

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

Magistritöö geoloogias (30 EAP)

**Pinna- ja põhjavee vastastikmõju modelleerimine kliimamuutuste mõju
hindamiseks Piigaste oja valglas**

Annabel Eensoo

Juhendajad: Marlen Hunt

Joonas Pärn

Tartu 2026

Pinna- ja põhjavee vastastikmõju modelleerimine kliimamuutuste mõju hindamiseks Piigaste oja valglas

Käesolev magistritöö käsitleb kliimamuutuste mõju Piigaste oja valgla hüdrooloogilisele režiimile, keskendudes pinna- ja põhjavee vastastikmõjule. Töö eesmärk oli koostada PRMS-il põhinev sademe-äravoolumudel ning hinnata selle sobivust kliimamuutuste hüdrooloogilise mõju uurimiseks. Mudeli kalibreerimiseks ja valideerimiseks kasutati mõõdetud vooluhulga aegridu, statistilisi sobivusnäitajaid ning mudelist sõltumatuid meetodeid. Tulemused näitavad, et Piigaste oja äravoolu kujunemisel on määrav põhjaveeline toide ning koostatud mudel kirjeldab valgla hüdrooloogilisi protsesse piisava usaldusväärsusega. Lisaks näitavad töö tulemused, et 20. sajandil on toimunud olulised muutused valgla sademete, netoinfiltratsiooni ja vooluhulga režiimis. Käesolev töö loob metoodilise aluse PRMS-mudeli edasiseks rakendamiseks kliimaprojektsioonidel põhinevate hüdrooloogiliste tulevikustsenaariumide uurimiseks.

Märksõnad: Pinna- ja põhjavee vastastikmõju, hüdrooloogiline modelleerimine, kliimamuutused
CERCS kood: P470 Hüdrogeoloogia, geoplaneering ja ehitusgeoloogia

Modeling surface water–groundwater interactions to assess climate change impacts in the Piigaste stream catchment

This master's thesis examines the impact of climate change on the hydrological regime of the Piigaste stream catchment, with a focus on surface water–groundwater interactions. The aim of the thesis was to develop a precipitation-runoff model based on PRMS and to assess its suitability for investigating the hydrological impacts of climate change. The model was calibrated and validated using observed discharge time series, statistical performance indicators, and model-independent methods. The results indicate that groundwater contribution plays a dominant role in the formation of runoff in the Piigaste stream, and that the developed model reproduces the hydrological processes of the catchment with sufficient reliability. Additionally, the results indicate that significant shifts have occurred in precipitation, recharge and discharge regime of the catchment during the 20th century. This thesis establishes a methodological basis for the further application of the PRMS model to assess hydrological future scenarios based on climate projections.

Keywords: Surface water–groundwater interactions, hydrological modeling, climate change

CERCS code: P470 Hydrogeology, geographical and geological engineering

Sisukord

1. Sissejuhatus	4
2. Teoreetiline taust	6
2.1. Kliimamuutuste hüdrooloogilised mõjud ja nende hindamine	6
2.2. Hüdrooloogiliste mudelite valideerimine kliimamuutuste mõju hindamiseks	7
2.3. Jõgede äravoolukomponendid ja põhjaveeline toide	8
3. Materjal ja metoodika	10
3.1. Uuringuala kirjeldus	10
3.2. Metoodika kirjeldus.....	13
3.2.1. <i>Mudeli tehniline kirjeldus</i>	13
3.2.2. <i>Sisendandmed</i>	17
3.2.3. <i>Kalibreerimise meetod</i>	20
3.2.4. <i>Valideerimise meetodid</i>	20
3.2.5. <i>Kliimamuutuste mõju hindamise metoodika</i>	25
3.2.6. <i>Tehisintellekti kasutamine</i>	25
4. Tulemused	26
4.1. Oja äravoolu kontseptuaalne mudel	26
4.2. Sademe-äravoolumudeli tulemused	29
4.3. Piigaste oja valgla äravoolukomponentide jaotus ja põhjavee toitumine	32
4.4. Modelleeritud netoinfiltratsiooni valideerimine	34
4.5. Potentsiaalse evapotranspiratsiooni valideerimine.....	34
4.6. Kliimamuutuste mõju hindamine	36
5. Arutelu ja järeldused	39
5.1. Mudeli tulemuste tõlgendamine ja usaldusväarsuse hindamine	39
5.2. Kliimamuutuste mõju Piigaste oja valgla veebilansile	42
6. Kokkuvõte	45
Summary	47
Tänuavaldused	49
Kirjanduse loetelu	50

1. Sissejuhatus

Kliimamuutused mõjutavad veeringet nii globaalsel kui ka regionaalsel tasandil, muutes õhutemperatuuri, sademete hulka ja sesoonset jaotust, lumikatte kestust ning aurumist (IPCC 2021, 2022). Vooluveekogude vooluhulkade seisukohalt ei avaldu kliimamuutuste mõju üksnes aastase äravooluhulga suurenemises või vähenemises, vaid ka voolurežiimi sesoonsetes muutustes (Jaagus *et al.* 2017). Temperatuuri tõus, talvise lumikatte vähenemine ja sademete esinemisvormi muutumine mõjutavad kevadise suurvee kujunemist, talvist äravoolu, suviseid madalveeperioode ning põhjavee toitumist (Jaagus *et al.* 2017; IPCC 2022). Sellised muutused võivad mõjutada nii veevarude kättesaadavust kui ka pinnaveekogumite ökoloogilist ja keemilist seisundit (IPCC 2022).

Tulevikus aset leidvate hüdroloogiliste muutuste hindamiseks on vajalik käsitleda jõgede äravoolu kujunemist terviklikult. Üksnes pinnavee protsessidele keskenduvad mudelid ei pruugi piisavalt kirjeldada põhjavee toitumise, baasäravoolu ning pinna- ja põhjavee vastastikmõju rolli vooluhulga kujunemisel (Fowler *et al.* 2020; Costantini *et al.* 2023). Seetõttu on kliimamuutuste hüdroloogilise mõju hindamisel oluline rakendada pinna- ja põhjavee integreeritud modelleerimist, mis võimaldab hinnata meteoroloogiliste tingimuste muutuste mõju nii jõe koguvooluhulgale kui ka selle kujunemist määravatele veebilansi komponentidele (Dams *et al.* 2015; Fowler *et al.* 2020).

Kuigi Eestis on kliimamuutuste mõju jõgede äravoolule käsitletud mitmes varasemas uuringus (Järvet *et al.* 1998; Jaagus *et al.* 2017; Kotta *et al.* 2018), ei ole kliimamuutuste mõju pinna- ja põhjavee vastastikmõjule põhjalikumalt uuritud. Varasemad käsitlused on keskendunud peamiselt jõgede vooluhulkade, kliimaparameetrite või põhjavee muutuste eraldiseisvale analüüsile, kuid pinna- ja põhjavee seoseid arvestavaid valglapõhiseid mudeleid on rakendatud vähesel määral. Sellest tulenevalt on vajalik arendada ja valideerida mudeleid, mis võimaldavad hinnata kliimamuutuste mõju mitte ainult jõe koguvooluhulgale, vaid ka põhjavee toitumisele, baasäravoolule ning pinna- ja põhjavee vastastikmõjule.

Käesoleva magistritöö eesmärk on luua Piigaste oja valglale PRMS-põhine (*Precipitation-Runoff Modeling System*) sademe-äravoolumudel ning hinnata selle rakendatavust pinna- ja põhjavee vastastikmõju ning kliimamuutuste hüdroloogilise mõju uurimisel. Töö esimeses etapis hinnatakse mudeli usaldusväärsust nii statistiliste näitajate kui ka mudelist sõltumatute valideerimismeetodite abil. Teises etapis rakendatakse kalibreeritud ja valideeritud mudelit

minevikus toimunud kliimamuutuste mõju hindamiseks ning hinnatakse selle sobivust uuringu edasistes etappides kliimaprojektsioonidel põhinevate tulevikuprognoside tegemiseks.

Piigaste oja valgla ajaloolistel andmetel kalibreeritud ja mudelist sõltumatute meetoditega valideeritud baasmudeli loomine on vajalik eeltingimus mudeli edasiseks rakendamiseks kliimaprojektsioonidel põhinevate meteoroloogiliste sisendandmetega mudelite loomisel. Kliimaprojektsioonidel põhinevate mõjuhinnangute usaldusväärsus sõltub mudeli võimest kirjeldada uuritava valgla hüdrooloogilist toimimist, mistõttu võimaldab käesolev töö hinnata loodud mudeli sobivust kliimamuutuste mõju prognoosimiseks jõgede äravoolule ning pinna- ja põhjavee vastastikmõjule Lõuna-Eesti sarnaste valglatega vooluveekogudes.

Magistritöö valmis LIFE-SIP AdaptEST „Kliimamuutustega kohanemise tegevuste elluviimine Eestis“ (*Implementation of national climate change adaptation activities in Estonia*, LIFE21-IPC-EE-LIFE-SIP AdaptEst/101069566) projekti 3. tööpaketi tegevuste raames ning toetab projekti eesmärke kliimamuutustega kohanemise meetmete väljatöötamisel Eesti veeökosüsteemide jaoks.

2. Teoreetiline taust

2.1. Kliimamuutuste hüdrooloogilised mõjud ja nende hindamine

Ülemaailmses teaduskirjanduses on kliimamuutuste hüdrooloogiliste mõjude hindamisel laialdaselt rakendatud kliimaprojektsioonide ja hüdrooloogiliste mudelite kombineerimist (Nohara *et al.* 2006; Dams *et al.* 2015; Fowler *et al.* 2020; Costantini *et al.* 2023). Globaalsel skaalal on kliimamudelite ansambleid ja jõgede äravoolu modelleerimist kasutatud suurte jõgikondade äravoolu muutuste hindamiseks, rõhutades, et kliimamuutuste mõju jõgede vooluhulgale võib olla ruumiliselt väga varieeruv ning sõltuda nii kliimamuutuste piirkondlikust iseloomust kui ka valgate hüdrooloogilistest ja füüsikalis-geograafilistest omadustest (Nohara *et al.* 2006). Regionaalsetes uuringutes on esile toodud ka hüdrooloogiliste mudelite valikust tulenev varieeruvus, kuna sama kliimastenaariumi korral võivad erineva ülesehituse ja eeldustega hüdrooloogilised mudelid anda jõgede voolurežiimi muutuste kohta erinevaid hinnanguid (Dams *et al.* 2015). Varasemates uuringutes on osutatud, et kontseptuaalsete sademe-äravoolumudelite rakendatavus võib olla piiratud suure põhjaveelise toitega valgates, kuna mudelid ei pruugi piisava täpsusega kirjeldada pikaajalisi muutusi valgla veebilansis ja põhjavee dünaamikas (Fowler *et al.* 2020). Selline piirang võib põhjustada lahknevusi mõõdetud ja modelleeritud vooluhulkade vahel ning vähendada mudelite usaldusväärsust ekstreemsete või uuringuperioodil esinenuga võrreldes oluliselt erinevate ilmastikutingimuste korral (Fowler *et al.* 2020). Põhjavee olulisust kliimamuutuste mõjuhinnangutes rõhutavad ka globaalsed põhjaveeprojektsioonid, mille kohaselt avaldub kliimamuutuste mõju põhjaveetasemele ruumiliselt varieeruvalt ning on seotud nii sademete ja aurumise muutustega kui ka pinna- ja põhjavee vastastikmõjudega (Costantini *et al.* 2023).

Eestis on varasemates uuringutes kliimaprojektsioone rakendatud tulevikukliima piirkondliku varieeruvuse hindamiseks ning temperatuuri ja sademete võimalike ruumiliste muutuste kirjeldamiseks (Sepp *et al.* 2018). EURO-CORDEX kliimamudelite ansambli põhjal sooritatud analüüsid osutavad, et Eesti kolm peamist kliimapiirkonda (mandriosa, rannikualad ning Lääne-Eesti saared) võivad säilida ka tulevikus, kuid muutuvate kliimatingimuste tõttu võivad nendevahelised erinevused mõnevõrra süveneda. Hüdrooloogiliste mõjude hindamisel on piirkondliku varieeruvuse arvestamine oluline, kuna jõgede äravoolurežiimi muutused kujunevad kliimamuutuste suundumuste, temperatuuri ja sademete ruumilise jaotuse ning valgate füüsikalis-geograafiliste omaduste koosmõjus (Sepp *et al.* 2018).

Kliimamuutuste mõju Eesti jõgede äravoolule on ajalooliselt väljendunud eelkõige hüdroloogilise režiimi sesoonse dünaamika muutustes (Jaagus *et al.* 2017). Piirkondlikult kujundavad jõgede äravoolurežiimi muutusi eeskätt talvise õhutemperatuuri tõus, lumikatte perioodi lühenemine ning sademete esinemisvormi muutumine, mis mõjutavad nii äravoolu ajalist kujunemist kui ka selle sesoonset jaotust (Jaagus 2006). Varasemad Eestis läbiviidud uuringud on näidanud, et kliimamuutuste hüdroloogiline mõju ei avaldu üksnes aastase äravooluhulga muutusena, vaid väljendub eelkõige voolurežiimi muutustes, sealhulgas talvise äravoolu suurenemises ning kevadise suurveeperioodi nihkumises varasemale perioodile (Jaagus *et al.* 2017). Sarnast käsitlust kinnitavad ka Eesti kliima- ja keskkonnamuutuste režiimihkeid käsitlevad üldised uuringud, mille järgi saab jõgede äravoolu muutusi käsitleda üldisemate atmosfääri-, maismaa- ja veekeskonna vastastikuste seoste kontekstis (Kotta *et al.* 2018). Lisaks on Eesti kliimamuutuste mõjude analüüsid käsitletud veevarusid olulise mõjuvaldkonnana, mille tundlikkus tuleneb sademete, aurumise, lumikatte ning pinnase külmumis- ja sulamisprotsesside muutuste otsesest seosest nii jõgede äravoolu kujunemise kui ka põhjavee toitumisega (Järvet *et al.* 1998).

2.2. Hüdroloogiliste mudelite valideerimine kliimamuutuste mõju hindamiseks

Hüdroloogiliste mudelite valideerimine on modelleerimise oluline etapp, mille käigus hinnatakse hüdroloogilise simulatsiooni- või prognoosimudeli toimivust, võrreldes mudelitulemusi vaatlusandmetega ning kasutades selleks mudeli rakenduseesmärgist tulenevaid hindamiskriteeriume (Biondi *et al.* 2012). Valideerimise eesmärk on hinnata, kui võrd usaldusväärset mudel kirjeldab uuritava valgla hüdroloogilisi protsesse ja äravoolu kujunemist. Tavapäraselt põhineb mudeli valideerimine eelkõige modelleeritud ja mõõdetud vooluhulkade võrdlemisel ning mudeli toimivuse hindamisel statistiliste sobivusnäitajate põhjal (Biondi *et al.* 2012).

Protsessipõhiste pinnavee äravoolumudelite rakendamine kliimamuutuste mõju hindamisel eeldab, et mudel on võimeline kirjeldama uuritava valgla hüdroloogilisi protsesse (näiteks äravoolukomponentide jaotus, sademete akumulatsioon ja ruumiline jaotumine, lumikatte teke ja sulamine, infiltratsioon ning evapotranspiratsioon) mitte üksnes kalibreerimisperioodi tingimustes, vaid ka sellest erinevates hüdroklimaatilistes tingimustes. Kuna tuleviku hüdroloogiliste tingimuste kohta vaatlusandmeid olla ei saa, on mudeli valideerimine ajaloolise aegrea andmete alusel oluline lähtekoht mudeli usaldusväärseuse hindamisel. Kuigi mudeli

piisav vastavus vaatlusandmetele ajaloolisel perioodil ei taga üheselt selle head prognoosivõimet tulevikutingimustes, võib see suurendada kliimamuutuste mõjuhinnangute usaldusväärsust ning vähendada hüdroloogiliste mudelitega seotud määramatust (Krysanova *et al.* 2018).

Seetõttu ei tohiks kliimamuutuste mõju hindamisel kasutatava mudeli valideerimine piirduda üksnes mõõdetud ja modelleeritud vooluhulkade võrdlemisega, vaid hinnata tuleks ka mudeli hüdroloogiliste protsesside kirjeldamise võimet (Thirel *et al.* 2015). Mudelist sõltumatute vaatlusandmete ja meetodite kasutamine mudeli eri komponentide kontrollimiseks võimaldab hinnata, kas mudelis kirjeldatud hüdroloogilised protsessid on kooskõlas tegelike protsessidega, ega põhine üksnes parameetrite sobitamisel vooluhulga vaatlusandmetega (Bingeman *et al.* 2006). Mitme kriteeriumi põhine valideerimine, mille käigus hinnatakse mudelit erinevate hüdroloogiliste muutujate alusel, aitab vähendada parameetrite määramatusest tulenevat mõju ning suurendada mudeli tulemuste usaldusväärsust (Beldring 2002).

2.3. Jõgede äravoolukomponendid ja põhjaveeline toide

Jõe äravool on valglalt jõesängi koonduv veevool, mis kujuneb nii maapinnal liikuvast sademe- ja lumesulamisveest kui ka pinnasesse infiltreerunud veest, mis jõuab jökke muuhulgas allikate, põhjavee väljavoolu või jõega hüdrauliliselt seotud põhjaveekihtide kaudu (Brutsaert 2023). Hüdroloogilises käsitluses eristatakse äravoolukomponentidena pindmist äravoolu, vaheäravoolu ning baasäravoolu, mille omavaheline suhteline osakaal sõltub sademete intensiivsusest, pinnakatte ja aluspõhja hüdraulilistest omadustest, reljeefist, maakasutusest ning muudest valgla omadustest (McGuire *et al.* 2024).

Pindmine äravool kujuneb juhul, kus sademe- või lumesulamisvee hulk ületab pinnase infiltratsioonivõime või kui pinnas on veega küllastunud, mistõttu liigub vesi vooluveekogusse mööda maapinda (Fu *et al.* 2024). Pinnase infiltratsioonivõime ületamisest tingitud Hortoni pindmine äravool on siiski loodusliku maakattega valglates üldjuhul vähelevinud ning on iseloomulikum tugevalt tihenenud või hõreda taimkattega pinnastele ning linnapiirkondadele (Zhang *et al.* 2021). Sademe-äravoolumudelites, näiteks PRMS-is, käsitletakse kraavivõrgu kaudu toimuvat kiiret äravoolu sageli pindmise äravoolukomponendi koosseisus (Markstrom *et al.* 2015). Pindmise äravoolu kiire liikumine valgla põhjustab jõe vooluhulga lühiajalist kasvu ning soodustab suurvee, erosiooni ning setete ja toitainete transporti valgla (Fu *et al.* 2024).

Vaheäravooluna käsitletakse põhjaveetasemest kõrgemal toimuvat lateraalset vee liikumist pinnases või murenenud kivimis, kus infiltreerunud vesi liigub nõlva kallakuse suunas väiksema hüdraulilise juhtivusega kihi peal või suurema veejuhtivusega makropoorides ja lõhedes (McGuire *et al.* 2024). Vaheäravoolu kujunemist soodustavad eelkõige suurema kallakusega nõlvad, kus suurema veejuhtivusega pindmised mullakihid paiknevad väiksema läbilaskvusega savikama mullakihi, murenenud aluspõhjakivimi või aluspõhja peal (McGuire *et al.* 2024). Pindmist äravoolu ja vaheäravoolu käsitletakse sageli koos otseäravooluna, mis põhjustavad äravoolu kiireid muutusi vastusena sademetele või lumesulamisele (Hiscock 2005).

Baasäravooluna käsitletakse jõe vooluhulga põhjaveelist komponenti, mis kujuneb põhjavee aeglasest väljavoolust vooluveekogusse ning moodustab jõe äravoolu peamise osa sademetevaestel perioodidel (Xie *et al.* 2024). Selle komponendi suhtelist tähtsust jõe koguvooluhulgas kirjeldatakse baasäravoolu indeksiga (*baseflow index*, BFI), mis leitakse vaadeldava perioodi baasäravoolu ja koguaravoolu suhtena (Xie *et al.* 2024). Globaalse baasäravoolu indeksi väärtuseks hinnatakse ligikaudu $59 \pm 7\%$, mis rõhutab põhjavee keskset rolli pinnavee äravoolu kujunemisel (Xie *et al.* 2024).

Netoinfiltratsiooni ehk põhjavee toitumisena käsitletakse vee allapoole suunatud liikumist läbi küllastumata pinnasevööndi põhjaveetasemeni (Healy, Scanlon 2010). Netoinfiltratsioon võib toimuda hajusalt või kontsentreeritult. Hajus toitumine kujuneb sademete infiltreerumisel läbi mullapinna ja sellele järgneval imbumisel läbi aeratsioonivööndi põhjaveetasemeni (Healy, Scanlon 2010). Kontsentreeritud toitumine on seevastu seotud vee liikumisega pinnaveekogudest, näiteks jõgedest, kraavidest või järvedest põhjaveekihti (Healy, Scanlon 2010). Põhjavee toitumine suurendab põhjaveevaru, luues tingimused põhjavee hilisemaks väljavooluks vooluveekogudesse, mistõttu on netoinfiltratsioon otseselt seotud jõe baasäravoolu kujunemisega (Scanlon *et al.* 2002).

3. Materjal ja metoodika

3.1. Uuringuala kirjeldus

Piigaste oja kuulub Ahja jõe vesikonda. Ahja jõgi on Emajõe alamjooksu suurim lisajõgi ning idapoolsem Emajõe suuremate lisajõgede seas (Timm *et al.* 2019). Jõgi kuulub Ida-Eesti vesikonna Peipsi alamvesikonda. Jõe pikkus on 103,9 km ning valgala pindala 1073,3 km² (Keskkonnaagentuur 2026a). Ahja jõgi saab alguse Erastvere järvest Otepää kõrgustiku kagunõlval ning suubub Emajõkke paremalt kaldalt 8,8 km kauguselt suudmest (Eesti Veemajandusinspeksioon 1986). Jõe ülemjooks koos arvukate lisajõgedega paikneb Otepää kõrgustikul, samas kui kesk- ja alamjooks kulgevad vastavalt Kagu-Eesti lavamaal ja Emajõe Suursoos (Järvekülg 2001).

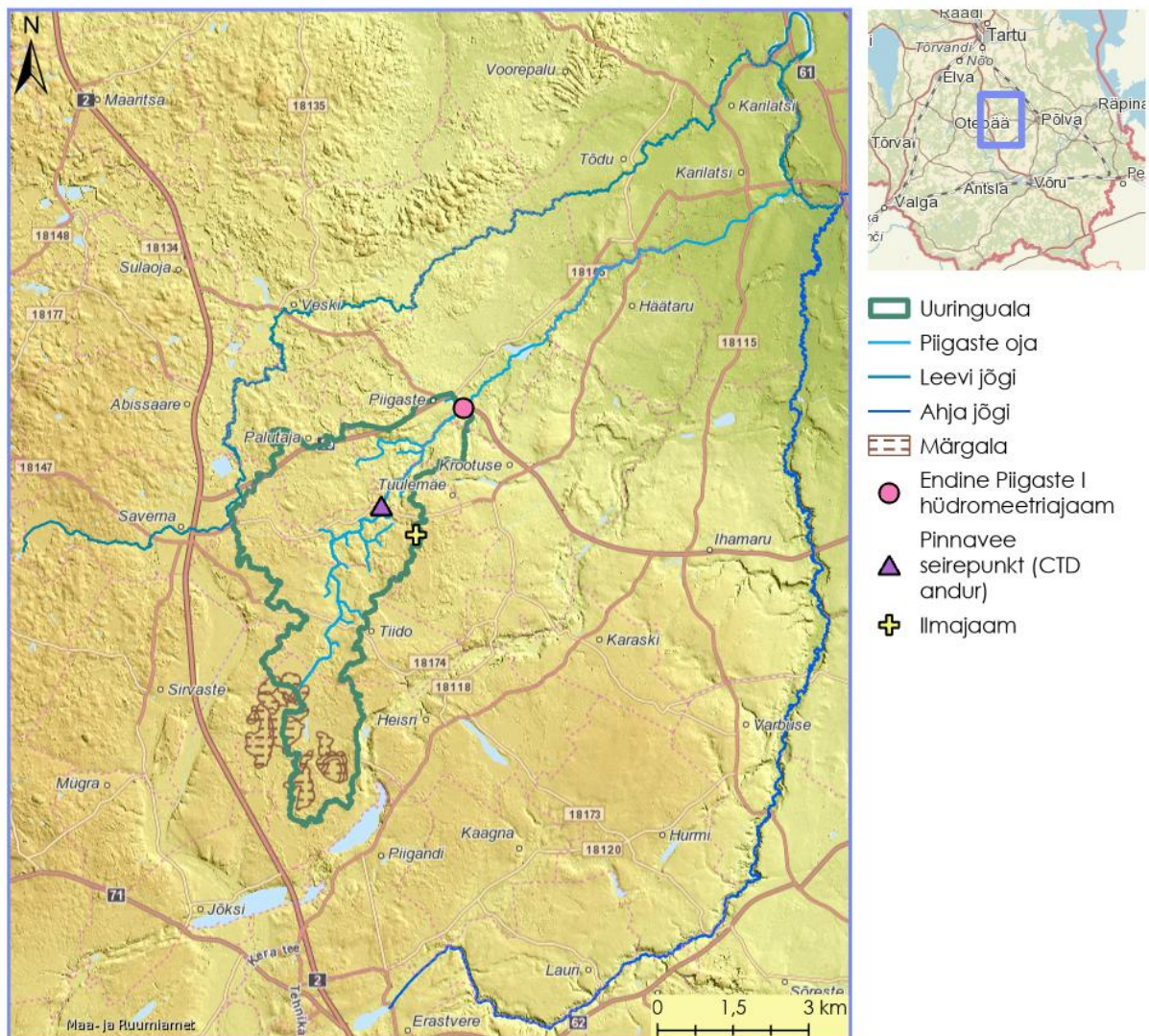
Käesoleva töö uuringualaks on Piigaste oja ülemjooks, mis paikneb Põlvamaa lääneosas Otepää kõrgustiku idanõlval (Joonis 1). Piigaste oja on Leevi jõe lisajõgi, olles Ahja jõe teist järku vasakpoolne lisaoja. Oja kogupikkus on 20,5 km ning valgala pindala 35,5 km² (Keskkonnaagentuur 2026d). Antud töö raames käsitletud hüdromeetriaama valgla pindala on 17,5 km². Piigaste oja lähe paikneb Saverna külast 3 km idakagu pool Tiido külas, kõrgendikunõlva soisel jalamil (Järvekülg 2001). Oja ülemjooks kulgeb Otepää kõrgustiku idanõlval, samas kui kesk- ja alamjooks jäävad Kagu-Eesti lavamaale (Järvekülg 2001). Piigaste oja suubub Leevi jõkke 1,3 km kaugusel selle suudmest Põrste küla lähedal (Eesti Veemajandusinspeksioon 1986).

Piigaste oja voolab peaaegu kogu pikkuses looklevas looduslikus sängis, kulgedes läbi vaheldusrikka maastiku, kus peamiselt esinevad metsad ja põllud, mis moodustavad vastavalt 57 % ja 28 % valgala pindalast (Maa- ja Ruumiamet 2025a). Lisaks katavad ligikaudu 6 % valglast madalsood ja rabad (Maa- ja Ruumiamet 2025a).

Piigaste oja on Kagu-Eesti kõrgustike servaaladele iseloomulikku suure languga vooluveekogu (Timm *et al.* 2019). Oja veepinna absoluutne kõrgus lähtel on 125,0 m ja suudmes 58,3 m, mistõttu ulatub kogulangus üle 66 meetri (Järvekülg 2001). Keskmine lang on 4,76 m/km, mis annab ojale suhteliselt kiirevoolulise iseloomu ja mõjutab äravoolu kujunemist (Järvekülg 2001).

Uuringuala pinnakatte paksused jäävad vahemikku 20–100 m. Õhemad pinnakatte paksused esinevad uuringuala kirdeosas, kus maapinna absoluutkõrgus on väiksem. Pinnakatte moodustavad limnoglatsiaalsed (liiv, liivsavi, saviliiv), glatsiogeensed (moreen), glatsiofluviaalsed (liiv, kruus, veeris) ning soosetted (turvas) (Golovina *et al.* 1975). Piigaste

oja valgla paikneb künklikul moreentasandikul, mida iseloomustavad ebakorrapärase kujuga liustikumoreenist kõrgendikud ja madalamad nõod. Levinud on glatsiofluviaalsed ja limnoglatsiaalsed pinnavormid: oosid, möhnad ja sandurid. Nende suhteline kõrgus on enamasti 2–10 m, kohati kuni 25 m, ning nõlvade kalle jääb valdavalt vahemikku 5–10°. Org, milles oja voolab, lõikub moreentasandikku kirdesuunas ning on erosiooniliselt süvenev. Selle suhteline sügavus ulatub ülemjooksul 5–10 meetrini ning alamjooksul ligikaudu 15 meetrini. Valgla absoluutkõrgused varieeruvad ligikaudu 85–100 meetrist selle madalamates osades kuni 145–150 meetrini kõrgematel aladel (Golovina *et al.* 1975).



Joonis 1. Uuringuala paiknemine. Aluskaardid (Maa- ja Ruumiamet 2025b).

Geoloogiliselt paikneb uuringuala Devoni ladestu avamusel (Golovina *et al.* 1975). Devoni kivimitest levivad alal Burtnieki ja Aruküla kihistu liivakivid, Narva kihistu domeriidid, aleuroliidid ja liivakivid ning Pärnu kihistu liivakivid (Golovina *et al.* 1975). Uuringualal esinevad seega Kesk-Devoni (D₂) ja Kesk-Alam-Devoni (D₂₋₁) veekompleksid, mida eraldab teineteisest Narva regionaalne veepide (D_{2nr}) (Eesti Põhjaveekomisjon 2004). Piigaste oja on seotud põhjaveekogumiga nr 24 (Kesk-Devoni põhjaveekogum Ida-Eesti vesikonnas) (Marandi *et al.* 2025).

Piigaste oja valgla on olnud varasemalt uurimisobjektiks mitmetes hüdrogeoloogilistes uuringutes. Piigaste oja hüdromeetriaajaam kuulus riiklikku hüdroloogilisse seirevõrku aastatel 1945–2017, mille tulemusena on olemas pikaajaline ja järjepidev andmestik oja äravoolu ning veerežiimi muutlikkuse analüüsimiseks (Keskkonnaagentuur 2026b). Üks olulisemaid piirkonnas läbiviidud uuringuid oli 1966–1979. aastatel Eesti Geoloogia Valitsuse poolt Rahvusvahelise Hüdrogeoloogia Programmi raames teostatud pinna- ja põhjavee kompleksseire Leivajõe ja Piigaste oja valglates (Golovina *et al.* 1975; Jürima 1976; Jaani 1977, 1978, 1979, 1980). Vastava programmi alusel läbiviidud seire jätkus piirkonnas 1991. aastani. Uuringu eesmärgiks oli põhjavee režiimi hindamine ning korrelatsioonide tuvastamine põhja- ja pinnavee režiimi hooajaliste ja pikaajaliste muutuste vahel. Piigaste oja valgla vaatlusvõrk koosnes 30 kaevust, millest 26 olid Kvaternaari, kolm Kesk-Devoni ja üks Kesk-Alam-Devoni veekompleksi kaev. Täiendavalt oli kasutusel ka hüdromeetriaajama äravooluandmestik.

Seiretulemused näitasid, et Piigaste oja valgla põhjaveerežiim on selgelt sesoonse iseloomuga, kus põhjavee peamine toitumine toimub kevadise lumesulamise ja sügiseste sademeterohkete perioodide ajal. Suve- ja talveperioodil valitsevad valdavalt põhjaveetasemete langus- või stabiilsusfaasid, kusjuures tasemete muutuste amplituud sõltub tugevalt seirepunkti geomorfoloogilisest paiknemisest ja aeratsioonivöö paksusest. Vaatlusandmete põhjal tuvastati tugev hüdrauliline seos Kvaternaari veekihi ja Piigaste oja äravoolu vahel, mis avaldub eriti madalveeperioodidel, mil oja vooluhulk on suures ulatuses tagatud põhjaveelise juurdevoolu arvelt. Veebilansi analüüsid kinnitasid, et märkimisväärne osa sademetest kulub aurumisele, samas kui pinnavee äravoolu osakaal on mõõdukas ning põhjavesi täidab olulist reguleerivat rolli valgla veerežiimi kujundamisel.

3.2. Metoodika kirjeldus

3.2.1. Mudeli tehniline kirjeldus

Käesoleva töö raames koostati Piigaste oja valgla pinnavee äravoolumudel, eesmärgiga modelleerida pinna- ja põhjavee vastastikuseid seoseid ning hinnata neile avalduvat kliimamuutuste mõju. Kliimamuutuste mõju hindamisel keskenduti äravoolukomponentide (pindmine äravool, vaheäravool, baasäravool) omavaheliste vahetõrgete ja netoinfiltratsiooni muutustele.

Pinnavee modelleerimiseks rakendati sademe-äravoolumudelit PRMS (*Precipitation-Runoff Modeling System*), mis on deterministlik, ruumiliselt hajutatud parameetritega ja füüsikalistel protsessidel põhinev modelleerimissüsteem (Markstrom *et al.* 2015). PRMS töötati välja USA Geoloogiateenistuses (USGS) eeskätt selleks, et hinnata kliima- ja maakasutusmuutuste mõju vooluhulkadele ning valgla hüdrooloogilisele režiimile. Mudel võimaldab kirjeldada ja kvantifitseerida valgla hüdrooloogilisi protsesse, pakkudes võimalust hinnata sademete, lumikatte, aurumise, infiltreerumise, põhjavee ja äravoolu omavahelist dünaamikat ajas ja ruumis (Markstrom *et al.* 2015).

Mudeli moodulipõhine ülesehitus võimaldab valida või kohandada protsesside kirjeldamise viise vastavalt uuritava piirkonna eripärale. Käesolevas töös kasutatud moodulid ning nende kirjeldused on esitatud tabelis 1.

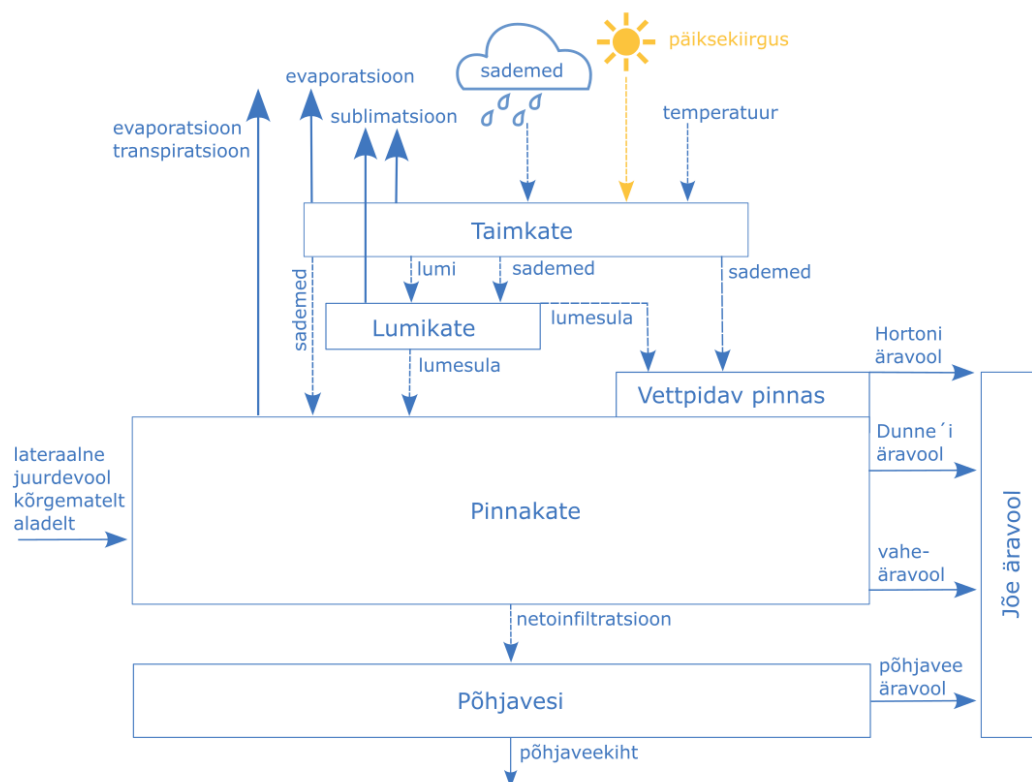
Mudel jaotab valgla hüdrooloogilisteks arvutusüksusteks (HRU – *Hydrologic Response Unit*, põhjavee puhul GWR – *Groundwater Reservoir*), mis on pindalaliselt homogeensed ruumiobjektid ning moodustavad veereservuaaride võrgustiku (Markstrom *et al.* 2015). Hüdrooloogiliste arvutusüksuste diferentseerimine tugineb mitmetel hüdrooloogilistel ja füüsikalistel omadustel, sealhulgas maapinna kõrgusel, selle kallakunurgal ja -suunal, taimestiku tüübil ja katvusel, maakasutusel, sademete, temperatuuri ja päikesekiirguse jaotusel, pinnase morfoloogial ja ala geoloogilisel ehitusel ning vooluvõrgu konfiguratsioonil. Eeldatakse, et iga HRU on nimetatud hüdrooloogiliste ja füüsikaliste omaduste ning oma hüdrooloogilise reaktsiooni suhtes homogeenne (Markstrom *et al.* 2015).

Tabel 1. PRMS mudelis kasutatud moodulid

Moodul	Mooduli nimi	Kirjeldus
Arvutusjärjestuse moodul	call_modules	Määrab arvutusjärjestuse ja aktiivsed PRMS moodulid
Valgla moodul	basin	Defineerib valgla ülesed ja HRU põhised füüsilised parameetrid ja muutujad
Aegrea andmemoodul	obs	Loeb sisse andmefailis olevad aegread, viib need teistesse moodulitesse sisenditeks sobivasse formaati ja arvutab statistilised muutujad
Vooluvõrgu moodul	cascade	Genereerib vooluteekonna arvutatud voolude suunamiseks kõrgematelt aladelt madalamatele ja põhjavee reservuaaridele
Temperatuuri moodul	temp_1sta	Arvutab ööpäeva maksimaalse, minimaalse ja keskmise õhutemperatuuri ja nende jaotuvuse
Sademetee moodul	precip_1sta	Arvutab sademete tüübi (vihm/lumi) ning nende jaotuvuse
Päikesekiirguse moodul	soltab	Arvutab potentsiaalse ööpäevase lühilainelise kiirguse päikesetõusu ja -loojangu vahelisel ajal
Päikesekiirguse jaotuse moodul	ddsolrad	Arvutab tegeliku ööpäevase lühilainelise kiirguse
Transpiratsiooni perioodi moodul	transp_tindex	Määrab igale HRU-le aktiivse transpiratsiooni perioodi
Potentsiaalse evapotranspiratsiooni moodul	potet_jh	Arvutab potentsiaalse evapotranspiratsiooni kasutades modifitseeritud Jensen-Haise võrrandit
Sademetee kinnipidamise moodul	intcp	Arvutab taimkatte poolt kinni peetava sademete hulga
Lumikatte moodul	snowcomp	Arvutab lumikattega seotud muutujad
Pindmise äravoolu moodul	srunoff_smidx	Arvutab pindmise äravoolu infiltratsiooni ja pinnase küllastatuse ülejäägina
Pinnakatte moodul	soilzone	Arvutab pinnakatte tsooniga seotud muutujad
Põhjavee moodul	gwflow	Arvutab sisse- ja väljavoolu ning vee mahu põhjavee reservuaarides
Vooluhulga moodul	stmflow	Arvutab kogu vooluhulga pindmise äravoolu, vaheäravoolu ja baasäravoolu summana

PRMS-i kontseptuaalne skeem on välja toodud joonisel 2. Mudel simuleerib valgla hüdrooloogilisi protsesse kontseptuaalsete reservuaaride süsteemi abil, mis võivad olla piiratud või teoreetiliselt ka piiramatult mahutavusega (Markstrom *et al.* 2015). Modelleerimise käigus piltlikult öeldes akumulatsiooniks igasse veereservuaari vett, et arvutada nii pinna- kui ka põhjavee äravool, evaporsatsioon ja transpiratsioon. Pindmine äravool, vaheäravool ning baasäravool moodustavad vooluveekogu vooluhulga peamise sisendi (Markstrom *et al.* 2015).

Pindmine äravool kujuneb sademete infiltratsioonini ning pinnase küllastuse ülejäägina (Markstrom *et al.* 2015). PRMS mudeli puhul jaotub pindmine äravool kaheks. Hortoni küllastumata pindmine äravool tekib olukorras, kus sademete ja lumesulavee kogus ületab pinnase infiltratsioonivõime. Küllastumata pindmist äravoolu esineb peamiselt linnapiirkondades, kus infrastruktuur takistab vee imbumist pinnasesse. Dunne'i ehk pinnase üleküllastusest tingitud pindmine äravool kujuneb, kui pinnas küllastub veega ning üleliigne vesi liigub mööda maapinda veekogusse (Markstrom *et al.* 2015).



Joonis 2. PRMS mudeli kontseptuaalne skeem (Markstrom *et al.* 2015 järgi)

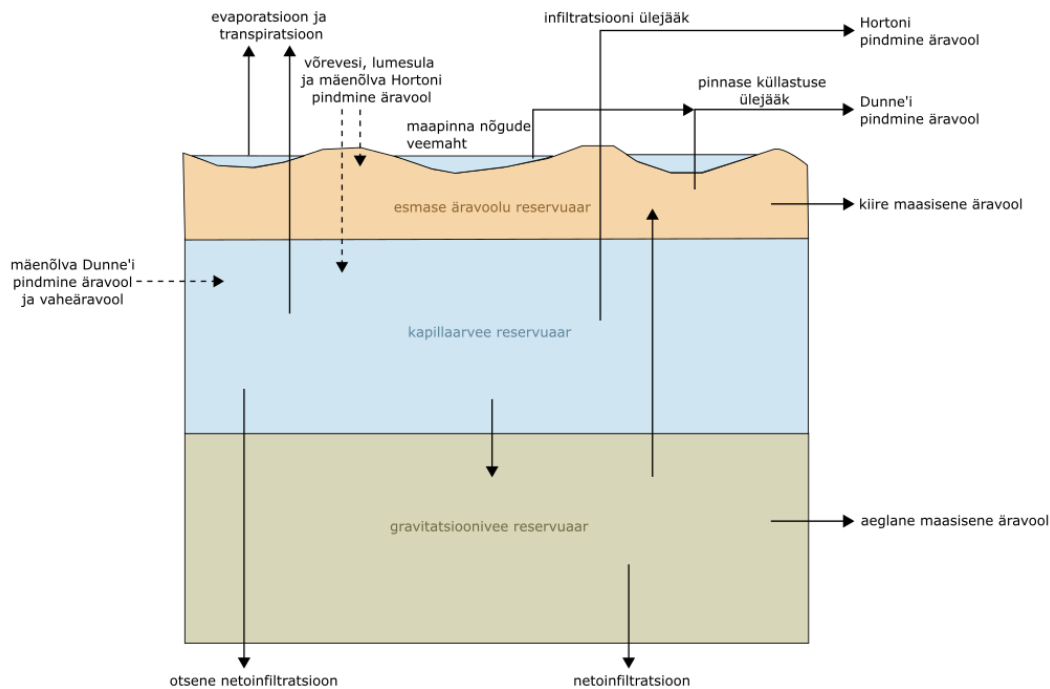
PRMS käsitleb pinnakatet esmase äravoolu, kapillaar- ning gravitatsioonivee reservuaaridena (Joonis 3). Antud reservuaaridel ei ole looduses otseseid füüsilisi vasteid, vaid need esindavad pinnase veesisaldust erinevatel küllastusastmetel (Markstrom *et al.* 2015). Esmase äravoolu reservuaar kirjeldab raskusjõu toimel lühiajalist nõrguvat gravitatsioonivett, mis kujuneb pikaajaliste sademete ja lumesulamise järgselt. Esmane äravool võib toimuda Dunne'i ning kiire maasisese äravooluna. Kiire maasisene äravool on lateraalne vee liikumine pinnase makropoorides läbi lõhede, loomaugude või metsavarise (Markstrom *et al.* 2015).

Kapillaarvee reservuaar kirjeldab väliveemahutavuse (suurim seotud ja rippuva kapillaarvee hulk, mida pinnas suudab kinni hoida) ja taimede närbumisniiskuse (pinnase veesisaldus, millest väiksema vee hulga korral ei suuda taimed enam vett omastada) vahet ehk aktiivveemahutavust iga HRU kohta (Markstrom *et al.* 2015). Kapillaarjõudude toimel ei liigu vesi vooluvõrku, vaid on valdavalt kättesaadav evapotranspiratsiooniks.

Gravitatsioonivee reservuaar kirjeldab väliveemahutavuse ja esmase äravoolu reservuaari vahet (Markstrom *et al.* 2015). Gravitatsioonivee reservuaari veesisaldust, analoogselt esmase äravoolu reservuaariga, mõjutavad gravitatsioonijõud ja hüdrauliline juhtivus. Gravitatsioonivesi võib liikuda edasi põhjavee reservuaari netoinfiltratsioonina või ka tagasi esmase äravoolu reservuaari. Gravitatsioonivesi on kättesaadav ka Dunne'i äravooluna või aeglase maasisese äravooluna. Aeglane maasisene äravool kujutab endast lateraalset äravoolu vooluveekogusse, olles osa vaheäravoolust (Markstrom *et al.* 2015).

PRMS-is käsitletakse põhjavett lineaarse veereservuaarina ning eeldatakse, et baasäravool pärineb täielikult põhjaveest (Markstrom *et al.* 2015). Summaarne sissevool igasse GWR-i arvutatakse pinnases leiduvast liigest veest, põhjaveeni jõudvast gravitatsiooniveest, sissevoolu kõrval asuvatest GWR-dest ning maapinna nõgudesse akumulereva vee infiltratsioonist. Põhjavee reservuaari väljavool toimub kas kõrval asuvasse GWR-i või baasäravooluna vooluveekogusse (Markstrom *et al.* 2015).

PRMS mudeli detailne struktuur, rakendatavad parameetrid ja muutujad, nende dimensioonid ja definitsioonid ning kasutatavad matemaatilised seosed on välja toodud mudeli dokumentatsioonis (Markstrom *et al.* 2015).



Joonis 3. Detailne PRMS mudeli pinnakatte tsooni kontseptuaalne skeem (Markstrom *et al.* 2015 järgi)

3.2.2. Sisendandmed

Piigaste oja mudel hõlmab ajaloolise Piigaste I hüdromeetriaama valglat, mis kuulus riiklikkuse seiresse aastatel 1946–2017 (Keskkonnaagentuur 2026c). Mudel koosneb ühest valglast, mille pindala on 17,5 km². Piigaste oja valgla uuringuala HRU suurus on 200 × 200 m, mis valiti lähtudes olemasolevate andmete tihedusest.

Pinnavee mudeli sisendandmetena kasutatud andmestikud hõlmasid meteoroloogilisi, hüdroloogilisi ja ruumiandmeid, mis koondati riiklikest andmebaasidest. Meteoroloogilised andmerekad koosnesid ööpäevastest sademete summast, miinimum ja maksimum õhutemperatuurist, lumikatte paksust ja tuulekiiruse vaatluste andmetest. Õhutemperatuuri, lumikatte paksuse ja tuulekiiruse vaatluste andmed pärinesid Võru meteoroloogiajaamast ning sademete aegread Piigaste sademete mõõtejaamast (Keskkonnaagentuur 2026b). Piigaste sademete aegreas 1987 oktoobrist 1988 aprillini oleva andmelünga täitmiseks kasutati vastavaid andmeid Võru meteoroloogiajaamast (Keskkonnaagentuur 2026b). Andmestik hõlmab perioodi septembrist 1951 kuni detsember 2018. Vooluhulga andmerekad (27.09.1945–28.02.2018) pärinesid Piigaste I hüdromeetriaamast ning neid kasutati mudeli poolt arvutatud valgla äravoolu kalibreerimiseks ja valideerimiseks (Keskkonnaagentuur 2026b).

Ruumiandmed, mis kirjeldasid valgala füüsikalisi omadusi, koondati riiklikest andmebaasidest ja teadusartiklitest või loodi riiklikes andmebaasides saadaoleva andmestiku põhjal (Tabel 2). Algandmete põhjal PRMS sisendfailide loomiseks kasutati tööriista *GSFlow-AcrPy* (Gardner *et al.* 2018). Tegemist on Pythonil põhineva tööriistaga, mis võimaldab automatiseerida topograafia-, mulla- ja maakatteandmete agregeerimist hüdroloogilise mudeli sisendiks sobivasse ruudustikupõhisesse struktuuri.

Algandmete töötlemise meetodikat ning kasutatud töövoogu on üksikasjalikumalt käsitlenud Hunt (2021). Kuna uuringuala kohta puudub geoloogilise baaskaardi mõõtkavas 1:50 000 koostatud andmestik, kasutati pinnakatte paksuse kaardi koostamisel riiklikes andmebaasides kättesaadavaid andmeid. Eesti looduse infosüsteemi (EELIS) andmebaasist koondati Kanepi valla territooriumil paiknevate puurkaevude andmed, mille geoloogilistest läbilõigetest eraldati pinnakatte paksuse väärtused (Keskkonnaagentuur 2026b). Lisaks kasutati analüüsis ka 1966–1979. aastatel toimunud pinna- ja põhjavee kompleksseire raames rajatud kaevude täpseid geoloogilisi kirjeldusi (Golovina *et al.* 1975). Nende andmete ning maapinna kõrgusmudeli alusel interpoleeriti uuringuala pinnakatte paksust kirjeldav rasterfail.

Tabel 2. PRMS mudeli ülesehitamiseks kasutatud andmed ja andmeallikad

Nimi	Parameeter mudelis	Andmeallikas, viide
Parameetrite sisend		
Uuringuala (valgla)	Aktiivne/mitteaktiivne HRU	Keskonnaagentuuri andmebaasi vooluveekogumite osavalglate andmekiht (Keskonnaagentuur 2026b)
Järved	HRU klassifikatsioon	Eesti topograafia andmekogu (ETAK) (Maa- ja Ruumiamet 2025a)
Kõrgusmudel	Keskmine, maksimaalne, minimaalne maapinnakõrgus, ennustatud HRU kõrgus, voolusuund jne	Maa- ja Ruumiameti maapinna kõrgusmudel (DTM) (Maa- ja Ruumiamet 2025b)
Vooluveekogu	Mudeli arvatud vooluteekonna kontroll	Eesti topograafia andmekogu (ETAK) (Maa- ja Ruumiamet 2025a)
Taimkate	HRU taimkatte klassifikatsioon, taimkatte katvuse tihedus, juurestiku sügavus	Eesti topograafia andmekogu (ETAK) (Maa- ja Ruumiamet 2025a)
Mullastik	Lõimise (aleuriit, savi, liiv) protsent, aktiivveemahtuvus, küllastunud veejuhtivus, HRU mulla klassifikatsioon	EstSoil-EH andmestik (Kmoach <i>et al.</i> 2021)
Pinnakatte paksus	Pinnakatte paksus	Arvatud lähedal asetsevate puurkaevude ja maapinna kõrgusmudeli andmestike põhjal (Maa- ja Ruumiamet 2025b; Keskonnaagentuur 2026b)
Vett mitteläbilaskev pinnas	HRU %, mis ei lase vett läbi alumistesse reservuaaridesse	Eesti topograafia andmekogu (ETAK) (Maa- ja Ruumiamet 2025a)
Andmete sisend		
Kliimaandmed	Maksimaalse, minimaalse õhutemperatuuri, sademete summa, tuulekiiruse, lumikatte paksuse aegread	Keskonnaagentuuri ajaloolised ilmaandmed (Keskonnaagentuur 2026b)
Vooluhulk	Mõõdetud vooluhulga aegread	Keskonnaagentuuri hüdrooloogilise seire andmestiku ajaloolised seireandmed (Keskonnaagentuur 2026b)

3.2.3. Kalibreerimise meetod

Mudeli kalibreerimise eesmärk oli tagada pinnavee mudeli võimalikult hea kokkulangevus mõõdetud vooluhulkadega ning saavutada usaldusväärne veebilansi komponentide kirjeldus uuritavas valglas.

Mudeli automaatseks kalibreerimiseks kasutati LUCA liidest (*Let Us Calibrate Algorithm*) (Hay, Umemoto 2007). Tegemist on USA Geoloogiateenistuse poolt välja töötatud automatiseeritud kalibreerimisprogrammiga, mis on spetsiaalselt välja töötatud PRMS mudelite optimeerimiseks (Hay, Umemoto 2007). LUCA rakendab kalibreerimisprotsessis *Shuffled Complex Evolution* globaalset optimeerimisalgoritmi (Duan *et al.* 1994). Käesolevas töös kasutati objektiivfunktsioonina Nash-Sutcliffe efektiivsuse koefitsienti (NSE), mis hindab mudeli arvutatud ja mõõdetud vooluhulkade vastavust (Nash, Sutcliffe 1970).

Esiolgu oli töös käsitletud PRMS mudel konstrueeritud ühe perioodiga. Mudeli kalibreerimine viidi läbi ajavahemikus 01.01.1952–31.12.1985 ning valideerimine 01.01.1986–31.12.2017. Siiski, võttes arvesse mudeli tavapäratult pikka tööperioodi (66 aastat), otsustati mudel luua kahe tööperioodiga, et teadlikumalt arvestada mudeli tööperioodi jooksul toimunud kliimamuutustega.

Mudeli kalibreerimiseks kasutati ööpäevaseid mõõdetud vooluhulga andmeid ajavahemikus 1952–2017. Piigaste oja mudel kalibreeriti ja valideeriti kahe eraldi perioodina. Esimesel perioodil viidi kalibreerimine läbi ajavahemikus 01.01.1952–31.12.1967 ning valideerimine 01.01.1968–31.12.1981. Teise perioodi kalibreerimine toimus ajavahemikus 01.01.1980–31.12.1995 ning valideerimine 01.01.1996–31.12.2017.

Kokku kalibreeriti mõlemal perioodil 30 parameetrit. Neist viis olid õhutemperatuuri ja sademete jaotuvuse parameetrid, kaks päikesekiirguse parameetrid, kolm parameetrit kirjeldasid sademete kinnipidamist taimestiku poolt (*interception*), üks evapotranspiratsiooni ja sublimatsiooni parameeter, kümme olid pinnakatte tsooni parameetrid, neli pindmise äravoolu parameetrid, kolm lumikatte parameetrid ning kaks põhjavee parameetrid.

3.2.4. Valideerimise meetodid

Valdavalt on teadusartiklites rakendatud hüdroloogiliste mudelite ennustusvõime hindamiseks kaks enim kasutatud statistilist näitajat, milleks on Nash-Sutcliffe efektiivsuse ja Kling-Gupta efektiivsuse koefitsiendid.

Nash-Sutcliffe efektiivsuse koefitsient arvutatakse modelleeritud vooluhulga aegrea vea dispersiooni ja mõõdetud aegrea dispersiooni suhtena (Nash, Sutcliffe 1970). Kuna NSE koefitsient põhineb ruutvigadel, on see tundlik äärmuslike väärtuste suhtes ja võib anda optimaalsest madalamaid tulemusi, kui andmestik sisaldab suuri kõrvalekaldeid. NSE väärtus jääb vahemikku $(-\infty, 1]$, kus väärtus 1 näitab ideaalset vastavust mõõdetud ja arvutatud vooluhulkade vahel. Väärtus 0 tähendab, et mudeli prognoos ei ole parem kui mõõdetud vooluhulkade keskmise kasutamine, ning negatiivsed väärtused viitavad sellele, et mudel kirjeldab andmeid halvemini kui lihtne keskmisel põhinev hinnang (Knoben *et al.* 2019). Nash-Sutcliffe efektiivsuse koefitsient on defineeritud järgmiselt:

$$\text{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{\text{obs}} - Q_i^{\text{sim}})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{\text{obs}} - \bar{Q}^{\text{obs}})^2} \quad (1)$$

kus

Q_i^{obs} on mõõdetud vooluhulk,

Q_i^{sim} on modelleeritud vooluhulk,

\bar{Q}^{obs} on mõõdetud vooluhulkade keskmine ning

n on vaatluste arv.

Kling-Gupta efektiivsuse koefitsient (KGE) ühendab endas kolm komponenti: Pearsoni korrelatsioonikordaja mõõdetud ja modelleeritud väärtuste vahel r , standardhälvete suhte ehk varieeruvuse komponendi α ning keskmiste suhte ehk nihke komponendi β (Gupta *et al.* 2009). Võrreldes Nash-Sutcliffe'i efektiivsuse koefitsiendiga peetakse Kling-Gupta efektiivsust sageli informatiivsemaks, kuna see võimaldab mudeli suutlikkust hinnata eraldi korrelatsiooni, varieeruvuse ja süstemaatilise nihke komponentide alusel (Mathevet *et al.* 2024). Kling-Gupta efektiivsuse koefitsendi valem on järgmine:

$$\text{KGE} = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2}. \quad (2)$$

Kalibreeritud mudeli võimekust hinnati lisaks ka Kling-Gupta efektiivsuse (KGE) parameetril põhineva *benchmark*-i abil, mis tugineb mõõdetud äravoolu pikaajalistel ööpäevastel vooluhulga väärtustel. Selleks analüüsiti mõõdetud äravoolu aegridu ajavahemikust 1952–2017 ning iga kalendripäeva kohta arvutati kõigi aastate keskmine vooluhulk. Selle tulemusena saadi keskmine aasta hüdrograaf, mis kirjeldab antud valgla äravoolu sesoonset dünaamikat, jättes kõrvale aastate vahelise muutlikkuse ja sündmuspõhised äravoolureaktsioonid.

Seejärel kasutati keskmise aasta hüdrograafi päevaväärtusi kogu vaatlusperioodi (1952–2017) referentsaegridade koostamiseks, omistades igale päevale vastava kalendripäeva keskmise väärtuse. *Benchmark*'i väärtus saadi referentsaegrea ja tegelikult mõõdetud äravoolumooduli andmete võrdlemisel kogu perioodi ulatuses, arvutades selle põhjal Kling-Gupta efektiivsuse. Saadud KGE väärtus määratleb lävendi, mille saavutab mudel juhul, kui see suudab taastada üksnes äravoolu tüüpilise sesoonse mustri. Kui kalibreeritud mudel ületab selle lävendi nii kalibreerimisel kui ka valideerimise perioodil, on võimalik eeldada, et mudel suudab kirjeldada lisaks sesoonsele mustriks ka täiendavaid hüdroloogilisi protsesse.

Käesolevas töös kasutati loodud mudeli valideerimiseks mitmeid mudeli erinevaid komponente kirjeldavate parameetrite paralleelseid hinnanguid, rakendades mudelist sõltumatuid meetodeid ja vaatlusi.

Selleks, et analüüsida mudeli võimekust usaldusväärset kirjeldada äravoolukomponentide jaotuvust, rakendati käesolevas töös hüdrograafi lõikamist. Hüdrograafi lõikamine on mõõdetud vooluhulga eraldamine kaheks või enamaks komponendiks. Kõige levinum on hüdrograafi eraldamine kaheks komponendiks, mille tulemusel jaguneb vooluhulk otseäravooluks (ehk pindmine äravool ja vaheäravool) ning baasäravooluks (Mei, Anagnostou 2015).

Baasäravoolu eraldamiseks on välja töötatud mitmeid erinevaid analüütilistele alustele ja kontseptuaalsetele mudelitele baseeruvaid regressioonimudeleid (Boussinesq 1904; Maillet 1905; Coutagne 1948; Wittenberg 1999). Käesoleva töö raames rakendati hüdrograafi lõikamiseks MATLAB programmi tööriista *HYDRORECESSION* (Arciniega-Esparza *et al.* 2017). Antud tööriist võimaldab teostada vooluhulga regressioonianalüüsi kombineerides erinevaid meetodeid (Brutsaert, Nieber 1977; Vogel, Kroll 1992; Aksoy, Wittenberg 2011), mudeleid (Boussinesq 1904; Maillet 1905; Coutagne 1948; Wittenberg 1999) ning parameetrite hindamise meetodeid (*parameter-fitting techniques*) (lineaarne regressioon, punktikaupa miinimum, vähimruut ning andmete rühmitamine). Nii mõõdetud vooluhulgast eraldatud baasäravoolu, kui ka modelleeritud baasäravoolu kohta arvutati baasäravoolu indeks (BFI; Gustard *et al.* 1992), kasutades järgmist valemit:

$$BFI = \frac{Q_b}{Q_t} \quad (3)$$

kus

Q_b on baasäravoolu vooluhulk ja

Q_t on kogu vooluhulk.

Üheks oluliseks valgla veebilansi komponendiks on ka netoinfiltratsioon ehk põhjavee toitumine. Selleks, et analüüsida modelleeritud netoinfiltratsiooni usaldatavust, kasutati põhjavee toitumise hinnangu arvutamiseks *Water Table Fluctuation* (WTF) meetodit, mis kasutab puurkaevude põhjaveetaseme aegridade muutusi põhjavee toitumise kvantifitseerimiseks (Healy, Cook 2002). Antud metoodika eeldab, et põhjaveetaseme tõusude taga on valdavalt infiltratsioonisündmused, ning et põhjaveetaseme muutuse ja toitumise vahel eksisteerib lineaarne seos. Meetod töötab eeldusel, et vee liikumine uuritavas põhjaveekihis on piisavalt aeglane, et põhjaveekihti sissevoolava vee hulk ületab sealt ära voolava vee hulka. Vastasel juhul muutub põhjaveetaseme graafik sujuvaks ning üksikud infiltratsioonisündmused ei ole sellest eraldatavad. Netoinfiltratsiooni arvutamiseks kasutati põhjaveetaseme aegridu vahemikus 1968–1991 neljast Kvaternaari veekompleksi avavast puurkaevust: 11141, 11329, 11333 ning 11337 (Eesti Geoloogiakeskus OÜ 2017). Kuna analüüsis kasutatud puurkaevude puhul puudus võimalus arvutada kaevu täpne veeand, arvutati igale kaevu jaoks põhjavee toitumine kasutades kaheksat veeanni väärtust (0,07; 0,09; 0,12; 0,15; 0,18; 0,21; 0,24; 0,27) (Loheide *et al.* 2005). Põhjavee toitumine arvutati järgmise valemi alusel:

$$R = S_y \times \frac{\Delta t}{\Delta h} \quad (4)$$

kus

S_y on veeand,

Δt on ajavahemik (päevades) minimaalse ja järgneva maksimaalse põhjaveetaseme vahel ning

Δh on põhjaveetaseme muutus.

Lisaks netoinfiltratsioonile on üheks oluliseks veebilansi komponendiks ka koguaurumine ehk evapotranspiratsioon. Käesoleva töö raames loodud PRMS mudel kasutab potentsiaalse evapotranspiratsiooni arvutamiseks Jensen-Haise võrrandit (Jensen, Haise 1963). Jensen-Haise võrrand on defineeritud järgmiselt:

$$ET_0 = (C_T T + C_S) R_S \quad (5)$$

kus

T on ööpäevane keskmine õhutemperatuur,

R_S on päikesekiirgus ning

C_T, C_S on empiirilised koefitsiendid.

Modelleeritud potentsiaalse evapotranspiratsiooni tulemuste analüüsimiseks rakendati käesolevas töös potentsiaalse koguaurumise arvutamiseks ÜRO Toidu- ja Põllumajandusorganisatsiooni ehk FAO poolt loodud tarkvara *ET₀ Calculator* (Allen *et al.* 1998). Antud tarkvara arvutab potentsiaalset evapotranspiratsiooni meteoroloogiliste andmete (õhutemperatuur, suhteline õhuniiskus, tuule kiirus ja päikesekiirgus) põhjal, kasutades modifitseeritud Penman-Monteith võrrandit (Penman 1963; Monteith 1965). Potentsiaalset evapotranspiratsiooni arvutati järgmise valemi alusel:

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (6)$$

kus

R_n on kiirgusbilanss taimestiku pinnal (MJ/m² ööpäevas),

G on mulla soojusvoog (MJ/m² ööpäevas),

T on keskmine ööpäevane õhutemperatuur 2 m kõrgusel (°C),

u_2 on tuulekiirus 2 m kõrgusel (m/s),

e_s on küllastunud auru rõhk (kPa),

e_a on tegelik auru rõhk (kPa),

Δ on aururõhu kõvera kalle (kPa/°C) ning

γ on psühromeetria konstant (kPa/°C).

Lisaks eespool mainitud mitmesugustele arvutuslikele valideerimismeetoditele viidi modelleerimise aluseks oleva kontseptuaalse mudeli loomiseks ja täiendamiseks läbi vooluhulga ja veekeemia näitajate (eelkõige erielektrijuhtivus) mõõtmine Piigaste oja erinevates punktides ja sellega seotud kraavides. Vooluhulkade mõõtmiseks kasutati SonTek FlowTracker2 mõõteseadet ning vee elektrijuhtivuse määramiseks YSI Professional Plus multimeetrit. Mõõtmiste käigus kogutud veeproovide isotoopkoostist ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) analüüsiti Eesti Geoloogiateenistuse Arbavere uurimiskeskuses kasutades laser-spektroskoopia meetodit (Picarro L2130-i isotoopanalüsaator).

Lisaks multimeetriga mõõdetud erielektrijuhtivuse andmetele olid kontseptuaalse mudeli loomiseks kasutuses ka erielektrijuhtivuse aegread, mis pärinevad Piigaste oja uuringuala keskjooksul asuvast Eijkelkamp CTD (*Conductivity-Temperature-Depth*) automaatandurist (Joonis 1). Täiendavalt olid käesolevas töös kontseptuaalse mudeli loomiseks kasutusel ka ilmaandmed alates 20.06.2024, mis pärinevad uuringualal asuvast HOBORX3000 ilmajaamast (Joonis 1). Antud ilmajaam mõõdab tunnise ajasammuga õhurõhku, päikesekiirgust, sademete

hulka, õhutemperatuuri, suhtelist õhuniiskust, tuule ja tuulepuhangu kiirust ning selle suunda, kastepunkti ning referents-*evapotranspiratsiooni*.

3.2.5. *Kliimamuutuste mõju hindamise meetodika*

Käesoleva töö üheks eesmärgiks on hinnata 20. sajandil toimunud kliimamuutuste mõju Piigaste oja valgale. Üheks võimaluseks kliimamuutuste tuvastamiseks on läbi hüdroloogilise režiimi komponentide režiimihete. Nende tuvastamiseks aegridades kasutati STARS (*Sequential T-test Analysis of Regime Shifts*) meetodit, tuntud ka kui Rodionovi test (Rodionov 2004). Meetod põhineb järjestikusel t-testil (*Sequential T-test*), milles võimaliku režiimihke tuvastamiseks võrreldakse kahe järjestikuse režiimi keskmisi Studenti t-testi abil. Meetodi rakendamisel määratakse esmalt minimaalne režiimi pikkus (*cut-off length*) l ning t-testi olulisustase (*significance level of the t-test*) p , mille alusel arvutatakse kahe järjestikuse režiimi keskmiste vaheline kriitiline erinevus (*critical difference*). Iga uut vaatlust võrreldakse senise režiimi keskmisega ning kui vastav vaatlus ületab määratud kriitilise erinevuse, käsitletakse seda kui uue režiimi algusena. Võimaliku režiimihke kinnitamiseks kasutatakse režiimihke indeksit (*Regime Shift Index, RSI*), mis kujutab endast uue režiimi hüpoteetilisest keskmisest arvutatud normaliseeritud hälvete kumulatiivset summat. Kui vastav RSI jääb kogu etteantud ajaperioodi jooksul positiivseks, loetakse nihe statistiliselt oluliseks. Käesolevas töös kasutati parameetriseadistust $l = 10$ aastat ning $p = 0,05$, võimaldades keskenduda pikemaajalistele ning klimatoloogiliselt tõlgendatavatele muutustele, mitte lühiajalisele juhuslikule varieeruvusele. Sama parameetriseadistust on rakendatud ka varasemates Eesti kliima- ja hüdroloogiliste aegridade režiimihete uuringutes, sealhulgas Jaagus *et al.* (2017), toetades käesoleva töö tulemuste võrreldavust varasemate uuringutega.

3.2.6. *Tehisintellekti kasutamine*

Käesoleva töö koostamisel kasutati tehisarurakendust ChatGPT (OpenAI 2026) abivahendina üksnes tööprotsessi toetavates etappides. Rakendust kasutati teksti keeletoimetuses, teabekirjanduse otsingu suunamises ning jooniste genereerimiseks vajalike Pythoni skriptide koostamise eesmärgil. Tehisintellekti ei rakendatud andmete analüüsil ega uurimistulemuste genereerimiseks. Tehisaru väljundeid ei kasutatud töös tsiteerituna, vaid autori tööprotsessi toetava abivahendina.

4. Tulemused

4.1. Oja äravoolu kontseptuaalne mudel

Modelleerimise aluseks oleva kontseptuaalse mudeli loomiseks ja täiendamiseks läbi viidud vooluhulga mõõtmiste ning veekeemia parameetrite määramiste tulemused on esitatud joonisel 4. Mõõtmisi viidi läbi kahel korral, 2025. aasta novembris ning 2026. aasta märtsis, eesmärgiga teha mõõtmised madalvee- ning suurveeperioodil. Sügisel võeti igast mõõtepunktist lisaks ka veeproovid, võimaldades analüüsida vee isotoopkoostist.

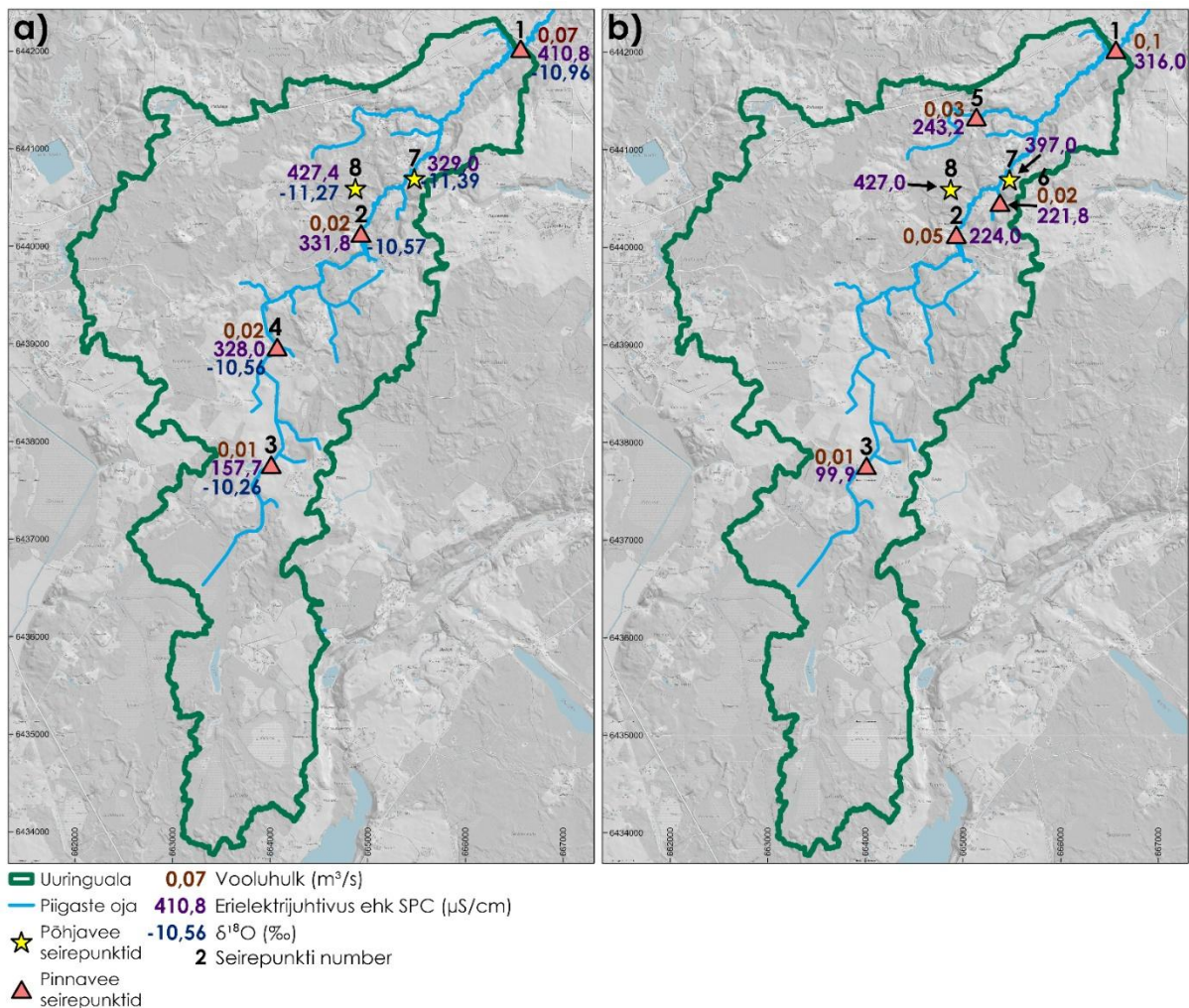
Tulemustest on võimalik täheldada, et Piigaste oja lähte piirkonnas (seirepunkt nr 3) on vee koostises selgelt suurem pinnavee, eriti soovee osakaal. Sellele viitavad nii madal erielektri juhtivus (sügisel 157,7 $\mu\text{S}/\text{cm}$, kevadel 99,9 $\mu\text{S}/\text{cm}$), kui ka raskem hapniku isotoopkoostis (sügisel $\delta^{18}\text{O}$ -10,26 ‰). Madal erielektri juhtivus on iseloomulik väikese mineraalainete sisaldusega veele, viidates lühemale kokkupuutele mineraalpinnasega ning suuremale pinnavee ja sademete mõjule. Põhjavee osakaalu hindamiseks võeti põhjavee isotoopproovid lähedal asuvatest puurkaevudest (seirepunktid nr 7 ja 8), kus $\delta^{18}\text{O}$ väärtused olid vastavalt -11,39 ‰ ning -11,27 ‰. Seega osutavad ka isotoopväärtused sellele, et ülesvoolu aladel domineerib sademetest ja soost pärinev vesi, mille isotoopkoostis erineb selgelt põhjavee omast. Ülemjooksul mõõdetud vooluhulk oli nii sügisel kui ka kevadel 0,01 m^3/s .

Liikudes allavoolu (seirepunkt nr 2) on võimalik täheldada põhjavee osakaalu suurenemist. See avaldub erielektri juhtivuse kasvus (sügisel 331,8 $\mu\text{S}/\text{cm}$, kevadel 224,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$), mis viitab vee pikemale kokkupuutele setete ja kivimitega ning sellest tulenevalt ka suuremale lahustunud ainete sisaldusele. Sama suundumus ilmneb ka isotoopandmetes ($\delta^{18}\text{O}$ -10,57 ‰), mis näitavad pinnaveelise komponendi vähenemist ning põhjaveelise komponendi osakaalu kasvu. Võrreldes ülemjooksuga on võimalik täheldada ka vooluhulga kasvu, olles sügisel 0,02 m^3/s ning kevadel 0,05 m^3/s .

Baasaravoolu osakaalu suurenemine ei piirdu üksnes ojasängiga, vaid on silmnähtav ka Piigaste oja jõudvates kraavides. Sügisel teostati täiendavalt mõõtmisi ühes kraavis (seirepunkt nr 4), kus erielektri juhtivus oli 328,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ja isotoopväärtus -10,56 ‰ ning kevadel kahes kraavis (seirepunktid nr 5 ja 6), kus erielektri juhtivused olid vastavalt 221,8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ja 243,2 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Seega näitavad nii erielektri juhtivuse kui isotoopanalüüsi andmed, et ka kraavid valglast ei toitu vaid pindmisest äravoolust, vaid nende äravoolus esineb ka baasaravoolu komponent. Samuti oli võimalik kevadistel mõõtmistel (seirepunktid nr 5 ja 6) täheldada kraavides

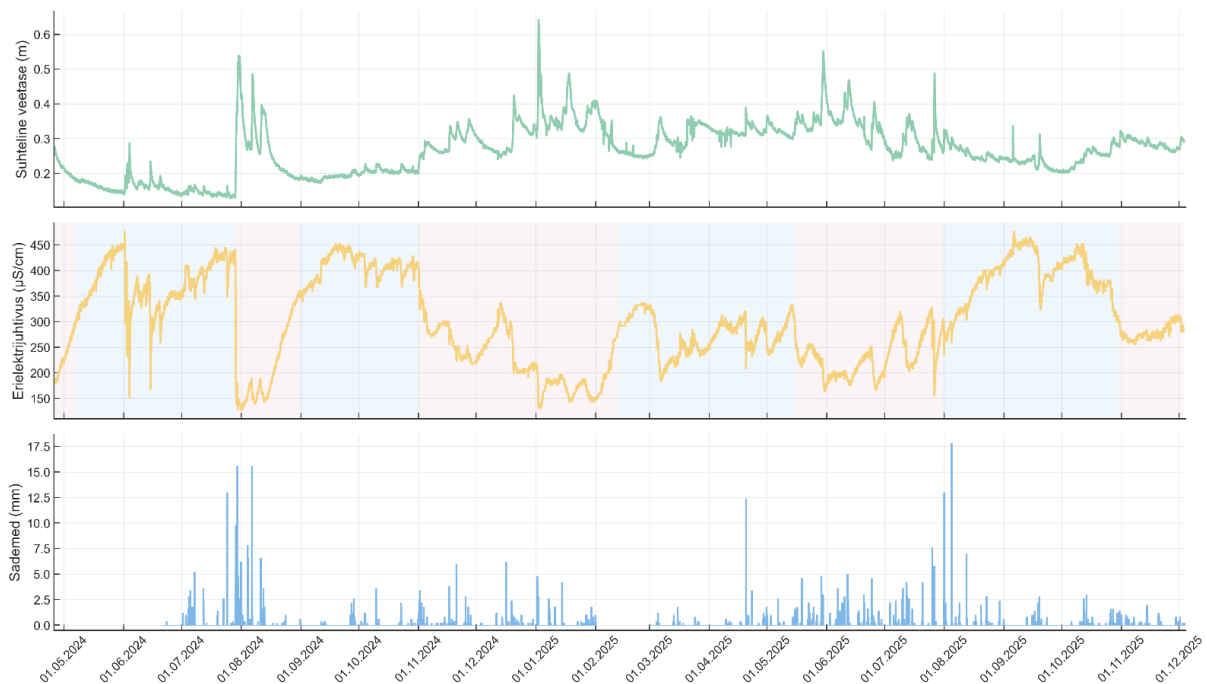
märkimisväärset vooluhulka, vastavalt $0,03 \text{ m}^3/\text{s}$ ning $0,02 \text{ m}^3/\text{s}$, viidates kraavide kaudu oja jõudvale vee hulgal kui olulisele veebilansi komponendile.

Suurim baasärvoolu osakaal on täheldatav uuringuala alamjooksul asuvas proovipunktis (seirepunkt nr 1), kus täiendavalt on oluline mõju ka oja oru geomorfoloogial. Allavoolu löikub oja sügavamale orgu, mille tulemusena suureneb selle hüdrauliline seotus Kvaternaari põhjaveekihiga ning põhjavee juurdevool oja. Sügisel teostatud mõõtmisel oli uuringuala alamjooksul asuvas mõõtmispunktis erielektrijuhtivus $410,8 \mu\text{S}/\text{cm}$ ja isotoopväärtus $-10,96 \%$ ning kevadel oli erielektrijuhtivus $316,0 \mu\text{S}/\text{cm}$. Käsitatud mõõtmistulemuste põhjal oli seirepunktis nr 1 erielektrijuhtivus mõlemal mõõtmiskorral uuringuala suurim ning sügisel määratud $\delta^{18}\text{O}$ väärtus kõigist proovipunktidest kõige kergem.



Joonis 4. (a) 2025 aasta novembris läbi viidud vooluhulkade mõõtmiste, veekeemia parameetrite määramise ning isotoopanalüüsi tulemused. Aluskaart (Maa- ja Ruumiamet 2025b). (b) 2026 aasta märtsis läbi viidud vooluhulkade mõõtmiste ning veekeemia parameetrite määramise tulemused. Aluskaart (Maa- ja Ruumiamet 2025b).

Piigaste oja äravoolu baasäravoolu osakaalu näitlikustab ka oja uuringuala keskjooksul paikneva (Joonis 1, Joonis 4 – seirepunkt 2) CTD automaatanduri erielektri juhtivuse aegrida vahemikus 25.04.2024 kuni 03.12.2025 (Joonis 5). Erielektri juhtivuse andmete põhjal on võimalik interpreteerida Piigaste oja äravoolus kahte vahelduvat perioodi: periood, kus domineeris baasäravool ning periood, kus domineeris otseäravool (pindmine äravool ja vaheäravool). Perioodid, kus oja äravoolus domineeris baasäravool kattuvad ajavahemikega, mil esinesid väiksemad sademete hulgad. Seevastu suurema sademete hulga ajavahemikud kirjeldavad perioode, kus oja äravoolus domineeris otseäravool. Erandlikuks osutus 2025. aasta talveperiood, mil otseäravoolu domineerimine ei olnud seotud suurenenud sademete hulga, vaid peamiselt lumesulaprotsessidega. Kogu aegrea vältel (ligikaudu 21 kuud) kestis otseäravoolu poolt domineeritud periood kokku hinnanguliselt 10 kuud ning suurema baasäravoolu osakaaluga periood hinnanguliselt 11 kuud.



Joonis 5. CTD automaatanduri suhtelise veetaseme (anduri kohal olev veetase), erielektri juhtivuse ning uuringuala ilmajaama sademete aegread. Erielektri juhtivuse graafikul on sinise taustaga märgitud perioodid, kus domineeris baasäravool ning roosa taustaga perioodid, kus domineeris otseäravool.

4.2. Sademe-äravoolumudeli tulemused

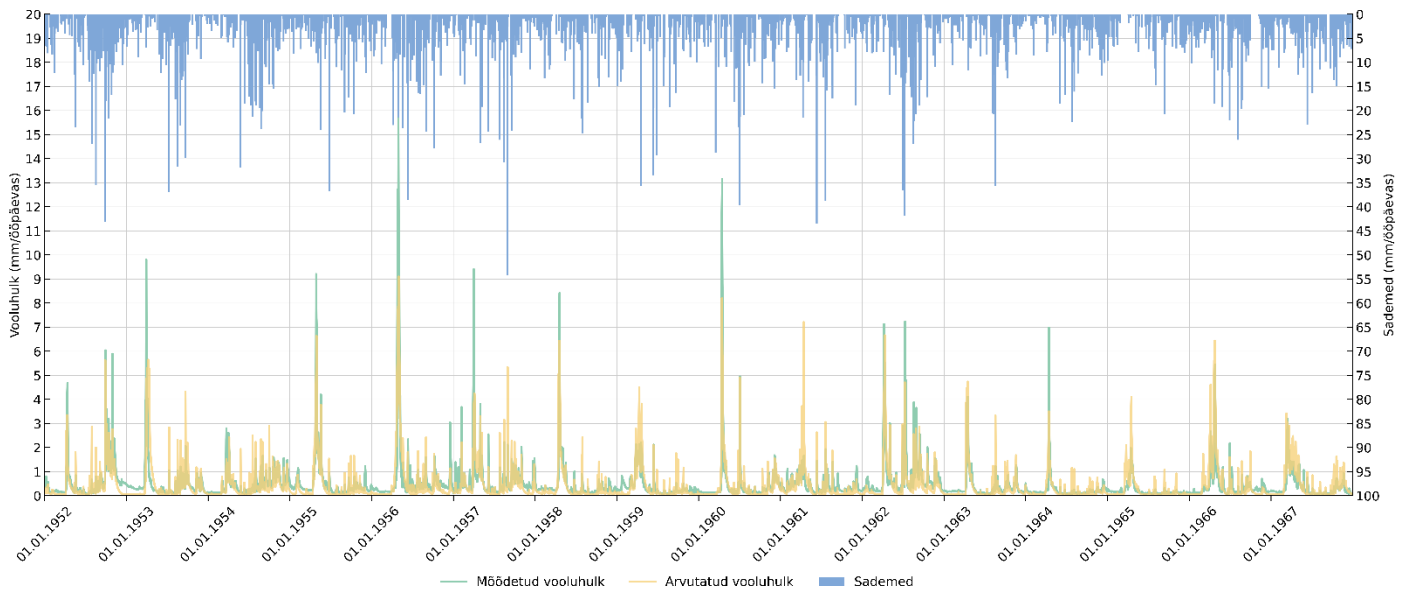
Käesoleva töö käigus konstrueeritud Piigaste oja pinnavee mudeli tööperiood on ajavahemik 01.01.1952–31.12.2017. Vastav mudel on üles ehitatud kahe kalibreerimis- ja valideerimisperioodiga: 01.01.1952–31.12.1981 ja 01.01.1980–31.12.2017.

Mudeli kalibreerimise ja valideerimise aluseks on Piigaste I hüdromeetriaaamas mõõdetud vooluhulkade aegrida (Joonised 6–9). Ajaperioodil 1952–2017 oli mõõdetud vooluhulga ööpäevane keskmine väärtus 0,49 mm/ööpäevas ja mediaan 0,29 mm/ööpäevas. Tüüpiline varieeruvus jäi vahemikku 0,17–0,51 mm/ööpäevas, kus maksimaalsed (15,83 mm/ööpäevas) ja minimaalsed (0,05 mm/ööpäevas) väärtused kirjeldavad üksikuid sündmusi. Modelleeritud vooluhulkade puhul oli perioodi tüüpiline varieeruvus väiksem, jäädes vahemikku 0,09–0,42 mm/ööpäevas. Keskmine ööpäevane väärtus oli 0,42 mm/ööpäevas ja mediaan 0,16 mm/ööpäevas. Modelleeritud vooluhulga ööpäevane miinimumväärtus oli 0,05 mm/ööpäevas ning maksimumväärtus 10,85 mm/ööpäevas.

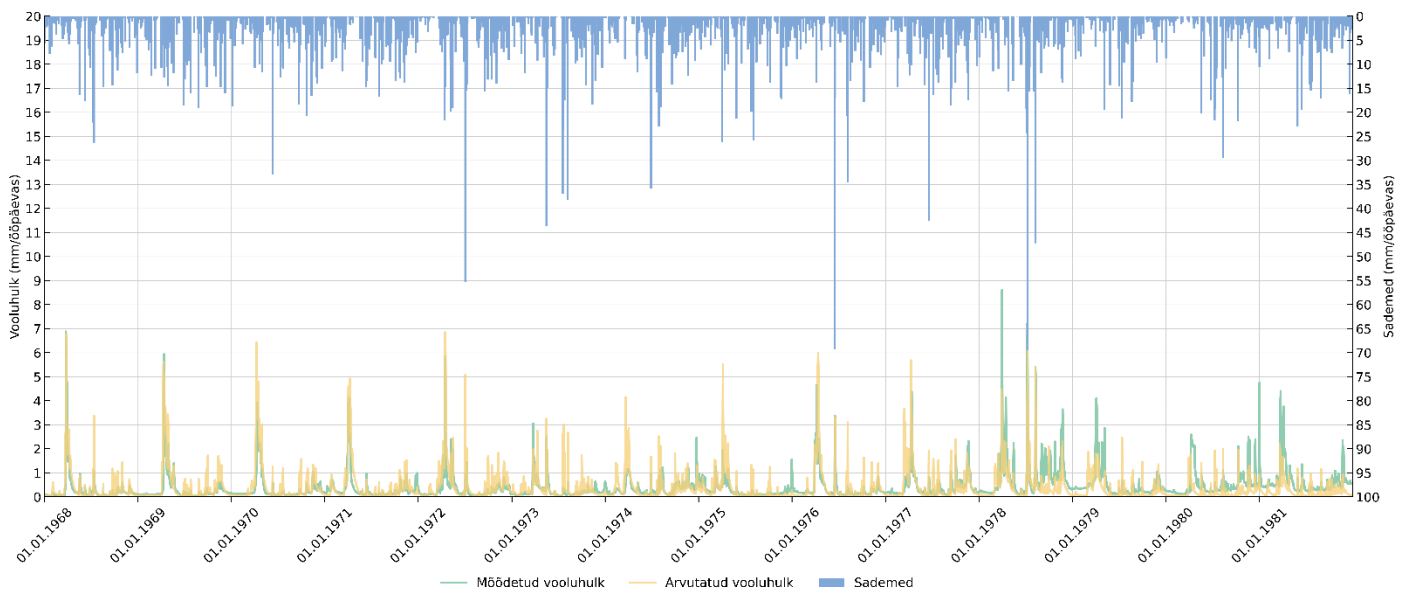
Käesolevas töös hinnati kalibreerimis- ja valideerimistulemusi statistiliselt, kasutades Nash-Sutcliffe'i efektiivsuse (NSE) ja Kling-Gupta efektiivsuse (KGE) koefitsiente. Täiendavalt viidi läbi ka Kling-Gupta efektiivsuse koefitsiendil põhinev *benchmark*'i analüüs. Teostatud analüüsi tulemuste põhjal oli antud KGE lävend Piigaste oja hüdromeetriaaamas mõõdetud vooluhulga puhul 0,24.

Mudeli esimese kalibreerimisperioodi arvutatud ja mõõdetud vooluhulgad on välja toodud joonisel 6 ning valideerimisperioodi vastavad vooluhulgad joonisel 7. Esimese kalibreerimisperioodi puhul andis mudeli ja mõõdetud ööpäevaste vooluhulkade võrdlus KGE väärtuse 0,74 ja NSE väärtuse 0,64. Valideerimisperioodil olid vastavad väärtused 0,64 ja 0,29. Seega ületavad nii kalibreerimis- kui ka valideerimisperioodil KGE väärtused seatud lävendi.

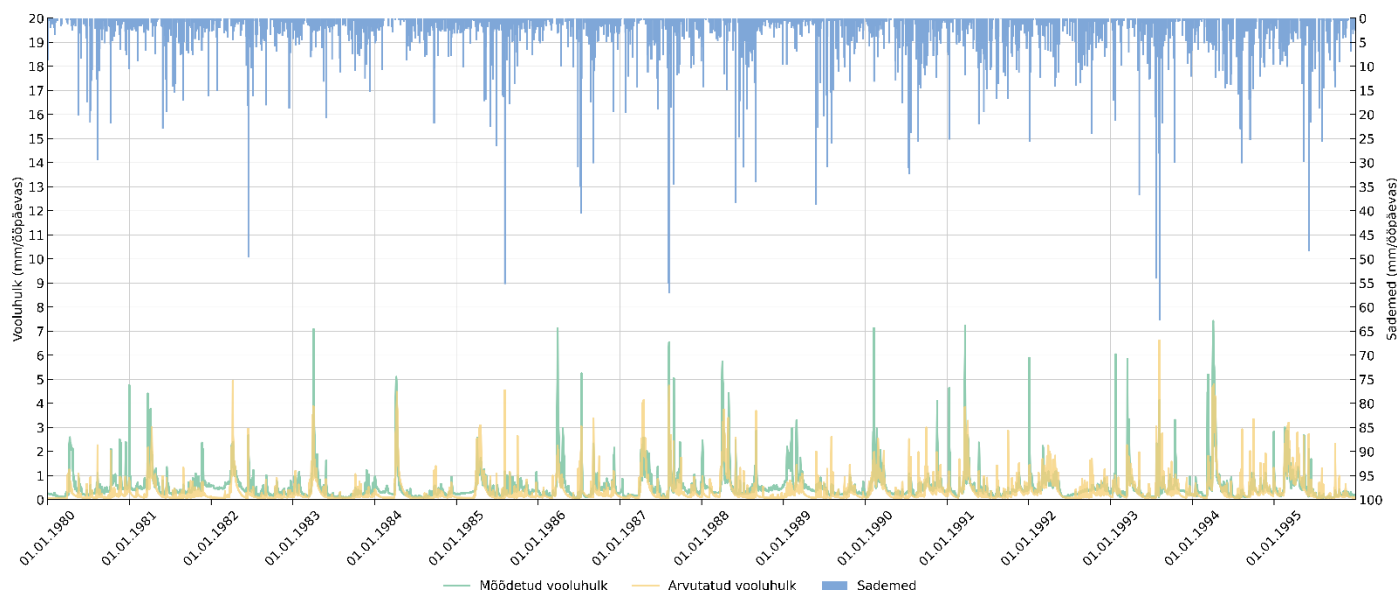
Mudeli teise kalibreerimisperioodi arvutatud ja mõõdetud vooluhulgad on välja toodud joonisel 8 ning valideerimisperioodi vastavad vooluhulgad joonisel 9. Teise kalibreerimisperioodi puhul andis mudeli ja mõõdetud ööpäevaste vooluhulkade võrdlus KGE väärtuse 0,51 ja valideerimisperioodil väärtuse 0,45, ületades mõlemal puhul seatud KGE lävendi. NSE väärtused olid vastavalt 0,37 ja -0,24. Negatiivne NSE väärtus valideerimisperioodil on tingitud üksikutel aastatel (2003–2006) mudeli poolt ülehinnatud kevadise lumesulaperioodi suurvee vooluhulga tippudest, mis mõjutab oluliselt kogu perioodi tulemusnäitajat, kuid ei peegelda mudeli üldist toimivust ei sama perioodi teistel aastatel ega ka muudel ajavahemikel.



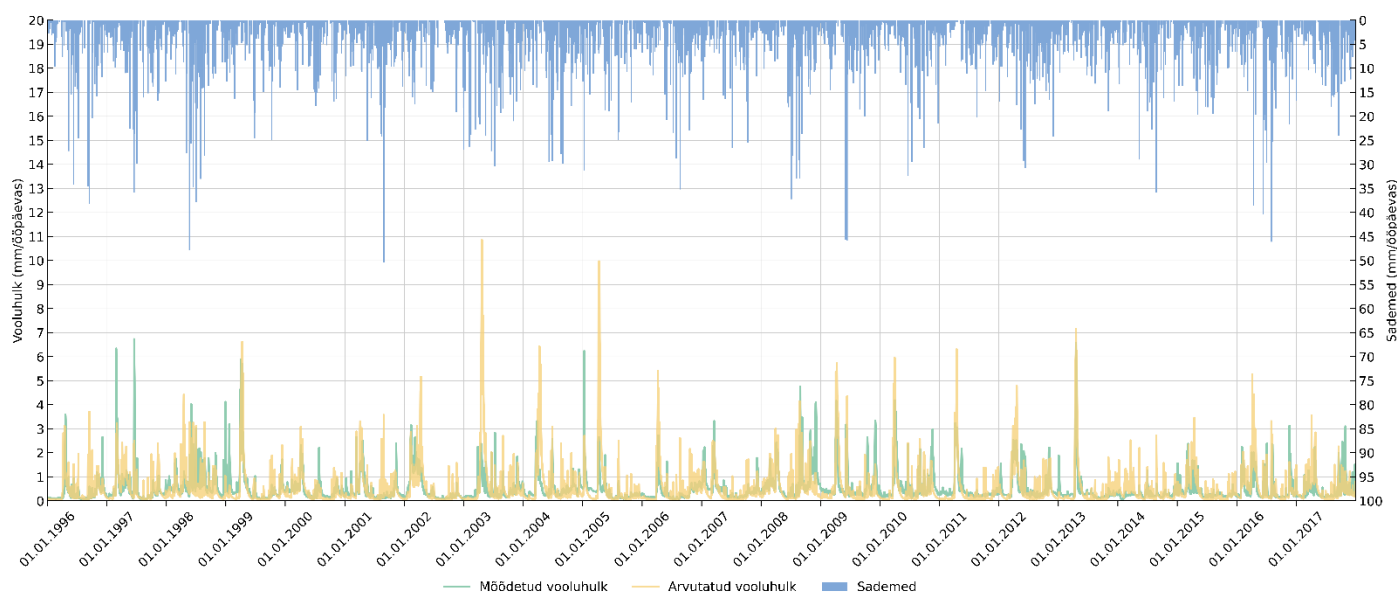
Joonis 6. Mudeli esimese kalibreerimisperioodi (1952–1967) mõõdetud ja arvutatud vooluhulkade hüdrograaf koos sademete aegrega Piigaste sademete mõõtejaamast (Keskkonnaagentuur 2026b).



Joonis 7. Mudeli esimese valideerimisperioodi (1968–1981) mõõdetud ja arvutatud vooluhulkade hüdrograaf koos sademete aegrega Piigaste sademete mõõtejaamast (Keskkonnaagentuur 2026b).



Joonis 8. Mudeli teise kalibreerimisperioodi (1980–1995) mõõdetud ja arvutatud vooluhulkade hüdrograaf koos sademete aegrega Piigaste sademete mõõtejaamast ja Võru meteoroloogiajaamast (Keskkonnaagentuur 2026b).



Joonis 9. Mudeli teise valideerimisperioodi (1996–2017) mõõdetud ja arvutatud vooluhulkade hüdrograaf koos sademete aegrega Piigaste sademete mõõtejaamast (Keskkonnaagentuur 2026b).

4.3. Piigaste oja valgla äravoolukomponentide jaotus ja põhjavee toitumine

Piigaste oja valgla äravoolukomponentide jaotus näitab enamjaolt põhjaveelise äravoolu domineerimist kogu vaadeldud perioodi vältel (Joonis 10). Kogu vooluhulgast moodustab valdava osa baasäravool, märkimisväärse osa moodustab ka pindmine äravool ning vaheäravoolu panus on üldiselt väike.

Põhjavee osakaalu koguperioodi mediaan Piigaste oja valglas oli 69 %, kinnitades oja märkimisväärset põhjaveelist toidet. Enamike aastate ja kuude jooksul jäi baasäravoolu osakaal vahemikku 55–83 %. Minimaalsed põhjavee osakaalud (kuni 24 %) esinesid üksikutes äärmuslikes suurveetingimustes, kus lühiajaliselt suurenesid hüppeliselt pindmise ja vaheäravoolu osakaalud. Maksimaalsed põhjavee osakaalud (kuni 100 %), on peamiselt iseloomulikud nii talviste kui suviste madalveeperioodidele.

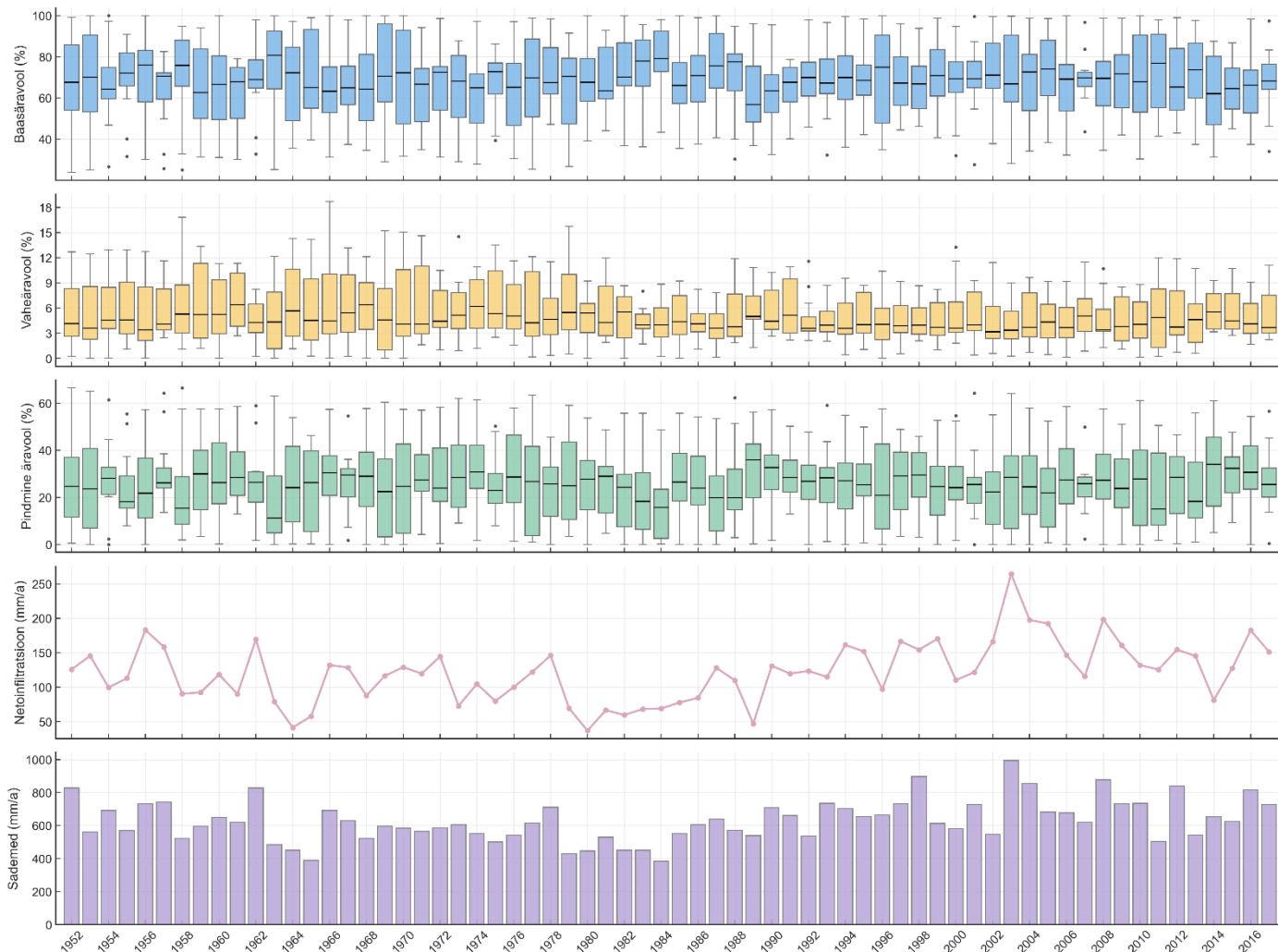
Vaheäravoolu osakaalu mediaan oli 4 % ning tüüpiline varieeruvus jäi vahemikku 3–8 %. Suurem vaheäravoolu osakaal (kuni 19 %) esineb peamiselt lühiajaliselt eelkõige suurvee ja intensiivsete sademete perioodidel, mil suurenes vee lateraalne liikumine mulla ülemistes kihtides ja mööda hästi vett juhtivaid kihte enne põhjaveeni jõudmist.

Pindmise äravoolu osakaalu mediaan Piigaste oja valglas oli 26 % ning tüüpiline varieeruvus jäi vahemikku 13–38 %, moodustades vooluhulgast märkimisväärse osa. Maksimaalsed osakaalud (kuni 66,5 %), iseloomustasid peamiselt suurte sademete hulkade või intensiivse lumesula perioode.

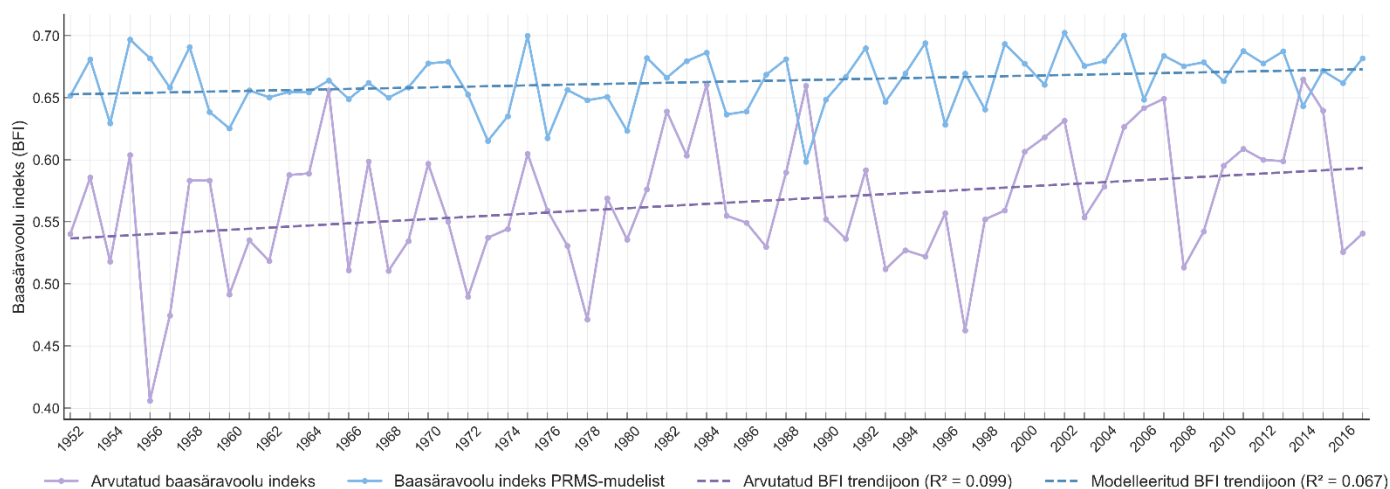
Piigaste oja valgla aastane põhjavee toitumine perioodil 1952–2017 jäi vahemikku 37–264,5 mm/a (Joonis 10). Keskmise aastane netoinfiltratsioon oli 121,7 mm/a ning mediaanväärtus 121,9 mm/a. Madalaimad väärtused esinesid kuivematel aastatel (1964 ja 1980), samas kui kõrgeim väärtus oli seotud vaatlusperioodi sademeterohkeima aastaga (2003).

Piigaste oja valgla modelleeritud baasäravoolu osakaalu valideerimiseks rakendati käesolevas töös baasäravoolu eraldamiseks hüdrograafi lõikamist. Nii mõõdetud äravoolust eraldatud baasäravoolu, kui ka modelleeritud baasäravoolu kohta arvutati aastased baasäravoolu indeksid. Teostatud analüüsi tulemusi näitlikustab joonis 11.

Mõõdetud äravoolust eraldatud aastane baasäravoolu indeks jäi vahemikku 0,41–0,66, mediaanväärtusega 0,56. Seevastu aastane modelleeritud baasäravoolu indeks jäi vahemikku 0,60–0,70, mediaanväärtusega 0,66. Mõlemad baasäravoolu indeksid järgivad sarnast positiivset tõusutrendi, R^2 väärtused on vastavalt 0,099 ja 0,067.



Joonis 10. Piigaste oja valgla äravoolukomponentide aastapõhised karpdiagrammid koos aastase summaarse modelleeritud netoinfiltratsiooni ja Piigaste sademete mõõtejaama aastase sademete hulga (Keskkonnaagentuur 2026b).

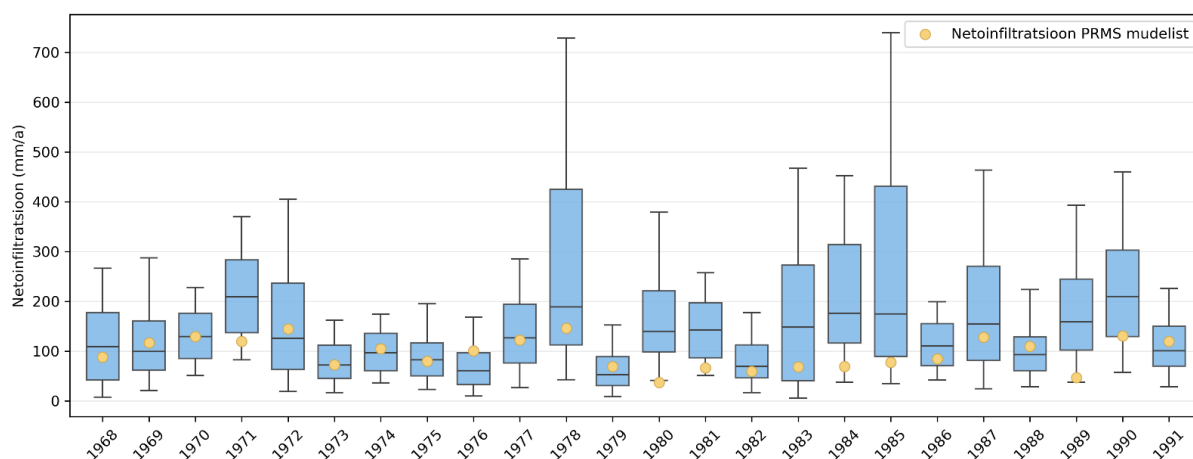


Joonis 11. Aastased baasäravoolu indeksid mõõdetud äravoolust eraldatud baasäravoolu ning modelleeritud baasäravoolu kohta koos vastavate trendijoonetega.

4.4. Modelleeritud netoinfiltratsiooni valideerimine

Modelleeritud netoinfiltratsiooni usaldatavuse analüüsimiseks rakendati käesolevas töös põhjavee toitumise hinnangu arutamiseks puurkaevude põhjaveetasemete aegridadel põhinevat *Water Table Fluctuation* (WTF) meetodit. Teostatud analüüsi koondtulemusi näitlikustab joonis 12.

Water Table Fluctuation meetodiga arvatud netoinfiltratsiooni puhul oli ajaperioodil 1968–1991 mediaanväärtus 116,8 mm/a ning tüüpiline varieeruvus jäi vahemikku 65,4–179,9 mm/a. Sama perioodi jaoks modelleeritud netoinfiltratsiooni mediaanväärtus oli 94,0 mm/a ning tüüpiline varieeruvus jäi vahemikku 69,3–120,4 mm/a. Modelleeritud netoinfiltratsiooni korral oli aastate vaheline varieeruvus madalam, minimaalne netoinfiltratsiooni väärtus oli 37,0 mm/a ning maksimaalne väärtus 146,1 mm/a.



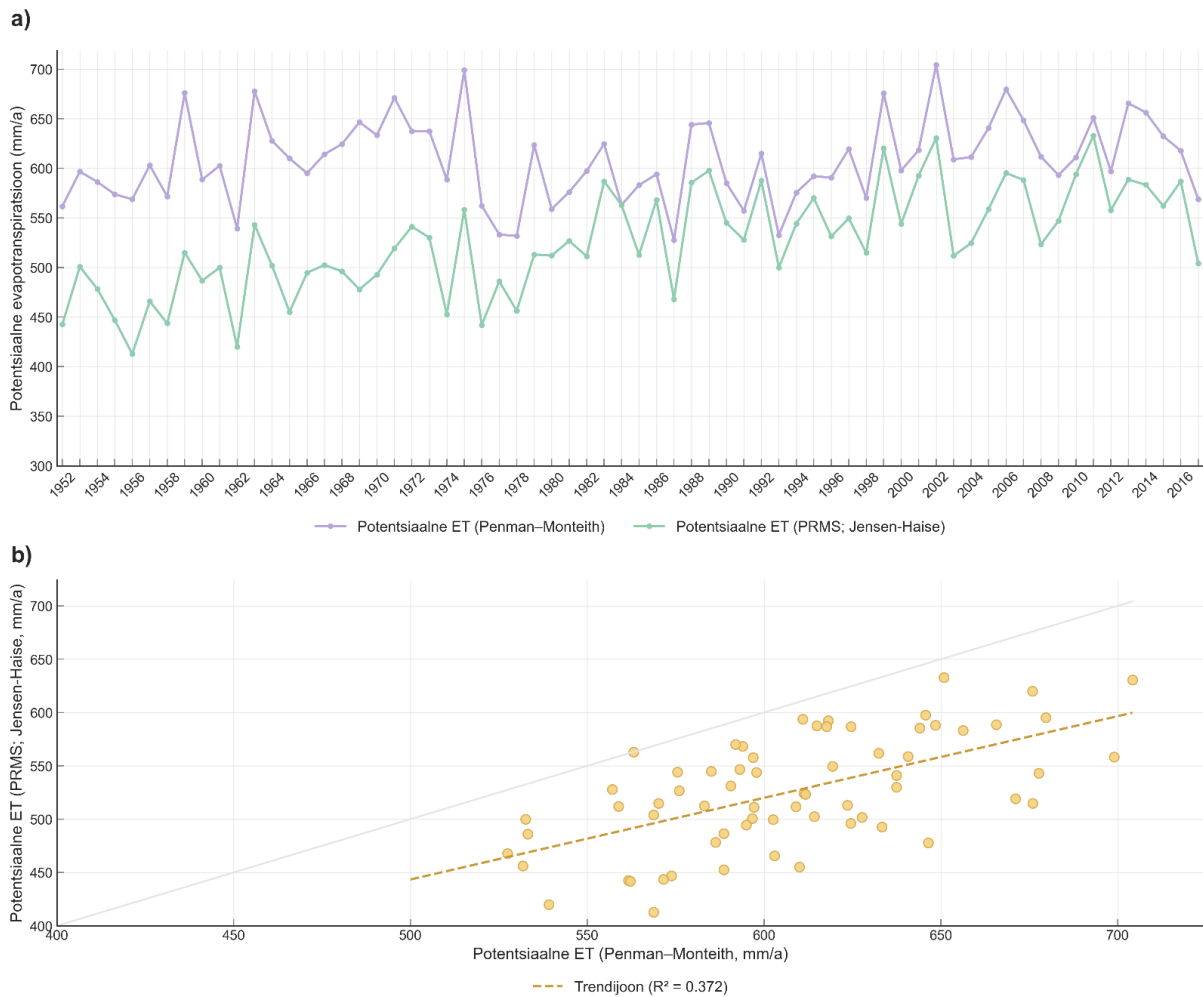
Joonis 12. Arvatud aastaste põhjavee toitumiste väärtuste karpdiagrammid koos netoinfiltratsiooni väärtustega PRMS-mudelist.

4.5. Potentsiaalse evapotranspiratsiooni valideerimine

Käesoleva töö raames konstrueeritud PRMS mudel rakendab potentsiaalse evapotranspiratsiooni ehk koguaurumise arutamiseks Jensen-Haise võrrandit. Mudeli tulemuste analüüsiks arvutati täiendavalt potentsiaalne evapotranspiratsioon Penman-Monteith võrrandiga, kasutades *ET₀ Calculator* tarkvara. Teostatud analüüsi tulemused on välja toodud joonisel 13.

Penman-Monteith võrrandiga arvatud potentsiaalse evapotranspiratsiooni mediaanväärtus oli 606,0 mm/a ning tüüpiline varieeruvus jäi vahemikku 577,8–636,5 mm/a. See-eest Jensen-Haise võrrandiga arvatud potentsiaalse evapotranspiratsiooni

mediaanväärtuseks oli 523,9 mm/a ning tüüpiline varieeruvus oli vahemikus 495,0–562,7 mm/a. Kuigi Penman-Monteith võrandiga arvatud potentsiaalse evapotranspiratsiooni väärtused on kõrgemad Jensen-Haise väärtustest, on võimalik tulemustest täheldada, et mõlemad järgivad analoogset mustrit (Joonis 13a). Sama suundumus ilmneb ka käsitletud andmete hajuvusdiagrammil (Joonis 13b), kus väärtuste vahel esineb positiivne ning statistiliselt oluline korrelatsioon ($R^2 = 0,372$; $p < 0,001$).



Joonis 13. (a) Penman-Monteith ning Jensen-Haise võranditega arvatud potentsiaalse evapotranspiratsiooni aastased väärtused. (b) Penman-Monteith ning Jensen-Haise võranditega arvatud aastaste potentsiaalsete evapotranspiratsioonide korrelatsioon koos vastava trendijoonega.

4.6. Kliimamuutuste mõju hindamine

Piigaste oja valglas 20. sajandil toimunud kliimamuutuste mõju hindamiseks kasutati käesolevas töös STARS (*Sequential T-test Analysis of Regime Shifts*) meetodit (ehk Rodionovi testi), millega tuvastati erinevate hüdroloogilise režiimi komponentide aegridades režiimihkeid. Analüüsi tulemused on välja toodud joonistel 14 ja 15.

Piigaste I hüdrometriaajaamas mõõdetud vooluhulga aegreas eristuvad kolm režiimi, mille režiimihked paiknevad 1963. ja 1978. aastal (Joonis 14). Perioodil 1952–1962 oli režiimi keskmine vooluhulk 0,55 mm/ööpäevas. Aastatel 1963–1977 langes keskmine ööpäevane väärtus kuni 0,33 mm/ööpäevas. Alates 1978. aastast suurenes mõõdetud vooluhulga ööpäevane keskmine taas kuni 0,55 mm/ööpäevas.

PRMS mudeli poolt arvatud vooluhulga ööpäeva keskmise aegreas tuvastati režiimihked 1979. ning 1990. aastatel (Joonis 14). Kuni aastani 1978 oli režiimi keskmine ööpäevane vooluhulga väärtus 0,40 mm/ööpäevas ning vahemikus 1979–1989 langes see kuni 0,30 mm/ööpäevas. Pärast 1990. aastat suurenes arvatud vooluhulga ööpäevane keskmine kuni 0,48 mm/ööpäevas.

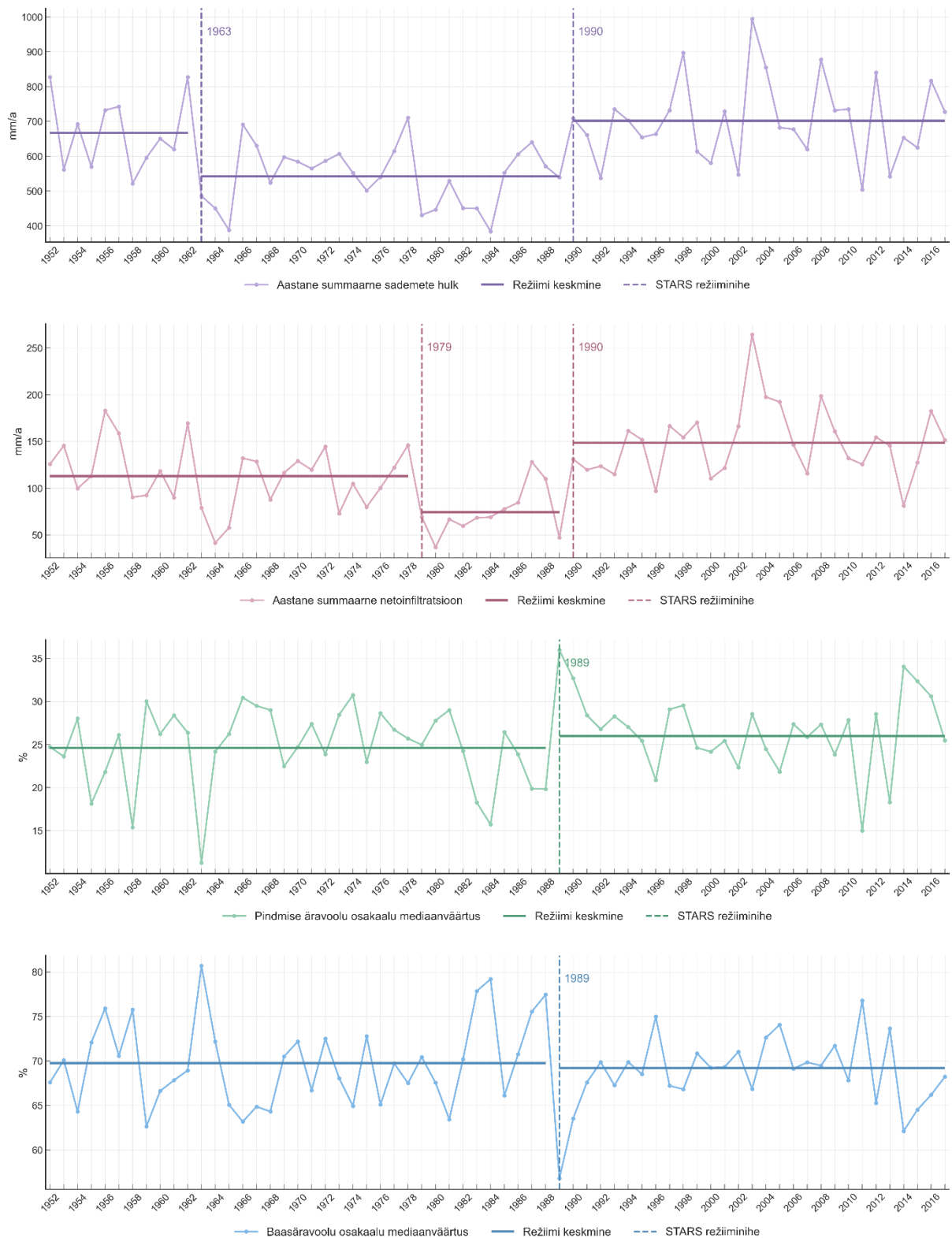


Joonis 14. STARS analüüsi tulemused mõõdetud ja arvatud vooluhulkade aastaste keskmete ööpäevaste väärtuste aegridade kohta.

Piigaste sademete mõõtejaamast pärineva aastase summaarse sademete hulga aegreas eristuvad režiimihked aastatel 1963 ning 1990 (Joonis 15). Perioodil 1952–1962 oli režiimi keskmine aasta summaarne sademete hulk 667 mm/a. Pärast 1963 aasta režiimihet vähenes režiimi keskmine aastane sademete hulk märgatavalt, jäädes perioodil 1963–1989 tasemele 542 mm/a. Alates 1990. aastast suurenes aastane sademete hulk taas ning režiimi keskmine oli 702 mm/a. Seega võib sademete aegreas täheldada niiskemat perioodi kuni 1962. aastani, vahemikus 1963–1989 kuivemat vaheperioodi ning alates 1990. aastast taaskord niiskemat perioodi.

Mudeli arvutatud aastase summaarse netoinfiltratsiooni aegreas tuvastati samuti kaks režiimihet, vastavalt 1979. ning 1990. aastal (Joonis 15). Aastani 1978 oli režiimi keskmine netoinfiltratsiooni väärtus 113 mm/a. Vahemikus 1979–1989 oli režiimi keskmine aastane netoinfiltratsioon 74 mm/a. Alates 1990. aastast suurenes aastane netoinfiltratsioon märkimisväärselt ning režiimi keskmine oli 149 mm/a. Netoinfiltratsiooni režiimide ajaline paiknemine erineb osaliselt sademete režiimidest, kuna langus ilmneb hiljem (aastal 1979), samas kui tõus langeb mõlemas aegreas 1990. aastasse.

Pindmise äravoolu osakaalu aastase mediaanväärtuse aegrida iseloomustab üks režiimihet aastal 1989 (Joonis 15). Aastani 1988 oli pindmise äravoolu osakaalu režiimi keskmine 24 % ning alates aastast 1989 on vastav väärtus 26 %. Samuti tuvastati ka baasäravoolu osakaalu aastase mediaanväärtuse aegreas režiimihet aastal 1989 (Joonis 15). Kuni aastani 1988 oli baasäravoolu osakaalu režiimi keskmine 70 % ning alates aastast 1989 on vastav väärtus 69 %. Kuigi režiimide keskmiste muutused on võrreldes sademete ja netoinfiltratsioonidega väiksemad, demonstreerivad nad siiski pindmise äravoolu ja baasäravoolu osakaalude muutumist 1990. aasta paiku.



Joonis 15. STARS analüüsi tulemused aastase summaarse sademete hulga ja netoinfiltratsiooni ning äravoolukomponentide osakaalude mediaanväärtuste aegriidade kohta.

5. Arutelu ja järeldused

5.1. Mudeli tulemuste tõlgendamine ja usaldusväarsuse hindamine

Mudeli tulemuste tõlgendamisel tuleb arvestada mitmete eelduste ja piirangutega, mis tulenevad mudeli struktuurist ning sisendandmete kvaliteedist ja kättesaadavusest. Vastavad eeldused ja piirangud võivad põhjustada mõõdetud ja modelleeritud vooluhulkade erinevusi nii üksikudel aastatel kui ka pikematel perioodidel.

Töö uuringuala paikneb piirkonnas, kus pinnakatte paksus on suur ning selle litoloogiline koostis on väga varieeruv. Uuringualal paikneva ligi 30 meetri sügavuse hüdroloogilise uuringu puurkaevu (PRK0011137) geoloogilisest läbilõikest on võimalik täheldada nii jääjärveliste ja glatsiofluviaalsete setete (liivsavi, saviliiva, liiv) kui ka moreeni (liivsavi veeristega) vaheldumist. Erineva veejuhtivusega kihtide vaheldumine läbilõikes mõjutab vee liikumist maapinnas ning seeläbi erinevate äravoolukomponentide osakaale. Uuringuala liivakamates piirkondades võib domineerida netoinfiltratsioon ja baasäravool, samas kui savikamate või moreenirikaste kihtide levikualal võib suurem osa veest liikuda maapinnalähedaselt ning jõuda veekokku pindmise või vaheäravooluna. PRMS mudel seevastu kirjeldab hüdroloogilisi protsesse kontseptuaalselt ning eeldab, et iga HRU on hüdroloogiliselt homogeenne. Seega puudub võimalus mudelis detailselt kujutada uuringupiirkonnas esinevat väiksemamastaabilist heterogeensust. Pinnakatte parameetrid mõjutavad nii vooluhulka ja äravoolukomponentide jaotuvust kui ka näiteks aurumist ja netoinfiltratsiooni.

Mudeli poolt arvatud vooluhulga hüdrograafidel (Joonised 6–9) on võimalik täheldada madalveeperioodidel süstemaatilist vooluhulga ülehindamist, mille tingib pindmise äravoolu suur osakaal ning mis tuleneb tõenäoliselt mudeli piiratud võimest korrektselt kirjeldada uuringuala tegelikke pinnakatte omadusi. Sama suundumus on märgatav ka üksikute suurte sademesündmuste puhul, mil mudel ülehindab vooluhulka läbi pindmise äravoolu osakaalu suurenemise. Sellest tulenevalt on mõjutatud ka pindmise äravoolu ja vaheäravoolu osakaalude suhe.

Uuringuala hüdroloogilistest tingimustest lähtudes võiks eeldada, et oluline osa äravoolust kujuneb pigem maapinnalähedase vaheäravooluna kui pindmise äravooluna. Pinnakatte litoloogilist muutlikkust arvestades võib mudelis arvatud pindmise äravool osaliselt kajastada ka kiiret maasisest äravoolu, mitte tingimata ulatuslikku otsest voolamist mööda maapinda, mida mudel ei erista piisava detailsusega vaheäravoolust. Teisalt tuleb äravoolukomponentide tulemuste tõlgendamisel arvestada, et kraavivõrgu mõju avaldub mudelis pindmise äravooluna,

kuigi välitööde käigus tehtud vaatlused tuvastasid ka kraavides olulise baasäravoolu mõju (vt peatükk 4.1). Kevadiste vooluhulga mõõtmiste põhjal moodustab kraavide kaudu Piigaste oja lisanduv vesi olulise osa koguvooluhulgast ning uuringuala alamjooksul täheldatud vooluhulga kasv on valdavalt seostatav kraavidest lisanduva veega. Seega toetavad mõõtmistulemused tõlgendust, et pindmise ja vaheäravoolu osakaalude suhe võib olla mõjutatud nii mudeli detailsusest kui ka kraavivõrgu mõjust. Sellest lähtuvalt tuleks mudeli poolt arvatud pindmise ja vaheäravoolu osakaale tõlgendada mõningase ettevaatlikkusega.

Piigaste I hüdromeetriajaamas mõõdetud pika ajavahemikuga vooluhulga aegrida võimaldas mudeli konstrueerida tavapäratult pika tööperioodiga (66 aastat). Kuigi annab see erakordse võimaluse uurida pikaajalisi muutusi, seab see mudeli seisukohalt täiendavad piirangud.

PRMS mudel põhineb eeldusel, et mudeli parameetrid kehtivad kogu simulatsiooniperioodi vältel. See põhjustab olukorra, kus ei ole võimalik eraldi arvesse võtta mudeli pika tööperioodi jooksul toimunud võimalikke pikaajalisi muutusi näiteks maakasutuses ja maaparanduses, mis mõlemad mõjutavad valglahydroloogilisi omadusi. Vastavad mudelis kajastamata pikaajalised muutused võivad avalduda nii mudelarvutuste ja mõõtmiste vaheliste erinevuste suurenemises kui ka mudelis arvatud äravoolukomponentide suhtelise jaotuse muutumises. Kuivendussüsteemide rajamine või rekonstrueerimine võib soodustada vee kiiremat koondumist kraavivõrku, suurendades seeläbi mudelis pindmise äravoolu osakaalu. Maakasutuse muutused, näiteks metsasuse vähenemine või pinnase tihenemine, võivad vähendada infiltratsiooni ja soodustada pindmise äravoolu suurenemist, mõjutades seeläbi ka aurumist ning äravoolukomponentide suhtelist jaotust.

Hoolimata kirjeldatud kitsaskohtadest võib mudeli tulemusi pidada töö üldiste ja tulevaste eesmärkide täitmiseks piisavalt usaldusväärseks. Koostatud mudel võimaldab kirjeldada pinna- ja põhjavee vastastikuseid seoseid ning hinnata neile avalduvat kliimamuutuste mõju. Mudeli statistilisel hindamisel kasutati Nash-Sutcliffe efektiivsuse ning Kling-Gupta efektiivsuse koefitsiente. Tulemused näitavad, et Kling-Gupta efektiivsuse koefitsiendi väärtused ületavad seatud lävendi nii kalibreerimis- kui ka valideerimisperioodil ning seda mõlemal tööperioodil.

Mudeli valideerimiseks ja mudelitulemuste usaldusväärse täiendavaks hindamiseks rakendati lisaks statistilistele näitajatele ka mitmeid mudelist sõltumatuid meetodeid ja vaatlusi. Modelleeritud netoinfiltratsiooni valideerimiseks kasutatud *Water Table Fluctuation* meetodi tulemused demonstreerivad head kokkulangevust PRMS-mudelist tulenevate

netoinfiltratsiooni väärtustega (Joonis 12). Samuti on nii arvatud netoinfiltratsiooni väärtused (mediaanväärtus 116,8 mm/a) kui ka modelleeritud netoinfiltratsiooni väärtused (mediaanväärtus 94,0 mm/a) kooskõlas varasemate uuringute tulemustega, mille alusel on piirkonnas keskmine aastane netoinfiltratsioon vahemikus 90–120 mm/a (Vallner, Porman 2016).

Sarnane suundumus ilmneb ka potentsiaalse evapotranspiratsiooni valideerimisel, kus PRMS-mudelil rakendatud Jensen-Haise võrrandile arvutati potentsiaalne koguaurumine täiendavalt ka Penman-Monteith võrrandi alusel (Joonis 13). Penman-Monteith võrrandit käsitletakse potentsiaalse evapotranspiratsiooni arvutamise standardmeetodina, millel põhineb ka FAO metoodika. Kuigi modelleeritud ET väärtused on mõnevõrra madalamad, tulenevalt mudeli ebatäpsustest pinnakatte parameetritest ja mõnevõrra teistsugusest arvutusmeetodist, ilmneb mõlema meetodiga arvatud koguaurumise väärtustes siiski sarnane suurusjärg, sesoonne muster ning positiivne ning statistiliselt oluline korrelatsioon.

Mõõdetud äravoolust eraldatud baasaravoolu ning modelleeritud baasaravoolu indeksite väärtuste võrdlusest ilmneb väike lahknevus (Joonis 11). Kuigi modelleeritud baasaravoolu indeksite väärtused on mõnevõrra kõrgemad, mis võib samuti tuleneda mudeli pinnakatte parameetritest, on mõlema näitaja puhul siiski täheldav sarnane positiivne tõusutrend. Siiski on oluline märkida, et baasaravoolu osakaal pole otseselt mõõdetav parameeter ning on defineeritav vaid läbi arvutuslike meetodite. Seetõttu kaasneb määramatus ka hüdrograafi lõikamise teel saadud baasaravoolu osakaaluga ning seda ei saa käsitleda otseselt mõõdetud parameetriga samaväärse täpsusega tulemusena.

Kokkuvõttes näitavad nii statistilised näitajad kui ka mudelist sõltumatute valideerimismeetodite rakendamine, et koostatud mudel kirjeldab uuritava ala hüdroloogilisi protsesse piisava täpsusega, et seda rakendada uuringute järgmises etapis tulevikus esineda võivate hüdroloogiliste muutuste uurimisel. Kuigi üksikute veebilansi komponentide, näiteks evapotranspiratsiooni ja baasaravoolu indeksi puhul esineb mõningaid kõrvalekaldeid, on siiski võimalik mudeli abil tõlgendada pinna- ja põhjavee vastastikuseid seoseid ning hinnata neile avalduvate kliimamuutuste mõju.

5.2. Kliimamuutuste mõju Piigaste oja valgla veebilansile

Käesoleva töö raames koostatud, kalibreeritud ja valideeritud PRMS-põhist sademe-äravoolumudelit rakendati täiendavalt 20. sajandil toimunud kliimamuutuste mõju hindamiseks Piigaste oja valglas. Oluliste minevikus toimunud kliimamuutuste tuvastamiseks on peamiselt kasutusel erinevad trendianalüüsi ning režiimihete analüüsi meetodid. Kuigi trendianalüüs võimaldab hinnata pikaajalise kliimamuutuse suunda ja tugevust, põhineb see eeldusel, et muutus avaldub järkjärgulise ühtlase protsessina eirates aegridade sisemist varieeruvust (Jaagus *et al.* 2017). Režiimihete analüüs võimaldab tuvastada aegreas statistiliselt olulisi murdepunkte, mis jagavad aegrea erinevate statistiliste omadustega osadeks ehk režiimideks (Jaagus *et al.* 2017). Režiimihet käsitletakse kui aegridade jagunemist perioodideks, mille keskmised väärtused erinevad oluliselt režiimisisesest varieeruvuse suhtes (Kotta *et al.* 2018).

Mõõdetud ja modelleeritud vooluhulga režiimihete võrdlus näitab, et mudel kajastab üldjoontes pikaajalist hüdroklimaatilist varieeruvust, kuid režiimihete ajastuses ja suurusjärgudes esineb mõõdetud andmetega võrreldes erinevusi (Joonis 14). Piigaste oja valgla ajaloolisi režiimiheteid on varem käsitletud Jaagus *et al.* (2017), kelle tulemuste põhjal eristuvad piirkonnas kuivem periood aastatel 1963–1977 ning sellele järgnev niiskem periood alates 1978. aastast kuni 21. sajandi alguseni. Käesolevas töös analüüsitud Piigaste I hüdromeetrjaama mõõdetud vooluhulga aegreas eristuvad režiimihked 1963. aastal režiimi keskmise langusena ning 1978. aastal režiimi keskmise tõusuga. Seega kattuvad käesoleva töö tulemused varasemalt tõestatud režiimihetega ning kuiva ja niiske perioodi vaheldumisega (Jaagus *et al.* 2017). Modelleeritud vooluhulga aegreas eristub režiiminihe 1979. aastal režiimi keskmise langusega, demonstreerides vastuolu mõõdetud äravoolu aegreaga. Täiendavalt eristub modelleeritud vooluhulga aegreas režiiminihe 1990. aastal režiimi keskmise tõusuna. Erinevused režiimihete suunas võivad tuleneda mõõdetud vooluhulga väärtuste taseme muutustest aastatel 1979–1983, mil perioodi mõõdetud vooluhulk oli varasemate mõõtmisega võrreldes püsivalt ligikaudu 0,4 mm/ööpäevas suurem. Sama suundumus ilmneb ka perioodil 1987–1992, mil perioodi mõõdetud vooluhulk oli samuti püsivalt ligikaudu 0,4 mm/ööpäevas suurem. Selline lühiajaline vooluhulga miinimumide tõus võib tuleneda näiteks koprapaisutusest mõõtelävendi lähedusse jääval ojalõigul, mille analoogset mõju Piigaste oja oja on täheldatud ka 2024. aastal välivaatluste käigus. Kuna mudel ei kirjelda lühiajalisi ettenägematuid muutusi, on modelleeritud vooluhulk vastavatel perioodidel mõõdetust väiksem. See võib põhjustada lahknevusi 1978. aasta ja 1979. aasta režiimihete suunas ja mõjutada 1990. aasta režiimihete kujunemist. Täiendavalt tuleks modelleeritud vooluhulga

aegrea 1990. aasta režiimihke tõlgendamisel arvestada ajavahemikul 2003–2006 üksikute suurveetippude anomaalselt modelleeritud väärtustega, mis mõjutavad aegrea režiimi keskmisi ning võimendavad režiimihkeid, mida mõõdetud vooluhulga aegreas ei esine. Siiski ei anna mõõdetud ja modelleeritud vooluhulkade režiimihete erinevus alust järeldada, et äravoolukomponentides tuvastatud nihked oleksid kindlasti ebausaldusväärsed. Erisus tuleneb peamiselt sellest, et mõõdetud vooluhulk hõlmab lisaks kliimategurile ka lokaalseid hüdro-morfoloogilisi ja mõõdetehnilisi mõjusid, samas kui modelleeritud aegrida kirjeldab eelkõige meteoroloogiliste sisendite põhjal arvutatud üldistatud valgla äravoolurežiimi.

Sademet, netoinfiltratsiooni ning äravoolukomponentide osakaalude aegridade võrdlus näitab, et režiimihked avalduvad Piigaste oja veebilansi komponentides kohati erineva ajastuse ja suurusjärguga (Joonis 15). Piigaste sademete mõõtejaama aastases summaarses sademete aegreas eristuvad režiimihked 1963. ja 1990. aastal, jagades aegrea niiskemaks algusperioodiks, kuivemaks vaheperioodiks ning 1990. aastast taas niiskemaks perioodiks. Netoinfiltratsiooni aegreas ilmneb madalama režiimi algus hiljem, 1979. aastal, kuid kõrgema režiimi taastumine langeb kokku sademete aegrega 1990. aastasse. Hilisem madalama režiimi algus 1980. aastatel võib tuleneda asjaolust, et netoinfiltratsiooni mõjutab lisaks sademete pikaajalisele muutlikkusele ka aurumine, lumikatte dünaamika, mulla niiskustingimused ning vee liikumine küllastumata tsoonis. Vastavad protsessid võivad sademete muutlikkust ajaliselt tasandada ning nihutada hilisemaks selle mõju avaldumist netoinfiltratsioonis.

Äravoolukomponentide osakaaludes on režiimihked võrreldes sademete ja netoinfiltratsiooniga märkimisväärselt tagasihoidlikuma amplituudiga (Joonis 15). Pindmise äravoolu osakaalude mediaanväärtustes avaldub 1989. aastal väike tõus 24 %-lt 26 %-ni. Baasäravoolu osakaalu režiiminihe avaldub samuti 1989. aastal väikse tõusuna 69 %-lt 70 %-ni. Äravoolukomponentide osakaalude väga väike muutus näitab, et 1990. aastal sademete ja netoinfiltratsiooni aegridades avalduv režiiminihe ei põhjusta Piigaste oja valgla äravoolukomponentide osakaalude olulist ümberjaotumist. See võib tuleneda valgla hüdroloogilisest tundlikkusest, mille alusel kuulub Piigaste oja valgla liivakivi kõrgustiku klastrisse, mida iseloomustavad suur kvaternaarisetete paksus ning baasäravoolu osakaal (Koit *et al.* 2025). Põhjavee suurema osakaalu tõttu on valgla puhverdusvõime tugevam ja ilmastiku muutustele reageerimine aeglasem, mistõttu on madalam ka valgla hüdroloogiline tundlikkus kliimamuutuste suhtes (Koit *et al.* 2025).

Huvitav on aga välja tuua, et nii sademete, netoinfiltratsiooni kui ka äravoolukomponentides esinev režiiminihe 1989–1990. aastatel kattub üle-eestiliselt tuvastatud 1989. aasta režiimihkega, mida on seostatud laiaulatuslike muutustega atmosfääritsirkulatsioonis ja sellest tulenevalt nii hüdroloogilistes, bioloogilistes kui ka merekeskkonna näitajates (Kotta *et al.* 2018). Käsitatud režiiminihe väljendus Eestis eelkõige talvise soojenemisena, mis hüdroloogiliste protsesside seisukohalt viitab sademete vormi ja sesoonse jaotuse muutumisele, sealhulgas talviste vihmasadude osakaalu suurenemisele ning lumena akumulieruva vee osakaalu vähenemisele (Kotta *et al.* 2018). Piigaste oja valgla tulemused näitavad, et eelnimetatud regionaalne režiiminihe avaldub lokaalsel tasemel eelkõige veebilansi sademete ja netoinfiltratsiooni aegridades, kus on muutus selgemalt eristatav. Äravoolukomponentide osakaaludes avaldub vastav nihe seevastu väiksema ulatusega, olles kooskõlas valgla suure põhjaveelise puhverdusvõimega.

Kokkuvõttes demonstreerivad Piigaste oja valgla tulemused, et PRMS-põhise sademe-äravoolumudeli abil on võimalik eristada ja hinnata kliimamuutustega seotud pikaajalisi muutusi nii koguvooluhulgas kui ka selle kujunemist määravates veebilansi komponentides. Mõõdetud ja modelleeritud vooluhulga režiimihete võrdlus kinnitab, et mõlemad aegread kirjeldavad üldist pikaajalist hüdroklimaatilist muutlikkust, kuid nende lahknevused tulenevad tõenäoliselt eeskätt lokaalselt avalduvatest hüdromorfoloogilistest ja mõõtetehnilistest teguritest, mida mudel ei kirjelda. Sademete ja netoinfiltratsiooni aegridades avaldub 1989–1990. aastate režiiminihe selgemalt kui pindmise äravoolu ja baasäravoolu osakaaludes, mis viitab valgla põhjaveelisele puhverdusvõimele ning äravoolurežiimi suhtelisele inertsusele. Valgla netoinfiltratsiooni ja äravoolukomponentide osakaalude aegridades tuvastatud režiimihked on kooskõlas varasemalt kirjeldatud üle-eestilise 1989. aasta režiimihkega (Kotta *et al.* 2018). Ühtlasi kinnitavad tulemused, et koostatud mudel kirjeldab Piigaste oja valgla äravooluprotsesse ning ajaloolisi kliimamuutusi piisava täpsuse ning usaldusväärsusega, võimaldades uuringu edasistes etappides rakendada vastavat mudelit kliimaprojektsioonidel põhinevate meteoroloogiliste sisendandmetega tuleviku kliimamuutuste mõju hindamiseks.

6. Kokkuvõte

Kliimamuutused mõjutavad jõgede äravoolurežiimi, põhjavee toitumist ning pinna- ja põhjavee vastastikmõju, mistõttu on nende protsesside terviklik käsitlemine oluline nii veevarude kestliku kasutamise kui ka veekogumite seisundi hindamise ja säilitamise seisukohalt. Kuna Eestis on kliimamuutuste hüdroloogilist mõju integreeritud pinna- ja põhjavee valglamudelite abil seni käsitletud piiratud ulatuses, panustab käesolev töö vastava uurimissuunaga seotud teadmiste täiendamisse ning loob aluse kliimaprojektsioonidel põhinevaks Piigaste oja ja teiste sarnaste Lõuna-Eesti vooluveekogude hüdroloogiliste muutuste hindamiseks.

Käesoleva magistritöö peamine eesmärk oli luua ja valideerida Piigaste oja valgale PRMS-põhine sademe-äravoolumudel viisil, mis võimaldaks võimalikult realistlikult kirjeldada valgla hüdroloogilist režiimi ning pinna- ja põhjavee vastastikmõju. Selleks kalibreeriti ja valideeriti mudel Piigaste I hüdromeetriaama mõõdetud vooluhulga aegridade alusel. Mudeli usaldusväärsust hinnati lisaks statistilistele sobivusnäitajatele ka mudelist sõltumatute meetodite ja vaatlustega, mis võimaldasid kontrollida, kas mudel kirjeldas äravoolukomponentide jaotuvust, netoinfiltratsiooni ja potentsiaalse evapotranspiratsiooni realistlikult. Valideeritud mudel võimaldas käesolevas töös hinnata ajalooliste kliimatingimuste mõju valgla hüdroloogiale ning on ühtlasi alus edasisteks uuringuteks, sealhulgas kliimaprojektsioonidel põhinevate hüdroloogiliste muutuste analüüsiks.

Töö tulemused näitasid, et koostatud mudel kirjeldab Piigaste oja valgla üldist hüdroloogilist toimimist piisava usaldusväärsusega. Mudel kajastas vooluhulga sesoonset ja pikaajalist muutlikkust ning võimaldas eristada valgla peamisi veebilansi komponente. Mudelist sõltumatud valideerimismeetodid toetasid mudeli tulemusi, kinnitades põhjaveelise toite olulist rolli Piigaste oja äravoolu kujunemisel ning mudeli sobivust põhjavee toitumise ja koguaarumise pikaajalise dünaamika hindamiseks.

Välitööde tulemused täiendasid modelleerimistulemusi ning kinnitasid, et Piigaste oja äravool kujuneb pinna- ja põhjavee vastastikmõju, pinnakatte omaduste ning kuivendusvõrgu koosmõjul. Ülemjooksul avaldub suurem pinnaveeline ja sooveeline mõju, samas kui allavoolu suureneb põhjaveelise komponendi osakaal. Seda tõlgendust toetab uuringuala keskjooksul paikneva CTD automaatanduri erielektrijuhtivuse aegrida, mille alusel eristuvad äravoolu kujunemises madalvee- ja suurveeperioodidele omased hüdroloogilised tingimused. Madalveeperioodidel suureneb baasaravoolu suhteline osakaal, samas kui suurveeperioodidel

domineerib sademete ning 2025. aasta talvel ka lumesulaprotsesside mõjul otseäravool. Seetõttu on Piigaste oja valgla käsitletav tugeva põhjaveelise toitega süsteemina, kus põhjavesi aitab säilitada vooluhulka madalveeperioodidel ning puhverdab osaliselt kliimatingimuste muutustest tulenevaid hüdroloogilisi kõikumisi.

Kliimamuutuste mõju hindamiseks analüüsitud režiimihked näitasid, et Piigaste oja valgla hüdroloogilises režiimis on toimunud pikaajalisi muutusi, mis avalduvad eelkõige sademete, netoinfiltratsiooni ja vooluhulga aegridades. Olulisim režiiminihe ilmnes aastatel 1989–1990, mil sademete ja netoinfiltratsiooni muutused olid selgemini eristatavad kui äravoolukomponentide suhteliste osakaalude muutused, viidates valgla hüdroloogilisele inertsusele ja põhjaveelise toite puhverdavale mõjule. Seega mõjutavad kliimatingimuste muutused Piigaste oja valgla veebilanssi, kuid nende mõju äravoolukomponentide suhtelisele jaotusele avaldub tasandatult.

Magistritöö tulemusel valmis PRMS-põhine sademe-äravoolumudel, mis võimaldab kirjeldada Piigaste oja valgla peamisi hüdroloogilisi protsesse ning hinnata pinna- ja põhjavee vastastikmõju kliimamuutuste kontekstis. Kuigi mudeli tulemuste tõlgendamisel tuleb arvestada sisendandmete määramatuse, pinnakatte heterogeensuse, kraavivõrgu mõju ning mudeli kontseptuaalsest ülesehitusest tulenevate piirangutega, loob töö vajaliku meetodilise aluse mudeli edasiseks rakendamiseks kliimaprojektsioonidel põhinevate tulevikustsenaariumide hindamisel. Käesolev töö näitab, et kliimamuutuste hüdroloogilise mõju usaldusväärne hindamine eeldab, et jõgede äravoolu kujunemise uurimisel käsitletakse pinna- ja põhjavett ühtse süsteemina.

Modeling surface water–groundwater interactions to assess climate change impacts in the Piigaste stream catchment

Annabel Eensoo

Summary

Climate change affects stream runoff through changes in precipitation, temperature, snow accumulation and melt, evapotranspiration, groundwater recharge and the seasonal distribution of streamflow. In Estonia, surface water and groundwater processes have often been studied separately, while catchment-scale modelling approaches that consider their interaction remain limited. This thesis addresses this gap by developing and validating a hydrological model for the Piigaste stream catchment in southern Estonia.

The aim of the thesis was to construct a PRMS-based (Precipitation-Runoff Modeling System) precipitation-runoff model and assess its suitability for studying surface water–groundwater interactions and climate-related hydrological change. The study area covers the upper part of the Piigaste stream catchment on the eastern slope of the Otepää Upland. The modeled catchment area is approximately 17,5 km² and represents the catchment area of the historical Piigaste I hydrometric station. The catchment is characterized by forests, agricultural land, wetlands, steep stream gradients, thick Quaternary deposits and heterogeneous sediment composition.

The model was used to simulate the main water balance components, including snowmelt, evapotranspiration, infiltration, groundwater recharge, surface runoff, interflow, baseflow and total streamflow. Input data included long-term daily meteorological observations, measured discharge data and spatial datasets describing topography, land cover, soils, stream network characteristics and Quaternary sediment thickness. The model covered the period from 1952 to 2017 and was calibrated and validated in two separate time periods. Model performance was evaluated using the Nash-Sutcliffe and Kling-Gupta efficiency coefficients, supported by a Kling-Gupta based benchmark. In addition, independent validation methods were applied to assess individual water balance components: hydrograph separation was used to evaluate baseflow, the Water Table Fluctuation method was used to estimate groundwater recharge, and potential evapotranspiration was compared with values calculated using the Penman-Monteith equation. Field measurements of discharge, electrical conductivity and stable isotopes, together with CTD sensor data, supported the conceptual interpretation of runoff formation.

The results show that the PRMS model describes the general hydrological regime of the Piigaste catchment with sufficient reliability. Kling-Gupta efficiency values exceeded the benchmark threshold in all calibration and validation periods, indicating that the model captured more than only the typical seasonal runoff pattern. Both model results and independent validation methods confirmed the significant contribution of groundwater to runoff formation. Modeled baseflow formed the largest share of total runoff, with a median contribution of approximately 69 %, while surface runoff was also notable and interflow remained small. Modelled groundwater recharge was generally consistent with independent recharge estimates and earlier regional values.

Field observations showed that the contribution of groundwater to streamflow increased downstream. Lower electrical conductivity and isotope values in the headwater area indicated stronger surface water and wetland influence, while downstream increases in electrical conductivity, lighter isotope composition and higher discharge indicated greater groundwater contribution. CTD sensor data showed alternating periods dominated by baseflow and direct runoff, mainly controlled by precipitation and snowmelt.

Historical climate-related changes were analyzed using the STARS regime shift method. Measured discharge showed regime shifts in 1963 and 1978, precipitation in 1963 and 1990, and modelled groundwater recharge in 1979 and 1990. The clearest regime shift occurred around 1989–1990, when precipitation and groundwater recharge increased. However, runoff component proportions changed only slightly, suggesting that groundwater buffers the impact of climatic variability on runoff formation.

Overall, the thesis demonstrates that the developed PRMS model is suitable for describing the main hydrological processes of the Piigaste stream catchment and for assessing surface water–groundwater interactions in the context of climate change. Despite uncertainties related to input data, sediment heterogeneity, drainage network effects and the conceptual structure of the model, it provides a methodological basis for future applications using climate projection-based meteorological input data.

Tänuavaldused

Autor soovib siiralt tänada oma juhendajaid Marlen Hunti ja Joonas Pärna põhjaliku juhendamise, sisukate arutelude ning toetava suhtumise eest. Samuti tänab autor kõiki Eesti Geoloogiateenistuse kolleege, kes aitasid töö valmimisele kaasa välitöödel osalemise, arutelude ning heade mõtetega. Lisaks avaldab autor tänu LIFE-SIP AdaptEST projektile ja sellega seotud inimestele, kelle sisulisel ning rahalisel toel käesolev magistritöö valmis.

Kirjanduse loetelu

Aksoy, H. ja Wittenberg, H. 2011. Nonlinear baseflow recession analysis in watersheds with intermittent streamflow. *Hydrological Sciences Journal*, **56**(2), 226–237. <https://doi.org/10.1080/02626667.2011.553614>

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. ja Smith, M. 1998. *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

Arciniega-Esparza, S., Breña-Naranjo, J. A., Pedrozo-Acuña, A. ja Appendini, C. M. 2017. HYDRORECESSION: A Matlab toolbox for streamflow recession analysis. *Computers & Geosciences*, **98**, 87–92. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.10.005>

Beldring, S. 2002. Multi-criteria validation of a precipitation–runoff model. *Journal of Hydrology*, **257**(1–4), 189–211. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00541-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00541-8)

Bingeman, A. K., Kouwen, N. ja Soulis, E. D. 2006. Validation of the Hydrological Processes in a Hydrological Model. *Journal of Hydrologic Engineering*, **11**(5), 451–463. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2006\)11:5\(451\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2006)11:5(451))

Biondi, D., Freni, G., Iacobellis, V., Mascaro, G. ja Montanari, A. 2012. Validation of hydrological models: Conceptual basis, methodological approaches and a proposal for a code of practice. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, **42–44**, 70–76. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2011.07.037>

Boussinesq, J. 1904. Recherches théoriques sur l'écoulement des nappes d'eau infiltrées dans le sol et sur le débit des sources. *Journal de Mathématiques Pures et Appliquées*, **10**, 5–78. (prantsuse keeles)

Brutsaert, W. 2023. *Hydrology: An Introduction*. 2nd ed. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781316471562>

Brutsaert, W. ja Nieber, J. L. 1977. Regionalized drought flow hydrographs from a mature glaciated plateau. *Water Resources Research*, **13**(3), 637–643. <https://doi.org/10.1029/WR013i003p00637>

Costantini, M., Colin, J. ja Decharme, B. 2023. Projected Climate-Driven Changes of Water Table Depth in the World's Major Groundwater Basins. *Earth's Future*, **11**(3), e2022EF003068. <https://doi.org/10.1029/2022EF003068>

- Coutagne, A. 1948. Météorologie et Hydrologie - Etude générale des débits et des facteurs qui les conditionnent. *La Houille Blanche*, **34**(3), 228–245. <https://doi.org/10.1051/lhb/1948035>. (prantsuse keeles)
- Dams, J., Nossent, J., Senbeta, T. B., Willems, P. ja Batelaan, O. 2015. Multi-model approach to assess the impact of climate change on runoff. *Journal of Hydrology*, **529**, 1601–1616. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.08.023>
- Duan, Q., Sorooshian, S. ja Gupta, V. K. 1994. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. *Journal of Hydrology*, **158**(3–4), 265–284. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)90057-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)90057-4)
- Eesti Geoloogiakeskus OÜ. 2017. Põhjaveekatastri andmebaas.
- Eesti Põhjaveekomisjon. 2004. *Eesti põhjavee kasutamine ja kaitse*. Maves AS. <http://www.digar.ee/id/nlib-digar:42000>
- Eesti Veemajandusinspektsioon. 1986. *Eesti NSV jõgede, ojade ja kraavide nimestik*. Kirjastus Valgus. <https://www.digar.ee/arhiiv/et/nlib-digar:435951>
- Fowler, K., Knoben, W., Peel, M., Peterson, T., Ryu, D., Saft, M., et al. 2020. Many Commonly Used Rainfall-Runoff Models Lack Long, Slow Dynamics: Implications for Runoff Projections. *Water Resources Research*, **56**(5), e2019WR025286. <https://doi.org/10.1029/2019WR025286>
- Fu, T., Liu, J., Gao, H., Qi, F., Wang, F. ja Zhang, M. 2024. Surface and subsurface runoff generation processes and their influencing factors on a hillslope in northern China. *Science of The Total Environment*, **906**, 167372. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167372>
- Gardner, M. A., Morton, C. G., Huntington, J. L., Niswonger, R. G. ja Henson, W. R. 2018. Input data processing tools for the integrated hydrologic model GSFLOW. *Environmental Modelling & Software*, **109**, 41–53. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.07.020>
- Golovina, L., Fedortshenko, G. ja Jürima, M. 1975. Svodnõi ottšet o rezultatah gidrogeologitšeskih issledovanii na reprezentativõh basseinah r.Leivajõgi i rutš.Piigaste po programme Meždunarodnogo Gidrologitšeskogo Desjatiletija za 1966-1974 gg. (Kokkuvõtlik aruanne hüdrogeoloogiliste uuringute tulemustest Leivajõe ja Piigaste oja näidisbasseinides Rahvusvahelise Hüdrogeoloogilise Kümmeaastaku 1966-1974. a programmi alusel). <https://fond.egt.ee/fond/egf/3354>. (vene keeles)

- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K. ja Martinez, G. F. 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, **377**(1–2), 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>
- Gustard, A., Bullock, A. ja Dixon, J. M. 1992. *Low flow estimation in the United Kingdom*. Institute of Hydrology, Wallingford.
- Hay, L. E. ja Umemoto, M. 2007. *Multiple-Objective Stepwise Calibration Using Luca*. Open-File Report, 25 pp. Geological Survey (U.S.). <https://doi.org/10.3133/ofr20061323>
- Healy, R. W. ja Cook, P. G. 2002. Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*, **10**(1), 91–109. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0178-0>
- Healy, R. W. ja Scanlon, B. R. 2010. *Estimating groundwater recharge*. Cambridge University Press, Cambridge ; New York.
- Hiscock, K. M. 2005. *Hydrogeology: principles and practice*. Blackwell Pub, Malden, MA.
- Hunt, M. 2021. *Selja jõe valgla veebilansi modelleerimine rakendades PRMS hüdroloogilist mudelit*. Magistrikraad. Tartu Ülikool, Loodus- ja täppisteaduste valdkond, Ökoloogia ja maateaduste instituut.
- IPCC. 2021. *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 2391 pp. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- IPCC. 2022. *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 3056 pp. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- Jaagus, J. 2006. Climatic changes in Estonia during the second half of the 20th century in relationship with changes in large-scale atmospheric circulation. *Theoretical and Applied Climatology*, **83**(1–4), 77–88. <https://doi.org/10.1007/s00704-005-0161-0>
- Jaagus, J., Sepp, M., Tamm, T., Järvet, A. ja Mõisja, K. 2017. Trends and regime shifts in climatic conditions and river runoff in Estonia during 1951–2015. *Earth System Dynamics*, **8**(4), 963–976. <https://doi.org/10.5194/esd-8-963-2017>

Jaani, A. 1977. *Gidrogeologitšeskii ežegodnik za 1976 god po reprezentativnõm basseinam reki Leivajõgi i rutšja Piigaste Estonskoi CCP* (Hüdrogeoloogiline aastaraamat 1976. a Leivajõe ja Piigaste oja näidisbasseinide põhjal). <https://fond.egt.ee/fond/egf/3442>. (vene keeles)

Jaani, A. 1978. *Gidrogeologitšeskii ežegodnik za 1977 god po reprezentativnõm basseinam reki Leivajõgi i rutšja Piigaste Estonskoi CCP* (Hüdrogeoloogiline aastaraamat 1977.a Leivajõe ja Piigaste oja näidisbasseinide põhjal). <https://fond.egt.ee/fond/egf/3489>. (vene keeles)

Jaani, A. 1979. *Gidrogeologitšeskii ežegodnik za 1978 god po reprezentativnõm basseinam reki Leivajõgi i rutšja Piigaste Estonskoi CCP* (Hüdrogeoloogiline aastaraamat 1978. a Leivajõe ja Piigaste oja näidisbasseinide põhjal). <https://fond.egt.ee/fond/egf/3536>. (vene keeles)

Jaani, A. 1980. *Gidrogeologitšeskii ežegodnik za 1979 god po reprezentativnõm basseinam reki Leivajõgi i rutšja Piigaste Estonskoi CCP* (Hüdrogeoloogiline aastaraamat 1979. a Eesti NSV Leivajõe ja Piigaste oja näidisbasseinide põhjal). <https://fond.egt.ee/fond/egf/3657>. (vene keeles)

Järvekülg, A. 2001. *Eesti jõed*. Tartu ülikooli kirjastus, Tartu.

Järvet, A., Roosaare, J., Tamm, T., Jaagus, J. ja Vallner, L. 1998. *Intergrated Assessment of Climate Change Impact on Water Resources in Estonia*. In *Country Case Study on Climate Change Impacts and Adaptations Assessments*. SEI-Tallinn, Tallinn, 146.

Jensen, M. E. ja Haise, H. R. 1963. *Estimating Evapotranspiration from Solar Radiation*. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, **89**(4), 15–41. <https://doi.org/10.1061/JRCEA4.0000287>

Jürima, M. 1976. *Gidrogeologitšeskii ežegodnik za 1975 god po reprezentativnõm basseinam reki Leivajõgi i rutšja Piigaste Estonskoi CCP* (Hüdrogeoloogiline aastaraamat 1975. a Leivajõe ja Piigaste oja näidisbasseinide põhjal). <https://fond.egt.ee/fond/egf/3371>. (vene keeles)

Keskkonnaagentuur. 2026a. Ahja jõgi. <https://register.keskkonnaportaal.ee/register/body-of-water/2002676543> (viimati vaadatud 14.04.2026)

Keskkonnaagentuur. 2026b. Avaandmed. <https://keskkonnaportaal.ee/et/avaandmed> (viimati vaadatud 14.04.2026)

Keskkonnaagentuur. 2026c. Piigaste I hüdromeetriaaam. <https://register.keskkonnaportaal.ee/register/weather-monitoring/7680627> (viimati vaadatud 15.04.2026)

- Keskkonnaagentuur. 2026d. Piigaste oja. <https://register.keskkonnaportaal.ee/register/body-of-water/-1598247419> (viimati vaadatud 15.04.2026)
- Kmoch, A., Kanal, A., Astover, A., Kull, A., Virro, H., Helm, A., et al. 2021. EstSoil-EH: a high-resolution eco-hydrological modelling parameters dataset for Estonia. *Earth System Science Data*, **13**(1), 83–97. <https://doi.org/10.5194/essd-13-83-2021>
- Knoben, W. J. M., Freer, J. E. ja Woods, R. A. 2019. Technical note: Inherent benchmark or not? Comparing Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiency scores. *Hydrology and Earth System Sciences*, **23**(10), 4323–4331. <https://doi.org/10.5194/hess-23-4323-2019>
- Koit, O., Pärn, J., Hunt, M., Tarros, S., Lode, E. ja Abreldaal, P. 2025. Climate-driven hydrological sensitivity in Estonian catchments: a northern temperate perspective. *Estonian Journal of Earth Sciences*, **74**(1), 1–21. <https://doi.org/10.3176/earth.2025.01>
- Kotta, J., Herkül, K., Jaagus, J., Kaasik, A., Raudsepp, U., Alari, V., et al. 2018. Linking atmospheric, terrestrial and aquatic environments: Regime shifts in the Estonian climate over the past 50 years. *PLOS ONE*, **13**(12), e0209568. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0209568>
- Krysanova, V., Donnelly, C., Gelfan, A., Gerten, D., Arheimer, B., Hattermann, F., et al. 2018. How the performance of hydrological models relates to credibility of projections under climate change. *Hydrological Sciences Journal*, **63**(5), 696–720. <https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1446214>
- Loheide, S. P., Butler, J. J. ja Gorelick, S. M. 2005. Estimation of groundwater consumption by phreatophytes using diurnal water table fluctuations: A saturated-unsaturated flow assessment. *Water Resources Research*, **41**(7), 2005WR003942. <https://doi.org/10.1029/2005WR003942>
- Maa- ja Ruumiamet. 2025a. Eesti topograafia andmekogu. <https://geoportaal.maaamet.ee/est/ruumiandmed/eesti-topograafia-andmekogu-p79.html> (viimati vaadatud 16.04.2026)
- Maa- ja Ruumiamet. 2025b. Ruumiandmed. <https://geoportaal.maaamet.ee/est/ruumiandmed-p1.html> (viimati vaadatud 16.04.2026)
- Maillet, E. 1905. Essais d'Hydraulique souterraine et fluviale. *Nature*, **72**(1854), 25–26. <https://doi.org/10.1038/072025a0> (prantsuse keeles)

- Marandi, A., Kuusma, E., Männik, M., Osjamets, M., Pärn, J. ja Raidla, V. 2025. *Põhjaveekogumite kontseptuaalsed mudelid 2025*. EGF 4725. Eesti Geoloogiateenistus, Rakvere. <https://fond.egt.ee/fond/egf/47425>
- Markstrom, S. L., Regan, R. S., Hay, L. E., Viger, R. J., Webb, R. M. T., Payn, R. A., et al. 2015. *PRMS-IV, the Percipitation-Runoff Modeling System, version 4. Techniques and Methods 6-B7*, 158 pp. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia. <https://doi.org/10.3133/tm6B7>
- Mathevet, T., Le Moine, N., Andréassian, V., Gupta, H. ja Oudin, L. 2024. Multi-objective assessment of hydrological model performances using Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiencies on a worldwide large sample of watersheds. *Comptes Rendus. Géoscience*, **355**(S1), 117–141. <https://doi.org/10.5802/crgeos.189>
- McGuire, K. J., Klaus, J. ja Jackson, C. R. 2024. JAMES BUTTLE REVIEW: Interflow, subsurface stormflow and throughflow: A synthesis of field work and modelling. *Hydrological Processes*, **38**(9), e15263. <https://doi.org/10.1002/hyp.15263>
- Mei, Y. ja Anagnostou, E. N. 2015. A hydrograph separation method based on information from rainfall and runoff records. *Journal of Hydrology*, **523**, 636–649. <https://doi.org/10.1016/j.jhydro.2015.01.083>
- Monteith, J. L. 1965. Evaporation and environment. *Symposia of the Society for Experimental Biology*, **19**, 205–234.
- Nash, J. E. ja Sutcliffe, J. V. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, **10**(3), 282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Nohara, D., Kitoh, A., Hosaka, M. ja Oki, T. 2006. Impact of Climate Change on River Discharge Projected by Multimodel Ensemble. *Journal of Hydrometeorology*, **7**(5), 1076–1089. <https://doi.org/10.1175/JHM531.1>
- OpenAI. 2026. ChatGPT (versioon 5.5) [suur keelemudel] <https://chatgpt.com>
- Penman, H. L. 1963. *Vegetation and hydrology*. Farnham Royal: Commonwealth Agricultural Bureaux. <https://rmetsonline.wiley.com/doi/10.1002/qj.49708938220> (accessed 2026-04-13)
- Rodionov, S. N. 2004. A sequential algorithm for testing climate regime shifts. *Geophysical Research Letters*, **31**(9), 2004GL019448. <https://doi.org/10.1029/2004GL019448>

- Scanlon, B. R., Healy, R. W. ja Cook, P. G. 2002. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, **10**(1), 18–39. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0176-2>
- Sepp, M., Tamm, T. ja Sagris, V. 2018. The future climate regions in Estonia. *Estonian Journal of Earth Sciences*, **67**(4), 259–268. <https://doi.org/10.3176/earth.2018.19>
- Thirel, G., Andréassian, V., Perrin, C., Audouy, J.-N., Berthet, L., Edwards, P., et al. 2015. Hydrology under change: an evaluation protocol to investigate how hydrological models deal with changing catchments. *Hydrological Sciences Journal*, **60**(7–8), 1184–1199. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.967248>
- Timm, H., Järvekülg, R., Pall, P. ja Vilbaste, S. 2019. *Eesti jõed*. Kirjastus Varrak, Tallinn.
- Vallner, L. ja Porman, A. 2016. Groundwater flow and transport model of the Estonian Artesian Basin and its hydrological developments. *Hydrology Research*, **47**(4), 814–834. <https://doi.org/10.2166/nh.2016.104>
- Vogel, R. M. ja Kroll, C. N. 1992. Regional geohydrologic-geomorphic relationships for the estimation of low-flow statistics. *Water Resources Research*, **28**(9), 2451–2458. <https://doi.org/10.1029/92WR01007>
- Wittenberg, H. 1999. Baseflow recession and recharge as nonlinear storage processes. *Hydrological Processes*, **13**(5), 715–726. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(19990415\)13:5%3C715::AID-HYP775%3E3.0.CO;2-N](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(19990415)13:5%3C715::AID-HYP775%3E3.0.CO;2-N)
- Xie, J., Liu, X., Jasechko, S., Berghuijs, W. R., Wang, K., Liu, C., et al. 2024. Majority of global river flow sustained by groundwater. *Nature Geoscience*, **17**(8), 770–777. <https://doi.org/10.1038/s41561-024-01483-5>
- Zhang, X., Yu, Y., Hu, C. ja Ping, J. 2021. Study on the influence of vegetation change on runoff generation mechanism in the Loess Plateau, China. *Water Supply*, **21**(2), 683–695. <https://doi.org/10.2166/ws.2020.361>

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Annabel Eensoo

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose

Pinna- ja põhjavee vastastikmõju modelleerimine kliimamuutuste mõju hindamiseks Püügaste oja valglas,

mille juhendajad on Marlen Hunt ja Joonas Pärn,

reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Annabel Eensoo

25.05.2026