

**VIDZEMES AUGSTSKOLA  
INŽENIERZINĀTŅU FAKULTĀTE**

**Oskars Java**

**IMITĒJOŠĀS MODELĒŠANAS UN SENSORU SISTĒMAS  
PIELIETOŠANA EKOSISTĒMAS PĀRVALDĪŠANAI**

PROMOCIJAS DARBS

Inženierzinātņu un tehnoloģiju doktora (Ph.D) zinātniskā grāda iegūšanai  
elektrotehnikas, elektronikas, informācijas un komunikāciju tehnoloģiju  
apakšnozarē sistēmu analīze, modelēšana un projektēšana

Promocijas darba vadītājs  
Dr.oec., profesors Juris Binde

Zinātniskais konsultants  
Dr.sc.ing., asociētais profesors Kaspars Osis

VALMIERA, 2021

Promocijas darbs izstrādāts:

**Vidzemes Augstskolas  
Inženierzinātņu fakultātes  
Doktora studiju programmā “Sociotehnisko sistēmu modelēšana”**

no 2017.gada līdz 2021.gadam

Zinātniskais vadītājs:

**Juris Binde**  
Dr.oec.  
Vidzemes Augstskolas profesors

Zinātniskais konsultants:

**Kaspars Osis**  
Dr.sc.ing.  
Vidzemes Augstskolas asociētais profesors

Iesniegts aizstāvēšanai Vidzemes Augstskolas Sociotehnisko sistēmu modelēšanas promocijas padomē 2022.gadā

## PATEICĪBAS

Es izsaku pateicību promocijas darba zinātniskajam vadītājam Dr.oec., profesoram Jurim Bindem, kurš ierosināja studijas turpināt doktorantūrā, piekrita kļūt par promocijas darba vadītāju un promocijas darba izstrādes procesā daudz palīdzēja ar savu eksperta viedokli, it īpaši stratēģiskos jautājumos. Studijas doktorantūrā man ir pavērušas jaunus apvāršņus, kā rezultātā bija iespējams krasi mainīt karjeru un nonākt dinamiskajā zinātnes un pētniecības sfērā.

Mana otrā pateicība tiek veltīta Bc.silv., Gatim Eriņam, kurš manī radīja interesi par mežaudzes koku vainagu ietekmi uz purva ekosistēmas ūdens bilanci, kas kļuva par manu maģistra darba tēmu, bet Eriņa kungs, par konsultantu. Kā novērojams šajā promocijas darbā, šī tēma man joprojām ir aktuāla, jo tā ir plaša un ne līdz galam izpētīta.

Trešo pateicību veltu Dr.geol., pētniekam Marko Kohv, kurš bija viens no maniem mentoriem starptautisko doktorantūras studentu apmaiņas programmā “Dora Plus” Tartu Universitātē, Igaunijā no 2019.gada 1.marta līdz 31.maijam. Kohv kungs palīdzēja ne tikai ar savām zināšanām ģeoloģijā un pieredzi purvu pētniecībā, skaidrojot hidroloģiskos un hidrauliskos procesus kūdras augsnē, bet arī nodrošināja mani ar kvalitatīviem datiem, kas iegūti Endla un Somā purvos. Tieši uz šiem datiem ir balstīta mana promocijas darba otrā nodaļa.

Ceturto pateicību izsaku Rietumbohēmijas Universitātei, Pilzenē, Čehijā un ģeomātikas pētniekam PhD Mihalam Kepkam par uzņemšanu viespētniecības vizītē projekta “LO1506 Sustainability support of the centre NTIS – New Technologies for the Information Society” ietvaros no 2020.gada 4.marta līdz 6.maijam, kur ieguvu starptautisku pētniecības projektu pieredzi.

Piekto pateicību izsaku zinātniskajam konsultantam Dr.sc.ing., asociētajam profesoram Kasparam Osim par norādēm uz zinātnes apakšnozarei atbilstošajiem akcentiem, kas darbā sākotnēji iztrūka.

Sestā pateicība tiek veltīta manai draudzenei un dzīvesbiedrei Sanitai Resnei, kura vienmēr atbalstīja un samierinājās ar to niecīgo uzmanības apjomu, ko veltīju viņai darba tapšanas periodā.

Visbeidzot, pateicos Vidzemes Augstskolai par sniegto iespēju apgūt jaunas zināšanas un apvāršņus.

## ANOTĀCIJA

Autors: Oskars Java

Darba vadītājs: Dr.oec., profesors Juris Binde

Zinātniskais konsultants: Dr.sc.ing., asociētais profesors Kaspars Osis

**Imitējošās modelēšanas un sensoru sistēmas pielietošana ekosistēmas pārvaldīšanai -** Promocijas darbs, Valmiera: Vidzemes augstskola, 2021.- 128 lpp., 8 tabulas, 27 attēli, 6 pielikumi, bibliogrāfijas sarakstā 221 informācijas avoti.

“Imitējošās modelēšanas un sensoru sistēmas pielietošana ekosistēmas pārvaldīšanai” ir starpdisciplinārs promocijas darbs, kura autors tā tapšanas laikā ir pielietojis ne tikai savas zināšanas elektrotehnikā, elektronikā un informācijas un komunikācijas tehnoloģijās, bet arī papildus apguvis zināšanas bioloģijā, ģeoloģijā, hidroloģijā, hidraulikā un meteoroloģijā. Promocijas darbs apraksta sensoru sistēmas izveidi jēldatu iegūšanai imitējošās modelēšanas vajadzībām, datu apstrādi un purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa BogSim izveidi, kas ir pamats sensoru sistēmas izveidei, jo sensoru sistēma risina kvalitatīvu ieejas datu pieejamību ekosistēmas imitējošo modeļu vajadzībām. Promocijas darbā modelētā ekosistēma ir purva hidroloģiskā sistēma, jo tieši atbilstošs gruntsūdens līmenis ir galvenais priekšnosacījums, lai degradētā augstajā purvā atjaunotos ekosistēmai raksturīgā, jutīgā flora un fauna.

Purva hidroloģisko sistēmu imitējošais BogSim modelis ar informācijas tehnoloģiju palīdzību risina problēmas, kas interesē citu nozaru speciālistus. Purva hidroloģisko procesu dinamiskās īpašības tiek atspoguļotas ar atbilstošiem matemātiskiem vienādojumiem, kas ļauj precīzi (tuvu procesiem dabā) veikt dažādus analītiskus aprēķinus, kas saistīti ar ūdens plūsmām purva ekosistēmā. Tiek piedāvāta metodoloģija, kā aprēķinu veikšanai nepieciešamu purva hidroloģisko sistēmu imitējošo modeli izveidot sistēmu dinamikas vidē. Šīs pieejas priekšrocība ir tā, ka tā ļauj uzskaitīt visas darbības, kas norit katrā no ekosistēmas daļām atkarībā no ieejas datiem un ūdens deficīta katrā no tvertnēm, novirzot plūsmas tā, kā tas notiek dabā. Autora piedāvāto purva hidroloģisko sistēmu imitējošo modeli var izmantot kā inženiertehnisku rīku, kas palīdz izprast purvu ekosistēmas nelineāros un sarežģītos hidroloģiskos procesus, lēmumu pieņemšanai par to pareizu apsaimniekošanu, apmācībai un citiem mērķiem. BogSim purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa darbības verifikācijai ir izmantoti neskartā Mannikjarve purva, kas atrodas Igaunijas austrumu daļā, jēldati, bet validācijai, Somā Nacionālā parka, kas dislocēts Igaunijas dienvidrietumu daļā, degradētās purva daļas jēldati.

Sensoru sistēmas izveide ietver metodoloģiju, kā ar datoru un sakaru līdzekļu starpniecību nodrošināt jēldatu iegūšanu, glabāšanu, apstrādi un nosūtīšanu imitējošo modeļu ekosistēmu pārvaldīšanai vajadzībām. Tiek aprakstīta programmatūra un aparatūra, sensoru sistēmas arhitektūra un jēldatu apstrādes un ieejas datu izplatīšanas skripts, kas padara iespējamu NB-IoT sensoru sistēmas fizisku izveidi.

Promocijas darbā izstrādātās metodoloģijas tiek pielietotas Eiropas Savienības programmas “Erasmus+” Eiropas universitāšu projekta “Engaged and Entrepreneurial European University as Driver for European Smart and Sustainable Regions (E<sup>3</sup>UDRES<sup>2</sup>)” (projekta Nr.101004069, 01.10.2020 – 30.09.2023) iekšējā pētniecības projektā “Multi-Sensor Monitoring for Smart and Sustainable Farming in Europe (MULTISENS<sup>2</sup>E)” (01.10.2021 – 30.09.2023), Fundamentālo un lietišķo pētījumu projektu programmas pētniecības projektā “Purvu hidroloģisko režīmu reāllaika un imitāciju datu vizualizācija virtuālā realitātē” (Nr.lzp-2020/2-0396, 01.12.2020 – 31.12.2021) un Eiropas Savienības pētniecības un inovāciju atbalsta programmas “Apvārsnis 2020” zinātnes pētniecības projektā “reSilienT fARminG by Adaptive microclimaTe managEment (STARGATE)” (Nr.818187, 01.10.2019 - 30.09.2023).

**Atslēgas vārdi:** BogSim, sensoru sistēma, ekosistēmu pārvaldīšana, imitējošā modelēšana, IoT sensoru jēldatu apstrāde, sistēmu dinamika

## ANNOTATION

Author: Oskars Java

Supervisors: Dr.oec., Professor Juris Binde

Scientific advisor: Dr.sc.ing., Associated professor Kaspars Osis

**Application of simulation modelling and sensor system in ecosystem management** – PhD thesis, Valmiera: Vidzeme University of Applied Sciences, 2021, - 128 pages, 8 tables, 27 figures, 6 appendices, 221 sources of information in bibliography list.

“Application of simulation modelling and sensor system in ecosystem management” is interdisciplinary doctoral thesis, the author of which at the time of its creation has applied not only his knowledge in electrical engineering, electronics and information and communication technologies, but also acquired additional knowledge in biology, geology, hydrology, hydraulics and meteorology. Doctoral thesis describes the development of a sensor system for the extraction of raw data for simulation modelling purpose, the data processing and the development of the BogSim simulation model of bog hydrology, which is the basis for the development of the sensor system, since the sensor system addresses the availability of high-quality input data for the needs of ecosystem simulation models. The modelled ecosystem in the doctoral thesis is the hydrological system of the bog, since exactly an appropriate level of groundwater is a key pre-requirement for restoring the ecosystem-specific, sensitive flora and fauna in a degraded high bog.

The BogSim model simulating the hydrological system of the bog deals with issues of interest to specialists in other sectors by utilising information technology. Characteristics of the dynamics of the bog hydrological processes are reflected in appropriate mathematical equations, which allow for accurate analytical calculations related to water flows in the bog ecosystem. A methodology is proposed how to create a simulation model in a system dynamics environment, needed for calculations. The advantage of this approach is that it allows to list all the processes that take place in each part of the ecosystem depending on the input data and the water deficit in each of the stocks, redirecting the flows as they would flow in nature. The simulation model proposed by the author can be used as an engineer-technical tool to help understand the non-linear and complex hydrological processes of bog ecosystem, in decision-making on their proper management, in training and for other purposes. The functioning of the simulation model was verified using the raw data of the intact Männikjärve bog located in

eastern part of Estonia but validated using the raw data of the degraded bog part of the Sommaa National Park, located in the south-west of Estonia.

The development of a sensor system includes a methodology for ensuring the acquisition, storage, processing and transmission of raw data through computer and communication tools for needs of simulation models of ecosystems managing. In the thesis the software and hardware, sensor system architecture and raw data processing and input data distribution script are described, which makes it possible to create a network of NB-IoT sensors physically.

Methodologies developed in the doctoral thesis are applied in the European Union Erasmus+ European University project “Engaged and Entrepreneurial European University as Driver for European Smart and Sustainable Regions (E<sup>3</sup>UDRES<sup>2</sup>)” (project No. 101004069, 01.10.2020 – 30.09.2023) internal call project “Multi-Sensor Monitoring for Smart and Sustainable Farming in Europe (MULTISENS<sup>2</sup>E)” (01.10.2021 – 30.09.2023), Fundamental and applied research project programme project “Visualisation of real-time bog hydrological regime and simulation data in virtual reality” (Izp-2020/2-0396, 01.12.2020 – 31.12.2021) and the European Union’s Framework Programme for Research and Innovation “Horizon 2020” research project “reSilient fARminG by Adaptive microclimaTe managEment (STARGATE)” (Nr.818187, 01.10.2019 - 30.09.2023).

**Keywords:** BogSim, sensor system, ecosystem management, simulation modelling, processing raw data of IoT sensors, system dynamics

# SATURA RĀDĪTĀJS

SAĪSINĀJUMI UN DEFINĪCIJAS .....	10
IEVADS .....	13
1. EKOSISTĒMAS DEFINĒJUMS .....	25
1.1. Degradēto augsto purvu atjaunošanas pamatojums .....	25
1.2. Nodaļas secinājumi .....	30
2. HIDROLOĢISKO MODEĻU UN PROCESU PRIEKŠIZPĒTE .....	31
2.1. Esošo hidroloģisko modeļu izpēte .....	31
2.2. Hidroloģisko modeļu pielietojums purvu atjaunošanas projektos .....	33
2.3. Nodaļas secinājumi .....	35
3. PURVA HIDROLOĢISKĀS SISTĒMAS IMITĒJOŠĀ MODEĻA IZVEIDE .....	37
3.1. Purva hidroloģiskās sistēmas imitējošā modeļa prasību specifikācija .....	37
3.1.1. Objektorientētā analīze .....	38
3.1.2. Objekti .....	39
3.1.3. Objektu diagramma .....	39
3.1.4. Objekti, to atribūti un darbības .....	40
3.1.5. Purva hidroloģiskās sistēmas imitējošā modeļa ieejas un izejas dati .....	44
3.1.6. Objektorientēts dizains .....	46
3.2. Purva hidroloģiskās sistēmas imitējošā modeļa matemātiskais formulējums .....	49
3.2.1. Lapu laukuma indekss .....	49
3.2.2. Intercepcija .....	50
3.2.3. Sniega sega .....	51
3.2.4. Virszemes ūdens .....	52
3.2.5. Kūdras slānis .....	53
3.2.6. Glaciālie nogulumi .....	57
3.2.7. Morēna slānis .....	57
3.2.8. Transpirācija .....	58
3.2.9. Ezeru iztvaikošana un notece .....	59



3.3.	Purva hidroloģiskās sistēmas imitējošā modeļa izstrāde .....	59
3.3.1.	Purva hidroloģiskās sistēmas imitējošā modeļa parametru jutīguma analīze.....	63
3.3.2.	Purva hidroloģiskās sistēmas imitējošā modeļa kalibrēšana .....	66
3.3.3.	Purva hidroloģiskās sistēmas imitējošā modeļa verifikācija .....	70
3.3.4.	Purva hidroloģiskās sistēmas imitējošā modeļa veikspējas pārbaude .....	72
3.4.	Hidroloģisko modeļu salīdzinājums .....	84
3.5.	Nodaļas secinājumi .....	86
4.	SENSORU SISTĒMAS IZVEIDE IEEJAS DATU IEGŪŠANAI IMITĒJOŠO MODEĻU EKOSISTĒMU PĀRVALDĪŠANAS VAJADZĪBĀM.....	89
4.1.	Šaurjoslas lietu interneta sensoru piemērotība nākotnes imitējošajiem modeļiem....	90
4.2.	NB-IoT sensoru sistēmas uzbūve .....	92
4.2.1.	Sensoru sistēmas komponentes .....	92
4.2.2.	Sensoru sistēmas arhitektūra .....	97
4.2.3.	Meteoroloģisko datu glabātuve .....	98
4.3.	Nodaļas secinājumi .....	100
5.	DARBA EKONOMISKAIS UN SOCIOTEHNISKAIS PAMATOJUMS .....	102
	SECINĀJUMI .....	105
	IZZIŅAS AVOTI .....	110
	PIELIKUMI.....	129
	I PIELIKUMS. Sensoru datu apstrādes <i>Python</i> skripts .....	129
	II PIELIKUMS. Jaukto koku meža ūdens bilance Karpatu kalnos .....	133
	III PIELIKUMS. Augsnes īpašību tabula .....	135
	IV PIELIKUMS. ARSENAL sensorsitēmu kopējais darbības diapazons.....	136
	V PIELIKUMS. Purva hidroloģiskās sistēmas imitējošā modeļa grafisks attēlojums .....	137
	VI PIELIKUMS. Purva hidroloģiskās sistēmas imitējošā modeļa <i>Stella Architect</i> vienādojumu pārskats .....	138

## SAĪSINĀJUMI UN DEFINĪCIJAS

Akrotelms – augšējais dzīvās veģetācijas un daļēji sadalījušās kūdras slānis augstajā (sūnu) purvā, kurā pieejams skābeklis un notiek aktīvi procesi (aerobo baktēriju un citu mikroorganismu darbība, organiskās vielas noārdīšanās), raksturīgas ūdens līmeņa svārstības. Akrotelms ir augstā purva kūdras slāņa dzīvā daļa

Aleirīts – irdens, smalks drupiezis, kura sastāvā frakcija 0.05-0.005 mm saturs ir 25-50% robežās

Atvārsnītes – šūnas (lapas epidermā), kas regulē ūdens iztvaikošanu un gāzu apmaiņu

Augstie purvi – purvi, kas barības vielas saņem tikai no nokrišņiem un kuros ūdens līmenis parasti ir augstāks nekā blakus esošajās teritorijās

Boreāls mežs – meži, kas dabiski attīstījušies pēc ugunsgrēkiem. Eiropas Savienības aizsargājamo mežu biotops Nr.9010

CH<sub>4</sub> – metāns

Distrofi ezeri – dabīgi ezeri ar ļoti nabadzīgu augāju, brūnu vai sarkanbrūnu ūdens krāsu un zemu pH (parasti 3-6), ko nosaka ūdenī esošās humusvielas. Purva ezers

Ekstinkcijas koeficients – vērtība, kas izsaka, cik daudz gaismas substance absorbē

Ekosistēma – funkcionāla dabas vides sistēma, kurā ietilpst noteiktā teritorijā sastopamie augi, dzīvnieki un mikroorganismi un to eksistences vide. Ekosistēmā pastāv līdzsvars, tā ir stabila, kamēr neiejaucas cilvēks vai dabas stihija. Ekosistēmai ir pielāgošanās un pašregulācijas spēja

Evaporācija – fizikālā iztvaikošana no kokaudzes vainagu klāja, zemvainagu telpas, zemsedzes un augsnes

Evapotranspirācija – evaporācijas, transpirācijas un intercepcijas summa

Fitomasa – augu valsts masa

Flora – vēsturiski izveidojies augu sugu kopums (piemēram, noteiktā teritorijā, ainavā, ģeogrāfiskajā laikmetā); augu valsts

Fauna – vēsturiski izveidojies dzīvnieku sugu kopums (piemēram, noteiktā teritorijā, ainavā, ģeogrāfiskajā laikmetā); dzīvnieku valsts

Glaciālie nogulumi – ledāju kušanas ūdeņu nogulumi

GIS – ģeogrāfiskās informācijas sistēmas

Humusvielas – dabas vidē bioloģiski noturīgas augstmolekulāras neviendabīgas uzbūves vielas, kas veidojas, sadaloties dzīvajai organiskajai vielai, kā arī tās sadalīšanās produktiem un dzīvo organismu vielmaiņas produktiem reaģējot savā starpā un mijiedarbojoties ar vidē un dzīvajos organismos esošām neorganiskajām vielām. Tradicionāli atkarībā no to šķīdības humusvielas iedala: a) humīnskābes – humusvielu daļa, kas šķīst ūdenī, ja vides  $\text{pH} > 2$ ; b) fulvoskābes – humusvielu daļa, kas šķīst ūdenī neatkarīgi no  $\text{pH}$ ; c) humīns - ūdenī nešķīstošā humusvielu daļa

In situ (latīņu val.) dati – mērījumi veikti ar instrumentiem, kas atrodas tieši interesējošajā vietā un saskarsmē ar interesējošo objektu

Intercepcija – nokrišņu (lietus, sniega) daudzums, kurš nenasniedz augsni, bet aizķeras kokos, pamežā un zemsedzē

Imitējošā modelēšana – reālas sistēmas modeļa atveidošana, attēlojot tai raksturīgās pazīmes un norises matemātiskā formā, lai pētīt sistēmas īpašības un darbības raksturlielumus, izdarītu secinājumus un pieņemtu lēmumus par šādu sistēmu ieviešanu vai uzlabošanu

IoT – lietu internets (Internet of Things)

Katotelms – nedzīvās kūdras slānis augstajā (sūnu) purvā, kas patstāvīgi piesātināts ar ūdeni, tajā nav raksturīgas ūdens līmeņa svārstības. Uz katotelma virsmas notiek kūdras uzkrāšanās, sadaloties aktīvajā slānī jeb akrotelmā esošajām organiskajām vielām, bet dziļākos slāņos, salīdzinot ar akrotelmu, kūdras sadalīšanās notiek lēni – katotelms ir augstā purva kūdras slāņa neaktīvā jeb nedzīvā daļa

LAI – lapu laukuma indekss (Leaf Area Index)

lm – lūmens. Gaismas plūsmas mērvienība

lx – lukss. Apgaismojuma mērvienība. 1 lx ir apgaismojums, ko rada 1 lm liela gaismas plūsma, krītot uz 1  $\text{m}^2$  lielu laukumu

MAPE – vidējā absolūtā kļūda (mean absolute percentage error)

Minerālaugsne – normālos mitruma apstākļos veidojusies augsne, kurā pārsvarā ir minerālvielas

Morēna – viens no glaciālo nogulumu tipiem. Tie var sastāvēt no mālu aleirītu, smilts un grants maisījuma, kas veidojušies ledājā ieslēgta un pārvietota iežu atlūzu materiāla izgulsnēšanās rezultātā

NB-IoT – šaurjoslas lietu interneta tīkla veids, kas nodrošina dažādu iekārtu informācijas apmaiņu un saziņu (Narrow Band Internet of Things)

NIR – gaismas tuvā infrasarkanā starojumam frekvenču josla (Near Infrared)

Pārvaldīšana – kāda objekta pārraudzīšana, vadīšana atbilstoši īpašnieka mērķiem, stratēģijai, ievērojot taupības režīmu, saimnieciskumu u.c.

Perkolācija – virszemes un pazemes ūdeņu pieplūde gruntsūdeņiem

$R^2$  – daudzfaktoru korelācijas koeficienta kvadrāts

Red – gaismas sarkano frekvenču josla

SEG – siltumnīcefekta gāzes

RMSE – vidējā kvadrātiskā kļūda (root mean square error)

Sensoru sistēma – vairāki sensori, kas apvienoti vienā vienībā ar vienotu signāla apstrādes aparāturu un piekļuves saskarni

Skripts – instrukciju virkne, kas nosaka, kā programmai jāveic kāda specifiska procedūra

Sublimācija - cietas vielas tieša pāreja gāzveida agregātstāvoklī, apejot šķidro fāzi; viens no iztvaikošanas veidiem

Transpirācija – augu fizioloģiskā iztvaikošana pa lapu (skuju) atvārsnītēm, lapās nodrošina sūcēj spēku, kas palīdz transportēt ūdeni augšupejošā plūsmā

UML – vienotā modelēšanas valoda (Unified Modeling Language)

UV- ultravioletais starojums

Validācija – sistēmas pārbaude, ko veic tās izstrādes beigu posmā, lai pārlicinātos, ka izstrādātās sistēmas funkcionēšana atbilst formālajām prasībām

Verifikācija – sistēmas pārbaude, ko parasti veic tās izstrādāšanas gaitā, lai pārlicinātos, vai izstrādāšanas procesā aplūkojamā posma rezultāti atbilst tā sākuma definētajiem noteikumiem un prasībām

## IEVADS

Promocijas darba nosaukumā ietvertie jēdzieni “imitējošā modelēšana”, “sensoru sistēma”, “ekosistēma” un “pārvaldīšana” ir plaši interpretējami atkarībā no izmantojamās jomas, mijiedarbības un konteksta. Darba ievadā autors sniedz šo jēdzienu izpratni, mijiedarbību un interpretāciju promocijas darba ietvaros un kontekstā. .

Pirmais nosaukumā ietvertais termins ir “imitējošā modelēšana”. Imitējošā modelēšana ir reālas sistēmas modeļa atveidošana, attēlojot tai raksturīgās pazīmes un norises matemātiskā formā, lai pētot sistēmas īpašības un darbības raksturlielumus, izdarītu secinājumus un pieņemtu lēmumus par šādu sistēmu ieviešanu vai uzlabošanu (Ozoliņa, 2021). Tas pasaka, ka promocijas darba centrā ir kāda reāla sistēma, kas izteikta matemātiskos vienādojumos un izteiksmēs, ar kuru palīdzību iespējams izspēlēt dažādus pārvaldīšanas scenārijus, lai (šajā gadījumā) sistēmu uzlabotu (degradētu atgrieztu dabīgā stāvoklī). Informācijas tehnoloģijas ir instrumenti, kurus lieto vai rada, lai risinātu problēmas, kas interesē visu nozaru speciālistus (Kuļikovskis, 2015) un imitējošā modelēšana ir viens no šiem instrumentiem. Imitējošā modelēšana ir sistēmas pārvaldīšanas process ar piemērotiem ieejas datiem un izejas datu novērtēšanu un analīzi (Yin & McKay, 2018). Piemērotus sistēmas datus iespējams nodrošināt izmantojot vides sensorus.

Otrais termins ir “sensoru sistēma”. Sensoru sistēma ir vairāki sensori, kas apvienoti vienā vienībā ar vienotu signāla apstrādes aparatūru un piekļuves saskarni (van Zyl, Simons, & McFerren, 2009). Sensoru sistēma ar datoru un sakaru līdzekļu starpniecību nodrošina jēldatu iegūšanu, glabāšanu, apstrādi un nosūtīšanu imitējošo modeļu ekosistēmu pārvaldīšanai vajadzībām. Sensoru sistēma pieskaitāma pie informācijas un komunikācijas tehnoloģijām, jo tā ir zināšanu, metožu, paņēmieni un tehniskā aprīkojuma kopums, kas ar datoru un sakaru līdzekļu starpniecību nodrošina informācijas iegūšanu, glabāšanu un izplatīšanu (Kuļikovskis, 2015). Imitējošo modeļu ieejas dati bieži ir balstīti uz objektīviem datiem, piemēram, tiek savākti no sistēmas, kura tiek modelēta (Yin & McKay, 2018) un bez sensoru sistēmas, kas datus iegūst tieši no sistēmas, tās imitējošā modeļa izveide var būt apgrūtināta, jo bieži trūkst kvalitatīvu *in situ* datu modeļu darbināšanai.

Trešais nosaukumā ietvertais termins ir “ekosistēma” – funkcionāla dabas vides sistēma, kurā ietilpst noteiktā teritorijā sastopamie augi, dzīvnieki un mikroorganismi un to eksistences vide (Baldunčika, 2007). Ekosistēmā pastāv līdzsvars, tā ir stabila, kamēr neiejaucas cilvēks vai dabas stihija (Bērziņa, 2008). Ekosistēmai ir pielāgošanās un pašregulācijas spēja (Bērziņa, 2008). Promocijas darba kontekstā, jāņem vērā, ka pirmā termina “imitējošā modelēšana” skaidrojumā minētā “reālā sistēma” šeit un tālāk tiek saprasta kā ekosistēma. Autora izstrādātais

purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis imitē purva ekosistēmas hidroloģisko sistēmu un procesus, jo tieši atbilstošs hidroloģiskais līmenis ir galvenais priekšnosacījums, lai degradētā purvā atgrieztos tam raksturīgā flora un fauna, kas ir divi galvenie dabīga purva ekosistēmu raksturojošie faktori. Detalizēts šīs ekosistēmas izklāsts, kas to raksturo, atšķir no citām dabas ekosistēmām un padara par unikālu, neatkārtojamo un vērtīgu, pieejams promocijas darba pirmajā nodaļā.

Ceturtais būtiskais termins ir "pārvaldīšana". Pārvaldīšana ir kāda objekta pārraudzīšana, vadīšana atbilstoši īpašnieka mērķiem, stratēģijai, ievērojot taupības režīmu, saimnieciskumu u.c. (Kvēle, 2005). Būtībā tā ir lēmumu pieņemšana, lai izvēlētos labāko pārvaldības veidu. Problēmu risināšanā un lēmumu pieņemšanā arvien vairāk tiek izmantoti imitējošie modeļi (Sarget, 2011). Modelēšana un imitācija ietver reālās pasaules sistēmas modeļa izstrādi, eksperimentu ar modeli veikšanu, lai iegūtu izpratni par sistēmas darbību dažādos apstākļos, alternatīvu pārvaldības stratēģiju novērtēšanu un lēmumu pieņemšanas procesus (Yin & McKay, 2018). Promocijas darba mērķis ir ar modelēšanas un imitācijas metodēm izstrādāt purva hidroloģisko sistēmu imitējošo modeli mežaudzes koku vainagu seguma ietekmes uz ekosistēmas ūdens bilanci novērtēšanai un tā izmantošanas metodoloģiju, bet izvērstā 3.3.4.apakšnodaļā, kurā detalizēti aprakstīta purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa darbības pārbaude un izdarītie secinājumi par ekosistēmas darbību, ir validācijas pieeja, praktiski pārbaudot tā darbību un, ar mainīgo izkliedes un prognozēšanas kļūdas standarta novirzes noteikšanu, parādot tā darbības augsto precizitāti un piemērotību ekosistēmas pārvaldīšanai.

Autora piedāvātais purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis ir izstrādāts sistēmu dinamikas vidē. Sistēmu dinamikas modelēšana izmanto datorimitāciju, lai ģenerētu savstarpējās mijiedarbības sistēmas dinamiskās darbības izpētei (Martis, 2006), šajā gadījumā – purva hidroloģiskās sistēmas izpētei. Purva hidroloģiskā sistēma ir sarežģīta sistēma ar daudzām komponentēm, tādējādi imitējošā modelēšana ir noderīgs instruments, lai novērotu, kā elementi, kas veido hidroloģisko sistēmu, mijiedarbojas viens ar otru. Jaunas, ātras un efektīvas pārvaldības metodes atklāšana ir būtiska, lai uzturētu un veicinātu ūdens resursu attīstību (Mashal & Fernald, 2020).

Diemžēl, lai arī kādu labumu videi un sabiedrībai kopumā sniegtu dažādi hidroloģiskie modeļi, bieži pietrūkst augstas kvalitātes meteoroloģisko datu, lai izstrādātu reģionāla līmeņa modeļus (Srivastava, et al., 2020), vai izskaidrotu cēloņu seku sakarības (Jenning, Kittel, & Molotch, 2018). Ņemot vērā, ka ne vienmēr pieejami *in situ* mērījumi, reizēm informācija, piemēram, par nokrišņiem tiek iegūta no tālās izpētes satelītiem un zemes virsmu imitējošiem modeļiem

(Shrestha, Nair, & Indu, 2020). Lai arī lielo datu tehnoloģiju nepārtrauktā attīstība uzlabo meteoroloģisko datu kvalitāti, to uzglabāšanas un pakalpojumu efektivitāte vēl nebūt neatbilst daudzu-avotu lielo datu prasībām (Yang, et al., 2019). Virszemes modeļi vairumā gadījumu ir atkārtoti apkopojusi esošos datus ļoti atšķirīgā kvalitātē un telpiskā izšķirtspējā (Grassini, et al., 2015). Modelēšanai varētu izmantot arī Eiropas Vidējā darbības rādiusa laika prognožu centra (ECMWF) atmosfēras datu kopu (ERA5), kas Copernicus klimata pārmaiņu dienesta (C3S) vārdā tika izveidota Klimata datu krātuvē (CDS), tomēr, dēļ nelielās 0.5 x 0.5 ģeogrāfisko grādu režģa izšķirtspējas (ECMWF, 2020), šie dati nav piemēroti, lai modelētu kādu specifisku vietu, kā, piemēram, pāris kvadrātkilometrus lielu purvu Latvijā. Šobrīd IoT tehnoloģijas strauji attīstās un ir kļuvušas viegli pieejamas un relatīvi lētas, kas ir par pamatu sensoru sistēmas izveidei kvalitatīvu ieejas datu iegūšanai imitējošo modeļu vajadzībām.

## **Pētījuma motivācija**

Jau izvēloties maģistra darba tēmu, darba autora sākotnējais uzstādījums bija, lai pētījuma rezultātā tiktu izstrādāts sociotehniskais risinājums, kam būtu pēc iespējas plašāks praktisks pielietojums, kas ar sistēmu analīzes, modelēšanas un projektēšanas starpniecību risinātu praktisku sabiedrības problēmu un interesētu iespējami vairāku nozaru speciālistus. Sistēma, kuru darba autors uzsāka pētīt maģistratūras laikā, bija purva hidroloģiskā sistēma, izstrādājot sistēmu dinamikas imitējošo modeli *Stella* vidē. Maģistra darbs tika izstrādāts 2017.gadā, un tā validācijai autors izmantoja Vides aizsardzības un reģionālās attīstības ministrijas (VARAM) Dabas aizsardzības pārvaldes īstenota LIFE programmas projekta “Meža biotopu atjaunošana Gaujas nacionālajā parkā” LIFE10 NAT/LV/000159 FOR-REST Gaujas Nacionālajā parka Gulbju salas purva hidroloģiskā līmeņa datus. Modeļa darbināšanai nepieciešamie meteoroloģiskie ieejas dati tika iegūti Latvijas vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centra mājas lapas ([www.meteo.lv](http://www.meteo.lv)) meteoroloģisko datu meklēšanas datu bāzē no ģeogrāfiski vistuvāk esošās (12.4 km) Priekuļu meteoroloģiskās stacijas, bet atstarošanās NIR un Red gaismas viļņa spektros – no “Vides risinājumu institūta” attālās izpētes lidojuma pāri teritorijai.

Maģistra darba ietvaros izstrādātā imitējošā modeļa verifikācijas procesā imitētā gruntsūdens līkne atdarināja gruntsūdens līmeņa mērījumu svārstības, kas lika domāt, ka modelī ietvertas visas galvenās ekosistēmu veidojošās daļas un to savstarpējā mijiedarbība matemātiski formulēta pareizi. Tā kā imitējošā modeļa darbināšanai kā ieejas dati tika izmantotas meteoroloģisko apstākļu diennakts vidējās vērtības, un tas arī ģenerēja izejas datus par katru dienu, bet “Meža biotopu atjaunošana Gaujas nacionālajā parkā” projekta ietvaros gruntsūdens līmeņa mērījumi tikai veikti manuāli tikai divas reizes mēnesī, modeļa veiktspēju nebija



iespējams objektīvi novērtēt. Darba autors izvirzīja hipotēzi, ņemot vērā, ka Priekuļu meteoroloģiskā stacija (119.8 mvjl (Latvijas valsts meži, 2020)) atrodas par 59.1 metru augstāk, nekā Gulbju salas purvs (60.7 mvjl (Latvijas valsts meži, 2020)) un, ka starp abām lokācijas vietām tek upe Gauja, tas atstāj būtisku nozīmi uz meteoroloģiskajiem apstākļiem, kas abās vietās, lai arī ģeogrāfiski netālu, varētu ievērojami atšķirties, tādējādi neļaujot imitējošā modeļa imitētajai gruntsūdens līknei pietuvoties mērījumu līknei tik tuvu, kā tas būtu situācijā, ja meteoroloģiskā stacija būtu novietota purvā.

Ņemot vērā, ka maģistra darba izstrādes laikā nebija pieejami piemēroti ieejas dati, kas liedza imitējošo modeli pienācīgi verificēt un validēt, un tika identificēta problēma, ka līdzīgu imitējošo modeļu darbināšanai dati bieži netiek iegūti vajadzīgajā kvalitātē un kvantitatē meteoroloģisko staciju un automātisko gruntsūdens mērījumu staciju augsto izmaksu dēļ, darba autoru motivēja pētījumu turpināt doktorantūras studiju ietvaros, turpinot darbu pie purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa pilnveides, verifikācijas un validācijas, izmantojot uz vietas iegūtus *in situ* ieejas datus un papildus uzsvāra liekot uz sensoru sistēmas izstrādi hidroloģisko sistēmu imitējošo modeļu ieejas datu iegūšanas vajadzībām.

## **Tēmas aktualitāte**

Lai sabiedrība būtu veselīga un izturīga, dabai jādod tai nepieciešamā telpa. Nesenā SARS-CoV-2 pandēmija vajadzību dabu aizsargāt un atjaunot padara vēl steidzamāku. Pandēmija liek aizdomāties par mūsu pašu veselības un ekosistēmu veselības savstarpējo saistību un uzskatāmi parāda vajadzību pēc ilgtspējīgām piegādes ķēdēm un patēriņa modeļiem, kas nepārsniedz planētas iespēju robežas. Jo vairāk daba tiek neatgriezeniski ietekmēta, jo vairāk pieaug infekcijas slimību rašanās un izplatīšanās risks (IPBES, 2019). Tāpēc bioloģiskās daudzveidības un labi funkcionējošu ekosistēmu aizsargāšana un atjaunošana ir iedarbīgākais veids, kā vairo mūsu izturētspēju un novērst jaunu slimību rašanos un izplatīšanos (European Commission, 2020).

Vairāk nekā pusi no pasaules iekšzemes kopprodukta nodrošina daba un tās sniegtie pakalpojumi, un no tiem augstākajā mērā atkarīgi ir trīs lielākie tautsaimniecības sektori – būvniecība, lauksaimniecība un pārtikas un dzērienu industrija (World Economic Forum, 2020). Investēšana dabas kapitālā, arī oglekļbagātu biotopu atjaunošanā un klimatam labvēlīgā lauksaimniecībā, tiek uzskatīta par vienu no piecām svarīgākajām fiskālās atlabšanas rīcībpolitikām, kas sniedz lielu ekonomisku daudzķāršojošo efektu un labvēlīgi ietekmē klimatu (Hepburn, O'Callaghan, Stern, Stiglitz, & Zenghelis, 2020). Klimatu regulē daba, un, lai samazinātu kaitīgās emisijas un pielāgotos klimata pārmaiņām, neaizvietojami kļūst dabā



balstīti risinājumi, piemēram, mitrāju, kūdrāju un piekrastes ekosistēmu aizsardzība un atjaunošana vai ilgtspējīga jūras apgabalu, mežu, zālāju un lauksaimniecības augšņu apsaimniekošana (European Commission, 2020). Bez tam, jau kopš 1992.gada augstie purvi ietilpst kopienas nozīmes dabisko biotopu, kuru saglabāšanai jānosaka īpaši aizsargājams dabas teritorijas statuss, sarakstā (European Commission, 1992).

Liela mēroga purvu atjaunošana ir viens no visvieglāk pielietojamajiem instrumentiem klimata pārmaiņu mazināšanai, jo dabīgi purvi darbojas kā oglekļa piesaistītāji.

Pašlaik purvu atjaunošana notiek gan Igaunijā, gan Latvijā. Pirmais degradēto purvu atjaunošanas solis ir meliorācijas sistēmas slēgšana, bet otrs, kas bieži vien ir visdārgākais un pretrunīgākais, ir (daļēja) koku izciršana. Pašlaik nav vispārpieņemtu imitācijas vai modelēšanas rīku, kas ļautu pirms darbu veikšanas novērtēt koku ciršanas ietekmi (Java, Kohv, & Asko, 2020). Pasaulē ir izstrādāta virkne hidroloģisko modeļu, kas izveidoti, lai novērtētu pazemes ūdens resursus (Koohestani, Meftah Halaghi, & Dehghani, 2013) (Moharir, Pande, & Patil, 2017) (Shu, Xu, & Wu, 2017) (Aker & Ahmed, 2021), pārbaudītu un prognozētu ūdens un tajā izšķīdušo vielu cirkulāciju un ķīmisko vielu un apūdeņošanas sistēmu ietekmi uz lauksaimniecības ražu (Wang, et al., 2019), novērtētu ūdens dziļumu, ūdens plūsmas ātrumu un applūstošās zonas (NSRC, 2020) un citiem mērķiem. Daļa no tiem pat ņem vērā veģetāciju, tomēr, neviens no tiem nav validēts purvu atjaunošanas projektos, tajā pašā laikā no tiem ir iespējams mācīties, lai izstrādātu jaunu purva hidroloģisko sistēmu imitējošo modeli, kas piemērots šīs specifiskās problēmas risināšanai, un tā pielietošanas metodoloģiju.

Šāds inženiertehniskais rīks, ja tas noteiktu optimālas iejaukšanās ekosistēmā<sup>1</sup> apjomu (mežaudzes retināšanas areālus un apjomus), būtu ļoti noderīgs purvu atjaunošanas plānošanā. Purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa un tā izmantošanas metodoloģijas izstrāde būtu inovatīvs un ilgtspējīgs veids, kā atrisināt šo problēmu, jo gan Latvijas, gan Igaunijas purvu hidroloģiskā režīma atjaunošanas projektu klāstā netrūkst tādu, kuros darbi tiek veikti neizmantojot modelēšanas rīkus, bet veicamo darbu veidu un apjomu izvēloties pamatojoties uz literatūrā aprakstītajiem tehniskajiem paņēmieniem (grāvju aizbēršana, rievsienu izbūve) un empīrisku pieredzi (Vides risinājumu institūts, 2014) (Le Maresquier, Aapala, Alanen, & Hokkanen, 2016). Šāda veida pieejas purvu hidroloģiskā režīma atjaunošanas projekti vairāk

---

<sup>1</sup> Optimāla iejaukšanās ekosistēmā nozīmē nodrošināt gruntsūdens līmeņa svārstības robežā 0.2-0.5 metrus zem zemes virsmas, kas ir dabīgam augstajam purvam raksturīgais līmenis (Vides risinājumu institūts, 2014), tādējādi neļaujot izzūt akrotelmam (augšējā kūdras slāņa daļu aptuveni 50 cm dziļumā aizņemt (Priede & Silamiķele, 2015)) jeb dzīvīvajai sfagnu sūnu daļai, kas nodrošina sūnu augšanu un kūdras veidošanos, tātad, oglekļa akumulāciju, kā arī notur gruntsūdens līmeni nedaudz zem zemes virsmas, neļaujot to appludināt, lai neveicinātu CH<sub>4</sub> emisijas (Stark, 2008).

līdzinās eksperimentēšanai dabā, jo vairumā gadījumu, tiek aizbērti grāvji un gaidīts, ka, gruntsūdens līmeņa palielināšanās rezultātā, koki aizies bojā (Ratcliffe, 2014), vai tiek nocirsti koki un aizbērti grāvji, un pēc tam vienkārši veikti novērojumi, vai un kā ekosistēma atjaunojas (Hancock, Cowie, & Field, 2014). Šādu pieeju rezultāts ne vienmēr sasniedz gaidas, kamēr ar atbilstošas imitējošās modelēšanas metodoloģijas palīdzību sagaidāmo rezultātu iespējams precīzi (tuvu procesiem dabā) prognozēt un sasniegt ātrāk.

## **Zinātniskā novitāte**

Šobrīd ir izstrādāti un pieejami vairāki hidroloģiskos procesus imitējošie modeļi. Kā jau modeļi, tie ir vienkāršots realitātes atspoguļojums, kas ir noderīgi liela mēroga modelēšanā, bet nespēj precīzi (tuvu procesiem dabā) attēlot visas tik specifiskās hidroloģiskās sistēmas kā purva ekosistēma ūdens plūsmas, kas ir vitāli svarīgas reģionāla līmeņa modeļos.

Šī pētījuma zinātniskā novitāte ietver aspektus:

1. Darba autors ir izpētījis un salīdzinājis esošos hidroloģiskos modeļus, kas ļāva identificēt to trūkumus un koncentrēties uz to izskaušanu jaunās pieejas izstrādē. Autora izstrādātā purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa pieeja ļauj uzskaitīt dinamiskās sistēmas īpašības.
2. Autora piedāvātā metodoloģija sniedz precīzākus (skatīt 6.tabulas RMSE rindu) rezultātus nekā esošās pieejas, jo īpaša uzmanība pievērsta parametriem, kas citos hidroloģiskajos modeļos nav attēloti tik augstā detalizācijas līmenī vai arī vispār nav ņemti vērā. Šie parametri ir ar veģetāciju saistītās ūdens bilanci ietekmējošās ekosistēmas īpašības kā intercepcija un transpirācija, kas vairumā hidroloģisko modeļu nemaz nav iekļautas.
3. Esošie hidroloģiskie modeļi katram no augsnes tipiem izmanto vienu hidrauliskās vadītspējas proporcionalitātes konstanti, tāpēc par darba autora purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa metodoloģijas novitāti uzskatāma arī akrotelma dinamiskās hidrauliskās vadītspējas ieviešana. Akrotelma dinamiskā hidrauliskā vadītspēja nozīmē, ka ūdens infiltrācijas ātrums kūdras slānī samazinās palielinoties attālumam līdz zemes virskārtai, līdz tiek sasniegts katotelms, savukārt katotelmā hidrauliskā vadītspēja saglabājas konstanta.
4. Darba autors izstrādāja vairākas loģiskās izteiksmes un vienkāršotu ūdens perkolācijas devona smilšakmens slānī pieeju, kā rezultātā ir uzlabota modeļa darbības precizitāte.

5. Izstrādātais purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis ir testēts divās sistēmu dinamikas vidēs, *Stella Architect* un *Insight Maker*, kas ļāva identificēt būtiskas atšķirības starp maksas un bezmaksas produktu;
6. Autora piedāvātā metodoloģija ietver izstrādātu NB-IoT sensoru sistēmu un skaidri izklāstītu tās darbību un uzbūvi, tajā skaitā programmatūru un aparatūru, kas ļauj iegūt *in situ* jēldatus hidroloģisko un citu vidi imitējošo modeļu vajadzībām, apstrādi, glabāšanu mākoņserverī un izplatīšanu, risinot kvalitatīvu ekosistēmas un vidi imitējošo modeļu ieejas datu pieejamības problēmu.

## **Praktiskā nozīme**

1. Autora piedāvātā metodoloģija ļauj ātrāk un efektīvāk atjaunot purva ekosistēmas ūdens bilanci, tādējādi palielinot dabas daudzveidību, atjaunojot ūdens ciklu, uzlabojot vietējo iedzīvotāju dzīves kvalitāti un veicinot rekreācijas iespējas, tā izmantojama kā mācību rīks vides zinātņu apmācības procesā;
2. Izstrādātais NB-IoT sensoru sistēma risina problēmu ar *in situ* jēldatu pieejamību vidi imitējošo modeļu vajadzībām;
3. Gan autora izstrādātais purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis, gan sensoru sistēma kvalitatīvu datu ievākšanai ir atkārtojami un replicējami, koncepts izmantojams citiem modeļiem līdzīgās ekosistēmās.

Zinātniskie rezultāti eksperimentāli pārbaudīti, izmantojot sistēmu dinamikas modelēšanas rīkus. Autora izstrādātais purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis *Insight Maker* vidē pieejams brīvpieejā tiešsaistē <https://insightmaker.com/insight/201089/Bog-hydrology-model>.

## **Pētījuma objekts**

Ekosistēmas pārvaldīšana izmantojot informācijas un komunikācijas tehnoloģijas.

## **Pētījuma priekšmets**

Imitējošais modelis un jēldatu ieguve, apstrāde un izmantošana ekosistēmas pārvaldīšanai.

## **Pētījuma mērķis**

Pētījuma mērķis ir izstrādāt imitējošo modeli un sensoru sistēmu ekosistēmas pārvaldīšanai.

## **Darba uzdevumi:**

- Definēt ekosistēmu un to raksturojošās īpatnības, kas to atšķir no citām ekosistēmām;
- Apzināt esošos modeļus, kas izmantojami hidroloģisko režīmu imitēšanai;

- Izpētīt elementus, kas veido ekosistēmu un mijiedarbojas viens ar otru;
- Izstrādāt purva hidroloģisko sistēmu imitējošo modeli un tā pielietošanas metodoloģiju;
- Novērtēt izstrādātā purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa darbību un veiktspēju sistēmu dinamikas vidē;
- Apzināt IoT un tīkla tehnoloģijas, kas varētu kalpot *in situ* sensoru sistēmas izstrādei;
- Izstrādāt *in situ* sensoru sistēmu, kas autonomi ievāc jēldatus, tos apstrādā un nosūta uz datu mākonī, kur tie tiek pārveidoti imitējošo modeļu ekosistēmu pārvaldīšanai nepieciešamā ieejas datu formātā.

## Hipotēze

*In situ* sensori dati apvienojumā ar purva hidroloģisko sistēmu imitējošo modeli un tā izmantošanas metodoloģiju hidroloģijas, ģeoloģijas un bioloģijas ekspertiem, kā arī iesaistītajām pusēm un lēmumu pieņēmējiem sniedz iespēju uzskatāmi novērtēt mežaudzes apjoma ietekmi uz purva ūdens bilanci, un skaidrot ekosistēmas atjaunošanas nozīmi un ietekmi uz vidi.

## Metodes

Promocijas darbā izmantotas šādas metodes:

1. Teorētiskās metodes – veikta sistemātiska zinātnisko rakstu, grāmatu, administratīvo dokumentu un elektronisko resursu izpēte un analīze;
2. Datu ieguves metodes – netiešos novērojumos ar Mannikjarve un Somā purvos Igaunijā izvietoto aparatūru iegūti meteoroloģiskie, gruntsūdens līmeņa un ranžēšanas sensoru LIDAR dati;
3. Datu analīzes metodes – primārās matemātiski statistiskās metožu izmantošana gruntsūdens līmeņa mērījumu un imitāciju datu sadalījuma, vidējo vērtību, standarta novirzes, kļūdas robežas noteikšanai; sekundāro matemātisko statistisko metožu izmantošana korelācijas, kvadrāta regresijas un neatkarības noteikšanai;
4. Rezultāta novērtēšana – purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa verificēšana, salīdzinot tā izejas datu punktus ar neskarta augstā purva gruntsūdens līmeņa datiem;
5. Eksperimenti – inženiertehniskā risinājuma izstrādāšana purva hidroloģiskās sistēmas imitēšanai, izmantojot sistēmu dinamikas modelēšanas metodes, ar kuru fiksēt visus parametrus un pa vienam mainīt, lai novērotu to ietekmi uz izmaiņām gruntsūdens līmeni. Eksperimentu veikšana izmantojot vairāku degradēta purva nogabalu datus, kur

manipulācijas ar mežaudzes retināšanu un/vai meliorācijas grāvju aizbēršanu, ar mērķi atjaunot purva dabisko hidroloģisko režīmu, veiktas dabā.

## **Darba struktūra**

Promocijas darbs izstrādāts, lai izstrādātu imitējošo modeli ekosistēmas pārvaldīšanai, praktiski pielietojot, pārbaudītu tā darbību un piedāvātu NB-IoT sensoru sistēmu kā rīku kvalitatīvu jēldatu iegūšanai imitējošo modeļu vajadzībām.

Darba pirmajā nodaļā tiek definēta ekosistēma, norādot uz tās galvenajām unikālajām īpašībām, kas to atšķir no citām dabas ekosistēmām un padara par tādu, kas būtu atjaunojuma, sniedzot pamatojumu tās hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa izveidei.

Otrajā nodaļā tiek veikta esošo hidroloģisko modeļu un imitējošo modeļu pielietošanas degradētu purvu atjaunošanas darbos priekšizpēte. Priekšizpēte ļauj apzināt iepriekš paveikto un identificēt apstākļus, kuriem jāpievērš pastiprināta uzmanība, lai izstrādātu purva ekosistēmas imitēšanai piemērotu hidroloģisko modeli.

Trešajā nodaļā darba autors pievēršas praktiskai purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa izveidei, sākot ar prasību specifikāciju, modeļa matemātisko formulējumu, kas noved pie modeļa izveides sistēmu dinamikas vidē. Sākotnēji autora izstrādātais BogSim purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis tiek izveidots gan *StellaArchitect*, gan *Insight Maker* vidē, kam seko padziļināta modeļa darbības pārbaude piecos Somā purva parauglaukumos Igaunijā. Nodaļā visi soļi ir detalizēti aprakstīti, kas kalpo par metodoloģija purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa atkārtotai izveidošanai un darbināšanai.

Ceturtajā nodaļā veltīta sensoru sistēmas izveidei ieejas datu iegūšanai imitējošo modeļu ekosistēmu pārvaldīšanai vajadzībām. Nodaļā aprakstītas atbilstošas tīkla tehnoloģijas izvēle, kas sniedz pietiekamu pārklājumu, lai NB-IoT sensoru sistēmu būtu iespējams novietot pat visattālākajā un grūtāk sasniedzamajā Latvijas nostūrī, un dati sasniegtu mākoņserveri. Nodaļas turpinājumā tiek aprakstītas NB-IoT sensoru sistēmas komponentes, darbības princips, arhitektūra un iegūto jēldatu apstrāde, lai tos pārveidotu ekosistēmu imitējošā modelī izmantojamus ieejas datus.

Piektajā nodaļā autors sniedz darba ekonomisko un sociotehnisko pamatojumu.

Lai nodaļās apkopoto informāciju padarītu vieglāk uztveramu, tās pēc vajadzības ir strukturētas līdz pat trīs līmeņu apakšnodaļās.

## Pētījuma veikšanas periods

Pētījums tika veikts no 2017.gada septembra līdz 2021.gada augustam.

## Aprobācija

### Par zinātniskā darba rezultātiem ziņots:

1. The specification of hydrological model requirements for bog restoration. 25.-26.04.2019. International Scientific Conference SOCIETY. TECHNOLOGY. SOLUTIONS. Valmiera, Latvija
2. Bog restoration for greenhouse gas emissions sequestration and climate change mitigation, 2.-5.10.2018, AgroEco 2018, Kauņa, Lietuva
3. Why should degraded high bogs be restored? 24.-26.08.2018, International Smithy of Ideas 2018, Pluņģe, Lietuva
4. Restoration of degraded bog hydrological regime using system dynamics modelling, 21.-23.03.2018, International Conference on Innovations in Science and Education, Prāga, Čehija
5. Significance of thinning degraded swamps forest stands in sustainable ecosystem's development, 23.-24.11.2017, Rural Development 2017, Kauņa, Lietuva
6. Degraded swamps hydrological regime restoration using system dynamics modelling. 13.14.10.2017. 58<sup>th</sup> International Scientific Conference SCEE`2017, Rīga, Latvija
7. The forest stand's crown cover impact on the water balance of swamp's ecosystem, 17.-19.05.2017, Research for Rural Development 2017, Jelgava, Latvija

### Publikācijas:

1. Java, O., Kohv, M., Lõhmus, A. (2021). Performance of a Bog Hydrological System Dynamics Simulation Model in an Ecological Restoration Context: Soomaa Case Study, Estonia. *Water*, 13(16), 1-13, DOI: 10.3390/w13162217 (Publikācija indeksēta Scopus un Web of Science)<sup>2</sup>
2. Java, O., Sigajevs, A., Binde, J., Kepka, M. (2021). NB-IoT Sensor Network for Obtaining the Input Data for Hydrological Simulation Model. *Agris On-line Papers in*

---

<sup>2</sup> O.J. ierosināja pamatteksta ideju, sagatavoja manuskriptu, izstrādāja jaunu perkolācijas smilšakmenī pieeju, veica modeļa pārbaudi un deva ieguldījumu tabulu un attēlu izveidē. M.K. nodrošināja hidroloģiskos un meteoroloģiskos datus, deva pienesumu pamattekstam un attēliem. A.L. nodrošināja veģetācijas datus un deva pienesumu pamattekstam un tā atbilstoši strukturēšanai.

*Economics and Informatics*, 13(1), 59-69, DOI: 10.7160/aol.2021.130105 (Publikācija indeksēta Scopus)<sup>3</sup>

3. Java, O., Kohv, M., Lõhmus, A. (2020). Hydrological model for decision-making: Mänikjärve bog case study, Estonia. *Baltic Journal of Modern Computing*. 8 (2020), No. 3, 379-390, DOI: 10.22364/bjmc.2020.8.3.01 (Publikācija indeksēta Scopus un Web of Science)<sup>4</sup>
4. Java, O. (2020). The Specification of Hydrological Model Requirements for Bog Restoration. *Baltic Journal of Modern Computing*. 8 (2020), No. 2, 164-173, DOI: 10.22364/bjmc.2020.8.1.11 (Publikācija indeksēta Scopus un Web of Science)
5. Java, O. (2018). Restoration of a degraded bog hydrological regime using system dynamics modelling, *CBU International Conference on Innovations in Science and Education*, Prague, Czech Republic, DOI: 10.12955/cbup.v6.1301 (Publikācija indeksēta Web of Science)
6. Java, O. (2017). Significance of thinning degraded swamps forest stands in sustainable ecosystem's development, *Proceedings of Rural Development 2017*, Kaunas, Lithuania, DOI: 10.15544/RD.2017.104 (Publikācija indeksēta Web of Science)

### **Zinātniskās pētniecības projekti**

Izstrādātā metodoloģija jau promocijas darba izstrādes laikā tika pielietota starpdisciplinārā Eiropas Savienības pētniecības un inovāciju atbalsta programmas “Apvārsnis 2020” zinātnes pētniecības projektā “reSilienT fARminG by Adaptive microclimaTe managEment (STARGATE)” (projekta Nr.818187, 01.10.2019 - 30.09.2023), novērtējot izstrādātās tehnoloģijas un tās validējot. Projektā ir izmantota autora izstrādātā metodoloģija sensoru datu pārveidošanai formātā, kas nepieciešama, lai tos automātiski pārveidotu atbilstošos sistēmu dinamikas imitējošā modeļa ieejas datus, un princips ūdens plūsmas augsnē aprēķināšanai.

Promocijas darba noslēguma posmā kopā ar Vidzemes Augstskolas Virtuālās un papildinātās realitātes laboratoriju tika uzsākts Fundamentālo un lietišķo pētījumu projektu programmas pētniecības projekts “Purvu hidroloģisko režīmu reāllaika un imitāciju datu vizualizācija virtuālā realitātē” (projekta Nr.lzp-2020/2-0396, 01.12.2020 – 31.12.2021), kura ietvaros autora izstrādātā un ar eksperimentālām metodēm sistēmu dinamikas vidē pārbaudītā purva

---

<sup>3</sup> O.J. ierosināja pamatteksta ideju, sagatavoja manuskriptu, izstrādāja sensoru sistēmas arhitektūru, izstrādāja attēlus un tabulas. A.S. deva pienesumu sensoru sistēmas arhitektūras izstrādei un nodrošināja datu sensoru datus. J.B. deva pienesumu pamattekstam un tā atbilstošai strukturēšanai. M.K. deva pienesumu pamattekstam.

<sup>4</sup> O.J. ierosināja pamatteksta ideju, sagatavoja manuskriptu, izstrādāja attēlus un tabulas. M.K. nodrošināja hidroloģiskos un meteoroloģiskos datus un deva pienesumu pamattekstam. A.L. nodrošināja veģetācijas datus.



hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa metodoloģija tika pielietota, lai izveidotu imitējošo modeli *Python* skriptā, kas ūdens plūsmas ekosistēmā aprēķinās vairs nevis vienā, bet divās dimensijās. Lai lietotājiem būtu iespējams ar imitējošo modeli iedarboties un iepazīties ar tā izejas datiem interaktīvā un viegli saprotamā veidā, izmantojot *Unity* starp-platformu spēļu dizainu, tas tik apvienots ar virtuālās realitātes vidi.

Jau pēc promocijas darba izstrādes, darba autora izstrādātā sensoru sistēmas metodoloģija tiek pielietota Eiropas Savienības programmas “Erasmus+” Eiropas universitāšu projekta “Engaged and Entrepreneurial European University as Driver for European Smart and Sustainable Regions (E<sup>3</sup>UDRES<sup>2</sup>)” (projekta Nr.101004069, 01.10.2020 – 30.09.2023) iekšējā pētniecības projekta “Multi-Sensor Monitoring for Smart and Sustainable Farming in Europe (MULTISENS<sup>2</sup>E)” (01.10.2021 – 30.09.2023) ietvaros. Tiek strādāts pie tā, lai sensoru sistēmu pielāgotu lauksaimniecības vajadzībām, kā arī papildinātu ar mašīnmācīšanās algoritmiem trokšņu identificēšanai un interpolēšanai, sensoru automātiskai kalibrēšanai, savlaicīgai bojātu sensoru identificēšanai u.c.



# 1. EKOSISTĒMAS RAKSTUROJUMS

Tāpat kā koraļļu rīfi, purvi ir īpašas zemes formas, jo tie galvenokārt veidojas bioloģisku, nevis fizisku procesu rezultātā, un tie paši veido virsmai raksturīgo formu un raksturu.

Purvs ir zemes virsmas nogabals, kuram raksturīgs pastāvīgs vai ilgstošs mitrums, specifiska augu valsts un kūdras veidošanās. Purvi veidojas apstākļos, kad nokrišņu daudzums pārsniedz iztvaikojumu. Purvu veidošanos veicina arī viļņotais reljefs un mālaini, vāji caurlaidīgi nogulumu, kādi raksturīgi lielā daļā Latvijas (Priede, Jātnieks, Kļaviņa, & Urtāns, 2017).

Degradētie augstie purvi ir tie augstie purvi, kuros izmainīts dabiskais hidroloģiskais režīms vai tie daļēji izmantoti kūdras ieguvei, bet kuros iespējams atjaunot hidroloģisko režīmu un kūdras veidošanās ir sagaidāma 30 gadu laikā (Auniņš, et al., 2010). Purvu degradācijai par pamatu ir meliorācijas grāvju izrakšana. Izrokot purvos grāvjus notiek pastiprinātas gruntsūdens līmeņa svārstības, kuras netraucētos purvos svārstās 0.2-0.5 metrus zem zemes virsmas (Vides risinājumu institūts, 2014). Turpretī traucētos hidroloģiskā režīma apstākļos gruntsūdens līmeņa gada svārstības var sasniegt vienu metru (Vides risinājumu institūts, 2014).

Hidroloģiskā režīma atjaunošana kavē strauju koku augšanu un nodrošina kūdras augsnes veidošanos – biotopam raksturīgos procesus, kas izmainītā hidroloģiskā režīma dēļ ir daļēji vai pilnībā apturēti (Vides risinājumu institūts, 2014). Hidroloģiskā režīma atjaunošanu var paātrināt, piepildot meliorācijas grāvjus un, ja teritoriju klāj mežaudze, nocērtot daļu no kokiem. Mežaudzes retināšana var būt nepieciešama hidroloģiskā režīma atjaunošanai, jo transpirācija no mežaudzes mērenajā klimata joslā var sasniegt līdz 35% no kopējo nokrišņu masas (Mind'āš, Škvarenina, & Střelcová, 2006), kalpojot par faktoru, kā ietekmē iztvaikojums pārsniedz saņemot nokrišņu daudzumu. Līdz šim nav izstrādāts imitējošais modelis, kas paredzēts optimālas koku retināšanas intensitātes noteikšanai ar mērķi atjaunot purva hidroloģisko režīmu (Java, Kohv, & Asko, 2020).

## 1.1. Degradēto augsto purvu atjaunošanas pamatojums

Dabīgi augstie purvi pilda vairākas svarīgas funkcijas un sniedz vērtīgus ekosistēmu produktus un pakalpojumus, kuru dēļ ir vērts saglabāt neskartos un atjaunot degradētos purvus. Diemžēl šie ekosistēmu produkti un pakalpojumi lielākoties netiek pārdoti tirgū, mēs tos saņemam par velti, tāpēc tiem nav noteikta cena, kas gadu desmitiem ir ļāvis tos iznīcināt balstoties tikai uz potenciāli iegūstamās kūdras un koksnes pienesumu ekonomikai, nenovērtējot nodarītos zaudējumus un ietekmi uz klimata pārmaiņām.

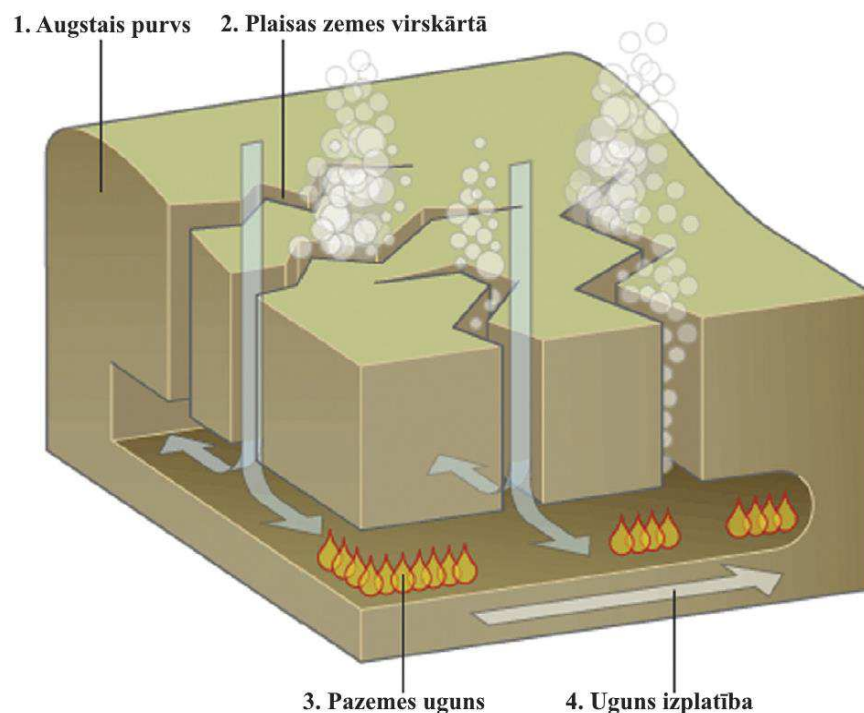
**Plūdu riska mazināšana.** Mitrzemes, it īpaši, augstie purvi upju baseinos nodrošina, tā saukto sūkļa funkciju, akumulējot kūdrā daļu no potenciālās noteces, tādējādi samazinot noteces ekstrēmās vērtības upēs. Tādēļ šajās platībās rekomendējamas jaunveidojamas mitrzemju platības kā upju noteci stabilizējošs upes sateces baseina elements. Lai to panāktu, nepieciešam bloķēt no purviem iztekošos meliorācijas grāvjus, veidojot kūdras vai koka dambjus, dažkārt tos kombinējot ar citiem materiāliem (Jansons, 2010).

Latvijas purvi dabiskā stāvoklī samazina upju gada vidējo noteci, ko savukārt palielina purvu nosusināšana. Mazūdens periodu minimālā notece no augstajiem purviem ir mazāka par apkārtējo vieglo minerālaugšņu teritoriju noteci, un aptuveni atbilst mālainu minerālaugšņu notecei (Aleksāns, 2015).

**Ugunsgrēku risku mazināšana.** Sliktās plānošanas gadi, kad padomju melioratori nosusināja purvus, lai elektrostacijas nodrošinātu ar fosilo kurināmo, ir veicinājuši kūdras ugunsgrēku seku smagumu (Ferris, Petz, & Stark, 2013). Ugunsgrēki degradētos purvos notiek biežāk kā dabīgos purvos (Auniņš, et al., 2010). Kūdras ugunsgrēkus pastiprina kūdras porainā struktūra, zemais blīvums un skābekļa klātesamība (līdz 40%) pat tad, ja tā ir izolēta no atmosfēras. Kūdra var gruzdēt zem zemes arī tad, ja zemes virskārta ir slapja vai klāta ar sniegu, jo pēc ilga sausuma perioda ūdens kūdrā iesūcas ļoti lēni (Stracher, Prakash, & Rein, 2016), tāpat kā ūdens notek no sausa sūkļa, jo kūdra ir pazaudējusi savu spēju absorbēt ūdeni.

Vidējais kūdras biezums purvos Latvijā ir 1,5 – 3 metri, bet maksimālais – 17,9 metri (VARAM, 2018). Pazemes kūdras ugunsgrēki ir bīstami personālam, kurš cīnās ar ugunsgrēku tāpēc, ka tikai plāna augsnes kārtā šķir uguni no neskartās zemes virskārtas. Zeme var iebrukt no ugunsdzēsēja vai tehnikas svāra un nonākt kontaktā ar ugunsgrēka avotu (Stracher, Prakash, & Rein, 2016).

Pa plaisām zemes virskārtā (2) kūdras ugunsgrēks (3) saņem papildus skābekli, kas veicina degšanu (skatīt 1.attēlu). Zem zemes kūdra var degt dienām un pat mēnešiem ilgi, horizontāli pārvietoties (4) un izlauzties zemes virskārtā pavisam citā vietā, nekā ugunsgrēka izcelšanās vieta (skatīt 1.attēlu).

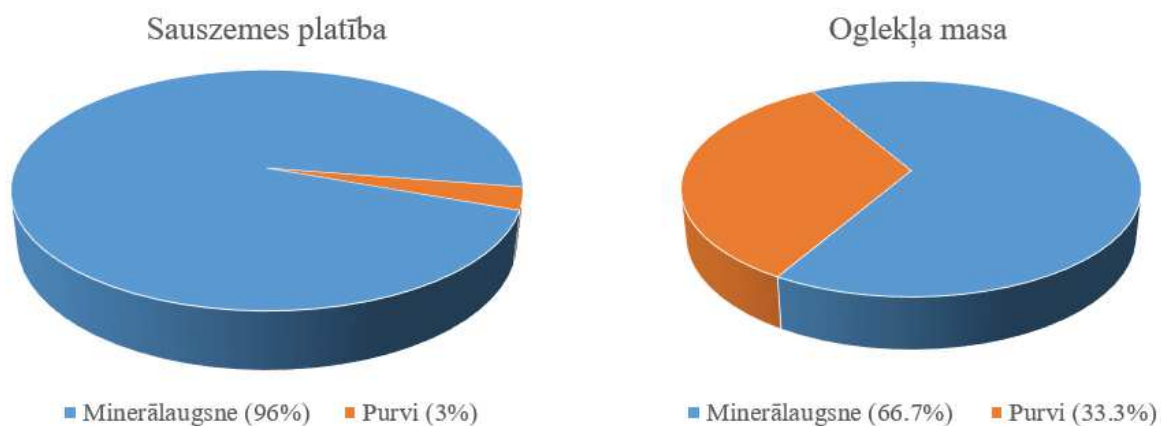


**1.attēls.** Kūdras ugunsgrēks

*Avots:* (BBC, 2012)

Kā atklāj Albertas Universitātes pētnieks Maiks Flanigens (Mike Flannigan), globālā sasilšana un mežaudžu apjoms purvos palielina kūdras ugunsgrēku risku, jo, pieaugot gaisa temperatūrai, evapotranspirācija notiek straujāk veicinot kūdrā ieslēgtā ūdens atbrīvošanu atmosfērā (Freedman, 2020). Ir aprēķināts, ka 2019.gada jūnijā, karstākajā jūnijā pēdējo 150 gadu vēsturē, kūdras ugunsgrēki atmosfērā emitēja 50 miljonus tonnu CO<sub>2</sub>, kas ir ekvivalents ikgadējām Zviedrijas emisijām (Hood, 2020).

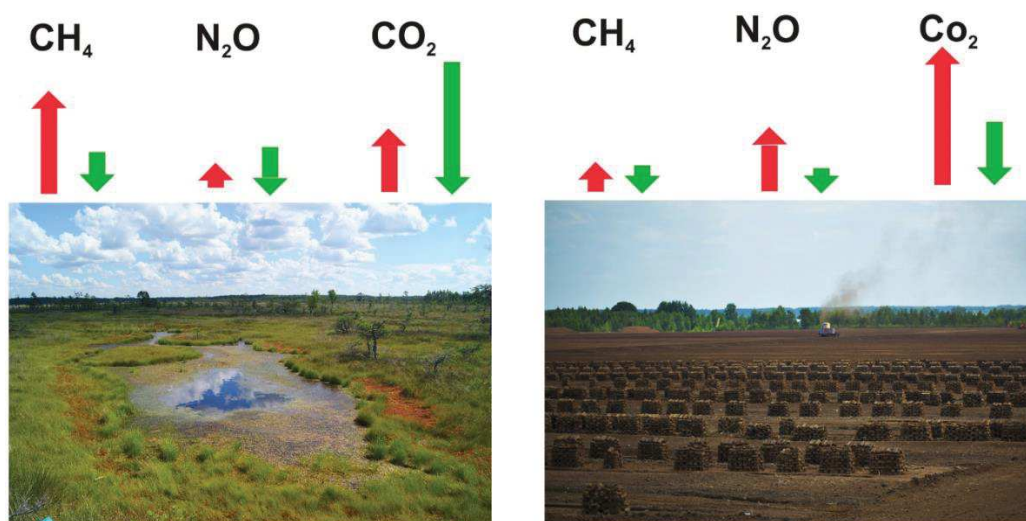
**Siltumnīcefekta gāzu emisiju piesaistīšana.** Tā kā jautājumi, kas saistīti ar klimata pārmaiņām pēdējā laikā tiek pastiprināti apspriesti un Eiropas Komisijas 2018.gada ilgtermiņa stratēģija paredz Eiropas pāreju uz klimata-neitrālu ekonomiku līdz 2050.gadam (Commission, 2018), bez siltumnīcefekta gāzu (turpmāk tekstā - SEG) emisiju ierobežošanas, jāapsver arī varianti, kā veicināt oglekļa absorbēšanu. Purvi aizņem tikai 3% no planētas sauszemes teritorijas, bet akumulē aptuveni vienu trešdaļu no aprēķinātā pasaules augsnes oglekļa (Kiely, et al., 2018) (skatīt 2.attēlu). Šis apjoms ir līdzvērtīgs visu sauszemes augu biomasai uz Zemes un glābā apmēram divreiz vairāk oglekļa nekā Zemes mežu ekosistēmas (Parish, et al., 2008).



**2.attēls.** Minerālaugsnes un organiskās augsnes (purvi) un oglekļa koncentrācijas proporcija

*Avots:* (Kiely, et al., 2018) (Parish, et al., 2008)

Lai atjaunotu degradēto purvu hidroloģisko režīmu, nepieciešams aizpildīt meliorācijas grāvjus un, dažkārt, nocirst vismaz daļu no apmežotās teritorijas. CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O un CH<sub>4</sub> emisijas galvenokārt ir atkarīgas no nokrišņiem, augsnes mitruma, pH līmeņa, sasalšanas-atkušanas, mēslošanas un augu sakņu aktivitātes (Aasa, et al., 2014). Aerobos apstākļos tiek veicināta CO<sub>2</sub> emisija, bet samazināta CH<sub>4</sub> emisija, bet, atjaunojot hidroloģisko režīmu, purvs sāk akumulēt CO<sub>2</sub>, bet pieaug CH<sub>4</sub> emisija (Lupiķis, 2018) (skatīt 3.attēlu). Lai klimata pārmaiņu mazināšanas nolūkā atjaunotu purvus kā oglekļa piesaistītājus, jāizvairās no teritoriju appludināšanas, bet tā vietā jāveido gruntsūdens līmenis nedaudz zem zemes virsmas, lai samazinātu nevēlamo metāna emisiju.



**3.attēls.** SEG emisijas dabīgā un degradētā purvā

*Avots:* autors

Dabīgu purvu ekosistēmas vienmēr ir darbojušās un turpina darboties kā nozīmīgi SEG piesaistītāji, un šī purvu loma jāapsver kopā ar citām funkcijām un vērtībām, pieņemot to pārvaldības lēmumus (Stark, 2008).

**Ekosistēmas pakalpojumi.** Iespējams vērtīgākais purva ekosistēmas pakalpojums ir ūdens pašattīrīšanās funkcija. Mehānisku, fizisku, fiziski-ķīmisku, bioloģisku un bioķīmisku procesu rezultātā mitrzesmes uzlabo ūdens kvalitāti (Vymazal, 2010). Pateicoties purviem un citām mitrzemēm, ezeros, upēs un pazemes ūdeņos nonāk tīrāki virszemes ūdeņi, tādējādi samazinot to attīrīšanas izmaksas, pirms lietošanas pārtikā. Pazemes ūdeņi ir viens no svarīgākajiem resursiem, kas nodrošina cilvēces pastāvēšanu, tajā skaitā avoti, kas ir nozīmīgs dzeramā ūdens avots (Priede, Jātnieks, Kļaviņa, & Urtāns, 2017). Purvi un citas mitrzesmes nodrošina, ka nokrišņu ūdens virszemes noteces veidā un pa meliorācijas kanāliem un upēm strauji nenonāk ģeogrāfiski zemākajās vietās, bet pamazām iesūcas augsnē un papildina pazemes ūdeņu krājumus, kuri pēc tam bieži nonāk virszemē avotu veidā mežos, tajos nodrošinot atbilstošu mitru un vēsu mikroklimatu, tādējādi piedaloties ūdens cikla un klimata regulācijā (Priede, Jātnieks, Kļaviņa, & Urtāns, 2017).

Rekreācija iekļauj rehabilitācijas funkciju, jo dabas izpēte veicina labu veselību (Tooman & Ruukel, 2012), purva estētisko funkciju, kam par pamatu ir purviem raksturīgā flora (sfagnu sūnas, purva priedes, rasenes, spilves u.c.) un bioloģiskos procesos veidojusies zemes virsma, kas bieži ietver ar humusa vielām bagātus distrofos ezerus ar tiem raksturīgo tumši brūno ūdeni. Purvi un avoti ir saistīti ar ārstniecībā izmantojamu minerālūdeņu, īpaši sērūdeņu veidošanos, kas līdz pat mūsdienām sekmīgi izmantoti ārstniecībā, rehabilitācijā, medikamentu un kosmētikas ražošanā (Priede, Jātnieks, Kļaviņa, & Urtāns, 2017).

Dabīgā augstajā purvā ir labvēlīgi apstākļi ogu, sēņu, ķērpju un citu mitrumu mīlošu organismu populāciju attīstībai un pastāvēšanai un cilvēku iecienīto dabas velšu – lāceņu, dzērveņu un sēņu – vākšanas vieta (Kampuse, 2014). Savvaļas produktu vākšana vairumā gadījumu tiek uzskatīta par atpalikušu darbību, ko nevar saistīt ar nozīmīgu makro vai mikro līmeņa ieguvumu (Grivins, 2016). Tomēr daudzi pētījumi liecina, ka savvaļas produkti veicina vietējās kopienas un var kļūt par ievērojamu ekonomikas nozari (Grivins, 2016). Daži aprēķini liecina, ka gandrīz ceturtdaļa Eiropas mājsaimniecību nodarbojas ar savvaļas produktu vākšanu (Grivins, 2021), kamēr Latvijā īpatsvars ir krietni lielāks un 2009.gadā sastādīja 77.7% (Grivins & Tisenkopfs, 2018). Ogošana, īpaši dzērveņu lasīšana, Latvijā ir būtiska ne tikai brīvā laika pavadīšanas nodarbe, bet arī nozīmīgs ekonomisks ieguvums un nodrošina papildu darba un peļņas iespējas daudziem cilvēkiem. Daudzi purva biotopu augi, piemēram, sila virsis *Calluna vulgaris*, purva vaivariņš *Ledum palustre*, purva vārnkāja *Comarum palustre*, trejlapu puplaksis *Menyanthes*

*trifoliata*, sfagni *Sphagnum*, rūgtā ķērsna *Cardamine amara*, izmantojami ārstniecībā un tradicionāli vākti dažādām vajadzībām (Priede, Jātnieks, Kļaviņa, & Urtāns, 2017). Lai arī nav aprēķināts kopējais ekonomiskais ieguvums, ko vietējām kopienām sniedz dabas velšu vākšana purvos, fakts, ka 2013.gadā Latvijā melleņu tirdzniecības apgrozījums vien sastādīja 4 miljonus EUR (Grivins, 2016), liek aizdomāties, ka precīzi aprēķināts ekonomiskais ieguvums ko dabas velšu veidā ilgtermiņā sniedz dabīgs augstais purvs, varētu būt vērā ņemams pretarguments purvu degradēšanai kūdras ieguves un mežsaimniecības vajadzībām.

Kūdras slāņos gandrīz neskarti lieliski saglabājas seno laiku putekšņi un dažādu dzīvo organisku atliekas, kas palīdz rekonstruēt agrākos laika periodos reģionam raksturīgo floru un faunu. Purvus nosusinot, šīs iekonservētās vērtības visbiežāk neatgriezeniski iet bojā, tātad jau pirms apzināšanas zaudējot tās uz visiem laikiem (Priede, Jātnieks, Kļaviņa, & Urtāns, 2017), tāpēc ir svarīgi purvus saglabāt neskartus, lai nākotnes arheologi, uzlabojoties augsnes dzīļu skenēšanas iekārtām, varētu izpētīt purvos uzkrātās pagātnes liecības.

## **1.2. Nodaļas secinājumi**

Ieguldīšana dabas kapitālā, tostarp ar oglekli bagātu biotopu atjaunošanā, tiek uzskatīta par vienu no piecām vissvarīgākajām fiskālās atveseļošanās politikām, kurām ir būtisks ekonomisku daudzkārsjošs efekts un pozitīva ietekme uz klimatu (Hepburn, O'Callaghan, Stern, Stiglitz, & Zenghelis, 2020). Purvi aizņem vien 3% no pasaules zemes platības, bet akumulē apmēram vienu trešdaļu augsnes oglekļa (Kiely, et al., 2018), kas ir divas reizes vairāk nekā mežu ekosistēmas (Parish, et al., 2008). Nepieciešamība saprast, kā šīs ekosistēmas darbojas un ko var sagaidīt cilvēku iejaukšanās gadījumā, jau sen ir atzīta par pētniecības prioritāti (Jørgensen, Mitch, & Kells, 1988), jo tā ļautu tās labāk pārvaldīt, lai sabiedrība varētu turpināt iegūt no ekosistēmas pakalpojumiem.



## 2. HIDROLOĢISKO MODEĻU UN PROCESU PRIEKŠIZPĒTE

Kā savās publikācijās ir minējis mitrzemju modelēšanas speciālists Jorgansens (Jørgensen), lai pareizi pārvaldītu purva ekosistēmas un optimizētu to nozīmi ainavā, ir svarīgi saprast, kā šīs sistēmas darbojas un ko gaidīt, kad mēs tajās iejauksimies vai tās mainīsim (Jørgensen, Mitch, & Kells, 1988). Ir skaidri jāsaprot, kā, mainot vienu purva daļu, mēs ietekmējam pārējās ekosistēmas daļas (Java, 2017). Gruntsūdens līmenis un tā svārstības ir galvenie šādas izpratnes parametri, tāpēc, uzsākot promocijas darba izstrādi, autors veica padziļinātu izpēti, lai noskaidrotu pasaules praksi līdzīgu problēmu risināšanā un izprastu purva hidroloģisko uzbūvi.

### 2.1. Esošo hidroloģisko modeļu izpēte

Arvien pieaug nepieciešamība pēc uzticamiem un pielietojamiem modelēšanas rīkiem ūdens krājumu un mitrzemju apstākļu novērtēšanai, kuru izejas datus varētu izmantot kā ieejas datus ainavu un zemes izmantošanas plānošanai. Šādu modelēšanas rīku vēlamā iezīme būtu spēja attēlot specifiskus zemes pārvaldības veidus un ekoloģiskās atjaunošanas sekas.

Mežsaimniecībai nosusināto purvu atjaunošanai izmantojamas divas galvenās ekoloģiskās atjaunošanas metodes – veģetācijas retināšana (koku ciršana) un grāvju aizbēršana (Anderson, et al., 2016). Skaidri aprakstīts un pārbaudīts modelis būtu vērtīgs instruments, lai plānotu šīs iejaukšanās ekosistēmas mērogā, ņemot vērā ekosistēmas atjaunošanas dilemmas un izmaksas (Remm, et al., 2019). RHESys (Regional Hydro-Ecological Simulation System – reģionālā hidroekoloģiskā imitējošā sistēma) modelis prognozē, ka mežu retināšana var palielināt noteci, un ūdensšķirtnēm, kas saņem vairāk nokrišņu, ir izteiktāka reakcija (Chen, et al., 2020), kas pamato mežaudzes retināšanu kā ekosistēmas atjaunošanas veidu. Tas nozīmē, ka purvu atjaunošanai un pārvaldībai nepieciešams reģionāla mēroga modelis, kas skaidri un precīzi ietver veģetācijas maiņas sarežģīto ietekmi uz ūdens bilanci. Šajā apakšnodaļā tiek apskatīti pasaulē biežāk izmantotie hidroloģiskie modeļi.

MODFLOW ir atvērta koda modulārs pazemes ūdens plūsmu modelis, ko izstrādājis Amerikas Savienoto Valstu Ģeoloģijas dienests (U.S. Geological Survey) (Harbaugh, 2005). Par tā augsto popularitāti liecina tas, ka Scopus datu bāzē tas minēts 2384 zinātniskajās publikācijās. Jaunākā MODFLOW 6.versija ir izstrādāta Fortran programmēšanas valodā, izmantojot mūsdienīgu programmēšanas stilu. Daudzi imitāciju elementi ir programmēti izmantojot objektorientēto dizainu (Hughes, Langevin, & Banta, 2017). Šis modelis ir izveidots, lai novērtētu pazemes ūdens resursus, un neiekļauj veģetāciju (Koohestani, Meftah Halaghi, & Dehghani, 2013) (Moharir, Pande, & Patil, 2017) (Shu, Xu, & Wu, 2017) (Akter & Ahmed, 2021), tāpēc nav piemērots, piemēram, degradētu purvu, kurus klāj mežaudze, atjaunošanas projektiem.

SWAT augsnes un ūdens novērtēšanas rīks ir upes baseina mēroga modelis, ko izmanto, lai imitētu virszemes un pazemes ūdeņu kvalitāti un kvantitāti un prognozētu zemes izmantošanas un apsaimniekošanas un klimata pārmaiņu ietekmi uz vidi (SWAT, 2021). Tas ir integrēts ĢIS, lai iegūtu ievades datus sateces baseina modelēšanai (Srinivasan & Arnold, 1994). Šis hidroloģijas modelis minēts 3808 Scopus indeksētās zinātniskajās publikācijās. To plaši izmanto, lai pārbaudītu un prognozētu ūdens un tajā izšķīdušo vielu cirkulāciju un ķīmisko vielu un apūdeņošanas sistēmu ietekmi uz lauksaimniecības ražu (Wang, et al., 2019). SWAT modelis, atšķirībā no vairuma plaši izmantoto hidroloģisko modeļu, ņem vērā arī veģetāciju, piemēram, aprēķinot intercepciju un transpirāciju, kas ļauj novērtēt veģetācijas ietekmi uz ūdens bilanci. Tomēr, tas nav piemērots purva atjaunošanas projektiem, jo gadījumā, kad augsnes virsējais slānis tiek piesātināts vai lietus intensitāte pārsniedz kūdras piesātināto hidraulisko vadītspēju un infiltrācija tiek aprēķināta pēc Grīna-Ampta (Green-Ampt) vienādojuma, intercepcija jāaprēķina atsevišķi (Neitsch, Arnold, Kiniry, Srinivasan, & Williams, 2002), bet dabīgā purvā kūdras slānis bieži ir piesātināts. Izveidotais modelēšanas ietvars ir vienkāršots ekoloģiskās mijiedarbības attēlojums, un tajā nav visu faktoru, kas ir atbildīgi par konkrētās ekosistēmas darbību, šī pieeja ir piemērota lielākam mērogam (upes sateces baseins vai valsts mērogs) (O'Keffe, et al., 2019).

WEAP (Water Evaluation And Planning) ir izstrādāts Stokholmas Vides institūtā (Stockholm Environmental Institute). Tas minēts 377 Scopus datubāzē indeksētās publikācijās. WEAP ir praktisks rīks ūdens resursu plānošanai un politikas analīzei. Ar tā palīdzību iespējams risināt jautājumus no ūdens pieprasījuma puses kā aprīkojuma efektivitāti, atkārtotas izmantošanas stratēģijas, izmaksas un ūdens sadales shēmas, jo tajā ir iekļauti ūdens rezervuāri, pazemes ūdens sūkņi un citas inženiertehniskās komponentes (Stockholm Environmental Institute, 2021). WEAP rīks ir paredzēts ūdens resursu attīstīšanas un apsaimniekošanas iespēju izskatīšanai, bet nav piemērots mežaudzes ietekmes uz ūdens bilanci novērtēšanai, jo LAI tajā tiek izmantots kā faktors, kas ietekmē virszemes noteci (Stockholm Environmental Institute, 2021), nevis intercepciju un transpirāciju.

MIKE SHE ir veidots uz apvienotiem fizikā balstītiem modeļiem virsmas plūsmas, nepiesātinātai plūsmas, gruntsūdens plūsmas un kanālu plūsmas. Tas ietver arī tādus procesus kā evapotranspirācija un sniega kušana (DHI, 2019), kas to padara par vispiemērotāko modeli mežaudzes ietekmes uz purva ūdens bilanci novērtēšanai no izstrādātajām modelēšanas metodēm. Ņemot vērā, ka MIKE SHE ir komerciāls produkts, tas ir atrodamas vien 481 Scopus indeksētās zinātniskajās publikācijās. Dēļ MIKE SHE modeļa ierobežojumiem atspoguļot mežaudzes intercepciju, lai iegūtu precīzus rezultātus, pētnieki evaporācijas no intercepcijas



modelēšanu veic ārpus modeļa (Duranel, et al., 2020). MIKE SHE modelī, imitējot purvu hidroloģiju, joprojām pastāv nenoteiktība, jo nav iespējams iekļaut dažus mitrāju uzvedības un modeļu attīstības elementus (Staes, Rubarenzya, Meire, & Willems, 2009), kas varētu būt par pamatu lielākai ūdens bilances kļūdai modelējot purva hidroloģiju (9.9% no kopējās ūdens ieplūdes) Centrālajā masīvā (Massif Central) Francijā, pretstatā nelielajai kļūdai minerālaugsnēs (1.6% no ūdens ieplūdes) (Staes, Rubarenzya, Meire, & Willems, 2009).

HecRAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System) ir pielietojams, lai pamatojoties uz virsmas slīpumu un topogrāfiju, novērtētu ūdens dziļumu, ūdens plūsmas ātrumu un applūstošās zonas. Tas ir noderīgs rīks arī nogulumu transportēšanas un ūdens temperatūras aprēķināšanai (NSRC, 2020). Šis rīks Scopus indeksētajās publikācijās minēts 48 reizes. Atsevišķos pētījumos ir ņemta vērā veģetācija kā buferis plūdu riska mazināšanai, kas rada papildus pretestību virszemes ūdens plūsmai, tādējādi samazinot plūdu sekas ģeogrāfiski zemākās teritorijās (Kastridis & Stathis, 2020) (Thomas, 2012), tomēr, modelis neveic intercepcijas un transpirācijas aprēķinus, līdz ar to nav piemērots mežaudzes ietekmes uz purva ūdens bilanci novērtēšanai.

QUAL2K ir Tuftas Universitātes (Tufts University) Civilās un vides inženierijas departamenta izstrādāts modelis (Tufts University, 2020), kas minēts 91 Scopus datubāzē indeksētā zinātniskajā publikācijā. Tas ir viendimensionāls upju un strautu ūdens kvalitātes modelis, kas paredzēts kanāla plūsmas vertikālās un sānu plūsmas attēlošanai (Tufts University, 2020), kas ņem vērā veģetāciju un nav piemērots purvu atjaunošanas projektos.

Ir pieejami vēl vairāki ne tik plaši pielietoti hidroloģiskie un hidrauliskie modeļi (Hess & Counsell, 2020) (Peng, Liu, Zgang, & Liu, 2018), kas, tāpat kā SWAT un MIKE SHE modeļi, veic aprēķinus, kas ņem vērā veģetācijas ietekmi uz ūdens bilanci. Kā jau modeļi, tie ir vienkāršots realitātes atspoguļojums, kuri ir noderīgi liela mēroga modelēšanā, bet nespēj precīzi attēlot visas tik specifiskās hidroloģiskās sistēmas kā purva ekosistēma ūdens plūsmas, kas ir vitāli svarīgas reģionāla līmeņa modeļos.

## **2.2. Hidroloģisko modeļu pielietojums purvu atjaunošanas projektos**

Ļoti vērtīga zinātniskā publikācija, kas palīdz izprast purva hidroloģiskās sistēmas komplikētību, ir "Simulation of hydrological processes on reconstructed watersheds using system dynamics" ("Hidroloģisko procesu imitācija atjaunotās ūdenstecēs, izmantojot sistēmu dinamiku"). Tajā ir izskaidrots, kā ūdens, kas atrodas augsnes porās, virzās uz glaciālo nogulumu un morēna slāņiem (Elshorbagy, Julta, & Kells, 2007). Vēl viens nozīmīgs pētījums

ir "A generic system dynamics model for simulating and evaluating the hydrological performance of reconstructed watersheds" ("Vispārīgs sistēmu dinamikas modelis atjaunoto ūdenskrātuvju hidroloģiskās veiktspējas imitēšanai un novērtēšanai") (Carey, Elshorbagy, & Kasha, 2009). Abas šīs publikācijas ietver vairākas matemātiskās izteiksmes, no kurām daļa izmantota promocijas darbā aprakstītā purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa izstrādē.

Pētījums "Different views on tree interception process and its determinants" ("Dažādi viedokļi par koku intercepcijas procesu un tā noteicošajiem faktoriem") apraksta, kā koku vainagu struktūra un izmērs nosaka kopējo nokrišņu daudzumu, kas paliek koku vainagos un nerasniedz zemi (Klamerus-Ivan, 2014). Šis gadījuma studiju pētījums ļauj labāk izprast hidroloģiskos procesus kokos un mežā kopumā.

Latvijas kontekstā hidroloģiskā modelēšana nav nekas jauns, piemēram, var minēt projektu "Ķemeru nacionālā parka hidroloģiskā režīma atjaunošana LIFE10 NAT\000160HYDROPLAN". To īstenoja Dabas aizsardzības pārvalde laika periodā no 2011.gada septembra līdz 2013.gada augustam. Dažādu matemātisko modeļu galvenais mērķis bija sniegt pamatotas prognozes par teritoriju hidroloģiskā režīma atjaunošanas nozīmi un ietekmi uz vidi (PAIC, 2013). Tie sniedza priekšstatu par projektā plānoto darbu ietekmi uz hidroloģiskā režīma pārmaiņām projekta teritorijā un vienlaikus izvērtēja potenciālo risku projekta ietvaros veikto darbību ietekmēm ārpus projekta rīcības teritorijām (Abaja, Eriņš, & Purmalis, 2018). Gruntsūdens modelis bija balstīts uz trīsdimensionālā Baltijas artēziskā pazemes ūdens filtrācijas modeļa PUMA, bet virszemes ūdenim tika izmantots SIA GEOEXPORT izstrādāts matemātiskais modelis (HYDROPLAN, 2016). Šī pētījuma gruntsūdens un virszemes monitoringa rezultāti norāda, ka, lai novērstu pastiprinātu ūdens iztvaikošanu caur koku vainagiem veģetācijas sezonas laikā, būtu nepieciešams veikt nevēlamās veģetācijas novākšanu (koku izciršanu), tomēr veģetācijas ietekme uz ūdens bilanci netiek modelēta (HYDROPLAN, 2016).

Latvijas hidroloģiskā režīma atjaunošanas projektu klāstā netrūkst arī tādu, kuros darbi tiek veikti neizmantojot modelēšanas rīkus, bet veicamo darbu veidu un apjomu izvēloties pamatojoties uz literatūrā aprakstītajiem paņēmieniem un empīrisku pieredzi, kā, piemēram, projekts "Mežu biotopu atjaunošana Gaujas nacionālajā parkā" (projekta numurs LIFE10 NAT/LV/000159 FOR-REST), kuru no 2011.gada 1.septembra līdz 2015.gada 31.augustam īstenoja Dabas aizsardzības pārvalde sadarbībā ar Vides risinājumu institūtu, Latvijas dabas fondu un ELM MEDIA. Projekta mērķis bija purvainiem mežiem raksturīgā hidroloģiskā režīma atjaunošana, novēršot susināšanas degradējošo ietekmi (Vides risinājumu institūts, 2014). Kā piemērotākā vieta projekta veikšanai tika izvēlēts Gulbju salas purva dabas liegums.

Tā kā FOR-REST projekta ietvaros tika veikti manuāli gruntsūdens līmeņa mērījumi gan pirms meliorācijas grāvju aizbēršanas, gan pēc un tos bija iespējams iegūt Dabas aizsardzības pārvaldē, darba autors izvēlējās Gulbju salas purvu, kā vietu uz kuras bāzes maģistratūras studiju laikā izveidot pirmo *Stella* imitējošā modeļa versiju un veikt tās verifikāciju. Gruntsūdens līmeņa mērījumi Gulbju salas purvā tika veikti divas reizes mēnesī. Gulbju salas purvā projekta ietvaros netika izvietota meteoroloģiskā stacija, tāpēc darba autors izmantoja datus no ģeogrāfiski tuvākās Priekuļu meteoroloģiskās stacijas, kas atrodas 12,7 km attālumā no purva, datus lejupielādējot no Latvijas vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centra mājas lapas [www.meteo.lv](http://www.meteo.lv). *Stella* imitējošā modeļa verifikācija parādīja, ka tas reagē uz meteoroloģisko apstākļu maiņu un izmaiņām LAI, kas apliecināja, ka modelis ir uzbūvēts atbilstoši, bet vienlaicīgi vērsa uzmanību uz to, ka upe Gauja, kas atrodas starp purvu un meteoroloģijas staciju, kā arī ģeogrāfiskā augstumu atšķirība ietekmē modeļa izejas datu precizitāti, jo meteoroloģiskie apstākļi purvā no apstākļiem Priekuļos var būtiski atšķirties. Šī iemesla dēļ, promocijas darba izstrādes vajadzībām, darba autors meklēja citu, piemērotāku vietu gadījumu studiju veikšanai un atrada Igaunijā, kur meteoroloģiskie dati tiek iegūti no purvos izvietotām meteoroloģiskajām stacijām un gruntsūdens līmenis tiek mērīts automātiski katru dienu.

### 2.3. Nodaļas secinājumi

Arvien vairāk pieaug vajadzība pēc uzticamiem un pielietojamiem modelēšanas rīkiem ūdens apgādes un mitrāju stāvokļa novērtēšanai, kurus pēc tam var izmantot par pamatu zemes izmantošanas plānošanai un pārvaldībai. Šādu modelēšanas rīku vēlamā iezīme būtu to noturība pret specifiskām zemes izmantošanas izmaiņām, lai prognozētu, kādas sekas radīs jauni pārvaldības režīmi un mitrāju atjaunošana, kas nav izmērīta laikā.

Ir pieejama virkne ar hidroloģiskajiem modeļiem, kurus darba autors ir izpētījis un salīdzinājumam iekļāvis 1.tabulā. Kā jau modeļi, tie ir vienkāršots realitātes atspoguļojums, kuri ir noderīgi liela mēroga modelēšanā, bet nespēj precīzi attēlot visas tik specifiskās hidroloģiskās sistēmas kā purva ekosistēma ūdens plūsmas, kas ir vitāli svarīgas reģionāla līmeņa modeļos. Purva hidroloģiskās sistēmas izpratne ir izšķiroša ilgtspējīgai zemes attīstībai un efektīvai augsnes un dabas saglabāšanai (Mioduskzewski, Povilaitis, Querner, & Ślesicka, 2010), bet esošie hidroloģiskos procesus imitējošie modeļi nespēj attēlot nosusinātiem un apmežotiem purviem piemērotos atjaunošanas scenārijus.

**1.tabula.** Hidroloģisko modeļu salīdzinājums

Hidro- loģiskais modelis	Iekļauj virszemes ūdeni	Iekļauj pazemes ūdens	Iekļauj veģetācija	Iekļauj inter- cepciju	Iekļauj transpi- rāciju	Iekļauj sniega kušanu	Pielietots purvu atjauno- šanas projektos
MODFLOW	X	V	X	X	X	X	X
SWAT	V	V	V	V	V	X	X
WEAP	V	V	V	X	X	X	X
MIKE SHE	V	V	V	X	V	V	X
HecRAS	V	X	V	X	X	X	X
QUAL2K	V	X	X	X	X	X	X

*Avots:* autors

Ir pieejama informācija par dažādiem degradētu purvu atjaunošanas projektiem, kur, lai noteiktu pēc iespējas optimālu iejaukšanās ekosistēmā mērogu, ir izmantoti imitējošie modeļi, tomēr, neviens no tiem nav brīvi pieejams un konstruēts veidā, kas ļautu tos pielāgot un pielietot citos purvu atjaunošanas projektos. Purvu atjaunošanai nepieciešams imitējošais modelis, kas piešķir lielāku nozīmi veģetācijas ietekmei uz ūdens bilanci un nodrošina precīzus rezultātus (tuvu procesiem dabā) reģionālā līmenī.

### **3. PURVA HIDROLOĢISKO SISTĒMU IMITĒJOŠĀ MODEĻA IZVEIDE**

Lai varētu precīzi prognozēt cilvēka darbību ietekmi uz ekosistēmu, veicot purvu atjaunošanas darbus, nepieciešams izveidot jaunu purva hidroloģisko sistēmu imitējošo modeli, kas īpaši izstrādāts šai ekosistēmai un pastiprinātu uzmanību pievēršot veģetācijai. Purva hidroloģiskā sistēma ir kompleksa sistēma ar daudzām komponentēm, tāpēc prasību specifikācijas metode ir noderīgs līdzeklis, lai, pirms purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa izveidošanas, noteiktu elementus, kas veido purva ekosistēmu un mijiedarbojas viens ar otru.

#### **3.1. Purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa prasību specifikācija**

Modelēšanā tiek pielietotas tādas sociotehnisku prasību specifikācijas metodes kā Sociotehnisku instrumentu kopums (Socio-technical toolbox – STT), Sociotehniskā sistēmu inženierija (Socio-technical System engineering – STSE), Sociotehnisko sistēmu dizains (Socio-Technical System Design – STSD), Mīkstā sistēmu metodoloģija (Soft System Methodology – SSM), Objektorientēta analīze un projektēšana (Object-Oriented Analysis and Design – OOAD), Spējā sistēmu izstrāde (Agile Systems development – Agile), Datorizētu sistēmu efektīva tehniskā un cilvēku ieviešana (Effective Technical and Human Implementation of Computer Based Systems – ETHICS).

STSE – sociotehnisku sistēmu izstrādes metodoloģija un instrumenti programmatūras inženieriem. Informācijas sistēmai tiek pievienots sociālais konteksts, tādējādi uzlabojot sistēmas produktivitāti (Dick, Hull, & Jackson, 2017).

STSD – pieeja, kā modelēt organizatoriskās sistēmas, ko ietekmē cilvēks, sociālie, organizatoriskie un tehniskie faktori (Baxter & Sommerville, 2011).

SSM – metode novērtē problemātisko situāciju no dažādām perspektīvām tādējādi iegūstot pilnīgu sistēmas skatījumu, lai izprastu iekšējās neloģikas atšķirības starp nākotnes struktūrām un turpmākajām sekām. Šī metode piemērota problēmu izzināšanai (Ngowi & Mvungi, 2018).

ETHICS – kopēja tehnisku un sociālu risinājumu izstrāde ar mērķi nodrošināt apmierinātību ar darbu un uzlabot organizatorisko sniegumu. No augšas uz leju vērsta pieeja. Neder liela mēroga projektiem ar sarežģītu izstrādi un prasībām (Ngowi & Mvungi, 2018).

OOAD – metode fokusējas uz objektiem un to savstarpējo mijiedarbību (Dick, Hull, & Jackson, 2017), palīdz radīt pielietojamus sistēmu modeļus un vizualizācijas, kas, izmantojot

objektorientētās tehnikas, var viegli pārvērst modulārās informācijas sistēmās (Ngowi & Mvungi, 2018).

STT – sistēma, metodes un rīki, kas izmanto citu klasisko sociotehnisku sistēmu prasību specificēšanas metožu koncepcijas, tādējādi gūstot virsroku pār to vajājam pusēm. Šī pieeja pārveido prasību definēšanu no SSM un ETHICS, izmantojot OOAD rīkus (Ngowi & Mvungi, 2018).

Agile – secīga prototipu izstrāde, kas ļauj abstraktās idejas konkretizēt un procesa laikā izkristalizēt prasības. Šī metode der sistēmu izstrādei, kur izstrādes sākumā nav zināmas prasības, iespējams tāpēc, ka tiek izstrādāts pilnīgi jauns pielietojuma, kur tās nav iespējams paredzēt (Dick, Hull, & Jackson, 2017).

Pēc prasību specificēšanu metožu izpētes, autors secina, ka vispiemērotākais prasību specificēšanas rīks, lai noteiktu sastāvdaļas, kas veido purva hidroloģisko sistēmu, un ļautu izveidot inženiertehnisku risinājumu tās replicēšanai, ir OOAD. OOAD principi balstās uz reāliem pasaules objektiem (Powell-Mors, 2017), šajā gadījumā uz elementiem, kas veido purva hidroloģisko sistēmu. Balstoties uz Objektorientēto pieeju, sistēma sastāv no savstarpēji komunicējošiem objektiem (Jiang, Zuo, & Fung, 1999). Šis prasību specificēšanas rīks ir piemērojams gan sistēmu dinamikā, gan objektorientētā programmēšanā. Balstoties uz OOAD prasību specificēšanu, ir iespējams izveidot gan sistēmu dinamikas purva hidroloģisko sistēmu imitējošo modeli *Stella Architect*, *Insight Maker* vai citā sistēmu dinamikas vidē, gan *Python* atvērtais kodā, kurš ir balstīts objektorientētā programmēšanā, gan uz aģentiem balstītu imitējošo modeli.

### **3.1.1. Objektorientētā analīze**

Objektorientētās analīzes uzdevumi ir:

- Objektu identificēšana;
- Objektu kārtošana, izmantojot objektu diagrammu;
- Objektu vai objektu atribūtu iekšējo elementu definēšana;
- Objektu uzvedības jeb darbības definēšana;
- Objektu savstarpējās mijiedarbības aprakstīšana (OOAD, 2020)

Purva hidroloģiskā modeļa robežu noteikšanā galvenokārt tika izmantotas teorētiskās metodes kā gadījuma izpēšu un satura analīze.

### **3.1.2. Objekti**

Objekti, kas veido purva hidroloģisko sistēmu, balstoties uz to uzvedību, procesiem un savstarpējo mijiedarbību, var tikt iedalīti klasēs:

- Ģeoloģiskie objekti: kūdras slānis, glaciālie nogulumi, morēna slānis;
- Bioloģiskie objekti: mežaudze;
- Procesa objekti: intercepcija, transpirācija, virszemes notece, sublimācija, evaporācija, ezeru evaporācija, ezeru notece, infiltrācija, sānu plūsma, perkolācija;
- Meteoroloģiskie apstākļi: nokrišņi, vēja ātrums, saules radiācija, gaisa temperatūra, relatīvais gaisa mitrums.

### **3.1.3. Objektu diagramma**

Purva hidroloģiskā modeļa telpisks atspoguļojums, kas sniedz vispārēju priekšstatu par modeļa loģisko uzbūvi, tiek demonstrēts 4.attēlā un 3.1.4.apakšnodaļā ir aprakstīti objekti, objektu atribūti, objektu darbības un objektu uzvedība.

Balstoties uz objektorientēto analīzi un projektēšanu, sistēmu dinamikas imitējošais modelis (skatīt 5.pielikumu) tika veidots pēc tādas pašas loģiskās uzbūves kā purva hidroloģiskās sistēmas konceptuālā shēma.





**Mežaudze** ir pirmais objekts, kas pakļauts ūdenim, kas sasniedz purva ekosistēmu lietuvai vai sniega veidā. Nozīmīgākais mežaudzes atribūts ir LAI. Pēc definīcijas tas ir viensusēja lapu laukuma attiecība pret zemes laukuma vienību. LAI nosaka lapu materiāla daudzumu vainagā, to normalizējot pret mežaudzes zemes platību (Pokorný & Strožnič, 2012). Mežaudzes atribūtu skaitā ietilpst lapu tilpums, koku vainagu koeficients, sniega intercepcijas koeficients, maksimālā sniega sega koku vainagos un datums, jo LAI ir mainīga vērtība. Ar atribūtu palīdzību iespējams aprēķināt objekta darbības:

- **Intercepcija** ir darbība, kas mežaudzes lapotnē uztver nokrišņus.

Koku vainagu struktūra un izmērs nosaka, kāds apjoms no kopējā nokrišņu daudzuma nenasniegs zemi. Baltijas valstīs priežu meži ir izplatīti purvos, bet skujkoki caur lapotni izlaiž mazāk nokrišņu kā lapu koki. Iemesls tam ir skuju četrsķautņainā forma, kas ļauj ūdenim uzkrāties skuju galos piliena veidā, kamēr tas relatīvi viegli notek no mitrām plakanajām lapu koku lapām. Salīdzinot vienāda izmēra skujkoku ar lapu koku, skujkokam būs vairāk skuju kā lapu kokam lapu (Klamerus-Ivan, 2014).

Skujkoki pretstatā lapu kokiem nemet lapas, tāpēc liela intercepcija saglabājas arī ziemas laikā, kas ļauj uztvert sniegu un to sublimēt (Java, 2020).

Kā liecina pētījums “Influence of tree transpiration on mass water balance of mixed mountain forests of the West Carpathians” (“Koku transpirācijas ietekme uz Rietumkarpatu jaukto koku kalnu mežu ūdens bilanci”), jaukto koku mežs pārtver aptuveni 20 procentus nokrišņu, kuri zemi nenasniedz, bet nonāk atpakaļ atmosfērā (Mind’áš, Škvarenina, & Střelcová, 2006). Skujkoku mežā intercepcijas ietekme uz ūdens bilanci varētu būt vēl ievērojamāka.

- **Sublimācija** ir darbība, kas nosaka, kā mežu lapotnē uztvertais sniegs atstāj koku vainagus tvaika veidā apejot kušanas procesu (Java, 2020).

Sniega sublimācijas palielinās saules radiācijas un pozitīvas gaisa temperatūras ietekmē. Sublimāciju, zinot koku vainaga aerodinamiskās īpašības, var aprēķināt ar enerģijas balansa modeļiem (Andreadis, Lettenmaier, & Storck, 2009).

- **Transpirācija** ir ūdens iztvaikošana no kokiem veģetācijas periodā, kad augi darbojas kā sūkņi, uzņemot ūdeni ar saknēm un pa stumbru to novadot līdz lapām, kur tas iztvaiko caur lapu atvārsnītēm. Veidojot purva hidroloģisko sistēmu imitējošo modeli jāņem vērā, ka skujkoki rudenī lapas nenomet un, lai arī lēni, pozitīvas gaisa temperatūras ietekmē priedēs notiek bioloģiskie procesi (Java, 2020).

Transpirācija apkārtējā atmosfērā ir atkarīga no koku sugas un apkārtējiem atmosfēras apstākļiem, piemēram, gaisa spiediena, relatīvā gaisma mitruma, gaisa temperatūras un

nokrišņiem, tāpēc šie parametri jāiekļauj transpirācijas aprēķinos (Leininger, Ouyang, Xu, & Zhang, 2016). Transpirācijas apjomu nosaka ne tikai meteoroloģiskie un klimatiskie faktori, bet arī koku bioloģiskie faktori, kas ietekmē koku vainagu izgaismojumu un ēnojumu, tāpēc, izstrādājot purva hidroloģisko sistēmu imitējošo modeli, ir svarīgi apkopot empīriskus datus par koku sugām un to anatomiskajām un fizioloģiskajām īpašībām (Java, 2020). Pamatojoties uz detalizētu informāciju par veģetācijas struktūru, modelī būtu jāiekļauj attiecīgie parametri, kas atbilst koku fizikālajām īpašībām, piemēram, vainagu ūdens kapacitāti un kopējo iztvaikošanas kapacitāti (Carey, Elshorbagy, & Kesha, 2009).

Transpirācija no meža ir apjomīgāka nekā no neskarta purva lielāka lapu laukuma indeksa dēļ, kurš vairākas reizes pārsniedz sfagnu sūnu lapu laukuma indeksu (Java, 2020).

**Augsnes virskārtu** sasniedz ūdens, ko nav pārtvērusi intercepcija, veidojot virszemes ūdeni. Augsnes virskārtu raksturo divi atribūti – nogāze jeb virsmas slīpums un datums. Datums ir nozīmīgs atribūts, jo laika gaitā, aizberot esošos vai izrokot jaunus grāvjus, var mainīties virsmas slīpums. Darbība, kā objekts atbrīvo ūdeni, ir:

- **Virszemes notece** veidojas, kad nokrišņu daudzums lietus veidā ir lielāks, nekā augsne spēj to absorbēt, sāk veidoties peļķes. Ja tiek pārsniegta virszemes ūdens ietilpība, notiek virszemes noteces virzienā no ģeogrāfiski augstākajām vietām uz zemākajām (Java, 2020).

**Ezers** ir objekts, kas atrodas tādā pašā līmenī kā augsnes virskārta. Purvu ezeru atribūti ir virsmas laukums, dziļums un datums, kas veido blodu ar sliekšni. Objektu raksturo divas ūdens atbrīvošanas darbības:

- **Ūdens iztvaikošana** no ūdens virsmas ir atkarīga no ūdens temperatūras, gaisa temperatūras, gaisa mitruma un vēja ātruma virs ūdens virsmas (Engineering ToolBox, 2001).
- **Ezera notece** notiek virzienā uz kanālu, ja tāds ir, un to iespējams noteikt empīrisku novērojumu rezultātā (Java, 2020). Ūdens notece beidzas, ja ūdens līmenis pazeminās zem sliekšņa, kas ir ezera ūdens līmeņa sākuma vērtība (Swedish Meteorological and Hydrological Institute, 2020).

**Kanālu** raksturo atribūti: dziļums, platums un kritums. Kanāls veic vienu darbību:

- **Kanāla plūsma** ir iespējama, kad ūdens līmenis ezerā ir pārsniedzis sliekšni un ezera notece sasniedz kanālu. Atribūti nosaka kanāla plūsmas ātrumu un ūdens apjomu, kas konkrētā laika sprīdī atstāj ezeru.

**Kūdras slānis** un purvs kopumā darbojas kā sūklis – tas absorbē ūdeni mitros apstākļos, bet lēnām to atbrīvo sausos apstākļos, tādējādi regulējot ūdens ciklu un samazinot plūdu risku (Java, 2020). Viena no svarīgākajām kūdras īpašībām ir porainības variācija – kūdras augšējā slāņa aptuveni 50 cm aizņem akrotelms, bet pārējo kūdras slāni aizņem katotelms. Akrotelmam un katotelmam ir atšķirīgas ūdens akumulācijas spējas (Priede & Silamiķele, 2015), ko nosaka atšķirīga porainība. Porainība ir augsnes daļiņu lieluma un to izkārtojuma funkcija. Poru telpa apzīmē rezervuāru ūdens uzkrāšanai un caurlaidībai, nosaka, cik ātri ūdens augsnē plūdis (Lawrence & Jiang, 2017). Kūdras slānis ir ļoti komplicēts objekts ar lielu atribūtu skaitu kā – kūdras slāņa piesātinātā hidrauliskā vadītspēja, sūcējspēka vadīšana kūdras slānī, kūdras slāņa biezums, evaporācijas no kūdras slāņa konstante, lambda evaporācijas koeficients, maksimālā kūdras slāņa ūdens ietilpība, minimālā kūdras slāņa ietilpība un datums.

Kūdras slāņa darbības, kas ietekmē tā piesātinātību ar ūdeni, ir:

- **Infiltrācija** kūdras slānī notiek balstoties uz kūdras slāņa piesātinātību ar ūdeni.
- **Evaporācija** ir ūdens iztvaikošana no kūdras slāņa, kas galvenokārt atkarīga no kūdras slāņa ūdens ietilpības un gaisa temperatūras.

**Glaciālo nogulumu slānis** ir objekts zem kūdras slāņa. Baltijas valstīs glaciālie nogulumi lielākoties sastāv no smiltīm un var saturēt oļus. Glaciālo nogulumu slānī notiek process, ko sauc par perkolāciju, kad ūdens, kas atrodas vadozās kūdras porās, ar gravitācijas spēku tiek virzīts uz leju un papildina gruntsūdeņus (Java, 2020).

Ūdens kustība glaciālo nogulumu slānī ir atkarīga no mitruma līmeņa virsējā kūdras slānī, ūdens uzsūkšanas spējām kūdras un glaciālo nogulumu slāņos, kūdras slāņa temperatūras un perkolācijas zemāk esošajā morēna slānī (Elshorbagy, Julta, & Kells, 2007).

Glaciālo nogulumu slāņa atribūti ir: glaciālo nogulumu biezums, ūdens filtrācijas ātruma glaciālajos nogulumos koeficients, glaciālo nogulumu slāņa ūdens piesātinātība, glaciālo nogulumu slāņa sākotnējā piesātinātība, glaciālo nogulumu efektīvā porozitāte, glaciālo

nogulumu porozitāte un datums. Atribūti ir atbildīgi par vienu objekta darbību:

- **Perkolācija** šajā gadījumā ir process, kad kūdras slānī esošais ūdens papildina glaciālo nogulumu slāni. Vienīgais veids, kā glaciālo ūdeņu slānis var atbrīvot ūdeni, ir perkolācija morēna slānī.

**Morēna slānis** atrodas zem glaciālo nogulumu slāņa. Ūdens kustība morēnas slānī ir atkarīga no gravitācijas spēka ietekmētās ūdens perkolācijas no glaciālo nogulumu slāņa (Elshorbagy, Julta, & Kells, 2007). Šī objekta atribūti ir: morēna slāņa ietilpību, morēna perkolācijas koeficients un datums. Objektam piemīt viena darbība:

- **Perkolācija** morēna slānī. Baltijas valstīs morēna slānis parasti sastāv no mālu un smilšu maisījuma, kam dažādās vietās var būt atšķirīga proporcija, tāpēc katrā purva gadījumā pētījumā, kurā tiek izmantots šis purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis, ir būtiski veikt morēna perkolācijas koeficienta kalibrēšanu (Java, 2020).

### 3.1.5. Purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa ieejas un izejas dati

Lai darbinātu purva hidroloģisko sistēmu imitējošo modeli, nepieciešami šādi ieejas dati:

#### 1. Meteoroloģiskie dati (Java, 2020):

- Nokrišņi (lietus, sniegs);
- Vēja ātrums;
- Saules radiācija;
- Gaisa temperatūra;
- Relatīvais gaisa mitrums.

Meteoroloģiskie dati var tikt iegūti netiešu novērojumu veidā no ģeogrāfiski tuvākās meteoroloģiskās stacijas vai, lai iegūtu precīzākus un ticamākus purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa izejas datus, ievākti no purvā izvietotas meteoroloģiskās stacijas vai sensoru sistēmas (Java, 2020).

#### 2. Ģeoloģiskie dati (Java, 2020):

- Purva virsmas slīpums;
- Ezera laukums un vidējais dziļums;
- Kanāla platums, dziļums un kritums;
- Kūdras, glaciālo nogulumu un morēna slāņa dziļums;
- Kūdras, glaciālo nogulumu un morēna slāņa maksimālā ūdens ietilpība.

Ģeoloģiskie dati modeļa vajadzībām Baltijas artēziskajā reģionā var tikt iegūti brīvpieejā no Latvijas Universitātes modeļsistēmas, izmantojot mobilo lietotni MOSYS mobile (Latvijas Universitāte, 2018)., Lai iegūtu augstāku precizitāti, autors rekomendē MOSYS modeļa vietā izmantot uz vietas veiktu ģeoloģisko mērījumu datus.

### 3. Augsnes hidrauliskās īpašības (Java, 2020):

- Kūdras slāņa sūcējspēks;
- Kūdras, glaciālo nogulumu un morēna kopējā porainība;
- Kūdras, glaciālo nogulumu un morēna efektīvā porainība;
- Kūdras galējā mitrumietilpība;
- Kūdras piesātinātā hidrauliskā vadītspēja.

Zinātniskajos rakstos, piemēram, “Estimation of Soil Water Properties” (“Augsnes ūdens īpašību novērtējums”) (Rawls, Brakensiek, & Saxton, 1982) un “Hydrological and Hydraulic Design of Peatland Drainage and Water Treatment Systems for Optimal Control of Diffuse Pollution” (“Kūdras drenāžas un ūdens attīrīšanas sistēmu hidroloģiskais un hidrauliskais dizains optimālai izkliedētā piesārņojuma kontrolei”) (Mojammadighavam, 2017), aprakstītas dažādu minerālo un organisko augšņu hidrauliskās īpašības. Izmantojot šos pētījumus, iespējams izvēlēties datus no gadījuma studijām ar vistuvākajiem klimatiskajiem apstākļiem un augsnēs sastāvu. Tomēr, lai iegūtu pēc iespējas precīzus purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa izejas datus, arī ieejas datiem jābūt precīziem, tāpēc ieteicams veikt augsnēs paraugu laboratoriskos mērījumus (Java, 2020).

### 4. Attālās izpētes dati (Java, 2020):

- Atstarošana tuvu infrasarkanajā spektrā;
- Atstarošana sarkanajā spektrā.

Vispiemērotākie dati lapu laukuma indeksa aprēķināšanai ir attālinātā izpētē iegūtie dati tuvu infrasarkanajā un sarkanajā spektrā, kurus var iegūt, izmantojot gaismas noteikšanas un ranžēšanas sensoru LIDAR (Light Detection and Ranging sensor). Ja LIDAR dati nav pieejami, var izlīdzēties ar MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) satelītdatiem, kas ir noderīgi liela mēroga modelēšanā, bet nelielos reģionālos modeļos, pie kuriem var pieskaitīt Baltijas valstu purvus, to izšķirtspēja nebūs pietiekama (Java, 2020).

#### 5. Kalibrējamie parametri (Java, 2020):

- Lapu izvietojuma leņķis;
- Specifiskā lapu ietilpība;
- Sniega intercepcijas koeficients;
- Maksimālā koku vainagu sniega ietilpība;
- Kūdras evaporācijas koeficients;
- Glaciālo nogulumu un morēna slāņa infiltrācijas koeficients.

Darba autora izstrādātais purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis ir nozīmīgs rīks, kas aprēķina un kā izejas datus atspoguļo vērtības, kurus dabā sarežģīti izmērīt, kā (Java, 2020):

- Gruntsūdens līmenis;
- Intercepcija;
- Transpirācija;
- Evaporācija;
- Ezeru notece;
- Virszemes notece;
- Infiltrācija kūdras slānī.

#### 3.1.6. Objektorientēts dizains

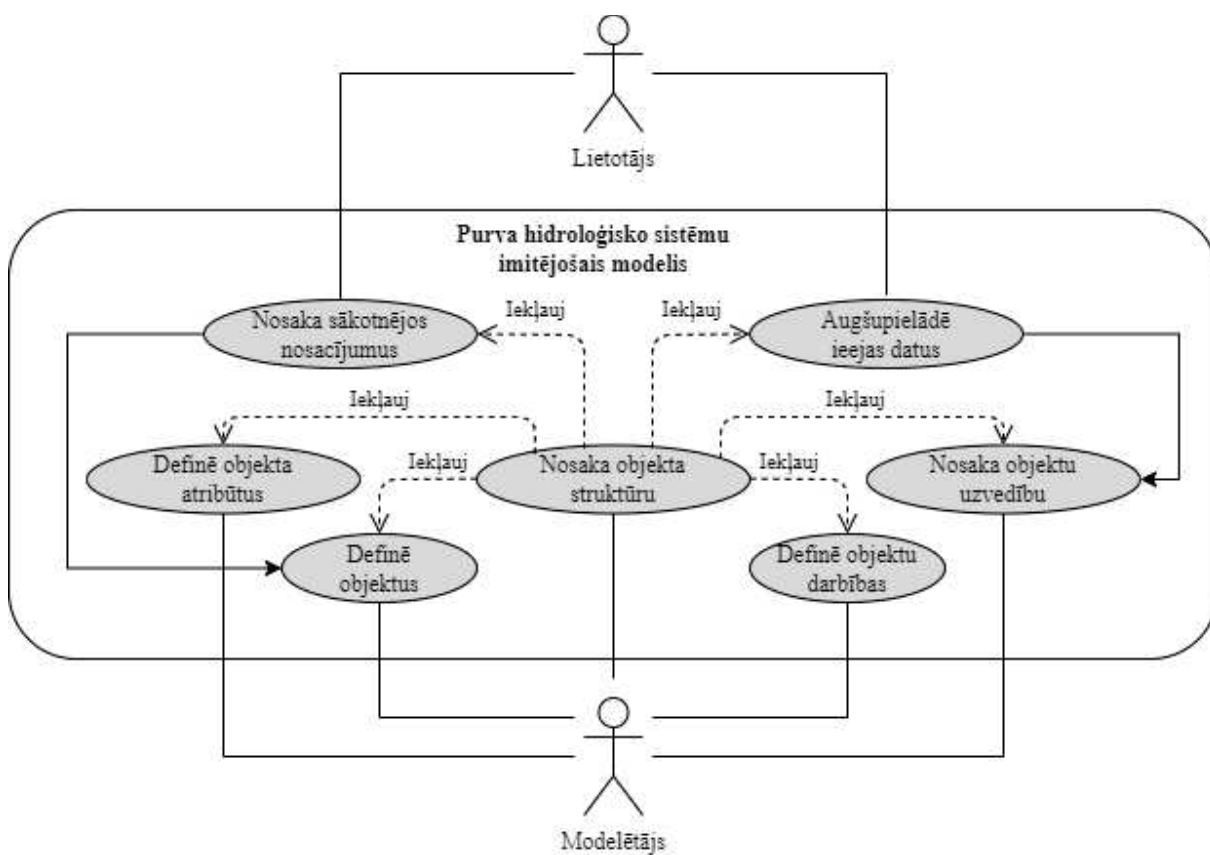
Objektorientēts dizains (OOD) ietver objektu atribūtus, darbības un detalizēti apraksta, kā sistēma jāveido, izmantojot konkrētās tehnoloģijas (OOAD, 2020), citiem vārdiem sakot, programmatūras prasības pārvērš objektu specifikācijās un iegūst klases hierarhijas, no kurām var izveidot objektu (Bhave & Patekar, 2005). Tāpat kā dizaina šabloni atvieglo veiksmīgu objektorientētu dizainu un arhitektūru atkārtotu izmantošanu, tie var palīdzēt atkārtoti izmantot imitējošo modeļu dizainus un arhitektūru (Tignor & Myrtveit, 2000).

OOD šabloni ir piemērojami sistēmu dinamikas jomā un imitējošo modeļu konstruēšanā (Tignor & Myrtveit, 2000). Sistēmu dinamikas vide ir slēgta dinamiska sistēma. Šis purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis tiek veidots, lai attēlotu ūdens kustību purva hidroloģiskajā sistēmā no ūdens ieejas slēgtajā sistēmā nokrišņu veidā, līdz izejai no tās izmantojot intercepciju, transpirāciju, evaporāciju, sānu plūsmu, ezera noteci un virszemes noteci.

Ievades datus paredzēts ielādēt no CSV datu bāzes, bet to iespējams veikt arī manuāli. Purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis dod iespēju ģenerēt izvades datus biežuma tabulu un



pārskata tabulu formātos. Kā lietotājs un modelētājs mijiedarbojas ar purva hidroloģisko modeli un kā modeļa iekšējās daļas mijiedarbojas viena ar otru, parādīts 5.attēlā.

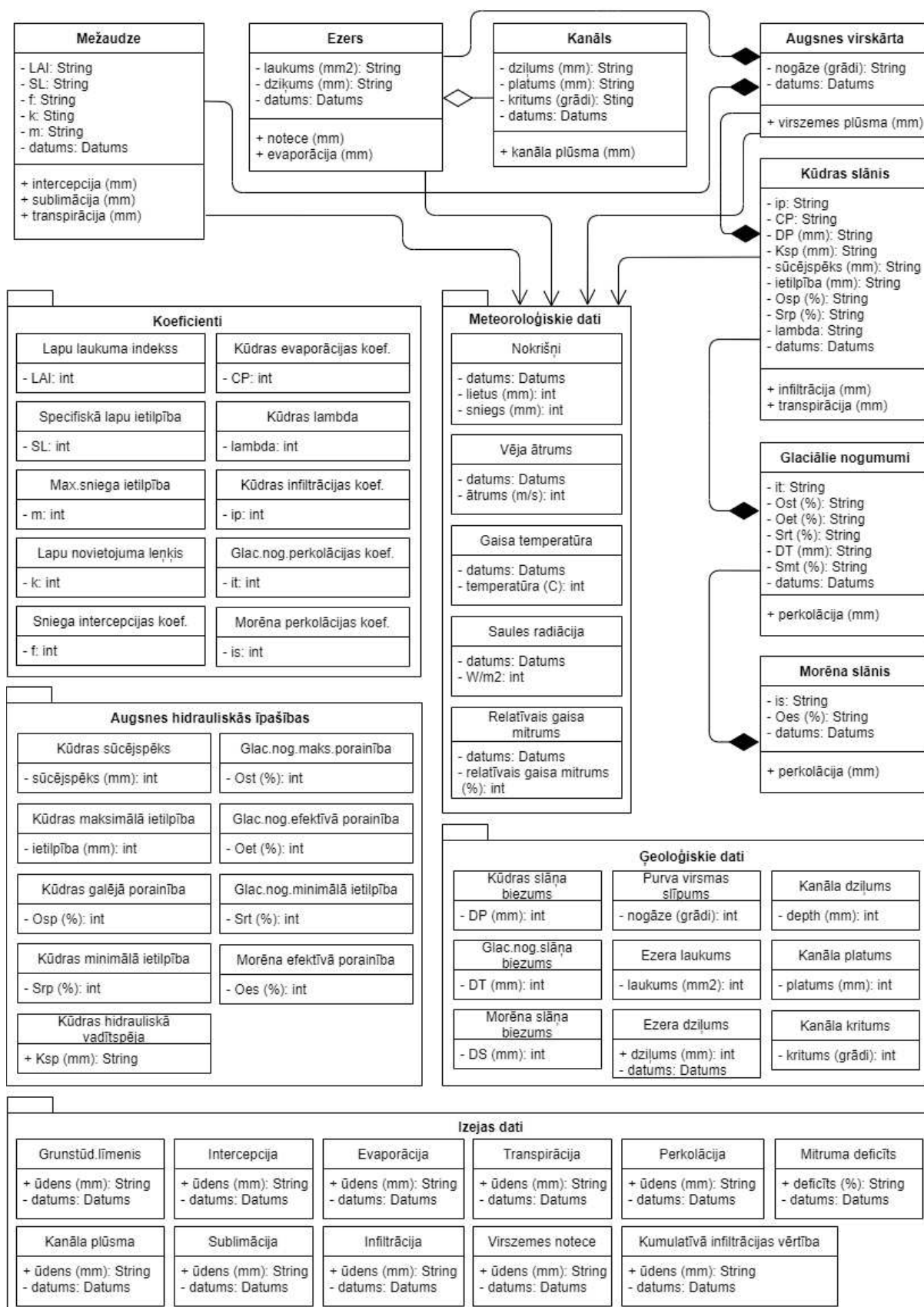


**5.attēls.** Purva hidroloģisko sistēmas imitējošā modeļa iekšējie soļi, UML lietošanas gadījumu diagramma

*Avots: autors*

Tāpat kā jebkurā dinamiskā sistēmā, purva hidroloģiskajā sistēmā ūdens plūsma no viena objekta nākamajā notiek pamatojoties uz savstarpējām cēloņsakarībām. Objektu, kuri saņem, glabā un nodod ūdeni tālāk, ir koku mežaudze, ezers, kanāls, augsne (kūdras, glaciālo nogulumu un morēna slānis).

6.attēlā visi purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa objekti ir vizualizēti klasēs. Visi ieejas dati ir sadalīti pa klasēm, pamatojoties uz piederību meteoroloģiskajiem, ģeogrāfiskajiem, augsnes hidraulisko īpašību datiem vai koeficientiem. Katra objekta klase izmanto ieejas datus kā atbilstošo atribūtu vērtības. Ūdens apjoma izmaiņas procesi tiek attēloti kā izejas dati.



6.attēls. Purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa UML klašu diagramma

Avots: autors

## 3.2. Purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa matemātiskais formulējums

Autora piedāvātajā problēmas formulējumā purva hidroloģiskā sistēma tiek uzskatīta par dinamisku sistēmu, kas sastāv no diferenciālvienādojumiem un loģiskajām izteiksmēm.

Autora piedāvātais purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis nav pirmais sistēmu dinamikas vidē izstrādātais hidroloģiskais modelis. 2005.gadā tika izstrādāts SDW (System Dynamics Watershed – sistēmu dinamikas ūdensšķirtne) modelis (Elshorbagy, Julta, Barbour, & Kells, 2005). Tajā nebija iekļauti ar veģetāciju saistītie vienādojumi (Elshorbagy, Julta, Barbour, & Kells, 2005), tāpēc 2009.gadā tika izlaista tā uzlabotā versija GSDW (Generic System Dynamics Watershed Model – vispārējais ūdensšķirtnes sistēmu dinamikas modelis), kurā iekļauta intercepcija un evaporācija (Carey, Elshorbagy, & Kesha, 2009).

Par pamatu autora piedāvātajam imitējošajam modelim tiek izmantots GSDW modelis, kam nomainīti, pielāgoti un izstrādāti vairāki jauni matemātiskie vienādojumi un loģiskās izteiksmes, līdz sasniegts gaidītais rezultāts – imitētā gruntsūdens līkne atdarina izmērīto gruntsūdens likni, norādot uz to, ka modelis ietver un ņem vērā visas pārvaldāmās ekosistēmas daļas.

Autora izveidotais purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis ir veidots tā, lai attēlotu ūdens kustību purva hidroloģiskajā sistēmā no ūdens ieejas nokrišņu veidā līdz ūdens izejai no sistēmas intercepcijas, sublimācijas, transpirācijas, evaporācijas, infiltrācijas dziļākos augsnes slāņos, ezeru iztvaikošanas, ezeru un virszemes noteces veidā. Kā dinamiskā sistēmā purva hidroloģisko sistēmu imitējošajā modelī ūdens no vienas krātuves nākamajā nonāk, pamatojoties uz savstarpējām matemātiskām cēloņsakarībām.

### 3.2.1. Lapu laukuma indekss

LAI ir normalizēta atsevišķa koka vai veselas mežaudzes lapu apjoms, kas aprēķināts normalizējot tā projekciju pret zemes platības vienību (Campbell & Norman, 1989). Tā kā augi fotosintēzei izmanto daļu saules izstarotās gaismas spektra, ir iespējams izmantot attālās izpētes datus, lai īsā laikā LAI aprēķinātu lielām platībām (Java, 2018).

Šā darba vajadzībām tiek izmantota attālā uzrāde. Tā kā purvā lielākoties aug priedes, tiek izmantots vienādojums, kas pielāgots skujkokiem:

$$LAI = 3.187NDVI + 0.792 \quad (1)$$

$$NDVI = (NIR - red)/(NIR + red) \quad (2)$$

kur *NDVI* apzīmē normalizēto veģetācijas indeksu, *NIR* atspoguļo atstarošanas tuvā infrasarkanā starojumam frekvenču joslā, *red* atspoguļo atstarošanas sarkano frekvenču joslā (Yu, Wang, Liu, & Cheng, 2019). Gadījumos, kad jāimitē purva hidroloģiskais režīms pirms un pēc mežaudzes retināšanas, izmantojamas divas (pirms un pēc) *NIR*, *red* un *LAI* vērtības, kā arī pielietojama loģiskā izteiksme *Stella Architect*:

IF TIME<\*

THEN LAI1

ELSE LAI2

vai *Insight Maker*:

IF Days()<\*

THEN LAI1

ELSE LAI2

(3)

kur \* apzīmē dienu skaitu līdz mežaudzes retināšanai no datuma, kas ir pirmā imitācijas diena.

### 3.2.2. Intercepcija

Intercepciju un citus fizikālos un bioloģiskos procesus mežaudzē vizuāli atspoguļo darba 2.pielikums. Lietus intercepcija ir pārtverto, uzglabāto un pēc tam iztvaikojošu nokrišņu daļa no visām veģetācijas daļām lietusgāžu laikā vai pēc tām (Cui & Jia, 2014). Šajā imitējošajā modelī lietus intercepcijas aprēķināšanai tiek izmantots Astona (Aston) 1979.gadā izstrādātā matemātiskā izteiksme, kas ietver lietusgāžu raksturlielumus, kas ir svarīgi intercepcijas formulēšanai tiek attēlots kā:

$$I_{rain} = C_p S_{max} \left( 1 - EXP \left( -k \frac{P}{S_{max}} \right) \right) \quad (4)$$

kur  $I_{rain}$  ir lietus nokrišņu intercepcija (mm/d),  $C_p$  ir koku vainagu ūdens pārklājuma funkcija (Oerlemans & Vink, 2010),  $S_{max}$  ir maksimālā intercepcijas kapacitāte (Hadi, Sudibyakto, & Shrestha, 2011),  $k$  ir koku vainagu koeficients, kas svārstās no 0.2 līdz 0.8 (van Dijk & Bruijnzeel, 2001),  $P$  ir nokrišņu daudzums (Klamerus-Ivan, 2014).

$$S_{max} = 0.935 + 0.498LAI - 0.00575(LAI^2) \quad (5)$$

$$C_p = 1 - EXP^{-kLAI} \quad (6)$$

Katrā laika solī tiek aprēķināta sniega intercepcija, līdz tiek sasniegta koku vainagu kapacitāte. Autors izmēģināja vairākus zinātniskajā literatūrā atrodamos sniega intercepcijas aprēķināšanas vienādojumus, tomēr, eksperimentālā pārbaude norādīja uz kļūdām to darbībā, jo ziemas periodā pieauga atšķirība starp imitēto gruntsūdens līkni un mērījumiem, tāpēc autors pielāgoja lietūs intercepcijas vienādojumu (4), tajā nomainot maksimālo lietūs intercepcijas kapacitāti ( $S_{max}$ ) ar maksimālo sniega intercepcijas kapacitāti ( $B$ ) (Andreadis, Lettenmaier, & Storck, 2009), ievērojami uzlabojot modeļa precizitāti:

$$I_{snow} = C_p B \left( 1 - EXP \left( -f \frac{P_S}{B} \right) \right) \quad (7)$$

kur  $I_{snow}$  ir ūdens daudzums (mm/d) ekvivalents sniega nokrišņiem,  $P_S$  ir kopējie sniega nokrišņi (mm/d),  $f$  ir sniega intercepcijas koeficients. Maksimālā intercepcijas kapacitāte tiek izteikta kā:

$$B = L_r m LAI \quad (8)$$

kur  $LAI$  ir mežaudzes koku vainagu lapu laukuma indekss un  $m$  ir maksimālā sniega sega koku vainagos (mm), kuru nosaka empīriskos pētījumos. Lapu laukuma proporcija  $L_r$  ir soļa funkcija:

$$\begin{aligned} & \text{IF } T_a > -1 \\ & \text{THEN } 4 \\ & \text{ELSE IF } T_a \leq -3 \\ & \text{THEN } 1 \\ & \text{ELSE } 1.5T_a + 5.5 \end{aligned} \quad (9)$$

Zem  $-1$  °C temperatūras intercepcija strauji samazinās un zem  $-3$  °C tā paliek konstanta (Andreadis, Lettenmaier, & Storck, 2009).

### 3.2.3. Sniega sega

Sniegs, kas ar intercepciju netiek pārtverts, sasniedz zemi un veido sniega segu. Sniega sega var vai nu izkust, papildinot virszemes ūdeni, vai tvaika veidā sublimēties atpakaļ atmosfērā. Matemātiski izmaiņas sniega segā var attēlot kā:

$$\frac{dC_{snow}}{dt} = S_t - E_S - M_S \quad (10)$$

kur  $S_t$  ir caurkritušais sniegums,  $E_S$  ir sublimācija un  $M_S$  sniega kušanas funkcija (Java, 2018). Sublimāciju var aprēķināt izmantojot Kuzmina 1916.gadā izstrādāto empīrisko vienādojumu:

$$E_S = (0.18 + 0.098v)(x_s - x) \quad (11)$$

kur  $E_S$  ir sniega sublimācija (mm/d),  $v$  ir vēja ātrums 10 m augstumā (m/s),  $x_s$  ir piesātinātais tvaika spiediens (mb), un  $x$  ir tvaika spiediens (mb) (Gelfan, Kuchment, & Pomeroy, 2004).  $x_s$  var aprēķināt, izmantojot vienādojumu:

$$x_s = 6.1078 \text{EXP} \left( \frac{17.2694T_a}{237.3+T_a} \right) \quad (12)$$

kur  $T_a$  ir gaisa temperatūra (°C) (StackExchange, 2017).  $x$  iespējams aprēķināt, balstoties uz relatīvo gaisa mitrumu  $RH$ :

$$x = x_s / RH * 100 \quad (13)$$

Sniega kušana tiek aprēķināta kā:

$$M_S = r(T_a) + (m_Q)R \quad (14)$$

kur  $M$  ir kušana dienā (mm/d),  $r$  ir koeficients robežā starp 0.2 un 0.25,  $T_a$  ir gaisa temperatūra (°C),  $m_Q$  ir fizikāla konstante (0.026), kas saules radiāciju pārvērš sniega ūdens ekvivalentā ( $\text{W/m}^2$ ) un  $R$  ir saules radiācija ( $\text{W/m}^2$ ) (Ismail, Habib-ur-Rehman, Bogachi, & Muhammad, 2015).

#### 3.2.4. Virszemes ūdens

Virszemes ūdens krātuvē nonāk caurkritušais lietus un izkusušais sniegs. Izmaiņas virszemes ūdens krātuvē var attēlot kā:

$$\frac{dS_{SW}}{dt} = R_t + M_S - f_P - O_F \quad (15)$$

kur  $S_{SW}$  ir virszemes ūdens (mm),  $R_t$  ir caurkritušais lietus (mm/d),  $M_S$  ir izkusušais sniegs (mm/d),  $f_P$  atspoguļo infiltrāciju kūdras slānī (mm/d),  $O_F$  ir virszemes notece (mm/d) (Java, 2018).

Virszemes notece tiek aprēķināta pēc augsnes mitruma vajadzību apmierināšanas. Tā kā, lai imitētu dažādus hidroloģiskos procesus, modelis izmanto rezervuārus, nesasalušas augsnes gadījumā ūdens pārpalikums, kas veidojas pārsniedzot infiltrācijas kapacitāti, tiek novadīts kā virszemes notece. Augsnes sasalušanas gadījumā lietus un sniegs sasalušajā augsnē infiltrējas balstoties uz 18.vienādojumu. Virszemes notece notiek tikai apstākļos, kad augsne ir piesātināta vai tiek pārsniegta kūdras hidrauliskā vadītspēja un tiek aprēķināta kā:

$$O_F = (S_{SW} - f_P)C_{Slope} \quad (16)$$

kur  $O_F$  ir mm/d un  $C_{Slope}$  krituma koeficients, kas ir atkarīgs no reljefa slīpuma (Elshorbagy, Julta, & Kells, 2007).

### 3.2.5. Kūdras slānis

Virszemes infiltrācija, evapotranspirācija un lejupvērstā ūdens plūsma uz glaciālo nogulumu slāni ir galvenie faktori, kas ietekmē mitruma apmaiņu kūdras slānī. Izmaiņas kūdras slānī var tikt attēlotas šādi:

$$\frac{dS_P}{dt} = f_P - f_T - ET_P - E_C \quad (17)$$

kur  $S_P$  ir kūdras slānis (mm),  $f_T$  ir ātrums, kādā ūdens virzās lejup uz glaciālo nogulumu slāni (mm/d),  $ET_P$  ir kūdras slāņa evapotranspirācijas ātrums (mm/d) un  $E_C$  ir ūdens daudzums, kādu mežaudze uzsūc caur saknēm, lai nodrošinātu savus bioloģiskos procesus jeb transpirācija (Java, 2018).

Pirms augsne tiek piesātināta, ūdens kūdras slānī infiltrējas vienādā ātrumā ar lietus intensitāti. Ja kūdras slānis tiek piesātināts vai lietus intensitāte pārsniedz kūdras piesātināto hidraulisko vadītspēju, tad infiltrācija tiek aprēķināta pēc Grīna-Ampta (Green-Ampt) vienādojuma (19). Infiltrācijas kapacitāte  $f_P$  tiek aprēķināta balstoties uz kumulatīvo infiltrācijas tilpumu (Elshorbagy, Julta, Barbour, & Kells, 2005), par pamatu ņemot autora izstrādāto loģisko izteiksmi (18):

$$\begin{aligned} & \text{IF } \theta_{iP} < \theta_{sP} \text{ AND } S_{SW} < K_{sP} \\ & \text{THEN } S_{SW} * C_{tP} \\ & \text{ELSE IF } \theta_{iP} \geq \theta_{sP} \\ & \text{THEN } 0 \\ & \text{ELSE } (19) * C_{tP} \end{aligned} \quad (18)$$

$$f_P = K_{sP} \left( 1 - \frac{(20)\psi_P}{F_P} \right) \quad (19)$$

$$\begin{aligned} & \text{IF } \theta_{iP} \geq \theta_{sP} \\ & \text{THEN } S_{rP} \\ & \text{ELSE } \theta_{sP} - \theta_{iP} \end{aligned} \quad (20)$$

$$O_{iP} = S_P / DP \quad (21)$$



kur  $K_{SP}$  ir kūdras slāņa piesātinātā hidrauliskā vadītspēja (mm/d), 20. matemātiskajā izteiksmē aprakstīts autora izstrādāts sākotnējā mitruma deficīta (mm) aprēķins,  $\theta_{SP}$  ir kūdras slāņa porozitāte vai piesātinātības mitruma līmenis (mm),  $\theta_{IP}$  ir sākotnējais mitruma līmenis (mm),  $\psi_P$  ir sūcējspēka vadīšana kūdras slānī (mm),  $F_P$  ir kumulatīvās infiltrācijas kūdras slānī apjoms (mm) (Elshorbagy, Julta, Barbour, & Kells, 2005),  $S_{rP}$  ir minimālā kūdras slāņa ietilpība, citiem vārdiem sakot, minimālais mitruma līmenis, kādu iespējams sasniegt kūdrā (mm), un  $DP$  ir kūdras slāņa biezums (mm).

Kumulatīvās infiltrācijas kūdras slānī ( $F_P$ ) apjoms (mm) tiek aprēķināts pēc autora izstrādātās pieejas, kur:

$$\begin{aligned}
 & \text{IF } R_t > 0 \text{ OR } S_{SW} > 0 \\
 & \text{THEN } S_{FP} \\
 & \text{ELSE } 0
 \end{aligned} \tag{22}$$

kur  $S_{FP}$  ieeja

$$\begin{aligned}
 & \text{IF } \theta_{IP} \geq \theta_{SP} \text{ OR } S_{SW} > K_{SP} \\
 & \text{THEN } f_p \\
 & \text{ELSE } 0
 \end{aligned} \tag{23}$$

kur  $S_{FP}$  izeja

$$\begin{aligned}
 & \text{IF } M_S = 0 \text{ AND } R_t = 0 \\
 & \text{THEN } S_{FP} \\
 & \text{ELSE } 0
 \end{aligned} \tag{24}$$

Ņemot vērā, ka kūdras slānis nav homogēns, bet to veido akrotelms un katotelms, kuros ir dažāda atšķirīga hidrauliskā vadītspēja, un arī akrotelms pats par sevi nav homogēns, jo tā augšējo daļu aizņem dzīvās sfagnu sūnas, bet zemākajā notiek atmirušo sūnu sadalīšanās procesi, kā ietekmē pieaug blīvums un samazinās hidrauliskā vadītspēja, autors meklēja jaunu pieeju, kā tuvu procesiem dabā atspoguļot ūdens plūsmu tajā. Par pamatu ņemot Kasteres un Grāfstālas (Custers & Graafstal, 2005) apjomīgo pētījumu “Ūdens plūsmas raksturojums baseina-grēdas mikrotopā purvā” (Characterisation of the water flow in a pool-ridge microtope in a bog), tika izveidota pieeja, kur kūdras slāņa piesātinātā hidrauliskā vadītspēja nav konstanta vērtība, bet tā tiek nolāsīta no līknes (skatīt 2.tabulu). Sasniedzot katotelmu hidrauliskā vadītspēja paliek konstanta, kas atbilst 16 mm/d.

**2.tabula.** Kūdras slāņa piesātinātā hidrauliskā vadītspēja atkarībā no attāluma līdz zemes virsmai

Attālums līdz zemes virsmas (cm)	$K_{SP}$ (mm/d)
0	800
20	700
30	500
40	100
50	16

*Avots: autors*

Šajā modelī tiek pielietota arī infiltrācija sasalušā augsnē. Ar empīriskas pieejas palīdzību ir konstatēts, ka infiltrāciju sasalušā augsnē ietekmē gan temperatūras svārstības, gan laika sprīdis, kādu temperatūra atrodas virs vai zem 0°C. Temperatūras svārstību rezultātā zeme atkūst un atkal sasalst. Lielākā daļa hidroloģisko modeļu vai nu ignorē sniega kušanas infiltrāciju, vai, lai noteiktu infiltrāciju sasalušā augsnē, pielieto lielu skaitu datu, vai arī izmanto modeļa kalibrēšanas parametru, kas samazina parastās infiltrācijas ātrumu. Modelis pieņem, ka augsne atkūst eksponenciāli līdz ar siltā gaisa temperatūras akumulāciju. Augsne atkārtoti sasalst, ja gaisa temperatūra nokrītas zem 0°C uz vairākām dienām. Šādā gadījumā temperatūras akumulācija tiek zaudēta un atsākas gaisa temperatūrai atkal sasniedzot 0°C (Elshorbagy, Julta, Barbour, & Kells, 2005). Lai imitētu infiltrāciju sasalušā augsnē, infiltrācija tiek reizināta ar Li un Simoviča (Li and Simovic) koeficientu  $C_{IP}$ , kas ņem vērā augsnes atkušānu un atkārtotu sasalšanu un ir atspoguļojams izmantojot autora izstrādāto loģisko izteiksmi kā:

$$\begin{aligned} & \text{IF } T_I < T_{I_{max}} \text{ THEN } (T_I / T_{I_{max}})^{c_i} \\ & \text{ELSE } 1 \end{aligned} \tag{25}$$

kur  $T_I$

$$\begin{aligned} & \text{IF } N \geq N_n \text{ THEN } 0 \\ & \text{ELSE IF } T_a > 0 \text{ AND } N < N_n \\ & \text{THEN } \sum(T_a) \\ & \text{ELSE } 0 \end{aligned} \tag{26}$$

kur  $N$

$$\text{IF } T_a > 0$$

$$\begin{aligned} & \text{THEN } 0 \\ & \text{ELSE } \Sigma(N_o) \end{aligned} \quad (27)$$

kur  $N_o$

$$\begin{aligned} & \text{IF } T_a \leq 0 \\ & \text{THEN } 1 \\ & \text{ELSE } 0 \end{aligned} \quad (28)$$

kur  $T_{\max}$  (°C) ir maksimālais  $T_l$  punkts, kurā zemes virskārta ir pilnībā atkususi,  $c_i$  ir rādītājs, kas raksturo  $T_l$  ietekmi uz augsnes atkušānu,  $N$  ir dienu skaits, kurās gaisa temperatūra atkārtoti ir negatīva,  $N_n$  ir maksimālais dienu skaits ( $N$ ), pēc kurām augsnes atkušāna ( $T_l$ ) būs zaudēta un augsne atkal sasals, un  $N_o$  ir secīgs mainīgais, lai noteiktu, kurā dienā temperatūra ir pozitīva un kurā – negatīva. Vienādojuma būtība ir uzskaitīt akumulēto pozitīvo un negatīvo gaisa temperatūru. Parametri  $c_i$  un  $T_{\max}$  tiek aprēķināti kalibrēšanas procesā (Li & Simonovic, Process).

Faktiskā kūdras slāņa evapotranspirācija ( $ET_P$ ) tiek aprēķināta izmantojot empīrisku Lī un Simonoviča (Li & Simonovic) formulējumu, kurā ir precīzi izteikts pieejamais augsnes mitrums un gaisa temperatūra. Šis formulējums var tikt izteikts kā:

$$\begin{aligned} & \text{IF } \theta_{iP} > S_{rP} \\ & \text{THEN (30)} \\ & \text{ELSE } 0 \end{aligned} \quad (29)$$

$$ET_P = c_P S_{mP}^\lambda T_a C_{tP} \quad (30)$$

$$S_{mP} = \frac{\frac{S_P}{S_{nP}} - S_{rP}}{1 - S_{rP}} \quad (31)$$

kur  $ET_P$  ir kūdras slāņa evaporiācija (mm/d),  $C_P$  ir evaporiācijas no kūdras slāņa konstante (mm/d°C) un tiek noteikta kalibrēšanas laikā,  $S_{mP}$  ir kūdras slāņa ūdens piesātinātība,  $\lambda$  ir eksponenciāls koeficients, kuru nosaka kalibrēšanas laikā,  $S_{nP}$  ir maksimālā kūdras slāņa ūdens ietilpība (mm) un  $S_{rP}$  ir minimālā ietilpība jeb atlikušais mitrums (%), kādu iespējams sasniegt.  $S_{rP}$  un  $S_{nP}$  kūdras slānim tiek aprēķināti, izmantojot augsnes ūdens raksturlielumu līkni (Elshorbagy, Julta, Barbour, & Kells, 2005).

### 3.2.6. Glaciālie nogulumu

Mitruma kustība glaciālajos nogulumos ir atkarīga no mitruma līmeņa augšējā kūdras slānī un filtrēšanās zemāk esošajā morēna slānī. Matemātiskās attiecības, kas atspoguļo mitruma virzību glaciālo nogulumu slānī, tiek atspoguļotas kā:

$$\frac{ds_T}{dt} = f_T - f_s \quad (32)$$

kur  $f_T$  ir ūdens apjoms, kas perkolējas glaciālo nogulumu slānī (mm/d),  $f_s$  ir morēna filtrācijas ātrums (mm/d). Ja kūdras slāņa mitrums ir zem atlikušā mitruma līmeņa, tad virzienā uz glaciālajiem nogulumiem nenotiek nekāda kustība (Elshorbagy, Julta, Barbour, & Kells, 2005). Perkolāciju glaciālajos nogulumos var attēlot ar autora izstrādāto loģisko izteiksmi (33) un vienādojumu (34) šādi:

```
IF  $\theta_{iP} \leq S_{rP}$ 
THEN 0
ELSE IF  $\theta_{iT} < \theta_{eT}$ 
THEN 0
ELSE IF  $\theta_{iT} > \theta_{sT}$ 
THEN 0
ELSE (34) (33)
```

$$f_T = (S_{mP}/S_{mT})I_T \quad (34)$$

kur  $I_T$  ir ūdens filtrācijas glaciālajos nogulumos koeficients,  $S_{mT}$  ir glaciālo nogulumu slāņa ūdens piesātinātība,  $\theta_{iT}$  apzīmē glaciālo nogulumu slāņa piesātinātību (%),  $\theta_{eT}$  ir glaciālo nogulumu efektīvā piesātinātība (%) un  $\theta_{sT}$  – glaciālo nogulumu porozitāti (%).

Kūdras slānim sasalstot, glaciālo nogulumu slāņa mitruma līmenis var samazināties, jo nenotiek ūdens tilpuma palielināšanās ne kūdras, ne morēna slānī. Vienīgais veids, kā glaciālo ūdeņu slānis var atbrīvot ūdeni, ir perkolācija morēna slānī.

Parametrus kā augsnes porozitāti un ietilpību var atrast promocijas darba 3.pielikumā.

### 3.2.7. Morēna slānis

Nemot vērā, ka Somā purvā (līdzīga ģeoloģiskā situācija ir vairumā Baltijas jūras reģiona purvu) morēna slānis atrodas zem vairāk kā 1 metru biezā kūdras slāņa un zem 5 metrus biezā glaciālo nogulumu slāņa un ūdens plūsma tajā ir gandrīz konstanta un niecīga (mazāk kā 1

cm/d), darba autors šim augsnes slānim ir izveidojis vienkāršotu aprēķinu pieeju. Šajā pieejā morēna slānim nav tvertnes un ūdens plūsmu tajā ( $f_s$ ) var atspoguļot ar autora izstrādāto pieeju kā:

$$\text{IF } \theta_{iT} > \theta_{eT}$$

$$\text{THEN (36)}$$

$$\text{ELSE 0} \tag{35}$$

$$f_s = (S_{mT}/\theta_{fs})I_s \tag{36}$$

kur  $\theta_{fs}$  ir ietilpība (%) un  $I_s$  – ūdens perkolācijas morēnā koeficients.

### 3.2.8. Transpirācija

Mežaudzes transpirācija ir atkarīga no tādiem meteoroloģiskajiem apstākļiem kā gaisa temperatūra, saules radiācija, vēja ātrums, tvaika spiediens, tomēr tā ir iespējama vienīgi tad, ja augsnē ir pietiekams mitruma līmenis, pretējā gadījumā koki nokaltīs, tāpēc šis process matemātiski tiek attēlots pēc augsnes, kamēr sistēmu dinamikas purva hidroloģisko sistēmu imitējošajā modelī visas darbības notiek paralēli. Šajā promocijas darbā tiek izmantots transpirācijas modelis, kas galvenokārt tiek balstīts uz LAI kā veģetācijas raksturojošo lielumu. Lai aprēķinātu transpirāciju, nepieciešami šie vienādojumi:

$$S_c = S_L LAI \tag{37}$$

$$c = 1 - e^{-kLAI} \tag{38}$$

$$E_c = cET \tag{39}$$

kur  $S_c$  ir koku vainagu ūdens kapacitāte,  $S_r$  ir sakņu ūdens uzsūkšanas funkcija,  $S_L$  apzīmē lapu tilpumu (ūdens daudzums, kuru lapas satur uz vienu lapu laukuma indeksa vienību) un šis koeficients ir robežās no 0.4 līdz 5.88,  $c$  apzīmē vainagu pārklājuma funkcija.  $k$  ir ekstinkcijas koeficients, kuru nosaka lapu noliekšanās leņķis un novietojums, tas variē no 0.2 līdz 0.8 (Carey, Elshorbagy, & Kesha, 2009).  $ET$  ir potenciālā evaporācija (mm/d), kas ir izteikta, izmantojot Penmana (Penman) vienādojumu, kā:

$$ET = \left( \frac{\Delta}{\Delta + 0.66} \right) \left( \frac{R * 0.0036}{2.5 + 0.0024T_a} \right) + \left( \frac{0.66}{\Delta + 0.66} \right) (0.26(1 + 0.536v))(x_s - x) \tag{40}$$

$$\Delta = 0.2(0.00738T_a + 0.8072)^7 - 0.000116 \tag{41}$$

kur  $T_a$  ir gaisa temperatūra ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $\Delta$  apzīmē tvaika spiediena līkni (Gad & El-Gayar, 2010),  $v$  ir vēja ātrums,  $x_s$  ir piesātinātais tvaika spiediens (mb), un  $x$  ir tvaika spiediens (mb) un  $R$  ir saules radiācija ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ) (Arakaki, et al., 2014).

### 3.2.9. Ezeru iztvaikošana un notece

No ezeriem iztvaikotā ūdens apjoms galvenokārt atkarīgs no piesātinātības deficīta atmosfērā. To var izteikt ar Penmana (Penman) ūdens virsmas iztvaikošanas vienādojumu kā:

$$E_L = 0.47(0.5 + 0.01v)(x_s - x) \quad (42)$$

kur  $E_L$  ir iztvaikotā ūdens apjoms ( $\text{mm}/\text{d}$ ),  $v$  ir vēja ātrums,  $x_s$  ir piesātinātais tvaika spiediens (mb), un  $x$  ir tvaika spiediens (mb) (Penman, 1956).

Atsevišķos gadījumos ūdens distrofos ezerus atstāj pa kanāliem noteces veidā. Ezeru noteces apjomu matemātiski var izteikt kā:

IF  $S_L \leq S_{Lmin}$

THEN 0

ELSE (44) (43)

$$Q = \left( \left( \frac{1}{n} \right) A r^{2/3} \sqrt{S} \right) 8640 \quad (44)$$

kur  $Q$  ir notece ( $\text{m}^3/\text{d}$ ),  $n$  ir Maninga (Manning) berzes koeficients, kas ir atkarīgs no kanāla virsmas,  $A$  ir kanāla šķērsriezuma laukums ( $\text{m}^2$ ),  $r$  ir kanāla hidrauliskais rādiuss (m), un  $S$  apzīmē kanāla kritumu (m/m) (Froehlich & Jobson, 1988).

*Stella Architect* matemātiskā formulējuma pieraksts pieejams darba 6.pielikumā.

### 3.3. Purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa izstrāde

Lai arī uz 3.2.apakšnodaļā aprakstītā matemātiskā formulējuma pamata iespējams izstrādāt purva hidroloģisko sistēmu imitējošo modeli citās programmēšanas valodās, darba autors izvēlējās pielietot sistēmu dinamiku. Sistēmu dinamikas būtiska kā vizuālas programmēšanas valodas priekšrocība ir tā, ka, lai arī modelis ar grafiski atspoguļotiem rezervuāriem, plūsmām un konvertoriem atgādina konceptuālo shēmu, tas ir strādājošs modelis, kurā skaidri saskatāmas tā tvertnes un plūsmas. Sistēmu dinamika tiek plaši pielietota sarežģītu, dinamisku problēmu risināšanā un sistēmu, ar daudziem aspektiem un komponentēm, izprašanā un pareizu lēmumu, attiecībā uz ūdens un hidroloģiskajām sistēmām, nodrošināšanā (Mashal & Fernald, 2020). Grafiskais sistēmas attēlojums dod iespēju hidroloģijas un bioloģijas ekspertiem to ērti validēt,

bet iesaistītajām pusēm un lēmumu pieņēmējiem – uzskatāmi parādīt mežaudzes apjoma ietekmi uz purva ūdens bilanci, un skaidrot ekosistēmas atjaunošanas nozīmi un ietekmi uz vidi.

Purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis gan *Stella Architect* (skatīt 5.pielikumu), gan *Insight Maker* vidē (<https://insightmaker.com/insight/201089/Bog-hydrology-model>) ir izveidots, balstoties uz 3.1.3.apakšnodaļā aprakstīto konceptuālo shēmu (skatīt 4.attēlu), saglabājot tādu pašu loģisko uzbūvi kā purva hidroloģiskajai sistēmai, kas atvieglo modeļa vizuālo uztveri un ļauj tajā vieglāk orientēties. Ar šo sistēmu dinamikas imitējošo modeļu palīdzību var veidot sistēmas diagrammas, kuras iespējams imitēt laikā. Šīs diagrammas ļauj labāk izprast sistēmas uzvedību un izsekot cēloņu-seku sakarībām tajā. Modelētāja un modeļa lietotāja iedarbošanās uz purva hidroloģisko sistēmu imitējošo modeli ir veidota atbilstoši 3.1.6.apakšnodaļā UML lietošanas gadījumu diagrammā (skatīt 5.attēlu) aprakstītajiem purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa iekšējiem soļiem. BogSim purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa objekti un to atribūti, kā arī nepieciešamie ieejas dati un modeļa ģenerētie izejas dati apkopoti UML klašu diagrammā, kas atrodas 3.1.6.apakšnodaļā (skatīt 6.attēlu).

*Stella Architect* vidē imitējošo modeļu izveidei tiek piedāvāti šādi pamatelementi:

- Krātuves (stocks) – to uzdevums ir uzkrāt. Tās savāc jebko, kas tajās ieplūst, atskaitot to, kas izplūst;
- Plūsmas (flows) – to uzdevums ir piepildīt un iztukšot krājumus. Tukšs plūsmas bultas gals apzīmē pozitīvas plūsmas virzienu;
- Pārveidotāji (converters) – tie satur nemainīgās vērtības, definē ārējos modeļa datus, aprēķina matemātiskās saistības un kalpo kā grafisko funkciju glabātuve. Respektīvi, ieejas pārveido par izejām;
- Savienotāji (connectors) – tie savstarpēji savieno modeļa daļas (isee systems inc., *Getting Started with iThink and STELLA*, 2013).

*Insight Maker* vidē, lai arī funkcionāli ir tāda pati, kā *Stella Architect*, tajā pārveidotāja funkcijas, tiek sadalītas starp diviem atsevišķiem elementiem:

- Pārveidotāji (converters) – satur ieejas nemainīgās vērtības (ieejas datus);
- Mainīgā vienādojumi (variable equations) – veic dinamiskus aprēķinus (*Insight Maker*, 2021).

Atbilstoši 3.2.apakšnodaļā aprakstītajam matemātiskajam formulējumam, koku vainagu ūdens kapacitātes ( $S_c$ ) tvertne ietver matemātisko vienādojumu, kamēr pārējās tvertnēs tiek norādītas to sākotnējās vērtības. Krātuves savstarpēji savienotas ar plūsmām un katra no tām ietver

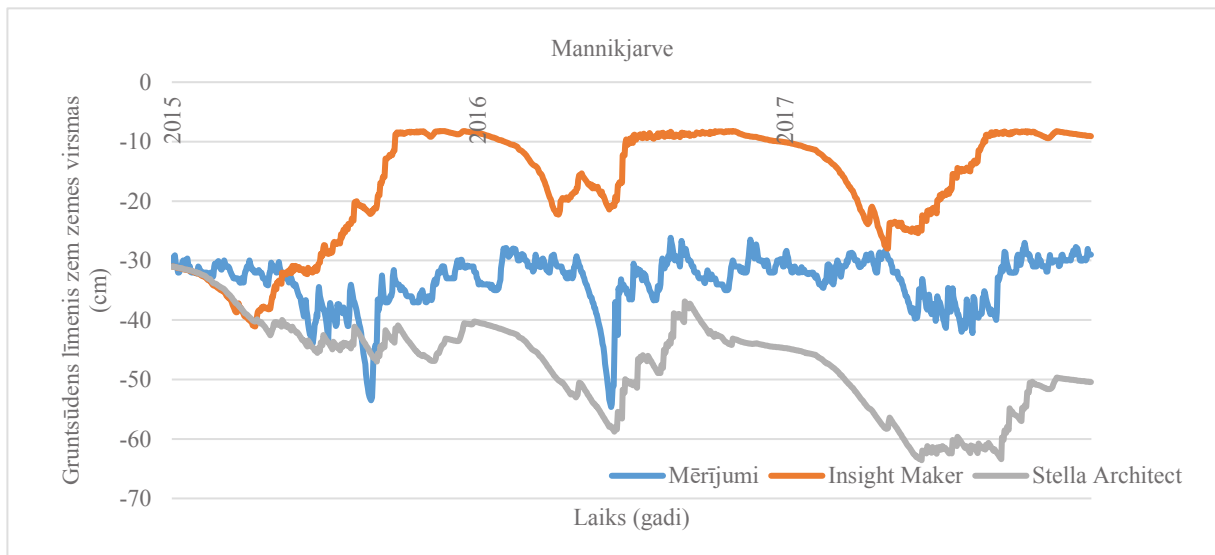


atbilstošu matemātisko vienādojumu, kas nodrošina ūdens plūsmu sadalījumu atbilstoši modelētajai ekosistēmai. Pārveidotāji *Stella Architect* modelī satur vai nu ieejas datus, vai vienādojumus, bet *Insight Maker*, vides uzbūves atšķirību dēļ, pārveidotāji satur tikai ieejas datus, mainīgo vienādojumi – vienādojumus. Abās sistēmu dinamikas vidēs purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa pārveidotāji (*Insight Maker* arī mainīgo vienādojumi) savienoti savā starpā, ar krātuvēm un plūsmām un otrādāk ar savienotāju palīdzību, atbilstoši 3.1.3.apakšnodaļā attēlotajā konceptuālajā shēmā (skatīt 4.attēlu) norādītajiem principiem, kas atsevišķiem ekosistēmas elementiem ļauj mijiedarboties vienam ar otru.

Lai arī *Stella Architect* un *Insight Maker* abas ir sistēmu dinamikas modelēšanas vides, starp tām pastāv dažas atšķirības, kas jāņem vērā, pirms izvēlēties lietot vienu vai otru. *Stella Architect* ir maksas rīks, kura licencētā programmatūra jāinstalē uz lietotāja datora, kas modelēšanu ļauj veikt bezsaistē, paralēli sniedzot iespēju imitējošajiem modeļiem izveidot vizuālas lietotāja saskarnes un tās publicēt tiešsaistē (isee systems inc., 2020). Pretēji, *Insight Maker* ir bezmaksas tiešsaistes imitējošās modelēšanas rīks, kura maksa par lietošanu ir izstrādātā imitējošā modeļa nonākšana brīvpieejā *Insight Maker* mājas lapā (Fortmann-Roe, 2014). Katram lietotājam vispirms jāizsver, vai imitējošajam modelim nav piemērojama ierobežota pieejamība, ko nosaka intelektuālā īpašuma tiesību aizsardzība, vai arī tas ir publicējams tiešsaistē, lai ar to, izmantojot interneta pārlūku, varētu iepazīties jebkurš interesents.

Darba autors purva hidroloģisko sistēmu imitējošo modeli BogSim vispirms izstrādāja *Stella Architect* vidē. Ņemot vērā, ka šī ir maksas programmatūra, paraugi ar izstrādātiem imitējošajam modeļiem principā nebija atrodami un, lai modeli izstrādātu, nācās balstīties uz lietotāja rokasgrāmatā atrodamo informāciju. Pretēja situācija novērojama *Insight Maker* vidē, kur mājas lapā atrodami neskaitāmi imitējošie modeļi, kurus iespējams darbināt un izpētīt sīkāk to uzbūvi un matemātisko formulējumu, gūstot iedvesmu jaunu modeļu izstrādei.

Pēc purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļu izstrādes *Stella Architect* un *Insight Maker* vidē, tika veikta modeļu palaišana, izmantojot vienus un tos pašus ieejas datus, parametrus un koeficientus. Abu imitāciju ģenerētās gruntsūdens līmeņa līknes tika salīdzinātas ar gruntsūdens līmeņa mērījumiem (skatīt 7.attēlu).



**7.attēls.** Purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa *Insight Maker* un *Stella Architect* 1.palaišanas rezultāti

*Avots: autors*

Kā redzams 7.attēlā, *Insight Maker* ģenerētā gruntsūdens līkne krietni pārsniedz gruntsūdens līmeņa mērījumu līkni, savukārt, *Stella Architect* līkne – atpaliek. Šādas imitējošo modeļu izejas datu nobīdes, pirms veikta purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa parametru jutīguma analīze un to kalibrācija, nav nekas ārkārtējs, tomēr jāatzīmē, abu imitējošo modeļu līknēm vajadzēja būt identiskām.

Analizējot *Insight Maker* ģenerētās vērtības katram vienādojumam un katram laika solim, darba autors secināja, ka *Insight Maker* tvertnēm, atšķirībā no *Stella Architect*, nav ieprogrammēts, ka tvertnes nevar iztukšot vairāk par to zemāko jeb nulles atzīmi. Citiem vārdiem sakot, atsevišķos gadījumos *Insight Maker* nogādāja ūdeni nākamajā tvertnē, kā tas tika aprēķināts vienādojumā, lai arī iepriekšējā tvertnē nebija brīva ūdens, kā rezultātā gruntsūdens līmeņa tvertne tika papildināta ar ūdens apjomu, kurš vairākas reizes pārsniedza nokrišņu summu. Lai novērstu problēmu, darba autors intercepcijas, sublimācijas, sniega kušanas, virszemes noteces un transpirācijas vienādojumus izteica kā:

IF [tvertne]>[vienādojums]

THEN [vienādojums]

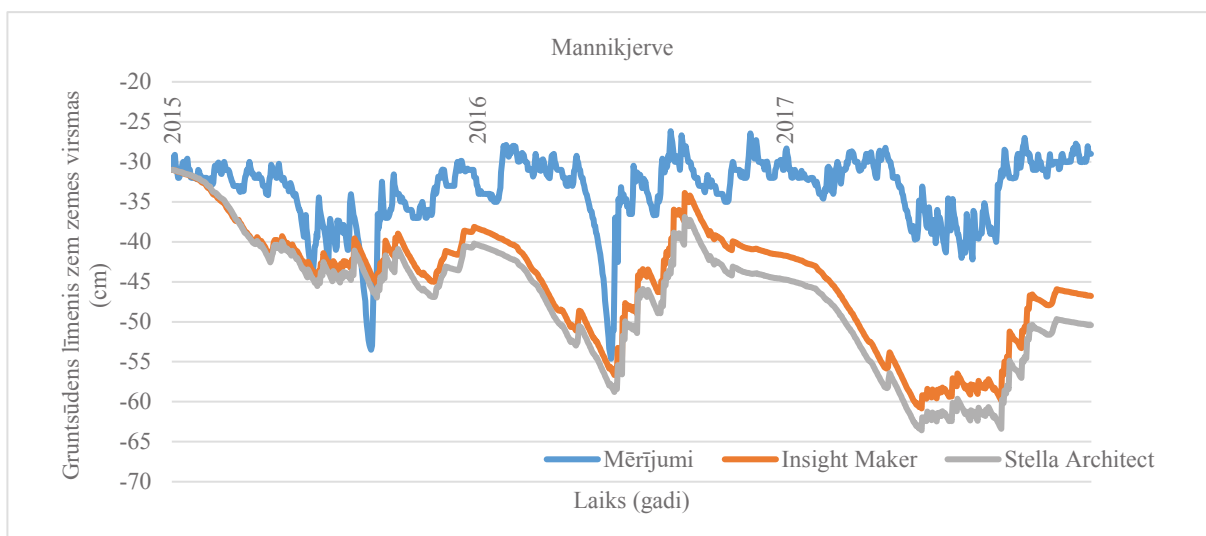
ELSE IF [tvertne]≤[vienādojums]

THEN [tvertne]

ELSE 0

(45)

Kā novērojams 8.attēlā, pēc vienādojumu formulējuma maiņas, tika sasniegts vēlamais rezultāts un *Insight Maker* gruntsūdens līmeņa līkne pietuvojās *Stella Architect* ģenerētajai.



**8.attēls.** Purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa *Insight Maker* un *Stella Architect* 2.palaišanas rezultāti

Avots: autors

Ņemot vērā, ka *Stella Architect* un *Insight Maker* darbība ir teju identiska, darba autors secina, ka tās vienlīdz piemērotas hidroloģisko procesu modelēšanai, tomēr norāda uz pāris niansēm, kas atklājās tās praktiski pielietojot:

1. *Insight Maker* nav iespējams pievienot saiti uz CSV failu lietotāja datorā, kurā glabājas imitējošā modeļa ieejas dati, kā tas ir *Stella Architect*, līdz ar to visus datus jāpārkopec manuāli;
2. Ja, strādājot ar *Insight Maker*, veidojas interneta pārrāvums, sistēma var izreģistrēt lietotāju no tā konta. Lietotājs to var nepamanīt un turpināt ar to strādāt, bet veiktās izmaiņas netikt automātiski saglabātas un var nākties zaudēt daļu veiktā darba;
3. *Insight Maker* parametru kalibrācija nedarbojas tik precīzi kā *Stella Architect*, manuāli mainot sistēmas piemeklētos parametrus, iespējams panākt augstāku precizitāti.

### 3.3.1. Purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa parametru jutīguma analīze

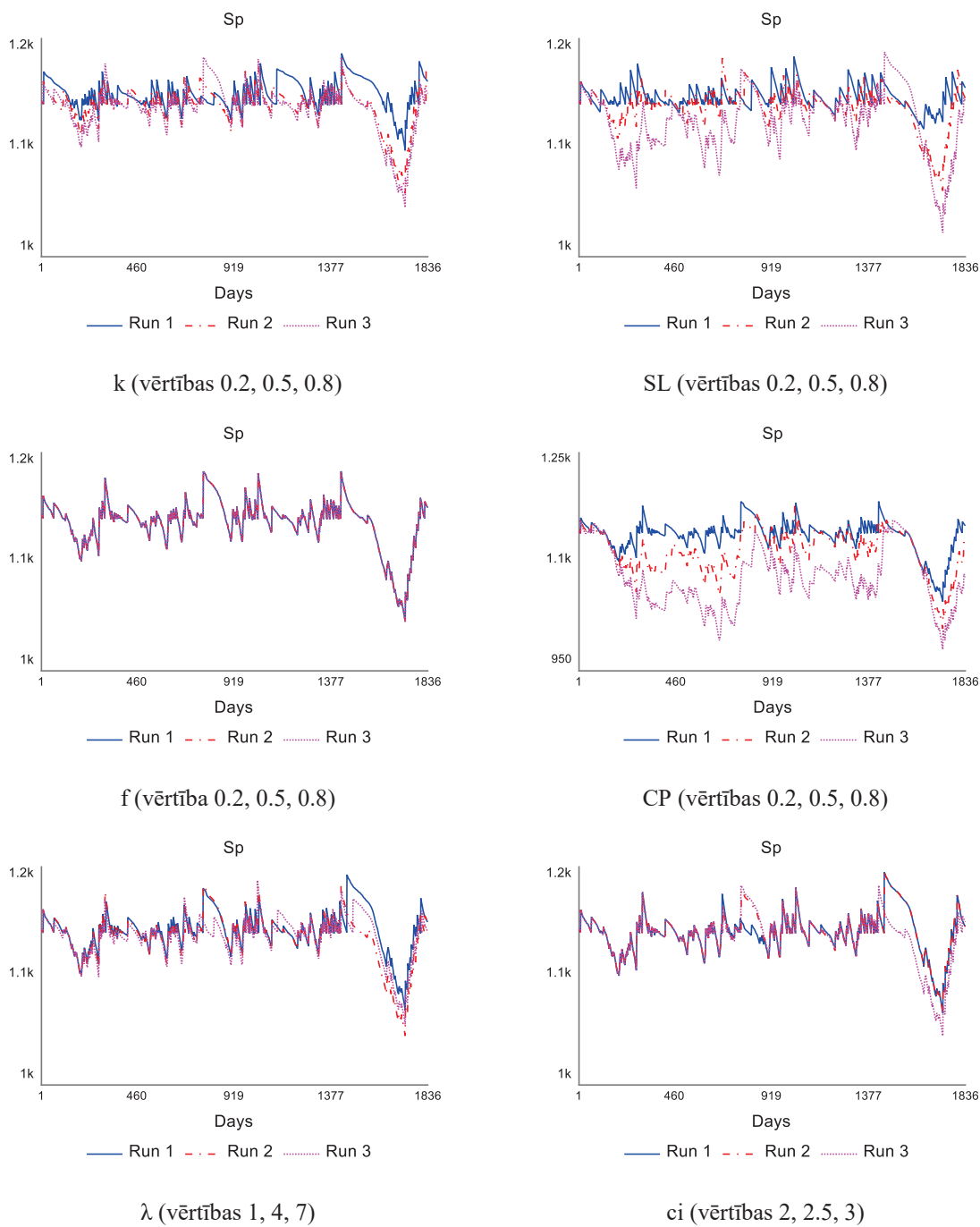
Parametru jutīguma analīze ir metode, kuru izmanto, lai noteiktu un salīdzinātu imitējošā modeļa parametru izmaiņu ietekmi uz izejas datiem (Pfannerstill, Guse, Renuse, & Fohrer, 2015).

Jutīguma analīze tika veikta tādiem kalibrējamiem parametriem kā - lapu izvietojuma leņķis ( $k$ ), specifiskā lapu ietilpība ( $SL$ ), sniega intercepcijas koeficients ( $f$ ), kūdras evaporācijas koeficients ( $CP$ ), kūdras slāņa ūdens piesātinātības eksponenciālais koeficients ( $\lambda$ ), gaisa

temperatūras ietekmes uz zemes atkušānu eksponents ( $ci$ ), lai noteiktu, cik jutīgi ir purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa ieejas parametri un apliecinātu, cik nozīmīgi ir ievākt precīzus ieejas datus un kalibrēt modeli, lai tas ģenerētu precīzus izejas datus. Jutīguma analīzes veikšanas procesā pie katra parametra purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis tika darbināts trīs reizes, katru reizi izmantojot citu vērtību – augstāko, zemāko un vidējo, kas sniedz ieskatu par katra parametra ietekmi uz gruntsūdens līmeņa svārstību amplitūdu. Izmantotās vērtības tika izvēlētas balstoties uz zinātniskajā literatūrā atrodamo informāciju par koeficientu diapazonu, kas aprakstīti šī darba 4.nodaļā.

Jutīguma analīzē tika pētīta koeficientu parametru ietekme uz gruntsūdens līmeni ( $Sp$ ), kas ir galvenais priekšnosacījums, lai atjaunotos dabīgam augstajam purvam raksturīgā purva ekosistēma (skatīt 9.attēlu).

Kā redzams 9.attēlā, sniega intercepcijas koeficientam ( $f$ ) nav nekādas ietekmes uz izmaiņām gruntsūdens līmeni. Ja sniega intercepcijas koeficienta ietekme uz sniega intercepciju tiek apskatīta matemātiski, tās ietekme, lai arī koeficienta vērtības ir nelielas, ir ievērojama, respektīvi – pie vērtības 0.2 sniega intercepcija sastāda 5%, pie vērtības 0.5 sniega intercepcija sastāda 12% un pie vērtības 0.8 sniega intercepcija sastāda jau 18% no kopējās nokrišņu masas sniega veidā. Pie 18% sniega intercepcijas, šķiet, tai uz gruntsūdens līmeni būtu jāatstāj saskatāma ietekme, tomēr, tā nav novērojama, jo šis ūdens, nonākot uz zemes, ekosistēmu atstāj virszemes noteces veidā.



**9.attēls.** Purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa kalibrējamo vērtību jutīguma analīzes rezultāti

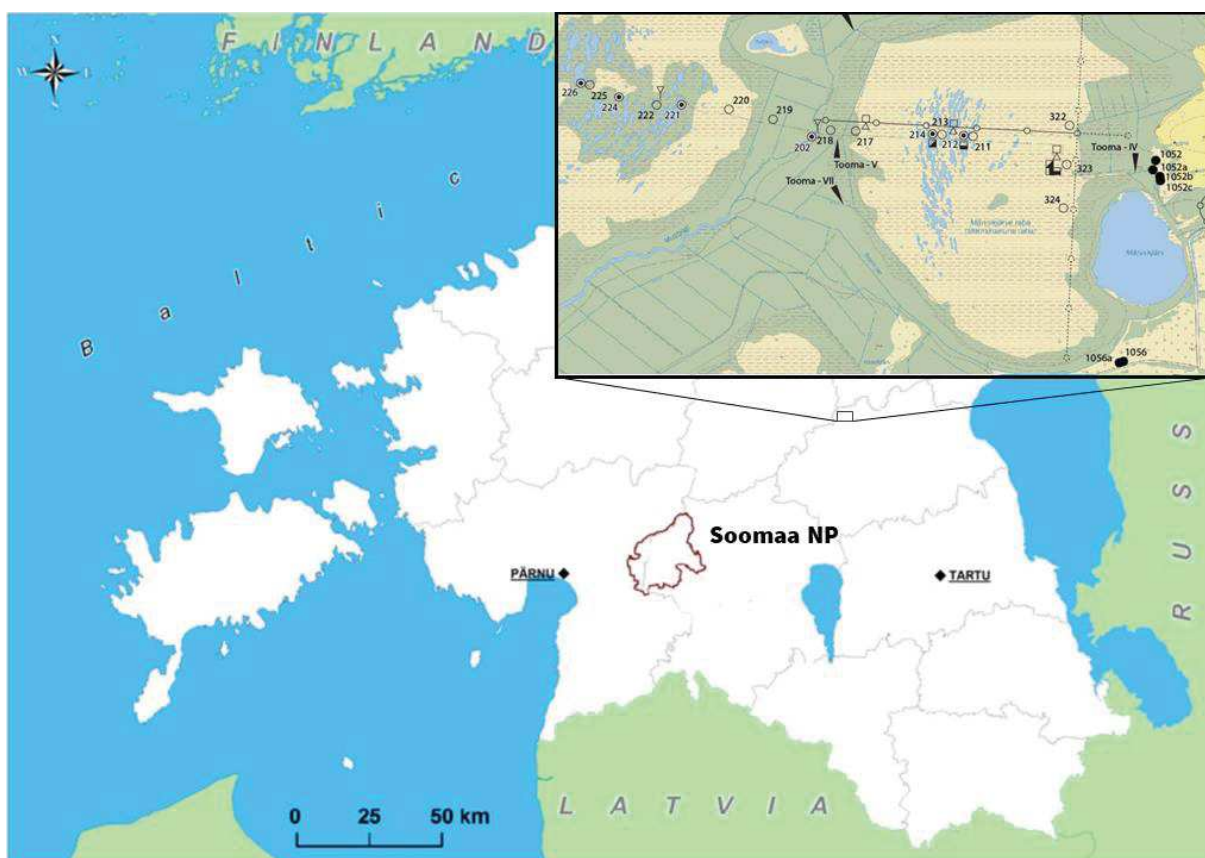
*Avots: autors*

Jutīguma analīzes vajadzībām purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis tika darbināts izmantojot 1836 datu punktus, kur katrs datu punkts atbilst vienai dienai. Modeļa darbības laikā kopējais nokrišņu apjoms bija 3318.9 mm, ko kā lietussastādīja 80%, bet sniegš – tikai 20%. No kā izriet, ka mazā sniega proporcija kopējā nokrišņu īpatsvarā ir par pamatu tam, ka pat ievērojamas izmaiņas sniega intercepcijā neatstāj būtisku ietekmi uz gruntsūdens līmeņa svārstībām.

Juŕīguma analīze skaidri norāda uz to, ka, kā jau tas bija sagaidāms, visjūtīgākais ir kūdras evaporācijas koeficients ( $CP$ ), kas koriģē iztvaikošanas no kūdras slāņa apjomu. Nākamie pēc ietekmes uz gruntsūdens līmeņa svārstībām ir ar veģetāciju saistītie koeficienti kā specifiskā lapu ietilpība ( $SL$ ), kas nosaka ūdens daudzumu, kas var ietilpt koku lapotnē, un ir tieši atbildīga par transpirāciju, kā arī lapu izvietojuma leņķis ( $k$ ). Jāatzīmē, ka juŕīguma analīze tika veikta purva nogabalā, kurā ir neliels LAI indekss 1.28. Ar liela auguma kokiem apaugušā purvā LAI var pat pārsniegt 7, kad nelielām izmaiņām specifiskajā lapu ietilpībā ietekme uz evaporāciju, līdz ar to uz izmaiņām gruntsūdens līmeni, būtu apjomīgāka.

### 3.3.2. Purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa kalibrēšana

Telpiski skaidri formulētas un fiziski pamatotas imitējošā modeļu pieejas bieži tiek kritizētas, jo modeļu parametru aplēse ir sarežģīta, kas var samazināt potenciālo prognozēšanas precizitātes pieaugumu. Pārfrāzējot, efektīva modeļu kalibrēšana ir apgrūtināta šo modeļu telpiski sadalītā rakstura dēļ, kas dažkārt uzrāda efektivitātes samazināšanos, salīdzinot ar abstraktiem modeļiem (Pérez-Sánchez, Senent-Aparicio, Senent-Aparicio, Pulido-Velazquez, & Srinivasa, 2019).



**10.attēls.** Gadījuma studiju izpētes vieta, Mannikjarves (Männikjärve) purvs Igaunijā

*Avots:* (Theeuro inglise Vikipeedist, 2007), (Oosterwoud, van der Ploeg, & van der Zee, 2017)

Purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa kalibrēšanas vajadzībām tika izvēlēts Endla dabas rezervāts, kas tika izveidots 1985.gadā kā iepriekšējā mazākā Endla-Oostriku purva rezervāta paplašinājums. Tas atrodas tieši uz dienvidiem no Pandiveres augstienes centrālās Igaunijas austrumu daļā (skatīt 10.attēlu).

Endla purvu komplekss ir izveidojies Endla ezera ieplakā. Joprojām ir saglabājušās vairākas šī ezera paliekas. Endla purvu sistēma aizņem ~25 000 ha platību un tajā atrodas vairāki purvi, kurus atdala šauras upītes, kompleksa rietumu daļā atrodas vairāki ievērojami avoti. Ezeri, purvi, un avoti ir nozīmīgi Peltsamā (Pölsamaa) upes ūdens resursi. Mannikjarves purvs ir ļoti intensīvi pētīts jau kopš 20.gadsimta paša sākuma. Purva ainavā novērojami: sūnu klājs, pundurpriedes, mitras ieplakas un purva ezeri. Infrasarkanajos krāsu attēlos ap purva ezeriem novērojams aktīvs sūnu augšanas process (Aber, Marzolff, & Reiss, 2010).

176 ha lielais Mannikjarves purvs attīstījās boreālajā periodā pirms vairāk kā 9000 gadiem limnogēnās terestrializācijas procesa rezultātā. Purva līmenis tika sasniegts subboreālajā periodā pirms 3500 gadiem. Maksimālais kūdras slāņa biezums purvā ir 7.5 metri. Mannikjarves purvam ir raksturīgais virsmas izliekums ar ieplakām un purva ezeriem raksturīgiem mikro-biotopiem un priežu mežiem ārējās nogāzēs. Purva austrumu daļa tika nosusināta 20.gadsimta pirmajā pusē. 1950.gadā Mannikjarves purvā tika izveidota Tooma purva meteoroloģiskā stacija un gruntsūdens mērījumu staciju tīkls, lai novērotu augstā purva ūdens bilanci un mikroklimatu (Custers & Graafstal, 2005).

Purvā atrodas vairākas gruntsūdens mērījumu akas (skatīt 10.attēlu), bet purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa validācijai tika izvēlēta aka Nr.222, kas atrodas purva centrālajā, neskartajā daļā. Nepieciešamie vēsturiskie ieejas dati tika iegūti Tooma meteoroloģiskās stacijas, kas atrodas 1.9 km attālumā no gruntsūdens mērījumu vietas, datu bāzē. Tā kā *Stella Architect* ir 2500 datu punktu ierobežojums, modeļa darbināšanai tika izmantotas meteoroloģisko datu vidējās diennakts vērtības. Ģeoloģiskie un augsnes hidrauliskie dati tika iegūti no Kustera un Grāfstāla (Custers & Graafstal, 2005) pētījuma.

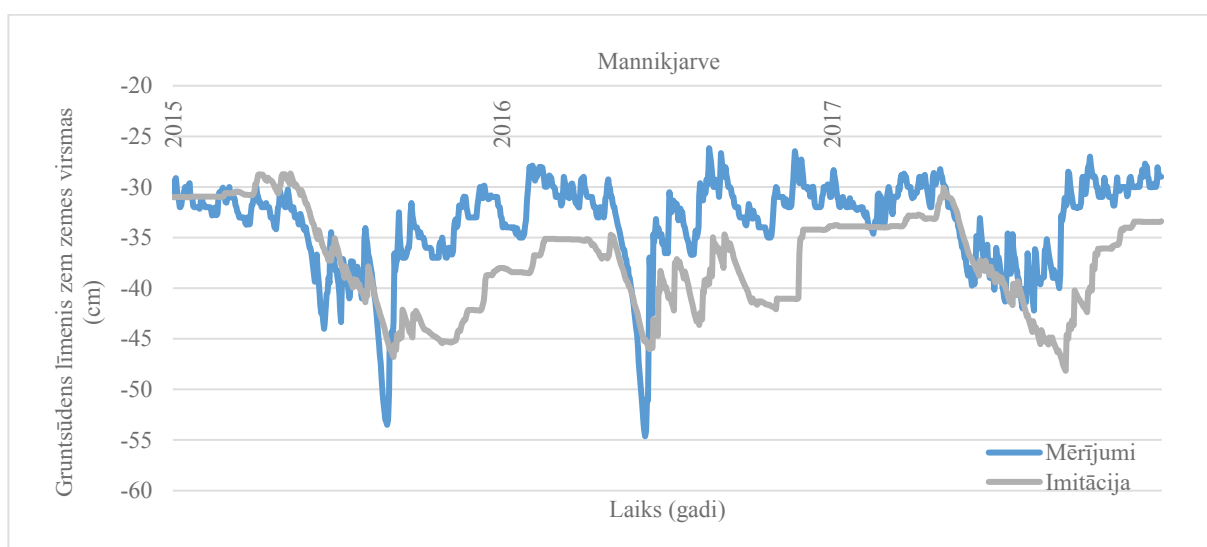
Ne visi ieejas dati ir viegli izmērāmi, tāpēc purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa kalibrēšana ir nozīmīgs solis, kas jāspēr, lai noteiktu visus parametrus, kas nepieciešami modeļa darbināšanai.

Lai varētu kalibrēt purva hidroloģisko sistēmu imitējošo modeli, ir jābūt dabā veiktu mērījumu datiem, pret kuriem salīdzināt modeļa izejas datus. Mannikjarves purva gadījumā vienīgie dabā iegūtie dati, kurus var izmantot kalibrēšanā, ir gruntsūdens līmeņa mērījumi, kas patiesībā ir ļoti laba datu rinda, jo tieši atbilstošs gruntsūdens līmenis ir noteicošais faktors, lai purvā



attīstītos dabīgam purvam raksturīga ekosistēma, kā arī autora izstrādātais purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis ģenerē gruntsūdens līmeņa datus.

Pirmā modeļa palaišana tika veikta nezinot precīzus koeficientus, bet tos nosakot, pamatojoties uz jutīguma analīzes rezultātiem un zinātniskajā literatūrā aprakstīto informāciju. Kalibrācijas apakšējās un augšējās vērtības norādītas 3.2.apakšnodaļā pie katra no koeficientiem. Kā redzams 11.attēlā, imitētais gruntsūdens līmenis mēģina kopēt izmērītā gruntsūdens līmeņa svārstības, bet atpaliek amplitūdā un precizitātē, it īpaši ziemas laikā, kad tas ilgāku laiku paliek nemainīgs.



**11.attēls.** Purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa imitētā gruntsūdens līmeņa salīdzinājums ar izmērīto gruntsūdens līmeni

*Avots: autors*

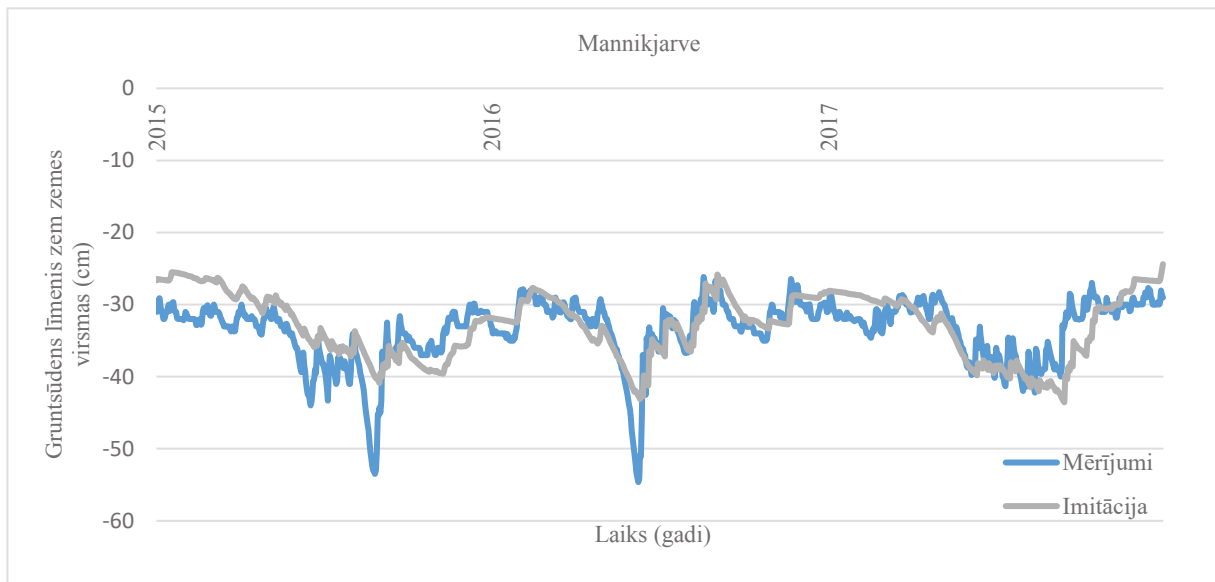
Pēc vairākām atkārtotām modeļa palaišanām noskaidrojās, ka neprecizitāti ietekmē divi vienādojumi. Viens no tiem bija vienādojums, kurš aprēķina augsnes atkušānu, līdz ar to ietekmējot ūdens infiltrāciju sasalušā augsnē, otrs bija transpirācija, jo sākotnēji modelī netika ņemts vērā apstākļi, ka skujkokos, lai arī neliela, iztvaikošana notiek pat ziemas laikā. Abos vienādojumos tika veiktas modifikācijas un modelī gruntsūdens līmenis sāka svārstīties arī ziemas laikā.

Modelis tika kalibrēts, lai dabas procesu matemātisko attēlojumu padarītu pēc iespējas precīzāku un tuvāku dabiskajiem procesiem. Tā kā 2017.gada 31.decembra gruntsūdens līmenis (30 cm no zemes virskārtas) sakrīt ar 2015.gada 1.janvāra gruntsūdens līmeni (30 cm no zemes virskārtas), 2017.gada ieejas dati tika dublēti un izmantoti, lai modelis varētu “ieskrieties”. Šie pirmā gada dati, kad modelis “ieskrienas”, netiek uzrādīti promocijas darbā iekļautajās gruntsūdens diagrammās un netiek iekļauti statistiskajos aprēķinos, tādējādi skaidrāk parādot

to uz ko modelis patiesībā ir spējīgs. Citiem vārdiem sakot, ja modelis ģenerē neprecīzus izejas datus, imitētā līkne laika gaitā no izmērītās līnijas pamazām attālinās, starp tām palielinot distanci. Ja šādi palaišanai tiktu veikta statistiskā analīze, tā uzrādītu augstāku regresiju, nekā pienāktos, bet šī promocijas darba gadījumā kalibrēšanas procesā šī iespēja līknēm attālināties vienai no otras jau ir tikusi dota un viens gads jeb 365 datu punkti ir pietiekami.

Gan *Stella Architect*, gan *Insight Maker* vidē parametru kalibrāciju var veikt izmantojot iebūvēto parametru optimizācijas (Optimization) rīku. Abās sistēmu dinamikas vidēs iespējams vienlaicīgi kalibrēt vairākus parametrus, katram no tiem nosakot apakšējo un augšējo vērtību (3.2.nodaļā aprakstītais purva hidroloģiskās sistēmas imitējošā modeļa matemātiskais formulējums ietver informāciju par kalibrējamajām vērtībām un to robežām), soli, maksimālo iterāciju skaitu, toleranci. Autors priekšroku dod *Stella Architect* optimizācijas rīkam, jo tas dod iespējas veikt tādas papildus uzstādījumus kā optimizācijas metodes izvēle un iespēja aprēķināt ticamības intervālu, kas, savukārt, ļauj piemeklēt precīzākas kalibrējamās vērtības. Ņemot vērā, ka dažādos purvos apstākļi var atšķirties, lai vienmēr imitāciju rezultāti būtu pēc iespējas precīzi, autors rekomendē parametru kalibrāciju veikt katra individuāla purva gadījuma studijām atsevišķi, nevis uzticēties iepriekšējā gadījuma studijā iegūtajām vērtībām.

Pēc purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa kalibrēšanas (skatīt 12.attēlu) var secināt, ka tas hidroloģiskos procesus atspoguļo adekvāti, jo imitētā gruntsūdens līkne līkne seko gruntsūdens līmeņa mērījumu šablonam. Vidējā kļūda jeb atšķirība starp abām līknēm ir 3.9 cm. Izņēmums ir divi lejup vērstie ekstrēmi 2015.un 2016.gada vasarā, kad atšķirība starp imitāciju un mērījumu bija attiecīgi 11.9 cm un 13.1 cm. Kas ir galvenais iemesls lielajai atšķirībai ir grūti noteikt, jo BogSim purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis sastāv no 19 dažādiem objektiem, kuri viens ar otru mijiedarbojas. Tomēr, ir divi meteoroloģiskie apstākļi, kas šo lejupvērsto pīķu periodā bija ārpus ierastā un varēja būt par pamatu tam, ka uz empīriskiem novērojumiem balstītie vienādojumi to ietekmi uz objektiem, nespēja objektīvi attēlot. Vasaras laikā diennakts vidējā saules radiācija Igaunijā sastāda 200-230 W/m<sup>2</sup>, bet, pirms šiem diviem ekstrēmiem bija novērojama netipiski augsta saules radiācijas līmenis, kas vairāk nekā 10 dienas pēc kārtas pārsniedza 250 W/m<sup>2</sup>. Augsto saules radiāciju papildināja ļoti zems vēja ātrums no 0 līdz 1.6 m/s.



**12.attēls.** Purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa imitētā gruntsūdens līmeņa salīdzinājums ar izmērīto gruntsūdens līmeni

*Avots: autors*

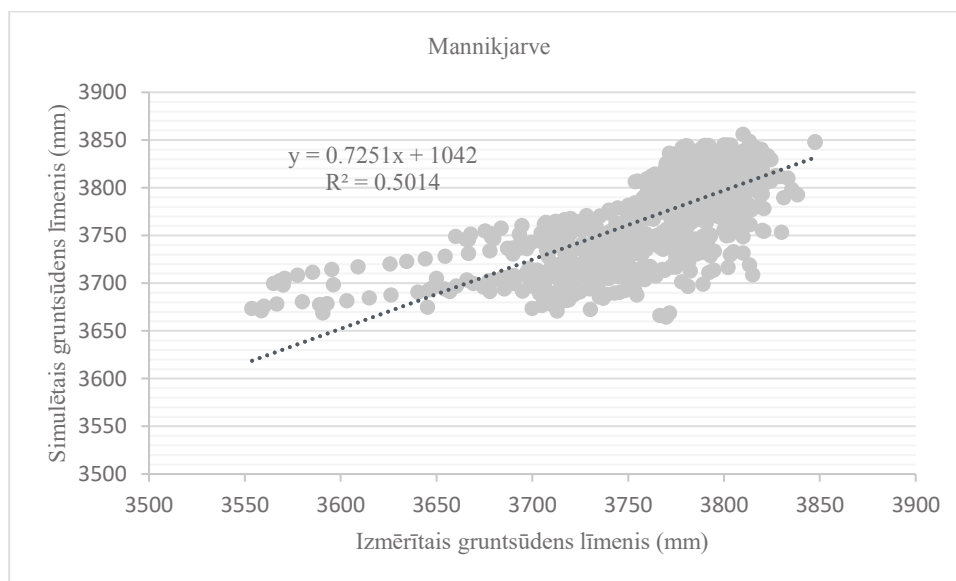
Ņemot vērā to, ka globālās klimata pārmaiņas arvien vairāk izraisa ekstrēmus laikapstākļus, autors uzskata, ka, turpinot darbu pie purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa un to izstrādājot, piemēram, *Python* atvērtais kodā, būtu jāapsver iespēja izmantot mašīnmācīšanās algoritmu pielietojumu, lai to uzlabotu un varētu identificēt faktorus, kas ietekmē novirzes izejas datus ekstrēmu laikapstākļu gadījumā, un atbilstoši pielāgot vienādojumus.

Autors saskata vēl vienu būtisku pozitīvu ietekmi, ko modeļa precizitātei varētu sniegt pāreja uz *Python* atvērto kodu, tā ir atbrīvošanās no *Stella Architect* 2500 datu punktu ierobežojuma. Datu punktu ierobežojumu dēļ *Stella Architect* imitējošajā modelī tiek izmantotas laikapstākļu vidējās diennakts vērtības, kas ietekmē modeļa darbības precizitāti, jo, piemēram, ja 20 mm lietus nolīst diennakts laikā, lietus pamazām infiltrējas augsnē, bet, ja 20 mm lietus nolīst vienas stundas laikā, augsne nav spējīga akumulēt tik lielu ūdens apjomu tik īsā laikā un veidojas virszemes noteces un ūdens aizplūst uz ģeogrāfiski zemākajām vietām. Vairāk datu punktu atļautu modelim imitēt precīzākus izejas datus un samazināt svārstības ekstrēmos laikapstākļos.

### 3.3.3. Purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa verifikācija

Visnozīmīgākais kvantitatīvais kritērijs ir precizitāte (Ha, Im, Kim, Sim, & Yoon, 2018). Tā kā galvenais nosacījums degradētu purvu atjaunošanai ir atbilstošs gruntsūdens līmenis, purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa verifikācijai autors izmanto statistiskos testus un salīdzina imitēto gruntsūdens līmeni ar dabā izmērīto. Vidējā absolūtā kļūda ir 27 mm, vidējā kvadrātiskā kļūda (RMSE) ir 1.049 un vidējā absolūtā procentuālā kļūda (MAPE) ir 1.153. R kvadrāta regresijas ir neatsverama jebkura nopietna pētījuma daļa, un to daudzi uzskata par

visnozīmīgāko pētījuma kvalitātes daļu (Moksony, 1990), jo, ja atšķirības starp mērījumiem un modeļa prognozētajām vērtībām ir nelielas un objektīvas, modelis atbilst datiem (Minitab, 2013). Lai arī R kvadrāta regresiju par nepiemērotu statistisko metodi, lai salīdzinātu mērījumus ar imitējošu modeļu prognozēm, uzskata vairāki autori (Figueiredo Filho, Silva, & Rocha, 2011) (Akossou & Palm, 2013), tā joprojām tiek plaši izmantota līdzīgu hidroloģiju imitējošu modeļu uzticamības pārbaudei. Ar ticamības intervālu 0.95 un nozīmīguma līmeni 0.05 lineārās regresijas koeficients ir 0.71 un R kvadrāta regresijas koeficients šajā eksperimentā sastāda 0.50 (skatīt 13.attēlu).



**13.attēls.** Mannikjarves gruntsūdens līmeņa R kvadrāta regresija

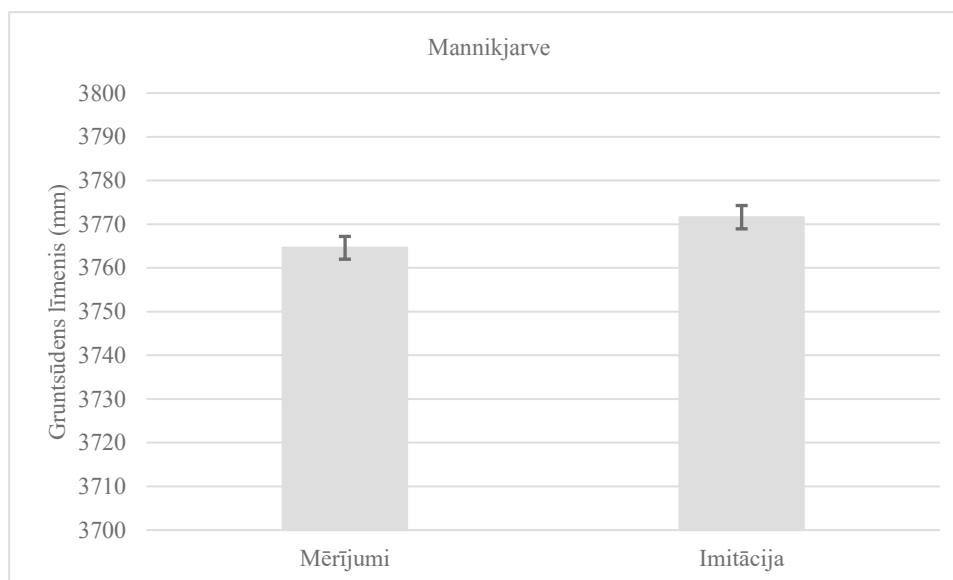
*Avots: autors*

13.attēlā redzamā histogramma pirmšķietami liek domāt, ka dati neatbilst normālsadalījumam. Izmērītā gruntsūdens līmeņa standarta novirze ir 44 un imitētā – 45. Līkņu standarta novirze pārsniedz 6, kas apliecina, ka ir liela datu izkliede un dati neatbilst normālsadalījumam.

Izanalizējot citas statistiskās analīzes, kuras varētu izmantot R kvadrāta regresijas vietā, autors kā piemērotāko izvēlējās Vilksona rangu zīmju testu, kas ir alternatīva parametru T-testam, kura vienīgais pieņēmums ir, ka atšķirības starp testa grupām ir simetriskas, nepieprasot, lai tās atbilstu normālsadalījumam (Oyeka & Ebuh, 2012). Mannikjarves Vilksona rangu zīmju testa vērtība ir 0.00, kas ir mazāka par 0.05 un nulles hipotēze, ka līkņu izkļedes mediāna ir vienāda, tiek noraidīta.

Ticamības intervāla punktu novērtējums (skatīt 14.attēlu) ar ticamības koeficientu 0.95 un nozīmības līmeni 0.05 ir 3765 (izmērītais gruntsūdens līmenis) un 3772 mm (imitētais

gruntsūdens līmenis), kļūdas robeža ir 2.61 (izmērītais gruntsūdens līmenis) un 2.67 (imitētais gruntsūdens līmenis).



**14.attēls.** Mannikjarves gruntsūdens līmeņa ticamības intervāli

*Avots: autors*

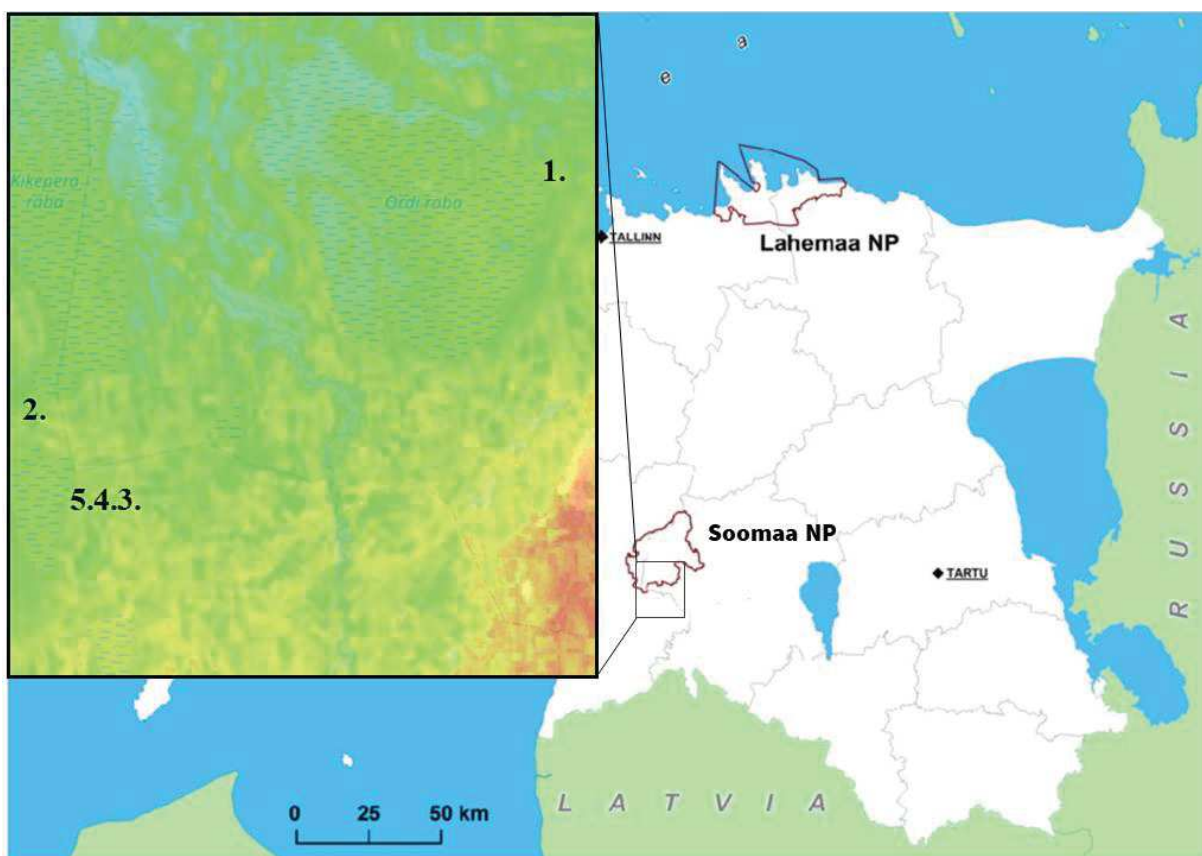
Neskatoties uz to, ka Vilkoksona rangu zīmju tests noraidīja nulles hipotēzi, bet, ņemot vērā nelielo ticamības intervālu nobīdi, to, ka purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa gruntsūdens līmeņa prognoze vizuāli atgādina gruntsūdens mērījumu līkni un reaģē uz ieejas datu un parametru maiņu, autors uzskata, ka izstrādātais purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis ir objektīvs un derīgs un nepieciešama tālāka tā veiktspējas pārbaude.

### **3.3.4. Purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa veiktspējas pārbaude**

Pēc tam, kad bija veikta purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa verifikācija Mannikjarves purva neskartajā rietumu daļā, bija nepieciešams pārbaudīt tā veiktspēju degradētā purvā, kur veiktas manipulācijas ar mērķi atjaunot purva hidroloģisko režīmu un ir pieejami purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa darbināšanai nepieciešamie ieejas dati. Šādai pārbaudei piemērota vieta ir Somā purvs, kura dažādos purva nogabalos, kuri komerciālu mežaudžu vajadzībām nodalīti viens no otra ar meliorācijas grāvjiem, 2014.-2015.gadā tika veikta eksperimentāla purva ekosistēmas atjaunošana, kas ietvēra mežaudzes retināšanu un/vai meliorācijas grāvju aizbēršanu. Purvā joprojām tiek veikts monitoring.

Šajā nodaļā tiek aprakstīts, kā *Stella Architect* vidē izstrādātais purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis BogSim imitē izmaiņas gruntsūdens līmenī, kad tiek veikta meliorācijas grāvju aizbēršana un/vai daļēja mežaudzes retināšana.

Somā purvs atrodas Somā Nacionālajā parkā, Igaunijas dienvidrietumos, Pērnavas zemiens un Sakalas augstienes rietumu nogāzē (skatīt 15.attēlu) (Pöldmaa, et al., 2019). Somā Nacionālais parks, kas dibināts 1993.gadā, ir jaunākais nacionālais parks Igaunijā (Tooman & Ruukel, 2012). Nacionālajam parkam raksturīgajā ainavā ietilpst lieli purvu līdzenumi, no kuriem līdz 40% sezonāli applūst. Apmēram 42% no 39 884 ha teritorijas aizņem meži, kuros dominē priežu audzes. Komerciālo mežaudžu izveidošana ir saistīta ar 20.gadsimta 70.gados veiktajiem apjomīgajiem meliorācijas darbiem (Pöldmaa, et al., 2019). Pētījuma vajadzībām tika izmantoti dati no notiekoša eksperimenta, kas tika uzsākts 2013.gadā, ar mērķi atjaunotu purvu mežu biotopa medņa (*Tetrao urogallus*), ikoniskas putnu sugas Baltijas valstīs, dzīvotni (Lõhmus, et al., 2017). Eksperimenta darbības tika mērķēts uz purva platībām, kas nosusinātas laikā no 1970.līdz 1990.gadam, kombinējot drenāžas grāvju bloķēšanu ar daļēju mežaudzes retināšanu. Šīs metodes ir identiskas tām, kuras izmanto Igaunijā un citur purva biotopu vispārīgai atjaunošanai (Laine, et al., 2011). Detalizētā meža inventarizācija pirms un pēc eksperimentālajām darbībām un automātiski gruntsūdens līmeņa mērītāji padara šo purvu par labu izmēģinājuma poligonu arī purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa darbības pārbaudei.

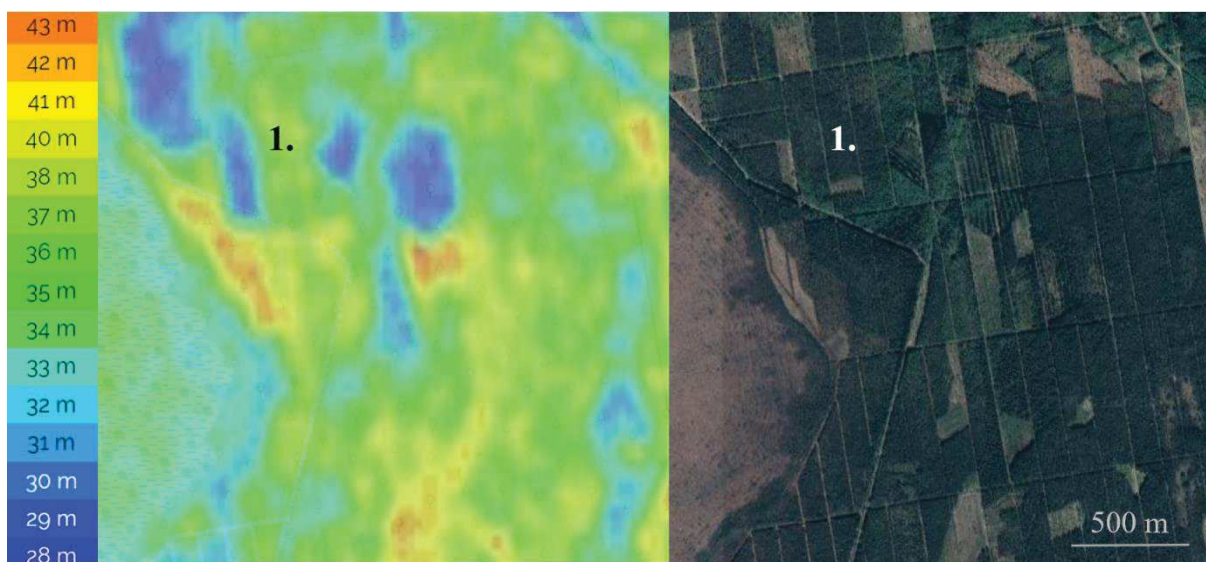


**15.attēls.** Gadījuma studiju izpētes vieta, Somā (Soomaa) Nacionālais parks Igaunijā

Avots: (Järv, Kliimask, Ward, & Sepp, 2016), (topographic-map.com, 2020)

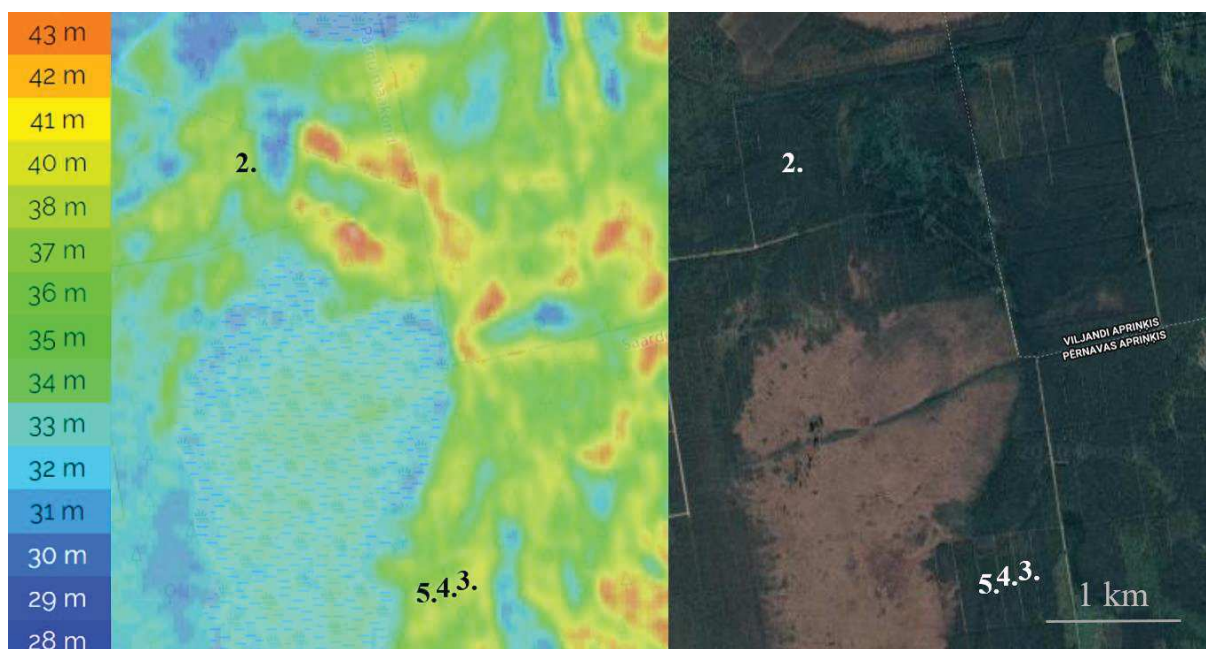


Kā redzams 16. un 17.attēlā, meliorācijas grāvji, kas izveidoti vairākās Somā Nacionālā parka daļās, veido taisnstūra formas nogabalus. Atsevišķos nogabalos ir atšķirīgs kūdras slāņa biezums, augstums virs jūras līmeņa un mežaudzes blīvums. Tā kā nogabali ir atdalīti ar meliorācijas grāvjiem, teorētiski to ietekme vienam uz otra hidroloģisko režīmu ir minimāla, tāpēc tie ir piemēroti, lai veiktu eksperimentus ar mežaudzes retināšanu.



**16.attēls.** Somā Nacionālā parka austrumu daļas topogrāfiskā karte un ortogrāfiskais fotoattēls

*Avots:* (topographic-map.com, 2020), (Google, 2020)



**17.attēls.** Somā Nacionālā parka dienvidu daļas topogrāfiskā karte un ortogrāfiskais fotoattēls

*Avots:* (topographic-map.com, 2020), (Google, 2020)



Pētījuma vajadzībām tika izvēlēti pieci nogabali, kuros veiktas dažādas manipulācijas, lai novērtētu to ietekmi uz gruntsūdens līmeņa svārstībām, kas nākotnē kalpotu par pamatu degradētu purvu atjaunošanas metodoloģijas izstrādei. Detalizēta nogabalu informācija apkopota 3.tabulā. Tabulas pirmajā kolonnā norādītie numuri atbilst 20.un 21.attēlā norādītajiem.

**3.tabula.** Nodaļā apskatīto nogabalu īpašības

<b>Nr.</b>	<b>Kūdras biezums (m)</b>	<b>Devona smilšakmens biezums (m)</b>	<b>Mežaudzes retināšanas datums</b>	<b>Meliorācijas grāvju aizbēršanas datums</b>	<b>Mežaudzes retināšanas intensitāte (%)</b>	<b>Augstums virs jūras līmeņa (m)</b>
1.	0.8	5	14.08.2014	Nav veikta	44	31
2.	1.2	5	15.10.2014	Nav veikta	31	31
3.	1.2	5	15.02.2015	Nav veikta	38	32
4.	1.3	5	Nav veikta	01.12.2015	0	31
5.	1.15	5	18.02.2015	01.12.2015	34	30

*Avots: autors*

Purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis tika darbināts izmantojot vēsturiskos datus no 2013.gada 1.novembra līdz 2018.gada 31.decembrim. Katrai dienai atbilda viens datu punkts ar atbilstošiem katras dienas datiem, kopā veidojot 1836 datu punktus. Ieejas datu kopa ietver meteoroloģiskos datus (diennakts nokrišņi gan lietūs, gan sniega veidā, diennakts vidējā gaisa temperatūra, diennakts vidējais relatīvais gaisa mitrums, diennakts vidējais vēja ātrums, diennakts vidējā saules radiācija), attālās izpētes datus (atstarošanas Red un NIR gaismas spektrā pirms un pēc mežaudzes retināšanas), ģeoloģiskos datus (kūdras slāņa un glaciālo nogulumu biezumu, nogabala virsmas slīpumu), augsnes hidrauliskās īpašības (kūdras sūcējspēku, kūdras maksimālo ūdens ietilpību, kūdras galējo porainību, kūdras minimālo ūdens ietilpību, kūdras hidraulisko ūdens vadītspēju, glaciālo nogulumu maksimālo porainību, glaciālo nogulumu efektīvo porainību, glaciālo nogulumu minimālo ūdens ietilpību, morēna slāņa porainību) un kalibrējamās vērtības (specifisko lapu ietilpību, maksimālo sniega ietilpību, lapu novietojuma leņķi, sniega intercepcijas koeficientu, kūdras evaporācijas koeficientu, kūdras lambda koeficientu, kūdras infiltrācijas koeficientu, glaciālo nogulumu perkolācijas koeficientu, morēna perkolācijas koeficientu). Lapu novietojuma leņķis ir robežās starp 0.2 un 0.8, specifiskā lapu ietilpība – starp 0.4 un 5.88 (Carey, Elshorbagy, & Kesha, 2009), atkarībā no koku sugas. Lai aprēķinātu sniega intercepciju, autors modificēja lietūs intercepcijas vienādojumu, tāpēc nebija zināmas sniega intercepcijas koeficienta vērtības, bet pēc

kalibrēšanas, autors secināja, ka tās meklējamas robežās starp 2 un 8. Kūdra sevdaporācijas koeficients ir eksponenciāls koeficients lielāks par 1 (Elshorbagy, Julta, Barbour, & Kells, 2005). Dati par kūdras biezumu tika iegūti veicot urbumus. Modelis iekļauj arī pamatu veidojošo minerālaugšni (šajā gadījumā 5 m) un pamatnes nogulumiežus (devona smilšakmeņi). Informācija par ģeoloģisko struktūru balstīta uz ģeoloģisko kartēšanu mērogā 1:400 000 (Igaunijas zemes karte) un atsevišķām kūdras avotu kartēm (mērogs 1:10 000, Igaunijas Ģeoloģijas dienests). Lai attēlotu ūdens perkolāciju devona smilšakmens slānī, autors izstrādāja jaunu pieeju, kur tā tiek aprēķināta balstoties uz glaciālo noguluma slāņa piesātinātību ar ūdeni, smilšakmens porainību (%) un smilšakmens perkolācijas koeficientu. Tā kā šī ir jauna, autora izstrādāta pieeja, perkolācijas koeficienta robežas nebija zināmas, un kalibrēšanas procesā tā vērtība tika noteikta 0,0019 apjomā, bet, ar atšķirīgam morēna slāni veidojošam iezim, tas varētu atšķirties.

BogSim purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa veikspēja dažādos testa nogabalos bija atšķirīga ar vidējo nobīdi starp imitēto un izmērīto gruntsūdens līmeni no 0,88 līdz 2,63 cm (skatīt 4.tabulu). Zemāka vidējā nobīde un saknes vidējās kvadrātiskās kļūdas (RMSE) vērtība starp imitēto un izmērīto līkni, norādot uz augstāku modeļa precizitāti, bija nogabalos ar mērenu gruntsūdens līmeņa svārstību diapazonu. Pretstatā, korelācijas koeficients un daudzfaktoru korelācijas koeficienta kvadrāts  $R^2$  augstāku vērtību un ciešāku sakarību starp imitēto un izmērīto gruntsūdens līmeņa līkni uzrādīja nogabalos, kur tika veikti plašāki ekosistēmas atjaunošanas darbi, kam sekoja krass gruntsūdens līmeņa pieaugums.

**4.tabula.** Parametri, kas norāda uz BogSim purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa darbības precizitāti.

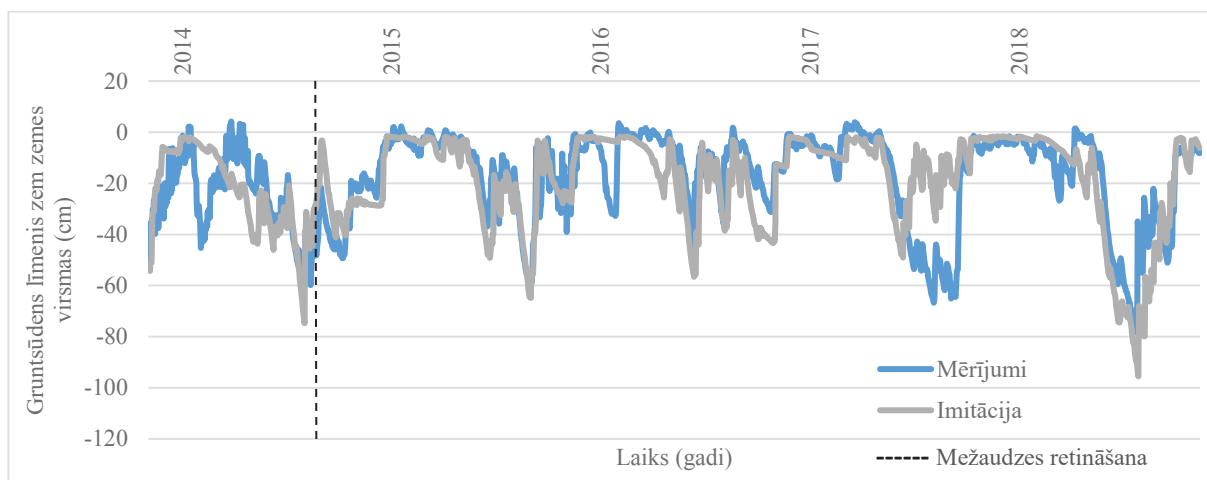
Nr.	Vidējā nobīde (cm)	Korelācija	$R^2$	RMSE (cm)
1	0.96	0.70	0.50	0.32
2	1.25	0.78	0.60	0.37
3	0.88	0.68	0.47	0.28
4	1.64	0.94	0.89	0.42
5	2.63	0.94	0.88	0.71

*Avots: autors*

Nodaļas turpinājumā BogSim purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa darbība tiek vērtēta detalizēti katrā no testa nogabaliem.

## Testa nogabals Nr.1

Nogabals Nr.1 ir ģeogrāfiski visaugstāk novietotais no testa nogabaliem. Tas atrodas 39 m virs jūras līmeņa, kas ir augstāk par nogabaliem ar kuriem tas robežojas (skatīt 16.attēlu). Purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa veiktspēja tika pārbaudīta, salīdzinot imitēto gruntsūdens līmeņa līkni ar izmērīto. Vidējā atšķirība starp gruntsūdens līmeņa mērījumiem un imitāciju ir 9.6 mm un ar ticamības intervālu 0.95 un nozīmīguma līmeni 0.5 starp līknēm pastāv izteikta pozitīva korelācija 0.70 ar  $R^2$  koeficientu 0.50 un RMSE 0.32 cm.



**18.attēls.** Testa nogabala Nr.1 gruntsūdens līmenis

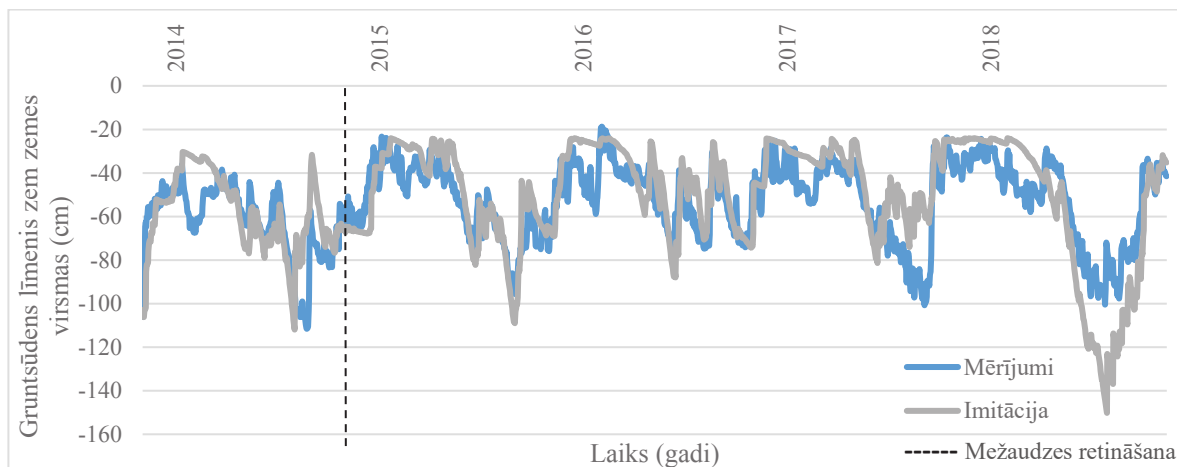
*Avots: autors*

Apskatot gruntsūdens līmeņa līknes (skatīt 18.attēlu), var novērot, ka mežaudzes samazināšana par 44 %, 2014.gada 14.augustā veicot retināšanas darbus (vertikālā līnija 18.attēlā), ir sniegusi uzlabojumus, jo, sākot no 2014./2015.gada, ziemās gruntsūdens līmenim vairs nav novērojamas izteiktās svārstības un tas saglabājas vien dažus centimetrus zem zemes virskārtas. Tomēr, iestājoties siltākam laikam un atkūstot meliorācijas grāvju nogāzēm, atkal novērojamas gruntsūdens līmeņa svārstības lielā amplitūdā, kas pārsniedz dabīgam augstajam purvam raksturīgās svārstības (Java, Kohv, & Löhmus, 2021). Lai arī imitētā gruntsūdens līmeņa līkne vizuāli atgādina gruntsūdens līmeņa mērījumos iegūto rezultātu, Vilkoksona rangu zīmju tests noraida nulles hipotēzi un pasaka, ka abu līkņu izkliedes mediānas nav pietiekami tuvas, lai varētu secināt, ka purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis ir pietiekami precīzs reālās sistēmas atspoguļojums.

## Testa nogabals Nr.2

Testa nogabals Nr.2 (skatīt 19.attēlu) ar vidējo atšķirību starp gruntsūdens mērījumiem un imitāciju 12.45 mm ar ticamības intervālu 0.95 un nozīmīguma līmeni 0.05 uzrāda izteiktāku pozitīvu korelāciju 0.78 ar  $R^2$  koeficientu 0.60 kā testa nogabals Nr.1, kamēr RMSE vērtība

sastāda 0.37 cm, norādot uz pretējo – abas gruntsūdens līknes atrodas tālāk kā iepriekšējā testa nogabalā. Vilkkoksona rangu zīmju testa vērtība nesasniedz 0.05 sliksni, kā rezultātā neapstiprina nulles hipotēzi, ka abu gruntsūdens līmeņa līkņu izkliedes mediāna ir vienāda, tiek noraidīta (Java, Kohv, & Löhmus, 2021).



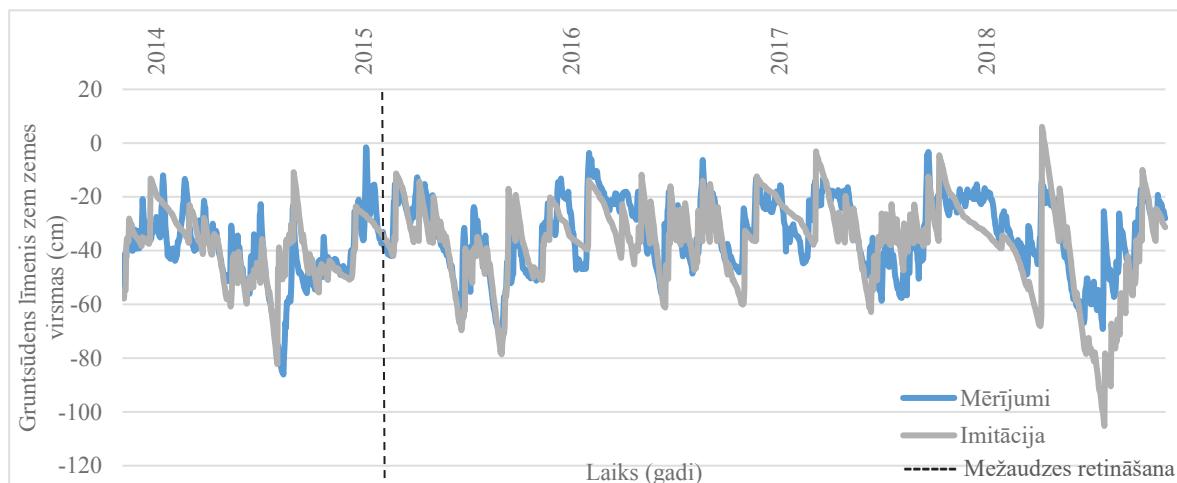
**19.attēls.** Testa nogabala Nr.2 gruntsūdens līmenis

*Avots: autors*

Apskatot abas gruntsūdens līknes (skatīt 19.attēlu), var novērot, ka pēc mežaudzes retināšanas, kas tika veikta 2014.gada oktobrī, gruntsūdens līmenis ziemā pieaug. Ziemā, kad zemes virskārta ir sasalusi, nenotiek evaporācija jeb ūdens iztvaikošana no augsnes, bet, pretstatā lapu kokiem, skujkokos, lai arī lēnāk kā veģetācijas periodā, transpirācija notiek. Samazinoties transpirācijai, ziemas periodā kūdras slānis zaudē mazāk ūdens. Vasarā transpirācijas ierobežošanas ietekme uz kopējo ūdens bilanci nav tik izteikta kā ziemā, jo, samazinot mežaudzes apjomu, samazinās arī zemsedzes noēnojums, tā saņem vairāk atmosfēras siltumu un saules radiāciju, kas ir pamatu evaporācijas pieaugumam (Java, Kohv, & Löhmus, 2021).

### Testa nogabals Nr.3

Trīs testa nogabali Nr.3, Nr.4 un Nr.5 atrodas viens otram blakus (skatīt 17.attēlu) un tos vienlaicīgi gan atdala, gan saista kopīga meliorācijas grāvju sistēma. Nogabals Nr.3 atrodas ģeogrāfiski augstāk par pārējiem diviem nogabaliem (Java, Kohv, & Löhmus, 2021).



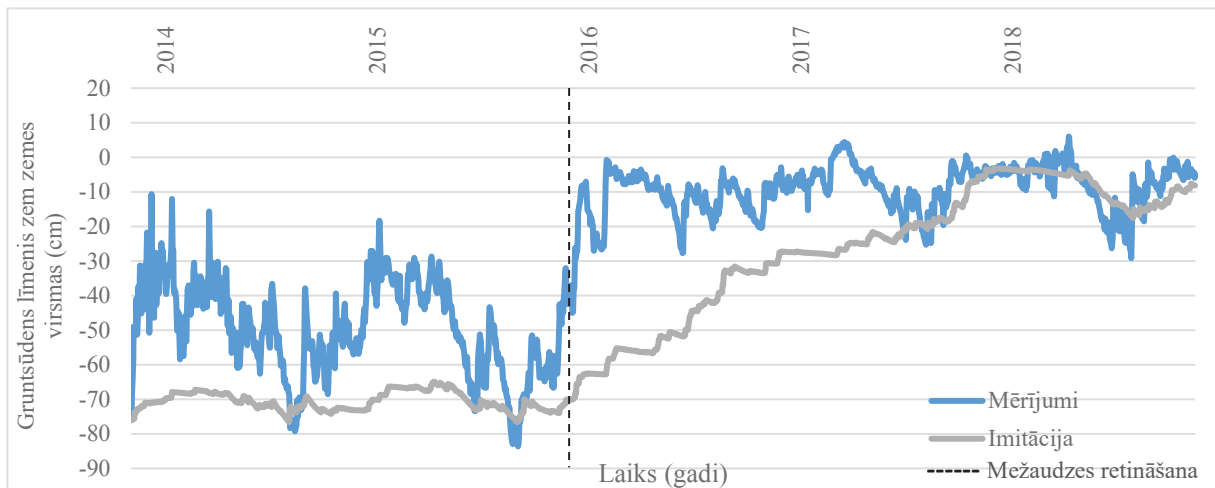
**20.attēls.** Testa nogabala Nr.3 gruntsūdens līmenis

*Avots: autors*

Šajā nogabalā, ne gruntsūdens līmeņa mērījumos, ne imitētajā gruntsūdens līknē nav novērojamas būtiskas izmaiņas pēc mežaudzes retināšanas 2015.gada 15.februārī, ko 20.attēlā apzīmē vertikālā raustītā līnija, kaut tika nocirsti 38% no kopējā koku skaita. Lai arī testa nogabala Nr.3 mērījumu un imitācijas gruntsūdens līmeņa līknes (skatīt 20.attēlu) viena no otras atrodas vistuvāk (mērījumu vidējā vērtība 1165 mm ar standarta novirzi 13.8 mm, imitācijas vidējā vērtība 1163 mm ar standarta novirzi 15.6 mm) vidējā atšķirība starp līknēm 8.81 mm) no visiem testa nogabaliem, ar ticamības intervālu 0.95 un nozīmīguma līmeni 0.05 korelācija ir zemāka, kā iepriekš apskatītajiem nogabaliem – 0.68 un  $R^2$  0.47, kamēr RMSE, ar viszemāko vērtību (0.28 cm) no visiem testa nogabaliem, norāda uz to, ka novirze starp abām līknēm ir neliela un imitētā līkne precīzi kopē gruntsūdens mērījumus (Java, Kohv, & Löhmus, 2021). Vilksoksona rangu zīmju tests noraida nulles hipotēzi, ka šajā nogabalā abu gruntsūdens līmeņa līkņu izkliedes mediāna ir vienāda.

#### **Testa nogabals Nr.4**

Kā tas bija novērojams iepriekšējos trīs testa nogabalos, kuri ģeogrāfiski atrodas augstāk par blakus esošajām teritorijām un no tām ir atdalīti ar meliorācijas grāvjiem, autora izstrādātais purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis sistēmu dinamikas vidē demonstrē augstu precizitāti. Testa nogabals Nr.4 (skatīt 17.attēlu) atrodas 31 metru virs jūras līmeņa un par vienu metru zemāk kā testa nogabals Nr.3. Šis nogabals no iepriekš apskatītajiem atšķiras arī ar to, ka tajā nav veikta mežaudzes retināšana, bet tikai grāvju aizpildīšana ar kūdru (Java, Kohv, & Löhmus, 2021).



**21.attēls.** Testa nogabala Nr.4 gruntsūdens līmenis pirms manipulācijām ar nokrišņu apjomu

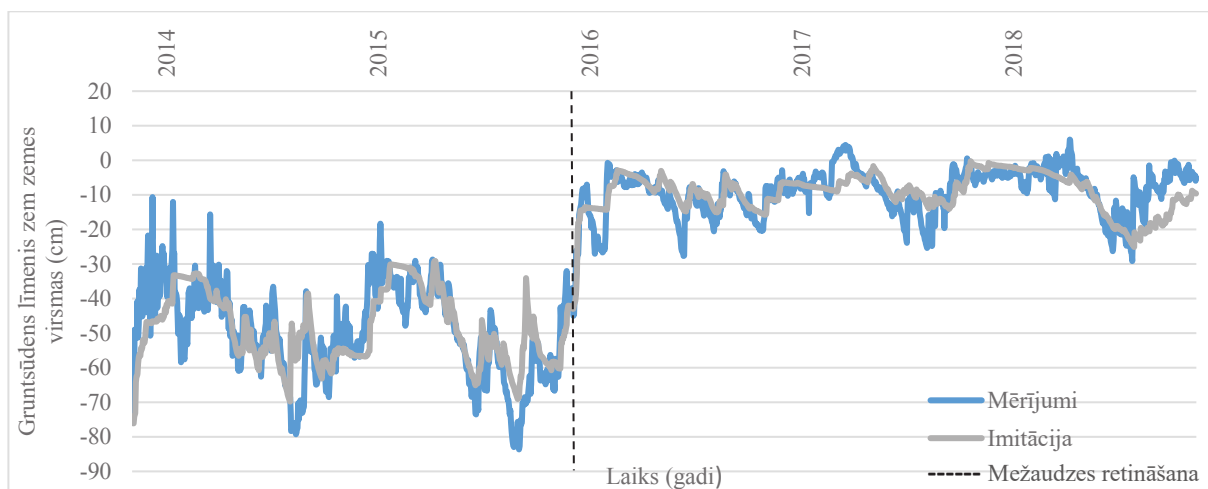
*Avots: autors*

21.attēlā skaidri redzamas, ka purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa imitētais gruntsūdens līmenis ievērojami atpaliek no faktiskā gruntsūdens līmeņa. Tomēr, pēc meliorācijas grāvju aizbēršanas 2015.gada decembrī, imitētais gruntsūdens līmenis pamazām pieaug, līdz 2017.gada vasarā sasniedz izmērīto gruntsūdens līmeni un turpmāk to kopē. Straujāku gruntsūdens līmeņa pieaugumu pēc meliorācijas grāvju aizbēršanas nav iespējams imitēt, ja vienīgais ūdens avots, kas papildina testa nogabala ūdens bilanci ir nokrišņi, jo, lai sasniegtu šo līmeni, infiltrācijai kūdras slānī būtu vairākas reizes jāpārsniedz nokrišņu summa (Java, Kohv, & Lõhmus, 2021).

Šis piemērs parāda, ka, lai arī autora izstrādātais imitējošais modelis ietver visas galvenās purva hidroloģiskās sistēmas komponentes un matemātiski vienādojumi ūdens plūsmas aprēķina tuvu procesiem dabā, ne visos gadījumos iespējams izvairīties no blakus esošo nogabalu ietekmes vienam uz otru, jo gravitācijas ietekmē virszemes notece vienmēr pārvietojas uz ģeogrāfiski zemākām vietām, papildinot to ūdens bilanci, ko lielākoties veido tikai nokrišņi (Java, Kohv, & Lõhmus, 2021).

Lai varētu novērtēt meliorācijas ietekmi uz šo testa nogabalu, darba autors eksperimentēja ar nokrišņu apjomu, to mākslīgi palielinot laika periodam pirms meliorācijas grāvju aizbēršanas. Kā maināmā vērtība tika izvēlēts nokrišņu apjoms, jo virszemes notece, kas veido ūdeni grāvjos, ir proporcionāla nokrišņu intensitātei. Pēc grāvju aizbēršanas testa nogabals saņēma tikai faktisko nokrišņu apjomu, jo blakus esošo nogabalu ietekme uz to tika būtiski samazināta, bet to nevar izslēgt pavisam, jo virszemes notece no blakus esošajiem nogabaliem to teorētiski var sasniegt pa virszemi. Apliecinājums tam, ka šo testa nogabalu ietekmē ģeogrāfiski augstāk esošie nogabali arī pēc grāvju aizbēršanas, ir 2017.gada pavasaris, kad izveidojās bieža sniega sega, kurai kūstot izmērītais gruntsūdens līmenis tika bagātināts ar lielāku ūdens masu, nekā uz

tā atradās (skatīt 22.attēlu). Ūdens apjoms, kāds būtu nepieciešams, lai imitētu precīzas gruntsūdens līmeņa svārstības testa nogabalā Nr.4, tika sasniegts nokrišņus palielinot 5.2 reizes (Java, Kohv, & Lõhmus, 2021).



**22.attēls.** Testa nogabala Nr.4 gruntsūdens līmenis pēc manipulācijām ar nokrišņu apjomu

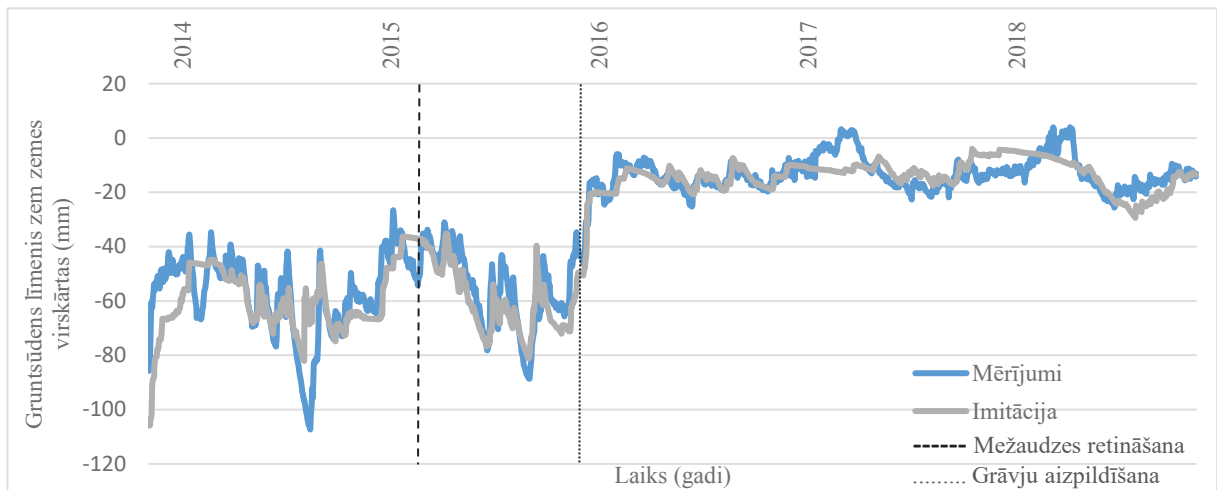
*Avots: autors*

Tā kā šajā testa nogabalā, meliorācijas grāvju aizbēršanas ietekmē ir notikušas ievērojamas gruntsūdens līmeņa svārstības, kuras purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis spēj atdarināt, statistiskie testi ar ticamības intervālu 0.95 un nozīmīguma līmeni 0.05 uzrāda ļoti augstu pozitīvu korelāciju 0.94 ar  $R^2$  koeficientu 0.89. Arī Vilkoksona rangu zīmju testa vērtība 0.419 krietni pārsniedz 0.05 sliekšni, kā rezultātā apstiprinās nulles hipotēze, ka abu gruntsūdens līmeņa līkņu izkliedes mediāna ir vienāda un šis purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis konkrētajā nogabalā precīzi atspoguļo reālo sistēmu un ir pielietojams nākotnes prognožu modelēšanās. Par spīti augstajai korelācijai un tam, ka apstiprinās Vilkoksona ranga zīmju testa nulles hipotēzes apstiprināšanai, RMSE vērtība testa nogabalā Nr.4 pieaug līdz 0.42 cm, norādot uz distance starp abu gruntsūdens līmeņa līkņu punktiem palielināšanos (Java, Kohv, & Lõhmus, 2021).

### Testa nogabals Nr.5

Nogabals Nr.5 atrodas ģeogrāfiski viszemāk no visiem testa nogabaliem (30 m virs jūras līmeņa), starp kuru un to purva daļu, kas pielīdzināma aktīvam augstajam purvam (ir pietiekams mitruma līmenis, lai notiktu sfagnu sūnu augšana un kūdras veidošanās, nav meliorācijas grāvju) atrodas tikai viens nogabals (skatīt 17.attēlu) (Java, Kohv, & Lõhmus, 2021).





**23.attēls.** Testa nogabala Nr.5 gruntsūdens līmenis pēc manipulācijām ar nokrišņu apjomu

*Avots: autors*

Tā kā nogabals Nr.5 atrodas par vienu metru zemāk kā nogabals Nr.4, meliorācijas ietekme uz tā ūdens bilanci ir vēl izteiktāka. Lai imitētā gruntsūdens līkne sasniegtu gruntsūdens mērījumus, pirms meliorācijas grāvju aizbēršanas nogabala nokrišņu apjoms tika palielināts 6.2 reizes, bet pēc – 1.7 reizes, jo kā zemākā punktā, tajā kā virszemes notece nonāk nokrišņu daļa, kuru ģeogrāfiski augstākos nogabalos zeme nav spējusi akumulēt (Java, Kohv, & Lõhmus, 2021).

Purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis šajā nogabalā ar ticamības intervālu 0.95 un nozīmīguma līmeni 0.05 uzrāda izteikti pozitīvu korelāciju 0.94 un  $R^2$  koeficientu 0.884, tomēr, Vilksona rangu zīmju testa vērtība nesasniedz 0.05 sliekšni, kā rezultātā nulles hipotēze, ka abu gruntsūdens līmeņa līkņu izkliedes mediāna ir vienāda, tiek noraidīta. Par spīti augstajai regresijai, RMSE vērtība šajā nogabalā pieaug līdz 0.71 cm, kas ir vislielākā RMSE vērtība no visiem testa nogabaliem, tomēr tā ir zemāka par 1, kas norāda uz būtisku imitācijas līdzību reālajai purva hidroloģiskajai sistēmai (Java, Kohv, & Lõhmus, 2021).

Testa nogabals Nr.5 atšķiras no pārējiem nogabaliem ar to, ka tajā ir veikta gan meliorācijas grāvju aizpildīšana ar kūdru (pirmā vertikālā līnija 23.attēlā no labās puses), gan mežaudzes manipulācijas (otrā vertikālā līnija 23.attēlā no labās puses), samazinot tās apjomu par 34 %. Salīdzinot nogabalu Nr.5 (skatīt 23.attēlu) ar Nr.4 (skatīt 22.attēlu), kurā tika veikta grāvju aizpildīšana, bet netika izcirsti koki, gruntsūdens līknes, var novērot, ka, pielietojot abas metodes, kas samazina ūdens aizplūšanas no ekosistēmas apjomu, to kombinācija ir visiedarbīgākā, jo būtiski samazina gruntsūdens līmeņa svārstības (Java, Kohv, & Lõhmus, 2021).

## Lapu laukuma indekss kā veģetācijas apjoma mērinstruments

Darba autora izstrādātais purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis sistēmu dinamikas vidē BogSim kā veģetāciju raksturojošu rādītāju izmanto LAI. Pēc definīcijas LAI ir attiecība starp vienpusēju (skujkoku gadījumā četršķautņainās lapas dēļ – divpusēju) lapas laukumu pret vienu zemes laukuma vienību (Gong, Pu, Biginb, & Larrieu, 2003). LAI nosaka daudzus ekoloģiskos procesus, piemēram, transpirāciju, intercepciju un oglekļa plūsmu (Zheng & Moskal, 2009). Tas ir rādītājs, kas atspoguļo meža veģetācijas augšanas statusu (Yu, Wang, Liu, & Cheng, 2019), tāpēc šajā pētījumā LAI aprēķiniem tiek izmantota metode, kas balstās uz atstarošanas sarkanās (Red) un gandrīz infrasarkanajās (NIR) gaismas spektrā, šo indeksu nosakot pēc biomasas fotosintēzei patērētās enerģijas apjoma (Härkönen, Lehtonen, Manninen, Tuominen, & Peltoniemi, 2015).

**5.tabula.** Testa nogabalu mežaudzi raksturojošie lielumi

Nr.	NIR pirms	Red pirms	LAI pirms	NIR pēc	Red pēc	LAI pēc	Mežaudzes retināšanas intensitāte (%)	LAI starpība (%)
1.	85	29	2.36	97	53	1.76	44	-25
2.	77	41	1.76	97	60	1.54	31	-13
3.	52	30	1.65	56	41	1.28	38	-22
4.	59	31	1.78	70	36	1.81	0	+2
5.	37	21	1.67	44	26	1.61	34	-4

*Avots: autors*

Kā novērojams 5.tabulā, LAI samazinājums nav tieši proporcionāls mežaudzes retināšanas intensitātei. Tas skaidrojams ar to, ka, izcērtot daļu koku, samazinās to vainagu noēnojošā ietekme, kas ļauj vairāk saules gaismai nonākt zemsedzē un veicina straujāku bioloģisko procesu norisi krūmos un sīkkokos (Java, Kohv, & Lõhmus, 2021).

Jāpiezīmē, ka testa nogabalam Nr.1 NIR un Red mērījumi pēc mežaudzes retināšanas netika veikti, tāpēc tie tika piemeklēti tos mainot, līdz starp imitēto gruntsūdens līkni un gruntsūdens mērījumiem tika sasniegta zemākā vidējā nobīde. Šī darbība var kalpot kā piemērs, kā kalibrētu purva hidroloģisko sistēmu imitējošo modeli pielietot, lai atrastu nezināmu parametra vērtību.

### 3.4. Hidroloģisko modeļu salīdzinājums

Kā aprakstīts 2.nodaļā, gan starp esošajiem hidroloģiskajiem modeļiem savā starpā, gan starp tiem un BogSim purva hidroloģisko sistēmu imitējošo modeli pastāv būtiskas atšķirības, kas liedz tos objektīvi salīdzināt, tas ir – tos replicēt un darbināt ar, piemēram, Somā purva ieejas datiem un salīdzināt to ģenerētās gruntsūdens līknes. Tomēr, ir vērts ieskatīties zinātniskajā literatūrā pieejamās gadījuma studijās, kurās izmantoti esošie hidroloģiskie modeļi, lai sniegtu kaut nelielu salīdzinošo priekšstatu ar BogSim purva hidroloģisko sistēmu imitējošo modeli. Divas biežāk izmantotās vērtības, kas tiek izmantotas, lai parādītu hidroloģisko modeļu precizitāti, ir RMSE un  $R^2$ . Vairumā gadījumu vienā zinātniskajā publikācijā tiek izmantota vai nu viena, vai otra, bet ļoti reti abas, kas aprūstina hidroloģisko modeļu salīdzināšanu.

Vidējā kvadrātiskā kļūda RMSE ir prognozēšanas kļūdas standarta novirze. Prognozēšanas kļūda ir punktu attālums no regresijas līknes, bet RMSE norāda uz punktu izkliedi. Citiem vārdiem sakot, tas parāda, cik koncentrēti dati ir izvietojusies ap tendences līkni. RMSE tiek bieži izmantots klimatoloģijā, prognozēšanā un regresiju analīzē, lai verificētu rezultātus (Glen, 2021).

Daudzfaktoru korelācijas koeficienta kvadrāts  $R^2$  ilustrē, cik labi imitācija raksturo izkļiedētos mainīgos (Abdulkareem, Pradhan, Sulaiman, & Jamil, 2018). Imitētās vērtības, kas vienādas ar 1, norāda uz perfektu sadalījumu starp izmērītajām un modeļa imitētajām vērtībām, bet vērtības, kas vienādas ar 0, norāda, ka korelācija nepastāv (Abdulkareem, Pradhan, Sulaiman, & Jamil, 2018).

**6.tabula.** Hidroloģisko modeļu RMSE un  $R^2$  salīdzinājums

	BogSim	MODFLOW	SWAT	WEAP	MIKE SHE	HecRAS	QUAL2K
<b>RMSE (cm)</b>	0.28-0.71	20-81	1.83	-	50-1500	-	-
<b><math>R^2</math></b>	0.47-0.89	0.66-0.95	0.71	0.57-0.99	0.15-0.64	0.99	-

*Avots: autors*

Kā redzams hidroloģisko modeļu RMSE un  $R^2$  salīdzinājuma tabulā (skatīt 6.tabulu), BogSim modeļa gruntsūdens RMSE variācija dažādos Somā purva nogabalos svārstās no 0.28 līdz 0.71 cm, kamēr MODFLOW pazemes ūdens plūsmas modelim gadījuma studijā Birdžandas līdzenumā (Birjand Plain) Irānā tā sastāda 20-30 cm (Aghlmand & Abbasi, 2019). Gadījuma studijā Vadi Samail (Wadi Samail) sateces baseinā Omānā vidējā RMSE vērtība sastāda 81 cm, bet secinājumos minēts, ka kalibrētie parametri izrādījās uzticami, jo nodrošināja nelielu RMSE vērtību (AL-Hasami, Gunawardhana, Sana, & Baawain, 2020). Gadījuma studijā Al Buraimi

(Al Buraimi) Omānā RMSE vērtība ir vēl lielāka un sastāda 271 cm, bet tiek uzskatīta par samērīgu teritorijai, kurai raksturīga ievērojama ģeoloģiskā un hidroģeoloģiskā daudzveidība (Izady, Abdalla, Joodavi, & Chen, 2017). Ja tiek apskatīts  $R^2$  korelācijas koeficients, kas Al Buraimi gadījuma studijā ir 0.69 (Izady, Abdalla, Joodavi, & Chen, 2017), tad šim apgalvojumam var piekrist, jo, par spīti lielajai vērtībai izkliedei,  $R^2$  ir tuvāk 1 nekā 0. Apskatot citas gadījuma studijas, kurās noteiktas tikai  $R^2$  vērtības, tās ir robežās no 0.66 (Jovanovic, et al., 2017) līdz 0.95 (Jiang, Xie, & Wang, 2020), korelācijas koeficienti ir atšķirīgi dažādiem augsnes tipiem, precīzākus rezultātus sniedzot nogulumiežiem (de Graaf, Sutanudjaja, van Beek, & Bierkens, 2015). Augstākas  $R^2$  vērtības ir arī gadījumos, kad tiek modelēta lielāka teritorija, piemēram, visa zemeslode (de Graaf, Sutanudjaja, van Beek, & Bierkens, 2015) pretstatā reģionālām gadījuma studijām.

SWAT modelis praksē lielākoties tiek izmantots, lai imitētu upju noteci, kā Betva (Betwa) upes gadījuma studijā Indijā (Desai, Singh, Islam, & Sarangi, 2021). Vairumā gadījumu, kad jāveic pazemes ūdeņu aprēķini, SWAT modelis tiek apvienots ar MODFLOW, kā Akaki (Akaki) gadījuma studijā Etiopijā (Tolera & Chung, 2021). Viena no retajām gadījuma studijām, kad pazemes ūdeņu imitēšanai tiek izmantots, ir Hei (Hei) upes baseina gadījuma studija Ķīnā, ar visai nelielu RMSE (1.82 cm) un augstu  $R^2$  korelācijas koeficientu (0.71) (skatīt 6.tabulu) (Wei, Zhang, Liu, & Xu, 2018).

WEAP hidroģeoloģiskā modeļa precizitāti, aprēķinot dažādu faktoru ietekmi uz gruntsūdens līmeni, nav iespējams novērtēt, jo Scopus datubāzē promocijas darba izstrādes laikā nav atrodama neviena publikācija, kurā šis modelis būtu izmantots gruntsūdens līmeņa modelēšanai. Tas pārsvarā tiek izmantots, lai imitētu upju noteci, kur tiek sasniegti atšķirīgi rezultāti no  $R^2$  0.64 (Abdulmalik, et al., 2019) līdz pat 0.99 (skatīt 6.tabulu) (Adbi & Ayenew, 2021).

MIKE SHE modeļa gruntsūdens RMSE vērtības dažādās gadījuma studijās Indijā ģeoloģiski atšķirīgās vietās ir atšķirīgās robežās: 50 cm līdz 500 cm līdzenumā; 150 cm līdz 1000 cm pārejas zonā; 200 līdz 1500 cm kalnainā apvidū (skatīt 6.tabulu), sniegumu līdzenumā vērtējot kā apmierinošu (Loliyana & Patel, 2018). Gadījuma studijā Beimiaodži (Beimiaoji) upes baseinā Ķīnā MIKE SHE modelim tika izmantotas dažādas kalibrācijas pieejas, kas sniedza atšķirīgas  $R^2$  vērtības no 0.15 līdz 0.64 (Li, Liang, Li, Lei, & Zhou, 2019). Gadījuma studija parāda, ka MIKE SHE modelis krietni labākus rezultātus uzrāda imitējot upes ūdens plūsmu, kur  $R^2$  attiecīgi ir robežā no 0.71 līdz 0.8, nevis pazemes ūdeņus (Li, Liang, Li, Lei, & Zhou, 2019).

HecRAS, kā tas aprakstīts 2.nodaļā, nav plaši pielietots hidroloģiskais modelis, kas varētu būt par pamatu tam, ka Scopus datubāzē nav atrodamā neviena zinātniskā publikācija, kurā, lai noteiktu modeļa precizitāti, būtu veikts RMSE aprēķins. Darba tapšanas laikā vienīgā gadījuma studija, kuras ietvaros veikta  $R^2$  aprēķins, ir gadījuma studija, kas salīdzina HecRAS modeļa imitēto ūdens līmeni ar izmērīto ūdens līmeni vairākās Svatas (Swat) upes vietās Pakistānā (Bahadar, Shafique, Khen, Tabassum, & Ali, 2015). Vidējā atšķirība starp izmērīto un imitēto upes ūdens līmeni ir 36 cm, kas sniedz ļoti augstu  $R^2$  vērtību – 0.99 (Bahadar, Shafique, Khen, Tabassum, & Ali, 2015).

QUAL2K modeļa darbība pēc savas būtības nav salīdzināma ne ar BogSim, ne citiem biežāk izmantotajiem hidroloģiskajiem modeļiem, jo tas imitē nevis ūdens plūsmas, bet ūdens kvalitāti pateicoties ķīmisko un bioloģisko elementu izplatīšanās un reakciju vienādojumiem (Savant, Babitha, & Shepur, 2020). Lai ar to veiktu ūdens kvalitātes aprēķinus, tas parasti tiek apvienots ar kādu citu no hidroloģiskajiem modeļiem kā WEAP (Stockholm Environmental Institute, 2021) vai SWAT (Bui, et al., 2019).

Lai arī, salīdzinot ar citiem hidroloģiskajiem modeļiem, BogSim uzrāda vismazāko RMSE vērtību (nesasniedzot pa 1 cm), kas norāda uz ļoti ciešu imitēto gruntsūdens līmeņa datu koncentrāciju ap tendences līkni, tajā pašā laikā MODFLOW ar ievērojami lielāku RMSE vērtību (20 cm) uzrāda krietni augstāku  $R^2$ , sasniedzot 0.95, kas statistiski ir ļoti tuvu norisēm dabā. Ņemot vērā, ka esošie hidroloģiskie modeļi ir pārbaudīti upju sateces baseinos, kur (salīdzinot ar purvu, kas ūdeni saņem tikai nokrišņu veidā) cauri plūst milzīgas ūdens masas, tas sasaucas ar 3.3.nodaļā aprakstīto BogSim purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa darbības pārbaudi, kas atklāj, ka  $R^2$  vērtības ir lielākas purva nogabalos, kuros veiktas intensīvākas purva atjaunošanas darbības, veicinot krasākas gruntsūdens līmeņa svārstības lielākā amplitūdā.

### 3.5. Nodaļas secinājumi

Autoram, vēl maģistratūras studiju laikā, veicot esošo hidroloģisko modeļu izpēti un salīdzināšanu, *Stella* vidē tika izveidota un darbināta GSDW modeļa replika, kas ļāva konstatēt, ka tā imitētā gruntsūdens līmeņa līknes nobīde no izmērītās ir būtiska un tas nav piemērots purva hidroloģiskā režīma imitēšanai. Tika turpināta matemātisko vienādojumu un izteiksmju izpēte, lai meklētu pieejas, kas purva ekosistēmai raksturīgos procesus spētu attēlot precīzāk, kā rezultātā, pielāgojot un izveidojot jaunus matemātiskos vienādojumus un loģiskās izteiksmes, autors izstrādājis jaunu purva hidroloģisko sistēmu imitējošo modeli BogSim un tā izmantošanas metodoloģiju.

Autora izstrādātā BogSim purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa validācija attiecībā uz gruntsūdens līknes pagriezienu punktiem norāda, ka tā matemātiskie vienādojumi un loģiskās izteiksmes darbojas pareizi, tomēr jāatzīmē, ka vidējā nobīde starp izmērīto un imitēto gruntsūdens līkni ir zemāka nogabalos ar mazāku un lēzenāku gruntsūdens līmeņa svārstību amplitūdu. Vispārinot var teikt, ka šis modelis precīzāk imitē nelielas iejaukšanās absolūto ietekmi uz ekosistēmu. Tas kontrastē ar šāda veida imitējošo modeļu nepieciešamību tieši lielu (plānotu) iejaukšanos ekosistēmā gadījumos, lai izvairītos no potenciāli lielas nevēlamas ietekmes uz vidi un neefektīvas līdzekļu izlietošanas. BogSim purva hidroloģisko sistēmu imitējošo modeli salīdzinot ar esošajiem hidroloģiskajiem modeļiem, novērojams, ka tam ir viszemākās RMSE vērtības (skatīt 6.tabulu), kas ir viens no biežāk izmantotajiem modeļu rezultātu verifikācijas indikatoriem, norādot uz ļoti tuvu gruntsūdens līmeņa datu punktu izkliedi ap tendences līkni, tātad – augstu modeļa imitāciju precizitāti.

Pozitīvu purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa darbības relatīvā novērtējumu sniedz arī augstās korelācijas koeficienta un  $R^2$  vērtības, kas četros testa nogabalos ir tuvāk 1, nevis 0. Vienlaikus 3.testa nogabala darbības novērtēšanas kritēriji sniedz pilnīgi pretēju novērtējumu – zemākā  $R^2$  vērtība (0.47) pasaka, ka modelis reālo sistēmu replicē apmierinoši, kamēr RMSE vērtība (0.28 cm) ir viszemākā un norāda, ka šajā testa nogabalā modelis gruntsūdens līmeni imitē vistuvāk izmērītajam, par ko var pārliecināties apskatot 20.attēlu.  $R^2$  vērtības sistēmu dinamikas modelim ir augstākas tieši parauglaukumos, kuros veikti apjomīgāki ekosistēmas atjaunošanas darbi, kas ir par pamatu ievērojamākai gruntsūdens līmeņa svārstību amplitūdai. Šādas izteiktas korelācijas norāda uz to, ka BogSim purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis veiksmīgi atdarina kūdras slāņa piesātinājuma straujo paaugstināšanos pēc meliorācijas grāvju aizpildīšanas un mežaudzes retināšanas. Purva ekosistēma pati par sevi ir “lēna” ekosistēma, kas ūdeni saņem tikai nokrišņu veidā un to akumulē augsnē, samazinot noteces ekstrēmās vērtības upēs (Jansons, 2010), dabīgos purvos lēni aug arī priedes un kūdras slānis pieaug tikai par vidēji 2 mm gadā (Latvijas Kūdras asociācija, 2021). BogSim purva hidroloģisko sistēmu imitējošo modeli salīdzinot ar esošajiem hidroloģiskajiem modeļiem, var novērot, ka, lai arī to RMSE vērtības vairumā gadījumu ir daudz lielākas kā autora izstrādātajam modelim un reizumis pārsniedz pat vairākus metrus, tie bieži uzrāda augstākas  $R^2$  vērtības, jo tiek izmantoti gadījuma studijās vietās ar daudz straujākiem un amplitūdas ziņā ievērojamākiem hidroloģiskajiem procesiem. Var teikt, ka purvs ir pats savs ķīlnieks, kas, dēļ sava mērenuma, imitējošajam modelim neļauj uzrādīt augstāku  $R^2$  vērtību. Autora piedāvātās metodes priekšrocība ir iespēja purva hidroloģisko sistēmu imitējošo modeli darbināt izmantojot dažādas sistēmu dinamikas programmatūras. Metode tika testēta un vienlīdz labi darbojās gan



*Stella Architect*, gan *Insight Maker* vidē. Galvenās modelēšanas problēmas ir saistītas ar sistēmu dinamikas modelēšanas ietvara telpiskajiem ierobežojumiem. Piemēram, ģeogrāfiski zemākos nogabalos, kas ūdeni saņem ne tikai no nokrišņiem, bet arī no blakus esošajiem nogabaliem (kā virszemes noteci un kanālu plūsmu), purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa vienādojumi, neatrisinot papildus ūdens piegādi, nespēja attēlot gruntsūdens līknes svārstības tuvu mērījumiem (RMSE pārsniedza 1 cm). Šo problēmu iespējams atrisināt, pārbaudīto matemātisko formulējumu pārnesot uz citu imitējošās modelēšanas vidi. Daudzsološa modelēšanas vide būtu tāda, kurā varētu definēt visu sateces baseinu, pamatojoties uz ĢIS digitālo reljefa modeli (Miller, et al., 2002), tātad - varētu izmantot vai nu uz aģentiem balstītu modelēšanu (Huber, Bahro, Leitinger, Tappeiner, & Strasser, 2019), vai arī izstrādāt jaunu modelēšanas rīku *Python* programmēšanas valodā (Python Software Foundation, 2021), (Markert, 2020). Uz aģentiem balstītos modeļos “aģenti” ir komponentes, kas spēj pārvietoties un reaģēt uz lokālo vidi (Huber, Bahro, Leitinger, Tappeiner, & Strasser, 2019). Šī modeļa gadījumā aģenti izsekotu ūdens ceļam, kas noteiktā brīdī virzās cauri ekosistēmai. Līdzīgi kā sistēmu dinamikas modelī, “aģenti” pieņemtu lēmumu, pa kuru ceļu iet. *Python* ir ļoti populāra programmēšanas valoda zinātniskajai skaitļošanai, jo piekļuve ideju tulkošanai kodā un faktisko datu ģenerēšanai ir neliela (Markert, 2020), kas ļauj imitējošos modeļus, kas izstrādāti un pārbaudīti citās modelēšanas vidēs, ērti uz to pārnest.

Lielāks ģeogrāfiskais areāls ļautu purva hidroloģisko sistēmu imitējošo modeli piemērot reāliem purvu atjaunošanas projektiem, savukārt uz aģentiem balstīta modelēšanas pieeja varētu pavērt iespējas plašākam pielietojumam. Piemēram, kūdras parametru nomaiņa ar minerālaugsni (papildinot ar pāris citiem labojumiem) varētu pavērt iespējas modeli izmantot precīzajā lauksaimniecībā. Risināmās praktiskās problēmas varētu būt minerālmēsļu absorbcija caur saknēm un noārdīšanās augsnē atkarībā no iesētās/iestādītās augu sugas, tādējādi sniedzot precīzāku priekšstatu par optimālu mēslošanas līdzekļu izmantošanu.

Sistēmu dinamikas pieeja palīdz imitēt procesus konkrētā punktā, palīdz saprast cēloņsakarības, kas padara to par piemērotu līdzekli, lai pārliecinātos, ka sistēma ietver visas komponentes pirms liela mēroga procesu modelēšanas citā vidē. Vienlaikus šī pieeja, kas ļauj izpētīt katru no sistēmas sastāvdaļām individuāli un visas kopā, padara to par lielisku imitāciju mācību metodi.



#### 4. SENSORU SISTĒMAS IZVEIDE IEEJAS DATU IEGŪŠANAI IMITĒJOŠO MODEĻU EKOSISTĒMU PĀRVALDĪŠANAS VAJADZĪBĀM

Piekļuve reāllaika laikstākļu datiem palīdz uzraudzīt potenciāli bīstamu notikumu biežumu un intensitāti, piemēram, sausumu, spēcīgas lietusgāzes, plūdus un ārkārtējas gaisa temperatūras (Idbella, et al., 2020). Šie dati noder arī imitējošo modeļu darbināšanai, kas ļauj izprast cēloņsakarības, lai mazinātu cilvēka darbības ietekmi uz vidi.

Kā piemēru darba autors var minēt, ka pēc meliorācijas grāvju izbūves, tādējādi mainot dabisko hidroloģisko režīmu, daudzi purvi Latvijā un Igaunijā ir degradēti, atstājot negatīvu ietekmi arī uz blakus esošo neskarto un mazskarto purvu un citu mitrāju hidroloģisko režīmu. Nosusināšanas ietekmē purvos un to piegulošās mežu teritorijās bieži palielinās mežaudžu biežība, galvenokārt ar priedēm, kuru skuju masa ierobežo nokrišņu nonākšanu līdz zemei, jo tas no koku vainagiem iztvaiko atpakaļ atmosfēra, kā arī koki veicina ūdens uzsūkšanu no augsnes caur saknēm, kas vēl vairāk pastiprina nosusināšanas efektu. Lai atjaunotu degradētu purvu, pirmkārt, nepieciešams aizbērt meliorācijas grāvjus, bet, ja purvs ir apaudzis ar kokiem, tad ar šo darbību var nepietikt un nepieciešams nocirst daļu koku. Eksperimenti, lai noteiktu optimālu iejaukšanās apjomu ekosistēmā (mežaudzes retināšanas intensitāti, lai sasniegtu vēlamu rezultātu, nocērtot pēc iespējas mazāk koku) un palielinātu augsnes piesātinātību ar ūdeni, kas veicinātu purva un purvaino mežu biotopu atjaunošanos, reālajā dzīvē aizņemt vairākus gadus. Hidroloģiju imitējošie modeļi palīdz risināt šo problēmu, jo ļauj prognozēt mežaudzes retināšanas ietekmi uz ekosistēmu bez dārgiem un laikietilpīgiem eksperimentiem reālajā dzīvē (Java, 2018). Protams, hidroloģiju imitējošos modeļus pielāgojot var izmantot dažādās ekosistēmās, lai risinātu arī citas, atšķirīgas problēmas.

Paredzams, ka autora piedāvātais IoT sensoru sistēma darbosies līdzīgi kā automatiskā meteoroloģiskā stacija, taču tās galvenā priekšrocība būs tā, ka tai nebūs nepieciešams pieslēgums elektriskajam un interneta tīklam, tas būs kompakts un salīdzinoši lēts.

Latvijā ir pieejami vairāki IoT tīkli. TET uzsver, ka tas bija pirmais uzņēmums, kas Latvijā nodrošināja IoT tīklu (tet, 2020), no 2017.gada 1.jūlija piedāvājot LoRa tīkla tehnoloģiju (kursors.lv, 2017). Vēl viens uzņēmums, kas Latvijā piedāvā IoT tīkla risinājumus, izmantojot Sigfox tīkla tehnoloģiju, ir 0G Baltics (0G Baltics, 2020). Viens no LoRa un Sigfox tehnoloģiju trūkumiem IoT risinājumu atbalstam Latvijā ir to pārklājums, kas aptver tikai lielās pilsētas (tet, 2020) (Sigfox, 2020), atstājot lauku apvidus neskartus. Atšķirībā no LoRa un Sigfox, NB-IoT

(šaurjoslas lietu interneta tehnoloģija), kas precizēta 3GPP 13.laidienā 2016.gada jūnijā, var pastāvēt līdzās GSM (2G globālo mobilo sakaru sistēma) un LTE (Long Time Evolution jeb 4G) licencētām frekvenču joslām (Mekki, Bajic, Chaxel, & Meyer, 2018), tādējādi ļaujot izmantot esošo mobilo tīklu infrastruktūru, kuras pārklājums sedz visu Latvijas teritoriju. LoRa un Sigfox izmanto nelicencētas informācijas sistēmu vadības joslas (Mekki, Bajic, Chaxel, & Meyer, 2018), bet, tā kā NB-IoT izmanto licencētas frekvenču joslas (tieši tāpat kā 3G un 4G), traucējumi to būtiski neietekmē (Vodafone Group, 2017) un tas ir pasargāts no ārējas iejaukšanās. Ņemot vērā iepriekš minēto un to, ka NB-IoT tīkls nodrošina 1 MB datu apjoma pārraidi mēnesī ar 64 Kb/s datu pārraides ātrumu visā Latvijas teritorijā, izmantojot drošu datu pārraides savienojumu (Latvijas Mobilais Telefons, 2020), var secināt, ka piemērotākais IoT tīkls Latvijas apstākļos ir NB-IoT, ko kopš 2019.gada janvāra nodrošina Latvijas Mobilais Telefons (LMT) (LMT Innovations, 2020). Kā alternatīva NB-IoT tīklam, kas paredzēta vairāk statistiskām iekārtām, Latvijā kopš 2020.gada jūlija ir ieviesta LTE-M tehnoloģija, kas vairāk domāta iekārtām un sensoriem kustībā (Delfi, 2020). LTE-M ir 3GPP standartā definēta tehnoloģija, kas pielietojama gadījumos, kad nepieciešams lielāks joslas platums nekā NB-IoT (Vodafone Group, 2017).

#### **4.1. Šaurjoslas lietu interneta sensoru piemērotība nākotnes imitējošajiem modeļiem**

Kāds noteikti apgalvos, ka nav nepieciešams uzstādīt jaunus sensorus, lai apkopotu un uzkrātu meteoroloģiskos datus, jo ir izstrādāti dažādi klimata datu pakalpojumi, piemēram, uz Copernicus satelītu datu bāzes pamata. Eiropas Vidējā darbības rādiusa laika prognožu centra (ECMWF) atmosfēras datu kopu (ERA5), kas Copernicus klimata pārmaiņu dienesta (C3S) vārdā tika izveidota Klimata datu krātuvē (CDS) (ECMWF, 2020). Šī vēsturisko datu kopa varētu šķīst piemērota hidroloģiskajai modelēšanai, bet, ja runājam par modelēšanu saistībā ar kādu konkrētu punktu, piemēram, pāris kvadrātmetru lielu purvu Latvijā, tās izšķirtspēja 0.5 x 0.5 ģeogrāfisko grādu režģī (ECMWF, 2020) nav pietiekama. Lielais kritums avio lidojumu apjomā koronavīrusa SARS-CoV-2 pandēmijas dēļ ir radījis problēmas laika apstākļu prognozēšanai (Guardian News & Media Limited, 2020). Autora piedāvātā NB-IoT sensoru sistēma, kas savienota ar datu mākonī, varētu būt noderīga ne tikai apkopojot datus, kas nepieciešami hidroloģiju imitējošo modeļu darbībai, bet arī līdzīgā krīzes situācijā, sniedzot datus, kas vajadzīgi laika apstākļu prognozēšanai.

Sensoriem, kas vāc meteoroloģiskos datus hidroloģisko sistēmu imitējošajai modelēšanai, bieži vien ir jāatrodas attālinātās vietās, lai tie varētu noteikt jebkādas izmaiņas vidē un paziņot

lietotājam par jebkādam izmaiņām, kas notikušas. Šīs ikdienas izmaiņas ir jāidentificē un jāaugšupielādē mākonserverī, lai lietotājs to varētu izmantot periodisku sensoru datu iegūšanai.

IoT lielu daļu no saviem panākumiem ir parādā plaši izplatītajiem interneta komunikāciju tīkliem (Idbella, et al., 2020). Vadošie mobilo sakaru operatori, globālie piegādātāji un izstrādātāji ievieš šaurjoslas frekvenču lietu interneta tīklu kā savu ilgtermiņa 5G IoT stratēģiju neatņemamu sastāvdaļu (GSMA, 2018). NB-IoT ir inovatīva sistēma, kas pilnībā paredzēta IoT. Šis tīkls ir publisks un izmanto LTE šūnas, tās pašas, kuras pirms vairākiem gadiem tika izmantotas GSM mobilajiem tālruņiem (Idbella, et al., 2020). IoT sensori ir lēti, izmanto mazu datu pārraides apjomu, tiem ir ilgs akumulatoru darbības laiks un tie bieži darbojas attālās un grūti sasniedzamās vietās. Mobilais IoT šobrīd nodrošina plašu savienojamību un nākotnē to turpinās darīt 5G (GSMA, 2018). Ar IoT datiem var veidot jaunus uzņēmējdarbības modeļus, piedāvāt jaunus pakalpojumus vai paaugstināt efektivitāti (Deutsche Telekom AG, 2019). Šajā promocijas darbā aprakstītā purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa kontekstā, IoT pielietošana paaugstinātu efektivitāti, jo, salīdzinot ar standarta meteoroloģisko staciju, IoT sensoru sistēma izmantotu krietni mazāku pārraidīto datu un patērētās elektroenerģijas apjomu.

NB-IoT tīkla standarts maina IoT risinājumu nodrošinātāju spēles noteikumus, jo tas paplašina tehniskās iespējas padarīt masveida IoT izvietošanu ekonomiski iespējamu (Deutsche Telekom AG, 2019). NB-IoT ir atvērtais standarts, kura pamatā ir LTE (4G). Tam ir iekārtu ražotāju atbalsts, un tās pamatā ir pazīstamas tehnoloģijas, kas ļauj vieglāk integrēties esošajā infrastruktūrā un procesos (Vodafone Group, 2017).

NB-IoT sakaru protokols ir piemērots gruntsūdeņu monitoringam, jo nodrošina daudz labāku pieejamību vietās, ko grūti sasniegt ar radio signālu. NB-IoT iekārtas spēj tikt galā ar mazāku signāla stiprumu, salīdzinot ar GPRS iekārtām (Deutsche Telekom AG, 2019). Tā kā NB-IoT izmanto licencētas spektra joslas (gluži kā 3G un 4G), traucējumi to maz ietekmē (Vodafone Group, 2017).

Ir vairāki veidi, kā samazināt enerģijas patēriņu un sasniegt ilgu baterijas kalpošanas laiku. Visvienkāršākais veids – ierīci var uzturēt gaidīšanas režīmā vai dziļā miega (hibernācijas) režīmā, lai tā netērē enerģiju tērēšanai tīklā starp saziņas sesijām. Enerģijas pārvaldība būtībā ir līdzsvars starp ziņojumu biežumu, ierīces miega cikliem un lietotāja vajadzībām (Vodafone Group, 2017).

Tā kā IoT sensora akumulators var kalpot līdz 10 gadiem (pieņemot, ka tas ir divu AA bateriju ekvivalents) (Deutsche Telekom AG, 2019), rodas jautājums, vai, ņemot vērā, ka tehnoloģijas strauji mainās, ir vērts ieguldīt šajā tehnoloģijā. NB-IoT ir trešās paaudzes partnerības projekts

(3GPP), kas ir cieši saistīts ar LTE tehnoloģiju, tāpēc to var izvietot gandrīz visās LTE bāzes stacijās līdzās LTE plūsmai, izmantojot vienkāršu programmatūras jauninājumu radio piekļuves tīklam (RAN), kas sniedz pārlicību, ka tā ir zema riska ilgtermiņa tehnoloģija (Vodafone Group, 2017).

NB-IoT fiziskajā līmenī tiek atbalstīta tikai vienas antenas un zemas kārtas modulācijas, un vidējās piekļuves kontroles slāņos resursu plānošanai tiek piešķirts tikai viens fizisko resursu bloks (Mwakwate, et al., 2019).

## **4.2. NB-IoT sensoru sistēmas uzbūve**

IoT tehnoloģiju galvenais mērķis ir uztvert, savienot, apkopot, analizēt un interpretēt datus (Fogwing, 2021). Meteoroloģiskie sensoru tīkli ir centrēti uz datiem un apstrādā sensoru savāktos meteoroloģiskos datus (Yang, et al., 2019). Lai iegūtu specifiski purva hidroloģisko sistēmu imitējošajam modelim nepieciešamos ieejas datus, sensoru sistēmai nepieciešams iegūt gruntsūdens līmeņa mērījums (mm) un tādos meteoroloģiskos datus kā nokrišņi (lietus, sniegs) (mm), vēja ātrums (m/s), saules radiācijas intensitāte ( $W/m^2$ ), gaisa temperatūra ( $^{\circ}C$ ), relatīvais gaisa mitrums (%). Ja modelēšana tiktu veikta ģeogrāfiski lielākā teritorijā nekā vidējais Latvijas purvs un tajā būtu izvietotas vairākas šādas sensoru sistēmas veidojot sensoru tīklu, tad svarīgi būtu ievākt arī informāciju par vēja virzienu. Tā kā promocijas darbā aprakstītais purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis tiek darbināts ar vēsturiskiem datiem un tam nav nepieciešami reālā laika ieejas dati, to iegūšanai piemērotas NB-IoT tehnoloģijas, kas datus nolasa un nosūta pēc nepieciešamības, nevis nepārtraukti (Java, Sigajevs, Binde, & Kepka, 2021).

### **4.2.1. Sensoru sistēmas komponentes**

Daudzus parametrus, piemēram, vidējo diennakts gaisa temperatūru, šobrīd ir viegli aprēķināt, jo iespējams automātiski veikt mērījumus ar mazu laika intervālu (reizi 0.25 sekundēs jeb četras reizes sekundē) (Met Office College, 2020), tos uzglabāt digitālos datu nesējos, un izdalīt mērījumu summu ar mērījumu skaitu. Šī metode neatbilst IoT sensoru būtībai, kā viena no galvenajām priekšrocībām ir iespēja tos, savienojumā ar bateriju, novietot attālās un/vai grūti sasniedzamās vietās, kur to uzdevums ir veikt mērījumus un nosūtīt datus veidā, kas patērē pēc iespējas mazāk enerģijas, lai pagarinātu baterijas kalpošanas laiku. Publikācijās, kurās tiek aprakstītas IoT meteoroloģisko staciju gadījuma studijas, starp mērījumiem bieži tiek lietots 3 stundu intervāls (Liu, et al., 2018), vai, pamatojoties uz pareizu mērījumu uzskaiti – 10 minūšu intervāls (Awandallah, Moure, & Torres-González, 2019). Šīs nodaļas turpinājumā autors

apraksta IoT sensoru izvēli un to provizorisko darbības principu, kas ļautu atrast balansu starp mērījumu biežumu, enerģijas patēriņu un pārsūtīto datu apjomu.

### **Radio modems un antena**

Lai visus iepriekš aprakstītos sensorus varētu integrēt vienā sistēmā, vadīt un pārsūtīt datus, ir nepieciešams radio modems un antena. Tā kā tiek izmantota atvērtā koda aparatūra un programmatūra, darba autors kā piemērotāko radio modema un antenas risinājumam ir izvēlējies Arduino ekosistēmu. Piemērota ir, piemēram, IoT Arduino formfactor standartam atbilstošā izstrādātāju plate SODAQ SARA AFF R412M. Tai ir jaudīgs 32 bitu mikrokontrolieris, 256 KB zibatmiņa, divas ligzdas, lai ērti savienotu ar jebkuru sensoru, divi JST savienotāji akumulatora un saules bateriju paneļa pievienošanai, uzlādes shēma, akcelerometrs, GPS, NB-IoT un antena. Izstrādātāju platei pievienojot bateriju un SIM karti, tā kļūst par modemu, kas spēj darboties autonomi un tā darbībā nav nepieciešams iejaukties manuāli. Tā kā NB-IoT atbalsta divvirzienu sakarus, kur lejupielādei tiek izmantota ortogonālo frekvenču dalīšanas daudzkārtējā piekļuve (OFDMA), un augšupielādei tiek izmantota viena nesēja frekvences dalīšanas daudzkārtējā piekļuve (SC-FDMA) (Chaudhari, Zennaro, & Borkar, 2020), atjauninājumus var veikt attālināti, pieslēdzoties no darbstacijas (Java, Sigajevs, Binde, & Kepka, 2021).

### **Barošanas elements**

Mobilais IoT radio modems parasti rada īsus strāvas uzplūdus, ko sauc arī par impulsa strāvu (Texas Instruments Inc., 2020), kas sasniedz simtiem miliamperu dažu desmitu milisekunžu laikā (Tektronix, 2015). Vispirms, barošanas elementam jābūt pārbaudītam, lai tas šādu krasu strāvas palielinājumu varētu nodrošināt arī ekstrēmu temperatūru apstākļos (ļoti auksta vai karsta vide). No otras puses, ir jāņem vērā barošanas elementa pašizlādēšanās un jaudas zudums gaidīšanas laikā. Lai aprēķinātu barošanas elementa kalpošanas laiku, jāņem vērā vairāki citi faktori, piemēram, izlādes spriegums, akumulatora efektivitāte, noplūdes strāva, temperatūras ietekme utt (Java, Sigajevs, Binde, & Kepka, 2021).

Lai sasniegtu ļoti ilgu barošanas elementa kalpošanas laiku un samazinātu IoT sensoru sistēmas apkopes ciklus, ieteicams izmantot nelādējamās litija baterijas, piemēram, SAFT LS 26500 3.6 V Primary lithium-thionyl chloride (Li-SOCI<sub>2</sub>) (Java, Sigajevs, Binde, & Kepka, 2021).

### **Gruntsūdens līmenis**

Gruntsūdens līmeņa mērījumus var veikt ar divu veidu IoT sensoriem – ūdens spiediena sensoru, piemēram, SEN0257 DFROBOT vai lāzera distances sensoru, piemēram, OKY3240

OKYSTAR. Abos gadījumos nepieciešams veikt urbumus, kuros ievietot čaulas, lai izveidotu kontrolakas. Spiediena sensora gadījumā, tas jānogremdē kontrolakas dibenā un gruntsūdens līmenis jāaprēķina pēc ūdens spiediena, kas mainās atkarībā no ūdens masas virs tā. Šīs metodes, kas ūdens līmeni nosaka pēc spiediena, traucējošais faktors ir mainīgais atmosfēras spiediens, jo tas izdara papildus spiedienu uz ūdens virsmu un, lai iegūtu precīzus mērījumus, rezultāti jākorģē. Lai iegūtu informāciju par atmosfēras spiedienu, nepieciešams barometrs, piemēram, DF-SEN0371, kas nozīmē, ka sensoru sistēma jāpapildina ar vēl vienu sensoru jeb enerģijas patērētāju, kā arī nepieciešams korekcijas vienādojums. Vienkāršāks gruntsūdens līmeņa mērīšanas veids ir attāluma noteikšana no zemes virskārtas līdz gruntsūdenim izmantojot lāzera sensoru. Lāzera sensoru nepieciešams stiprināt pie kontrolakas vāka, bet, lai nodrošinātu atstarojošu virsmu, ūdenī jānovieto peldošs pludiņš attāluma līdz ūdens virsmai noteikšanai (Java, Sigajevs, Binde, & Kepka, 2021).

Akrotelma (purva augsnes augšējais slānis līdz aptuveni 50 cm dziļumam) hidrauliskā vadītspēja ir 330 cm/d, bet zemāk esošajā katotelmā tā strauji sarūk no 9 cm/d 1.2m dziļumā līdz 0.16 cm/d dziļumā kas vienāds vai lielāks par 2 m (Custers & Graafstal, 2005). Ņemot vērā akrotelma hidraulisko vadītspēju un meliorācijas grāvju klātesamību degradētos purvos, gruntsūdens svārstības vienas diennakts laikā var sasniegt vairākus desmitus centimetru (testa nogabala R2v0\_b lielākās gruntsūdens mērījumu izmaiņas starp divu sekojošu dienu mērījumiem sasniedz 24 cm pieaugumu un 19 cm samazinājumu), tāpēc darba autors rekomendē gruntsūdens mērījumus veikt ar tādu pašu intervālu, kā pārējos mērījumus (izņemot nokrišņu apjomu), lai iegūtu vidējo diennakts vērtību, jo arī purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis izejas datus ģenerē kā diennakts vērtību (Java, Sigajevs, Binde, & Kepka, 2021).

### **Vidējā gaisa temperatūra un relatīvais gaisa mitrums**

Metode, kurai nepieciešams vismazāk gaisa temperatūras mērījumu, lai aprēķinātu vidējo dienas vērtību, ir Manheimera stundu metode (Mannheimer Stunden), kuru var izteikt ar Kemtzišena (Kämtz'schen) vienādojumu:

$$TM = (T07 + T14 + 2 * T21)/4 \quad (46)$$

kur TM ir vidējā diennakts gaisa temperatūra, T07, T14 un T21 apzīmē gaisa temperatūru, attiecīgi - pulksten 7.00, 14.00 un 21.00. Lai iegūtu pēc iespējas precīzāku vidējo gaisa temperatūru, temperatūrai pulksten 21.00 tiek piešķirts dubults svars (Behrendt & Zimmermann, 2008). Salīdzinot gaisa temperatūras vidējās diennakts vērtības, kas aprēķinātas no datiem, ar rādījumu nolasīšanas intervālu 4 reizes sekundē, un Manheimera stundas metodi,

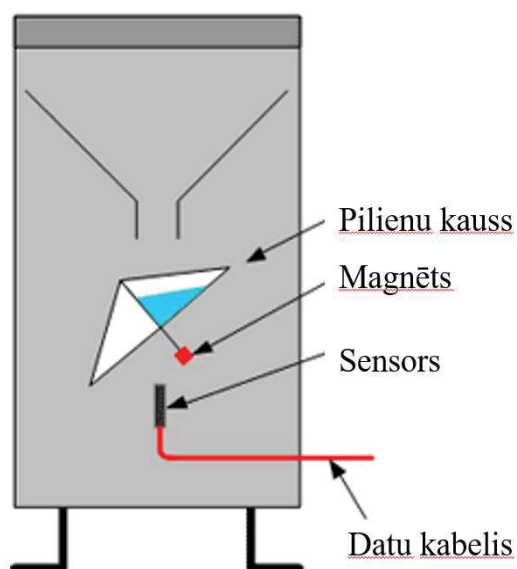


izmantojot tikai trīs rādījumus dienā, tika novērota ļoti zema  $R^2$  variācija proporcija 0,99 ar RMSE 0,06 (Java, Sigajevs, Binde, & Kepka, 2021).

Tā kā relatīvais gaisa mitrums ir cieši saistīts ar gaisa temperatūru, jo tas ir ūdens tvaika daudzums gaisā, izteikts procentos no maksimālā tvaika daudzuma, ko gaiss varētu noturēt konkrētajā temperatūrā (Yahia, 2019), lai pienācīgi veiktu gaisa temperatūras un relatīvā gaisa mitruma mērījumus, atbilstoši ir izmantot kombinēto sensoru, piemēram, Grove SHT31 ar  $\pm 0.3$  °C precizitāti temperatūrai un  $\pm 2\%$  relatīvajam gaisa mitrumam (Seeed Technology Co.,Ltd., 2020).

## Nokrišņi

Meteoroloģiskajās stacijās tiek izmantoti speciāli nokrišņu mērītāji, kas ar piltuves palīdzību uztver nokrišņus, tos nogādā speciālos kausiņos, kuros tie tiek svērti, dati nolasīti un nosūtīti uz serveri (skatīt 24.attēlu). Šāda iekārta nav piemērota IoT sensoru sistēmai, jo tai periodā ar negatīvu gaisa temperatūru nepieciešams pastāvīga elektrības padeve un elektriskā apsilde. Tā kā piltuves veida lietus mērītājs nespēj noteikt nokrišņu veidu, tikai nokrišņu ūdens apjomu milimetros, nosakot nokrišņu veidu būtu jāpaļaujas vai nu uz gaisa temperatūru (pozitīva, vai negatīva), vai jāpievieno papildus mikroviļņu radars (Java, Sigajevs, Binde, & Kepka, 2021).



24.attēls. Nokrišņu mērītājs

Avots: adaptēts no Furukawa Electric (Furukawa Electric Co., LTD, 2011)

Tirgū ir pieejami lāzera nokrišņu sensori, piemēram, OTT Parsel<sup>2</sup> LUFFT. Šim sensoram lāzera tehnoloģija sniedz iespēju noteikt nokrišņu veidu, intensitāti un lietus pilienu izmēru (Lufft, 2020).



Kā izsecināja pētījuma autors, piemērotākais veids, kā izveidot alternatīvu IoT nokrišņu mērītāju, ir nokrišņu sensoru, piemēram, OKY3436 OKYSTAR, kas ģenerē signālu 0 vai 1, izmantot kā slēdzi, kas, atkarībā no nokrišņu esamības vai neesamības, ieslēgtu vai izslēgtu Doplera efekta mikroviļņu radaru BGT24LTR11, kas veiktu mērījumus līdz brīdim, kad no nokrišņu sensora tiktu saņemts signāls ar vērtību "0". Lai vēl vairāk samazinātu baterijas enerģijas patēriņu, mākoņa tehnoloģija ļauj sistēmai pieslēgt kādu no tiešsaistes laika prognozēm, piemēram, nacionālo VSIA "Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centra" [meteo.lv/laiks](http://meteo.lv/laiks), kas brīžos, kad netiek prognozēti nokrišņi, nokrišņu sensoru atslēdz pavisam, bet, kad tiek prognozēti nokrišņi, to ieslēdz gaidīšanas režīmā (Java, Sigajevs, Binde, & Kepka, 2021).

### **Vēja ātrums**

Vēja ātruma mērījumu veikšanai nepieciešams izvēlēties IoT anemometru, piemēram, SEN0170 DFROBOT, kas patērē maz enerģijas un darbības laikā ģenerē izejas signālu ar voltāžu no 0 līdz 5 V. Vēja ātrums tiek noteikts atbilstoši voltāža jaudas līknei no 0 līdz 30 m/s (DFROBOT, 2020). Ņemot vērā, ka vējš mēdz būt brāzmains, ir noteikts, ka vēja ātrums ir divu minūšu mērījumu vidējā vērtība (National Weather Service, 2020). Tas nozīmē, ka, lai iegūtu dienas vēja ātrumu, mērījumi jāveic reizi stundā divu minūšu periodā ar 0.25 sekunžu intervālu, katrai stundai jāaprēķina vidējā vērtība un diennakts vidējās vērtības jāizdala ar stundu skaitu (Java, Sigajevs, Binde, & Kepka, 2021).

### **Saules radiācija**

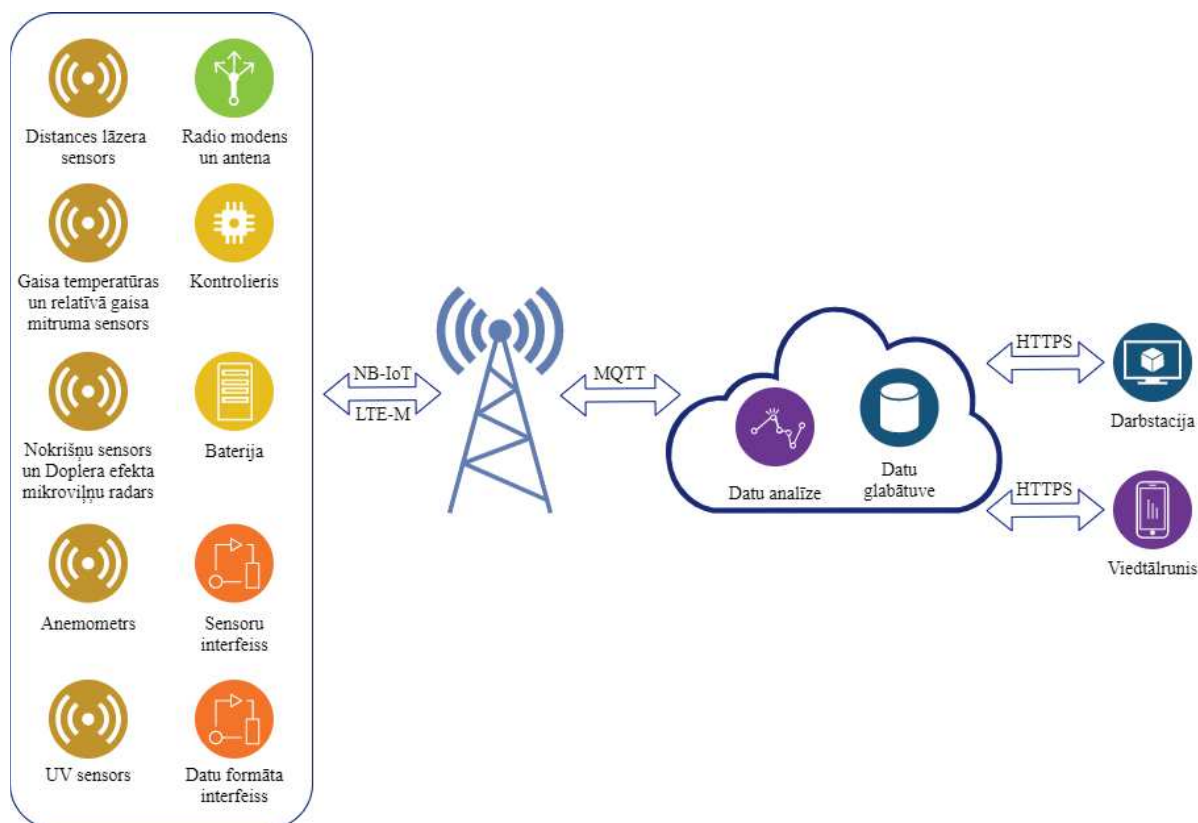
Promocijas darbā aprakstītais purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis saules radiāciju izmanto vienādojumos, kas aprēķina mežaudzes transpirāciju un sniega kušanu. Transpirāciju, neskaitot saules radiāciju, ietekmē arī citi meteoroloģiskie apstākļi kā: gaisa temperatūra, vēja ātrums un atmosfēras mitruma deficīts (piesātinātā ūdens tvaika spiediena un faktiskā ūdens tvaika spiediena starpība). Sniega kušanu, neskaitot saules radiāciju, ietekmē gaisa temperatūra.

Saules radiācijas mērinstrumenti ir dārgi. No Latvijas teritorijā izvietotās 31 automātiskās novērojumu stacijas, tikai 7 ir uzstādīti summārās radiācijas mērinstrumenti (Valsts Vides ģeoloģijas un meteoroloģijas centrs, 2020), kas mēra kopējo saules radiāciju vatos uz vienu kvadrātmetru. Vairākos avotos ir minēts, ka aptuveni 6% no kopējās saules radiācijas, kas sasniedz Zemes virsmu, sastāda UV starojums (Gharehpetian & Mohammad Mousavi Agah, 2017), (Jacobsen & Dangles, 2017), tāpēc, ņemot vērā, ka saules radiācija nav vienīgais meteoroloģiskais apstāklis, kas ietekmē transpirāciju un sniega kušanu, darba autors ierosina saules radiācijas mērījumiem izmantot IoT UV sensoru, piemēram, OKY3258 OKYSTAR.

Lai samazinātu barošanas elementa elektroenerģijas patēriņu, darba autors piedāvā sensoru sistēmai pievienot gaismas sensoru, piemēram, SEN0043 DFROBOT, kas reizi stundā veiku gaismas intensitātes mērījumu. Īsi pēc saulrieta un pirms saullēkta gaismas intensitāte sastāda 10 lx (Schlyter, 2017), tāpēc šī tiek pieņemta kā atskaites vērtība, jo, to pārsniedzot, pie apvāršņa ir redzama saule, tātad no tās kopā ar gaismu Zemi sasniedz radiācija. Pārsniedzot 10 lx gaismas sensors dod pavēli UV sensoram veikt mērījumu. Mērījumus jāveic līdz gaismas intensitāte nokrītas līdz 10 lx un jāsaskaita kopā un jāpareizina ar koeficientu 16.7, lai iegūtu summārai radiācijai tuvu rezultātu (Java, Sigajevs, Binde, & Kepka, 2021).

#### 4.2.2. Sensoru sistēmas arhitektūra

NB-IoT arhitektūra (skatīt 25.attēlu) sastāv no 4.2.1.apakšnodaļā aprakstītajiem sensoriem, kontroliera, sensoru interfeisa, datu formāta interfeisa, barošanas elementa, radio modema un antenas, kas kopā veido sensoru sistēmu (Java, Sigajevs, Binde, & Kepka, 2021).



**25.attēls.** NB-IoT sensoru sistēmas purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa ieejas datu iegūšanai arhitektūra

*Avots: autors*

Sensori ir integrēti vienā sistēmā un novietoti izvēlētajā attālajā atrašanās vietā, un tie ir savienoti ar radio modemu. Arhitektūra izmanto NB-IoT tīklu, lai pārsūtītu datus no ierīces uz mobilo sakaru bāzes staciju. Izmantojot MQTT protokolu, dati no mobilo sakaru bāzes stacijas tiek pārsūtīti uz datu mākonī, kur tie tiek saglabāti un analizēti. Mākonī neapstrādātie dati tiek

dekodēti mērījumu datus. Modems ļauj modelētājam mijiedarboties ar tam pievienotajām ierīcēm. Kad ir iestatīts sakaru režīms un konfigurēts mākoņserveris, notiek saziņa starp sensoriem un mākoņserveri. Arhitektūra nodrošina, ka modelētājs var piekļūt mākonī saglabātajiem datiem izmantojot interneta pārlūku un, ja nepieciešams, attālināti mainīt saskarni starp sensoriem un datu formātu (Java, Sigajevs, Binde, & Kepka, 2021).

#### 4.2.3. Meteoroloģisko datu glabātuve

Autors uzskata, ka sensoru sistēmas dati jāglabā datu krātuvē, kas atrodas mākonī. *Cumulocity* kopš tās darbības sākuma 2010.gadā ir bijusi vadošā IoT lietotņu un pārvaldības platforma (i-SCOOP, 2020). *Cumulocity* ietver visus rīkus un veiktspēju, kas nepieciešama, lai pārvaldītu IoT sensoru sistēmu, izmantojot mākonī:

- Drošs savienojums;
- Ierīču pārvaldība;
- Analītika;
- Ātra uzņēmumu lietojumprogrammu integrācija;
- Rīki viedo produktu izstrādei;
- Datu analītikas rīki
- Mašīnmācīšanās modeļu pārvaldība (Software AG, 2020).

Tiklīdz sensoru sistēma ir reģistrēta *Cumulocity* IoT platformā, ir jāmaina sakaru intervāls uz 24 stundām, samazinot intervālus informācijas nosūtīšanai uz mākonī un atpakaļ, vienlaikus definējot to tik mazu, ka ir iespējams laikus identificēt kļūdas un tās novērst, minimizējot patērēto datu un baterijas resursu patēriņu. Tas ir svarīgi, lai nezaudētu datus ilgākā laika periodā, kā tas var gadīties, ja sensoru sistēma ir uzstādīta attālā vietā un darbojas autonomi, kad, ja būtu bijusi kļūme, pētnieks to uzzinātu tikai apmeklējot sensoru sistēmu, lai nolasītu datus (Java, Sigajevs, Binde, & Kepka, 2021).

Neapstrādātos sensoru datus var lejupielādēt CSV vai Excel formātā, kas saglabā datus, kā parādīts 7.tabulā.

**7.tabula.** Neapstrādāto *Cumulocity* izejas datu attēlojums

time	source	device_name	fragment.series	value	unit
2020-08-01T09:00:26.563Z	1940	sodaq001	Humidity	52	%RH

2020-08-01T14:00:44.644Z	1940	MQTT Device sodaq001	Humidity.Relative Humidity	43	%RH
2020-08-01T21:00:10.598Z	1940	MQTT Device sodaq001	Humidity.Relative Humidity	58	%RH

*Avots: autors*

No Cumulocity IoT platformas datus iespējams lejupielādēt katram sensoram atsevišķi, kamēr *Stella Architect* imitējošajā modelī ieejas datu augšupielādēšana notiek ar viena CSV faila starpniecību, tāpēc svarīgi, lai dati būtu formatēti veidā, kādu atbalsta konkrētā sistēmu dinamikas modelēšanas vide. Autors šajā nodaļā apraksta datu apstrādi priekš *Stella Architect*, jo *Insigt Maker* neparedz automātisku datu augšupielādi imitējošajā modelī, tie jākopē un jāievieto manuāli, kamēr *Stella Architect* atliek tikai norādīt ceļu uz datu CSV faila atrašanās vietu datorā, un tie tiek automātiski atjaunoti, ik reizi, kad tiek veiktas izmaiņas datos.

Lai, no *Cumulocity* IoT platformas iegūtie sensoru dati, tiktu pārveidoti *Stella Architect* imitējošajam modelim atbilstoši formatētos ieejas datos, promocijas darba ietvaros tika izstrādāts *Python* skripts (skatīt 1.pielikumu). Skripts nosaka:

1. kuram *Cumulocity* IoT lietotāja kontam jāpieslēdzas (koda 31.rinda);
2. kuru sensoru dati (72.-77.rinda), par kādu termiņu jāievāc (26.rinda);
3. kādas matemātiskās darbības jāveic, lai aprēķinātu vidējās diennakts vērtības (92.-124.rinda);
4. kā datus saglabāt purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa ieejas datu CSV formātā (133.-135.rinda);
5. uz kuru e-pasta adresi datus jānosūtīa (22.rinda).

*Python* skripts darbojas uz Vidzemes Augstskolas servera. Ja arī pats purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis būtu izstrādāts *Python* skriptā un atrastos uz šī paša servera, datus būtu iespējams bez e-pasta starpniecības augšupielādēt imitējošajā modelī, kas sniegtu iespēju imitācijas veikt reālā laikā, atliktu tikai datu apstrādes skriptā izmainīt dažas rindiņas (Java, Sigajevs, Binde, & Kepka, 2021).

Piemērs, kā tiek attēloti *Python* skripta ģenerētie ieejas dati CSV failā, apskatāms 8.tabulā.

**8.tabula.** *Python* skripta ģenerēto ieejas datu CSV faila attēlojums

Date	Average Temperature	Average humidity
01.07.2020	19.78	91

*Avots: autors*

Ieejas datu failā par katru nākamo dienu tiek veidots jauns datu punkts ar vidējo mērījumu vērtību. Tabulu iespējams papildināt ar jauniem mērījumu veidiem, pievienojot jaunas kolonnas, tikai jāpievērš uzmanība, lai kolonnu apzīmējumi sakristu ar imitējošajā modelī definēto pārveidotāju nosaukumiem (skatīt 3.2.nodaļu), pretējā gadījumā tas nespēs atpazīt datus un tos saglabāt atbilstošajos pārveidotājos (Java, Sigajevs, Binde, & Kepka, 2021).

Datu apstrādes *Python* skriptā ir vairākas vērtības, kuras pēc nepieciešamības iespējams konfigurēt, piemēram, koda 22.rindā iespējams nomainīt datu saņēmēja e-pastu vai 26.rindā datu nosūtīšanas periodu no uzstādītajām septiņām dienām nomainīt uz īsāku vai garāku termiņu pēc nepieciešamības. Lai dati tiktu sagatavoti un nosūtīti par laika periodu no pirmdienas līdz svētdienai, skriptu nepieciešams aktivizēt pirmdienā (Java, Sigajevs, Binde, & Kepka, 2021).

Lai sensoru sistēmas savāktie dati būtu publiski pieejami, nākotnē paredzēts apstrādātos datus publicēt Latvijas Atvērto datu portālā ([data.gov.lv](http://data.gov.lv)) vai līdzīgā starptautiskā vietnē, kā arī izmantot citu lietotāju portālā augšupielādētos datus sensoru sistēmas apkopoto datu papildināšanai, sniedzot iespēju veidot jaunus imitējošos modeļus un zināšanas (Java, Sigajevs, Binde, & Kepka, 2021).

### 4.3. Nodaļas secinājumi

Piedāvātā NB-IoT sensoru sistēmas uzbūve ietver vairākas jaunas pieejas meteoroloģisko datu iegūšanai. Viena no tām ir Doplera efekta izmantošana nokrišņu mērīšanai. Doplera efekts izpaužas kā frekvences un viļņa garuma maiņa, kad avots rada svārstību vilni ar noteiktu frekvenci un viļņa garumu, un novērotājs fiksē kustības radīto fizisko vērtību izmaiņas (Sasso, 2020). Doplera efekta mikroviļņu radars ļauj noteikt kustību, ātrumu un virzienu (Infineon Technologies AG, 2020), ko iespējams pārvērst saņemto nokrišņu apjomā. Jauna pieeja saules radiācijas mērījumiem ir autora piedāvātā IoT UV sensora izmantošana, kas pamatota ar mērījumiem, kuros noteikts, ka 6% no kopējās saules radiācijas, kas sasniedz Zemes virsmu, sastāda UV starojums (Gharehpetian & Mohammad Mousavi Agah, 2017), (Jacobsen & Dangles, 2017).

IoT sensoru zemās izmaksas un NB-IoT tīkla datu tehnoloģijas, nelielais izmērs un ilgais akumulatora darbības laiks paver iespējas plašākai augstas kvalitātes *in situ* datu, kas izmantojami imitējošajos modeļos, iegūšanai. Kamēr nav izdevies, ar mākoņskaitļošanas algoritmu palīdzību, izveidot vienu globālu meteoroloģisko datu krātuvi ar pietiekamu izšķirtspēju, kur dati būtu brīvi pieejami un izmantojami augstas precizitātes reģionāla līmeņa imitējošo modeļu darbināšanai, IoT sensoru sistēmas ir piemērotas šo datu iegūšanai un nākotnē

varētu kļūt par daļu no globālā sensoru tīkla. Sensoru sistēmai, kas vāc un apkopo hidroloģiskajam modelim nepieciešamos ieejas datus, ir iespējams izmantot mašīnmācīšanās paņēmienus, lai kalibrētu sensorus, identificētu kļūdainus sensorus, savlaicīgi identificētu, kad nepieciešama tehniskā apkope, un vajadzības gadījumā prognozētu nākotnes laika prognozi (Java, Sigajevs, Binde, & Kepka, 2021).

Lai vāktu un apkopotu *in situ* datus hidroloģisko modeļu ieejas datu nodrošināšanai, ievērojot autora piedāvāto arhitektūru un sensoru sistēmas darbības principus, iespējams izmantot arī analogus IoT sensorus un mikrokontrolierus. Izņēmums ir mikroviļņu Doplera efekta mikroviļņu radars, kam sensoru sistēmas izstrādes laikā nebija pieejama alternatīva (Java, Sigajevs, Binde, & Kepka, 2021).

## 5. DARBA EKONOMISKAIS UN SOCIOTEHNISKAIS PAMATOJUMS

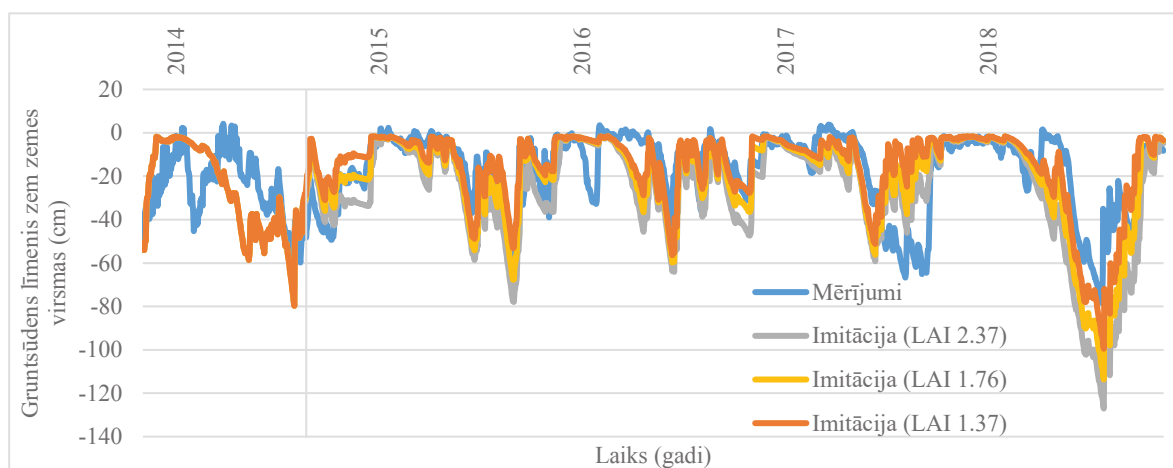
Lai arī ir iespējams monetāri aprēķināt ekonomisko ieguvumu, ko iespējams gūt degradējot purvus, lai tajos audzētu koksni vai iegūtu kūdru, jo, balstoties uz empīriskiem vienādojumiem, iespējams aprēķināt koksnes augšanas tempu un pieaugumu kubikmetros, un iespējams izmērīt izstrādājamās kūdras apjomu kubikmetros, tomēr nav iespējams aprēķināt ekonomisko ieguvumu no dabīga augstā purva, jo degradēšanas mirklī zaudētās purva funkcijas lielākoties netiek pārdotas tirgū un tām nav noteikta cena.

Galvenās dabīga augstā purva funkcijas ir uzskaitītas šī darba 1.nodaļā “Ekosistēmas raksturojums” un tās ir – plūdu riska mazināšana; ugunsgrēku riska mazināšana; SEG emisiju piesaistīšana un dažādi ekosistēmas pakalpojumi (ūdens pašattīrīšanās funkcija, ūdens cikla un klimata regulācijas funkcija, rekreācijas funkcija, dabas velšu (pārtikas, tēju, medicīnas) avots, arheoloģijas un pētniecības potenciāls).

Autora izstrādātie teorētiskie atzinumi, purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis un tā praktiskais pielietojums var tikt izmantots visā Baltijas jūras reģionā. Mainot modeļa parametrus, tā pielietojuma areālu iespējams ģeogrāfiski paplašināt. Purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa galvenais pielietojums ir degradētu purvu atjaunošanas projekti - mežaudzes retināšanas intensitātes noteikšana, balstoties uz izmaiņām LAI, ar mērķi atjaunot dabīgam augstajam purvam raksturīgu gruntsūdens līmeni, kas ir priekšnosacījums, lai purvā atgrieztos tam raksturīgā flora un fauna. Tā kā modelī tiek izmantots LAI, vairāki dārgi ar veģetāciju saistīti mērījumi nav nepieciešami.

26.attēlā redzams, kā purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa imitētais gruntsūdens līmenis reaģē uz izmaiņām LAI. Ar LAI 2.37 tiek atspoguļota situācija, kāda tā būtu, ja nogabalā nebūtu veikta mežaudzes retināšana. LAI 1.76 atspoguļo situāciju, kas atbilst veiktajām mežaudzes retināšanas manipulācijām. LAI 1.37 parāda, kāda situācija būtu, ja tiktu izcirsti vēl vairāk koki. Apskatot visas trīs līknes vienlaicīgi, galvenais secinājums, ko var izdarīt, ir – jo biezāka mežaudze, jo novērojamas lielākas gruntsūdens līmeņa svārstības. Ziemas periodā, kad bioloģiskie procesi skujkokos ir gandrīz apstājušies un tie augsnē esošo ūdeni patērē niecīgā apjomā, gruntsūdens līkne, neatkarīgi no mežaudzes apjoma, vienmēr sasniedz līmeni, kas atbilst augsnes piesātinātības līmenim, jo liekais ūdens apjoms, neatkarīgi no mežaudzes apjoma, nogabalu atstāj virszemes noteces veidā.



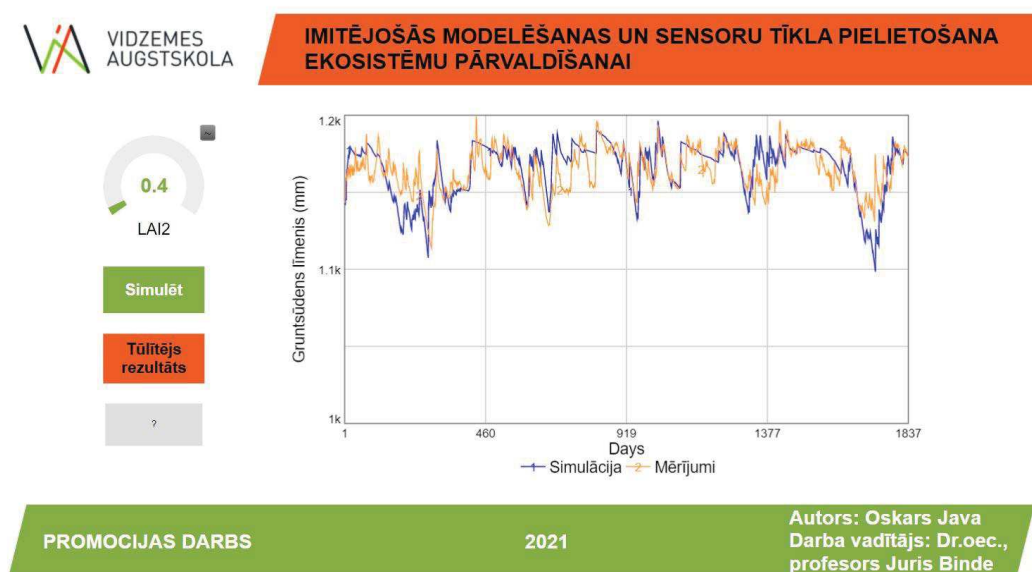


**26.attēls.** Testa nogabala Nr.1 gruntsūdens līmenis LAI manipulāciju ietekmē

*Avots: autors*

Purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa imitētajā periodā nokrišņu summa sastādīja 3319 mm. Ar modeļa palīdzību bija iespējams aprēķināt, ka, ja nogabalā netiktu veikta mežaudzes retināšana, intercepcija un transpirācija sastādītu 1655 mm jeb 50% no nokrišņu summas, pašreizējā situācijā, tā ir samazināta līdz 1433 mm jeb 43% no nokrišņu summas, bet, LAI samazinot līdz 1.37, intercepcijas un transpirācijas ietekme uz ekosistēmas ūdens bilanci samazinātos līdz 1253 mm jeb 38 % no perioda kopējās nokrišņu summas.

Tā kā *Stella Architect* nav atvērtā koda programmatūra un tās darbināšanai nepieciešams iegādāties licenci, darba autors ir izveidojis interneta pārlūka lietotāja saskarni, kurā ikviens interesents var veikt eksperimentu ar izmaiņām LAI nogabalā Nr.1 (skatīt 27.attēlu).



**27.attēls.** Purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa lietotāja saskarnes ekrānšāviņš  
<https://exchange.iseesystems.com/public/oskarsjavapromocijasdarbs/bog-hydrological-model>

*Avots: autors*

Lietotāja saskarnē (skatīt 27.attēlu) iespējams imitēt gruntsūdens līmeņa izmaiņa sākot no LAI 0.1, kas atbilst virsmai principā bez nekādas veģetācijas, līdz LAI 8, kas atbilst vidējam priežu meža LAI (Sumida, Watanabe, & Miyaura, 2018), un ļauj novērot LAI ietekmi uz gruntsūdens līmeni plašākā amplitūdā.

Purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis pilnā funkcionalitātē pieejams *Insight Maker*, interneta pārlūkā atverot šo hipersaiti <https://insightmaker.com/insight/201089/Bog-hydrology-model>. *Insight Maker* imitējošajā modelī kā ieejas dati ir izmantoti Mannikjarves mērījumu dati un tas atļauj detalizēti izpētīt modeļa uzbūvi un matemātisko formulējumu.

Purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis parāda, ka sistēmu dinamika ir piemērota hidroloģisko procesu un režīmu modelēšanai, jo tās struktūra ļauj izprast sistēmu un sniedz informāciju par tās darbību. Sistēmu dinamika arī sniedz ieskatu dažādu hidroloģisko procesu mijiedarbībā, tādējādi pierādot, ka šis ir efektīvs modelēšanas rīks, kas ļauj strukturēt un integrēt esošo hidroloģisko procesu informāciju.

Darbā aprakstītās NB-IoT sensoru sistēmas tiešo ekonomisko ietekmi uz informācijas tehnoloģiju un komunikācijas nozari nav iespējams novērtēt, jo sistēmas izbūve pēc būtības sastāda tikai izmaksas. Tomēr, jāuzsver šīs pieejas praktiskā nozīme, jo vairākas reizes zemāko izmaksu dēļ, salīdzinājumā ar standarta meteoroloģiskajām stacijām, tā varētu veicināt sensoru sistēmu izmantošanu meteoroloģisko un hidroloģisko datu vākšanai, kas savukārt paplašinātu šī un citu vidi un ekoloģiju imitējošo modeļu pielietojuma ģeogrāfisko areālu, sniedzot pētniekiem vispārīgāku ieskatu par ekosistēmas ietekmējošo faktoru savstarpējo mijiedarbību un ietekmi uz procesiem. Pētnieku atziņas kalpotu ilgtspējīgas un drošas vides veidošanai, samazinot cilvēka ietekmes uz vidi sekas.

## SECINĀJUMI

Pētījuma mērķis bija, balstoties uz reālas ekosistēmas uzbūves un tajā noritošo procesu analīzi, ar modelēšanas un imitācijas metodēm izstrādāt purva hidroloģisko sistēmu imitējošo modeli mežaudzes koku vainagu seguma ietekmes uz ekosistēmas ūdens bilanci novērtēšanai un tā izmantošanas metodoloģiju, kā arī izstrādāt IoT sensoru sistēmas prototipu *in situ* meteoroloģisko un gruntsūdens līmeņa jēldatu ievākšanas, apstrādes un izmantošanas metodoloģiju.

Pētījuma laikā apstiprinājās hipotēze, ka *in situ* sensori dati apvienojumā ar purva hidroloģisko sistēmu imitējošo modeli un tā izmantošanas metodoloģiju hidroloģijas, ģeoloģijas un bioloģijas ekspertiem, kā arī iesaistītajām pusēm un lēmumu pieņēmējiem sniedz iespēju uzskatāmi novērtēt mežaudzes apjoma ietekmi uz purva ūdens bilanci, un skaidrot ekosistēmas atjaunošanas nozīmi un ietekmi uz vidi:

- Kopīgi ar ģeoloģijas PhD, pētnieku Marko Kohv (Tartu Universitātes, Zinātnes un tehnoloģiju fakultātes, Ekoloģijas un zemes zinātņu, Ģeoloģijas departaments) un dzīvnieku ekoloģijas PhD, profesoru un vadošo pētnieku Asko Lõhmus (Tartu Universitātes, Zinātnes un tehnoloģiju fakultātes, Ekoloģijas un zemes zinātņu institūta, Bioloģijas aizsardzības departaments) sagatavojot kopīgu zinātnisko publikāciju, vienlaicīgi tika iegūta modeļa validācija, saņemot ekspertu, kuri kopīgi strādājuši degradētu purvu atjaunošanas projektā Igaunijā (Liina, et al., 2019), atzinumu par modeļa darbību un piemērotību, kas lasāms publikācijas “Performance of a Bog Hydrological System Dynamics Simulation Model in an Ecological Restoration Context: Soomaa Case Study, Estonia“ diskusijas daļā un iekļauts darba 3.nodaļas secinājumos;
- Fundamentālo un lietišķo pētījumu projektu programmas pētniecības projekta “Purvu hidroloģisko režīmu reāllaika un imitāciju datu vizualizācija virtuālā realitātē” (projekta Nr.lzp-2020/2-0396, 01.12.2020 – 31.12.2021) ietvaros, autora izstrādātā jaunā imitējošās modelēšanas metode un tā izmantošanas metodoloģija, apvienojumā ar izstrādāto IoT sensoru sistēmu kvalitatīvu *in situ* jēldatu iegūšanai un tā izmantošanas metodoloģiju, tika praktiski izmantota purvu ekosistēmas funkcionēšanas imitēšanai un vizualizēšanai virtuālās realitātes vidē;
- 5.nodaļā aprakstītā purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa lietotāja saskarne (skatīt 27.attēlu) kā vizuāls piemērs izmantots, lai par mežaudzes ietekmi uz purva ekosistēmas ūdens bilanci stāstītu (1) 30.03.2021 videolekcijā Aizkraukles vidusskolas

9.klašu grupai, (2) 17.08.2021 Ceļotāju dienas Zilākalnā apmeklētājiem, (3) 21.04.2022 Augšlīgatnes Jaunajās sākumskolas 3.-5.klašu grupai.

Darba rezultāti ir lietišķi un var tikt plaši pielietoti visā Baltijas reģionā.

**Promocijas darba teorētiskā vērtība** - izstrādātā purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa pieeja ļauj uzskaitīt dinamiskās sistēmas īpašības. Šī metodoloģija sniedz precīzākus rezultātus (zemāka vidējā nobīde un saknes vidējā kvadrāta kļūda) nekā esošās pieejas, jo īpaša uzmanība pievērsta parametriem, kas citos hidroloģiskajos modeļos nav attēloti tik augstā detalizācijas līmenī, vai arī nav iekļauti vispār. Šie parametri ir ar veģetāciju saistītās ūdens bilanci ietekmējošās ekosistēmas īpašības kā intercepcija un transpirācija, kas vairumā hidroloģisko modeļu nemaz nav iekļautas.

**Promocijas darba zinātniskais jaunieguvums** – ir izstrādāta metodoloģija imitējošās modelēšanas un sensoru sistēmas pielietošanai ekosistēmas pārvaldīšanai. BogSim purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa metodika caurvij gandrīz visu promocijas darbu un nav atsevišķi izdalīta un, balstoties uz to, iespējams replicēt šo modeli un veikt mežaudzes koku vainagu ietekmi uz jebkura Baltijas jūras reģiona purva ekosistēmas ūdens bilanci. No metodoloģijas viedokļa visnezīmīgākās apakšnodaļas ir (1) 3.1.5 Purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa ieejas un izejas dati, (2) 3.1.6 Objektorientētais dizains, (3) 3.2 Purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa matemātiskais formulējums, (4) 3.3 Purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa izstrāde un (5) 4.2 NB-IoT sensoru sistēmas uzbūve. Metodoloģija atšķiras no esošajām hidroloģisko modeļu metodoloģijām, jo modelis izmantojams “lēnu” ekosistēmu hidroloģisko sistēmu imitēšanai. Esošie hidroloģiskie modeļi katram no augsnes tipiem izmanto vienu hidrauliskās vadītspējas proporcionalitātes konstanti, tāpēc par darba autora izstrādātā purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa metodoloģijas novitāti uzskatāma akrotelma dinamiskās hidrauliskās vadītspējas ieviešana. Akrotelma dinamiskā hidrauliskā vadītspēja nozīmē, ka ūdens infiltrācijas ātrums kūdras slānī samazinās palielinoties attālumam līdz zemes virskārtai, līdz tiek sasniegts katotelms, savukārt katotelmā hidrauliskā vadītspēja saglabājas konstanta. Darba autors izstrādāja vairākas loģiskās izteiksmes un vienkāršotu ūdens perkolācijas devona smilšakmens slānī pieeju, kā rezultātā ir uzlabota modeļa darbības precizitāte. Kā zinātniskais jaunieguvums minama arī autora piedāvātā NB-IoT sensoru sistēmas arhitektūra, kas ietver vairākas jaunas pieejas meteoroloģisko datu vākšanā, kā, piemēram, Doplera efekta mikroviļņu sensora izmantošana nokrišņu mērīšanai un UV sensora izmantošana saules radiācijas aprēķināšanai.

**Promocijas darba praktiskā nozīme** - autora piedāvātā metodoloģija ļauj ātrāk un efektīvāk atjaunot purva ekosistēmas ūdens bilanci, tādējādi palielinot dabas daudzveidību, atjaunojot ūdens ciklu, uzlabojot vietējo iedzīvotāju dzīves kvalitāti un veicinot rekreācijas iespējas, tā izmantojama kā mācību rīks vides zinātņu apmācības procesā. Izstrādātā NB-IoT sensoru sistēma risina problēmu ar *in situ* jēldatau pieejamību vidi imitējošo modeļu vajadzībām. Izstrādātais purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis ir testēts divās sistēmu dinamikas vidēs, *Stella Architect* un *Insight Maker*, kas ļāva identificēt būtiskas atšķirības starp maksas un bezmaksas produktu. Gan autora izstrādātais purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis, gan sensoru sistēma kvalitatīvu datu ievākšanai ir atkārtojami un replicējami, un koncepts izmantojams citiem modeļiem līdzīgās ekosistēmās.

Promocijas darba izstrādes gaitā iegūti šādi galvenie secinājumi:

1. Purvu ekosistēma ir viena no vērtīgākajām un vismazāk novērtētajām dabas ekosistēmām, kas sniedz vairākus vērtīgus ekosistēmas pakalpojumus, nodrošina tīrus pazemes ūdeņus, samazina ugunsgrēku risku u.c., dēļ kā ir vērts to sargāt un atjaunot iepriekš degradētos purvus.
2. Autora izstrādātā BogSim purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa, kas izstrādāts sistēmu dinamikas vidē, imitētās gruntsūdens līknes dažādos nogabalos ar atšķirīgiem apstākļiem imitē izmērītā gruntsūdens līmeņa līknes trajektoriju un svārstības, arī mainoties LAI. Lai noteiktu, cik precīzi darbojas izstrādātais purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis, autors veica statistiskos testus. Statistiskie testi apstiprina, ka purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis darbojas precīzi (skatīt 4.tabulu) un ir izmantojams, ne tikai cēloņu seku novērošanai, ko rada purva hidroloģiskās sistēmas komponentu mijiedarbība, bet arī, pamatojoties uz LAI – mežaudzes retināšanas intensitātes noteikšanai purvu atjaunošanas projektu vajadzībām.
3. Eksperimenti ar autora izstrādāto BogSim purva hidroloģisko sistēmu imitējošo modeli parādīja, ka LAI nav tieši proporcionāls mežaudzes retināšanas intensitātei, kam par pamatu varētu būt atšķirīgs koku vecums, veselības stāvoklis un fakts, ka, nocērtot kokus, samazinot zemesdzīves noēnojums, kas veicina bioloģiskos procesus pamežā.
4. Autora izstrādātais BogSim purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis ne tikai grafiski attēlo LAI izmaiņu ietekmi uz purva gruntsūdens līmeņa izmaiņām, bet ar tā palīdzību iespējams izteikt skaitļos un procentos mežaudzes ietekmi uz kopējo ekosistēmas ūdens bilanci. Piemēram, testa nogabalā Nr.1, pirms mežaudzes retināšanas, tā aizkavēja nonākšanu līdz zemes virsmai un patērēja bioloģisko procesu nodrošināšanai 50% no nokrišņu, bet, veicot mežaudzes retināšanu 44% apmērā, tās

- ietekme uz ūdens bilanci samazinājās par 7% un sastāda 43%. Ar mērinstrumentiem izmērīt intercepciju un transpirāciju būtu sarežģīti, laikietilpīgi un dārgi, kamēr imitējošajā modelī integrētie empīriskie vienādojumi šīs vērtības, balstoties uz LAI, meteoroloģiskajiem apstākļiem un augsnes piesātinātību, ļauj noteikt izdarot pāris peles klikšķus.
5. Sistēmu dinamikas pieeja palīdz imitēt procesus konkrētā punktā un saprast cēloņsakarības, kas padara to par piemērotu līdzekli, lai pārlicinātos, ka sistēma ietver visas komponentes pirms liela mēroga procesu modelēšanas citā vidē. Vienlaikus šī pieeja, kas ļauj izpētīt katru no sistēmas sastāvdaļām individuāli un visas kopā, padara to par lielisku imitāciju mācību metodi.
  6. Promocijas darba rezultāti ir praktiski pielietojami un tiek tālāk izmantoti tādos pētniecības projektos kā Eiropas Savienības pētniecības un inovāciju atbalsta programmas “Apvārsnis 2020” zinātnes pētniecības projektā “reSilienT fARminG by Adaptive microclimaTe managEment (STARGATE)” (projekta Nr.818187, 01.10.2019 - 30.09.2023), Fundamentālo un lietišķo pētījumu projektu programmas pētniecības projektā “Purvu hidroloģisko režīmu reāllaika un imitāciju datu vizualizācija virtuālā realitātē” (projekta Nr.lzp-2020/2-0396, 01.12.2020 – 31.12.2021), kā arī Eiropas Savienības programmas “Erasmus+” Eiropas universitāšu projekta “Engaged and Entrepreneurial European University as Driver for European Smart and Sustainable Regions (E<sup>3</sup>UDRES<sup>2</sup>)” (projekta Nr.101004069, 01.10.2020 – 30.09.2023) iekšējā pētniecības projektā “Multi-Sensor Monitoring for Smart and Sustainable Farming in Europe (MULTISENS<sup>2</sup>E)” (01.10.2021 – 30.09.2023).
  7. Grafiskais sistēmu dinamikas purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa attēlojums sniedz iespēju hidroloģijas un bioloģijas ekspertiem to ērti validēt, bet iesaistītajām pusēm un lēmumu pieņēmējiem uzskatāmi parādīt koku apjoma ietekmi uz purva ūdens bilanci, un skaidrot ekosistēmas atjaunošanas nozīmi un ietekmi uz vidi.
  8. Lielais lidmašīnu lidojumu skaita samazinājums koronavīrusa SARS-CoV-2 pandēmijas dēļ ir radījis problēmas laikapstākļu prognozēšanai, jo ievērojami samazinājies pieejamo meteoroloģisko datu apjoms (Guardian News & Media Limited, 2020). Autora piedāvātā NB-IoT sensoru sistēma ne tikai apkopo datus, kas nepieciešami hidroloģiju imitējošo modeļu darbībai, bet, piemēram, līdzīgās krīzes situācijās varētu sniegt datus, kas nepieciešami laikapstākļu prognozēšanai, it īpaši, ja šī sensoru sistēmas arhitektūra, tās zemo izmaksu dēļ, tiktu plaši pielietota visapkārt zemeslodei, veidojot vienotu globālu sensoru tīklu. Promocijas darba ietvaros tika izstrādāta sensoru sistēma *in situ* ieejas datu imitējošo modeļu darbināšanai iegūšanai

un apstrādei un izstrādāts plaši pielietojams purva hidroloģisko sistēmu imitējošais modelis, kā plašāka praktiska pielietošana dotu lielu ekonomisku daudzkārtīgu efektu un labvēlīgi ietekmētu klimatu, sniedzot labumu visai sabiedrībai, tādējādi pamatojot IoT sensoru sistēmas pielietojumu un nepieciešamību. Novērtējot IoT sensoru sistēmas un purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa darbību, tika izdarīti secinājumi: NB-IoT sensoru zemās izmaksas, nelielais izmērs un ilgais barošanas elementu kalpošanas mūžs paver iespējas plašākai kvalitatīvu imitējošo modeļu ieejas datu iegūšanai, lai, piemēram, neatkārtotos situācija kā Gulbju salas purva atjaunošanas projektā (projekts “Mežu biotopu atjaunošana Gaujas nacionālajā parkā”, projekta numurs LIFE10 NAT/LV/000159 FOR-REST), kad gruntsūdens mērījumus divas reizes mēnesī veica vides inspektors, braucot uz objektu un lasījumus veicot manuāli ar mērlentu un pierakstot uz papīra lapas, bet datus varētu nolasīt attālināti vienu reizi dienā, vai biežāk, ja nepieciešams.

9. Kamēr, balstoties uz mākoņskaitļošanas algoritmiem, nav iespējams izveidot vienotu globālu meteoroloģisko datu glabātuvī ar pietiekami augstu izšķirtspēju, lai dati būtu pieejami un izmantojami lokālu imitējošo modeļu darbināšanai, kas prasa augstu precizitāti, lietu interneta sensoru sistēmas ir piemērotas šo datu iegūšanai un nākotnē varētu kļūt par daļu no globāla sensoru tīkla.



## IZZINĀS AVOTI

- 0G Baltics. (2020). *Company and Technology*. Ielādēts no <https://0g-baltics.com/>
- Aasa, A., Egorov, S., Filipov, I., Gabiri, G., Gheorghe, I., Järveoja, J., . . . Mander, Ü. (2014). Global Boundary Lines of N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> Emission in Peatlands. (S. I. Publishing, Red.) *The Role of Natural and Constructed Wetlands in Nutrient Cycling and Retention on the Landscape*, 87-102. doi:10.1007/978-3-319-08177-9\_7
- Abaja, R., Eriņš, G., & Purmalis, O. (2018). Hidroloģiskā režīma atjaunošanas programmu izstrāde dažādām mitrāju ekosistēmām Ķemeru Nacionālajā parkā. *Aktuāli biotopu un sugu dzīvotņu apsaimniekošanas piemēri Latvijā*, 25-45.
- Abdulkareem, J. H., Pradhan, B., Sulaiman, W. N., & Jamil, N. R. (2018). Review of studies on hydrological modelling in Malaysia. *Modeling Earth Systems and Environment*, 1-29. doi:10.1007/s40808-018-0509-y
- Abdulmalik, Z., Salami, A. W., Bilewu, S. O., Ayanshola, A. M., Amoo, O. T., & Abdultaofeek, A. (2019). Geospatial water resources allocation modeling and prognostic scenario planning in lower Benue River Basin, Nigeria. *ACM International Conference Proceeding Series*, 1-12. doi:10.1145/3368756.3369063
- Aber, J., Marzloff, I., & Reiss, J. B. (2010). Wetland Environments. *Small-Format Aerial Photography*, 201-212.
- Adbi, D. A., & Ayenew, T. (2021). Evaluation of the WEAP model insimulating subbasin hydrology in theCentral Rift Valley basin, Ethiopia. *Ecological Processes*, 1-14. doi:0.1186/s13717-021-00305-5
- Aghlmand, R., & Abbasi, A. (2019). Application of MODFLOW with Boundary Conditions Analyses Based on Limited Available Observations: A Case Study of Birjand Plain in East Iran. *11*, 1-21. doi:10.3390/w11091904
- Akossou, A. Y., & Palm, R. (2013). Impact of Data Structure on the Estimators R-Square And Adjusted R-Square in Linear Regression. *International Journal of Mathematics and Computation*, 20(3), 84-93.
- Akter, A., & Ahmed, S. (2021). Modeling of groundwater level changes in an urban area. *Sustainable Water Resources Management*, 7(1). doi:10.1007/s40899-020-00480-x
- Aleksāns, O. (2015). *Hidroloģiskie un ģeoloģiskie pētījumi ziemeļu purvu dabas liegumā*. Rīga.

- AL-Hasami, S., Gunawardhana, L., Sana, A., & Baawain, M. (2020). A Numerical Groundwater Flow Model of Wadi Samail Catchment Using MODFLOW Software. *International Journal of GEOMATE*, 18(70), 30-36. doi:10.21660/2020.70.5671
- Anderson, R., Vasander, H., Geddes, N., Laine, A., Tolvanen, A., O'Sullivan, A., & Aapala, K. (2016). Afforested and forestry-drained peatland restoration. In A. Bonn, T. Allott, M. Evans, H. Joosten, & R. Stonean, *Peatland Restoration and Ecosystem Services - Science, Policy and Practives* (pp. 213-233). Cambridge: Cambridge University Press.
- Andreadis, K. M., Lettenmaier, D. P., & Storck, P. (2009). Modelling snow accumulation and ablation processes in forest environments. *Water Resource Research*, 45, 1-13. doi:10.1029/2008WR007042
- Arakaki, T., Shimizu, A., Kabeya, N., Ikuzawa, H., Shimizu, T., Iida, S., & Furugen, H. (2014). Calculation of Forest Potential Evapotranspiration of Okinawa in Japan Using the Penman Equation. *Journal of Water Resource and Protection*, 6, 813-820. doi:http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2014.69077
- Auniņš, A., Bambe, B., Enģele, L., Ikaunieca, S., Kabucis, I., Laime, B., . . . Sniedze, R. (2010). *Eiropas Savienības nozīmes īpaši aizsargājamie biotopi Latvijā*. Rīga: Latvijas Dabas fonds.
- Awandallah, S., Moure, D., & Torres-González, P. (2019). An Internet of Things (IoT) Application on Volcano Monitoring. *Sensors*, 19(21), 1-29. doi:https://doi.org/10.3390/s19214651
- Bahadar, I., Shafique, M., Khen, T., Tabassum, I., & Ali, N. Z. (2015). Flood hazard assessment using hydro-dynamic model and GIS/RS tools: A case study of Babuzai-Kabal tehsil Swat Basin, Pakistan. *Journal of Himalayan Earth Sciences*, 48(2), 129-138.
- Baldunčika, J. (2007). *Svešvārdu vārdnīca: vairāk nekā 16 000 citvalodu cilmes vārdu un terminoloģisku vārdkopu* (Sēj. 3). Rīga: Jumava.
- Baxter, G., & Sommerville, I. (2011). Socio-technical systems: From design methods to systems engineering. *Interacting with Computers*, 23(1), 4-17. doi:https://doi.org/10.1016/j.intcom.2010.07.003
- BBC. (2012. gada 6. March). *Death rate boubles in Moscow as heatwave continus*. Ielādēts no News: <https://www.bbc.com/news/world-europe-10912658>

- Behrendt, J., & Zimmermann, K. (2008). Qualitätskontrolle historischer Klimadaten. *Klimastatusbericht 2008*, 119-125.
- Bērziņa, K. (2008). *Tūrisma un viesmīlības terminu skaidrojošā vārdnīca*. Rīga: LR Ekonomikas ministrija.
- Bhave, M. P., & Patekar, S. A. (2005). *Object-Oriented Programming with C++*. Indiana: First Indiana Print.
- Bui, H. H., Ha, N. H., Nguyen, T. N., Nguen, A. T., Pham, T. T., Kandasamy, J., & Nguyen, T. V. (2019). Integration of SWAT and QUAL2K for water quality modeling in a data scarce basin of Cau River basin in Vietnam. *Ecohydrology and Hydrobiology*, 19(2), 210-223. doi:10.1016/j.ecohyd.2019.03.005
- Campbell, G. S., & Norman, J. M. (1989). Canopy structure. *Plant Physiological Ecology*, 301-325. doi:10.1007/978-94-009-2221-1\_14
- Carey, S., Elshorbagy, A., & Kesha, N. (2009). A generic system dynamics model for simulating and evaluating the hydrological performance of reconstructed watersheds. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13, 865-881.
- Chaudhari, B. S., Zennaro, M., & Borkar, S. (2020). LPWAN Technologies: Emerging Application Characteristics, Requirements, and Design Considerations. *Future Internet*, 12(46), 1-25. doi:doi:10.3390//fi12030046
- Chen, B., Liu, Z., He, C., Peng, H., Xia, P., & Nie, Y. (2020). The regional hydro-ecological simulation system for 30 years: A systematic review. *Water*, 12(10), 1-22. doi:10.3390/w12102878
- Commission, E. (2018). *Going climate - neutral by 2050*. European Union. doi:10.2834/508867
- Cui, Y., & Jia, L. (2014). A Modified Gash Model for Estimating Rainfall Interception Loss of Forest Using Remote Sensing Observation at Regional Scale. *Water*, 6, 993-1012. doi:10.3390/w6040993
- Custers, J., & Graafstal, H. (2005). *Characterization of the water flow in a pool-ridge microtope in a bog. A case study of Männikjärve bog, Estonia*. Wageningen University.
- de Graaf, I. E., Sutanudjaja, E. H., van Beek, L. P., & Bierkens, M. F. (2015). A high-resolution global-scale groundwater model. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19, 823-837. doi:10.5194/hess-19-823-2015

- Delfi, A. (2020). *LMT ieviešis jaunās paaudzes lietu interneta LTE-M tīklu*. Ielādēts no [https://www.delfi.lv/business/biznesa\\_videlmt-ieviesis-jaunas-paaudzes-lietu-interneta-lte-m-tiklu.d?id=52304947](https://www.delfi.lv/business/biznesa_videlmt-ieviesis-jaunas-paaudzes-lietu-interneta-lte-m-tiklu.d?id=52304947)
- Desai, S., Singh, D. K., Islam, A., & Sarangi, A. (2021). Multi-site calibration of hydrological model and assessment of water balance in a semi-arid river basin of India. *Quaternary International*, 571, 136-149. doi:10.1016/j.quaint.2020.11.032
- Deutsche Telekom AG. (2019). *Mobile IoT guide. How NB-IoT and LTE-M are helping the IoT take off*. Bonn.
- DFROBOT. (2020). *Wind Speed Sensor Voltage Type 0-5V SKU SEN0170*. Ielādēts no Search: [https://wiki.dfrobot.com/Wind\\_Speed\\_Sensor\\_Voltage\\_Type\\_0-5V\\_\\_SKU\\_SEN0170](https://wiki.dfrobot.com/Wind_Speed_Sensor_Voltage_Type_0-5V__SKU_SEN0170)
- DHI. (2019). *MIKE SHE*. DHI.
- Dick, J., Hull, E., & Jackson, K. (2017). *Requirements Engineering* (4 izd.). Springer.
- Dictionary.com, LLC. (2020). *Relative humidity*. Ielādēts no Browse: <https://www.dictionary.com/browse/relative-humidity>
- Duranel, A., Thomson, J. R., Burningham, H., Durepaire, P., Garambois, S., Wyns, R., & Cubizolle, H. (2020). Modelling the hydrological interactions between a fissured granite. *Hydrology and Earth System Sciences*, 1-46. doi:<https://doi.org/10.5194/hess-2020-172>
- ECMWF. (2020). *Near surface meteorological variables from 1979 to 2018 derived from bias-corrected reanalysis*. Ielādēts no <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/derived-near-surface-meteorological-variables?tab=overview>
- Elshorbagy, A., Julta, A., & Kells, J. (2007). Simulation of the hydrological processes on reconstructed watersheds using system dynamics. *Hydrological Science Journals*, 52(3), 538-562.
- Elshorbagy, A., Julta, A., Barbour, L., & Kells, J. (2005). System dynamics approach to assess the sustainability of reclamation of disturbed watersheds. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 32, 144-158. doi:10.1139/L04-112
- Engineering ToolBox. (2001). *Evaporation from Water Surfaces*. Ielādēts no Engineering ToolBox: [http://www.engineeringtoolbox.com/evaporation-water-surface-d\\_690.html](http://www.engineeringtoolbox.com/evaporation-water-surface-d_690.html)

- European Commission. (1992). COUNCIL DIRECTIVE 92/43/EEC. *Official Journal of the European Communities*, 1-44.
- European Commission. (2013). *Interpretation of European Union Habitats - EUR 28*. European Commission DG Environment.
- European Commission. (2019). *ANNEX 6 - HORIZON EUROPE CLUSTER 6. FOOD, BIOECONOMY, NATURAL RESOURCES, AGRICULTURE AND ENVIRONMENT*.
- European Commission. (2020). *EU Biodiversity Strategy for 2030*. Brussels: European Commission.
- Evans, D. (2006). The Habitats of the European Union Habitats Directive. *Biology and Environment*, 106B(3), 167-173.
- Ferris, E., Petz, D., & Stark, C. (2013). *It Only Takes a Spark: The Hazards of Wildfires*. Brookings.
- Figueiredo Filho, D. B., Silva, J. A., & Rocha, E. (2011). What is R2 all about? *Leviathan*, 3(3), 60-68. doi:10.11606/issn.2237-4485.lev.2011.132282
- Fogwing. (2021). *What is Industrial IoT: Understanding IoT and IIoT in brief*. Ielādēts no Fogwing: <https://docs.fogwing.io/fogwing-platform/introduction-to-iiot>
- Fortmann-Roe, S. (2014). Insight Maker: A general-purpose tool for web-based modeling & simulation. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 47(2014), 28-45.
- Freedman, A. (2020. gada 28. 05). "Zombie fires" are erupting in Siberia and Alaska, signaling a severe northern wildfire season may lie ahead. *The Washington Post*.
- Froehlich, D. C., & Jobson, H. E. (1988). Basic hydraulic principles of open-channel flow. *U.S. Geological Survey*, 150.
- Furukawa Electric Co., LTD. (2011). *Optical Fiber Rain Gauge Commercialized, Japan Meteorological Agency Verification Obtained, and Sales Launched*. Ielādēts no Kurukawa Electric: [https://www.furukawa.co.jp/english/what/2011/comm\\_111207.htm](https://www.furukawa.co.jp/english/what/2011/comm_111207.htm)
- Gad, H. E., & El-Gayar, S. M. (2010). Climate parameters used to evaluate the evapotranspiration in delta central zone of Egypt. *IWTC14 2010*, (lpp. 529-548). Cairo.
- Gelfan, A. N., Kuchment, L. S., & Pomeroy, J. W. (2004). Modeling Forest Cover Influence on Snow Accumulation, Sublimation, and Melt. *American Meteorological Society*, 5,

785-803. doi:10.1002/(SICI)1099-1085(199808/09)12:10/11<1611::AID-HYP684>3.0.CO;2-4

- Gharehpetian, G. B., & Mohammad Mousavi Agah, S. (2017). *Distributed Generation Systems. Design, Operation and Grid Integration*. Elsevier Inc.
- Glen, S. (2021). *RMSE: Root Mean Square Error*. Ielādēts no Elementary Statistics for the rest of us: <https://www.statisticshowto.com/probability-and-statistics/regression-analysis/rmse-root-mean-square-error/>
- Gong, P., Pu, R., Biginb, G. S., & Larrieu, M. R. (2003). Estimation of Forest Leaf Area Index Using Vegetation Indices Derived From Hyperion Hyperspectral Data. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 41(6), 1355-1362.
- Google. (2020). *Google Maps*. Ielādēts no <https://www.google.com/maps/>
- Grassini, P., van Bussel, L. G., Van Wart, J., Wolf, J., Claessens, L., Yang, H., . . . Cassman, K. G. (2015). How good is good enough? Data requirements for reliable crop yield simulations and yield-gap analysis. *Field Crops Research*, 177(2015), 49-63. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2015.03.004>
- Grivins, M. (2016). A comparative study of the legal and grey wild product supply chains. *Journal of Rural Studies*, 45, 66-75. doi:10.1016/j.jrurstud.2016.02.013
- Grivins, M. (2021). Are All Foragers the Same? Towards a Classification of Foragers. *Sociologia Ruralis*, 61(2), 518-539. doi:10.1111/soru.12335
- Grivins, M., & Tisenkopfs, T. (2018). Benefitting from the global, protecting the local: The nested markets of wild product trade. *Journal of Rural Studies*, 61, 335-342. doi:10.1016/j.jrurstud.2018.01.005
- GSMA. (2018). *NB-IoT and LTE-M in the context of 5G. Mobile IoT in the 5G future*. London.
- Guardian News & Media Limited. (2020). *Decline in aircraft flights clips weather forecasts' wings*. Ielādēts no <https://www.theguardian.com/news/2020/apr/09/decline-aircraft-flights-clips-weather-forecasters-wings-coronavirus>
- Ha, J.-H., Im, Y.-H., Kim, H.-H., Sim, N.-J., & Yoon, Y. (2018). Error Correction of Meteorological Data Obtained with Mini-AWSs Based on Machine Learning. *Advances in Meteorology*, 2018, 1-8. doi:<https://doi.org/10.1155/2018/7210137>



- Hadi, A. N., Sudibyakto, & Shrestha, D. (2011). ANALYZING RUNOFF DYNAMICS THROUGH PARAMETERIZING A HYDROLOGICAL MODEL IN A WATERSHED: A CASE STUDY IN UPPER SERAYU BASIN, CENTRAL JAVA PROVINCE, INDONESIA. *Indonesian Journal of Geography*, 42(1), 1-24.
- Hancock, M., Cowie, N., & Field, R. (2014). *No.12: The science of peatland restoration*. RSPB Centre for Conservation Science.
- Harbaugh, A. W. (2005). *MODFLOW-2005 : the U.S. Geological Survey modular ground-water model--the ground-water flow process*. USGS science for a changing world. doi:10.3133/tm6A16
- Härkönen, S., Lehtonen, A., Manninen, T., Tuominen, S., & Peltoniemi, M. (2015). Estimating forest leaf area index using satellite images: comparison of k-NN based Landsat-NFI LAI with MODIS-RSR based LAI product for Finland. *Boreal Environment Research*, 181-195.
- Hepburn, C., O'Callaghan, B., Stern, N., Stiglitz, J., & Zenghelis, D. (2020). Will COVID-10 fiscal recovery packages accelerate or retard progress on climate change? *Oxford Review of Economic Policy*, 1-25. doi:<https://doi.org/10.1093/oxrep/graa015>
- Hess, T., & Counsell, C. (2020). *A water balance simulation model for teaching and learning--WaSim*. HR Wallingford & Cranfield University.
- HYDROPLAN. (2016). *Hidroloģiskā režīma atjaunošana Zaļajā purvā, Skudrupītes paliņē un mežos rietumos no Ķemeru tīreļa. Ietekmes uz vidi novērtējuma ziņojums*. Ķemeri: Projekts LIFE10NAT/LV/000160 "ķemeru nacionālā parka hidroloģiskā režīma atjaunošana" HYDROPLAN.
- Hood, M. (2020. gada 27. 05). *Scientists warn of "zombie fires" in the Arctic*. Ielādēts no Phys.org: <https://phys.org/news/2020-05-scientists-zombie-arctic.html>
- Huber, L., Bahro, N., Leitinger, G., Tappeiner, U., & Strasser, U. (2019). Agent-based modelling of a coupled water demand and supply system at the catchment scale. *Sustainability*, 11(21), 1-15. doi:10.3390/su11216178
- Hughes, J. D., Langevin, C. D., & Banta, E. R. (2017). *Documentation for the MODFLOW 6 Framework*. Reston: U.S. Geological Survey. doi:10.3133/tm6A57



- Idbella, M., Iadaresta, M., Gagliarde, G., Mennella, A., Mazzoleni, S., & Bonanomi, G. (2020). AgriLogger: A New Wireless Sensor for Monitoring Agrometeorological Data in Areas Lacking Communication Networks. *Sensors*, 20, 1-13. doi:10.3390/s20061589
- Infineon Technologies AG. (2020). *24 GHz transceiver - BGT24LTR11*. Munich: Infineon Technologies AG.
- Insight Maker. (2021). *Types of Primitives*. Ielādēts no Insight Maker: <https://insightmaker.com/primitives>
- IPBES. (2019). *Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform of Biodiversity and Ecosystem Services*. Bonn: IPBES secretariat. doi:<https://doi.org/10.5281/zenodo.3553579>
- i-SCOOP. (2020). *Cumulocity IoT recognized as IoT platform leader, launches new release*. Ielādēts no <https://www.i-scoop.eu/cumulocity-iot/>
- isee systems inc. (2013). *Getting Started with iThink and STELLA*. isee systems inc.
- isee systems inc. (2020). *Stella Architect*. Ielādēts no iseesystems: <https://www.iseesystems.com/store/products/stella-architect.aspx#overview>
- Ismail, M. F., Habib-ur-Rehman, Bogachi, W., & Muhammad, N. (2015). Degree Day Factor Models for Forecasting the Snowmelt Runoff for Naran Watershed. *Sci.Int.(Lahore)*, 27(3), 1951-1960.
- Izady, A., Abdalla, O., Joodavi, A., & Chen, M. (2017). Groundwater Modeling and Sustainability of a Transboundary Hardrock–Alluvium Aquifer in North Oman Mountains. *Water*, 1-17. doi:10.3390/w9030161
- Yahia, E. M. (2019). *Postharvest Technology of Perishable Horticultural Commodities*. Elsevier. doi:<https://doi.org/10.1016/C2016-0-04890-8>
- Yamamoto, K., Togami, T., Yamuchi, N., & Ninomiya, S. (2017). Machine Learning-Based Calibration of Low-Cost Air Temperature Sensors Using Environmental Data. *Sensors*, 1-16. doi:10.3390/s17061290
- Yang, M., He, W., Zhang, Z., Xu, Y., Yang, H., Chen, Y., & Xu, X. (2019). An efficient storage and service method for multi-source merging meteorological big data in cloud

- environment. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 241(2019), 1-12. doi:<https://doi.org/10.1186/s13638-019-1576-0>
- Yin, C., & McKay, A. (2018). Introduction to Modeling and Simulation Techniques. *The 8th International Symposium on Computational Intelligence and Industrial Applications (ISCIIA2018)*, (lpp. 1-6).
- Yu, Y., Wang, J., Liu, G., & Cheng, F. (2019). Forest Leaf Area Index Inversion Based on Landsat OLI Data in the Shangri-La City. *Journa of the Indian Society of Remote Sensing*, 10. doi:<https://doi.org/10.1007/s12524-019-00950-6>
- Jacobsen, D., & Dangles, O. (2017). *Ecology of High Altitude Waters*. Oxford: Oxford University Press. doi:10.1093/oso/9780198736868.001.0001
- Jansons, Ā. (2010). *Meža apsiamniekošana klimata izmaiņu kontekstā*. LVMI Silava.
- Järv, H., Kliimask, J., Ward, R. D., & Sepp, K. (2016). Socioeconomic Impacts of Protection Status on Residents of National Parks. *European Countryside*, 8(2), 67-85. doi:10.1515/euco-2016-0006
- Java, O. (2017). Significance of Thinning Degraded Swamps Forest Stands in Sustainable Ecosystem's Development. (lpp. 5). Kaunas: Proceedings of the 8th International Scientific Conference Rural Development 2017. doi:<http://doi.org/10.15544/RD.2017.104>
- Java, O. (2018). Restoration of a Degraded Bog Hydrological Regime Using System Dynamics Modelling. *CBU International Conference Proceedings 2018*, 1105-1113.
- Java, O. (2020). The Specification of Hydrological Model Requirements for Bog Restoration. *Baltic Journal of Modern Computing*, 8(2020), 164-173. doi:10.22364/bjmc.2020.8.1.11
- Java, O., Kohv, M., & Asko, L. (2020). Hydrological model for decision-making: Männikjärve bog case study, Estonia. *Baltic Journal of Modern Computing*, 8(3), 3798-390. doi:10.22364/BJMC.2020.8.3.01
- Java, O., Kohv, M., & Lõhmus, A. (2021). Performance of a Bog Hydrological System Dynamics Simulation Model in an Ecological Restoration Context: Soomaa Case Study, Estonia. *Water*, 13, 1-13. doi:10.3390/w13162217

- Java, O., Sigajevs, A., Binde, J., & Kepka, M. (2021). NB-IoT Sensor Network for Obtaining the Input Data for Hydrological Simulation Model. *Agris On-line Papers in Economics and Informatics*, 13(1), 59-69. doi:10.7160/aol.2021.130105
- Jātnieks, J. (2012). *Materiālu īpašības 3D struktūras ģeneralizācija reģionālā hidroģeoloģiskajā modelī ar normalizētās kompresijas distances metriku*. Rīga: Latvijas Universitāte.
- Jenning, K. S., Kittel, T. F., & Molotch, N. P. (2018). Observations and simulation of the seasonal evolution of snowpack cold content and its relation to snowmelt and the snowpack energy budget. *Cryosphere*, 12(5), 1595-1614. doi:10.5194/tc-12-1595-2018
- Jiang, M., Xie, S., & Wang, S. (2020). Water Use Conflict and Coordination between Agricultural and Wetlands—A Case Study of Yanqi Basin. *Water*, 12, 1-18. doi:doi:10.3390/w12113225
- Jiang, Z., Zuo, M. J., & Fung, R. Y. (1999). Stochastic Object-Oriented Petri Nets (SOPNs) for Reliability Modeling of Manufacturing Systems. (pp. 1471-1476). Edmonton: Proceedings of the 1999 IEEE Canadian Conference of Electrical and Computer Engineering.
- Jørgensen, S. E., Mitch, W. J., & Kells, J. (1988). Wetland Modelling. *Developments in Environmental Modelling*, 12, 1-8.
- Jovanovic, N., Bugan, R., Tredoux, G., Israel, S., Bishop, R., & Marius, V. (2017). Hydrogeological modelling of the Atlantis aquifer for management support to the Atlantis Water Supply Scheme. *Water SA*, 43(1), 122-138. doi:10.4314/wsa.v43i1.15
- Kampuse, K. (2014). *Gruntsūdens līmeņa atjaunošanas darbi Gulbju salas purvā*. Ielādēts no Dabas aizsardzības pārvalde: <https://www.daba.gov.lv/public/lat/zinas/1921/>
- Kastridis, A., & Stathis, D. (2020). Evaluation of hydrological and hydraulic models applied in typical mediterranean ungauged watersheds using post-flash-flood measurements. *Hydrology*, 7(1), 1-26. doi:10.3390/hydrology7010012
- Kiely, G., Leahy, P., McVeight, P., Laine, A., Lewis, C., Koehler, A. K., & Sottocornola, M. (2018). Survey of GHG Emission and Sink Potential of Blanket Peatlands. 34.
- Klamerus-Ivan, A. (2014). Different views on tree interception process and its determinants. *Forest Research Papers*, 75(3), 291-300. doi:10.2478/frp-2014-0028

- Koohestani, N., Meftah Halaghi, M., & Dehghani, A. (2013). Numerical simulation of groundwater level using MODFLOW software (A case. *International journal of Advanced Biological and Biomedical Research*, 1(8), 858-873.
- Kuļikovskis, G. (2015). *Viedās specializācijas jomas - "Informācijas un komunikāciju tehnoloģijas" ekosistēmas analītiskais apraksts*. Rīga: Izglītības un zinātnes ministrija.
- kursors.lv. (2017). *Lattelecom Rīgā izbūvējis lietu interneta tīklu*. Ielādēts no Tehnoloģiju ziņas, apskati un attieksme: <https://kursors.lv/2017/07/01/lattelecom-riga-izbuvejis-lietu-interneta-tiklu/>
- Kvēle, V. (2005). *Grāmatvedības jēdzienu skaidrojošā vārdnīca*. Rīga: Avots.
- Laine, A. M., Leppälä, M., Tarvainen, O., Päätaalo, M. L., Seppänen, R., & Tolvanen, A. (2011). Restoration of Managed Pine Fens: Effect of Hydrology and Vegetation. *Applied Vegetation Science*, 14, 340-349. doi:doi:10.1111/j.1654-109X.2011.01123.x.
- Latvijas Kūdras asociācija. (2021). *Kūdra*. Ielādēts no Latvijas kūdra: <http://www.latvijaskudra.lv/lv/kudra/>
- Latvijas Mobilais Telefons. (2020). *NB-IoT*. Ielādēts no <https://business.lmt.lv/lv/nb-apraksts>
- Latvijas Universitāte. (2018). *MOSYS mobilā aplikācija*. Ielādēts no <https://www.puma.lu.lv/aplikacija/>
- Latvijas valsts meži. (2020). *LGIA topo karte 1:50000*. Ielādēts no Kartes: <https://www.lvmgeo.lv/kartes>
- Lawrence, M., & Jiang, Y. (2017). Porosity, Pore Size Distribution, Micro-structure. *Bioaggregates Based Building Materials*. 23, lpp. 39-71. RILEM State-of-the-Art Reports. doi:10.1007/978-94-024-1031-0\_2
- Le Maresquier, L., Aapala, K., Alanen, A., & Hokkanen, M. (2016). *The Boreal Restoration Tour: Estonia, Latvia and Lithuania*. European Union.
- Leininger, T. D., Ouyang, Y., Xu, D., & Zhang, N. (2016). A system dynamic model to estimate hydrological processes and water use in a eucalypt plantation. *Ecological Engineering*, 86, 290-299. doi:10.1016/j.ecolog.2015.11.008
- Li, D., Liang, Z., Li, B., Lei, X., & Zhou, Y. (2019). Multi-objective calibration of MIKE SHE with SMAP soil moisture datasets. *Hydrology Research*, 50(2), 644-654. doi:10.2166/nh.2018.110

- Li, L., & Simonovic, S. P. (Process). System dynamics model for predicting floods from snowmelt in North America prairie watersheds. *Hydrology*, 16, 2645-2666. doi:10.1001/hhyp/1064
- Liina, R., Lõhmus, A., Leibak, E., Kohv, M., Salm, J.-O., Lõhmus, P., . . . Rannap, R. (2019). Restoration dilemmas between future ecosystem and current species values: The concept and a practical approach in Estonian mires. *Journal of Environmental Management*, 250, 1-8. doi:10.1016/j.jenvman.2019.109439
- Liu, W., Zhang, C., Liu, P., Yan, M., Wnag, B., Zhang, J., & Higgs, R. (2018). Application of Temperature Prediction Based on Neural Network in Intrusion Detection of IoT. *Security and Communication Networks*, 2018, 1-10. doi:https://doi.org/10.1155/2018/1635081
- LMT Innovations. (2020). *IoT sensor gateway*. Ielādēts no <https://innovations.lmt.lv/en/projects/iot-sensor-gateway>
- Lõhmus, A., Leivits, M., Pēterhofs, E., Zizas, R., Hofmanis, H., Ojaste, I., & Kurlavičius, P. (2017). The Capercaillie (Tetrao Urogallus): An Iconic Focal Species for Knowledge-Based Integrative Management and Conservation of Baltic Forests. *Biodiversity and Conservation*(26), 1-21.
- Loliyana, V. D., & Patel, P. L. (2018). Performance evaluation and parameters sensitivity of a distributed hydrological model for a semi-arid catchment in India. *Journal of Earth System Science*, 127(8), 1-26. doi:10.1007/s12040-018-1021-5
- LT&C. (2019). *Guided nature activities promote Soomaa national park*. Ielādēts no Linking Tourism & Conservation: <https://www.ltandc.org/guided-nature-activities-promote-soomaa-national-park/>
- Lufft. (2020). *Technical Data. OTT Parsivel2 - Laser Weather Sensor*. Ielādēts no Precipitation sensors: <https://www.lufft.com/products/precipitation-sensors-287/ott-parsivel2-laser-weather-sensor-2399/productAction/outputAsPdf/>
- Lupiķis, A. (2018). *SEG emisijas kūdrājos ar dažādu zemes lietojuma veidu: pirmā mērījumu gada rezultāti*. Salaspils: LVMI Silava.
- Markert, K. (2020). *Comparing Python and Julia for hydrologic modeling*. Ielādēts no Kel Market: <https://medium.com/@kel.markert/comparing-python-and-julia-for-hydrologic-modeling-7334ffa9534b>

- Martis, M. S. (2006). Validation of Simulation Based Models: A theoretical Outlook. *The Electronic Journal of Business Research Methods*, 4(1), 39-49.
- Mashal, A. F., & Fernald, A. G. (2020). Identifying Capabilities and Potentials of System Dynamics in Hydrology and Water Resources as a Promising Modeling Approach for Water Management. *Water*, 12(1342), 1-23. doi:10.3390/w12051432
- Mekki, M., Bajic, E., Chaxel, F., & Meyer, F. (2018). A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. *ICT Express*, 1-7. doi:https://doi.org/10.1016/j.icte.2017.12.005
- Met Office College. (2020). *How we measure wind*. Ielādēts no Observations: <https://www.metoffice.gov.uk/weather/guides/observations/how-we-measure-wind>
- Miller, S. N., Semmens, D. J., Miller, M., Hernandez, D. C., Goodrich, W. P., Kepner, W. G., & Ebert, D. W. (2002). GIS-based hydrological modeling: the automated geospatial watershed assessment tool. *2nd Federal Integrancy Hydrologic Modeling Conference*, (lpp. 1-12).
- Mind'áš, J. V., Škvarenina, J., & Střelcová, K. (2006). Influence of tree transpiration and mass water balance of mixed mountain forests in the West Carpatians. *Biologia*, 61(19), 305-310. doi:10.2478/s11756-006-0178-6
- Minitab. (2013). *Regression Analysis: How Do I Interpret R-squared and Assess the Goodness-of-fit?* Ielādēts no <https://blog.minitab.com/blog/adventures-in-statistics-2/regression-analysis-how-do-i-interpret-r-squared-and-assess-the-goodness-of-fit>
- Mioduszkewski, W., Povilaitis, A., Querner, E. P., & Ślesicka, A. (2010). Modelling Peatland Hydrology: Three Cases from Northern Europe. *Polish J. of Environ. Stud.*, 19(1), 149-159.
- Moharir, K., Pande, C., & Patil, S. (2017). Inverse modelling of aquifer parameters in basaltic rock with the help of pumping test method using MODFLOW software. *Geoscience Frontiers*, 8(6), 1385-1395. doi:10.1016/j.gsf.2016.11.017
- Mojammadighavam, S. (2017). *Hydrological and Hydraulic Design of Peatland Drainage and Water Treatment Systems for Optimal Control of Diffuse Pollution*. Oulu: University of Oulu.
- Moksony, F. (1990). Small is beautiful. The use and interpretation of R<sup>2</sup> in social research. *Szociológiai Szemle*, 130-138.

- Mwakwate, C. B., Malik, H., Alam, M. M., Moullec, Y. L., Parad, S., & Mumtaz, S. (2019). Narrowband Internet of Things (NB-IoT): From Physical (PHY) and Media Access Control (MAC) Layers Perspectives. *Sensors*, 1-34. doi:10.3390/s19112613
- National Weather Service. (2020). *Wind Speed*. Ielādēts no Search: <https://forecast.weather.gov/glossary.php?word=WIND%20SPEED>
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Srinivasan, J. R., & Williams, J. R. (2002). *Soil and Water Assessment Tool User's Manual*. Texas: Texas Water Resources Institute.
- Ngowi, L., & Mvungi, N. H. (2018). Socio-Technical Systems: Transforming Theory into Practice. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 12(2), 310-316. doi:10.1999/1307-6892/10008768
- NSRC. (2020). *HecRAS*. Ielādēts no Natural Resources Conservation Service: <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/national/water/manage/hydrology/?cid=stelprdb1042484>
- Oerlemans, R., & Vink, R. P. (2010). *Rainfall Interception Experiments and Interception Mapping using Remote Sensing*. Utrecht University.
- Oyeka, I. C., & Ebu, G. U. (2012). Modified Wilcoxon Signed-Rank Test. *Open Journal of Scientifics*, 2, 172-176. doi:10.4236/ojs.2012.22019
- O'Keffe, J., Marcinkowski, P., Utratna, M., Pinewski, M., Kardel, I., Kundzewicz, Z. W., & Okruszko, T. (2019). Modelling Climate Change's Impact on the. *Water*, 11(10), 1-24. doi:<https://doi.org/10.3390/w11102191>
- Onal, A. C., Sezer, O. B., Ozbayoglu, M., & Dogdu, E. (2017). Weather Data Analysis and Sensor Fault Detection Using an Extended IoT Framework with Semantics, Big Data and Machine Learning. *2017 IEEE International Conference on Big Data*, (lpp. 1-10). Boston. doi:10.1109/BigData.2017.8258150
- OOAD. (2020). *Object Oriented Paradigm*. Ielādēts 2020. gada 22. 03 no [https://www.tutorialspoint.com/software\\_architecture\\_design/object\\_oriented\\_paradigm.htm](https://www.tutorialspoint.com/software_architecture_design/object_oriented_paradigm.htm)
- Oosterwoud, M., van der Ploeg, M., & van der Zee, S. (2017). Variation in hydrologic connectivity as a result of microtopography explained by discharge to catchment size relationship. *Hydrological Process*, 31(15), 2683-2699.



- Ozoliņa, V. (2021). *Imitējošās modelēšanas metodes*. Ielādēts no Kvantitatīvās metodes ekonomikā: <https://estudijas.rtu.lv/mod/resource/view.php?id=120783>
- PAIC. (2013). *Hidroloģiskā modelēšana. Projekts "Ķemeru Nacionālā parka hidroloģiskā režīma atjaunošana" LIFE NAT\LV\00016\HIDROPLAN*. Dabas aizsardzības pārvalde.
- Parish, F., Sirin, A., Charman, D., Joosten, H., Minayewa, T., Silvus, M., & Stringer, L. (2008). *Assessment on peatlands, biodiversity and climate change*. Global Environment Centre & Wetlands International.
- Peng, B., Liu, X., Zgang, Y., & Liu, C. (2018). Incorporating vegetation dynamics noticeably improved performance of hydrological model under vegetation greening. *Science of the Total Environment*, 643(2018), 610-622. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.06.233
- Penman, H. L. (1956). Estimating evaporation. *Transactions, American Geophysical Union*, 37(1), 45-50. doi:10.1029/TR037i001p00043
- Pérez-Sánchez, J., Senent-Aparicio, J., Senent-Aparicio, F., Pulido-Velazquez, D., & Srinivasa, R. (2019). Evaluating Hydrological Models for Deriving Water. *Sustainability*, 11, 36. doi:10.3390/su11102872
- Pfannerstill, M., Guse, B., Renuse, D., & Fohrer, N. (2015). Process verification and a hydrological model using a temporal parameter sensitivity analysis. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19, 4365-4376.
- Python Software Foundation. (2021). *Application for Python*. Ielādēts no Python: <https://www.python.org/about/apps/>
- Pokorný, R., & Strojníč, S. (2012). Leaf area index of Norway spruce stands in relation to age and defoliation. *Berskydy*, 173-180.
- Pöldmaa, K., Spirin, V., Miettinen, O., Runnel, K., Savchenko, A., Pärtel, K., & Kõljalg, U. (2019). Fungi from Soomaa National Park: rarities and species new for Estonia. *Folia Cryptogamica Estonica*, 56(128), 1-10. doi:10.12697/fce.2019.56.13
- Powell-Mors, A. (2017). *Object-Oriented Analysis and Design: What it is and how do you use it?* doi:<https://airbrake.io/blog/design-patterns/object-oriented-analysis-and-design>
- Priede, A., & Silamiķele, I. (2015). *Rekomendācijas izstrādātu kūdras purvu renaturalizācijai*. Salaspils: Latvijas Universitātes Bioloģijas institūts.

- Priede, A., Jātnieks, J., Kļaviņa, Ē., & Urtāns, A. V. (2017). *Vadlīnijas aizsargājamo biotopu saglabāšanā Latvijā. 4.sējums. Purvi, avoti un anoksnāji*. Sigulda: Dabas aizsardzības pārvalde.
- Ratcliffe, J. (2014). *Restoration of peatlands drained for forestry*. Alfred Toepfer.
- Rawls, W. J., Brakensiek, K. E., & Saxton, K. E. (1982). Estimation of Soil Water Properties. *Transactions of ASAE*, 25(5), 1316-1320.
- Remm, L., Lõhmus, A., Leibak, E., Kohv, M., Salm, J. O., Lõhmus, P., . . . Rannap, R. (2019). Restoration dilemmas between future ecosystem and current species values: The concept and a practical approach in Estonian mires. *J. Environ. Manage.*, 250, 1-8. doi:10.1016/j.jenvman.2019.109439
- Sarget, R. G. (2011). Verification and Validation of Simulation Models. *Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference* (lpp. 183-198). Phoenix: IEEE.
- Sasso, D. (2020). *The Doppler Effect in Contemporary Physics*. International Laboratory of Contemporary Physics.
- Savant, P., Babitha, R. H., & Shepur, R. (2020). A Review on Water Quality Model QUAL2K. *International Journal of Creative Research Thoughts*, 8(5), 426-432. doi:10.1729/Journal.23582
- Schlyter, P. (2017). *How bright are natural light sources?* Ielādēts no Radiometry and photometry in astronomy: <http://stjarnhimlen.se/comp/radfaq.html#10>
- Schumann, M., & Joosten, H. (2008). *Global Peatland Restoration Manual*. Institute of Botany and Landscape Ecology, Greifswald University.
- Seed Technology Co.,Ltd. (2020). *Groove - Temperature & Humidity Sensor (SHT31)*. Ielādēts no <https://www.seedstudio.com/Grove-Temperature-Humidity-Sensor-SHT31.html>
- Shrestha, A., Nair, A. S., & Indu, J. (2020). Role of precipitation forcing on the uncertainty of land surface model simulated soil moisture estimates. *Journal of Hydrology*, 580, 1-26. doi:10.1016/j.jhydrol.2019.124264
- Shu, L., Xu, Y., & Wu, P. (2017). Groundwater Flow Numeric Simulation Method Based on Uncertainties of MODFLOW Parameters. *Journal of Jilin University*, 47(6), 1803-1809. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.201706203

- Sigfox. (2020). *Coverage*. Ielādēts no <https://www.sigfox.com/en/coverage>
- Software AG. (2020). *Cumulocity IoT capabilities*. Ielādēts no <https://www.softwareag.cloud/site/capability/cumulocity-iot.html#/>
- Srinivasan, R., & Arnold, J. G. (1994). INTEGRATION OF A BASIN-SCALE WATER QUALITY MODEL WITH GIS. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 30(3), 453-462. doi:10.1111/j.1752-1688.1994.tb03304.x
- Srivastava, A. K., Ceglar, A., Zeng, W., Gaiser, T., Mboh, C. M., & Ewert, F. (2020). The implication of different sets of climate variables on regional maize yield simulation. *Atmosphere*, 11(2), 1-15. doi:10.3390/atmos11020180
- StackExchange. (2017). *Convert air vapor pressure to relative humidity*. Ielādēts no Questions: <https://earthscience.stackexchange.com/questions/9868/convert-air-vapor-pressure-to-relative-humidity>
- Staes, J., Rubarenzya, M. H., Meire, P., & Willems, P. (2009). Modelling hydrological effects of wetland restoration. *Water Science & Technology*, 433-441. doi:10.2166/wst.2009.884
- Stark, M. (2008). Peatlands and Climate Change. *International Peatland Society*, 223.
- Stockholm Environment Institute. (2021). *QUAL2K Overview*. Ielādēts no weap21: [https://www.weap21.org/WebHelp/Overview\\_Q2K.htm](https://www.weap21.org/WebHelp/Overview_Q2K.htm)
- Stockholm Environmental Institute. (2021). *Why WEAP?* Ielādēts no Water Evaluation And Planning: <https://www.weap21.org/index.asp?action=201>
- Stracher, G. B., Prakash, A., & Rein, G. (2016). *Coal and Peat Fires*. Elsevier Science. doi:<https://doi.org/10.1016/C2010-0-68845-6>
- Sumida, A., Watanabe, T., & Miyaura, T. (2018). Interannual variability of leaf area index of an evergreen conifer stand was affected by carry-over effects from recent climate conditions. *Scientific Reports*, 1-11. doi:DOI:10.1038/s41598-018-31672-3
- SWAT. (2021). *Soil & Water Assesment Tool*. Ielādēts no <https://swat.tamu.edu/>
- Swedish Meteorological and Hydrological Institute. (2020. gada 05. 02). Ielādēts no Rivers and lakes: [http://www.smhi.net/hype/wiki/doku.php?id=start:hype\\_model\\_description:hype\\_routing](http://www.smhi.net/hype/wiki/doku.php?id=start:hype_model_description:hype_routing)

- Takami, G., Tokuoka, M., Goto, H., & Nozaka, Y. (2016). Machine Learning Applied to Sensor Data Analysis. *Yokogawa Technical Report English Edition*, 59(1), 27-30.
- Tektronix. (2015). *11 Power Consumption Measurement Techniques*.
- tet. (2020). *Pirmais lietu interneta tīkls Latvijā*. Ielādēts no <https://iot.tet.lv/lv>
- Texas Instruments Inc. (2020). *NB-IoT Power Topologies for Smart Meter Wireless Modules Using Primary Cells Reference Design*. Dallas.
- Theuro inglise Vikipēdist. (2007). *Europe map estonia*. Ielādēts no [https://et.wikipedia.org/wiki/Fail:Europe\\_map\\_estonia.png](https://et.wikipedia.org/wiki/Fail:Europe_map_estonia.png)
- Thomas, R. N. (2012). Reforestation of the mission reach of the San Antonio river. (lpp. 225-230). Dallas: 41st International Erosion Control Association Annual Conference 2010.
- Tignor, W. W., & Myrtveit, M. (2000). Object Oriented Design Patterns And System Dynamics. *Proceedings of the 18th International Conference of the System Dynamics*, 1-37.
- Tolera, M. B., & Chung, I.-M. (2021). Integrated Hydrological Analysis of Little Akaki Watershed Using SWAT-MODFLOW, Ethiopia. *Applied Sciences*, 11, 1-18. doi:10.3390/app11136011
- Toolbox, T. E. (2017). *Rivers and lakes*. Ielādēts no [http://www.engineeringtoolbox.com/evaporation-water-surface-d\\_690.html](http://www.engineeringtoolbox.com/evaporation-water-surface-d_690.html)
- Toolbox, T. E. (2017). *Rivers and lakes*. Ielādēts no [http://www.engineeringtoolbox.com/evaporation-water-surface-d\\_690.html](http://www.engineeringtoolbox.com/evaporation-water-surface-d_690.html)
- Tooman, H., & Ruukel, A. (2012). Sustainable development of a remote tourism destination. The case of Soomaa National Park, Estonia. *Tourism Development in Post-Soviet Nations: From Communism to Capitalism*, 276-295.
- Tooman, H., & Ruukel, A. (2012). Sustainable development of a remote tourism destination. The case study of Soomaa National Park, Estonia. *Sustainable development. Case studies from developing regions of the world*, 276-295.
- topographic-map.com. (2020). *Soomaa National Park*. Ielādēts no <https://en-ca.topographic-map.com/maps/nz32/Soomaa-National-Park/>
- Tufts University. (2020). *Welcome to the QUAL2K homepage*. Ielādēts no QUAL2K: <http://www.qual2k.com/home/default.html>

- Valsts Vides ģeoloģijas un meteoroloģijas centrs. (2020). *Novērojumu stacijas*. Ielādēts no Novērojumi: <https://www.meteo.lv/meteorologijas-staciju-karte/?nid=460>
- van Dijk, A., & Bruijnzeel, L. A. (2001). Modelling rainfall interception by vegetation of variable density using an adapted analytical model. Part 1. Model description. *Journal of Hydrology*, 247(2001), 230-238.
- van Zyl, T. L., Simons, I., & McFerren, G. (2009). The Sensor Web: systems of sensor systems. *International Journal of Digital Earth*, 2(1), 16-30. doi:10.1080/17538940802439549
- VARAM. (2018). *Situācijas apraksts*. Vides aizsardzības un reģionālās attīstības ministrija.
- Vides risinājumu institūts. (2014). *Hidroloģiskā režīma atjaunošana purvainos mežos Gulbjusalas purva dabas liegumā*.
- Vymazal, J. (2010). *Water and Nutrient Management in Natural and Constructed Wetlands*. Springer. doi:10.1007/978-90-481-9585-5
- Vodafone Group. (2017). *Narrowband IoT: pushing the boundaries of IoT*.
- Wang, Y., Jiang, R., Xie, J., Zhao, Y., Yan, D., & Yang, S. (2019). Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Model: A Systemic Review. *Journal of Coastal Research*, 93, 22-30. doi:10.2112/SI93-004.1
- Wei, Z., Zhang, B., Liu, Y., & Xu, D. (2018). The Application of a Modified Version of the SWAT Model at the Daily Temporal Scale and the Hydrological Response unit Spatial Scale: A Case Study Covering an Irrigation District in the Hei River Basin. *Water*, 10, 1-22. doi:10.3390/w10081064
- World Economic Forum. (2020). *Nature Risk Rising: Why the Crisis Engulfing Nature Matters for Business and the Economy*. Geneva.
- Xie, X., Wu, D., Liu, S., & Li, R. (2017). IoT Data Analytics Using Deep Learning. 1-11.
- Zheng, G., & Moskal, M. (2009). Retrieving Leaf Area Index (LAI) Using Remote Sensing: Theories, Methods and Sensors. *Sensors*, 9, 2719-2745. doi:10.3390/s90402719

## PIELIKUMI

### I PIELIKUMS. Sensoru datu apstrādes *Python* skripts

```
1 #!/usr/bin/python
2
3 # Version: 1.03
4 # Datetime: 2020.10.14 20.45:00
5
6 import requests
7 from datetime import datetime, timezone, timedelta
8
9
10 # Convert UTC time to system local timezone
11 def utc_to_local(utc_dt):
12     return utc_dt.replace(tzinfo=timezone.utc).astimezone(tz=None)
13
14
15 # Convert datetime object to date str
16 def datetime_to_date(d):
17     return str(d.year)+'-'+str('{:02}'.format(d.month))+'-'+str('{:02}'.format(d.day))
18
19
20 # Email configuration
21 smtp_server = 'smtp.gmail.com'
22 smtp_port = 465 # For SSL
23 sender_email = 'cumulocity.report@gmail.com'
24 sender_password = 'XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX',
25 receiver_email = 'oskars.java@va.lv'
26
27 # Request parameters
28 source = '80585'
29 periodDays = 7
30 headers = {'Authorization': 'Basic b3NrYXJzQGx1ZGVuZXMubHY6TnIuMjAyMC8xNg=='}
31 dateFrom = datetime_to_date(datetime.now() - timedelta(days=periodDays)) + 'T00:00:00%2B03:00'
32 dateTo = (datetime_to_date(datetime.now() - timedelta(days=1))) + 'T23:59:59%2B03:00'
33
```



```

34 baseUrl = 'https://lmtiot.eu-latest.cumulocity.com/measurement/measurements/series'
35 baseUrl += '?aggregationType=HOURLY&pageSize=9999999999999999&revert=true&source=' + source
36 baseUrl += '&dateFrom=' + dateFrom + '&dateTo=' + dateTo
37
38 report_filename = 'cumulocity-report-' + datetime_to_date(datetime.now() - timedelta(days=periodDays)) + '_-' + datetime_to_date(datetime.now() -
timedelta(days=1)) + ".csv"
39
40
41 def send_email_report(report_csv_contents):
42     import email, smtplib, ssl
43     from email import encoders
44     from email.mime.base import MIMEBase
45     from email.mime.multipart import MIMEMultipart
46     from email.mime.text import MIMEText
47
48     # Create a multipart message and set headers
49     message = MIMEMultipart()
50     message["From"] = sender_email
51     message["To"] = receiver_email
52     message["Subject"] = "Cumulocity report: " + report_filename
53
54     # Add email attachment
55     part = MIMEBase("application", "octet-stream")
56     part.set_payload(report_csv_contents)
57     encoders.encode_base64(part)
58     part.add_header(
59         "Content-Disposition",
60         f"attachment; filename= {report_filename}",
61     )
62
63     # Add attachment to message and convert message to string
64     message.attach(part)
65     text = message.as_string()
66
67     # Log in to server using secure context and send email
68     context = ssl.create_default_context()
69     with smtplib.SMTP_SSL(smtp_server, smtp_port, context=context) as server:
70         server.login(sender_email, sender_password)
71         server.sendmail(sender_email, receiver_email, text)
72

```



```

73
74 # Get Humidity data
75 humidityUrl = baseUrl + '&series=Humidity.Relative+Humidity'
76 humidityResp = requests.get(url=humidityUrl, headers=headers).json()
77
78 # Temperature data
79 temperatureUrl = baseUrl + '&series=c8y_TemperatureMeasurement.T'
80 temperatureResp = requests.get(url=temperatureUrl, headers=headers).json()
81
82 # Create period dictionary template
83 sensorReadings = {}
84 for i in reversed(range(periodDays)):
85     d = (datetime.now() - timedelta(days=i+1))
86     if d not in sensorReadings:
87         sensorReadings[datetime_to_date(d)] = []
88
89 # Regroup readings by date (reading time is left in utc)
90 for time in humidityResp['values']:
91     df = utc_to_local(datetime.strptime(time, '%Y-%m-%dT%H:%M:%S.%fZ'))
92     if datetime_to_date(df) not in sensorReadings:
93         sensorReadings[datetime_to_date(df)] = []
94
95     sensorReadings[datetime_to_date(df)].append(time)
96
97 # Calculate avg values
98 avgHumidity = {}
99 avgTemp = {}
100 mHumidity = {}
101 mTemp = {}
102 for date in sensorReadings.keys():
103     sumHumidity = cHumidity = sumTemp = cTemp = sumHumidityM = cHumidityM = sumTempM = cTempM = 0
104     for time in sensorReadings[date]:
105         if time in humidityResp['values']:
106             cHumidity += 1
107             sumHumidity += ((humidityResp['values'][time][0]['min'] + humidityResp['values'][time][0]['max']) / 2)
108
109         if time in temperatureResp['values']:
110             cTemp += 1
111             sumTemp += ((temperatureResp['values'][time][0]['min'] + temperatureResp['values'][time][0]['max']) / 2)
112

```

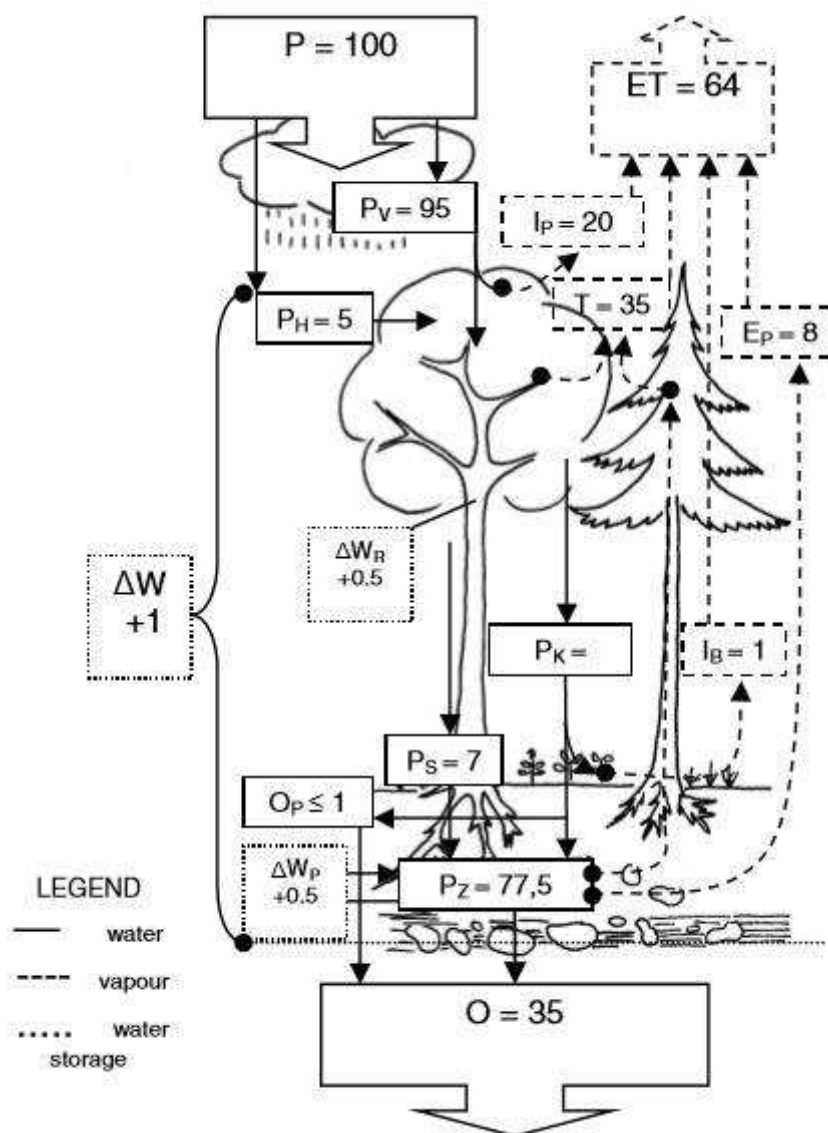
```

113     # Manheimer method algorithm
114     hourM = utc_to_local(datetime.strptime(time, '%Y-%m-%dT%H:%M:%S.%fZ')).hour
115     if hourM in [7, 14, 21]:
116         if time in humidityResp['values']:
117             cHumidityM += 1
118             sumHumidityM += ((humidityResp['values'][time][0]['min'] + humidityResp['values'][time][0]['max']) / 2)
119
120         if time in temperatureResp['values']:
121             cTempM += 1
122             sumTempM += ((temperatureResp['values'][time][0]['min'] + temperatureResp['values'][time][0]['max']) / 2)
123     if hourM in [21]:
124         if time in humidityResp['values']:
125             cHumidityM += 1
126             sumHumidityM += ((humidityResp['values'][time][0]['min'] + humidityResp['values'][time][0]['max']) / 2)
127
128         if time in temperatureResp['values']:
129             cTempM += 1
130             sumTempM += ((temperatureResp['values'][time][0]['min'] + temperatureResp['values'][time][0]['max']) / 2)
131
132     # Save calculation values
133     avgHumidity[date] = (sumHumidity/cHumidity) if cHumidity > 0 else 0
134     avgTemp[date] = (sumTemp/cTemp) if cTemp > 0 else 0
135     mHumidity[date] = (sumHumidityM/cHumidityM) if cHumidityM > 0 else 0
136     mTemp[date] = (sumTempM/cTempM) if cTempM > 0 else 0
137
138     # Prepare report in CSV format
139     csv_report = "Date";"Average humidity";"Average Temperature";"Manheimer humidity";"Manheimer temperature"\n'
140     for date in sensorReadings.keys():
141         csv_report += date + ';' + '{:05.2f}'.format(avgHumidity[date]) + ';' + '{:05.2f}'.format(avgTemp[date]) + ';' + '{:05.2f}'.format(mHumidity[date]) + ';' + '{:05.2f}'.format(mTemp[date]) + '\n'
142
143     # Print report
144     #print (csv_report)
145
146     # Send CSV report by email
147     send_email_report(csv_report)
148

```

*Avots: autors*

## II PIELIKUMS. Jaukto koku meža ūdens bilance Karpatu kalnos



— ūdens

- - - tvaiks

... ūdens uzglabāšana

$P$  – nokrišņi atklātā laukā

$P_V$  – vertikālie nokrišņi

$P_H$  – horizontālie nokrišņi

$P_K$  – līdz zemei nonākušie nokrišņi

$P_Z$  – infiltrācija zemē un augsnē

$O_p$  – virszemes notece

$O$  – pazemes notece (sānu plūsma un infiltrācija augsnes apakškārtā)

$I_B$  – intercepcija augu un sīkrūmu klājā

$I_P$  – intercepcija koku vainagos

$E_P$  – iztvaikošana no augsnes

$T$  – iztvaikošana no kokiem

$E_T$  – evapotranspirācija

$W_R$  – ūdens sastāva maiņa fitomasā

$W_P$  – ūdens sastāva maiņa augsnē un kritušajās lapās

$W$  – izmaiņas fitomasā un saknēs esošā ūdens masā laika periodā

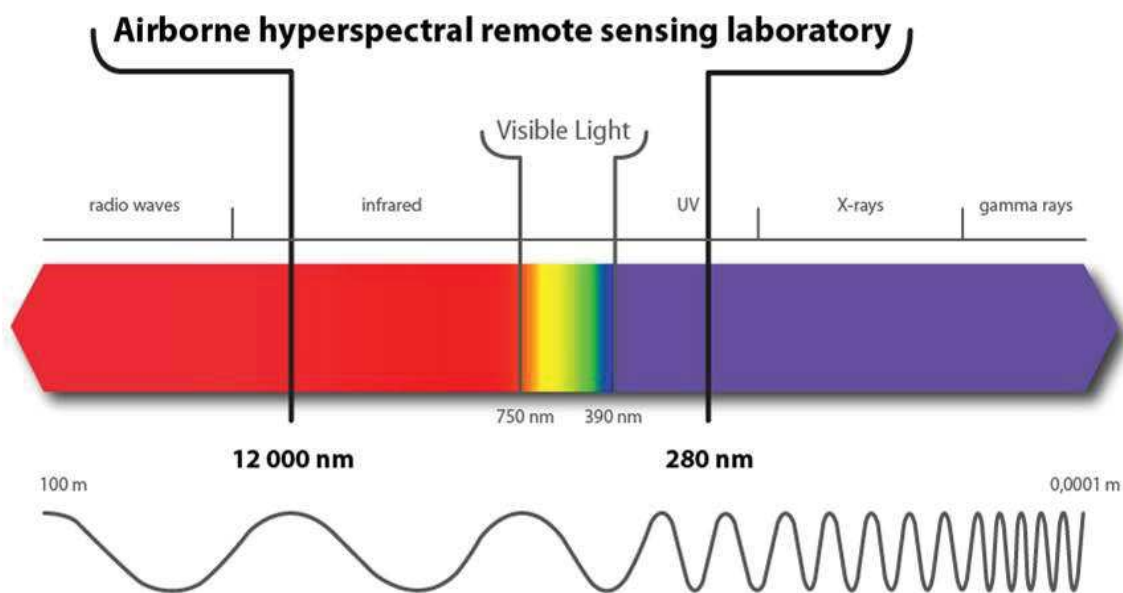
*Avots: (Mind'āš 2006)*

### III PIELIKUMS. Augšnes īpašību tabula

USDA Textural Classification	Total Porosity/ Saturation $\theta_s$ (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	Effective Porosity/ Saturation $\theta_e$ (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	Field Capacity Saturation $\theta_f$ (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	Wilting Point Saturation $\theta_{wp}$ (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	Residual Saturation $\theta_r$ (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	Bubbling Pressure Geometric Mean $\psi_b$ (cm)	Pore Size Distribution Arithmetic Mean $\lambda$ (cm/cm)	Saturated Hydraulic Conductivity (multiply by 0.5 for GA methods) $K_s$ (cm/h)	Wetting Front Suction Head (Capillary Head) $\psi_f$ (cm)
Sand	0.437	0.417	0.091	0.033	0.02	7.26	0.694	23.56	4.95
Loamy sand	0.437	0.401	0.125	0.055	0.035	8.69	0.553	5.98	6.13
Sandy loam	0.453	0.412	0.207	0.095	0.041	14.66	0.378	2.18	11.01
Loam	0.463	0.434	0.27	0.117	0.027	11.15	0.252	1.32	8.89
Silt loam	0.501	0.486	0.33	0.133	0.015	20.79	0.234	0.68	16.68
Sandy clay loam	0.398	0.330	0.255	0.148	0.068	28.08	0.319	0.30	21.85
Clay loam	0.464	0.390	0.318	0.197	0.075	25.89	0.242	0.20	20.88
Silty clay loam	0.471	0.432	0.366	0.208	0.040	32.56	0.177	0.20	27.30
Sandy clay	0.430	0.321	0.339	0.239	0.109	29.17	0.223	0.12	23.90
Silty clay	0.479	0.423	0.387	0.250	0.056	34.19	0.150	0.10	29.22
Clay	0.475	0.385	0.396	0.272	0.090	37.30	0.165	0.06	31.63

*Autors: (Rawls, Brakensiek, & Saxton, 1982)*

# IV PIELIKUMS. ARSENAL sensorsitēmu kopējais darbības diapazons



Avots: *Vides risinājumu institūts*







## VI PIELIKUMS. Purva hidroloģisko sistēmu imitējošā modeļa *Stella*

### *Architect* vienādojumu pārskats

Top-Level Model:

```
Csnow(t) = Csnow(t - dt) + (St - Ms - Es) * dt {NON-NEGATIVE}
  INIT Csnow = 0
  INFLOWS:
    St = Mežaudze_ziemā-Isnow {UNIFLOW}
  OUTFLOWS:
    Ms = 0.2*Ta+0.026*R {UNIFLOW}
    Es = (0.18+0.098*v)*(Xs-X) {UNIFLOW}
fp_tvertne(t) = fp_tvertne(t - dt) + (fp_ieeja - fp_izeja) * dt {NON-NEGATIVE}
  INIT fp_tvertne = 0
  INFLOWS:
    fp_ieeja = IF Oip>=Osp OR Ssw>Ksp THEN fp ELSE 0 {UNIFLOW}
  OUTFLOWS:
    fp_izeja = IF Ms=0 AND Rt=0 THEN fp_tvertne ELSE 0 {UNIFLOW}
Mežaudze_vasarā(t) = Mežaudze_vasarā(t - dt) + (Lietus - Irain - Rt) * dt {NON-NEGATIVE}
  INIT Mežaudze_vasarā = 0<=Smax
  INFLOWS:
    Lietus = P {UNIFLOW}
  OUTFLOWS:
    Irain = Cp*Smax*(1-EXP(-0.6*(P/Smax))) {UNIFLOW}
    Rt = Mežaudze_vasarā-Irain {UNIFLOW}
Mežaudze_ziemā(t) = Mežaudze_ziemā(t - dt) + (Sniegs - Isnow - St) * dt {NON-NEGATIVE}
  INIT Mežaudze_ziemā = 0<=B
  INFLOWS:
    Sniegs = Ps {UNIFLOW}
  OUTFLOWS:
    Isnow = Cp*B*(1-EXP(-f*Ps/B)) {UNIFLOW}
    St = Mežaudze_ziemā-Isnow {UNIFLOW}
No_tvertne(t) = No_tvertne(t - dt) + (No_ieeja - No_izeja) * dt {NON-NEGATIVE}
  INIT No_tvertne = 0
  INFLOWS:
    No_ieeja = No {UNIFLOW}
  OUTFLOWS:
    No_izeja = IF No_ieeja=1 THEN 0 ELSE No_tvertne {UNIFLOW}
S_t(t) = S_t(t - dt) + (ft - fs) * dt {NON-NEGATIVE}
  INIT S_t = 2185
  INFLOWS:
    ft = IF Oip<=Srp THEN 0 ELSE IF Oit<Oet THEN 0 ELSE IF Oit>Ost THEN
0 ELSE (Smp/Smt)*It {UNIFLOW}
  OUTFLOWS:
    fs = IF Oit>Oet THEN (Smt/Ofs)*Is ELSE 0 {UNIFLOW}
Sc(t) = Sc(t - dt) + (Uzsūkšana_caur_saknēm - Ec) * dt {NON-NEGATIVE}
  INIT Sc = SL*LAI
  INFLOWS:
    Uzsūkšana_caur_saknēm = Ec {UNIFLOW}
  OUTFLOWS:
    Ec = Cp*PET {UNIFLOW}
Sp(t) = Sp(t - dt) + (fp - ft - Uzsūkšana_caur_saknēm - ETp) * dt {NON-NEGATIVE}
  INIT Sp = 746.22
  INFLOWS:
    fp = IF Oip<Osp AND Ssw<Ksp AND Ssw<((1-Oip/Osp)*DP) THEN Ssw*CtP
ELSE IF Oip<Osp AND Ssw<Ksp AND Ssw>=((1-Oip/Osp)*DP) THEN (1-
```

```

Oip/Osp)*DP*CtP ELSE IF Oip>=Osp THEN 0 ELSE (Ksp*(1-
((Mp)*(Sücējspēks))/F_P))*CtP {UNIFLOW}
OUTFLOWS:
ft = IF Oip<=Srp THEN 0 ELSE IF Oit<Oet THEN 0 ELSE IF Oit>Ost THEN
0 ELSE (Smp/Smt)*It {UNIFLOW}
Uzsūkšana_caur_saknēm = Ec {UNIFLOW}
ETp = IF Oip>Srp THEN C_P*(Smp^Lambda)*Ta*CtP ELSE 0 {UNIFLOW}
Ssw(t) = Ssw(t - dt) + (Ms + Rt - fp - Of) * dt {NON-NEGATIVE}
INIT Ssw = 0
DOCUMENT: 669,38
INFLOWS:
Ms = 0.2*Ta+0.026*R {UNIFLOW}
Rt = Mežaudze_vasarā-Irain {UNIFLOW}
OUTFLOWS:
fp = IF Oip<Osp AND Ssw<Ksp AND Ssw<((1-Oip/Osp)*DP) THEN Ssw*CtP
ELSE IF Oip<Osp AND Ssw<Ksp AND Ssw>=((1-Oip/Osp)*DP) THEN (1-
Oip/Osp)*DP*CtP ELSE IF Oip>=Osp THEN 0 ELSE (Ksp*(1-
((Mp)*(Sücējspēks))/F_P))*CtP {UNIFLOW}
Of = (Ssw-fp)*C_slope {UNIFLOW}
Ta_tvertne(t) = Ta_tvertne(t - dt) + (Ta_ieeja - Ta_izeja) * dt {NON-
NEGATIVE}
INIT Ta_tvertne = 0
INFLOWS:
Ta_ieeja = Ta_2 {UNIFLOW}
OUTFLOWS:
Ta_izeja = IF Ta_ieeja>0 AND N<3 THEN 0 ELSE Ta_tvertne {UNIFLOW}
B = Lr*m*LAI
UNITS: mm
C_P = 0.019
C_slope = 0.92
ci = 2.9
Cp = 1-EXP(-k*LAI)
UNITS: mm
CtP = IF Ti<Timax THEN (Ti/Timax)^ci ELSE 1
D_T = 5000
DP = 800
UNITS: mm
El = 0.47*(0.5+0.01*"m/s_uz_mpd")*(Xw-X)
UNITS: mm
f = 0.2
F_P = IF Rt>0 OR Ssw>0 THEN fp_tvertne ELSE 0
Is = 0.0014
It = 0.01
k = 0.23
UNITS: coefficient
Ksp = GRAPH(Sp)
(0.0, 16), (88.8888888889, 16), (177.777777778, 16), (266.666666667, 16),
(355.555555556, 16), (444.444444444, 16), (533.333333333, 100),
(622.222222222, 500), (711.111111111, 700), (800.0, 800)
UNITS: mm/day
LAI = IF TIME<288 THEN LAI1 ELSE LAI2
UNITS: coefficient
LAI1 = 3.187*NDVI+0.792
LAI2 = 3.187*NDVI2+0.792
Lambda = 3.9
Lr = IF Ta>-1 THEN 4 ELSE IF Ta<=-3 THEN 1 ELSE 1.5*Ta+5.5
UNITS: mm
m = 5
UNITS: mm
"m/s_uz_mpd" = v/0.0186266667
Mp = Osp-Oip
Mt = IF Oit>=Ost THEN Srt ELSE Ost-Oit
N = IF Ta_2>0 THEN 0 ELSE No_tvertne

```

```

NDVI = (NIR-red)/(NIR+red)
NDVI2 = (NIR2-red2)/(NIR2+red2)
NIR = 85
NIR2 = 99
No = IF Ta_2<=0 THEN 1 ELSE 0
Oet = 0.401
Ofs = 0.22
Oip = Sp/DP
Oit = S_t/D_T
Osp = 0.998
Ost = 0.437
P = GRAPH(TIME)
  UNITS: mm
PET = (Ta_likne/(Ta_likne+0.66))*(R/(2.5-
0.0024*Ta))+0.66/(Ta_likne+0.66)*(0.26*(1+0.536*v))*(Xw-X)
  UNITS: mm
Ps = GRAPH(TIME)
  UNITS: cal
red = 29
red2 = 53
RH = GRAPH(TIME)
SL = 0.58
Smax = 0.935+0.498*LAI-0.00575*(LAI^2)
  UNITS: mm
Smp = (Sp/Snp-Srp)/(1-Srp)
  UNITS: mm
Smt = (S_t/Snt-Srt)/(1-Srt)
Snp = 720
  UNITS: mm
Snt = 2005
Srp = 0.4
Srt = 0.035
Sūcējspēks = 400
  UNITS: mm
Ta = GRAPH(TIME)
  UNITS: degC
Ta_2 = GRAPH(TIME)
Ta_likne = GRAPH(Ta)
(0.00, 0.300), (2.50, 0.380), (5.00, 0.450), (7.50, 0.540), (10.00, 0.600),
(12.50, 0.710), (15.00, 0.800), (17.50, 0.950), (20.00, 1.050), (22.50,
1.240), (25.00, 1.400), (27.50, 1.610), (30.00, 1.850), (32.50, 2.070),
(35.00, 2.350), (37.50, 2.620), (40.00, 2.950), (42.50, 3.280), (45.00,
3.600)
Ti = IF N>=2 THEN 0 ELSE IF Ta_2>0 AND N<2 THEN Ta_tvertne ELSE 0
Timax = 8
v = GRAPH(TIME)
  UNITS: m/s
X = Xw*RH/100
Xs = Xw
Xw = 6.1078*EXP((17.2694*Ta)/(Ta+237.3))
  DOCUMENT: Penman PET
{ The model has 92 (92) variables (array expansion in parens).
  In root model and 0 additional modules with 0 sectors.
  Stocks: 10 (10) Flows: 21 (21) Converters: 61 (61)
  Constants: 26 (26) Equations: 56 (56) Graphics: 9 (9)}

```

*Avots: autors*