ühikutes ning selle põhjal märgitakse ära tabelis välja toodud numbriga või tärniga. Aluselisus ehk leelisus on määratletud tugeva happe kogusena, mida tuleb vette lisada, et selle pH langeks väärtuseni 4,5 (Stuyfzand, 1989). Tähistused on välja toodud tabelis 3.

**Tabel 3.** Stuyfzandi veetüübi põhitüüpide jaotus leelisuse alusel.

Tüüp	Leelisus ( $\text{HCO}_3^-$ )		Tähistus
	meq/l	mg/l	
väga väike	< ½	< 31	*
väike	½ – 1	31 – 61	0
keskmisest väiksem	1 – 2	61 – 122	1
keskmine	2 – 4	122 – 244	2
keskmisest suurem	4 – 8	244 – 488	3
suur	8 – 16	488 – 976	4
väga suur	16 – 32	976 – 1953	5
üsna äärmuslik	32 – 64	1953 – 3905	6
äärmuslik	> 64	> 3905	7

Kolmas kriteerium lõpliku veetüübi määramisel on “alamtüüp” (inglise keeles *subtype*). Alamtüüp määratakse kõige suurema sisaldusega peamise katiooni ja aniooni kombineerimisel saadud keemilise valemi tulemusel. Keemiline valem näitab ära vees kõige rohkem esinevaid ioone (Stuyfzand, 1993). Andmestik on veeproovidel olemas katioonid, mis on kõik meq/l väärtustes. Võttes näiteks kation  $\text{Ca}^{2+}$ , siis selle sai välja arvatud valemiga:

$$\frac{\text{Ca (meq/L)}}{\text{Ca} + \text{Mg} + \text{Na} + \text{K (meq/L)}} * 100\%$$

Valemiga arvutatakse välja veetüübi peamise katiooni protsentuaalne väärtus. Kation jagatakse kationide summaga ning korrutatakse 100%. Sama valemit rakendatakse ka kationide  $\text{Mg}^+$ ,  $\text{Na}^+$  ja  $\text{K}^+$  puhul. Anioonide puhul kehtib sama valem, kuid anioon ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ) jagatakse anioonide summaga. Selle abil saab välja selgitada nii peamise põhjavees esineva katiooni kui ka aniooni. Kationide ja anioonide kõige suuremat protsentuaalset väärtust loeti määravaks alamtüübi leidmisel. Samuti oli tähtis jälgida, et millise kahe katiooni summa on protsentuaalselt suurem: kas kationide  $\text{Ca}^+$  ja  $\text{Mg}^+$  või kationide  $\text{Na}^+$  ja  $\text{K}^+$  protsentuaalne summa, sest nende kationide summade kõrgem protsentuaalne summa oli veetüübi nimetamisel määrav tegur.

Neljas kriteerium lõpliku veetüübi määramisel on “klass” (inglise keeles *class*). Klass märgib ära, et kas nimetatud põhjavesi on mõjutatud kationvahetuse protsessidest või mitte. Klasse on kolm liiki: 0 (null), + (pluss) või – (miinus). Klassi määramine toimub kationvahetusindeksi baasil (tähistatakse BEX, inglise keeles *base exchange index*) ning väärtused väljendatakse meq/l. Klassi tähistatakse 0 (null), kui indeksi väärtus on -0,5 ja 0,5 vahel; tähistatakse – (miinus), kui indeksi väärtus on suurem kui -0,5, ja tähistatakse + (pluss), kui indeksi väärtus on suurem kui 0,5.

Kationvahetuse indeksi välja arvutamine võtab arvesse naatriumi, kaaliumi, magneesiumi ja kloori ionide sisaldusi põhjavees ja nende omavahelist vahekorda. Stuyfzandi meetodika järgi arvutatakse BEX välja summeerides naatriumi, kaaliumi ja magneesiumi väärtused ning jagades kloori väärtusega.

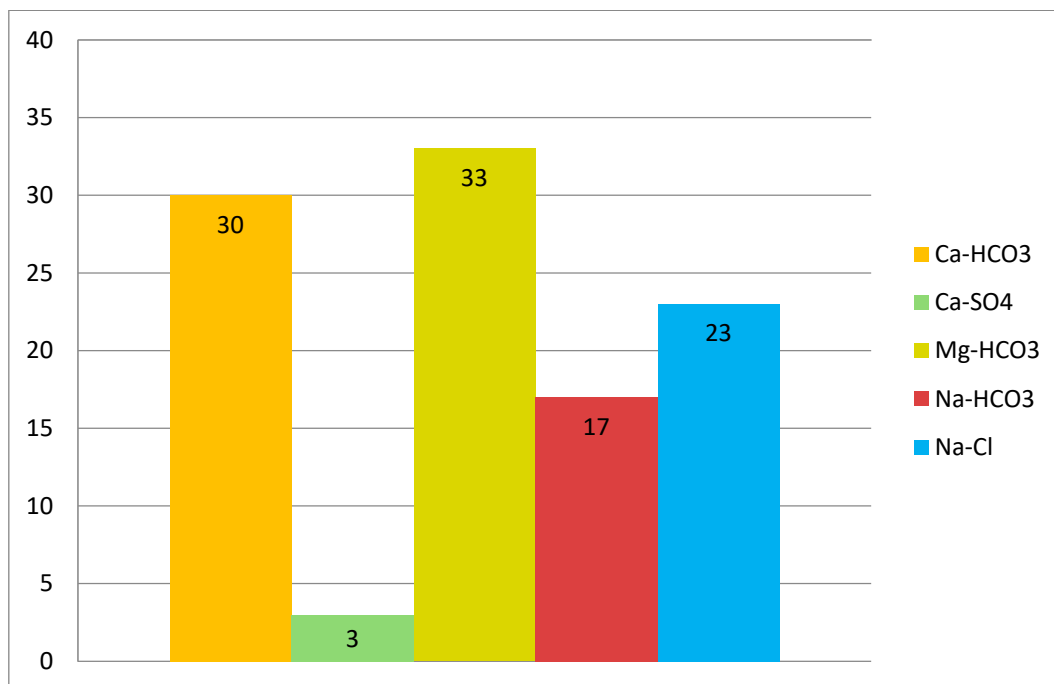
Pärast seda lahutatakse koefitsendi ja kloori väärtuse korrutis ning saadakse lõpptulemus. BEXi arvutades väljendatakse kõiki väärtusi meq/l. Koefitsient 1,0716 võrdub keskmise  $\frac{(Na+K+Mg)}{Cl}$  suhte väärtusega merevees ühikutes meq/L (Stuyfzand, 1993). Dolomiiti sisaldavate veekihtide puhul on katioonvahetusindeksi valem (Stuyfzand, 2008) järgmine:

$$BEX = \frac{(Na + K)}{Cl} - 0,8768 * Cl^{-}$$

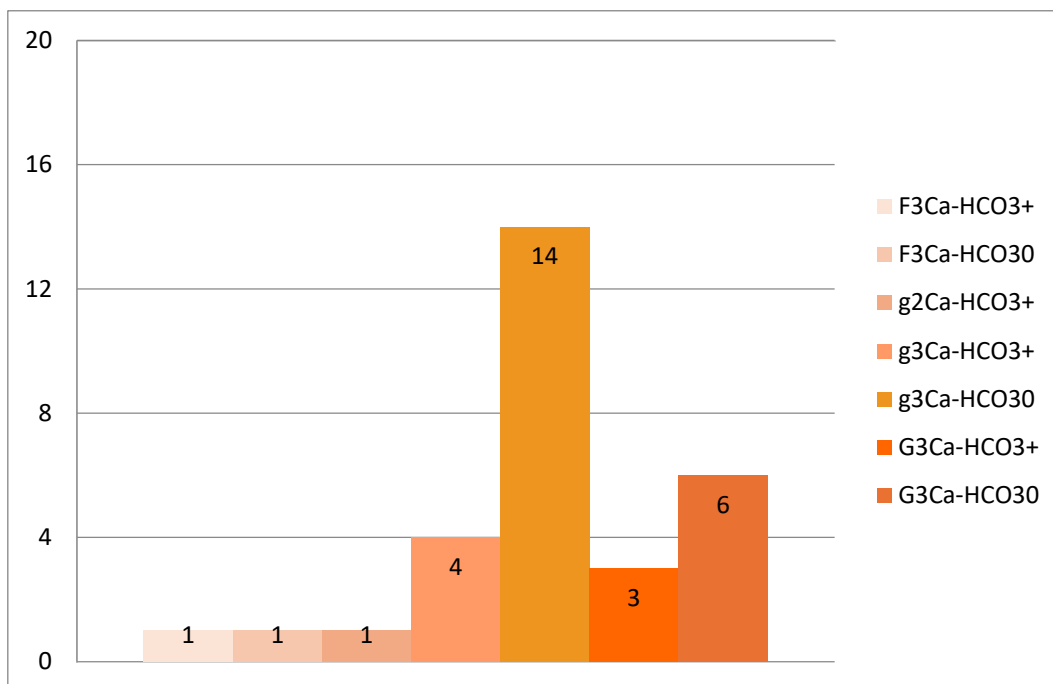
## 4. Tulemused ja arutelu

### 4.1 Erinevate põhjaveetüüpide esinemine Kesk-Alam-Devoni põhjaveekompleksis

Kesk-Alam-Devoni põhjaveekompleksi põhjavee keemiline koostis on väga mitmepalgeline, mida näitab väga erinevate vee keemiliste tüüpide esinemine üle kogu põhjaveekompleksi ala. Veetüüpide leviku sageduse tulemused on kajastatud joonisel 5.



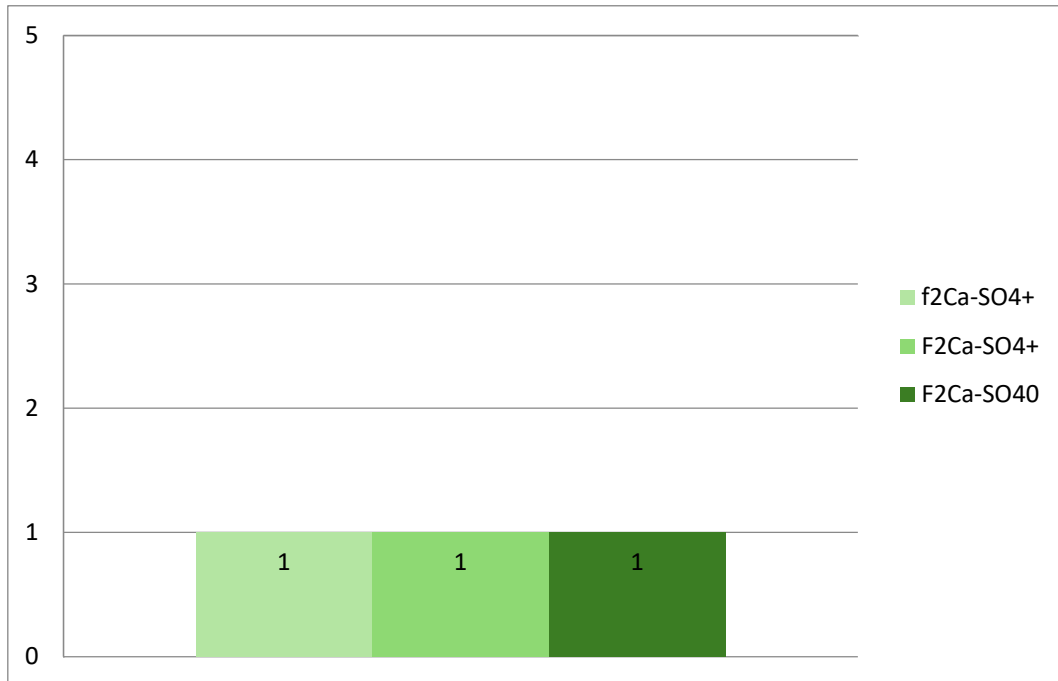
Joonis 5. Põhjaveekompleksis levivate üldiste veetüüpide sageduse graafik.



**Joonis 6.** Ca-HCO<sub>3</sub> veetüübi erinevate liikide esinemissageduse graafik.

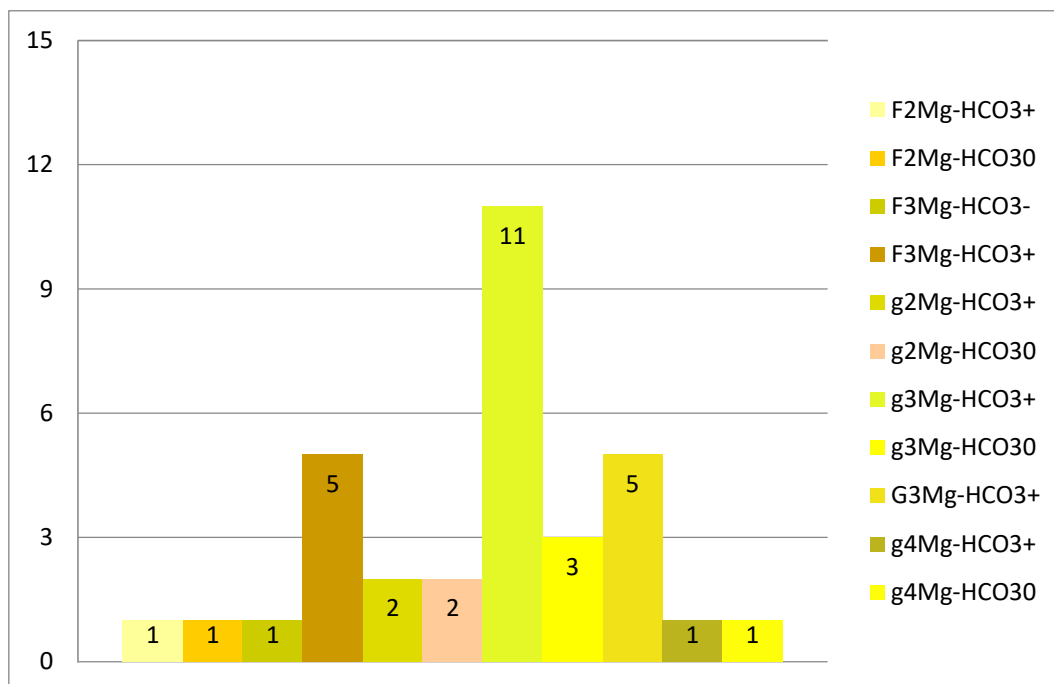
Valimis olnud veeproovidest 30 kuuluvad üldise veetüübi Ca-HCO<sub>3</sub> alla ja seda on Stuyfzandi veetüüpide klassifikatsiooni järgi põhjaveekompleksis kokku 7 erinevat liiki. Ca-HCO<sub>3</sub> alamtüübiga seotud erinevate liiki vee esinemissagedus on kajastatud joonisel 6. Enamlevinud liigiks on väikese soolsuse keskmisest suurema karedusega katioonvahetusest mõjutamata Ca-HCO<sub>3</sub> tüüpi vesi (g3Ca-HCO<sub>3</sub>0). Koos sellele väga sarnase veetüübiga G3Ca-HCO<sub>3</sub>0, mis erineb eelmisest vaid veelgi väiksema kloriidi sisalduse pooltest, moodustavad need kaks 66% kõigist Ca-HCO<sub>3</sub>-tüüpi vetest. Ülejäänud veetüübid erinevad kas suurema kloriidi sisalduse (täht F) või positiivse katioonvahetuse indeksi pooltest („+“).





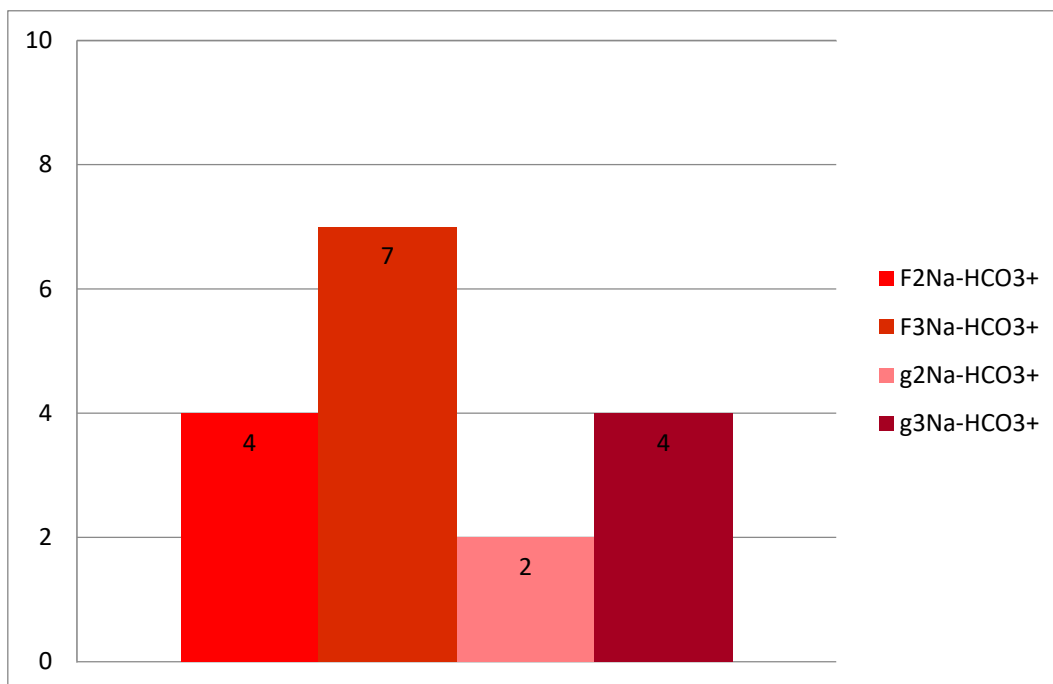
**Joonis 7.** Ca-SO<sub>4</sub> veetüübi erinevate liikide esinemissageduse graafik.

Valimis olnud veeproovidest 3 kuuluvad üldise veetüübi Ca-SO<sub>4</sub> alla ja seda on Stuyfzandi veetüüpide klassifikatsiooni järgi põhjaveekompleksis kokku 3 erinevat liiki. Ca-SO<sub>4</sub> alamtüübiga seotud erinevat liiki vee esinemissagedus on kajastatud joonisel 7. Põhjaveekompleksis esinev Ca-SO<sub>4</sub> tüüpi põhjavesi ei ole laialdaselt levinud (esinatud vaid 3 prooviga) ja selle erinevad liigid on omavahel väga sarnased (erinevused kloriidi ja kationvahetusindeksi väärtustes). Seetõttu käsitletakse neid ülejäänud töös koos üldise veetüübina tegemata vahet üksikute liikide vahel.



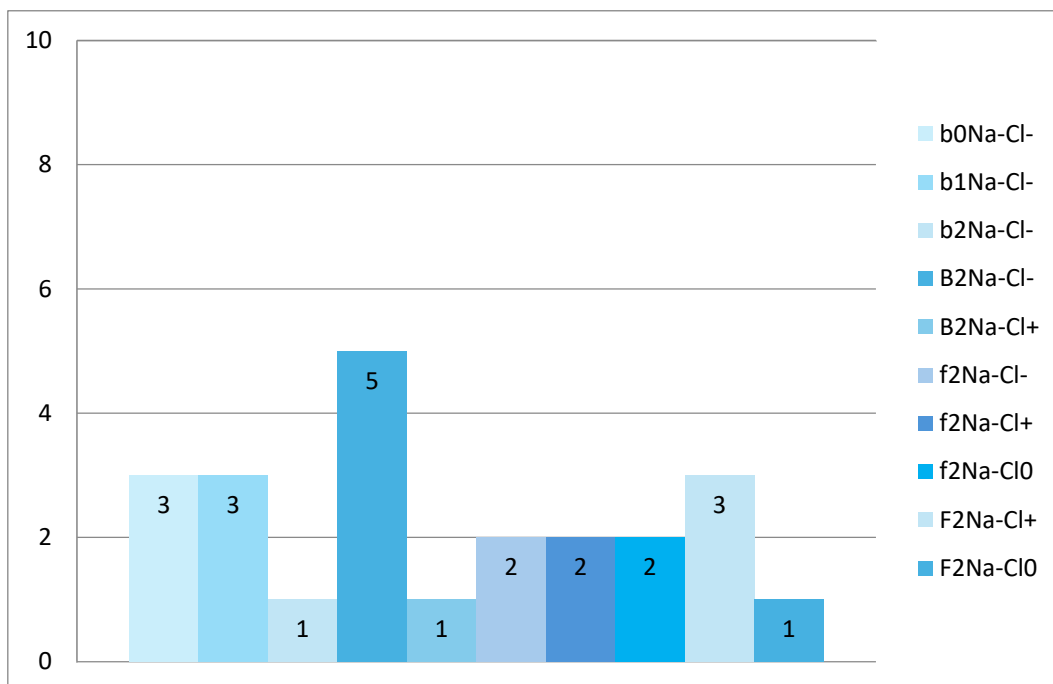
**Joonis 8.** Mg-HCO<sub>3</sub> veetüübi erinevate liikide esinemissageduse graafik.

Valimis olnud veeproovidest 33 kuuluvad üldise veetüübi Mg-HCO<sub>3</sub> alla ja seda on Stuyfzandi veetüüpide klassifikatsiooni järgi põhjaveekompleksis kokku 11 erinevat liiki. Tegu on kõige heterogeensema veetüübiga Kesk-Alam-Devoni põhjaveekompleksis. Mg-HCO<sub>3</sub> alamtüübiga seotud erinevat liiki vee esinemissagedus on kajastatud joonisel 8. Enamlevinud liigiks on väikese soolsusega keskmisest suurema karedusega magestumise tüüpi kationvahetusest mõjutatud Mg-HCO<sub>3</sub> vesi (g3Mg-HCO<sub>3</sub>+). Koos sellele väga sarnase veetüübiga G3Mg-HCO<sub>3</sub>+ ja F3MgHCO<sub>3</sub>+, mis erinevad eelmisest vaid vastavalt väiksema ja suurema kloriidi sisalduse poolest, moodustavad need kaks veetüüpi 64% kõigist Mg-HCO<sub>3</sub>-tüüpi vetest. Mitmed ülejäänud veetüübid erinevad üldiselt kas suurema kloriidi sisalduse (tähistused F või g), leelisuse (tähised 2 või 4) poolest või seetõttu, et ei ole kationvahetusest mõjutatud (tähis 0). Kationvahetusest mõjutamata Mg-HCO<sub>3</sub> tüüpi vesi moodustab valimis kõigist sellise üldise veetüübiga põhjaveest 21%.



**Joonis 9.** Na-HCO<sub>3</sub> veetüübi erinevate liikide esinemissageduse graafik.

Valimis olnud veeproovidest 17 kuuluvad üldise veetüübi Na-HCO<sub>3</sub> alla ja seda on Stuyfzandi veetüüpide klassifikatsiooni järgi põhjaveekompleksis kokku 4 erinevat liiki. Na-HCO<sub>3</sub> alamtüübiga seotud erinevat liiki vee lesinemissagedus on kajastatud joonisel 9. Kõik erinevad liigid on üksteisele väga sarnased olles positiivse kationvahetuse indeksiga. Enamlevinud liigiks on mage keskmise või keskmisest suurema karedusega magestumise tüüpi kationvahetusest mõjutatud Na-HCO<sub>3</sub> tüüpi vesi (65%; F2Na-HCO<sub>3</sub><sup>+</sup> ja F3Na-HCO<sub>3</sub><sup>+</sup>). Ülejäänud sama veetüübi alla kuuluvad liigid erinevad eelmistest vaid väiksema kloriidi sisalduse poolest (täht g).



**Joonis 10.** Na-Cl veetüübi erinevate liikide esinemissageduse graafik.

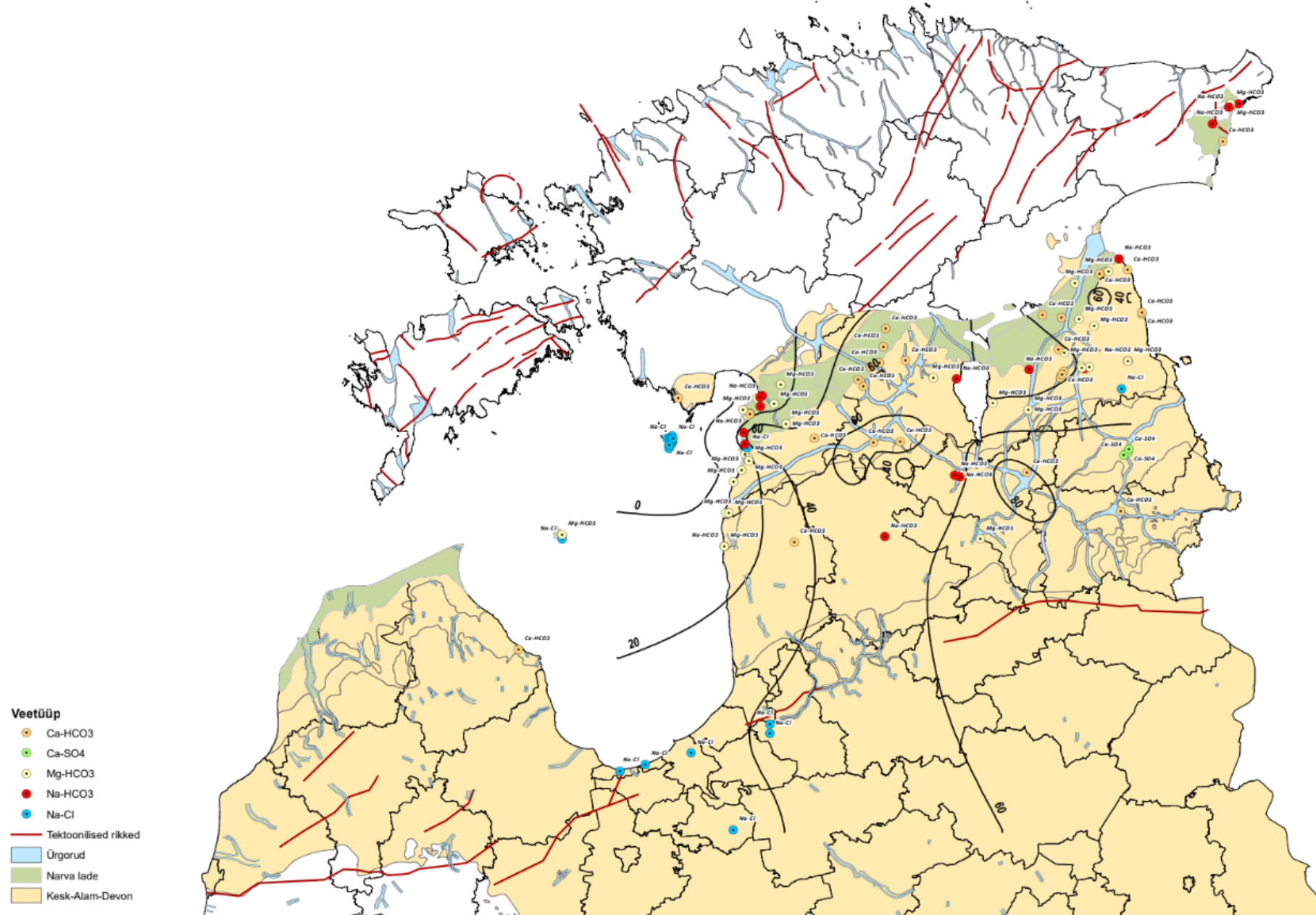
Valimis olnud veeproovidest 23 kuuluvad üldise veetüübi Na-Cl alla ja seda on Stuyfzandi veetüüpide klassifikatsiooni järgi põhjaveekompleksis kokku 10 erinevat liiki. Na-Cl alamtüübiga seotud erinevat liiki vee esinemissagedus on kajastatud joonisel 10. Veetüübi alla kuuluvad liigid erinevad teineteisest peamiselt kationvahetusindeksi poolest. Negatiivse kationvahetuse indeksiga Na-Cl tüüpi põhjavett esineb valimi 61% samal ajal kui positiivse kationvahetusega Na-Cl tüüpi põhjavett esineb 29%. Enamlevinud liigiks on riimveeline keskmise karedusega negatiivse kationvahetuse indeksiga Na-Cl tüüpi vesi (B2Na-Cl-). Koos väga sarnase veetüübiga b2Na-Cl-, mis erineb eelmisest kloriidi poolest, moodustavad need kaks veetüüpi 26% kõigist Na-Cl-tüüpi vetest. Ülejäänud veetüübid erinevad suurema või väiksema kloriidi sisalduste (tähed b, f, F), või leelisuse poolest.

## 4.2 Erinevate veetüüpide levik ja kujunemine

Põhjavee keemiliste tüüpide ruumilise leviku kirjeldamiseks loodi kaks ülevaadet andvat kaarti. Esimene kaart kujutab üldise veetüübi levikut ja teine kaart näitab detailse Stuyfzandi meetoodika järgi määratud veetüübi levikut (Stuyfzand, 1986, 1989, 1993). Mõlemad kaardid koostati ArcMapi programmis. Kaardid on esitatud joonistel 11 ja 12. Valimi moodustanud veeproovide tulemuste põhjal on näha, et Kesk-Alam-Devoni põhjaveekompleksis esinevad  $\text{Ca-HCO}_3$ ,  $\text{Mg-HCO}_3$ ,  $\text{Na-HCO}_3$ ,  $\text{Na-Cl}$  ja  $\text{Ca-SO}_4$  liiki põhjaveed.

Kesk-Alam-Devoni põhjaveekompleksi toitealadel ja nende ümbruses esineb laialdaselt väikese mineraalsusega vesi, millele viitab  $\text{Ca-HCO}_3$  ja  $\text{Mg-HCO}_3$  veetüüpide laialdane levik Lõuna-Eesti kõrgustike (eelkõige Sakala ja Otepää) ümbruses ja põhjaveekompleksi avamusalal.  $\text{Ca-HCO}_3$  ja  $\text{Mg-HCO}_3$  veetüübid on üldjuhul vanuselt noored veed, mis on välja kujunenud karbonaatsete mineraalide (kaltsiit, dolomiit) lahustumise tõttu.  $\text{Ca-HCO}_3$  liiki veed viitavad toitealal infiltreerunud veele. Põhjavee liikumine on Lõuna-Eestis määratud kõrgustike paiknemisega ning põhjavesi liigub neist eemale väljavoolualade suunas. Kesk-Alam-Devoni põhjaveekompleksi toitealadeks olevad kõrgustikud paiknevad kompleksi kesk- ja idaosas, mida iseloomustab ka kõrgem põhjavee survetase selles piirkonnas (joonis 11). Toitumine toimub avamusalal pinnakattest läbi infiltreeruva sademevee kaudu ning survealal lasuva Kesk-Devoni põhjaveekompleksi vee kaudu (Marandi jt, 2019). Põhjavesi väljub nende abil maapinnale tihti allikate või arteesiakaevudena ning liigub mööda jõgesid ja ürgorge.

Stuyfzandi meetoodika järgi määratud erinevad  $\text{Ca-HCO}_3$  veetüübi alamliigid võimaldavad täpsemalt kirjeldada põhjavee teket ja selle kvaliteedi kujunemist. Kõrgustike lael (ja ka põhjaveekompleksi avamusalal) esineb peamiselt väga väikese või väikese soolsuse, keskmist suurema leelisusega ja kationvahetusest mõjutamata  $\text{Ca-HCO}_3$  tüüpi vesi ( $\text{G3Ca-HCO}_3^0$ ; joonis 12). Toitealadest eemal  $\text{Ca-HCO}_3$  veetüübi liik muutub. Suureneb selle kloriidide sisaldus ja kohati esineb positiivse kationvahetuse indeksiga vett ( $\text{g3Ca-HCO}_3^+$ ; joonis 12). See viitab otseselt värskelt infiltreerunud vee segunemisele põhjaveekompleksis esineva varasema veega, mis toimub vee liikumisel toitealadelt eemale.



**Joonis 11.** Kesk-Devoni ja Alam-Devoni üldise veetüübi ülevaatekaart. Põhjavee hüdroisohüpsid Tšeban (1966) järgi. Tektoonilised rikked ja ürgorud Eesti alal pärineva Eesti geoloogiliselt kaardilt mõõtkavas 1:400 000 (Maa-amet, 2019). Läti alal esinevate ürgorgude ja tektooniliste rikete andmeallikateks on Bragulis jt (1998) ning Bragulis ja Kanevs (2002).

Toitealadelt eemale liikudes esineb põhjaveekompleksis palju  $\text{Mg-HCO}_3$  tüüpi põhjavett. Seda leidub nii selle kirdeosas (Tartumaal) kui ka lääneosas (Pärnumaal ja Liivi lahe saartel; joonis 11).  $\text{Mg-HCO}_3$  tüüpi vee esinemine viitab pikemale põhjavee ja ümbriskivimi vastastikmõjule. Suuremad  $\text{Mg}^{2+}$  sisaldused vees kujunevad dolomiitide või Mg-rikaste kaltsiidide lahustumisel, mille lahustuvus on väikese Mg-sisaldusega kaltsiidist oluliselt väiksem ja protsess ajaliselt pikem (Appelo ja Postma, 2005).  $\text{Mg-HCO}_3$  tüüpi veele on eriti põhjaveekompleksi lääneosas omane positiivne katioonvahetuse indeks, mis on kujunenud värskest infiltrerunud vee järkjärgulise segunemisega vanema pikema viibeajaga veega põhjaveekompleksis. Peamiselt esineb põhjaveekompleksi lääneosas  $\text{g2Mg-HCO}_3+$  või  $\text{g3Mg-HCO}_3+$  tüüpi põhjavesi (joonis 12). Põhjaveekompleksi kirdeosas esineb ka  $\text{Mg-HCO}_3$  tüüpi põhjavett, milles katioonvahetuse mõju ei esine, ehk veetüüp vastavalt Stuyfzandi meetodile  $\text{g3Mg-HCO}_3\text{O}$ . Eelmainitud veetüüp on avamusalal lähedal paiknev vesi, mis on tõenäoliselt kujunenud vaid Mg-rikkamate karbonaatsete mineraalide lahustumise tulemusena. Ida-Eestis asuval Narva lademel domineerivad peamiselt  $\text{Mg-HCO}_3$  liiki veed, kuid esineb ka veel  $\text{Na-HCO}_3$  ja  $\text{Ca-HCO}_3$  liiki vett. Narva lademe veed on analüüsi põhjal hinnatud väikese soolsusega või magedateks.

Stuyfzandi meetodika järgi määratud erinevad  $\text{Mg-HCO}_3$  veetüübi alamliigid võimaldavad ka täpsemalt kirjeldada põhjavee teket ja selle kvaliteedi kujunemist.  $\text{Mg-HCO}_3$  veetüüp viitab samuti mageda vee laialdasele levikule nagu  $\text{Ca-HCO}_3$ .  $\text{Mg-HCO}_3$  veetüübid levivad peamiselt Liivi lahe ranniku äärsetes piirkondadel ja väljavoolualadel.  $\text{Mg-HCO}_3$  veetüübid esinevad peamiselt magedatena või väikese soolsusega, peamiselt keskmise kuni suure leelisusega ning on üldiselt positiivse katioonvahetuse indeksi väärtusega ( $\text{g3Mg-HCO}_3+$ ; joonis 12).

Edela-Eesti rannikualadel Liivi lahe ääres leidub valdavalt  $\text{Na-HCO}_3$  tüüpi vett ( $\text{F2Na-HCO}_3+$  või  $\text{f2Na-HCO}_3+$ ). See veetüüp kujuneb enamasti katioonvahetuse protsesside tulemusena viidates otseselt suure mineraalsusega merelist tüüpi põhjavee ja magedama sademete infiltrerumisel tekkinud põhjavee omavahelisele segunemisele. Positiivne katioonvahetuse indeks näitab, et toimunud on magedumise tüüpi protsess, kus väikese soolsusega põhjavesi tungib varem soolase põhjaveega täidetud piirkonda (Appelo ja Postma, 2005). Seega on  $\text{Na-HCO}_3$  tüüpi vesi suurema soolsusega kui  $\text{Ca-HCO}_3$  ja  $\text{Mg-HCO}_3$  tüüpi veed (tähised „F“ ja „f“ vs „G“ ja „g“). Pärnu ja Liivi lahe ümbrustes esinev  $\text{Na-HCO}_3$  tüüp võib viidata minevikus esinenud suurele veevõtule ja tarbimisele Pärnu Reiu veehaardes, mis põhjustas tänapäevase merevee sissetungi (Savitskaja jt, 1996). Kohati esineb  $\text{Na-HCO}_3$  tüüpi vett ka sisemaal, toitealadest eemal ning paiguti ürgorgude nõlvadel (nt Valgamaal, Tartumaal ja Põhja-Lätis; joonis 11 ja 12). See näitab, et suurema soolsusega vesi võib olla kohati säilinud ka sisemaal ja põhjaveekompleksis toimub endiselt selle järkjärguline asendumine kõrgustikel infiltrerunud veega.

Stuyfzandi meetodika järgi määratud erinevad Na-HCO<sub>3</sub> veetüübi alamliigid on üldiselt väga sarnased. Na-HCO<sub>3</sub> veetüüpides ei muutu soolsus praktiliselt üldse, veetüübid on üldiselt keskmise kuni suure leelisusega ning neile on omane positiivne katioonvahetuse indeks (F3Na-HCO<sub>3</sub>+; joonis 11).

Erandina torkab põhjaveekompleksis silma Haanja kõrgustiku lähistel Põlvamaal esinev Ca-SO<sub>4</sub> veetüüp, mis on tõenäoliselt kujunenud Narva lademes esineva kipsi lahustumise tõttu (Savitskaja jt, 1996). Varasemad uurijad on näidanud ka Na-Cl tüüpi mineraalvee esinemist põhjaveekompleksi kaguosas (Vingisaar, 1978; Perens jt, 2001), aga käesolevas uuringus kasutatud valimist see veetüüp välja ei tule. Ainsana esineb antud uuringu valimis Na-Cl tüüpi vesi (f2Na-Cl-) Tartumaal Võnnu asulas ja see leid võib olla seotud kaugemal kagus leviva mineraalveega, mille esinemine on varasemate uuringute põhjal teada.

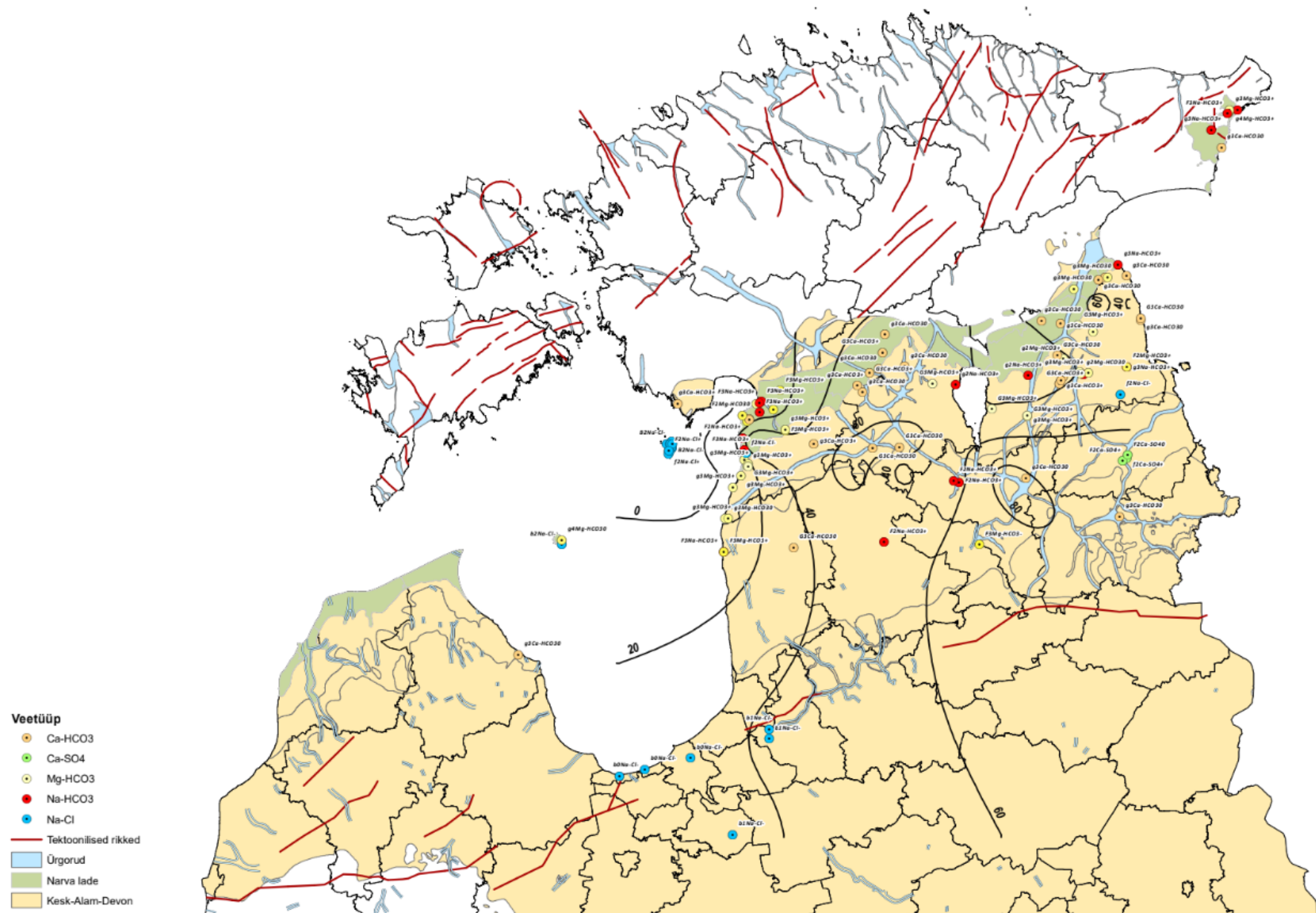
Stuyfzandi meetodika järgi määratud vähe levinud Ca-SO<sub>4</sub> veetüübi alamliigid viitavad mageda vee levikule nende asukohas, kus esineb peamiselt värsket vee levik. Veetüüp ei esine koos teistega laialdaselt ning selle liigid on väga sarnased. Veetüüp on mageda keskmise leelisusega ja positiivse katioonvahetuse indeksiga (F2Ca-SO<sub>4</sub>+; joonis 11).

Kihnu ja Ruhnu saartel on domineerivamaks veetüübiks Na-Cl. Varasemalt on oletatud (Pärn, 2018; Marandi jt, 2019), et Kihnu saare Kesk-Alam-Devoni põhjaveekompleksis esineb väga aeglane veevahetus, mis on tõenäoliselt põhjustatud vanema soolase vee või tänapäevase merevee sissetungist. Viimane võib olla seotud saarel toimuva veevõtu Kesk-Alam-Devoni põhjaveekogumist. Sellele viitab saartel esineva Na-Cl alamtüüpidele iseloomulik negatiivne katioonvahetuse indeks ja keskmised kloriidide sisaldused (Cl<sup>-</sup> sisaldus 100–400 mg/L; tabel 1), mille tulemusel on kujunenud F2Na-Cl- või B2Na-Cl- veetüübid. Ruhnu saarel esinev veetüüp viitab sarnasele päritolule, mis esineb Kihnu saarel.

Kesk-Lätis Riia ümbruses esinev Na-Cl veetüüp (b1Na-Cl- ja b2Na-Cl-) on tõenäoliselt vanuselt väga vana põhjavee tüüp, mis on kujunenud sooldumise tüüpi katioonvahetuse tulemusena. Liivi lahe saartel esinevast Na-Cl tüüpi veest eristab seda suurem soolsus (Cl<sup>-</sup> sisaldus 1500-9800 mg/L; tabel 1) ja väga väike leelisus. See võib olla kujunenud soolase vee sissetungil sügavamatest Ordoviitsiumi ja Kambriumi kivimitest Devoni kivimitesse läbi Liepaja-Pihkva rikkevööndi, mida põhjustas jääajal pealetungiva liustiku ette tekkinud hüdrostaatiline rõhk (Raidla jt, 2009; Gerber jt, 2017).

Põhjaveetüüpide ruumiline levik põhjaveekompleksis ning nende paiknemine toitealade ja väljavoolualade suhtes näitab, et põhjaveekompleksis toimub aktiivne vastastikmõju ja segunemine värskelt infiltreerunud vee ja varem põhjaveekompleksis olnud vee vahel. Toitealadelt väljavoolualade suunas esineb tüüpiline nn kromatograafiline jada (*chromatographic sequence*), kus veetüübid asenduvad järjekorras Ca-HCO<sub>3</sub>, Mg-HCO<sub>3</sub>, Na-HCO<sub>3</sub> ja Na-Cl (Walraevens ja Lebbe, 1989; Stuyfzand, 1993; Appelo ja Postma, 2005). See iseloomustab vanema suurema mineraalsusega vee järkjärgulist väljapesemist põhjaveekihtidest värskelt infiltreeruva vee poolt. Põhjaveekompleksi äärealadel Liivi lahe saartel ja eriti Riia piirkonnas toimub vastupidine protsess, kus kas piirkonna geoloogilise ehituse või veevõtu tõttu on toimunud soolase vee sissetung varem väiksema mineraalsusega põhjaveega täidetud põhjaveekihtidesse.





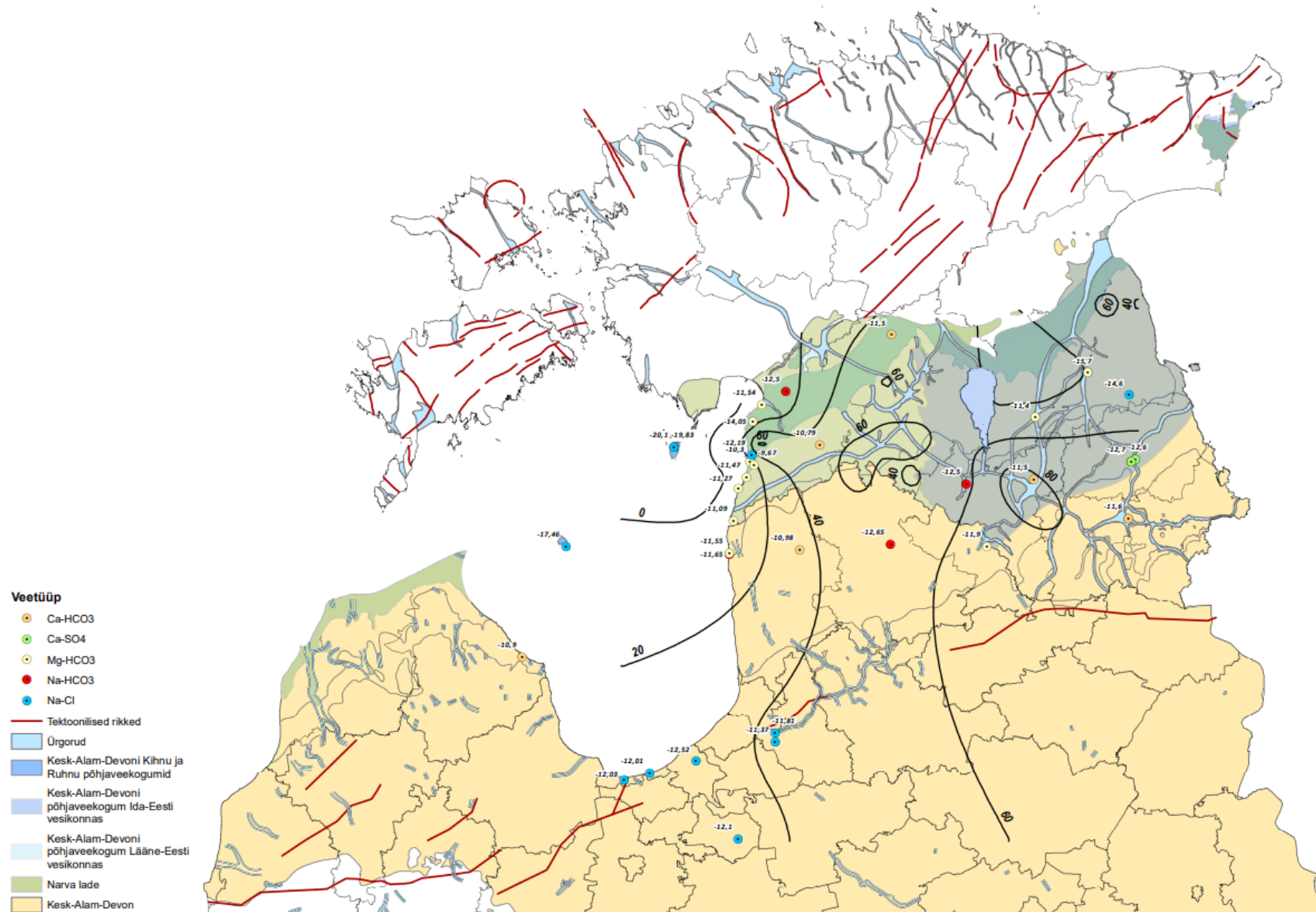
**Joonis 12.** Kesk-Devoni ja Alam-Devoni Stuyfzandi veetüübi ülevaatekaart. Põhjavee hüdroisohüpsid Tšeban (1966) järgi. Tektoonilised rikked ja ürgorud Eesti alal pärineva Eesti geoloogilisel kaardil mõõtkavas 1:400 000 (Maa-amet, 2019). Läti alal esinevate ürgorgude ja tektooniliste rikete andmeallikateks on Bragulis jt (1998) ning Bragulis ja Kanevs (2002).

### 4.3 Aktiivse ja aeglase veevahetuse vööndite piiritlemine põhjaveekompleksis ja sellega seotud põhjaveekogumites

Analüüsi tulemuste põhjal saab järeldada, et Lõuna-Eestis ja Põhja-Lätis esineb Kesk-Alam-Devoni põhjaveekompleksis segamini nii soolast kui ka magedat põhjavett. Uuringualal esinev põhjavee tüüpide jaotus on kujunenud pika aja jooksul ja põhjaveekompleksis esineb tõenäoliselt väga erineva vanusega vett. Põhjavee keemilise koostis annab aimu aktiivse ja aeglase veevahetuse vööndite levikust. Oma keemilise kujunemise järgi iseloomustavad Ca-HCO<sub>3</sub> tüüpi veed tänapäeval infiltratsioonil tekkinud noort põhjavett, mis kuulub kindlasti aktiivse veevahetuse vööndisse. Mg-HCO<sub>3</sub> ja Na-HCO<sub>3</sub> tüüpi vesi viitab pikemale vastastikmõjule põhjavee ja kivimite vahel ja aeglasele veevahetusele. Na-Cl tüüpi vee puhul võib olla tegu väga vana merelist päritolu mineraalveega (Gerber jt, 2017), aga seda tüüpi vesi võib pärineda aga ka tänapäevase merevee sissetungist (Marandi jt, 2019). Seepärast on erinevate veevahetusevööndite täpsemaks eristamiseks vaja kasutada lisaks veel mõnda teist parameetrit.

Põhjavee vanust saab lisaks selle keemilisele koostisele kaudselt hinnata põhjavee isotoopkoostise abil, mille üheks näitajaks on veemolekuli hapniku isotoopkoostis ( $\delta^{18}\text{O}$ ). Eesti põhjaveekihi on olnud mõjutatud Pleistotseeni jääaegadel toimunud liustike sulavete sissetungist ja selle mõjul on kujunenud liustikutekkeline põhjavesi, millel on tänapäevasest põhjaveest ( $\delta^{18}\text{O}$  väärtused -10,5 kuni -11,5‰) olulistelt erinev kerge isotoopkoostis ( $\delta^{18}\text{O}$  väärtused -14 kuni -23‰; Vaikmäe jt, 2001; Raidla jt, 2009; Pärn jt, 2016; Pärn, 2018). Tänapäevane merevesi on seevastu sademest tekkinud põhjaveest oluliselt raskem isotoopkoostis ( $\delta^{18}\text{O}$  väärtused ~-7‰) ning reliktisel mineraalveel on isegi tänapäevasest mereveest raskem isotoopkoostis ( $\delta^{18}\text{O}$  väärtused ~-2 kuni -4‰; Raidla jt, 2009; Gerber jt, 2017; Pärn, 2018).

Varem avaldatud andmestikus on uuringu valimis esinenud asukohtadest olemas 37 isotoopanalüüsi, mida saab võrrelda uuringus määratud põhjaveetüüpidega (Savitskaja jt, 1996; Vaikmäe jt, 2020; Babre jt, 2016). Veeproovide isotoopkoostiste väärtuste põhjal on loodud ülevaateline kaart koos nende kajastatud tulemustega, mis on esitatud joonisel 13.



**Joonis 13.** Kesk-Alam-Devoni veekogude põhjavee hapniku isotoopkoostise ( $\delta^{18}\text{O}$ ) leviku kaart. Põhjavee hüdroisohüpsid Tšeban (1966) järgi. Tektoonilised rikked ja ürgorud Eesti alal pärineva Eesti geoloogiliselt kaardilt mõõtkavas 1:400 000 (Maa-amet, 2019). Läti alal esinevate ürgorgude ja tektooniliste rikete andmeallikateks on Bragulis jt (1998) ning Bragulis ja Kanevs (2002). Kaardil on ka kujutatud Kesk-Alam-Devoni Kihnu ja Ruhnu põhjaveekogumid, Kesk-Alam-Devoni põhjaveekogum Ida-Eesti vesikonnas ja Kesk-Alam-Devoni põhjaveekogum Lääne-Eesti vesikonnas.

Aktiivse veevahetusevööndi iseloomulikuks tunnuseks on tänapäevastele sademete sarnase isotoopkoostisega põhjavee esinemine. Aeglase veevahetuse vööndi iseloomulikuks tunnuseks on vanema külmematest kliimaperioodidest pärineva liustikutekkelise põhjaveele iseloomulikud hapniku isotoopväärtused, kuna olemasolevad andmed ei näita relikitsele mineraalveele iseloomulike väärtuste esinemist Kesk-Alam-Devoni põhjaveekompleksis (joonis 13). Seega on aktiivse ja aeglase veevahetuse vööndi piiriks loetud  $\delta^{18}\text{O}$  väärtus  $-14\text{‰}$  nagu on välja pakkunud Pärn (2018). Kui põhjavee hapniku isotoopkoostise ( $\delta^{18}\text{O}$ ) väärtus on väiksem kui  $-14\text{‰}$ , siis on tegemist aeglase veevahetuse vööga, ning kui põhjavee hapniku isotoopkoostise ( $\delta^{18}\text{O}$ ) väärtus on suurem kui  $-14\text{‰}$ , siis on tegemist aktiivse veevahetuse vööndiga.

Aeglase veevahetuse vööndile iseloomulikud väärtused esinevad põhjaveekompleksi lääne ja kirdeosas kaugemal olulisematest toitealadest. Kihnu ja Ruhnu põhjaveekogumis olevate Na-Cl veetüüpide  $\delta^{18}\text{O}$  isotoopväärtused jäävad vahemikku  $-17,5$  kuni  $-20,1\text{‰}$ , mis viitavad vanale põhjaveele. Aeglasele veevahetusele viitab ka Ruhnu saarel esinev põhjavee  $\delta^{18}\text{O}$  väärtus  $-17,6\text{‰}$ . Isotoopide väärtused viitavad sellele, et see põhjavesi ei ole seotud tänapäevase veeringega, vaid põhjavesi pärineb tõenäoliselt jääajal Eesti ala katnud mandriliustikute sulavetest (Marandi jt, 2019). Liivi lahe saartel on selline vesi saanud säilida, sest need on eraldatud üldisest põhjavee voolusüsteemidest Eesti mandriosas, kus põhjavesi liigub tänu suuremale hüdraulilisele gradiendile palju kiiremini. Saarte asendi tõttu on hüdrauliline gradient kogumis väike, mistõttu on vana põhjavee väljauhtumine aluspõhja kivimitest infiltreeruvate sademete poolt raskendatud (Marandi jt, 2019). Põhjavee suur soolsus võib olla seotud veevõtul toimuva tänapäevase merevee sissetungiga kuna Kihnul ja Ruhnul domineerib sooldumise tüüpi katioonvahetusest mõjutatud veetüüp (F2Na-Cl- või B2Na-Cl-).

Olulisele liustikuvee osakaalule viitab ka Tartu piirkonnas leviv  $\text{g3Mg-HCO}_3^+$  tüüpi vesi ja üksik f2Na-Cl- tüüpi veeproov Võnnu asulast (tabel 2), mille  $\delta^{18}\text{O}$  väärtused on  $-14$  kuni  $-16\text{‰}$ .  $\delta^{18}\text{O}$  väärtused, mis on väiksemad kui  $-14\text{‰}$ , viitavad aeglasemale veevahetusele ja on omased piirkondadele, mis paiknevad kaugemal kogumi peamistest toitealadest Lõuna-Eesti kõrgustikel (Marandi jt, 2019).

Kesk-Alam-Devoni põhjaveekompleksi lääneosas Liivi lahe rannikul kui ka kohati kaugemal sisemaal esinevate Na-HCO<sub>3</sub> veetüüpide  $\delta^{18}\text{O}$  isotoopväärtused jäävad vahemikku  $-12,5$  kuni  $-14,1\text{‰}$ . Need väärtused iseloomustavad aeglase ja aktiivse veevahetuse üleminekuvööndit. Ka seda tüüpi põhjavesi paikneb valdavalt suurematest toitealadest eemal ja põhjavee keemiline tüüp viitab segunemisele tänapäeval infiltreerunud väikese soolsusega põhjavee ning vanema suurema soolsusega põhjavee vahel.

Põhjaveekompleksi toitealadel Lõuna- ja Kagu-Eesti suuremate kõrgustike ümbruses (Sakala, Otepää, Haanja) ja selle avamuslal esineva Ca-HCO<sub>3</sub> ja Mg-HCO<sub>3</sub> tüüpi vee  $\delta^{18}\text{O}$  väärtused jäävad vahemikku  $-10,8$  kuni  $-11,9\text{‰}$ . Need on väga sarnased tänapäevaste sademete  $\delta^{18}\text{O}$  väärtustele ja iseloomustavad aktiivse veevahetuse vööndit. Seega toimub põhjaveekompleksi veeressursside aktiivne taastumine vaid veekompleksi kitsal avamuslal selle põhjaosas ning Lõuna-Eesti kõrgustike ümbruses. Mujal on põhjavee taastumine aeglasem ja põhjaveekompleksis on tõenäoliselt säilinud vanemat põhjavett, mille viibeaeg võib ulatuda sadadesse kuni tuhandettesse aastatesse.

Aktiivse ja aeglase veevahetuse vööndite täpsem piiritlemine omab ka veemajanduslikku tähtsust. Kesk-Alam Devoni põhjaveekompleksis on Euroopa Liidu veepoliitika raamdirektiivi seatud

keskkonnaeesmärkide täitmiseks ja põhjavee ressursside majandamiseks loodud 4 põhjaveekogumit (Marandi jt, 2019; joonis 13): Kesk-Alam-Devoni Ruhnu (nr. 19), Kesk-Alam-Devoni Kihnu (nr. 20), Kesk-Alam-Devoni põhjaveekogum Lääne-Eesti vesikonnas (nr. 21) ja Kesk-Alam-Devoni põhjaveekogum Ida-Eesti vesikonnas (nr. 22).

Kesk-Alam-Devoni Lääne-Eesti vesikonna põhjaveekogumis esineb aktiivne veevahetus Sakala kõrgustikul ja selle lähiümbruses, kus levivad valdavalt  $\text{Ca-HCO}_3$  ja  $\text{Mg-HCO}_3$  tüüpi veed. Liivi lahe rannikul kõrgustikust läänes leidub  $\text{Na-HCO}_3$  tüüpi põhjavett, mis kuulub pigem aeglase veevahetuse vööndisse. Aeglase veevahetuse tõttu on see põhjaveekogumi osa tundlik põhjavee tarbimise suhtes nagu näitavad tänapäevase merevee sissetungi ilmingud Reiu veehaarde ümbruses (Savitskaja jt, 1996; Marandi jt, 2019). Täielikult võib aeglase veevahetuse vööndisse kuuluvaks lugeda Kesk-Alam-Devoni Kihnu ja Ruhnu põhjaveekogumitesse kuuluvat vett. Sealse vee kerge isotoopkoostis, Mandri-Eesti põhjaveega võrreldes suurem soolsus ja negatiivne kationvahetuse indeks viitavad vanema liustikutekkelise põhjavee ning tänapäevase merevee segunemisele põhjaveevõtu käigus. Seega peaks just Lääne-Eesti Kesk-Alam-Devoni põhjaveekompleksi põhjavee tarbimisel ja põhjaveevõtu hindamisel arvestama põhjaveekompleksis esineva aeglase veevahetusega, mis suurendab põhjavee sooldumise ohtu põhjaveevõtul.

Kesk-Alam-Devoni Ida-Eesti vesikonna põhjaveekogumis levib valdavalt  $\text{Ca-HCO}_3$  ja  $\text{Mg-HCO}_3$  tüüpi põhjavesi ja aktiivse veevahetuse vöönd on siin oluliselt laiaulatuslikum kui Lääne-Eestis. Selle põhjuseks on peamiste põhjavee toitealade esinemine just selle põhjaveekogumi territooriumil. Kohati leidub selles kogumis ka kergema isotoopkoostisega  $\text{Mg-HCO}_3$  ja  $\text{Na-HCO}_3$  tüüpi põhjavett, kogumi lõunaosas samuti  $\text{Ca-SO}_4$  tüüpi vett, mille isotoopkoostis ( $\delta^{18}\text{O}$  väärtused jäävad vahemikku  $-12,5$  kuni  $-16\%$ ) näitab aeglasema veevahetuse esinemist toitealadest eemal. Sellises aeglase veevahetusega piirkonnas paiknevad näiteks Tartu linna põhjaveehaarded. Erinevalt Lääne-Eesti rannikust ja Liivi lahe saartest ei toimu siin veetarbimise mõjul mitte soolase vee sissetungi vaid pigem maapinnalähedasema Kesk-Devoni põhjaveekompleksi vee tungimine Kesk-Alam-Devoni põhjaveekompleksi. See võib kaasa tuua varem maapinnalt lähtuva reostuse eest kaitstud põhjavee kvaliteedi halvenemise põhjaveekogumis.

## 5. Kokkuvõte

Uuringu eesmärk oli kirjeldada ja analüüsida varem avaldatud andmestiku põhjal Kesk-Alam-Devoni põhjaveekompleksis esinevaid põhjaveetüüpe, nende päritolu ja levikut ning kujunemist. Uurimisel kasutati kokku 106 veeproovist moodustatud valimit, mis koosneb perioodil 1996 – 2017 kogutud veeproovidest. Erinevate põhjaveetüüpide leviku alusel kirjeldati põhjaveekompleksis aktiivse ja aeglase veevahetuse vööndite esinemist. Põhjaveetüüpide määramine tugines Pieter Jan Stuyfzandi väljatöötatud meetodikal. Erinevalt tavapäraselt kasutusel olevatest põhjavee keemilise tüübi määramiseks kasutatud meetoditest võimaldab Stuyfzandi meetod kirjeldada põhjavee keemilist koostist mitmest erinevast vaatepunktist lähtudes, sisaldades järgmisi põhjavee kvaliteeti iseloomustavaid tunnuseid: mineraalsus, leelisuus, põhjavees enimesinevad katioonid ja anioonid ning katioonvahetuse indeks.

Põhjaveekompleksis esinevad viis põhilist põhjaveetüüpi, milleks on  $\text{Ca-HCO}_3$ ,  $\text{Mg-HCO}_3$ ,  $\text{Na-HCO}_3$ ,  $\text{Ca-SO}_4$  ja  $\text{Na-Cl}$ .  $\text{Ca-HCO}_3$  veetüüp levib peamiselt Lõuna-Eesti kõrgustikel (Sakala, Otepää, Haanja) ja põhjaveekompleksi avamusalal. Stuyfzandi meetodi põhjal on  $\text{Ca-HCO}_3$  veetübile omane peamiselt väga väike või väike soolsus, suur leelisuus ja need on katioonvahetusest mõjutamata (veetüüp  $\text{G3Ca-HCO}_3\text{O}$  või  $\text{g3Ca-HCO}_3\text{O}$ ). Toitealadest kaugemal muutub põhjavesi järk-järgult  $\text{Mg-HCO}_3$  ja  $\text{Na-HCO}_3$  tüüpi veeks.  $\text{Mg-HCO}_3$ -tüüpi vesi levib ulatuslikult põhjaveekompleksi kirdeosas ja Edala-Eestis, olles valdavalt väikese soolsusega, keskmise kuni suure leelisusega ning mõjutatud magestumise tüüpi katioonvahetuse protsessidest (veetüüp  $\text{g3Mg-HCO}_3+$ ). Edala-Eesti rannikualal ning kohati ka kaugemal sisemaal ürgorgude ümbruses esineb magedat, keskmise kuni suure leelisusega  $\text{Na-HCO}_3$  tüüpi vett (veetüüp  $\text{F2Na-HCO}_3+$ ), mille katioonvahetuse tüüp viitab suurema mineraalsusega merelist päritolu põhjavee ja magedama sademete infiltratsioonil tekkinud põhjavee omavahelisele segunemisele.  $\text{Ca-HCO}_3$ ,  $\text{Mg-HCO}_3$  ja  $\text{Na-HCO}_3$  veetüüpide järkjärguline üleminek põhjavee voolamise suunas kõrgustikelt (toitealadelt) madalamate alade (väljavoolualade) suunas on tüüpiline põhjaveekompleksidele, kus toimub värskest infiltreerunud vee ja vanema põhjavee segunemine.

Põhjaveekompleksis esineb ka Haanja kõrgustiku lähistel Põlvamaal  $\text{Ca-SO}_4$  veetüüp, mis on tõenäoliselt kujunenud Narva lademes esineva kipsi lahustumise tõttu, kuid mille mineraalsus sarnaneb teistele väikese mineraalsusega põhjaveetüüpidele  $\text{Ca-HCO}_3$ ,  $\text{Mg-HCO}_3$  ja  $\text{Na-HCO}_3$ . Stuyfzandi meetodi põhjal on  $\text{Ca-SO}_4$  veetübile omane positiivne katioonvahetuse indeks (veetüüp  $\text{F2Ca-SO}_4+$ ).

Kihnu ja Ruhnu saartel domineerib  $\text{Na-Cl}$  veetüüp, millele on omane suurem mineraalsus, väike leelisuus ning negatiivne katioonvahetuse indeks ( $\text{f2NaCl-}$  või  $\text{b2Na-Cl-}$ ). Negatiivne katioonvahetuse indeks viitab sooldumise tüüpi katioonvahetuse protsessi esinemisele, mida põhjustab soolase vee sissetung põhjaveekompleksi. Selline sooldumine võib Liivi lahe saartel olla kujunenud põhjaveevõtu tõttu. Mõneti sarnane sooldumisest mõjutatud  $\text{Na-Cl}$  tüüpi vesi levib ka Kesk-Lätis Riia ümbruses, mille soolsus on aga Liivi lahe saartel leiduva veega võrreldes oluliselt suurem (veetüüp  $\text{b2Na-Cl-}$ ). Tegemist on tõenäoliselt vanuselt väga vana põhjaveega, mis võib pärineda soolase vee sissetungist Kesk-Alam-Devoni põhjaveekompleksi sügavamatest kihtidest (Ordoviitsiumi ja Kambriumi kivimites paiknev vesi) läbi Liepaja-Pihkva rikkevööndi. Kokkuvõtvalt näitab põhjaveetüüpide ruumiline levik põhjaveekompleksis ning nende paiknemine toitealade ja väljavoolualade suhtes, et

põhjaveekompleksis toimub vastastikmõju ja segunemine värskest infiltrerunud vee ja varem põhjaveekompleksis olnud vanema vee vahel.

Erinevate veevahetuse võõndite täpsemaks eristamiseks kasutati töös ka olemasolevat andmestikku (kokku 37 analüüsi) Kesk-Alam-Devoni põhjaveekompleksi isotoopkoostise kohta. Põhjaveekogumite aktiivsete ja aeglase veevahetuse võõndite eristamiseks kasutati põhjavee hapniku isotoopkoostise  $\delta^{18}\text{O}$  väärtust  $-14\%$  nagu on soovitanud Pärn (2018). Selgelt viitavad vanema põhjavee esinemisele ja aeglasele veevahetusele kerged  $\delta^{18}\text{O}$  isotoopväärtused Liivi lahe saartel, mis on sarnased Põhja-Eestist varem leitud liustikutekkelisele põhjaveele. Teine piirkond, kus esineb põhjavett, mille  $\delta^{18}\text{O} < -14\%$  esineb põhjaveekompleksi kirdeosas Tartumaal. Kolmandaks viitab põhjavee keemiline koostis väga aeglasele veevahetusele ka põhjaveekompleksi lõunaosas Kesk-Lätis. Kesk-Alam-Devoni põhjaveekompleksi lääneosas Liivi lahe rannikul kui ka kohati kaugemal sisemaal kõrgustike vahelistel aladel esinevad  $\delta^{18}\text{O}$  isotoopväärtused viitavad aeglase ja aktiivse veevahetuse üleminekuvõõndile. Selgelt võib aktiivse veevahetuse tsooni osaks lugeda Kesk-Alam-Devoni põhjaveekompleksi idaosa kõrgustike piirkonnas paiknevat põhjavett ja põhjaveekompleksi avamusala.

Kesk-Alam-Devoni põhjaveekompleksiga seotud põhjaveekogumitest on selgelt aeglase veevahetusega Kesk-Alam-Devoni Ruhnu ja Kesk-Alam-Devoni Kihnu põhjaveekogumid. Kesk-Alam-Devoni põhjaveekogum Lääne-Eesti vesikonnas paikneb üleminekuvõõndis, kus aeglasem veevahetus iseloomustab kogumi lääneosas ja aktiivsem veevahetus kogumi idaosa. Kesk-Alam-Devoni Ida-Eesti vesikonna põhjaveekogumis esineb kõige ulatuslikum aktiivse veevahetuse võõnd Kagu-Eesti kõrgustike piirkonnas. Kogumi lõunaosa ja kirdeosa põhjavee keemiline ja isotoopkoostis aga viitab sellele, et toitealadest eemal muutub veevahetus põhjaveekompleksis oluliselt aeglasemaks.

## Tänuavaldused

Soovin südamest tänada oma juhendajaid Joonas Pärna ja Rein Vaikmäed nende suurepärase ning osavõtliku juhendamise eest. Nende panus bakalaureusetöö koostamisse, abi materjalide leidmisel, ning koostöö tervikuna on olnud väga õpetlik, arendav ning inspireeriv. Tänu oma juhendajatele sain oluliselt laiendatud oma hüdrogeoloogilisi teadmisi.

Samuti soovin tänada Alise Babret ja Konrāds Popovsit Läti ülikoolist, kes jagasid hüdrogeoloogilisi ja geoloogilisi andmeid Läti ala kohta.



## Kirjanduse loetelu

- Appelo, C. A. J., Postma, D. (2005). *Geochemistry, groundwater and pollution, 2<sup>nd</sup> edition*. A.A. Balkema Publishers, Leiden.
- Borozdins, D., Demidko, J., Bikše, J., Babre, A., Koit, O., Küttim, L., Ojamäe, K., Popovs, K., Strazdiņa, L., Tarros, S., Vainu, M., Valters, K. (2022). Joint report on WP2 activities AT.2.2 “Assessment of the status of transboundary groundwater bodies according to harmonized principles”, AT.2.3 “Development of transboundary monitoring strategy” and AT.2.4 “Spring monitoring optimization and watershed modeling”. Interreg Estonia-Latvia project No.Est-Lat155 “Joint actions for more efficient management of commongroundwater resources (WaterAct)”.
- Bragulis, A. J., Kanevs, S. (2002). *Latvijas tektonika* [Läti tektoonika]. State Geological Survey, Riga.
- Bragulis, A. J., jt (2002). *Latvijas ģeoloģija: 1:500 000 mēroga ģeoloģiskā karte un pirmskvartāra nogulumu apraksts* [Läti geoloogia: 1:500 000 mõõtkavas geoloogiline kaart ja kvaternaari eelsete setete kirjeldus]. Valsts ģeoloģijas dienests, Riga.
- Gerber, C., Vaikmäe, R., Aeschbach, W., Babre, A., Jiang, W., Leuenberger, M., Lu, Z.T., Mokrik, R., Müller, P., Raidla, V., Saks, T., Waber, H.N., Weissbach, T., Zappala, J.C., Purtschert, R. (2017). *Using 81Kr and noble gases to characterize and date groundwater and brines in the Baltic Artesian Basin on the one-million-year timescale*. *Geochem. Cosmochim. Acta* 205, 187–210. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2017.01.033>.
- Hass, M. (2023). *Põhjaveevaru bilansi aastaaruanne 2022*. Keskkonnaagentuur, Tallinn.
- Healy, R. W., Scanlon, B. R. (2010). *Estimating Groundwater Recharge*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Healy, R. W., Cook, P. G. (2002). *Using groundwater levels to estimate recharge*. *Hydrogeology Journal* 10, 91-109. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0178-0>
- Kleesment, A., Mark-Kurik, E. (1997). *Devonian, Introduction. Lower Devonian. Middle Devonian*. Kogumikus: Raukas, A., Teedumäe, A. (toim.). *Geology and Mineral Resources of Estonia*, lk. 107-121. Estonian Academy Publishers, Tallinn.
- Lukševičs, E., Stinkulis, Ģ., Mūrnieks, A., Popovs, K. (2012). *Geological evolution of the Baltic Artesian Basin*. Dēlina, A., Kalvāns, A., Saks, T., Bethers, U., Virčavs, V. (toim.), *Highlights of Groundwater Research in the Baltic Artesian Basin*, lk. 7-53. University of Latvia, Riga.

- Maa-amet (2019). Eesti pinnakatte kaart (1:400 000). Kasutatud 24.04.2023. <https://geoportaal.maaamet.ee/geoportaal.maaamet.ee/est/ruumiandmed/geoloogilised-andmed/geoloogilised-kaardid-1-400000-p356.html>
- Marandi, A., Osjamets, M., Polikarpus, M., Pärn, J., Raidla, V., Tarros, S., Vallner, L. (2019). *Põhjaveekogumite piiride kirjeldamine, koormusallikate hindamine ja hüdrogeoloogiliste kontseptuaalsete mudelite koostamine*. Eesti Geoloogiateenistus, Rakvere.
- Marandi, A., Karro, E., Osjamets, M., Polikarpus, M., Hunt, M. (2020). *Eesti põhjaveekogumite seisund perioodil 2014-2019*. Eesti Geoloogiateenistus, Rakvere.
- Perens, R., Vallner, L. (1997). *Water-bearing formation*. Raukas, A., Teedumäe, A. (toim.), *Geology and Mineral Resources of Estonia*, lk. 137-145. Estonian Academy Publishers, Tallinn.
- Perens, R., Savva, V., Lelgus, M., Parm, T. (2001). *Eesti hüdrogeokeemiline atlas*. OÜ Eesti Geoloogiakeskus, Tallinn.
- Põhjaveekomisjon (2004). *Eesti põhjavee kasutamine ja kaitse*. Tallinn.
- Pärn, J. (2018). *Origin and Geochemical Evolution of Palaeogroundwater in the Northern Part of the Baltic Artesian Basin* [Doktoritöö, Tallinna Tehnikaülikool]. <https://digikogu.taltech.ee/>
- Pärn, J., Raidla, V., Vaikmäe, R., Martma, T., Ivask, J., Mokrik, R., Erg, K. (2016). *The recharge of glacial meltwater and its influence on the geochemical evolution of groundwater in the Ordovician-Cambrian aquifer system, northern part of the Baltic Artesian Basin*. *Applied Geochemistry*, Volume 72, 125–135. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2016.07.007>
- Raidla, V., Kirsimäe, K., Vaikmäe, R., Jöeleht, A., Karro, E., Marandi, A., Savitskaja, L. (2009). *Geochemical evolution of groundwater in the Cambrian-Vendian aquifer system of the Baltic Basin*. *Chemical Geology*, Volume 258, 219–231. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.10.007>
- Savitskaja, L., Viigand, A., Jaštšuk, S. (1996). *Keskdevoni-siluri veekompleksi põhjaveekvaliteedi uurimistöö*. Eesti Geoloogiakeskus, Tallinn.
- Stuyfzand, P. J. (1986). *A new hydrochemical classification of watertypes: principles and application to the coastal dunes aquifer system of the Netherlands*. Proc. 9th Salt Water Intrusion Meeting, Delft 12-16 may, Delft Univ. Techn., 641-655.
- Stuyfzand, P. J. (1989). *A new hydrochemical classification of water types*. IAHS Publication 182, The Netherlands, 89 98.

- Stuyfzand, P. J. (1993). *Hydrochemistry and Hydrology of the Coastal Dune area of the Western Netherlands*. Vrije Universiteit Amsterdam, The Netherlands.
- Stuyfzand, P. J. (2008). *Base exchange indices as indicators of salinization or freshening of (coastal) aquifers*. Program and Proceedings 20th Salt Water Intrusion Meeting, 262-265. IFAS Research, The Netherlands.
- Tamm, I., Metsur, M. (2017). *Põhjaveevaru hindamise juhend*. Keskkonnainvesteeringute Keskus, Tallinn.
- Tšeban, E. (1966). Гидродинамическая и гидрохимическая зональность. Гидрогеология СССР, том XXX. Эстонская ССР [Hüdrodünaamiline ja hüdrokeemiline tsoneerimine. NSVL hüdrogeoloogia, köide XXX. Eesti NSV]. Nedra, Moskva.
- Vallner, L. (1997). Groundwater flow. Raukas, A., Teedumäe, A. (toim.), *Geology and Mineral Resources of Estonia*, lk. 137–152. Estonian Academy Publishers, Tallinn.
- Vallner, L., Järvet, A. (1998). Assessment of the climate change impact on groundwater recharge. Kallaste, T., Kuldna, P. (toim). *Climate Change Studies in Estonia*, lk 105–110. Stockholm Environment Institute Tallinn Centre, Tallinn.
- Vaikmäe, R., Vallner, L., Loosli, H. H., Blaser, P. C., Juillard-Tardent, M. (2001). Palaeogroundwater of glacial origin in the Cambrian-Vendian aquifer of Northern Estonia. Edmunds. W. M., Milne, C. J. (toim). *Palaeowaters of Coastal Europe: Evolution of Groundwater since the late Pleistocene*, Geological Society Special Publications No. 189, 17-27. Geological Society, London.
- Vingisaar, P. (1978). Eesti mineraalveed ja nende kasutamine. Kumari, E., Heinsalu, Ü, jt (toim.), *Põhjavee kasutamisest ja kaitsest Eesti NSV-s*, lk 54–71. ENSV Teaduste Akadeemia, Tallinn.
- Walraevens, K., Lebbe, L. (1989). Groundwater quality in the Tertiary Ledo-Paniselian aquifer in Belgium as a result of fresh-water intrusion into sediments in chemical equilibrium with the sea. *Proc. 10th SWIM, Ghent 1988*, 30-44.

## Lisad

### Lisa 1. Lihtlitsents

Lisa  
rektori 07.04.2020 käskkirjale nr 1-8/17

#### **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks<sup>1</sup>**

Mina, Kaarl Rudolf Tamm

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Lõuna-Eesti ja Põhja-Läti Kesk-Alam-Devoni põhjaveekompleksi põhjavee päritolu ja selle keemilise koostise kujunemine“, mille juhendajad on Joonas Pärn ja Rein Vaikmäe.
  - 1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
  - 1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

---

27.05.2024

---

<sup>1</sup> Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingulise tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.