

**Elina Ries**

**SÜGISESE JA TALVISE BIOMASSI  
EEMALDAMISE MÕJU LAIALEHISE  
HUNDINUIA (*TYPHA LATIFOLIA*)  
TAASTUMISELE PÕLLUMAJANDUSLIKKU  
HAJUKOORMUST VÄHENDAVAS  
AVAVEELISES TEHISMÄRGALAS**

LÕPUTÖÖ

Tehnoloogia ja ringmajanduse instituut

Keskkonnatehnoloogia ja -juhtimine

Juhendajad: Jürgen Sarjas, *MSc*

Kuno Kasak, *PhD*

Kaie Eha, *MSc*

Tallinn 2026

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks**

Mina, Elina Ries

annan Tallinna Tehnikakõrgkoolile (edaspidi kõrgkool) tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

Sügisese ja talvise biomassi eemaldamise mõju laialehise hundinuia (*Typha latifolia*) taastumisele põllumajanduslikku hajukoormust vähendavas avaveelises tehismärgalas

- 1) reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada ja teha üldsusele kättesaadavaks Tallinna Tehnikakõrgkooli digiarhiivi DSpace kaudu;
- 2) reprodutseerimiseks pärast piirangu lõppu juhul, kui instituudi direktori korraldusega on kehtestatud lõputöö avaldamisele tähtajaline piirang.

Olen teadlik, et nimetatud õigused jäävad alles ka autorile ja kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid ega muid õigusi.

### **Autorideklaratsioon**

Mina, Elina Ries

tõendan, et lõputöö on minu kirjutatud. Töö koostamisel kasutatud teiste autorite, sh juhendaja ja iseenda varasematele teostele on viidatud õiguspäraselt.

Kõik isiklikud ja varalised autoriõigused käesoleva lõputöö osas kuuluvad autorile ainuisikuliselt ning need on kaitstud autoriõiguse seadusega.

*(allkirjastatud digitaalselt)*

Juhendajad Jürgen Sarjas, Kuno Kasak, Kaie Eha

Töö vastab lõputööle esitatavatele nõuetele.

*(allkirjastatud digitaalselt)*

Lõputöö on kaitsmisele lubatud instituudi direktori korraldusega.

# SISUKORD

SISSEJUHATUS .....	4
1 TEHISMÄRGALA .....	6
1.1 Aveveeline tehismärgala .....	6
1.2 Tööprotsessid .....	7
1.3 Majandamine .....	9
2 LAIALEHINE HUNDINUUI.....	11
2.1 Bioloogia .....	11
2.2 Hundinuia kasutamise potentsiaal .....	12
3 MATERJAL JA METOODIKA .....	13
3.1 Uurimisala kirjeldus .....	13
3.2 Ilmastik .....	14
3.3 Biomass ja lehepindala indeks .....	15
3.4 Välitööd .....	16
3.5 Laboratoorsed tööd .....	17
3.6 Andmete analüüs ja autori roll uuringus .....	17
4 TULEMUSED JA ARUTELU .....	18
4.1 Esmased tähelepanekud.....	18
4.2 Biomassi eemaldamise mõju taastumisele .....	19
4.3 Toitainete (C ja N) sisaldus ja jaotumine eri aegadel.....	23
KOKKUVÕTE .....	25
SUMMARY.....	27
VIIDATUD ALLIKAD.....	28
Lisa 1. Aineringlus avaveelistes tehismärgalades .....	34
Lisa 2. Vända kraavile rajatud tehismärgalasüsteem .....	35
Lisa 3. Taastunud laialehise hundinuia C:N suhe märgala kaupa. ....	36

## SISSEJUHATUS

Kuigi Eesti veekogumite seisundit mõjutavad mitmed tegurid, on põllumajanduslik hajukoormus üks olulisemaid surveallikaid nii pinna- kui ka põhjaveele [1], [2], [3]. Erinevalt punktkoormusest, millel on täpne asukoht, kujuneb hajukoormus ulatuslikelt aladelt ning on seetõttu raskemini tuvastatav ja kontrolli all hoitav [4]. Põllumajandusmaadel kasutatavad mineraal- ja orgaanilised väetised sisaldavad lämmastiku- ja fosforiühendeid, millest osa kandub pinnaveekogudesse ning võib leostuda ka põhjavette [3, lk 6–9], [5]. Hajukoormust võimendavad nii majanduslik areng kui ka kliimamuutused [6, lk 122]. Intensiivsem põllumajandamine suurendab väetiste kasutust ning külmunud mullakihi ja püsiva lumikattega talveperioodide harvenemine soodustab lämmastikuühendite jätkuvat mineraliseerumist ning leostumist kogu talve vältel, aga eriti paduvihmadega kevadest sügiseni [6, lk 122]. Selline liigne toitainete sissekanne soodustab pinnaveekogumite eutrofeerumist ehk kinnikasvamist [3, lk 6–9].

Eutrofeerumine on oluline probleem nii Eesti rannikuvees kui ka Läänemere piirkonnas tervikuna, kuna veekogudes esineb märkimisväärne toitainete üleküllus [1], [7], [8]. See protsess halvendab vee kvaliteeti ning põhjustab muutusi veeökosüsteemides, sealhulgas hapnikupuudust ja bioloogilise mitmekesisuse vähenemist, mis viib veekogumite ökoloogilise seisundi languseni [7]. Keskkonnaportaali ja Keskkonnaagentuuri 2024. aasta andmetel on Eesti põhjaveekogumite seisund valdavalt hea, mõningate eranditega nitraaditundlikel aladel [1], [8]. Märksa kriitilisem on aga pinnaveekogumite olukord, millest vaid pooled vastavad heale seisundile [1], [8]. Seega hetkeseis ei ole veel kooskõlas Euroopa Liidu veepoliitika raamdirektiivi (2000/60/EÜ) eesmärgiga tagada kõikide pinna- ja põhjaveekogumite hea seisund hiljemalt 2027. aastaks [9]. Põllumajandusliku hajukoormuse ohjamisel on oluline roll Euroopa Liidu nitraadidirektiivil (91/676/EMÜ), mille eesmärk on kaitsta veekogusid põllumajandusest pärineva nitraadireostuse eest [10]. Nende direktiivide rakendamine Eestis toimub veeseaduse alusel (§ 305) ning riiklike meetmete kaudu [11]. Kuigi Eesti rakendab direktiivist tulenevaid tegevusprogramme kogu riigi ulatuses, esineb endiselt piirkondlikku nitraadireostust ning veekogude seisundid ei ole ühtlaselt head [12]. Lisaks rõhutavad hajukoormuse vähendamise vajadust ja keskkonda säästva tehnoloogia rakendamist Veemajanduskava 2022–2027 [6].

Üheks keskkonnasäästlikuks tehnoloogiaks põllumajandusliku hajukoormuse leevendamisel on tehismärgalade rajamine. Käesolevas töös keskendutakse avaveelistele tehismärgaladele, mis toimivad looduslike märgalade analoogidena. Sellistes süsteemides toimub liigsete toitainete eemaldamine peamiselt setitamise, taimede poolt omastamise, mikrobioloogiliste protsesside ning substraadis toimuva sidumise kaudu. [13], [14], [15]

Makrofüütne taimestik aitab aeglustada voolukiirust ja seeläbi soodustada settimist, loob soodsad tingimused mikroorganismidele ja omastab kasvuperioodil toitaineid [13]. Laialehine hundinui (*Typha latifolia*) on tehismärgalades väärtuslik taimeliik tänu oma suurele biomassi tootlikkusele ning võimele siduda märkimisväärses koguses toitaineid [16], [17]. Taim on oluline ka selle poolest, et suudab hapnikku transportida risosfääri, mis toetab mikroobseid protsesse ja näiteks metaani oksüdatsiooni [18], [19]. Samas on oluline märkida, et kui taimede poolt omastatud toitained jäävad laguneva biomassi kujul süsteemi, võivad need mineraliseerumise käigus uuesti veesambasse vabaneda [16]. Seetõttu on tehismärgalade pikaajalise toimivuse ja toitainete sidumise tõhususe tagamiseks oluline taimse biomassi regulaarne hooldamine [20]. Koristatud biomassi saaks omakorda väärintada energeetikas või ehitusmaterjalide tootmisel [21].

Parasvöötme tehismärgalades on taimestiku hooldamine ja biomassi eemaldamise ajastus kriitilise tähtsusega, sest kasvuperioodi lõpus liiguvad toitained maapealsest biomassist risoomidesse [16]. Liiga varane eemaldamine võib vähendada taimede energiavarusid ja pärssida kevadist taastumist, mistõttu eelistatakse sageli hilissügist, talvist või varakevadist hooldust [16]. Nende protsesside parem mõistmine on möödapääsmatu nii märgalade hoolduspraktikate optimeerimiseks kui ka pikaajalise toitainete sidumise tagamiseks.

Varasemad uuringud on käsitlenud biomassi eemaldamise mõju märgalade toimimisele [22], sealhulgas toitainete ärastusele [23], raskmetallide sidumisele [18], kasvuhoonegaaside emissioonidele [23], [24] ning biomassi edasisele kasutamisele [25]. Samuti on uuritud erinevaid koristusperioode, kuid taimede taastumist pärast biomassi eemaldamist on seni vähe käsitletud [16], [26].

Lõputöö eesmärk on selgitada välja biomassi koristusaja (sügis vs talv) mõju laialehise hundinuia taastumisele.

Eesmärgi saavutamiseks püstitati järgmised uurimisküsimused:

1. Mil määral mõjutab biomassi eemaldamise aeg (sügis vs talv) laialehise hundinuia taastumist järgmisel kasvuperioodil?
2. Milline on optimaalne biomassi koristamise aeg tehismärgalade pikaajalise hooldusstrateegia kujundamiseks, arvestades taimestiku uuenemisvõimet?

# 1 TEHISMÄRGALA

## 1.1 Aveveeline tehismärgala

Tehismärgalad on inimeste poolt loodud süsteemid, mis jäljendavad looduslike märgalade puhastusprotsesse kontrollitud keskkonnas. Erinevalt looduslikest märgaladest on tehismärgaladel kindel sisse- ja väljavool ning kontrollitav veerežiim. Tehismärgalad on erinevaid tüüpe ning tehnoloogilised lahendused ja tööprotsessid võivad varieeruda. Neid kasutatakse peamiselt järelpuhastuse läbiviimiseks, sadevee puhastuseks või hajukoormuse vähendamiseks. Süsteemi disain, näiteks vee viibeaeg, sügavus ja taimestik, on optimeeritud saasteainete võimalikult tõhusaks eemaldamiseks. [13, lk 5–8], [14]

Avaveelised tehismärgalad on enamasti madalaveelised (0,2–0,4 m) tiigid, milles kasvavad kõrgemad veetaimed, näiteks laialehine hundinui või harilik pilliroog (*Phragmites australis*) [13], [14, lk 40]. Avaveelise tehismärgala peamine eesmärk on parandada vee kvaliteeti hõljuvaine settimise, taimede poolt toitainete omastamise ning mikroorganismide poolt orgaanilise reostuse lagundamise kaudu. Sõltuvalt eesmärgist ja valgala suuruselt võivad tehismärgalad koosneda kraavidega ühendatud tiikide süsteemist [13, lk 40]. Suurema reostuskoormuse ning aastaegade vahetumisest tulenevate vooluhulkade kõikumiste puhul on võimalik rajada märgala ette settetiik, mis toimib puhvrina [15]. Lisaks suurendavad sellised tehismärgalad elurikkust, luues uusi elupaiku ning rikastades maastikku nii esteetiliselt kui ka ökoloogiliselt [13], [14, lk 40].

Tehismärgala tõhusus sõltub eeskätt süsteemi suuruselt, hüdraulilisest koormusest ja kliimatingimustest, mis mõjutavad viibeaega, mikroobset aktiivsust ja taimede kasvu [13]. Maksimaalse puhastusvõime saavutamiseks tuleb optimeerida vee viibeaeg süsteemis, substraadi koostis ja taimestiku kooslus [15], [27]. Eestis peaks avaveelise tehismärgala pindala olema valgala pindalast vähemalt 0,1–0,5% (kohati isegi 2%) [3], [17]. Süsteemi pikaajaliseks toimimiseks on hädavajalik regulaarne hooldamine, sealhulgas taimestiku biomassi ning kogunenud setete perioodiline eemaldamine [28].

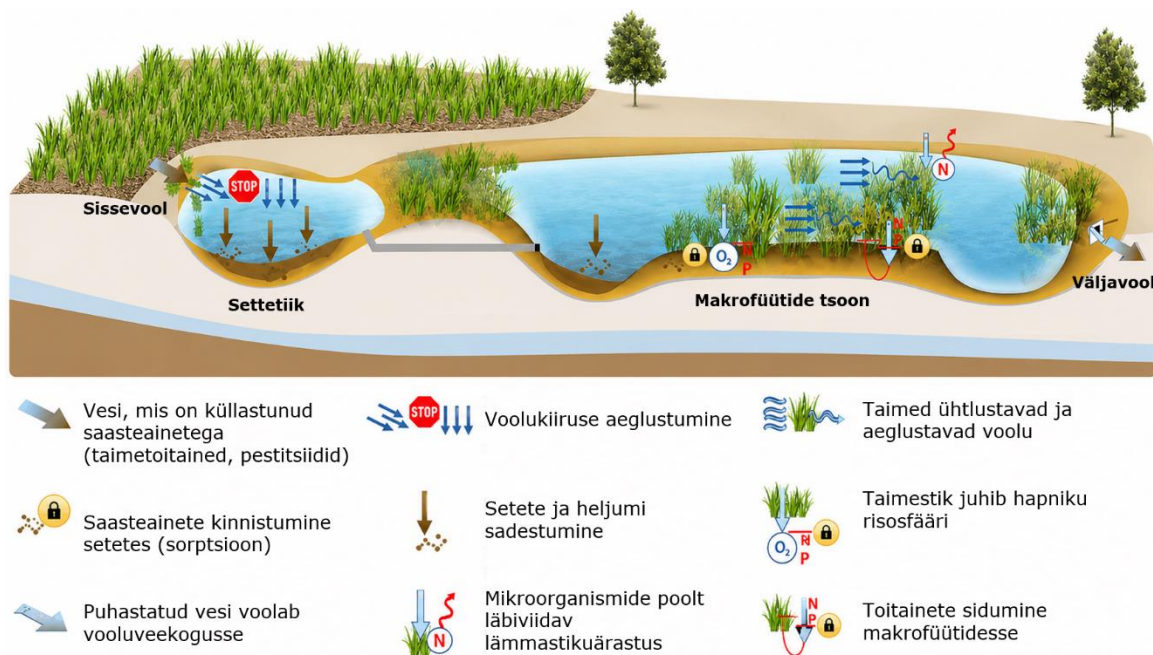
Mida jahedamas piirkonnas märgala paikneb, seda suurem peab olema selle pindala, et puhastusprotsessid jõuaksid toimuda [13], [14]. Talvised tingimused seavad puhastusprotsessidele teatud piirangud [13], [14]. Jääkate ja madal veetemperatuur aeglustavad oluliselt bioloogilisi ja hapnikust sõltuvaid protsesse, näiteks fosfori sidumise tõhusust [13], [14]. Isegi kui talvised tingimused aeglustavad protsesse, võib siiski väita, et tehismärgalad on usaldusväärne tehnoloogia ka jahedamates kliimades [29]. Jää tekitatud anaeroobne keskkond ja süsiniku olemasolu loovad head eeldused lämmastiku

eemaldamiseks denitrifikatsiooni teel [13]. Füüsilised protsessid, nagu heljumi settimine, on jää all aga sageli isegi mõjusamad kui suvel, kuna puudub tuule ja lainetuse segav mõju [13, lk 5–6].

## 1.2 Tööprotsessid

Avaveelised tehismärgalad peavad kinni saasteaineid erinevate füüsiliste, keemiliste ja bioloogiliste protsesside kaudu. Nende protsesside koosmõjul eemaldatakse veest toitained (lämmastik ja fosfor), orgaaniline aine, heljum ning mitmesugused saasteained (raskmetallid, ravimi- ja pestitsiidijäägid). [13, lk 5], [15]

Märgalas toimub voolukiiruse aeglustumine, mis soodustab heljumi settimist ning loob taimestikule sobivad tingimused toitainete sidumiseks (Joonis 1) [15]. Kui vesi voolab läbi märgalade, puhastatakse seda settimise, filtreerimise, oksüdeerimise, redutseerimise, sorptsiooni ja sadestumise protsesside abil, mida vahendavad nii mikroobid kui ka taimed [13, lk 5].



Joonis 1. Tehismärgala tööprotsessid (kohandatud) [30]

Kõige olulisem füüsikaline protsess tehismärgalas on settimine [15]. Kuna märgala suurendab voolusängi ristlõiget ja tekitab hüdraulilise takistuse, aeglustub vee voolukiirus märgatavalt [15]. Voolu aeglustumine võimaldab heljumil ja sellega seotud toitainetel (peamiselt fosforil) gravitatsiooni jõul veesamba põhja ladestuda [13], [15]. Taimestik toetab seda protsessi, toimides füüsilise filtrina, mis püüab kinni suuremaid osakesi ja vähendab vee turbulentsi, hoides ära setete põhjast üles kerkimist [12], [13], [20]. Nende

protsesside tõhusus sõltub suuresti vee viibeajast ja hüdraulilisest koormusest [12], [13]. Avaveelises tehismärgalas on soovituslik vee viibeaeg mõnest päevast kuni üle nädala, see oleneb süsteemi suuruses, disainist ja koormusest. [13], [14]

Peamised fosfori eemaldamise protsessid on sorptsioon, sadestumine, taimede poolt omastamine (koos saagi koristusega), aga enamasti on fosfori eemaldamine üsna väike tehismärgalades [15], [20], [31]. Lämmastikuärastus toimub mitmeastmelise protsessina (Lisa 1), mille olulisemaks etapiks on denitrifikatsioon [13]. Denitrifikatsiooni käigus redutseeritakse nitraat ( $\text{NO}_3$ ) gaasilisteks ühenditeks, mille lõpp-produktiks on molekulaarne lämmastik ( $\text{N}_2$ ) [13]. Tehismärgalad on küll mõeldud lämmastikuärastuseks, kuid halvasti majandatud märgala võib muutuda kasvuhoonegaaside allikaks [32], [24]. Mittetäieliku denitrifikatsiooni korral võivad vaheproduktidena vabaneda keskkonnale ohtlikud kasvuhoonegaasid lämmastikoksiid ( $\text{NO}$ ) ja diämmastikoksiid ( $\text{N}_2\text{O}$ ) [13], [24]. Liiga madal veetase on üks kõige suurem  $\text{N}_2\text{O}$  põhjustaja märgalades [24].

Süsinikuringe algab taimede fotosünteesist (Lisa 1), mille käigus seotakse atmosfäärne  $\text{CO}_2$  biomassiks ja siis vabastatakse umbes pool sellest taimede ja mikroorganismide hingamise kaudu tagasi atmosfääri [13]. Varasemast katsest on leitud, et süsinik on talvel jaotunud laialehises hundinuias umbes pooleks risosfääri ja maapealse taime biomassi [16].

Taimestiku funktsioonid ja toitainete omastamine makrofüütidel, nagu laialehine hundinui ja harilik pilliroog, on süsteemis oluline roll. Taimede varred pakuvad mikroobidele lisa kasvupinda veesamba sees ning juureeritised toetavad mikroobide elutegevust. Hundinuiad transpordivad hapnikku spetsiaalse õhukoe (aerenhüümi) kaudu risoomidesse, mis soodustab mikrobioloogiliste protsesside kulgemist. See loob vajalikud tingimused mikroorganismidel orgaanilise aine aeroobseks lagunemiseks ja lämmastiku nitrifikatsiooniks. Taimede tekitatud hapnikurikkad tsoonid võimaldavad setetes elutseda nitrifitseerivatel bakteritel, kes muidu hapnikuvaeses keskkonnas eksisteerida ei suuda. Selline aeroobsete ja anaeroobsete tsoonide koeksisteerimine setetes suurendab märgatavalt kogu süsteemi puhastusefektiivsust. [13], [14]

Taimed omastavad kasvuperioodil veest ja setetest otseselt süsiniku, lämmastiku- ja fosforiühendeid (Lisa 1), sidudes neid oma biomassi [13], [16], [20]. See on ajutine ladustamine, sest kui taimed sügisel kõdunevad, vabaneb osa toitaineid mineraliseerumise käigus veesambasse tagasi [13], [16], [33]. Osa lämmastikust, fosforist, süsinikust (süsivesikud), liigub risoomidesse, aga osa sellest jääb maapealsesse kõdunevasse biomassi [13], [16]. Seetõttu on toitainete lõplikuks eemaldamiseks soovitatav taimestikku niita ja biomass eemaldada [15], [16]. Kui taimed eemaldada (õigetel tingimustel)

vegetatsiooniperioodi kõrgajal, kus toitained on maksimaalselt biomassi seotud, võivad taimed olla väga olulised toitainete eemaldamisel kerge koormusega süsteemides [20].

### 1.3 Majandamine

Avaveelised tehismärgalad on küll sageli võrreldes alternatiivsete tehnoloogiatega kulutõhusad ja passiivsed süsteemid, kuid neid ei saa pidada hooldusvabaks. Süsteemi pikaajalise toimivuse jaoks on vaja biomassi perioodilist eemaldamist, sest lagunev taimne materjal võib toitained tagasi vette leostada ning sette kuhjumisel tuleb mõnel juhul eemaldada ka kogunenud settemuda. [13], [14], [15]

Kui taimede koristamise peamine eesmärk on taimestiku pikaajaline toimimine talletatud toitainete eemaldamise teel, tuleks taimi koristada kasvuperioodi tipul [16]. Suvine koristamine põhjustab tehismärgala ökosüsteemis rohkem häiringuid ning võib negatiivselt mõjutada loomastikku, taimestikku, häirida veesammast, settekihti ning mikroobide tegevust [16]. Neid häireid saab parasvöötme tingimustes vältida, koristades maapealset biomassi kasvuperioodi lõpus või jää pealt talvel [16]. Peale temperatuuri langust alla 4 kraadi peatub fotosüntees ja taimede aktiivsus, mistõttu talvine koristus säilitab märgala sisekeskkonna stabiilsuse, võimaldades järgmisel kevadel paremat taastumist [23]. Märgala ökosüsteemi liigse häirimise vältimiseks soovitatakse koristustöid teostada samas asukohas mitte sagedamini kui iga 2–3 aasta tagant [16]. Selline puhverperiood võimaldab säilitada märgala ökoloogilist tasakaalu ja tagada vegetatsiooni stabiilset taastumist [16]. Maaparanduse keskkonna- ja elustikumõjude leevendamise juhises soovitatakse märgala liigsest taimestikust ja setetest puhastada 5–6-aastase intervalliga [34]. Pakutakse välja, et veetaimestikku tuleks niita sügisel (septembris–oktoobris), kui toitained on veel taimede maapealses osas ning kogutud biomassi saaks kasutada biogaasi tootmiseks [34].

Taimse biomassi eemaldamine annab lisaks veepuhastuse tõhustamisele ka ülevaate märgala liikidest, sealhulgas invasiivsete võõrliikide olemasolust. Koristatud biomass on väärtuslik ressurss biogaasi tootmiseks, eeldusel, et säilib anaeroobseks kääritamiseks vajalik optimaalne süsiniku ja lämmastiku (C:N) suhe. Kuigi suvine koristus tagab kõrge toitainete kontsentratsiooni, põhjustab see metaani (CH<sub>4</sub>) emissioone ning füüsilisi häiringuid sette ja vee koostises [16], [23], [32]. On pakutud, et parim koristusaeg on kasvuperioodi lõpus (nt septembris), mis võimaldab saavutada tasakaalu biomassi energeetilise väärtuse ja madalamate keskkonnamõjude vahel. [23]

Eesti seadusandluses puudub terviklik ja spetsiifiline raamistik tehismärgalade hooldamiseks. Olemasolevad nõuded on killustatud: veekaitsevööndite režiim tuleneb veeseadusest ning spetsiifilisemad juhised puhastuslodude käitlemiseks on sätestatud maaparandushoiutööde nõuete määruse § 16 (3), kus räägitakse puhastuslodust [11],

[35]. Veekvaliteedi sihtväärtuste määramisel tuginetakse riiklikele normatiividele. Avaveelise tehismärgala efektiivsuse hindamisel ja veekvaliteedi sihtväärtuste määramisel lähtutakse keskkonnaministri 16.04.2020. a määrusest nr 19 „Pinnaveekogumite nimekiri, pinnaveekogumite ja territoriaalmere seisundiklasside määramise kord, pinnaveekogumite ökoloogiliste seisundiklasside kvaliteedinäitajate väärtused ja pinnaveekogumiga hõlmamata veekogude kvaliteedinäitajate väärtused“ lisa 4 toodud vooluveekogumite ökoloogiliste seisundiklasside piirväärtustest. [36]

## 2 LAIALEHINE HUNDINUI

### 2.1 Bioloogia

Hundinuiad (*Typha*) kuuluvad hundinuialiste sugukonda (*Typhaceae*). Need mitmeaastased kaldaveetaimed (makrofüüdid) on levinud üle kogu maakera (kosmopoliitne v.a Arktika ja Antarktika, suhteliselt harva leidub ka Kagu- ja Lõuna-Aasias ning Lõuna-Ameerikas) [37]. Kõige rohkem leidub neid parasvöötme kliimas [37]. Eestis kasvavad taimed peamiselt mageveekogude soostunud kallastel, kraavides, tiikides, madalsoodes, turbaaukudes ja roostikes [38]. Laialehine hundinui kasvab 1–2 m kõrguseks ning õitseb Eestis valdavalt juunist augustini [38]. Taimel on sinakasrohelistel, 1,5–3 cm laiad ja enamasti kasvavad õisikust kõrgemaks (üle 2 m) [38]. Liik paljuneb edukalt nii risoomide kui ka seemnete abil. [37], [39].

Hundinuia kasv on kevadel esimese nelja nädala jooksul võrdlemisi aeglane. Peamiselt toimub toitainete ja süsivesikute transport risoomidest lehtedesse, et käivitada maapealne kasv. Sellele järgneb suvekuudel umbes 12-nädalane kiire kasvufaas, mille jooksul moodustub peamine osa kogu hooaja biomassist. Aktiivse kasvuperioodi vältel toimub ka maksimaalne toitainete (süsiniku, lämmastiku ja fosfori) sidumine taimel. Sügisel enne külmasid, kui kasvuperiood hakkab lõppema, toimub toitainete ja süsivesikute massiline liikumine lehtedest tagasi risoomidesse (u 40% toitainetest). Sügisel on taimel toitainete maksimumvaru risoomis juba saavutatud. Mida suuremas koguses säilib talvel risoomi biomassi, seda suurem on ka järgmise hooaja lehtede biomassi toodang. [40]

Kui niita hundinuia suvel või varasügisel enne seda, kui toitained liiguvad risoomidesse, eemaldatakse süsteemist maksimaalselt toitaineid. See on veepuhastuse seisukohalt hea, kuid jätab risoomid talveks toitainevaegusesse, mis on halvem taimel taastumisele. Hilissügisel või talvel niites on toitained juba risoomidesse liikunud ning taim taastub kevadel hästi, aga veest eemaldatud toitainete hulk on väiksem. [40]

Talvine püstine kuivanud biomass võib toetada märgala talvist soojusisolatsiooni ja säilitada varte kaudu toimuvaid gaasivahetuse teid [13]. Taimel biomassi niitmine allpool veepiiri võib pärssida risoomidesse talletatud hapnikuvarusid ja kahjustada taimel taastumisvõimet (anaeroobsetes tingimustes algab risoomide lagunemine) [29], [16]. Mõnes kohas on laialehine hundinui invasiivne võõrliik ja selle eemaldamiseks niidetakse esmalt maapealne biomass maha ja seejärel ujutatakse ala üle [29]. Selline meetod on tõhus vähendades O<sub>2</sub> transporti risoomidesse ja piirates edasist kasvu [29]. See tõestab kui oluline on, et taimel oleksid lõigatud vee piirist ülevalpool kui soovetakse, et taimel taastuks [29].

## 2.2 Hundinua kasutamise potentsiaal

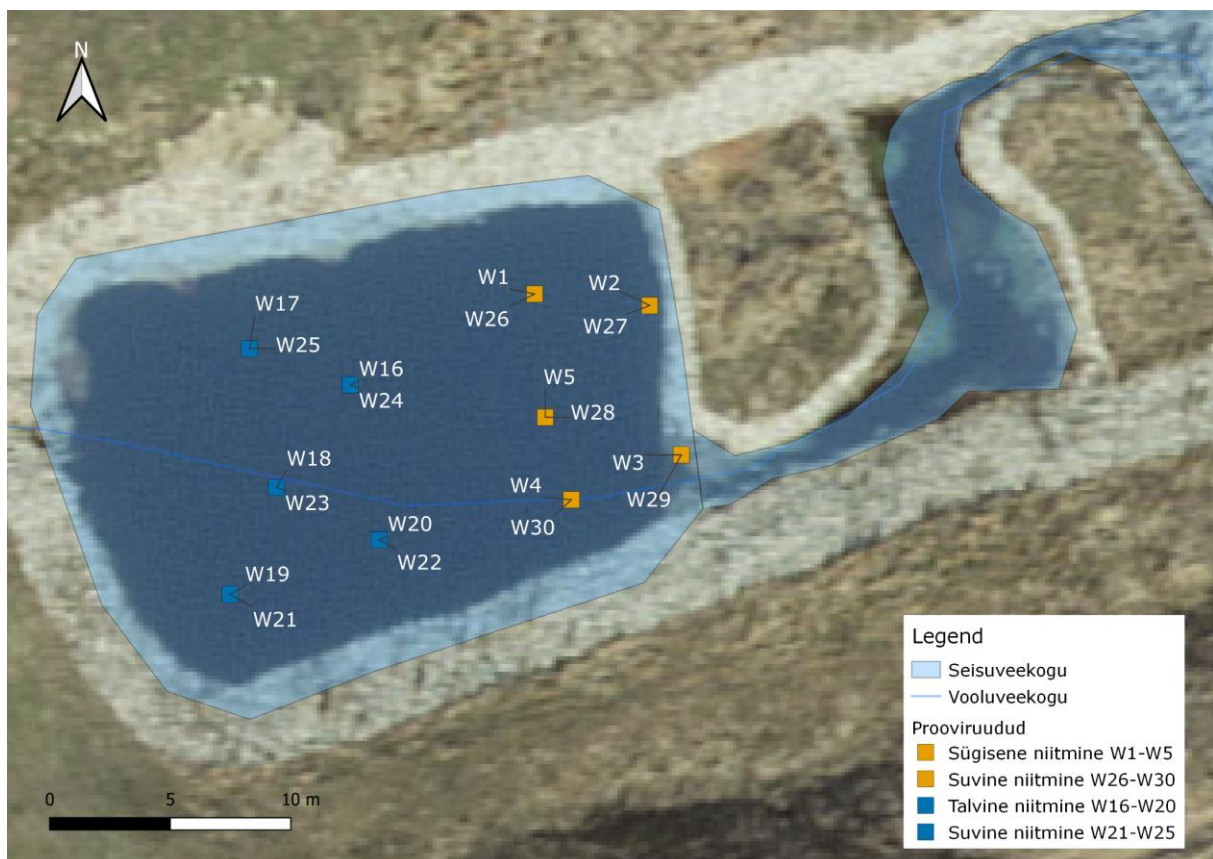
Tehismärgalades on laialehine hundinui kõrge produktiivsusega makrofüüt, mis seob fotosünteesi käigus tõhusalt atmosfäärset süsinikku ning akumulereib kasvuperioodi vältel oma biomassi märkimisväärses koguses toitaineid (lämmastiku- ja fosforiühendeid) [16], [19], [20]. Laialehine hundinui vähendab tehismärgaladest metaani (CH<sub>4</sub>) eraldumist atmosfääri [19]. Toitained jaotuvad taimes ebaühtlaselt, näiteks N ja Ca kogunevad peamiselt lehtedesse ja K, P ning Mg risoomidesse [41]. Lisaks taimetoitainetele akumulereivad hundinuiad raskmetalle (Zn, Mn, Fe, Cu) oma biomassi ning neid peetakse sobivateks liikideks fütoremediatsioonis [39], [42].

Laialehise hundinua biomass on mitmekülgne jätkusuutlik resurss, mille kasutusvõimalused ja kvaliteet sõltuvad otseselt koristuse ajast [16]. Hundinuiast saab edukalt teha bioetanooli tänu kõrge tselluloosi- ja hemitselluloosi sisaldusele [41]. Seda saab kasutada loomade allapanuna, vesiviljeluses kasvatades inimestele toiduks, kasutatakse ka korvide punumiseks ja muude tarbeesemete valmistamiseks [39]. Kuna taimede keemiline koostis ja niiskusesisaldus muutuvad vegetatsiooniperioodi jooksul märkimisväärselt, määrab niitmise aeg materjali sobivuse konkreetseks otstarbeks [16]. Näiteks on sügise lõpus korjatud hundinua biomass sobiv tooraine, mida kasutada kütusena termokeemilistes protsessides (nt põletamine pelletitena või briketina) [43]. Talvel koristatud biomass sobib madala veesisalduse (vajab siiski lisa kuivatamist) ja kõrgema C:N suhe tõttu isolatsiooni- või ehitusmaterjalide tootmiseks [44], [23]. Samas biogaasi jaoks on parim koristusaeg suvel, kus C:N suhe on madal (25–30) [42], [23]. Kiudainerikka sööda tarbeks, tuleks biomassi koristada kevadel, kui proteiini sisaldus on kõrgeim. [44]

### 3 MATERJAL JA METOODIKA

#### 3.1 Uurimisala kirjeldus

Töö uurimisala asub Uhti külas, Kambja vallas, Tartu maakonnas (58°17'N, 26° 43'E), kus paikneb Vända kraavile rajatud avaveeline tehismärgalasüsteem, mis suubub Porijökke [22]. Põllumajanduslikku hajukoormust vähendav tehismärgala valmis 2015 aastal ning selle suuruseks on umbes 0,5 ha [22]. Tehismärgalasüsteem koosneb settetiigist, kahest üksteisele järgnevast looklevast avaveelisest märgalast (Joonis 2 ja 3) ning neid ühendavast kraavist (Lisa 2) [3]. Märgalade sügavus on keskmiselt 0,5 m [16]. Märgalasüsteemi valgla pindala on 2,2 km<sup>2</sup>, millest valdava osa (62%) moodustab põllumajandusmaa [22]. Tehismärgala pindala suhe valgala pindalaga on ligikaudu 0,3% [22].



Joonis 2. Katseala 1, Vända tehismärgalasüsteemi esimese märgala eeltiik (koostatud tarkvaraga QGIS [45] Maa-amet [58] (ETAK)[59])

Esimese märgala suuruseks on umbes 0,22 ha. Pärast ehitustöid istutati sinna laialehist hundinuia ning harilikku pilliroogu [16]. Teine märgala (Joonis 3), pindalaga 0,21 ha jäeti pärast rajamist istutamata, et võimaldada taimestiku looduslikku asustumist [16]. Antud

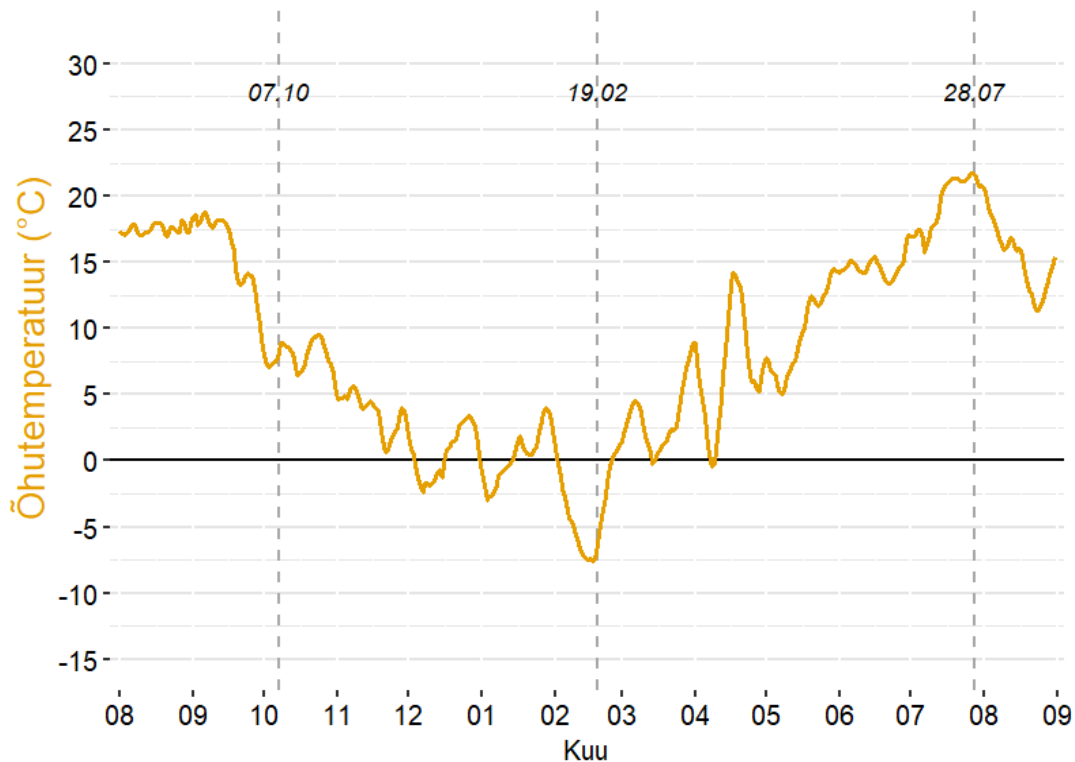
tehismärgalasüsteemi on põhjalikult uuritud ning alates 2017. aastast on tehtud pidevat vee kvaliteedi ja voolukiiruse seiret [16]. Mõlemas märgalas saavutati peaaegu täielik taimkate 7 aastat peale tehismärgala rajamist [46].



Joonis 3. Katseala 2, Vända tehismärgalasüsteemi teine märgala (koostatud tarkvaraga QGIS [45] Maa-amet[58] (ETAK)[59])

### 3.2 Ilmastik

Ilmastik mängib olulist rolli biomassi tootlikkuses ning tehismärgala tõhususes, sest temperatuur, aasta-aeg ja vegetatsiooniperioodi pikkus mõjutavad nii taimede kasvu kui ka mikroobsete puhastusprotsesside kiirust [46]. Vegetatsiooniperiood kestab Eestis tavaliselt aprilli lõpust septembri lõpuni [46]. Selle pikkust saab määratleda ajavahemikuna, mil ööpäevane keskmine õhutemperatuur püsib üle 5 °C vähemalt viis järjestikust päeva, kuni sügiseni, mil temperatuur püsib vähemalt viis järjestikust päeva alla 5 °C [47]. Uuringupaigale lähimas automatiseeritud ilmajaamas Tõraveres, mis asub umbes 15,5 km Vända tehismärgalast, on 2015–2025 aasta keskmine õhutemperatuur 7,17 °C [48]. Antud uuringkohas on selge hooajaline tsükkel külmade talveperioodidega, kui lumi ja jää on püsivad ning märgalad jäätuvad [43].



Joonis 4. Keskmine õhutemperatuur katseperioodi vältel (augustist 2024–septembrini 2025) lähima ilmajaama Tartu-Tõravere andmed (umbes 15,5 km Vända tehismärgalast) [48]

### 3.3 Biomass ja lehepindala indeks

Tehismärgala biomass on märgala taimede, näiteks hundinuiade ja pilliroo, elus või surnud orgaaniline mass, mis seob kasvuperioodi jooksul süsinikku, lämmastiku- ja fosforiühendeid [40], [16]. Tehismärgalades on biomass oluline, sest see toetab vee puhastamist, kuid pärast vegetatsiooniperioodi lõppu hakkab biomass kõdunema ning sinna talletunud toitained leostuvad vette tagasi [13], [16].

Biomassi majandamine ehk koristus mõjutab nii märgala puhastuse tõhusust kui ka biomassi kasutusväärtust, sest koristusaja järgi muutub biomassi keemiline koostis ja niiskuserežiim [16]. Seetõttu võib tehismärgala biomassi kasutada ka edasiseks väärimiseks, näiteks bioenergia tootmiseks [39].

Lehepindala indeks (LAI, *Leaf Area Index*) on lehtede pindala suurus ökosüsteemis. Ehk mitu ruutmeetrit lehepinda on ühe ruutmeetri maapinna kohta. Seda kasutatakse selleks, et hinnata taimkatte tihedust, fotosünteesi potentsiaali, aurumist ja biomassi produktsiooni [49]. LAI on kasulik primaarse produktsiooni ja taimede kasvu jälgimiseks. LAI teoreetiline väärtusvahemik on 0 kuni 10, kus kõrgemad väärtused tähistavad suuremat lehepinda

maapinna ühiku kohta [49]. Mõõtühik puudub või sobib ka  $m^2/m^2$  [50]. LAI väärtus on tavaliselt kõrgeim suve jooksul, kui vegetatiivne kasv on maksimaalne ja lehepind on täielikult välja kujunenud [13], [23].

### 3.4 Välitööd

Välitööd viidi läbi 07.10.2024 (sügisel), 19.02.2025 (talvel) ning lõpuks 28.07.2025 (suvel), kui on vegetatsiooniperioodi tippaeg, et kontrollida taimede taastumist (Joonis 4). Katse läbiviimiseks jagati esimese märgala eeltiik (Joonis 2) ja kogu teine märgala (Joonis 3) kaheks osaks ning neist eemaldati veepealne taimestik vastavalt, kas sügisel või talvel. Enne taimede eemaldamist koguti mõlemast märgalast viis taimeproovi, mille kogumiseks kasutati juhuslikult paigutatud 30,8 x 30,8 cm prooviruutu. Esmalt mõõdeti prooviruudu keskelt kasvava taimestiku lehepindala indeks seadmega LAI-2200C *Plant Canopy Analyzer* (LI-COR Inc., Ameerika Ühendriigid) [51]. Seejärel lõigati taimed umbes 5 cm kõrguselt veepinnast maha ja asetati kilekottidesse ning märgistati vastavalt. Pärast proovide kogumist eemaldati ülejäänud taimed ja laotati märgala serva kuhjadesse.



Joonis 5. Pildid välitöödest, vasakul sügis ja paremal talv (allikas: TÜ keskkonnatehnoloogia töörühm)

Sügisel (07.10.2024) eemaldati taimed kõndides märgala põhjas, lõigates käsitsi sirpidega ja kogudes need kaldale käsitsi või rehadega. Talvel (19.02.2025), kui märgaladele oli tekkinud kandev jääkate, eemaldati taimed lõigates sirpidega jää kohalt ning riisudes rehadega kaldale (Joonis 5). Järgneval suvel, vegetatsiooniperioodi tipus (28.07.2025), koguti sama meetodiga, samadest punktidest taimede taastumise hindamiseks kordusproovid.

### 3.5 Laboratoorsed tööd

Välitöödel kogutud taimeproovid pakendati ümber paberkottidesse ja kuivatati 60 °C juures kuivatuskapis 36 tundi. Teatud aja möödudes kontrolliti, kas proovide kaal veel kuivatuskapis olles väheneb. Kui proovi kaal oli saavutanud stabiilse taseme märgiti see andmetabelisse. Pärast kuivkaalu määramist valmistati proovid ette edasiseks analüüsiks, purustades need kannblendris. Ettevalmistatud proovid viidi Tartu Ülikooli geograafia osakonna biogeokeemia laborisse, kus määrati elementanalüsaatoriga *Vario MACRO cube* (Elementar Analysensysteme GmbH, Saksamaa) proovide süsiniku (C) ja lämmastiku (N) koostis [52].

### 3.6 Andmete analüüs ja autori roll uuringus

Töös kasutati kvantitatiivset uurimismeetodit, kus andmete ettevalmistus ja lihtsamad arvutused tehti Microsoft Excelis [53] ning andmeanalüüsiks kasutati statistikaprogrammi Rstudio versioon 4.3.3 [54]. Graafikute ja analüüsides teostamiseks kasutati RStudio pakette ggplot2 [55], ggpubr [56], dplyr [57], lubridate [58] ja zoo [59].

Kuna valim on üsna väike, siis normaaljaotuse teste tõlgendati ettevaatlikult ja tehti lisa jooniseid, et järeldused oleksid usaldusväärsemad. Andmete normaaljaotust kontrolliti Shapiro-Wilki testiga või Q-Q plot graafikuga. Sõltuvalt tulemustest kasutati rühmade võrdlemiseks kas parameetrilist kahe valimi t-testi või normaaljaotuse puudumisel mitteparameetrilist Mann-Whitney U-testi. Lisaks kasutati homogeensuse kontrollimiseks Levene'i testi.

Uuringuala asukohaskeemid ja proovipunktide paiknemine visualiseeriti tarkvaraga QGIS versioon 3.22.10 [45], kasutades Maa-ameti ortofotot [60] ning Eesti topograafia andmekogu (ETAK) voolu- ja seisuveekogude kihte [61]. Prooviruutude koordinaadid imporditi Microsoft Excelist ning kanti kaardile punktandmetena. Kaardid vormistati EPSG:3301 koordinaatsüsteemis, lisades vajalikud kartograafilised elemendid (legend, mõõtkava, põhjasuund).

Analüüsitavad andmed pärinevad uuringust, mille andmekogumisprotsessis töö autor ei osalenud. Autori roll käesolevas uurimistöös hõlmas andmestiku korrastamist ja süstematiseerimist, statistiliste analüüsimeetodite rakendamist, tulemuste tõlgendamist ja kaartide tegemist.

## 4 TULEMUSED JA ARUTELU

### 4.1 Esmased tähelepanekud

Hajukoormust vähendavate tehismärgalade soovituslik pindala on 0,1–0,5% (2%) vastava valgala pindalast [3], [17]. Katseala puhul on 0,3%, mille tõttu võib järeldada, et tehismärgala on optimaalse suurusega [42]. Vända märgala tõhusust on varasemalt uuritud erinevate vaatenurkade alt [16], [17], [22], [23], [24], [46]. Lisaks märgala pindalale on oluliseks uurimisobjektiks olnud inimtegevuse ja hoolduse mõju märgala ökosüsteemile, sest biomassi koristus ja muu mehaaniline sekkumine võivad mõjutada taimestiku taastumist, elustikku, hüdraulikat ning pikaajalist puhastustõhusust [16], [62].

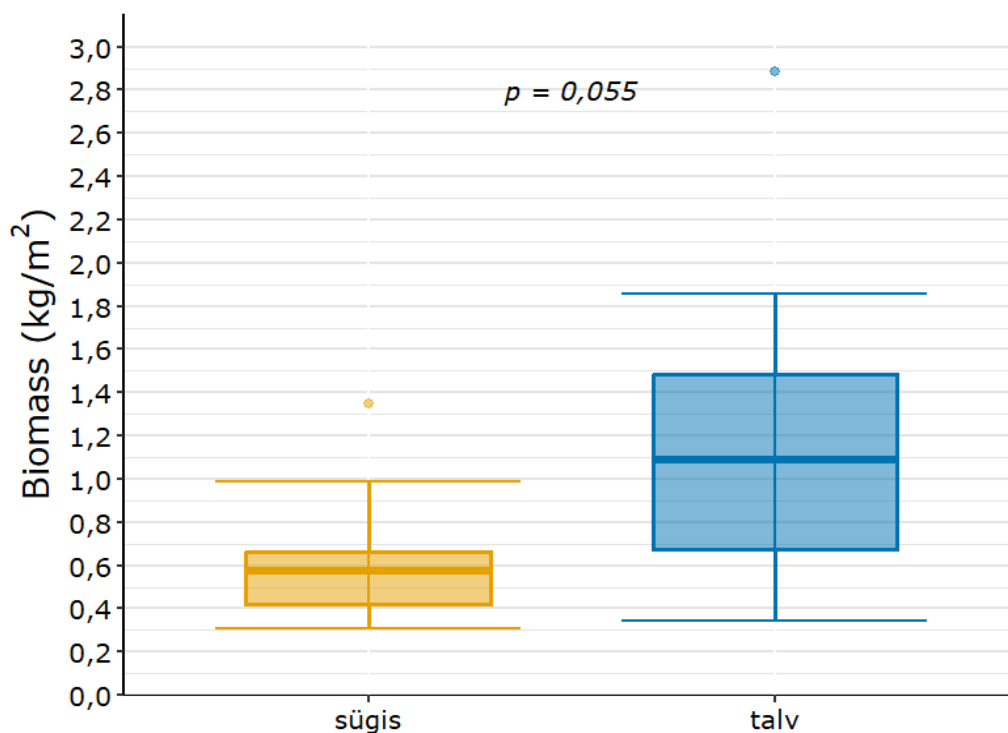
On kindlaks tehtud, et suvine biomassi koristamine põhjustab tehismärgala ökosüsteemis häiringuid, mis võib negatiivselt mõjutada taimestikku ja loomastikku ning häirida veesammast, settekihti ning mikroobide tegevust [16]. Niitmistehnika või inimeste liikumine märgalas võib lõhkuda taimede juuri, risoome ja hundinuia varsi [16]. Varasemates uuringutes on täheldatud, et kui taime vars ei saa enam hapniku viia risofääri, muutub see piirkond anaeroobseks ja sellistes tingimustes algab risoomide lagunemine [16], [29]. Sügisel on märgala põhi endiselt pehme ja selle peal kõndimine, võib kahjustada taimede risoome, setet, mikroobe, ja muid organisme, kes märgala põhjas võivad elutseda [63, lk 49]. Juba varasemas uuringus on soovitatud parasvöötme tingimustes häiringute vältimiseks koristada maapealset biomassi talvel jää pealt, sest talvel säilib märgala sisekeskkonna stabiilsus, mis võimaldab kevadel paremat taastumist [16].

Esmalt kontrolliti märgalade omavahelist homogeensust. Kuna katses uuriti kahte osa tehismärgalasüsteemist (esimene märgala ja teine märgala), siis kontrolliti, kas neid andmeid võiks statistiliselt koos analüüsida. Varasemas 2018 Vända tehismärgala uuringus on täheldatud suurt erinevust märgalade biomasside vahel, kus esimeses märgalas oli biomass 0,71 kg/m<sup>2</sup> ja teises märgalas vaid 0,30 kg/m<sup>2</sup>, kuna teine märgala jäi esialgu taimestamata [22]. Antud töö läbiviimise ajaks on mõlemad märgalad ühtlaselt taimedega kaetud ja homogeensed omavahel. Märgalade homogeensuse kontrollimiseks kasutati Levene'i testi dispersioonide võrdsuse hindamiseks ja t-testi keskmiste võrdlemiseks. Levene'i test näitas, et dispersioonid olid kõigi parameetrite puhul homogeensed ( $p > 0,05$ ) ehk märgalade hajuvus on sarnane ja neid võiks koos analüüsida. T-test näitas statistiliselt olulist erinevust märgalade vahelises C:N suhtes ( $p < 0,05$ ). Teise märgala (Joonis 3 lk 14) taimede keskmine C:N suhe oli kõrgem kui esimese märgala (Joonis 2 lk 13), mis viitab sellele, et asukohaspetsiifilised tingimused (toitainete kättesaadavus) mõjutasid taimede keemilist koostist rohkem kui eksperimendi käigus varieerunud niitmisaeg (Lisa 3).

Toitainete erinevus tehismärgalade vahel võiks olla tõestus, et märgala töötab toitainete eemaldamisel. Vesi on käinud esimesest märgalast juba läbi, siis on loogiline, et teises märgalas on juba vähem toitaineid. Andmestikus esines üksikuid erindeid, kuid kuna tegemist oli loodusliku varieeruvusega, siis neid analüüsist ei eemaldatud.

## 4.2 Biomassi eemaldamise mõju taastumisele

Taimede taastumist antud töös hinnatakse biomassi, taimede arvu, lehepindala indeksi ja süsiniku-lämmastiku suhte põhjal. Kirjanduse põhjal võib eeldada, et hilissügisel ja talvel lõigatud taimed taastuvad üldiselt hästi, sest vegetatsiooniperioodi lõpuks on suurem osa toitainetest juba risoomidesse talletatud [16], [25].



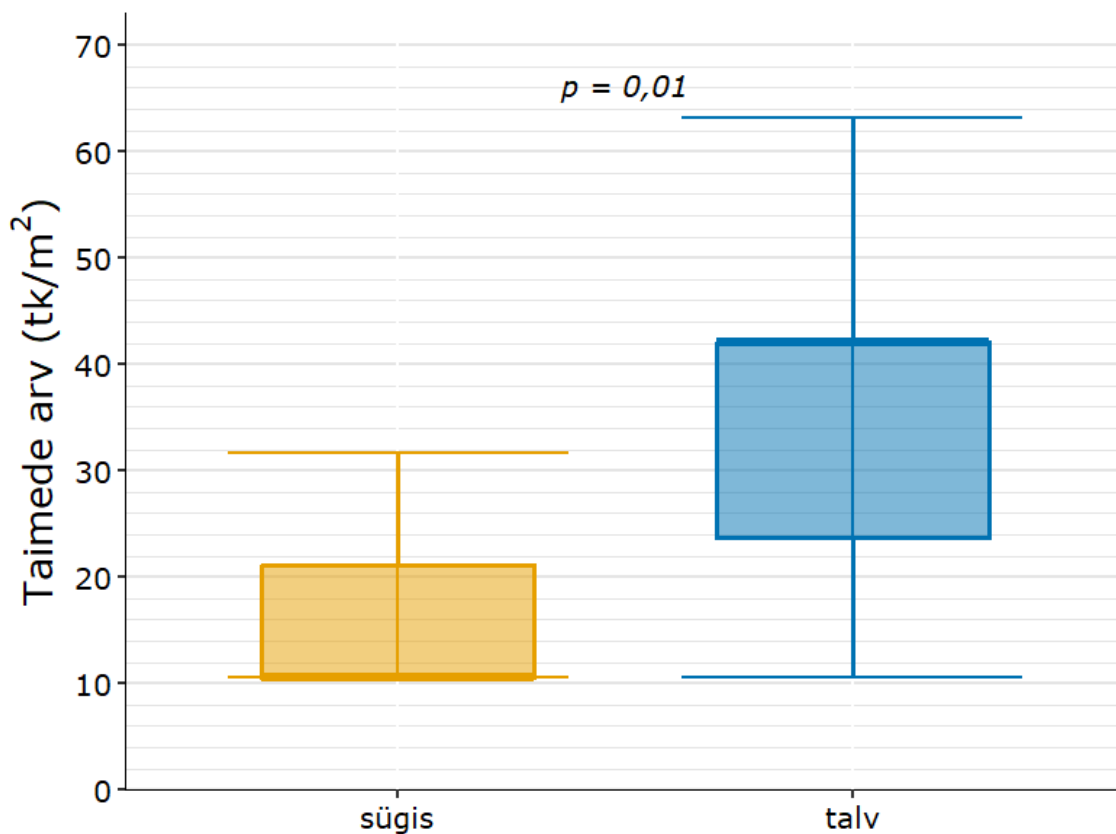
Joonis 6. Taastunud laialehise hundinuia biomassi kuivkaal ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ) erinevatel niitmisaegadel. Esitatud on biomassi miinimum- ja maksimumväärtused (vurrud), 25–75% kvartiilid (karbid) ning mediaanväärtused (jooned karbis). Kastidest väljapoole jäävad punktid tähistavad erindeid (outliers) ehk statistiliselt hälbivaid väärtusi. Esitatud p-väärtus näitab biomassi statistilist erinevust olulisust niitmisaegade vahel t-testi põhjal ( $p = 0,055$ ).

Algsed mõõteandmed teisendati ümber  $\text{kg}/\text{m}^2$ , et tulemused oleksid võrreldavad varasemate uuringutega. Taastunud taimede keskmine kuivkaal ruutmeetri kohta oli vastavalt: sügisel niidetud alalt  $0,64 \text{ kg}/\text{m}^2$  ja talvel niidetud alalt  $1,19 \text{ kg}/\text{m}^2$ . Sügisel niidetud alas varieerusid mõõtetulemused  $0,31\text{--}1,34 \text{ kg}/\text{m}^2$  ja talvel  $0,34\text{--}2,88 \text{ kg}/\text{m}^2$ .

Sügise lõikuse järel taastunud biomassi mediaan on 0,58 kg/m<sup>2</sup> ja talvise lõikuse järel taastunud biomassi mediaan on 1,09 kg/m<sup>2</sup>.

Varasemas parasvöötme kliimas tehtud uuringus on saadud sügisel lõigatud keskmiseks biomassiks 0,37–1,76 kg/m<sup>2</sup>, mis on võrreldav selles katses saadud tulemustega [64] [60]. Antud katses saadud tulemus võib olla veidi kõrgem seetõttu, et selles katses koristati biomass vegetatsiooniperioodi tipp ajal, aga varasem katse on tehtud sügisel, kus osa biomassist juba vaikselt hääbub.

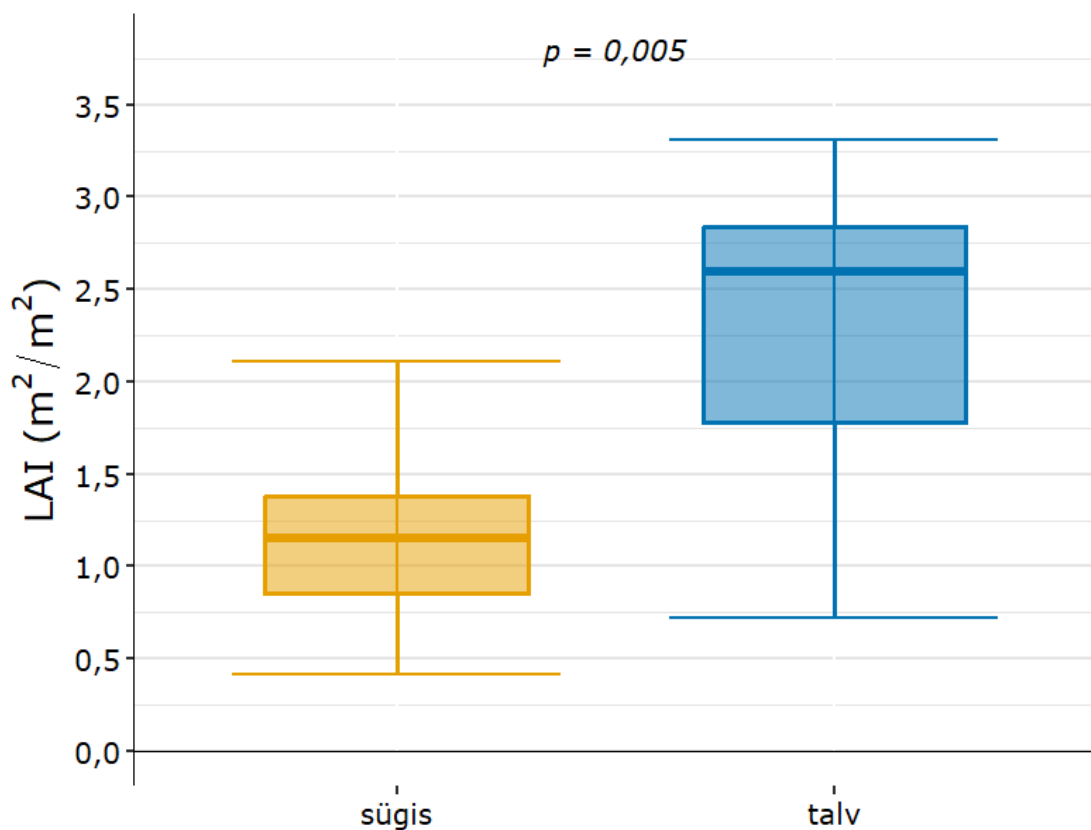
Kuigi statistilist olulisust ei ole ( $p$ -väärtus = 0,055) võiks seda ikka vaadata kui erinevust sügise ja talve niitmise vahel. Erinevus tuleb hästi välja mediaanidest vaadatuna (Joonis 6 lk 19), kus on näha, et talvise lõikuse järel taastunud biomassi mediaan (1,1 kg/m<sup>2</sup>) on peaaegu kahekordne võrreldes sügisese lõikusega (0,6 kg/m<sup>2</sup>). See viitab sellele, et sügisene biomassi eemaldamine pärsib märkimisväärselt järgmise aasta kasvu.



Joonis 7. Taastunud laialehise hundinuia taimede arv (tk/m<sup>2</sup>) erinevatel niitmisaegadel. Esitatud on taimede arvu miinimum- ja maksimumväärtused (vurrud), 25–75% kvartiilid (karbid) ning mediaanväärtused (jooned karbis). Esitatud  $p$ -väärtus näitab taimede arvu statistilist olulisust niitmisaegade vahel Mann-Whitney U-testi põhjal ( $p = 0,01$ ).

Et andmed oleksid võrreldavad valiti taimede arvu näitamise mõõtühikuks tk/m<sup>2</sup>. Sügisel niidetud alas varieerusid mõõtetulemused 11–32 tk/m<sup>2</sup> ja talvel 11–63 tk/m<sup>2</sup>. Sügisese

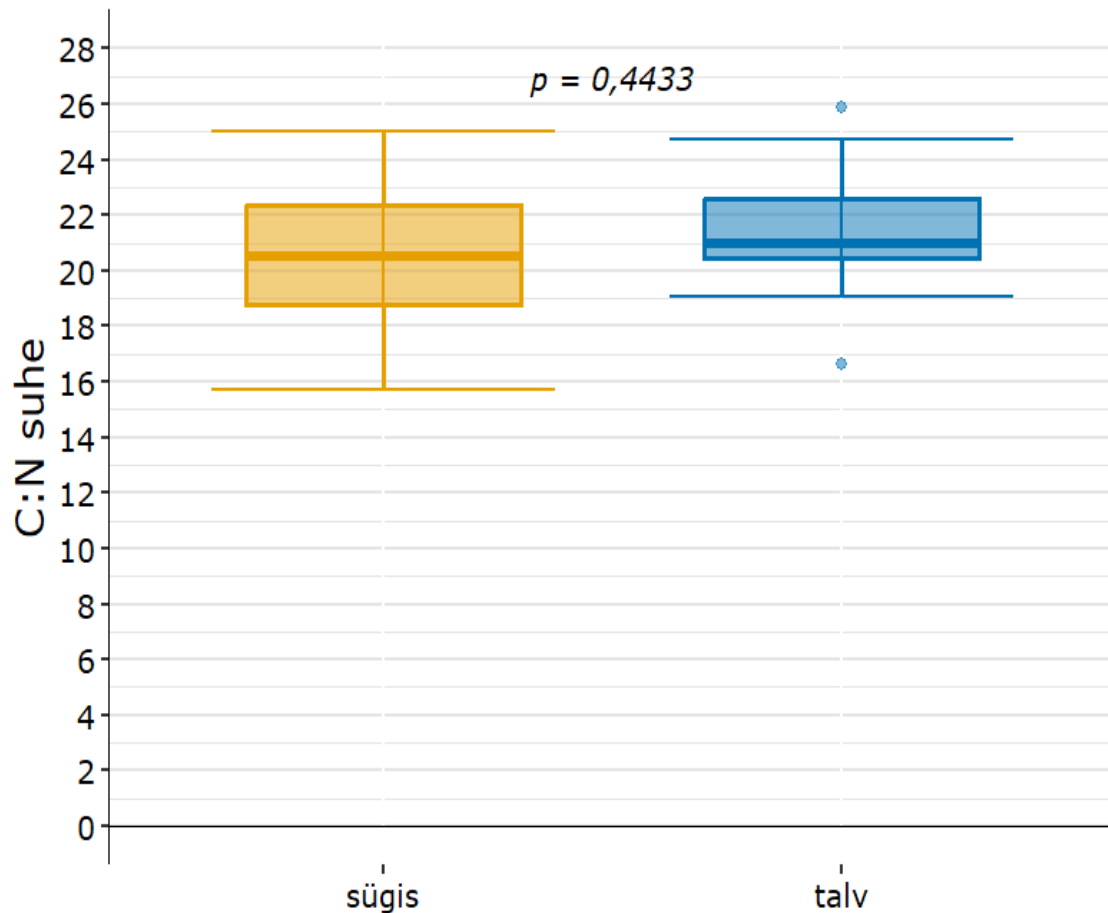
lõikuse järel taastunud taimede arvu mediaan on 11 tk/m<sup>2</sup> ja talvise lõikuse järel taastunud taimede arvu mediaan on 42 tk/m<sup>2</sup>. Taimede arvu puhul ei tulnud normaaljaotus hästi välja, nii et andmeid analüüsiti Mann-Whitney U-testiga, mille tulemusena saadi p-väärtuseks 0,01, mis näitab sügisel ja talvel niidetud taimede arvu taastumises statistilist olulisust. Varasemast uuringust on tulnud välja, et tehismärgalal on tavaliselt umbes 22–71 taime ruutmeerti kohta [13]. Graafikut (Joonis 7 lk 20) vaadates võib järeldada, et sügisene niitmine pärsib taimede kasvu ja talvine niitmine on keskmine, aga ei paranda nende kasvu otseselt.



Joonis 8. Taastunud laialehise hundinuia lehepindala indeks LAI (m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>) erinevatel niitmisaegadel. Esitatud on lehepindala indeksi miinimum- ja maksimumväärtused (vurrud), 25–75% kvartiilid (karbid) ning mediaanväärtused (jooned karbis). Esitatud p-väärtus näitab lehepindala indeksi statistilist olulisust niitmisaegade vahel t-testi põhjal ( $p = 0,005$ ).

Lisaks suuremale biomassile ja taimede arvule, oli statistiliselt erinev ka taimede lehepindala indeks, mis viitab taimede efektiivsemale toimimisele (lopsakam). Siinkohal on selgelt tulnud välja t-test, kus  $p = 0,005$  ehk niitmisaegade vahe on statistiliselt oluline. LAI ehk, tihedus ja fotosünteesiv pind taimedel on sügisel niidetud alal keskmiselt 1,15 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> ja talvel niidetud alas keskmiselt 2,26 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>. Sügisel niidetud alas varieerusid mõõtetulemused 0,41–2,11 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> ja talvel 0,718–3,31 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>.

Sarnaselt biomassile on talvise lõikuse mediaan (2,6) tunduvalt kõrgem kui sügise lõikuse oma (1,2), mis võiks viidata, et talvel niidetud taimed kasvavad lopsakamad ja tihedamalt (Joonis 8 lk 21). Varasemas uuringus on hundinuia lehtede LAI-ks saadud 4,1–5,5 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>, mis on veidi kõrgemal käesoleva katse tulemustest [13].



Joonis 9. Taastunud laialehise hundinuia C:N suhe erinevatel niitmisaegadel. Esitatud on C:N suhte miinimum- ja maksimumväärtused (vurrud), 25–75% kvartiilid (karbid) ning mediaanväärtused (jooned karbis). Kastidest väljapoole jäävad punktid tähistavad erindeid (outliers) ehk statistiliselt hälbivaid väärtusi. Esitatud p-väärtus näitab C:N suhte statistilist olulisust niitmisaegade vahel t-testi põhjal ( $p = 0,044$ ).

Graafikult (Joonis 9) on näha, et lõikamise aeg ei mõjuta taimede keemilist koostist taastumisel. Mediaan on sügisel lõigatud alal 20,53 ning talvel lõigatud alal 21,00. Sügisel niidetud ala (keskmise 20,40) ja talvel niidetud ala (keskmise 21,41) keskmised C:N suhted on väga lähedased. Sellise süsiniku-lämmastiku suhtega sobiks biomass biogaasi tootmiseks [22].

Statistiline analüüs näitas, et suviseks taastumisperiodiks oli erinevus sügise ja talvise niitmisaegade vahel kadunud ( $p$ -väärtus = 0,4436). See viitab sellele,

et niitmise aja valik ei avalda mõju taimede keemilisele koostisele ning märgala taimestik taastub suveks ühtlaselt. Vurrud viitavad, et sügisel lõigatud alal on taimed taastunud väga erinevalt, vurrud on ka väga suure vahega, mis näitab väga ebaühtlaseid tulemusi.



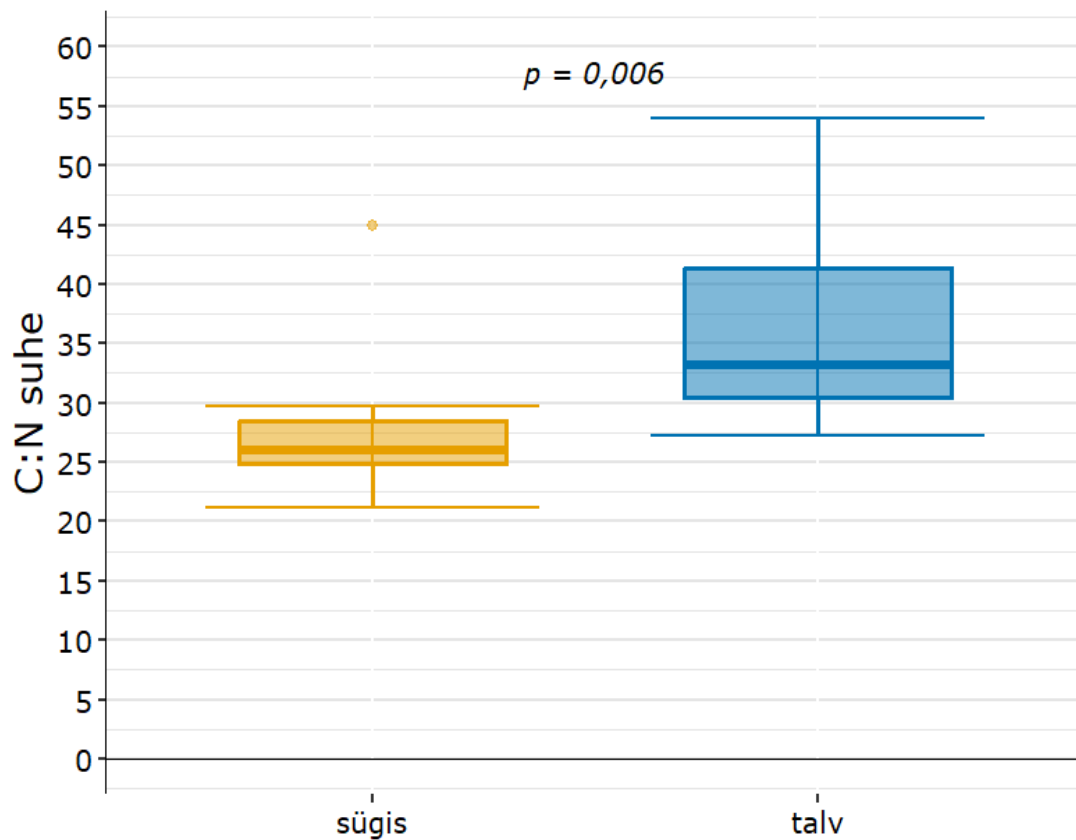
Joonis 10. Esimese märgala kattuvus taimedega 08.05.2025.

Nii kohapeal kui ka piltide pealt (Joonis 10) vaadeldes oli kindel erinevus taimede taastumisel. Esimese märgala keskelt läheb nõör ja see pool, kus niideti sügisel taimed maha, on palju vähem taimi tärganud võrreldes poolega, kus niideti hundinui talvel. Sügisel lõigatud taimede risoomid võisid saada niitmise käigus viga või toitained pole piisavalt risoomi jõudnud ja taimel on raskem tärgata kevadel [40]. Sellele viitab ka (Joonis 10), kus on näha kevadel tehtud pildilt, et sügisel lõigatud taimed on hõredamalt kui talvisel niidetud pool.

### 4.3 Toitainete (C ja N) sisaldus ja jaotumine eri aegadel

Kuna andmete esialgne analüüs näitas, et valim ei vasta normaaljaotuse tingimustele, kasutati gruppidevaheliste erinevuste hindamiseks Mann-Whitney U testi, kus p-väärtuseks ( $p < 0,05$ ) saadi 0,006 ehk tegemist on statistiliselt olulise erinevusega, kus C:N suhe erineb sügisel ja talvel niidetud taimedes (Joonis 11). Sügisel niidetud biomassi mõõtetulemused varieerusid 21–44,95 ja talvel 27,22–54,02. Sügisese niitmise ajal oli laialehise hundinuia C:N suhte mediaan umbes 26, kuid talviseks lõikuseks oli see tõusnud

umbes 33-ni. See viitab asjaolule, et sügisene biomassi eemaldamine on toitainete (lämmastiku) märgalast väljaviimise seisukohalt tõhusam, kuna talveperioodil toimub toitainete translokatsioon maa-alustesse osadesse või leostumine surnud taimmaterjalist.



Joonis 11. Sügisel vs talvel koristatud laialehise hundinua biomassi C:N suhe. Esitatud on C:N suhte miinimum- ja maksimumväärtused (vurrud), 25–75% kvartiilid (karbid) ning mediaanväärtused (jooned karbis). Kastidest väljapoole jääv punkt tähistavad erindit (outlier) ehk statistiliselt hälbiv väärtus. Esitatud p-väärtus näitab C:N suhte statistilist erinevust niitmisaegade vahel Mann-Whitney U-testi põhjal ( $p = 0,006$ ).

Talvine kõrgem C:N suhe näitab, et lämmastik on taimest eemaldunud (liikunud risoomi või leostunud), jättes alles süsinikurikka struktuurse biomassi. Seda, et taimed osad toitained biomassist risoomidesse viivad on teada juba mitmetest varasematest uuringutest [13], [16], [40]. Sügisese niitmise negatiivne mõju tarkamisele võib olla tingitud asjaolust, et toitainete liikumine risoomidesse polnud selleks hetkeks veel lõppenud. Seda kinnitab C:N suhte dünaamika: kui suvel oli mediaanväärtus 21 ja sügisel 26, siis talvel juba 33. Järelikult leiab suurem osa toitainete ümberpaigutamisest aset alles pärast oktoobrikuist koristust.

## KOKKUVÕTE

Põllumajanduslik hajukoormus on Eesti pinnaveekogude üks suurimaid surveallikaid, põhjustades toitainete (lämmastik ja fosfor) liia tõttu veekogude eutrofeerumist ehk kinnikasvamist. Üheks looduslähedaseks leevenduse meetmeks on tehismärgalade rajamine. Need süsteemid puhastavad vett eemaldades toitained ja orgaanilist ainet keemiliste, füüsikaliste ja bioloogiliste protsesside kaudu (setitamise, taimede toitainete omastamise ja mikroobsete protsesside kaudu). Olulisel kohal on makrofüüdid (näiteks laialehine hundinui), mis on suure biomassi tootlikkusega ja võimekas toitainete siduja. Kuid toitainete püsivaks eemaldamiseks süsteemist on vajalik biomassi regulaarne koristamine. Vastasel juhul vabanevad taimedesse kogutud ained lagunemisprotsessi käigus uuesti vette.

Uurimuse jaoks teostati katsed, kus kahel märgalal pool veepealsest biomassist eemaldati sügisel, liikudes märgala põhjal ja lõigates biomassi veepinnast kõrgemalt, ning teine pool eemaldati talvel jää pealt. Et hinnata taimede taastumist, lõigati kogu katseala ulatuses biomass järgneval suvel kasvuperioodi tipus. Taastumist hinnati biomassi, taimede arvu, lehepindala indeksi (LAI) ning süsiniku ja lämmastiku suhte alusel.

Tulemused näitasid, et talvel koristatud aladel oli järgmisel kasvuperioodil taimede taastumine oluliselt parem kui sügisel koristatud aladel. Talvel niidetud aladel oli keskmine biomass 1,19 (0,34–2,88) kg/m<sup>2</sup>, samas kui sügisel niidetud aladel 0,64 (0,31–1,34) kg/m<sup>2</sup>. Taimede arvukus (mediaan) oli talvisel ajal 42 (11–63) tk/m<sup>2</sup> ning sügisel niidetud alal 11 (11–32) tk/m<sup>2</sup>. Samuti oli talvel niidetud aladel suurem keskmine lehepindala indeks (2,26 (0,72–3,31) m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>) võrreldes sügisese niitmise (1,15 (0,41–2,11) m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>), mis viitab lopsakamale taimestikule. Süsiniku ja lämmastiku suhe varieerus sõltuvalt koristusajast, mis võib viidata sellele, et taim ei jõudnud kevadiseks taastumiseks piisavas koguses toitaineid risosfääri viia. Samas erinevatel aegadel niitmine ei mõjutanud taastunud taimede C:N suhet järgmisel hooajal, sest taimede keemiline koostis jäi samaks.

Sügisese koristuse käigus võis märgala risosfäär saada kahjustada, mis mõjutas negatiivselt taimestiku taastumist. Samuti võis märgalas liikumine ja niitmine põhjustada taimede varte vajumist vee alla, mille tulemusel tekkis risoomides anaeroobne keskkond. Lisaks ei pruukinud taimed olla jõudnud enne oktoobri algust piisavalt toitaineid ja hapnikku risoomidesse talletada.

Üldiselt tehismärgalade pikaajalise elujõulisuse tagamiseks Eestis on soovitatav teostada niitmist talvel jäält, mis toimib kui mehaaniline kaitsekiht. See tagab, et järgmisel aastal taimed taastuvad ootuspäraselt, mis on vajalik tõhusaks veepuhastuseks ja hapniku transpordiks risosfääri. Samas ei tohiks koristada taimi ära liiga tihti, et ökosüsteem saaks

taastuda. Suvine koristus vegetatsiooniperioodi tippajal on eelistatud vaid juhul, kui peamine eesmärk on maksimaalne toitainete (eriti lämmastiku) süsteemist väljaviimine, kuid seejuures peab arvestama taimestiku märgatava nõrgenemisega. Lisaks biomassi koristades suvel tekitab taimevarte lõikamisest lühiajalisi, kuid märkimisväärselt suuri CH<sub>4</sub> heitkoguseid. Hilissügisene koristus varasemate uuringute põhjal oli soovitatud, sest taimed on suure osa toitained viinud risoomidesse. Oktoobri algus on liiga vara niitmiseks, sest selle katse põhjal oli toitainete liikumine risoomi alles poole peal ning vegetatsiooniperiood polnud veel täielikult lõppenud. Poldud arvestatud ka sellega, et sügisese lõikuse käigus märgalal ringi kõndides kahjustatakse taimede risoome. Samas tuleb arvestada, et sügisene niitmine võib olla tõhusam toitainete eemaldamise seisukohalt.

Uurimustöö tulemused kinnitavad, et talvine niitmine soodustab laialehise hundinuia paremat taastumist. Edaspidi on oluline täpsustada tehismärgalade hooldamise regulatsiooni Eestis, määratledes selgelt vastutuse, hooldusintervallid ja kasutatavad meetodid. Samuti on vajalik uurida hundinuia biomassi väärimise võimalusi, arvestades logistikat, materjali kvaliteeti ja võimalikke keskkonnariske.

Käesoleva töö autor soovib tänada oma juhendajaid, Jürgen Sarjast, Kuno Kasakut ning Kaie Eha mõistva suhtumise, suure abi ja toetuse eest. Autor soovib tänada Tartu Ülikooli Keskkonnatehnoloogia töörühma, kes viis läbi välitööd ja laboratoorsed tööd. Käesoleva uurimistöö läbiviimist toetas Eesti Teadusagentuur (grant nr PSG714).

## SUMMARY

The Effect of Autumn and Winter Biomass Removal on the Recovery of Broadleaf Cattail (*Typha latifolia*) in a Free Water Surface Constructed Wetland for Reducing Agricultural Diffuse Pollution.

Agricultural diffuse pollution is one of the main pressures on Estonia's surface waters, causing eutrophication due to excess nitrogen and phosphorus. Constructed wetlands are a nature-based solution that remove nutrients and organic matter through physical, chemical, and biological processes such as sedimentation, plant uptake, and microbial activity. Macrophytes (e.g., broadleaf cattail) play a key role due to their high biomass and nutrient-binding capacity. Still, regular harvesting is necessary to permanently remove nutrients that are otherwise released back into the water during decomposition.

This study compared the effects of autumn versus winter harvesting on plant recovery in two wetlands. Half of the biomass was cut in autumn and the other half in winter (from ice). Recovery was assessed the following summer using biomass, plant density, leaf area index (LAI), and the carbon-to-nitrogen (C:N) ratio.

Results showed significantly better recovery after winter harvesting, as it minimizes disturbance and ensures effective plant recovery for continued water purification. Mean biomass was 1.19 kg/m<sup>2</sup> in winter-harvested areas and 0.64 kg/m<sup>2</sup> in autumn-harvested areas. Plant density and LAI were also notably higher after winter cutting, indicating more vigorous vegetation. Autumn harvesting likely reduced recovery due to rhizosphere disturbance and insufficient nutrient storage in rhizomes before cutting. Future work in Estonia should focus on optimizing management practices and on exploring the potential for utilizing harvested biomass.

The author of this work would like to thank their supervisors, Jürgen Sarjas, Kuno Kasak, and Kaie Eha, for their understanding, help, and support. The author also wishes to thank the University of Tartu Environmental Technology Lab for conducting the fieldwork and laboratory analyses. This research was supported by the Estonian Research Council (grant No. PSG714).

## VIIDATUD ALLIKAD

- [1] „Keskkonnaüleavaade - vesi | Keskkonnaportaal“. Vaadatud: 22. aprill 2026. [Online]. Available at: <https://keskkonnaportaal.ee/et/keskkonnauleavaade/keskkonnauleavaade-vesi>
- [2] M. Vainu, E. Lode, R. Rivis, T. Vaasma, ja E. Vandel, „Uuring põhjaveest sõltuvate pinnaveekogumite ja maismaaökosüsteemide seoste kindlakstegemiseks ning ühiste kontseptuaalsete mudelite ja seirekava väljatöötamiseks. Köide I. Põhjaveekogumist sõltuvad ökosüsteemid“, Tallinna Ülikooli Ökoloogia Keskus, Tallinn, RES.4.10.24-0008, dets 2025. [Online]. Available at: <https://kliimaministerium.ee/merendusveekeskond/projektid-ja-muu-teave/uuringud-ja-aruanded#2025>
- [3] K. Kasak, K. Piirimäe, ja S. Vahtrus, *Veekaitsemeetmed põllumajanduses: käsiraamat tootjale*, AS Ecoprint. 2016.
- [4] T. N. T. Ngoc, A. Policht-Latawicz, J. Dąbrowska, ja K. Michałowska, „Current challenges, methods, and strategies for reducing the transfer of nonpoint source pollution from agricultural areas to surface water“, *J. Water Land Dev.*, kd 2025-July-September, nr 66, lk 187–205, 2025, doi: 10.24425/jwld.2025.155314.
- [5] „Eesti vete seisund: väljakutsed ja võimalused | Keskkonnaagentuur“. Vaadatud: 2. mai 2026. [Online]. Available at: <https://www.keskkonnaagentuur.ee/node/2035>
- [6] Kliimaministerium, „Lääne-Eesti vesikonna veemajanduskava 2022–2027“, Kliimaministerium, 2022. Vaadatud: 22. aprill 2026. [Online]. Available at: <https://kliimaministerium.ee/sites/default/files/documents/2022-10/L%C3%A4%C3%A4ne-Eesti%20vesikonna%20veemajanduskava%202022-2027.pdf>
- [7] „Eutrophication – HELCOM“. Vaadatud: 22. aprill 2026. [Online]. Available at: <https://helcom.fi/baltic-sea-trends/eutrophication/>
- [8] Keskkonnaagentuur, „Pinnavee ja põhjavee seisund“, ArcGIS StoryMaps. Vaadatud: 22. aprill 2026. [Online]. Available at: <https://storymaps.arcgis.com/stories/955b68ec081c472aaa9e07d1acd49998>
- [9] *Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy*, kd 2000/60/EC. 2000. Vaadatud: 22. aprill 2026. [Online]. Available at: <http://data.europa.eu/eli/dir/2000/60/oj>
- [10] *Council Directive of 12 December 1991 concerning the protection of waters against pollution caused by nitrates from agricultural sources (91/676/EEC)*, kd 91/676/EEC. 1991. Vaadatud: 22. aprill 2026. [Online]. Available at: <http://data.europa.eu/eli/dir/1991/676/2008-12-11>

- [11] „Veeseadus–Riigi Teataja“. Vaadatud: 4. detsember 2025. [Online]. Available at: <https://www.riigiteataja.ee/akt/122022019001?leiaKehtiv>
- [12] Kliimaministeerium, „Nõukogu direktiivi 91/676/EMÜ, veekogude kaitsmise kohta põllumajandusest lähtuva nitraadireostuse eest, täitmine Eestis 2020–2023“, Kliimaministeerium, Tallinn, 2024. [Online]. Available at: [https://kliimaministeerium.ee/sites/default/files/documents/2024-10/Nitrate\\_report\\_2024\\_Estonia.pdf](https://kliimaministeerium.ee/sites/default/files/documents/2024-10/Nitrate_report_2024_Estonia.pdf)
- [13] R. H. Kadlec ja S. Wallace, *Treatment Wetlands*, 2. tr. Boca Raton: CRC Press, 2009. doi: 10.1201/9781420012514.
- [14] A. Noorvee, Ü. Mander, K. Karabelnik, E. Põldvere, ja Ma. Maddison, *Kombineeritud pinnasfiltersüsteemide ja tehismärgalapuhastite rajamise juhend*. Tartu: Tartu Ülikooli Tehnoloogiainstituut, Tartu Ülikooli Ökoloogia ja Maateaduste Instituut Geograafia osakond, 2007. [Online]. Available at: [http://www.geo.ut.ee/pinnasfilter/pinnasfilter\\_juhend.zip](http://www.geo.ut.ee/pinnasfilter/pinnasfilter_juhend.zip)
- [15] I. Talpsep, K. Kasak, K. Piirimäe, ja I. Tamm, *Tehismärgalad: põllumees puhastab vett*. 2012. [Online]. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/236896137\\_Tehismargalad\\_pollumees\\_puhastab\\_vett](https://www.researchgate.net/publication/236896137_Tehismargalad_pollumees_puhastab_vett)
- [16] M. Kõiv-Vainik, I. Ostonen, C. O. Kanu-Oji, ja K. Kasak, „Assessment of nutrient storage and translocation in winter harvested *Typha latifolia* from free-water surface treatment wetland mitigating diffuse agricultural pollution“, *Sci. Total Environ.*, kd 962, lk 178424, jaan 2025, doi: 10.1016/j.scitotenv.2025.178424.
- [17] K. Kill *et al.*, „Phosphorus removal efficiency by in-stream constructed wetlands treating agricultural runoff: Influence of vegetation and design“, *Ecol. Eng.*, kd 180, lk 106664, juuli 2022, doi: 10.1016/j.ecoleng.2022.106664.
- [18] S. Bansal *et al.*, „Typha (Cattail) Invasion in North American Wetlands: Biology, Regional Problems, Impacts, Ecosystem Services, and Management“, *Wetlands*, kd 39, nr 4, lk 645–684, aug 2019, doi: 10.1007/s13157-019-01174-7.
- [19] R. J. E. Vroom *et al.*, „*Typha latifolia* paludiculture effectively improves water quality and reduces greenhouse gas emissions in rewetted peatlands“, *Ecol. Eng.*, kd 124, lk 88–98, dets 2018, doi: 10.1016/j.ecoleng.2018.09.008.
- [20] J. Vymazal, „Removal of nutrients in constructed wetlands for wastewater treatment through plant harvesting – Biomass and load matter the most“, *Ecol. Eng.*, kd 155, lk 105962, aug 2020, doi: 10.1016/j.ecoleng.2020.105962.
- [21] S. B. Kurniawan *et al.*, „Macrophytes as wastewater treatment agents: Nutrient uptake and potential of produced biomass utilization toward circular economy initiatives“, *Sci. Total Environ.*, kd 790, lk 148219, okt 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148219.

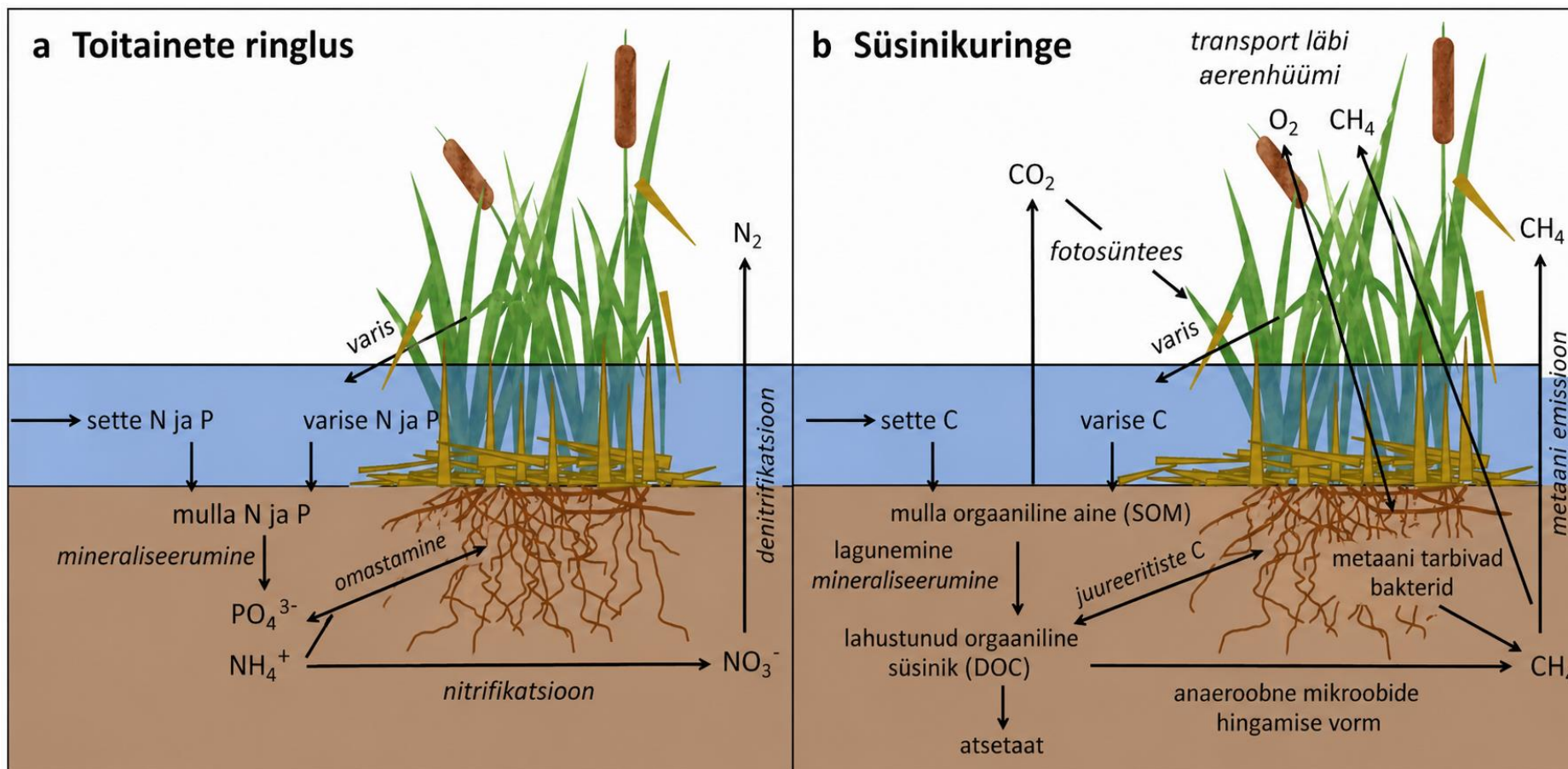
- [22] K. Kasak, K. Kill, J. Pärn, ja Ü. Mander, „Efficiency of a newly established in-stream constructed wetland treating diffuse agricultural pollution“, *Ecol. Eng.*, kd 119, lk 1–7, aug 2018, doi: 10.1016/j.ecoleng.2018.05.015.
- [23] K. Kasak *et al.*, „Experimental harvesting of wetland plants to evaluate trade-offs between reducing methane emissions and removing nutrients accumulated to the biomass in constructed wetlands“, *Sci. Total Environ.*, kd 715, lk 136960, mai 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.136960.
- [24] I. Okiti, G. Efakwu, M. Pindus, ja K. Kasak, „Environmental and biogeochemical drivers of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O flux variability in treatment wetlands“, *Ecol. Eng.*, kd 219, lk 107705, sept 2025, doi: 10.1016/j.ecoleng.2025.107705.
- [25] M. Maddison, „Dynamics of phytomass production and nutrient standing stock of cattail and its use for environment-friendly construction“, 2008, [Online]. Available at: <http://hdl.handle.net/10062/7809>
- [26] J. Pijlman, J. Geurts, R. Vroom, M. W. P. Bestman, C. Fritz, ja N. Eekeren, „The effects of harvest date and frequency on the yield, nutritional value and mineral content of the paludiculture crop cattail (*Typha latifolia* L.) in the first year after planting“, *Mires Peat*, kd 25, mai 2019, doi: 10.19189/MaP.2017.OMB.325.
- [27] M. E. Rahman *et al.*, „Design, Operation and Optimization of Constructed Wetland for Removal of Pollutant“, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, kd 17, nr 22, lk 8339, jaan 2020, doi: 10.3390/ijerph17228339.
- [28] M. Kõiv-Vainik, L. Lopp, I. Okiti, M. Pindus, ja K. Kasak, „Enhancing agricultural soil fertility and improving crop yield with the sediment dredged from the treatment wetland“, *Ecol. Eng.*, kd 227, lk 107942, juuni 2026, doi: 10.1016/j.ecoleng.2026.107942.
- [29] J. Vymazal, „Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Five Decades of Experience“, 2011, doi: 10.1021/es101403q.
- [30] „CONSTRUCTED WETLANDS – LISA“. Vaadatud: 23. veebruar 2026. [Online]. Available at: <https://lisa.icem.com.au/nbs/constructed-wetlands/>
- [31] J. C. M. Rosendo, G. M. da Paz, ja A. Rosendo, „Constructed wetlands applied on domestic wastewater for decentralized systems: concepts, processes, modalities, combinations and enhancements; a review“, *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.*, kd 21, nr 2, lk 371–397, juuni 2022, doi: 10.1007/s11157-022-09616-1.
- [32] Ü. Mander, M. Maddison, A. C. Valach, K. Soosaar, K. Kill, ja K. Kasak, „High methane emissions as trade-off for phosphorus removal in surface flow treatment wetlands“, *Aquat. Bot.*, kd 190, lk 103719, jaan 2024, doi: 10.1016/j.aquabot.2023.103719.
- [33] E. Jabłońska, M. Winkowska, M. Wiśniewska, J. Geurts, D. Zak, ja W. Kotowski, „Impact of vegetation harvesting on nutrient removal and plant biomass quality in

- wetland buffer zones", *Hydrobiologia*, kd 848, nr 14, lk 3273–3289, aug 2021, doi: 10.1007/s10750-020-04256-4.
- [34] R. Rannap, M. Vaikre, E. Soomets-Alver, K. Vellak, L. Remm, ja P. Lõhmus, „Juhis maaparanduse keskkonna- ja elustikumõjude leevendamiseks: lühiversioon“. Keskkonnaamet, Tartu, 2024. [Online]. Available at: [https://keskkonnaamet.ee/sites/default/files/documents/2024-02/240131\\_Lyhijuhend\\_T%C3%9C.pdf](https://keskkonnaamet.ee/sites/default/files/documents/2024-02/240131_Lyhijuhend_T%C3%9C.pdf)
- [35] „Maaparandushoiutööde nõuded–Riigi Teataja“. Vaadatud: 30. aprill 2026. [Online]. Available at: <https://www.riigiteataja.ee/akt/120122018013?leiaKehtiv>
- [36] „Pinnaveekogumite nimekiri, pinnaveekogumite ja territoriaalmereseisundiklasside määramise kord, pinnaveekogumite ökoloogiliste seisundiklasside kvaliteedinäitajate väärtused ja pinnaveekogumiga hõlmamata veekogude kvaliteedinäitajate väärtused–Riigi Teataja“. Vaadatud: 30. aprill 2026. [Online]. Available at: <https://www.riigiteataja.ee/akt/121042020061>
- [37] Usda Nrcs National Plant Data Center & Idaho Plant Materials Center, „Broad-leaved Cattail (*Typha latifolia* L.)“. USDA NRCS, 2006. [Online]. Available at: [https://plants.sc.egov.usda.gov/DocumentLibrary/plantguide/pdf/cs\\_tyla.pdf](https://plants.sc.egov.usda.gov/DocumentLibrary/plantguide/pdf/cs_tyla.pdf)
- [38] „laialehine hundinui - täiendav info“. Vaadatud: 1. mai 2026. [Online]. Available at: <https://bio.edu.ee/taimed/oistaim/hundinui2.htm>
- [39] S. Bansal *et al.*, „*Typha* (Cattail) Invasion in North American Wetlands: Biology, Regional Problems, Impacts, Ecosystem Services, and Management“, *Wetlands*, kd 39, nr 4, lk 645–684, aug 2019, doi: 10.1007/s13157-019-01174-7.
- [40] E. G. Garver, D. R. Dubbe, ja D. C. Pratt, „Seasonal patterns in accumulation and partitioning of biomass and macronutrients in *Typha* spp.“, *Aquat. Bot.*, kd 32, nr 1, lk 115–127, okt 1988, doi: 10.1016/0304-3770(88)90092-7.
- [41] A. Parzych ja Z. Sobisz, „The ability of *Typha latifolia* L. to accumulate nutrients from rural ponds“, *Desalination Water Treat.*, kd 288, lk 188–196, märts 2023, doi: 10.5004/dwt.2023.29383.
- [42] G. Bonanno, J. Vymazal, ja G. L. Cirelli, „Translocation, accumulation and bioindication of trace elements in wetland plants“, *Sci. Total Environ.*, kd 631–632, lk 252–261, aug 2018, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.03.039.
- [43] M. P. Ciria, M. L. Solano, ja P. Soriano, „Role of Macrophyte *Typha latifolia* in a Constructed Wetland for Wastewater Treatment and Assessment of Its Potential as a Biomass Fuel“, *Biosyst. Eng.*, kd 92, nr 4, lk 535–544, dets 2005, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2005.08.007.
- [44] J. J. M. Geurts *et al.*, „Nutrient removal potential and biomass production by *Phragmites australis* and *Typha latifolia* on European rewetted peat and mineral

- soils", *Sci. Total Environ.*, kd 747, lk 141102, dets 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141102.
- [45] „QGIS Desktop 3.22.10". Vaadatud: 4. mai 2026. [Online]. Available at: <https://qgis.org/download/>
- [46] J. Sarjas, M. Kõiv-Vainik, I. Tamm, ja K. Kasak, „Long-term assessment of in-stream treatment wetland efficiency in mitigating agricultural diffuse pollution", *Environ. Sci. Pollut. Res.*, kd 33, nr 11, lk 5069–5088, 2026, doi: 10.1007/s11356-026-37613-2.
- [47] P. Frich *et al.*, „Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century", *Clim. Res.*, kd 19, lk 193–212, jaan 2002, doi: 10.3354/cr019193.
- [48] Keskkonnaagentuur, „Tartu-Tõravere jaama ajaloolised ilmaandmed". 2025 2015. Vaadatud: 23. aprill 2026. [Online]. Available at: <https://www.ilmateenistus.ee/kliima/ajaloolised-ilmaandmed/>
- [49] „Leaf area index (LAI): The researcher's complete guide - METER Group". Vaadatud: 3. mai 2026. [Online]. Available at: <https://metergroup.com/education-guides/the-researchers-complete-guide-to-leaf-area-index-lai/>
- [50] „Geokuup Metadata Catalogue". Vaadatud: 3. mai 2026. [Online]. Available at: <https://metadata.geokuup.ee/geonetwork/srv/est/catalog.search#/metadata/1448f5de-234f-496d-99ef-41a3fae62243>
- [51] „LAI-2200C Plant Canopy Analyzer", LI-COR Environmental. Vaadatud: 3. mai 2026. [Online]. Available at: <https://www.licor.com/products/leaf-area/LAI-2200C>
- [52] „Organic elemental analyzer vario MACRO cube - Elementar". Vaadatud: 3. mai 2026. [Online]. Available at: <https://www.elementar.com/en/products/organic-elemental-analyzers/vario-macro-cube>
- [53] „Microsoft Excel | Tasuta veebipõhine tabelarvutusprogramm". Vaadatud: 4. mai 2026. [Online]. Available at: <https://www.microsoft.com/et-ee/microsoft-365/excel>
- [54] „Download RStudio Desktop and Server | Posit Data Science Tools". Vaadatud: 4. mai 2026. [Online]. Available at: <https://posit.co/downloads>
- [55] „Create Elegant Data Visualisations Using the Grammar of Graphics". Vaadatud: 4. mai 2026. [Online]. Available at: <https://ggplot2.tidyverse.org/>
- [56] A. Kassambara, L. E. (Faculty of E. and Business, U. of Debrecen, ja Hungary), *ggpubr: „ggplot2" Based Publication Ready Plots*. (24. veebruar 2026). Vaadatud: 4. mai 2026. [Online]. Available at: <https://cran.r-project.org/web/packages/ggpubr/index.html>
- [57] „A Grammar of Data Manipulation". Vaadatud: 4. mai 2026. [Online]. Available at: <https://dplyr.tidyverse.org/>
- [58] „Make Dealing with Dates a Little Easier". Vaadatud: 4. mai 2026. [Online]. Available at: <https://lubridate.tidyverse.org/>

- [59] „zoo package in R“, GeeksforGeeks. Vaadatud: 4. mai 2026. [Online]. Available at: <https://www.geeksforgeeks.org/r-language/zoo-package-in-r/>
- [60] M. ruumiamet, „Aluskaardid“. Vaadatud: 4. mai 2026. [Online]. Available at: <https://geoportaal.maaamet.ee/est/aluskaardid-p486.html>
- [61] M. ruumiamet, „Eesti topograafia andmekogu“. Vaadatud: 4. mai 2026. [Online]. Available at: <https://geoportaal.maaamet.ee/est/ruumiandmed/eesti-topograafia-andmekogu-p79.html>
- [62] G. Mancuso, D. C. Duran Lugo, E. Spizzirri, A. Toscano, ja F. Valenti, „Optimizing plant biomass from constructed wetlands for biogas production within the water-energy-food nexus“, *Energy Nexus*, kd 21, lk 100626, märts 2026, doi: 10.1016/j.nexus.2025.100626.
- [63] A. B. Somers, K. A. Bridle, D. W. Herman, ja A. B. Nelson, „Managing Wetland Vegetation pt 5“, *The Restoration & Management of Small Wetlands of the Mountains & Piedmont in the Southeast: A Manual Emphasizing Endangered & Threatened Species Habitat with a Focus on Bog Turtles*, Natural Resources Conservation Service & University of North Carolina at Greensboro, 2000. [Online]. Available at: <https://www.wcc.nrcs.usda.gov/ftpref/wntsc/strmRest/SEwetlands/ch5.pdf>
- [64] M. Maddison, T. Muring, K. Remm, M. Lesta, ja Ü. Mander, „Dynamics of *Typha latifolia* L. populations in treatment wetlands in Estonia“, *Ecol. Eng.*, kd 35, nr 2, lk 258–264, veebr 2009, doi: 10.1016/j.ecoleng.2008.06.003.

**Lisa 1. Ainerings avaveelistes tehismärgalades**



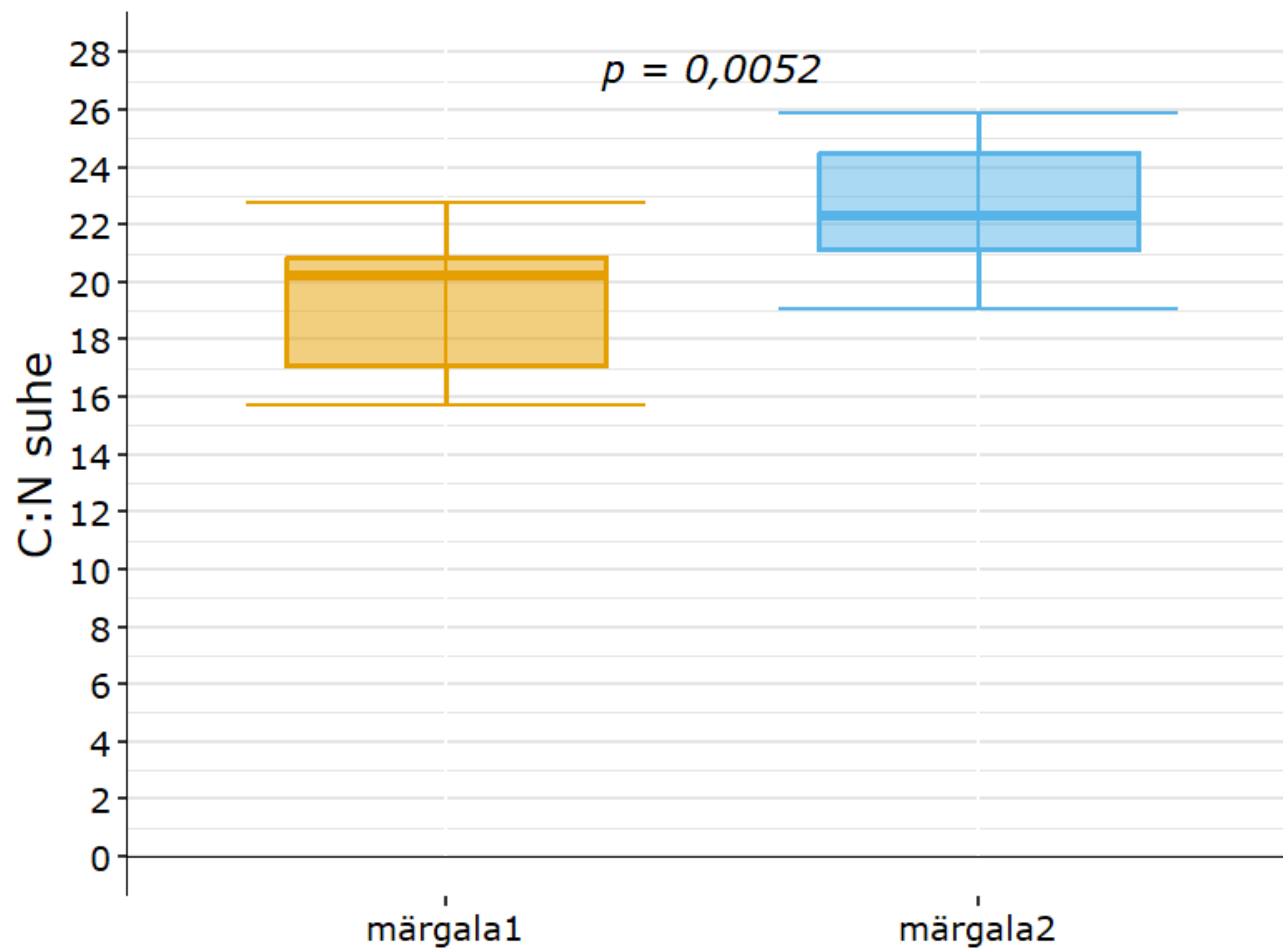
a. Toitainete ringlus b. Süsinikuringe (kohandatud) [39]

## Lisa 2. Vända kraavile rajatud tehismärgalasüsteem



(koostatud tarkvaraga QGIS [45] Maa-amet[58] (ETAK)[59])

Lisa 3. Taastunud laialehise hundinuia C:N suhe märgala kaupa.



Esitatud on C:N suhte miinimum- ja maksimumväärtused (vurrud), 25–75% kvartiilid (karbid) ning mediaanväärtused (jooned karbis).

Esitatud p-väärtus näitab C:N suhte statistilist erinevust märgalade vahel t-testi põhjal ( $p = 0,005$ )