

TARTU ÜLIKOOL
Loodus- ja täppisteaduste valdkond
Ökoloogia ja maateaduste instituut
Geograafia osakond

Bakalaureusetöö keskkonnatehnoloogias (12 EAP)

**Põllumajanduslikku hajukoormust vähendava avaveelise
tehismärgala sette mõju mulla viljakusele ja teravilja kasvule**
Lii Lopp

Juhendajad:
Kuno Kasak, PhD
Margit Kõiv-Vainik, PhD

Tartu 2024

Põllumajanduslikku hajukoormust vähendava avaveelise tehismärgala sette mõju mulla viljakusele ja teravilja kasvule

Kliimamuutustest tingitud põllumajandusliku saagikuse vähenemist püütakse kompenseerida suurema mulla väetamisega, et tagada kõrge tootlikkus. Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks oli välja selgitada avaveelise tehismärgala sette mõju põllumulla tervisele ja viljakusele ning vilja kvaliteedile ning võrrelda sette mõju teiste mullaviljakust parandavate meetoditega. Töö sooritamiseks püstitati kaks hüpoteesi: 1) sete parandab mulla viljakust ja orgaanika sisaldust ja 2) sete tagab samaväärse tulemuse vilja kvaliteedis võrreldes mineraalväetise ja digestaadiga. Teostatud põllukatses võrreldi paralleelselt neljal katsealal suvinisu kasvu ja saagikuse ning mullaviljakuse muutust. Peamine tulemus oli suurim saagikus sette katsealal, mis oli oluliselt kõrgem kui algse põllumullaga alal ning suurem kui mineraalväetise või digestaadi lisandiga aladel. Suurem saagikus oli tingitud peamiselt suuremast mulla niiskusest ja orgaanilise süsiniku sisaldusest sette katsealal.

Märksõnad: avaveeline tehismärgala, digestaat, hajureostus, mullaparandus, NPK mineraalväetis, ringmajandus, sete

CERCS: T270 Keskkonnatehnoloogia, reostuskontroll

The impact of the sediment from agricultural diffuse pollution control surface-flow treatment wetland on soil fertility and grain yield

The reduction in agricultural yield due to climate change is compensated for by the amount of fertilizers applied to the fields. This bachelor's thesis aims to determine the impact of treatment wetland sediment on soil health and fertility and the quality and yield of the crop and to compare the effect of the sediment with other soil amendment methods. To carry out the work, two hypotheses were established: 1) the sediment improves soil fertility and organic matter content, and 2) the sediment ensures an equal result in terms of crop yield and quality compared to mineral fertilizer and digestate. The field experiment compared changes in spring wheat growth, yield, and soil fertility across four experimental areas. The main result of this experiment was that the sediment plot had a significantly higher yield than the control plot and a higher yield than mineral fertilizer and digestate as soil amendment. This was probably due to higher soil moisture and organic carbon content in the sediment plot.

Keywords: circular economy, digestate, diffuse agricultural pollution, NPK mineral fertiliser, sediment, soil amendment, surface-flow treatment wetland,

CERCS: T270 Environmental technology, pollution control

Sisukord

SISSEJUHATUS	5
1. TEOREETILINE TAUST	7
1.1. Kliimamuutuse mõju põllumajandusele	7
1.2. Hajukoormus.....	8
1.3. Avaveeline tehismärgala.....	9
1.4. Saagikuse suurendamise viisid põllumajanduses.....	10
1.4.1. Mineraalväetised	11
1.4.2. Digestaat ehk kääritusjääk	12
1.4.3. Tehismärgala sette kasutamine põllumaal	12
2. MATERJAL JA METOODIKA	15
2.1. Uuringuala kirjeldus ja katse ülesehitus	15
2.1.1. Põllumuld	16
2.1.2. Avaveelise tehismärgala sete	17
2.1.3. Digestaat	18
2.1.4. NPK mineraalväetis	19
2.1.5. Suvinisu.....	19
2.2. Katse proovivõtt, seire ja analüüsimine	20
2.2.1. Mullaproovide võtmise meetodika ja analüüsid	22
2.2.2. Taime kõrguskasvu dünaamika analüüs	23
2.2.3. Mulla temperatuuri ja niiskuse muutused ajas.....	23
2.2.4. Õhutemperatuur, sademed ja õhuniiskus	24
2.2.5. Biomassi analüüs	24
2.3. Andmete analüüs ja autori roll välitöodes	25
3. TULEMUSED	26
3.1. Avaveelise tehismärgala sette sobivus.....	26
3.2. Teravilja kasvu mõjutavad keskkonnaparameetrid.....	26
3.2. Mulla näitajad	29
3.3. Taimede kasv ja saagikus.....	31
4. ARUTELU	34
KOKKUVÕTE	39
Summary	41
Tänuavaldused	43

KASUTATUD KIRJANDUS	44
LISAD	50
Lisa 1. Katseala mulla algne koostis	50
Lisa 2. Väetistarbe klassid ja toiteelementide sisaldused	51
Lisa 3. Sette koostis ja vajalik sette kogus vastavalt toitainete vajadusele	52
Lisa 4. Kultuuride väetamine	53
Lisa 5. Digestaadi analüüsi protokoll	54
Lisa 6. Digestaadi vajalik kogus katsealale toiteelemendi järgi	55
Lisa 7. Avaveelise tehismärgala sette pestitsiidide analüüsi tulemused	56
Lisa 8. Raskemetallide sisaldus settes	58
Lisa 9. Kvaliteedinõuded toidunisule	58
Lisa 10. Kompleksväetise NPK koostis	58

SISSEJUHATUS

Kliimamuutusega kaasnevad üha sagedasemad ekstreemsed ilmastikuolud, mis põhjustavad probleeme põllumajanduslikus tootmises. Sagenevad ja pikenevad põuad vegetatsiooniperioodil vähendavad põllumajandussaaduste kogust ning suurendavad põllumeeste kulutusi (Calvin *et al.*, 2023).

Kasvav rahvastikuarv ning vähenev põllumajanduslik saagikus suurendavad näljahädade probleemi kogu maailmas (Krasilnikov Taboada & Amanullah, 2022; Zahid, Robinson & Kelly, 2016). Põllumajanduse jaoks sobiliku maa-ala vähenemine paneb ühiskonna seisma silmitsi uute katsumustega, et leida lahendusi toidunõudluse rahuldamiseks (Alexandratos & Bruinsma, 2012).

Üheks lihtsaimaks viisiks saagikuse suurendamiseks põldudel on taime primaartoitainete suurendamine mullas (Liu, Xu & Yi, 2021). Nõudlus mineraalväetiste järgi on järjest kasvutrendis ning näiteks fosforiidi kaevandamise mahud suurenevad iga aasta (Grand View Research, 2023). Nõudluse kasvust tingituna suureneb ka mineraalväetiste hind maailmaturul, pannes põllumehed järjest raskemasse seisu: vähese niiskuse tõttu väheneb saagikus põldudelt ning sellest saadav tulu, kuid väetiste ja taimekaitsevahendite hinnad järjest kallinevad (Grand View Research, 2023).

Teisest küljest kasvavate mineraalväetiste kogustega suureneb uute toitainete lisandumine keskkonda. Liigsed toidained põhjustavad häiringuid ökosüsteemide tasakaalus (Krasilnikov *et al.*, 2022). Vihmaveega jõuavad põldudelt fosfor ja lämmastik hajukoormuse näol veekogudesse, kus nende rohkus soodustab veekogude kinnikasvamist ehk eutrofeerumist (Moss, 2007). Eutrofeerumine omakorda võib viia liikide hävimiseni ja pöördumatute muutusteni veeökosüsteemides (Alexander *et al.*, 2008).

Põllumajandusliku hajukoormuse vähendamiseks on rajatud suurema koormusega voluveekogudele looduspõhised lahendused - avaveelised tehismärgalad, mis keskkonnasõbralikult vähendavad toitainete sisaldust vees (Noorvee, Põldvere & Mander, 2007). Puhastusprotsessid on märgalades nii keemilised, füüsilised kui ka bioloogilised ning ühe füüsilise protsessina toimub toitainete vabanemine veest nende settimise teel tehismärgalas (Noorvee *et al.*, 2007). Toitainete kogunemisega settesse väheneb ajapikku tehismärgalades veesamba sügavus ning suurte veevoolude korral hakkavad toidained taas märgalast vabanema, mille vältimiseks tuleks tehismärgalast liigne sete eemaldada

(Johannesson *et al.*, 2011). Sete on orgaanika ja toitaineterikas materjal, mis võiks parandada põllumulla viljakust.

Varasemalt on teostatud uuringuid järvesette kasutuse kohta põllumajanduses (Renella, 2021), kuid ei ole uuritud avaveelise tehismärgala sete kasutuse sobivust ühe mullaparandus viisina põllumajanduses.

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärk on kirjeldada hajukoormuse vähendamiseks loodud avaveelise tehismärgala sete mõju põllumulla orgaanika sisaldusele ja viljakusele ning vilja kvaliteedile ning võrrelda sete mõju teiste mullaviljakust parandavate meetoditega: NPK mineraalväetise ja digestaadi ning algse põllumullaga. Töö kirjanduslikus ülevaates tuuakse välja kliimamuutuse mõju põllumajandusele, mullaparandusmeetodid ja nende mõjud ökosüsteemidele ning sellest tulenevad keskkonnaprobleemid ja nende lahendused. Käesoleva töö eksperimentaalses osas teostati põldkatse, et kindlaks määrata tehismärgala sete mõju mulla omadustele, viljakusele ning taime kasvule ja vilja kvaliteedile. Sete mullaparanduse efekti võrreldi algse põllumulla ehk kontroll-alaga ning digestaadi ja mineraalväetise lisandiga katsealadega.

Töö sooritamiseks püstitati hüpoteesid:

- Avaveelise tehismärgala sete parandab mulla viljakust ja orgaanika sisaldust.
- Avaveelise tehismärgala sete tagab samaväärse tulemuse vilja kvaliteedis võrreldes mineraalväetise ja digestaadiga.

1. TEOREETILINE TAUST

1.1. Kliimamuutuse mõju põllumajandusele

Põllumajandusel on arvestatav mõju kliimamuutusele. Kasvuhoonegaaside emissioonide suurenemise tõttu on globaalne pinnatemperatuur kasvanud perioodil 2011–2020 1,1 °C võrreldes perioodiga 1850–1900 (Calvin *et al.*, 2023). Üheks kasvuhoonegaaside emissioonide allikaks põllumajanduses on maakasutus ja maakasutuse muutus (Calvin *et al.*, 2023). Aastal 2019 moodustas põllumajandus 22% kasvuhoonegaaside emissioonidest, mis on väiksem kui tööstusest ja transpordist tulev heide, kuid siiski märkimisväärse kaaluga (Calvin *et al.*, 2023). Põllumehed seisavad silmitsi kliimamuutusega kaasnevate katsumustega.

Kliimamuutus mõjutab kõiki maailma piirkondi. IPCC raporti kohaselt sagenevad ekstreemsed ilmastikuolud, milleks on suured vihmad ja üleujutused ning ekstreemselt kõrged temperatuurid ja pikemad põuad, mis põhjustavad suuri muutusi enamikes eluvaldkondades, sealhulgas ka põllumajanduses (Calvin *et al.*, 2023). Euroopas laieneb piirkond, kus sagenevad ja pikenevad põuad mõjutavad drastiliselt põllumajandust, jättes teraviljad vegetatsiooniperioodil veeta (Maluleke, 2020). Tulenevalt põllumajanduse arengust on põllusaaduste tootmine maailmas ebahühtlaselt jaotunud, mis tuleneb peamiselt madala sissetulekuga riikides põllumajanduse arengu pidurdumisest ning piiratud ligipääsust teistes riikides toodetud toidule (Alexandratos & Bruinsma, 2012). Sademete puudus või vähesus vegetatsiooniperioodil vähendab teraviljade ja teiste põllumajandussaaduste saagikust, kuid rahvastiku populatsiooni kasvuga suureneb toidu ja tooraine nõudlus üle maailma (United Nations, n.d.).

Rahvastiku kasvuga kaasneb vajadus suurema saagi koguse järele põldudelt (Krasilnikov *et al.*, 2022; Zahid *et al.*, 2016). Vos & Bellù (2019) andmetel võib vahemikus 2013–2050 nõudlus toidu ja põllumajandussaaduste järele kasvada kuni 50% ning selle rahuldamiseks suurendatakse põllumajanduslikku maa-ala metsade ja rohumaade arvelt. Metsade ja teiste looduslike ökosüsteemide muutmise põllumajanduslikuks maaks suurendab kasvuhoonegaaside vooge ning põhjustab elurikkuse vähenemist (Vos & Bellù, 2019). Mitmetes piirkondades on kliimamuutus pannud piiri maa-ala suurendamisele põllumajanduse tarbeks, peamiselt maailmamere taseme tõusu ja vähenenud sademete tõttu (Vos & Bellù, 2019). Alexandratos & Bruinsma (2012) sõnul ei ole täieliku toidunõudluse rahuldamiseks enam piisavalt sobivat maa-ala, kus tegeleda põllumajandusega. Mitmetes piirkondades, kus

maa on tootmiseks sobilik, hakkavad rolli mängima teised tegurid: madal viljakus, toksilisus, kõrge haiguste esinemissagedus või vajaliku taristu puudumine (Alexandratos & Bruinsma, 2012). Alternatiiviks püütakse leida viise, kuidas tõhustada taimede kasvu ning seeläbi suurendada saagikust (Vos & Bellù, 2019). Saagikuse suurendamiseks on võetud kasutusele osades riikides GMO-d ehk geneetiliselt muundatud organismid (Rótolo *et al.*, 2015). GMO-de kasutuselevõtu eeldus on olnud suurem saagikus väiksema keskkonnamõjuga (Rótolo *et al.*, 2015). Kuid Euroopa turg on järjest vastumeelsem GMO-de kasutusele võtmise osas (Rótolo *et al.*, 2015). Seetõttu otsitakse paremaid mullaparandusviise viljakuse tõstmiseks (Kibblewhite, Ritz & Swift, 2008).

1.2. Hajukoormus

Enamik pinnaveekogude valglaid hõlmab ka intensiivse põllumajandusliku kasutusega maa-alasid, millelt sademevesi äravooluna veekogudesse jõuab. Osa veekogusid saab oma toite ainult vihma- ja pinnaveest, mistõttu mõjutab sinna jõudnud vee kvaliteet suuresti ka selle veekogu troofilist taset (Moss, 2007). Toidunõudluse rahuldamiseks suurendatakse pestitsiidide ja väetiste hulka põldudel, mis põhjustab ka suuremat keskkonnareostust (Unesco, 2015).

Põllumajandusega viiakse keskkonda rohkem toitaineid, kui neid sealt toodanguna eemaldub ning üleliigsed toidained koormavad ja viivad looduslikud toitainete ringed tasakaalust välja (Carpenter *et al.*, 1998). Toitained jõuavad veekogudesse põllumajanduslikult maalt peamiselt vihmaga erosiooni või läbi pinnase leostumise teel (Alexander *et al.*, 2008). Toitainete liikuvust mõjutavad lisaks väetiste kogustele ja väetamise ajale ka ilm, maakasutus, reljeef, mulla omadused ja harimisviisid (Järvan *et al.*, 2020). Hajukoormus on laialt põllumajanduslikult maalt veekogudesse jõudev reostus peamiselt toitainete kujul (Carpenter *et al.*, 1998). Põllumajanduslik hajukoormus on peamine veekogude seisundit halvendav tegur ning tema laiaulatuslikkuse tõttu on see raskemini jälgitav ja kontrollitav (Kasak, Piirimäe & Vahtrus, 2016). Hajukoormuse suurus sõltub väetiste kogustest, taimekasvu intensiivsusest ja väetamise ajast (Järvan *et al.*, 2020). Tehnoloogiate areng ja töövõtete paranemine põllumajanduses ei ole suutnud vähendada hajukoormust ega selle mõju pinnaveekogudele (Järvan *et al.*, 2020). Hajukoormusest tulenev suurem toitainete sisaldus veekogudes põhjustab nende eutrofeerumist (Carpenter *et al.*, 1998). Veekogude eutrofeerumisel on tugev mõju vee kvaliteedile ning sealsele ökosüsteemile ning sellega kaasneb hapniku sisalduse vähenemine

veekogu põhjakihtides, põhjustades hüpoksia ehk hapnikuvaeguse (Selman et al., 2008). Hüpoksia tulemusel väheneb elustik veekogu põhjas ning see võib viia kuni ökosüsteemi hävimiseni (Selman et al., 2008).

Hajukoormus mõjutab lisaks pinnaveekogudele ka põhjavee seisundit (Alexandratos & Bruinsma, 2012). Kaitsmata põhjaveega aladel liigub reostus kiiresti läbi pinnase, põhjustades joogivee kvaliteedi halvenemist (Alexandratos & Bruinsma, 2012).

Järvan et al. (2020) sõnul on hajukoormus praeguse rahvastiku kasvu juures vältimatu, kuid selle ulatuslikkust on võimalik vähendada, minimaliseerides lohakast majandamisest tulenevat reostust. Hajukoormust on võimalik vähendada kombineerides erinevaid meetodeid ning suurendades piiranguid (Unesco, 2015).

1.3. Avaveeline tehismärgala

Avaveelised tehismärgalad on looduspõhised lahendused, mis on mõeldud reostuse eemaldamiseks erinevat päritolu veest, sealhulgas põllumajandusliku hajukoormuse vähendamiseks pinnaveest läbi erinevate füüsikaliste, keemiliste ja bioloogiliste protsesside (Noorvee et al., 2007). Tehismärgalades väheneb vee voolukiirus, mille tõttu suureneb vee viibeaeg märgalas ning seeläbi on soodustatud toitainete sisalduse langus vees läbi erinevate protsesside (Talpsep et al., 2012).

Suurem osa reostustest eemaldatakse tehismärgalades läbi erinevate mikrobioloogiliste protsesside. Peamiselt nitraadi kujul põllumajandusmaadelt tulevas vees olev lämmastik eraldatakse märgalades peamiselt kolme protsessi käigus: denitrifikatsioon, settimine ja taimede poolne omastamine (Saunders & Kalff, 2001). Valdavalt on domineerivaks protsessiks denitrifikatsioon, kuid mingi osa nitraatidest ja orgaanilisest lämmastikust talletub märgala settesse (Kadlec & Wallace, 2009).

Avaveelistes tehismärgalades kasutatakse taimedena peamiselt suuri kaldataimi: nt harilik pilliroog (*Phragmites australis*) ja laialeheline hundinui (*Typha latifolia*). Vegetatsiooniperioodil bioloogiliste protsesside käigus loovad taimed soodsad tingimused mikroobide elutegevuseks ning toimub efektiivne toitainete (peamiselt lämmastiku) eemaldamine veest (Vymazal, 2010).

Vegetatsiooniperioodi lõppedes vabaneb osa süsinikust CO₂ kujul tagasi atmosfääri ning osa vabaneb vette, kuid umbes 20% süsinikust talletatakse märgalade settes (Kadlec & Wallace, 2009).

Setet, mis koosneb peamiselt orgaanikast ja toitainetest, koguneb tehismärgala tiikide põhja kogu aasta vältel: suviti settivad põldudelt märgalale jõudnud toitained ning sügiseti ja talviti koguneb settesse taimede lagunemisest tekkiv orgaanikarikas materjal (Johannesson *et al.*, 2011). Kuhjuv sete vähendab tehismärgalas veesamba sügavust, mille tulemusena hakkavad suuremate veevooludega toitained koos settega tagasi vette vabanema (Johannesson *et al.*, 2011). Tehismärgala toimimise seisukohalt on oluline periooditi toitainerikka sette eemaldamine, et tagada märgala maksimaalne puhastusefektiivsus (Johannesson *et al.*, 2011).

1.4. Saagikuse suurendamise viisid põllumajanduses

Põllumajanduse saagikuse suurendamiseks luuakse erinevaid tehnilisi ning elektroonilisi lahendusi põllu paremaks kaardistamiseks (Cherlinka, 2020). Tehnika arengule vaatamata on oluline keskenduda rohkem mulla tervisele ja selle kvaliteedile. Parema saagikuse tagab kindel toitainete, niiskuse ja orgaanika sisaldus mullas ning lisaks mõjutab mulla tervist ka mulla õhutatatus ning hapniku sisaldus (Cherlinka, 2020).

Mullatervise hoidmine on peamisi alustalasid jätkusuutlikus põllumajanduses (Kibblewhite *et al.*, 2008). Mullatervis on mulla võime toimida tervikliku ökosüsteemina, toetades põllumajanduslikku saadust ning teisi ökosüsteemi teenuseid ka pärast põllumajanduslikku sekkumist (Kibblewhite *et al.*, 2008). Halb mulla käitlemine põhjustab sageli pinnase erosiooni ja orgaanilise aine lagunemise aeglustumist, mis vähendab põllumajanduslikku saagikust ning on pikas perspektiivis kahjulik ka ümbritsevatele ökosüsteemidele (Kibblewhite *et al.*, 2008). Kibblewhite *et al.* (2008) töid välja, et terve põllumajandusmuld peaks toetama toiduainete ja kiudainete tootmist sellisel tasemel, mis vastaks inimeste vajadustele ja kvaliteedi nõuetele, kuid samal ajal endiselt pakkudes teisi ökosüsteemi teenuseid, mis on vajalikud elukvaliteedi säilimiseks inimestel ja bioloogilise mitmekesisuse tagamiseks.

Mullatervist mõjutavad mitmed parameetrid ning erinevad mulla tüübid käituvad maa harimisel erinevalt (Kibblewhite *et al.*, 2008). Osad mullad on oma olemuselt, struktuurilt ja geograafilise asukoha tõttu erosioonitundlikumad kui teised (Kibblewhite *et al.*, 2008). Mikroorganismid mullas mõjutavad mulla süsiniku ja energia varu, mis on mullatervise juures oluline, ning seega kaotavad väikse mikroorganismide mitmekesisusega mullad oma

funktsiooni ja ei suuda toimida enam terve ökosüsteemina (Kibblewhite *et al.*, 2008). Süsinik ning teised toitained on mulla süsteemi ja protsesse kontrollivad lülid, mõjutades mulla tervist, selle dünaamikat ja põllumajanduslikku toodangut (Kibblewhite *et al.*, 2008). Põllumulla rikastamiseks toitainetega on laialdaselt kasutusel mineraalväetised, kuid sellele meetodile on hakanud lisanduma ka teisi mullaviljakuse parandamise viise.

1.4.1. Mineraalväetised

Mineraalväetiseid on kasutatud juba 19. sajandi algusest (Russel & Williams, 1977), et suurendada mulla toitainete sisaldust ning seeläbi suurendada saagikust (Liu *et al.*, 2021). Põllumajanduses kasutatakse peamisi taimede toitaineid: fosfor, lämmastik, kaalium (US EPA, 2022). Lisaks viiakse põllule väetistega ka mikrotoitaineid (nt. tsink ja teised metallid) (US EPA, 2022). Kahekümnendal sajandil suurenes põllukultuuride saagikus 50% tänu mineraalväetiste kasutuselevõtule (Yousaf *et al.*, 2017) ning mineraalväetiste tootmise suurendamine ja kasutamise laiendamine on aidanud vähendada näljaprobleemi kogu maailmas (Erisman *et al.*, 2008).

Suurim nõudlus taimetoitainetest on fosforväetiste järele (Grand View Research, 2023) ning nende tootmiseks kaevandatakse maapõuest fosforiiti (Pistilli, 2023). Toidunõudluse suurenemine toob endaga kaasa ka mineraalväetiste nõudluse suurenemise (Pistilli, 2023) ning Grand View Research (2023) andmete põhjal ennustatakse 2040. aastaks 5,2% fosforväetise kaevandamise mahtude kasvu. Kaevandamise kulude suurenemine mõjutab suuresti ka fosforväetise hinda maailmaturul (Grand View Research, 2023). Kõrge väetise hind paneb põllumehed raskesse olukorda, kus põllumajanduse kulud hakkavad ületama tulusid ning põllumehed on sunnitud leidma odavaimaid ja alternatiivsemaid lahendusi (Grand View Research, 2023).

Väetiste vale kasutamine on viinud mitmete keskkonnaprobleemideni: veekogude eutrofeerumine, õhu reostus, mulla hapestumine ja lagunemine, põllukultuuride saagikuse vähenemine ning põldude toidu- ja energiatootmise jätkusuutlikkuse kahjustumine (Krasilnikov *et al.*, 2022). Tasakaalustamata mineraalväetiste kasutamine põhjustab ka suuremat kahjurite rünnakut ning mulla kooriku teket, mis omakorda suurendab pinnasest kasvuhoonegaaside vooge (Pahalvi *et al.*, 2021). Negatiivse keskkonnamõju tõttu on leitud osaliselt või täielikult alternatiivseid lahendusi mineraalväetisele.

Jätkusuutliku põllumajanduse arendamine võimalikult väikse negatiivse mõjuga keskkonnale on suur katsumus, millega tänapäeva teadlased silmitsi peavad seisma (Akinyemi & Ifejika Speranza, 2022). Üleliigsete toitainete kasutuselevõtt keskkonnast võiks olla üheks jätkusuutliku põllumajanduse väljenduse viisiks, et vältida uute toitainete ringlusse võtmist ja keskkonna lisakoormamist. Seega on orgaanilised väetised head võimalikud alternatiivid juba keskkonnas olevate toitainete ära kasutamiseks (Samuel & Dines, 2023).

1.4.2. Digestaat ehk kääritusjääk

Üheks orgaaniliseks väetiseks on digestaat ehk kääritusjääk, mis tekib loomsete ja taimsete jäätmete anaeroobsel lagunemisel ning see on peamine kõrvalprodukt biogaasi tootmisel (Kirchmann & Lundvall, 1993). Biogaasi tootmisel anaeroobses protsessis lagundavad bakterid orgaanilist ainet, mille saaduseks on toitaineterikas anorgaaniline vedelik (Kirchmann & Lundvall, 1993). Toormeks, milleks võib olla erinev loomasõnnik, põllumajanduslik jääde, tööstus- ja olmereovesi või ka toiduainetetööstuse jäätmed ning taimejäägid, on enamasti toitaineterikas materjal, milles on kõrge lämmastiku sisaldus (Ward *et al.*, 2008). Toitainete sisaldus ei muutu pärast anaeroobset käärimisprotsessi ning pärast biogaasi eraldumist saadakse kõrvalproduktiks toitaineterikas vedelik, mida on võimalik kasutada põllumajanduses (Loria *et al.*, 2007). Anaeroobse kääritamise käigus kontsentreeruvad toitained ning seetõttu on digestaadis toitainete (fosfor, lämmastik, kaalium) kontsentratsioon suurem kui sõnnikus või kompostmullas (Tambone *et al.*, 2010). Varasematest uurimustest on selgunud, et digestaadi kasutamisel ei ole täheldatud saagikuse erinevust võrreldes mineraalväetisega (Kouřimská, Poustková & Babička, 2012).

1.4.3. Tehismärgala sette kasutamine põllumaal

Avaveelise tehismärgala sette koostist ning sobivust põllumajanduses mullaparanduse meetodina on vähe uuritud. Sarnaselt avaveelistele tehismärgaladele jõuab toitaineid põldudelt ka teistesse pinnaveekogudesse.

Hajukoormusena jõuavad fosfor- ja lämmastikväetised vihma või lumesulamisveega põldudelt jõgedesse ja järvedesse. Fosfor kantakse põldudelt ära koos mullaosakestega erosiooni teel ning lämmastik uhutakse mulla pinnalt vihmaga (Mendes, Tonderski & Kjaergaard, 2018).

Seisvas veekogus settib mullaosakese külge seotud fosfor välja, kus tekib stabiilne fosfori ja raua ühend, mis hakkab kuhjuma põhjasettesse (Mendes *et al.*, 2018).

Veekogude põhja kuhjunud sete sisaldab suures koguses toitaineid ning suurendab seeläbi veekogu troofilist taset (Moss, 2007). Toitainetega rikastunud sete eemaldamine veekogude põhjast võib olla üks efektiivseid meetodeid eutrofeerumise vähendamiseks ning toitainete uuesti ringlusse võtmiseks (Kiani *et al.*, 2021). Sete, mis on saadud eutrofeerunud järvede taastamisest, on hea võimalus rikastada järvelähedast maa-ala toitainetega, mis suurendaks sealsete taimede kasvu ja kvaliteeti (Kiani *et al.*, 2023). Sete kasutamine mulla parandusviisina oleks ka hea alternatiiv mineraalväetistele, et vähendada uute toitainete ringlusse võtmist ning mineraalväetise jaoks toorme kaevandamise vajadust (Kiani *et al.*, 2021). Järjest olulisemaks on muutunud veekogude, nii jõgede, järvede kui ka sadamate, süvendamine kuhjunud settest, mis raskendab veesõidukite liikumist (Renella, 2021). Seetõttu on viimasel ajal teostatud mitmeid uuringuid veekogude põhjasette kasutusvõimalustest ja sobilikkusest põllumajanduses (Renella, 2021).

Kiani *et al.* (2021) laboratoorne katse näitas, et järvesette lisamine mullale suurendas taimede saagikust ja kvaliteeti, kuid põldkatse puhul (Kiani *et al.*, 2023) ei erinenud sete katseala kontroll katsealast (ehk ilma lisandita põllumullast) oluliselt. Sete kasutamine põllumajanduses võib suurendada toitainete ärakannet põldudel, mida on võimalik vähendada näiteks biosöe kasutamisega (Kiani *et al.*, 2021, 2023). Järvesette kasutamine võib ka suurendada kasvuhoonegaaside voogusid pinnasest peamiselt just vahetult peale selle kandmist põllule (Kiani *et al.*, 2023). Lisaks on järvesette kasutusest näiteid ka mujalt Euroopast, mille tulemused on olnud edukad ja palju töötavad (Renella, 2021).

Avaveelisel tehismärgalalt eemaldatud toitaineterikas sete on potentsiaalne taimedele kergesti omastatavate toitainete allikas (sarnaselt järvesettele), mida oleks võimalik kasutada põllumajanduses mullaparanduse meetodina ning toitainete allikana (Talpsep *et al.*, 2012). Saunders & Kalff (2001) uurimusest selgus, et märgalades toimub lämmastikust vabanemine tõhusamalt kui järvedes, mistõttu on potentsiaalselt märgalasette lämmastiku sisaldus suurem kui järvesettes. See suurendab tehismärgala sete kasutamise potentsiaali põllumajanduses. Sete kasutus põllumajanduses annaks võimaluse võtta kasutusele üleliigsed toitained keskkonnas ning võimaldaks vähendada mineraalväetise kasutust põldudel ning suurendada ringmajanduse osakaalu (Crocetti *et al.*, 2022). Avaveelise tehismärgala sete kasutuse sobivust põllumajanduses on vaja uurida, et kindlaks määrata selle positiivsed ning negatiivsed mõjud vilja kasvule.

Antud uurimise eesmärk on kindlaks määrata hajukoormuse vähendamiseks loodud avaveelise tehismärgala sette mõju mulla viljakusele ning vilja saagikusele. Sette mõju võrreldakse kontroll-ala ehk algse lisanditeta põllumulla, digestaadi lisandiga katseala ning NPK mineraalväetisega katsealaga (edaspidi mineraali katsealaga).

2. MATERJAL JA METOODIKA

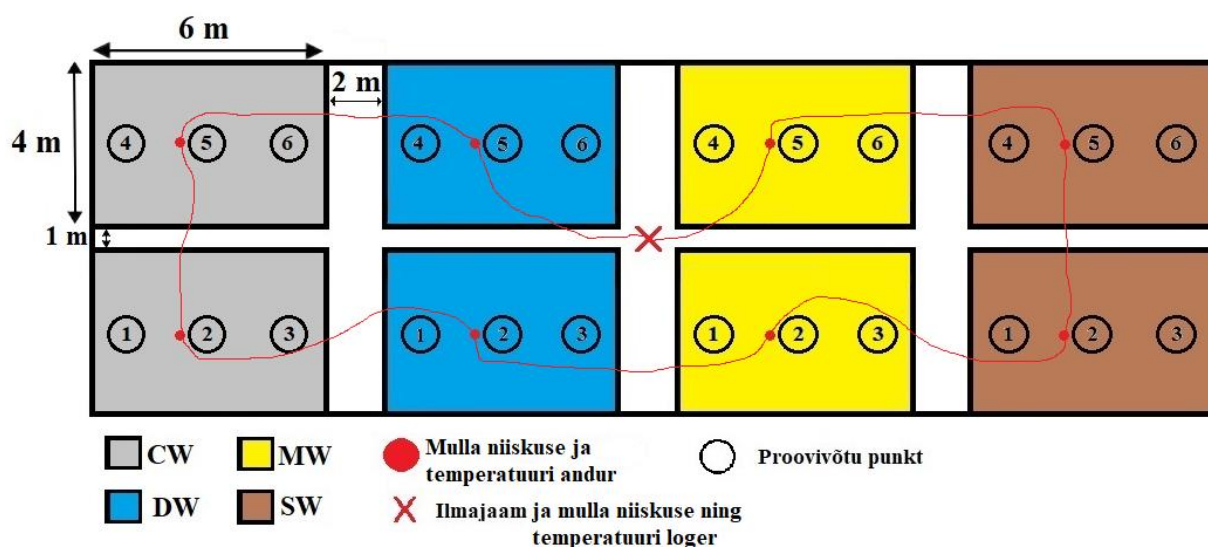
Uurimuse jaoks teostati põldkatse perioodil 5. mai 2023 kuni 6. septembri 2023.

2.1. Uuringuala kirjeldus ja katse ülesehitus

Antud töö uurimisala asub Reola külas Kambja vallas Tartumaal. Katse teostati koostöös Tagametsa Mahe OÜ ettevõttega. Detailne uurimisala kirjeldus ja katse ülesehitus on toodud tabelis 1.

Tabel 1. Katse ülesehitus.

Katse periood	5. mai 2023 – 6. september 2023			
Asukoht	58° 17' 1,07'' N; 26° 42' 33,06'' E			
Uurimisala suurus	270 m ²			
Katsealade arv	4			
Katseala mõõtmed	6 × 8 m			
Katseala suurus	54 m ²			
Proovipunktide arv katsealal	6			
Põllukultuur	Suvinisu „Happy“			
Mullaviljakuse parandamise meetod	Kontroll (ilma lisandita)	Mineraalväetis N:P:K	Digestaat	Avaveelise tehismärgala sete
Päritolu	-	Yara Mila	Tartu Biogaas OÜ	Vända avaveeline tehismärgala
Katseala kood	CW	MW	DW	SW



Joonis 1. Katseala skeem, kus mullaviljakuse parandamise meetod katsealadel on tähistatud: CW- kontroll, MW - mineraalväetis, DW - digestaat ja SW - tehismärgala sete. Punase täpiga on tähistatud mulla niiskuse ja temperatuuri andur ja punase ristiga on tähistatud ilmajaam ning mulla niiskuse ja temperatuuri loger (kokku 8 mõõtmispunkti). Katsealadel paiknevad ringid tähistavad proovivõtu punkte (kokku 6 punkti igal alal).

Uurimisala ettevalmistamiseks künti ja kultiveeriti põlluala läbi. Järgmise sammuna toimus uurimisala katsealadeks jaotamine, kus märkevahendeid kasutades pandi paika puhveralade ja katsealade suurused (Tabel 1 ja Joonis 1).

Uurimisala jagati ettevalmistamisel neljaks katsealaks (Tabel 1). Iga katseala vahel oli kahe meetri laiune puhverala, et vältida võimalikku mõju teistelt aladelt. Iga katseala oli omakorda jagatud kaheks võrdseks osaks, mille vahel oli ühe meetri laiune puhverriba proovide kogumiseks, et vältida proovivõtu ajal katsealade liigset tallamist (Joonis 1). Katseala pindala arvutustes ei ole sisse arvestatud katsealadel paiknevat puhverriba. Uurimisalal oli kokku 24 proovivõtu punkti, mis olid võrdselt jaotatud katsealade vahel (6 punkti igal alal). Igasse proovivõtupunkti asetati gaasiproovide kogumiseks spetsiaalsed plastist rõngad, mille ümbert (gaasiproovivõtu häirimise vältimiseks) ja seest toimusid ka teised proovivõtud (kirjeldatud järgnevas peatükis). Antud töös ei analüüsitud kasvuhoonegaaside mõõtmiste tulemusi.

2.1.1. Põllumuld

Algsete mulla parameetrite kaardistamiseks võeti enne katse algust 2023 aasta veebruaris (7.02.2023) mulla proovid kahest mulla kihist: keskmistatud proov kogu uurimisalalt kolmest

juhuslikust kohast mulla pindmisest kihist ning teine umbes 30 cm sügavuselt. Katseala esialgse mulla toitainete ja orgaanika sisaldused on välja toodud lisas 1.

Põllumulla toitainete sisalduse esmaseks hindamiseks lasti määrata uurimisala magneesiumi, fosfori ja kaaliumi sisaldus (mg/kg). Toitainete vajaduse arvutamiseks kasutati lisas 1 olevaid andmeid ja Kanger *et al.* (2014) loodud väetamise abimaterjali väetistarbe klasside ja toiteelementide sisalduse tabelit (Lisa 2). Toiteelementide vajadused jäid klassidesse: magneesium – väike, fosfor – väga väike, kaalium – väike.

Taime primaarsed makrotoitained on lämmastik, fosfor ja kaalium (The European Parliament and the Council of the European Union, 2019). Antud töös keskenduti peamiselt taimede makrotoitainetele fosfor ja lämmastik, mille põhjal tehti vajalikud arvutused sette, digestaadi ja mineraalväetise koguse määramiseks. Kanger *et al.* (2014) väetamise abimaterjali põhjal põllumulla orgaanilise süsiniku (TOC) sisalduse (%) järgi (0,005%) on lämmastikku vaja 115 kg/ha ning fosforit vaja (vajaduse klass: väga väike) 9 kg/ha (Lisa 4).

2.1.2. Avaveelise tehismärgala sete

Avaveelise tehismärgala sette saamiseks tuli tehismärgala eelnevalt ette valmistada: settetiigilt eemaldati veepiirini biomass ja kaldalt eemaldati suuremad puud, et tagada ligipääs.

Tehismärgala sete saadi Vända tehismärgala viimasest settebasseinist (Joonis 2), kasutades koppa. Settest lasti määrata lisaks ka pestitsiidide (Lisa 7) ning raskemetallide (Lisa 8) sisaldus Eesti Keskkonnauuringute Keskuses.



Joonis 2. Vända avaveeline tehismärgala, kus punasega on tähistatud sette eemaldamise ala, VM1 tähistab sissevoolu ja VM2 tähistab tehismärgala väljavoolu (Maa-Amet - Fotoladu, 2023 järgi).

Vajaliku settekoguse arvutamiseks tuli analüüsitulemustest arvutada fosfori (P), lahustunud lämmastiku ja kaaliumi protsendiline sisaldus settes. Vastavalt katseala mulla toitainete sisaldusele (Lisa 1) arvutati tehismärgala sette kogused (Lisa 3), kasutades andmeid lisast 2.

Vända avaveelise tehismärgala sette laotati traktori kopaga ühtlaselt katsealale. Setet sai katsealale laotatud koguses 64 kg/m^2 . Toitainete erineva vajaduse tõttu (Lisa 3) tuli leida optimaalne sette kogus, kus taimed saaksid toitaineid ilma mulla enda struktuuri ja koostist märkimisväärselt muutmata. Pärast sette laotamist katsealale randaaliti katseala läbi, et tagada toiteelementide ühtlasem jaotumine mullas.

2.1.3. Digestaat

Teise mullaviljakuse parandamise viisina (Tabel 1) kasutati digestaati ehk biogaasi tootmise käigus tekkivat vedelat kääritusjääki. Digestaadi koguse arvutamiseks kasutati lisas 5 toodud digestaadi toiteelementide protsendilise sisalduse andmeid, mis on saadud Põllumajandusuuringute Keskuse analüüsi tulemustest (Madissoo, 2022). Kasutades põllumulla koostise andmeid (Lisa 1) leiti sarnaselt tehismärgala sette koguse arvutustele vajalik digestaadi kogus vastavalt toiteelemendile (Lisa 6).

Digestaati laotati käsitsi, kasutades kastekannusid ja kaalu. Eelnevalt ruutmeetristeks ruutudeks jaotatud katsealale laotati digestaati koguses 3 kg/m². Pärast laotamist randaaliti katseala läbi, et ühtlustada toiteelementide paiknemist mullas.

2.1.4. NPK mineraalväetis

Antud katses kasutati Yara Mila kompleksväetist valemiga (YaraMila, 2022):

NPK(S) 21-8-12 (7) Mg, B,

kus:

N – lämmastik, P – fosfor, K – kaalium, Mg – magneesium, B – boor ja numbriliselt on tähistatud toiteelementide protsendiline (%) sisaldus väetises. Lisas 10 on toodud toiteelementide sisaldus kasutatud NPK mineraalväetisel.

NPK mineraalväetise kogus arvutati fosfori vajaduse järgi (9 kg/ha), vältimaks liigset fosforit põllul. Lämmastikväetist vastavalt arvutatud vajadusele lisaks NPK väetisele juurde ei lisatud, sest taheti tekitada võimalikult sarnane olukord tehismärgala settega.

2.1.5. Suvinisu

Oluline oli põldkatse jaoks valida põllukultuur, mis vajaks seemnete moodustamiseks ühte vegetatsiooniperioodi, seega tuli valida suvivil. Mullaviljakuse parandamise viisi paremaks hindamiseks sooviti kasutada põllukultuuri, mille saagist annaks analüüsida erinevaid kvaliteedinäitajaid. Põllukultuuri nisu kasutatakse ka toiduainete valmistamiseks ning võrreldes teiste põllukultuuridega (nt rukis, kaer, oder), mida kasutatakse kas toidutööstuses või söödaks, on nisul suurim kvaliteedinäitajate määramise võimalus (*Kvaliteeditingimused*, 2023). Arvestades eelnevaid tingimusi valiti põldkatseks põllukultuur suvinisu, sort „Happy“.

Külvinormi arvutamiseks teostati idanemise test. Võeti 100 g terasid ning asetati niiskete salvrätikute vahele. Nädala jooksul loeti kokku idanema hakanud seemnete arv. Kokku oli seemneid 2678, millest idanes 2549 seemet. Külvinormi arvutamiseks kasutati näitena Seemneliidu külvinormi arvutamise valemit (MTÜ Eesti Seemneliit, n.d.):

$$\frac{(id.tera arv/m^2) \times (1000 tera mass g)}{Idanevuse \%} = Külvinorm \text{ kg/ha,}$$

kus

id.tera arv/m² - idanenud terade arv ühe ruutmeetri kohta, idanevuse % - idanenud terade suhte mitte idanenud teradega.

MTÜ Eesti Seemneliidu andmetel on Põllumajandus Uuringute Keskuse katsest aastal 2020 soovituslik külvinorm 500–550 id tera/m² (MTÜ Eesti Seemneliit, n.d.). Sellest tulenevalt arvutati välja vilja kaal ühe ruutmeetri kohta: 21,6 g. Nädal pärast digestaadi, mineraalväetise ja tehismärgala sette laotamist katsealale külvati suvinisu uurimisalale külvinormiga 500 id.tera/m².

2.2. Katse proovivõtt, seire ja analüüsimine

Proove koguti perioodil 6.05.2023 – 6.09.2023, kokku 19 proovivõtu korda. Põldkatse ajal koguti andmeid, mis on toodud tabelis 7.

Tabel 7. Proovid ja analüüsid uurimisalalt.

Proov	Proovivõtu tihedus	Analüüsitav parameeter	Analüüsi meetod/aparatuur	Analüüsi teostuspaik
Mulla proov	2x katse jooksul: alguses ja lõpus igast proovipunktist	Orgaaniline süsinik (TOC), anorgaaniline süsinik (TIC)	Standardmeetodika EN 13137	Tartu Ülikooli biogeokeemia laboris
Mulla proov	2x katse jooksul: alguses ja lõpus igast proovipunktist	pH, nitraat (NO ₃ ⁻), ammonium (NH ₄ ⁺), fosfor (P), kaalium (K), kaltsium (Ca), magneesium (Mg)	Standardmeetodikad	Eesti Maaülikooli mullateaduse õppetooli teaduslabor
Kasvuhoonegaasid	1x nädalas kogu katseperioodi jooksul igast proovipunktist	Dilämmastikoksiid (N ₂ O), metaan (CH ₄), süsinikdioksiid (CO ₂), veeaur (H ₂ O)	LI-7810 CH ₄ /CO ₂ /H ₂ O ja LI-7820 N ₂ O/H ₂ O portatiivsed analüsaatorid (LI-COR Biosciences, NE, USA)	Uurimisala
Mulla temperatuur	1x nädalas kogu katseperioodi jooksul igast proovipunktist	Mulla temperatuur: 10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm sügavusel	Pinnase temperatuuriandur ja andmeloger (U0141 Comet System, Tšehhi Vabariik)	Uurimisala

Mulla füüsikalised näitajad	Pidevalt ühe minutilise intervalliga kogu katseperioodi jooksul kahest proovipunktist igal katsealal	Mulla temperatuur 10 cm sügavusel, mulla elektrijuhtivus, mulla niiskus	GP2 andmesalvestaja ja kontrolleri (Delta-T Devices, UK)	Uurimisala
Taimestiku tihedus	1x nädalas kogu katseperioodi jooksul igast proovipunktist	Lehepinna indeks (LAI)	LI-COR's LAI-2200C measuring device (LI-COR Biosciences, NE, USA)	Uurimisala
Taimestiku kõrgus	1x nädalas taime kasvuperioodi algusest kuni lõpuni igast proovipunktist	10 taime kõrgus kõigis proovi punktides (cm)	Mõõdulint	Uurimisala
Ilma andmed	Pidevalt ühe minutilise intervalliga kogu katseperioodi jooksul uurimisala keskel ühest punktist (Joonis 1)	Õhutemperatuur (°C), sademed (mm), õhuniiskus (%)	Ilmajaam (Delta-T Devices, UK)	Uurimisala

Katse lõpus koguti lisaks järgmised andmed: varte ja lehtede kuiv- ja märgkaal, viljapeade kuiv- ja märgkaal, viljapeade arv ühes proovipunktis, seemnete kuivkaal, niiskus, mahukaal, langemisarv, kleepvalk, proteiini ja tärklise sisaldus. Edasisteks analüüsideks, mida selles töös ei käsitleta, koguti lisaks eelmainitud kasvuhoonegaasidele ka nisutaimede juured ja maapealne biomass ning eraldi mullaproovid mikroobikoosluste ning mükoriisa uuringuteks.

Antud töös keskenduti mulla parameetritest niiskuse sisalduse, süsiniku, pH, nitraat-lämmastiku, ammoonium-lämmastiku, taimedele omastatava fosfori ja kaaliumi sisalduse analüüsimisele ja automaatanalüsaatoriga mõõdetud mulla temperatuuri andmetele. Lisaks käsitletakse antud töös taimede kõrguse ja saagikuse andmeid ning vilja kvaliteetnäitajaid (seemnete mahukaal, langemisarv, kleepvalk, proteiini ja tärklise sisaldus) ja kohaliku ilmajaama poolt kogutud õhutemperatuuri ja sademete andmeid.

2.2.1. Mullaproovide võtmise meetodika ja analüüsid

Mullaproove koguti kahel korral katse jooksul, et analüüsida orgaanilise süsiniku, anorgaanilise süsiniku ning toitainete sisalduse muutusi mullas katse jooksul (Tabel 7).

Esimesel proovivõtul (mai 2023) koguti proovid proovivõtu punktidest ($n = 24$; Joonis 1). Kummikindaga tõsteti kühvlilt kolm peotäit mulda puhtasse anumasse. Proov segati, asetati õhukindlasse plastikkotti ning pandi seejärel külmakasti (Joonis 3). Proovivõtu lõpus transporditi proovid laborisse, eraldati alamproovid, mida hoiustati vastavalt planeeritavatele analüüsidele külmikus (süsiniku sisalduse määramiseks) ja sügavkülmas (mulla keemiliste parameetrite määramiseks käesoleva töö raames ning eraldi proovid tulevikus läbiviidavateks mikrobioloogilisteks ja mükoriisa analüüsideks). Iga proovivõtu punkti vahel võeti uus puhas kinnas ja puhastati anum ja kühvel.



Joonis 3. Mullaproovide võtmine katsealadelt. A - proovivõtupunktid esimese proovivõtu ajal mais (settega ala) tähistatud plastist rõngastega; B - esimene proovivõtt katse alguses proovivõtupunktidest käsitsi; C - teine proovivõtt katse lõpus proovivõtupunktidest mullapuuriga; D - katse lõpus igast proovivõtupunktist kogutud mulla- ja juureproovid.

Teisel proovivõtul katse lõpus (Joonis 3), pärast nisu maapealse biomassi maha lõikamist, võeti mullapuuriga (läbimõõt 4,8 cm) igast proovivõtupunktist viiest kohast 10 cm sügavuselt mullaproovid, mis homogeniseeriti anumates. Mullaproovist eraldati juured tulevikus teostatavateks analüüsideks. Edasi võeti mullaproovist alamproovid, mis koguti õhukindlatesse kottidesse süsiniku sisalduse määramiseks (hoiustati laborianalüüsideni külmikus) ning mulla koostise määramiseks (hoiustati laborianalüüsideni sügavkülmas) ning tulevikus tehtavateks mikrobioloogilisteks ja mükoriisa uuringuteks (hoiustatakse sügavkülmas). Iga proovipunkti jaoks võeti uus kummikinnas, pesti ja puhastati eelnevalt kasutatud mullapuur ja anum. Juurte analüüsimiseks, mida antud töös ei käsitleta, koguti mullapuuriga (läbimõõt 4,8 cm) katse lõpus veel kolmest kohast proovivõturinga seest 20 cm sügavused mullaproovid, mis koguti õhukindlasse kotti. Ka need proovid hoiustatakse juurte eraldamiseni külmikus.

Mullaproovide üldorgaanilise süsiniku (TOC) (edaspidi orgaaniline süsinik) ja üldanorgaanilise süsiniku (TIC) (edaspidi anorgaaniline süsinik) sisalduse analüüsi meetodika on toodud tabelis 7. Eeltötlusel proov kuivatati, peenestati uhmris ja sõeluti läbi 0,5 mm filtri. Analüüsiks kasutati aparatuuri Vario TOC, Solids Module; 950° C, Elementar GmbH, Germany. NO_3^- ja NH_4^+ määramiseks kasutati ionkromatograafia meetodit ning taimede poolt omastatavate toitainete sisalduse (AL-meetod) ning pH määramiseks kasutati standardmeetodeid. Kõik analüüsitulemused kanti ümber andmetöötlusprogrammi Microsoft Excel.

2.2.2. Taime kõrguskasvu dünaamika analüüs

Taime kasvukiiruse erinevuse hindamiseks kontroll-ala, digestaadi, mineraali ja tehismärgala settega katsealade vahel mõõdeti iganädalasel proovivõtul kõigist proovipunktides 10 juhusliku taime kõrgus mõõdulindiga, millest hiljem arvutati proovipunkti keskmine tulemus iga nädala kohta. Andmed kanti edasisteks analüüsideks andmetöötlusprogrammi Microsoft Excel.

2.2.3. Mulla temperatuuri ja niiskuse muutused ajas

Mulla parameetrite muutuste kaardistamiseks ajas koguti katse jooksul andmeid mulla temperatuuri, niiskuse ja elektrijuhtivuse kohta (Tabel 7). Automaatandur paigaldati katse

alguses igal katsealal kahte punkti (Joonis 1). Katse lõpus laeti andmed arvutisse ning tõsteti edasisteks analüüsideks andmetöötlusprogrammi Microsoft Excel.

2.2.4. Õhutemperatuur, sademed ja õhuniiskus

Uurimisala ilma hindamiseks ja sademete mõju kaardistamiseks mullale paigaldati katse alguses katseala keskele (Joonis 1) ilmajaam (Tabel 7). Ilmajaam salvestas andmeid automaatselt ning katse lõpus laeti andmed arvutisse, kus toimus andmete korrastamine ja kandmine andmetöötlusprogrammi Microsoft Excel.

Sademete ja niiskuse puudumise tõttu ekstreemselt kuival maikuul teostati katse alguses kolmel korral katsealade kastmine, mille käigus anti ühele katse alale vett 10 minuti jooksul. Hiljem arvutati antud vee hulk ümber sademeteks (mm/ööp) ning arvestati arvutustes ja tulemustes vihmana sademete hulka.

2.2.5. Biomassi analüüs

Katse lõpus koguti kokku nisu biomassi proovid neljalt katsealalt. Vilja erineva valmimise tõttu toimus biomassi proovide kogumine tehismärgala sette katsealalt (edaspidi sette katseala) nädal aega varem, kui teistelt katsealadelt (kontroll-ala, mineraal ja digestaat). Igalt katsealalt võeti proovid ($n=6$ iga ala kohta) proovivõtu rõngastest, mille pindala oli $0,1908 \text{ m}^2$ (Joonis 1) ja lisaks 10-st juhuslikust kohast igal katsealal kasutades plastikraami pindalaga $0,0949 \text{ m}^2$ (Joonis 4).



Joonis 4. Nisu biomassi proovide kogumine katse lõpus: A – 24-st proovivõtu rõngast; B – 10-ne juhuslikul meetodil maapealse biomassi lisaproovi võtmine igalt katsealalt.

Laboris eraldati viljapead vartest, kaaluti eraldi, et saada viljapeade ja varte märgkaal, ning loeti kokku iga proovi viljapeade arv (Joonis 5). Pärast märgkaalu mõõtmist asetati proovid paberkohtidesse ning lasti neil kuivada 48 h 70 °C juures. Pärast kuivamist kaaluti viljapead ja varred uuesti, et saada kuivkaalud.



Joonis 5. Laboris nisupeade ja viljaterade eraldamine edasisteks analüüsideks.

Viljapeadest eraldati viljaterad käsitsi. Esmalt tuli viljapead käte vahel hõõruda, et eraldada terad viljapeast ning sõkaldest, mille järel tuli väljas tuule käes proovi ühest anumast teise kallates terad sõkaldest puhastada sedasi, et järele jääksid vaid terad (Joonis 5).

Puhtad terad kuivatati uuesti 48 h 70 °C juures ning seejärel kaaluti uuesti. Andmed kanti andmetöötlusprogrammi Microsoft Excel.

2.3. Andmete analüüs ja autori roll välitöodes

Andmete analüüs teostati kasutades statistikaprogrammi RStudio (Posit Team, 2024). Graafikute ja analüüside teostamiseks kasutati RStudio pakette ggplot2 (v3.3.3; Wickham, 2016), tidyverse (v1.3.0; Wickham *et al.*, 2019) ja tidyr (Wickham, Vaughan & Girlich, 2024). Muutujate normaaljaotusele vastavust kontrolliti Shapiro-Wilk testide abil. Vastavalt normaaljaotuse esinemisele kasutati parameetrilist kahe valimi t-testi ning normaaljaotuse mitte esinemisel rakendati mitteparameetrilist Mann-Whitney U-testi.

Töö autor osales katse planeerimisel, ettevalmistuste tegemisel, katseala ülesseadmisel, proovivõttudel ja analüüsides tegemisel ning teostas andmeanalüüsi.

3. TULEMUSED

3.1. Avaveelise tehismärgala sette sobivus

Avaveelise tehismärgala sette sobivuse hindamiseks toitainete allikana põllukultuurile määrati esmalt sette toitainete sisaldus, mis on toodud lisa 3. Fosfori osakaal settes oli 0,00618%, mis oli veidi alla 10 korra väiksem kui digestaadi fosfori osakaal (Lisa 5). Teiste toitainete (lämmastik, kaalium) osakaal oli settes tunduvalt väiksem kui digestaadis. Lämmastiku osakaal oli settes 69 korda väiksem ja kaaliumi osakaal oli 41 korda väiksem kui digestaadis.

Sette puhtuse hindamiseks lasti määrata 141 pestitsiidi ning kuue raskmetalli sisaldust. Avaveelise tehismärgala settes leidus testitud 141 pestitsiidist üle määramispiiri neli erinevat pestitsiidi: AMPA 8,6 µg/kg (glüfosaadi laguprodukt), kloridasoon-desfenüül 4,4 µg/kg (herbitsiidi kloriidasooni laguprodukt), p,p'-DDE 1,4 µg/kg (putukamürgi DDT laguprodukt), p,p'-DDT 3,5 µg/kg (putukamürgi DDT laguprodukt) (Lisa 7). Raskmetallidest leidus kroomi 17 mg/kg, niklit 8,2 mg/kg, pliid 5,5 mg/kg, tsinki 46 mg/kg, vaske 7,3 mg/kg ning elavhõbedat 0,024 mg/kg (Lisa 8). Raskmetallide ja pestitsiidide sisaldused avaveelise tehismärgala settes olid piisavalt madalad, et need ei põhjusta takistusi sette kasutamisel põllumaal.

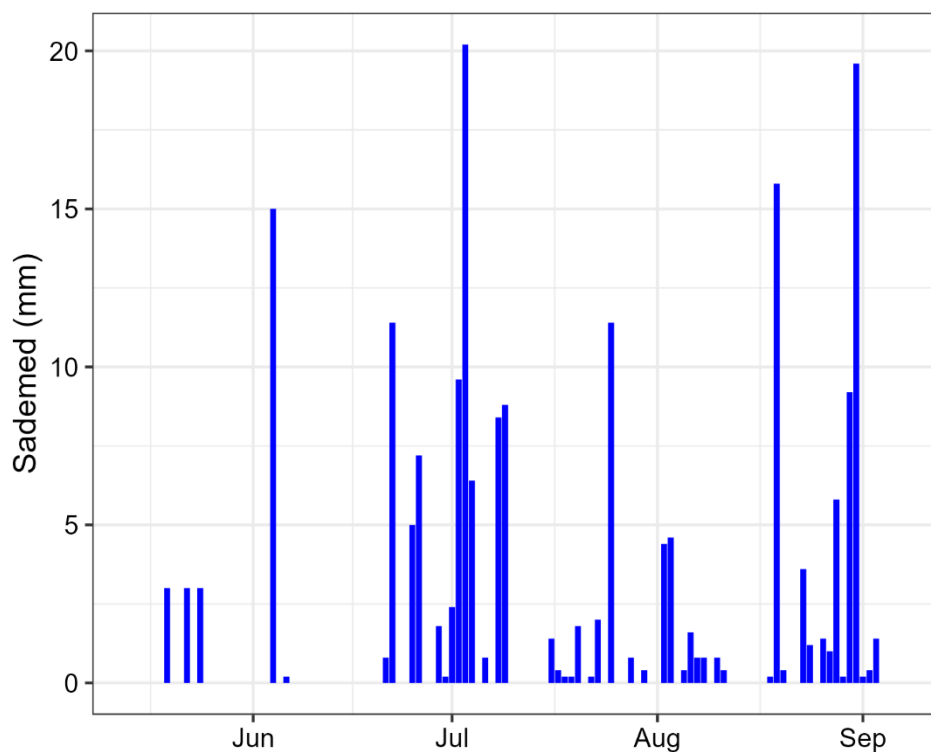
3.2. Teravilja kasvu mõjutavad keskkonnaparametrid

Aasta 2023 maikuu oli 9,1 mm sademeid (Tabel 8), mis on peaaegu viis korda vähem kui viimase kümne aasta (2012–2022) keskmine maikuu sademete kogus (43 mm).

Tabel 8. Tartu-Tõravere ilmajaama mai kuu sademete keskmine kogus viimase 10. aasta jooksul

Aasta	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Sademed (mm)	67,2	85,1	57,1	1,9	27,6	9,8	55,7	37	10,27	39,8	9,1

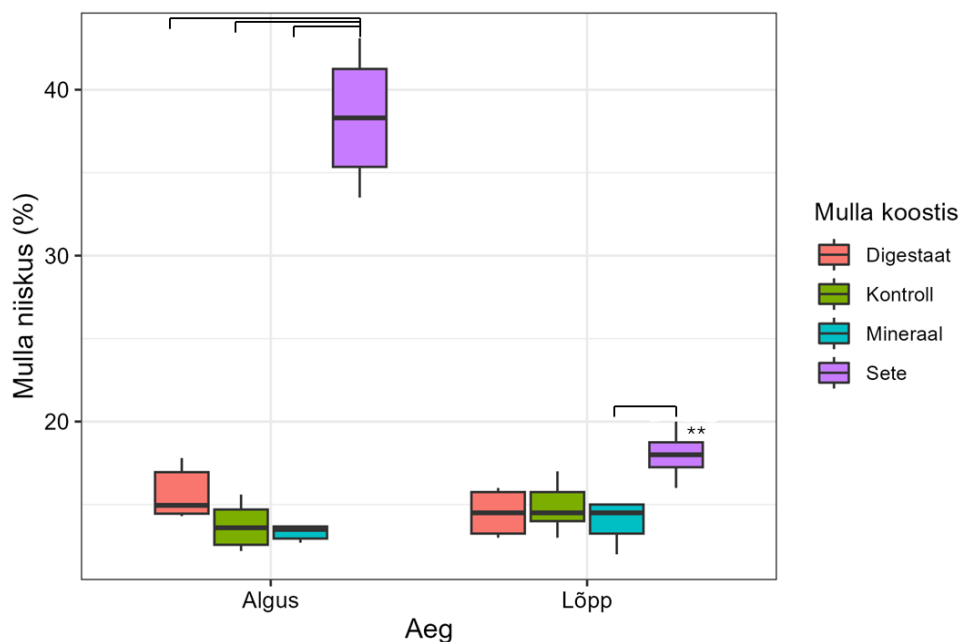
Kohaliku ilmajaama andmetel ei olnud maikuu sademeid, kuid antud kuus teostati kolmel korral kastmine, et tagada ekstreemselt kuivades tingimustes seemnete tärkamine. Ühel kastmiskorral niisutati uurimisala põhjaveega mahus, mis vastas 3 mm/ööp sademetele (Joonis 6). Koos kastmisega oli tervel katse perioodil (kokku 4 kuud; mai kuni september) kokku 200 mm sademeid.



Joonis 6. Sademete jaotus katseperioodil mai kuni september 2023 kohapealse ilmajaama põhjal.

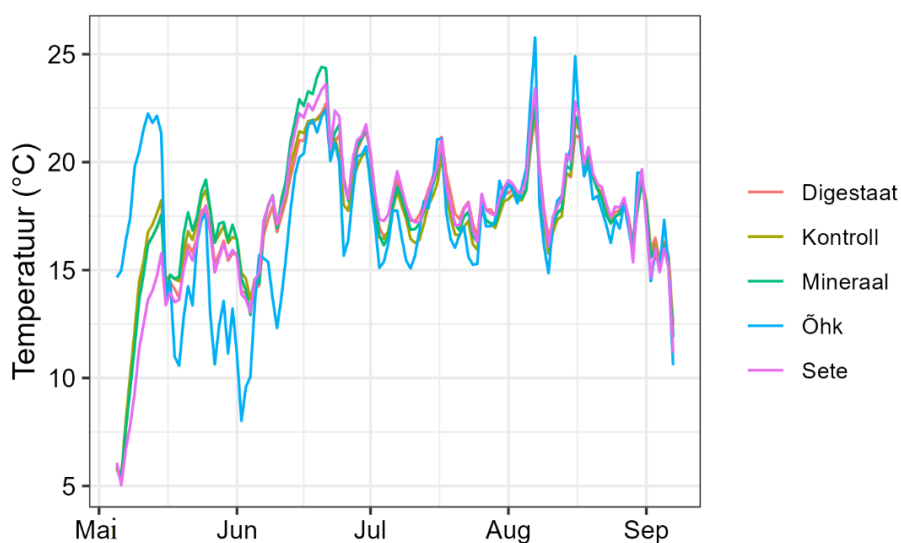
Katse perioodi alguses (5.05.2023) oli kontroll-ala mulla niiskus keskmiselt 13,7%, digestaadi katsealal keskmiselt 15,7%, mineraali katsealal keskmiselt 18,1% ning sette katseala oli keskmiselt 38,3%. Joonisel 7 on toodud niiskuse sisaldus mullas igal katsealal (kontroll-ala, digestaadi, mineraali ja sette katseala) läbi katse perioodi, mõõdetuna mullaproovidest katse alguses ja lõpus.

Katse alguses on statistiliselt oluline erinevus sette katseala ja teiste katsealade (mineraali, digestaadi katseala ning kontroll-ala) mulla niiskuse vahel (Joonis 7). Kogu katseperioodi jooksul jäi mulla niiskus sette katsealal kõrgemaks kui teistel katsealadel, erinedes katse lõpus statistiliselt mineraali katsealast. Sette katseala niiskuse sisalduse muutus oli statistiliselt oluline ($p < 0,01$). Kontroll-ala, digestaadi ja mineraali katsealal püsis mulla niiskus läbi katse perioodi keskmiselt sama.



Joonis 7. Niiskuse mediaan sisaldus mullas, 25-75% kvartiilid ning miinimum- ja maksimumväärtused kontroll-ala, digestaadi, mineraali ja sette katsealal katseperioodi jooksul. Tärn tähistab statistilist erinevust katse alguse ja lõpu vahel (t-test: * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$) ning klambrid tähistavad statistilist erinevust ($p < 0,05$) katsealade vahel paarikaupa t-testi põhjal.

Mulla temperatuur muutus õhutemperatuuri muutumisega (Joonis 8) ning mulla temperatuur jäi katseperioodil vahemikku 11,3–34,3 °C. Jooniselt 8 on näha, et kõige soojemad temperatuurid on juuni teises pooles ja augusti keskel. Mai algusest kuni juuni keskpaigani eristuvad mulla temperatuurid õhutemperatuurist rohkem.



Joonis 8. Temperatuur katse perioodi jooksul kontroll-ala, digestaadi, mineraali ja sette katsealal 10 cm sügavusel ning õhus.

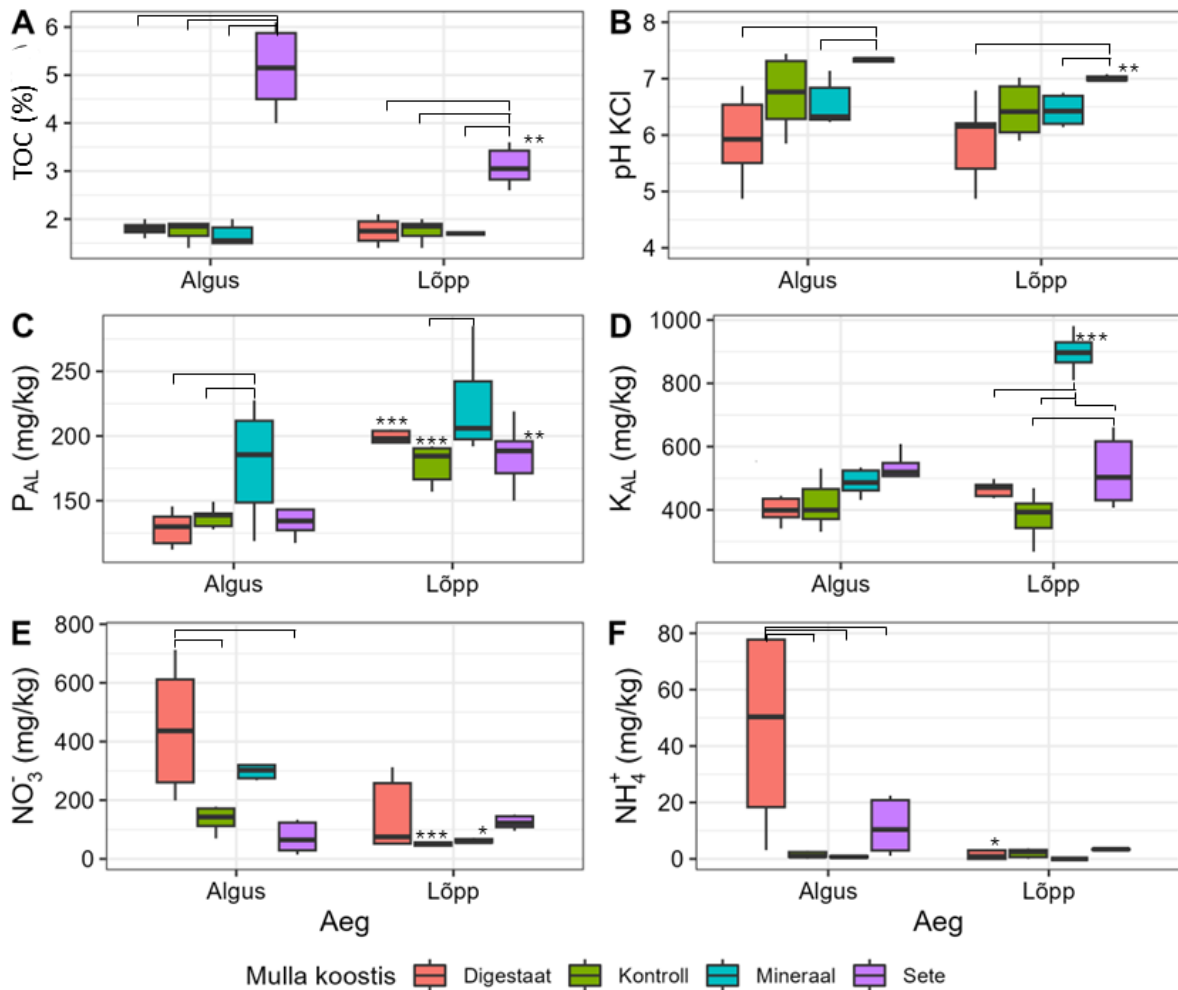
3.2. Mulla näitajad

Taimede kasvuks esmased toitained on fosfor, lämmastik ja kaalium. Järgnevalt on joonisel 9 välja toodud kontroll-ala, digestaadi, mineraali ja sette katseala orgaanilise süsiniku sisaldus (A), mulla pH (KCl) (B), taimedele omastatava fosfori P_{AL} (C), taimedele omastatava kaaliumi K_{AL} (D), nitraatiooni NO_3^- (E) ja ammooniumiooni NH_4^+ (F) sisaldus mullas katse alguses ja lõpus.

Laborianalüüside tulemused näitasid, et kogu süsinik (TC) mullaproovides oli orgaaniline (TOC), seetõttu järgnevates tulemustest räägitakse orgaanilise süsiniku sisaldusest. Süsiniku sisaldus (Joonis 9A) on oluliselt erinev sette katsealal võrreldes teiste katsealadega (kontroll-ala, digestaadi ja mineraali katseala) ning on oluliselt kõrgem ka katse lõpus. Süsiniku muutus oli ajas statistiliselt oluline sette katsealal ($p < 0,01$). Katseperioodi alguses on keskmine süsiniku sisaldus sette katsealal 5,1% ja katse lõpuks on sisaldus langenud 3,1%. Kontroll-ala, digestaadi ja mineraali katsealal on süsiniku sisaldus püsinud muutumatuna, jäädes kontsentratsiooni juurde 1,8%.

Mulla pH (KCl) (Joonis 9B) jäi uurimisel keskmiselt vahemikku 5,0–7,5. Kõige madalama pH-ga muld on digestaadi katsealal, miinimum väärtusega 4,87 ja keskmiselt kõige kõrgem pH väärtus on sette katsealal, maksimum väärtusega 7,37. Sette katseala mulla pH erines oluliselt digestaadi ja mineraali katseala mulla pH väärtusest nii katse alguses kui ka lõpus.

Joonise 9C graafikul on toodud välja mulla taimedele omastatava fosfori (P_{AL}) sisaldus katse alguses ja katse lõpus. Enamikel katsealadel (digestaat, kontroll-ala, sete) on katse lõpus taimedele omastatava fosfori sisaldus oluliselt suurem kui katse alguses. Mineraali katsealal on fosfori kontsentratsioon katse alguses oluliselt kõrgem kui digestaadi katsealal ja kontroll-alal. Katse lõpus on mineraali katsealal fosfori kontsentratsioon oluliselt kõrgem kui kontroll-alal ja sette katsealal.



Joonis 9. Mulla parameetrite mediaan sisaldus mullas, 25-75% kvartiilid ning miinimum- ja maksimumväärtused kontroll-alal, digestaadi, mineraali ja sette katsealal katseperioodi jooksul. A- orgaanilise süsiniku sisaldus mullas (%), B- mulla pH (KCl), C- taimedele omastatava fosfori sisaldus mullas (mg/kg), D- taimedele omastatava kaaliumi sisaldus mullas (mg/kg), E- nitraatiooni sisaldus mullas (mg/kg), F- ammooniumiooni sisaldus mullas (mg/kg). Tärnid (*) näitavad kontsentratsioonide statistilist ajalist erinevust vastaval katsealal Mann-Whitney U testi põhjal: * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$ ning klambrid tähistavad statistilist erinevust erinevate katsealade vahel Mann-Whitney U testi põhjal.

Taimedele omastatava kaaliumi (K_{AL}) sisaldus (Joonis 9D) mullas suurenes mineraali katsealal katse lõpuks oluliselt, suurenedes keskmiselt 390 mg/kg võrra. Teiste katsealade muldades ei olnud olulist K_{AL} sisalduse muutust. Katse alguses ei olnud statistilist erinevust katsealade kaaliumi sisalduse suhtes, kuid katse lõpus erines mineraali katseala kaaliumi sisaldus teistest katsealadest (digestaadi, sette katseala ja kontroll-ala).

Digestaadi katseala ammooniumiooni (NH_4^+) ja nitraatiooni (NO_3^-) sisaldused mullas (Joonis 9E, 9F) varieerusid kõige rohkem. Ammooniumiooni sisaldus erines oluliselt katse alguses

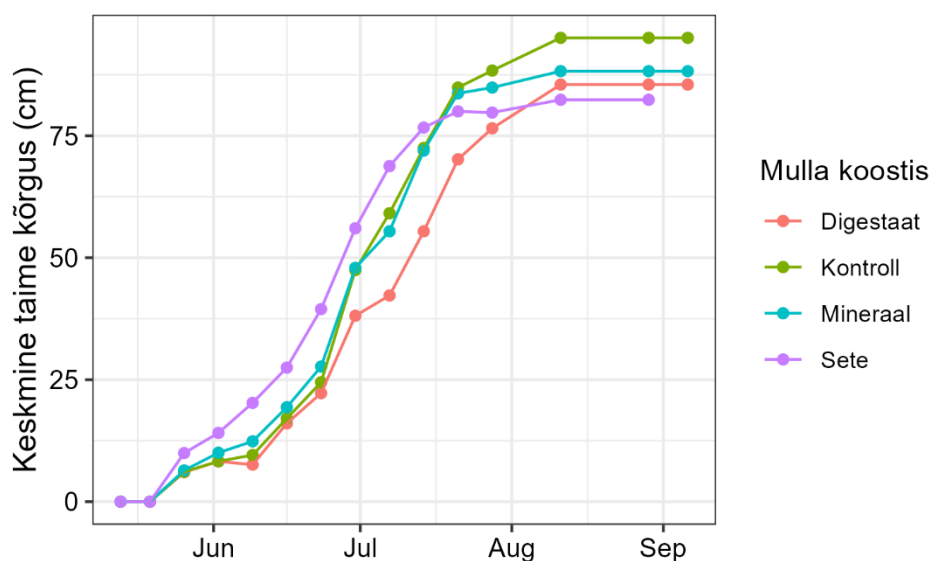
digestaadi katsealal kontroll-ala ja mineraali katsealaga ning katse lõpus erines oluliselt kontroll-ala ja mineraali katseala ammooniumiooni sisaldus. Sette katsealal ja kontroll-alal ei toimunud ammooniumiooni sisalduse muutust katseperioodi jooksul, kuid digestaadi ja mineraali katsealal oli ammooniumiooni kontsentratsioon katse lõpus oluliselt väiksem.

Katse alguses erines digestaadi katseala nitraatiooni sisaldus kontroll-ala ja sette katseala nitraatiooni sisaldusest. Katse lõpus erines oluliselt sette katseala sisaldusest kontroll-ala ja mineraali katseala sisaldusest. Statistiliselt oluline erinevus katse alguse ja katse lõpu nitraatiooni sisaldusega esines mineraali katsealal ja kontroll-alal.

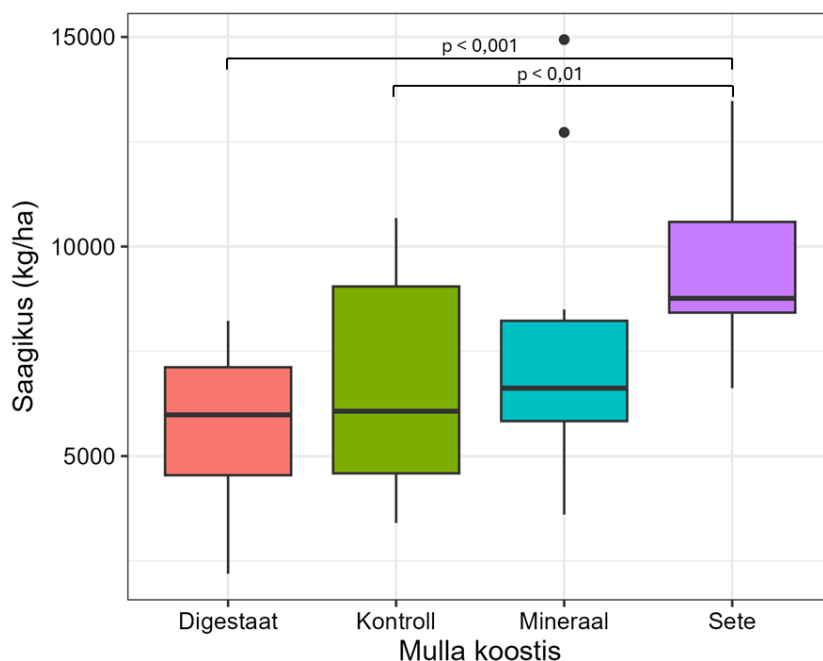
3.3. Taimede kasv ja saagikus

Katseperioodi alguses tärkas esimesena sette katsealale külvatud vili (Joonis 10). Varasema tärkamise tulemusena saavutas sette katsealal kasvav vili varem ka kasvu maksimumi, kui teistel katsealadel. Kõige kõrgemaks kasvas vili kontroll-alal, saavutades proovipunktide keskmise maksimaalse kõrguse 95,1 cm. Kõige madalama kasvuga vili oli sette katsealal, mille proovipunktide keskmine maksimaalne kõrgus oli 82,4 cm. Digestaadi katsealal kasvanud vili saavutas proovipunktide keskmise maksimaalse kõrguse 85,5 cm ning mineraali katsealal kasvanud vilja proovipunktide keskmine maksimaalne kõrgus on 88,3 cm.

Saagikus näitab, kui palju on võimalik saada vilja ühelt hektarilt. Antud katsest selgus, et kõige suurema saagikusega oli sette katseala, mida on näha ka jooniselt 11. Sette katsealal kasvanud vilja keskmine saagikus oli 9607 kg/ha. Mineraali katsealal oli vilja keskmine saagikus 8034 kg/ha ning kontroll-alal 7454 kg/ha. Kõige väiksem keskmine saagikus oli digestaadiga katsealal, milleks oli keskmiselt 4460 kg/ha. Kõige suurem saagikuse varieeruvus oli mineraali katsealal, kus proovi punktidest arvatud saagikus jäi vahemikku 4587–14937 kg/ha. Sette katseala saagikuse erinevus digestaadi katsealast ja kontroll-alast on statistiliselt oluline.



Joonis 10. Taimede kõrguse muutus läbi katse perioodi kontroll-ala, digestaadi, mineraali ja sette katsealal.



Joonis 11. Saagikus kontroll-alal, digestaadi, mineraali ja sette katsealal. Graafikul on toodud iga katseala mediaan väärtus, 25 ja 75% kvartiilid ning miinimum ja maksimum kontsentratsioonide väärtused. Klambritega on välja toodud statistiline erinevus paarikaupa t-testi põhjal katsealade vahel.

Lisaks saagikuse suurusele hinnatakse ka vilja kvaliteeti. Tartu Mill AS analüüsitud viljaproovide tulemused on toodud tabelis 9. Kvaliteedinõuded toidunisu kvaliteedi kategooria määramiseks (kategooria I kõrgeim kvaliteet ja V madalaim) on toodud lisa 9. Kontroll-ala savinisu kuulub mahukaalu järgi III kategooriasse, kuid langemisarvu, kleepvalgu ja proteiini

sisalduse järgi I kategooriasse. Digestaadi katsealal kasvanud suvinisu jäi vastavalt mahukaalu järgi sööda nisu kategooriasse, langemisarvu järgi II kategooriasse ning kleepvalgu ja proteiini järgi I kategooriasse. Mineraali katsealal kasvanud vili ei sobinud mahukaalu järgi ka söödavilja kategooriasse, kuid langemisarvu, kleepvalgu ja proteiini sisalduse järgi jäi I kategooriasse. Settel kasvanud vili jäi mahukaalu järgi III kategooriasse ning langemisarvu, kleepvalgu ja proteiini sisalduse järgi I kategooriasse. Kvaliteedinäitajate järgi oli kõige madalam vilja kvaliteet mineraali katsealal, peamiselt mahukaalu tõttu. Digestaadi katsealal oli samuti madalama kvaliteediga vili. Kõige parema kvaliteediga vili kasvas kõikide näitajate kokkuvõttes kontroll-alal ja settega katsealal.

Tabel 9. Suvinisu toiduvilja kvaliteedinäitajad. Analüüsitud Tartu Mill AS. Kategooriad I-V (I kõige kõrgem (vt Lisa 9)).

	Niiskus		Mahukaal		Langemis- arv		Kleep- valk		Proteiin		Tärklis
	%	kg/ha	Kat.	sek	Kat.	%	Kat.	%	Kat	%	
Kontroll	12.2	75	III	330	I	32	I	14.4	I	63	
Digestaat	13.6	72.3	Sööda nisu	251	II	35	I	15.8	I	60.5	
Mineraal	13.7	71.8	< sööda nisu	282	I	35	I	16.2	I	60.1	
Sete	13.3	75.7	III	342	I	34	I	15.3	I	62	

4. ARUTELU

Taime kasvul mängivad rolli mitmed tegurid. Taime kasvu soodustab optimaalne toitainete sisaldus mullas (Pandey, 2018). Katsest selgus, et fosfori, kaaliumi ning lämmastiku sisaldus sette katsealal ei erinenud kontroll-ala toitainete sisaldusest, mistõttu ei ole avaveelise tehismärgala sete sedavõrd toitaineterikas, et suudaks olulisel määral tõsta mulla viljakust. Digestaadi katseala erines teistest katsealadest kõrgema lämmastiku sisalduse poolest, kus katse alguses oli nii nitraatiooni kui ka ammooniumiooni kontsentratsioon suurem kontroll-ala ja sette katsealast. Digestaadi katseala kõrge ammoonium ja nitraatiooni sisaldus tuleneb biogaasi tootmisel toorme kõrge lämmastiku sisaldusest (Czekala, 2022). Põldudel leostub nitraatlämmastik oma mobiilsete omaduste tõttu kergemini välja kui ammooniumlämmastik (Dai *et al.*, 2023), mistõttu digestaadi kasutamisel on kõrgem oht lämmastiku leostumiseks põllult. Kõige rohkem erines toitainete sisaldus teistest katsealades mineraali katsealal. Kõrgem fosfori (P_{AL}) ja kaaliumi (K_{AL}) sisaldus mineraali katsealal nii katse alguses kui ka lõpus viitavad taimedele lihtsamini ja kiiremini omastavatele toitainete vormile.

Taimedele omastatava fosfori sisalduse tõus mullas digestaadi ja sette katsealal võib olla tingitud fosfori vabanemisest teistest vormidest. Digestaadis ning ka veekogude setetes on fosfor valdavalt seotud magneesiumi või kaltsiumiga ning taimedele kättesaadavale kujule vabaneb fosfor pikema aja jooksul (Di Luca *et al.*, 2017; Möller & Müller, 2012; Prasad & Chakraborty, 2019) Lisaks aitab digestaadi katsealal fosfori vabanemisele ja kättesaadavusele kaasa veidi happelisem muld kui teistel katsealadel (Xu *et al.*, 2015). Mineraali katsealal on ka katse lõpus kõrgem fosfori sisaldus kui teistel katsealadel, sest antud väetis sisaldas lisaks koheselt kättesaadavale fosforile ka polüfosfaati (Lisa 10), mis vabaneb pikema perioodi jooksul (YaraMila, 2022).

Tahkest mineraalväetisest saavad toitained vabaneda mullaniiskuse olemasolul. Katse lõpus on mineraali katsealal kaaliumi sisaldus arvatavasti tõusnud tänu suve keskel olnud vihmadele, mis on suurendanud katse ajal mullaniiskust ning toitained on saanud vabaneda.

Katses kasutatud NPK mineraalväetises on lämmastikku kahes eri vormis, millest ammooniumlämmastiku osakaal on suurem (Lisa 10). Mineraali katsealal võib kõrgem nitraatlämmastiku sisaldus olla tingitud bakterite aktiivsest tegevusest, mis on Vitosh (1996) poolt välja toodud. Taime hea kasvu korral toimub bakterite poolt NH_4^+ kiire muutmine NO_3^- (Vitosh, 1996).

Kõrgem orgaanika sisaldus mullas tagab parema mulla tervise, vähendades erosiooni ja ärakannet põldudel (UCDavis, n.d.). Kõrge orgaanika sisaldus settes suurendas süsiniku sisaldust sette katsealal oluliselt võrreldes teiste katsealadega. Semeniuk & Semeniuk (2004) uuringutest järeldus, et märgala sette kõrge süsiniku sisaldus on tagatud peamiselt suurema orgaanilise aine sisalduse tõttu. Kõrge orgaanika sisaldus sette katsealal suurendas katsealal kasvanud vilja tootlikkust ning parandas mulla tervist. Kõrgem süsiniku sisaldus sette katsealal tagas ka parema niiskuse sisalduse katsealal, tänu millele oli ka katse lõpus sette niiskusesisaldus kõrgem kui teistel katsealadel. Oldfield *et al.* (2019) uurimusest selgus samuti, et orgaanilise süsiniku sisaldus mullas mõjutab oluliselt nisu saagikust. Kuni 2%-line orgaanilise süsiniku sisaldus mullas suurendas vilja saagikust ning suurema orgaanilise süsiniku sisaldus korral ei täheldatud negatiivset mõju saagikusele (Oldfield *et al.*, 2019). Oldfield *et al.* (2019) tõi välja, et üle 2% orgaanilise süsiniku sisalduse korral mullas hakkavad saagikust mõjutama mulla toitainete sisaldus. Tehismärgala settel on potentsiaali suurendada põllumajanduslikku saagikust veelgi, kui lisada põllule juurde täiendavaid eelistatult orgaanilist päritolu toitaineid, kuid see vajab edasist uurimist. Teiste katsealade (digestaat, kontroll-ala ning mineraal) madal süsiniku sisaldus oli arvatavasti üheks põhjuseks madalama saagikuse juures.

Hajukoormuse vähendamiseks loodud avaveeline tehismärgala saab oma vee peamiselt põllumajanduslikult maalt ära kanduvast vihmaveest ning põhjaveest. Märgalasse jõuab neutraalse pH-ga vesi, mille tõttu on ka tehismärgala sette pH neutraalne. Kontroll-alal on muld keskmiselt alla neutraalse pH (6,7), mis on loomulik Lõuna-Eesti muldadele (Astover, 2005). Sette lisamine katsealale tõstis mulla pH väärtust veidi, kuid digestaat muutis mulla pH happelisemaks. Mineraalväetis ei avaldanud mulla pH väärtusele suurt mõju. Taimede seisukohast on aluselisem muld eelistatud, sest see soodustab taimede head arengut (Koszel & Lorencowicz, 2015).

Tehismärgala sette kasutuspotentsiaali hindamisel on oluline teada, et see ei sisalda üle piirväärtuste toksilisi ühendeid. Praegustes Euroopa õigusaktides ei ole endiselt juhiseid sellise sette (sealhulgas järvesette) kasutusele põllumajanduses ega ole ka kehtestatud lubatud piirväärtusi toksiliste ühendite sisalduse suhtes (SubSed, n.d.). Kuid järjest olulisemaks muutub sellise dokumendi loomine ringmajanduse paremaks toimimiseks (SubSed, n.d.). Keskkonnaministri määrusega nr 12 on paika pandud lubatavad raskmetallide sisaldused kääritusjärgis ehk digestaadis (Keskkonnaministri määrus nr 12, 2020). Võrreldes digestaadi piirmääradega on raskmetallide sisaldused tehismärgala settes tunduvalt väiksemad, tänu

millele on setet sobilik kasutada ka mahepõllumajanduses (Keskkonnaministri määrus nr 12, 2020).

Avaveelise tehismärgala sette kasutuspotentsiaali hindamiseks tehtud analüüsist leitud pestitsiidide sisaldused viitavad ärakandele põllumajanduslikult maalt. Määratud 141 pestitsiidist oli settes üle määramispiiri ainult neli pestitsiidi või pestitsiidi jääki. Toksiliste ühenditega (nt pestitsiidid) mulla parandusviisi kasutamine põllul võib põhjustada toksiliste ühendite jõudmist taimedesse (Ho *et al.*, 2002). Settest leitud pestitsiidide kontsentratsioonid on tunduvalt väiksemad ohtlikest kontsentratsioonidest ja ei põhjusta põllul ohtu (Bonansea *et al.*, 2017). Leiduvatest pestitsiidijääkidest on kõik neli (AMPA, kloridasoon-desfenüül, p,p'-DDT ja p,p'-DDE) olnud või on endiselt põllumajanduses laialdaselt kasutusel kahjurite ja umbrohu tõrjeks (Wan *et al.*, 2006).

Taimedele on oluline, et seemnete idanemise ja tärkamise ajal oleks mullas piisavalt niiskust. Mulla niiskus on olulisim tegur, mis tagab põllumajanduses taime kasvu (Robock, 2003), mõjutades nii taime biomassi kogust kui ka lõplikku saagikust (Xue, Shen & Marchner, 2016). Suvinisu puhul on oluline piisav niiskuse sisaldus peamiselt maikuu, kui nisu vegetatsiooniperiood algab. Tartu-Tõravere andmetest selgus, et 2023 aasta maikuu oli tunduvalt kuivem kui viimase 10 aasta keskmine, mistõttu olid nisu idanemiseks olud võrdlemisi halvad tavapärase lahenduste (mineraalväetiste, digestaadi) kasutamiseks. 2023. aasta kevadine põud oli üle mitme aasta suurim ning põhjustas saagi vähenemist enamikes Eesti piirkondades (Kenk, 2023; Põldnurk, 2023). ERR'is avaldatud artiklis ennustas põllumees 10 kuni 20% saagi langust põua tõttu (Kenk, 2023), mis näitab niiskuse olulisust taimede vegetatsiooniperioodil ning eriti selle alguses. Sette katseala mulla niiskuse sisalduse oli teistest katsealadest kolm korda kõrgem, mis Xue *et al.* (2016) andmete põhjal tagab taimedel kuni viie kordse biomassi erinevuse.

Sette suur veesisaldus tõstis efektiivselt sette katseala mulla niiskust (Joonis 7), mis tagas vilja varasema tärkamise ning valmimise. Kevadisest kuivusest tingitud mulla erinev niiskuse sisaldus katsealadel põhjustas digestaadi, mineraali katsealal ja kontroll-alal nädalase viivituse seemnete tärkamises võrreldes sette katsealaga (Joonis 10). Kiirem taimekasvuperiood algas digestaadi, mineraali katsealal ja kontroll-alal pärast esimesi suuremaid vihmaseid ja temperatuuri soojenemist. Sette katsealal oli võrreldes teiste katsealadega ühtlasem viljakasv ning temperatuuri soojenemine ja sademed kiirendasid viljakasvu juuni teistest poolest.

Eestis kasutatakse suvinisu toidutööstuses ning vilja kvaliteedi hindamiseks määratakse erinevaid kvaliteedinäitajaid. Toidu tootmiseks on hea suurem proteiini sisaldus ning kõigil katsealadel oli proteiini sisaldus piisavalt kõrge, et vili sobiks kvaliteedi poolest esimesse kategooriasse. Proteiini sisaldust mõjutab väävli kättesaadavus mullast, sest väävel aitab taimedel parandada lämmastiku omastamist (Baltic Agro, n.d.). Mulla madalam pH vähendab taimede väävli omastamise võimet (Baltic Agro, n.d.).

Halvimad tulemused viljal kõigil katsealadel olid mahukaalu osas. Mahukaal näitab terade tihedust ning taimede kehv toitainetega varustus ja vale väetamine võivad mahukaalu vähendada (Yara, 2017). Antud katse puhul madala mahukaalu põhjuseks kõikidel katsealadel võis olla ka peentera mitte välja sorteerimine tehnilistel põhjustel. Põllumajanduses sorteeritakse peentera välja kuivatites ja suurtes kogustes korraga.

Langemisarv on oluline näitaja just pagaritoodete jaoks kasutatava jahu puhul (Yara, 2017). Madalam langemisarv digestaadi katsealal võib viidata madalale tärklise sisaldusele või halvale tärklise kvaliteedile (Koppel, 2021). Terade valmimisel ekstreemselt kuumad temperatuurid põhjustavad ensüümi α -amülaasi moodustumist, mis hakkab tärklist lagundama (Koppel, 2021). Augusti alguses tõusid temperatuurid kuni 26 °C kraadini, mis on piisav, et α -amülaas hakkaks moodustuma (Koppel, 2021). Lisaks alandab langemisarvu ka koristusperioodi vihmane ja niiske ilm, mis soodustab terade peas kasvama hakkamist (Koppel, 2021). Kehvem langemisarv võib olla tingitud ka vilja ebaühtlasest valmimisest ning kaaliumi puudusest, mis põhjustab terade enneaegset küpsemist ning normaalsemast väiksemat langemisarvu, ebaühtlasemate ja kiduramate teradega (Yara, 2017).

Sette katsealal tagas kõrgema saagikuse peamiselt kõrge niiskuse ja süsiniku sisaldus katse alguses. Lisaks aitas saagikuse suurendamisele kaasa veidike kõrgem pH kui teistel katsealadel. Suurema saagikusega kaasneb madalam proteiini sisaldus, mida on natukene näha ka sette katseala vilja madalamast proteiini sisaldusest ning mis järeldus ka Pepe & Heiner'i (1975) tööst (Pepe & Heiner, 1975). Kõrgema kasvuga taimedel võib olla väiksem saagikus, kuid see seos ei ole väga tugev (Islam *et al.*, 2013; Pepe & Heiner, 1975).

Scandagra katseandmete põhjal oli 2016 aastal suvinisu „Happy“ keskmine kõrgus 91 cm (Scandagra, n.d.). Uurimisala keskmine taimekõrgus oli natukene väiksem eelnimetatud kõrgusest, mis võib olla tingitud madalamast niiskuse sisaldusest katsealadel, mis selgus ka Hagan (1955) katsest, kus näidati, et mulla niiskus mõjutab taime kasvu. Lisaks võis taime kasvul rolli mängida ka mulla temperatuur. Cooper & Tainton (1968) leidsid, et taimede

kasvuks optimaalseim temperatuuri vahemik on 20–25 °C kraadi, kuid antud katses oli mulla temperatuur enamik ajast alla 20 °C kraadi.

Antud katses täheldati digestaadi negatiivset mõju taimekasvule, kuid sellele põhjuse leidmiseks on vajalik edasised uurimised.

Sette kasutuse sobivust põllumajanduses on uurima hakatud alles hiljuti, peamiselt seoses suurenenud vajadusega põhjaseteid eemaldada, et veekogusid süvendada (Renella, 2021). Teostatud on mitmeid positiivse tulemusega järvesette sobivuse hindamise katseid, kus on täheldatud sette positiivset mõju taimedele (Renella, 2021). Kian *et al.* (2023) järvesette katses leiti samuti, et sete sisaldab kõrgemas kontsentratsioonis süsinikku, kuid nende katse korral saagikus ei erinenud teistest katsealadest (k.a. kontroll-alast). Järjest enam tõuseb olulisele kohale ringmajandus ning erinevates valdkondades püütakse järgida ringmajanduse tavasid (US EPA, 2021). Põllumajandusliku hajukoormuse vähendamiseks loodud avaveeliste tehismärgalade toitainete ja orgaanilise aine rikka sette kasutus põllumajanduses oleks üheks oluliseks ringmajanduse väljenduse viisiks, et tagada ressursside jätkusuutlik kasutus.

Avaveelised tehismärgalad on olulised põllumajandusliku koormuse vähendamiseks ning aitavad vähendada liigsete toitainete jõudmist suurematesse pinnaveekogudesse (Kadlec & Wallace, 2009). Sette taaskasutamine põllul laiendaks avaveelise tehismärgala kasutuspotentsiaali ning võimaldaks võtta ringlusesse settes talletunud liigsed toitained. Avaveelise tehismärgala sette pikaajalisem mõju põllumullale vajab veel täiendavalt uurimist.

KOKKUVÕTE

Kliimamuutus raskendab põllumajanduslikku tootmist. Pikad ja sagedased põuad vähendavad põllumajanduslikku saagikust, kuid rahvaarvu kasvuga on põllumajandussaaduste nõudlus järjest tõusutrendis. Põllumajanduseks sobiva maa-ala vähenemise ning mineraalväetiste hindade kasvuga ei suudeta rahuldada toidunõudluse kasvu ning näljahädade arv järjest suureneb.

Suuremate väetusainete koguste kandmisega põldudele, et suurendada saagikust, suureneb ka koormus keskkonnale ning veekogude eutrofeerumise oht. Veest liigsetest toitainetest vabanemiseks ning põllumajandusliku hajukoormuse vähendamiseks on loodud avaveelisi tehismärgalaid. Tehismärgalasse hakkab ajapikku kogunema toitaineterikas sete ja märgala efektiivsuse tagamiseks on vajalik selle perioodiline eemaldamine.

Käesoleva töö eesmärk oli kirjeldada põllumajanduslikku hajukoormust vähendava avaveelise tehismärgala sette mõju põllumulla tervisele ning viljakusele ja vilja kvaliteedile ning võrrelda sette mõju teiste mullaviljakust parandavate meetoditega: NPK mineraalväetis ja digestaat ning algse põllumullaga.

Töö käigus otsiti tõestust järgnevatele hüpoteesidele:

- Avaveelise tehismärgala sete parandab mulla viljakust ja orgaanika sisaldust.
- Avaveelise tehismärgala sete tagab samaväärse tulemuse vilja kvaliteedis võrreldes mineraalväetise ja digestaadiga.

Uurimuse jaoks teostati põldkatse, mille käigus võrreldi suvinisu kasvu põhjal erinevusi kontroll-ala (algne põllumuld), digestaadi, mineraalväetise ning settega katsealal. Pidevate mõõtmiste ja vaatluste käigus igal katsealal kuuest proovivõtupunktist koguti mulla ja taime parameetrite andmeid vegetatsiooniperioodil ehk kokku nelja kuu jooksul (mai kuni september 2023).

Katse alguses ja lõpus kogutud mullaproovidest lasti analüüsida süsiniku, pH ning toitainete sisaldused ning kogu katse jooksul kogus automaat-analüsaator andmeid mulla temperatuuri kohta igal katsealal. Taime kasvu jälgimiseks mõõdeti iga nädal taimede kõrgused igalt katsealalt proovivõtu punktidest ning katse lõpus koguti kogu biomass saagikuse arvutamiseks. Tulemuste toetamiseks ja seoste leidmiseks paigaldati ka automaat-ilmajaam, mis kogus andmeid õhutemperatuuri ja sademete kohta terve katseperioodi jooksul.

Katse tulemustest järeldus, et avaveelise tehismärgala settel on positiivne mõju suvinisu kasvule ja saagikusele. Sette suur niiskusesisaldus aitas vähendada kuiva kevade negatiivset mõju ning andis nisuterade tärkamiseks vajaliku niiskuse. Teistel katsealadel põhjustas mullaniiskuse puudumine nädalase viivituse taimede tärkamises.

Toitainete (fosfor, lämmastik ja kaalium) sisaldus sette katseala mullas ei erinenud teistest katsealadest (kontroll-ala, mineraal, digestaat), kuid sette katseala mullas oli oluliselt kõrgem orgaanilise süsiniku sisaldus. Avaveelise tehismärgala sette kõrge niiskuse ja kõrge orgaanika sisaldus andsid positiivse efekti antud katse suvinisu saagikusele, tänu millele oli sette katsealal suurim saagikus võrreldes teiste katsealadega. Toitainete lisamine sette katsealale suurendaks potentsiaalselt saagikust veelgi, kuid see vajaks täiendavalt uurimist.

Põllumajandusliku hajukoormuse vähendamiseks loodud avaveelise tehismärgala settel on suur potentsiaal ka ringmajanduse perspektiivist, sest toitaineterikka sette kasutus põllumuldade tervise parandamiseks tagaks juba keskkonnas olevate toitainete ringlusesse võtmise. Sette kasutus põllumajanduses võimaldaks vähendada ka sünteetiliste väetiste kasutust ning aitaks saavutada jätkusuutlikku põllumajanduse eesmäärke. Avaveelise tehismärgala sette pikaajalisemat mõju põllumullale tuleks uurida täiendavate katsetega.

The impact of the sediment from agricultural diffuse pollution control surface-flow treatment wetland on soil fertility and grain yield

Lii Lopp

Summary

Climate change makes farming more difficult. Long and more frequent droughts reduce agricultural yield, but with population growth, the demand for agricultural products continues to rise. With the reduction of the land area suitable for agriculture and the increase in the prices of mineral fertilizers, it is not possible to satisfy the increase in food demand, and the number of famines is increasing.

Applying larger quantities of fertilizers to the fields to increase yields also increases the pollution of the environment and the risk of eutrophication in water bodies. Surface-flow treatment wetlands have been created to remove excess nutrients from the water and to reduce agricultural diffuse pollution. Nutrient-rich sediment begins to accumulate at the bottom of the treatment wetland, and it is necessary to remove it periodically to ensure the effectiveness of the wetland.

This thesis aims to describe the impact of the sediment from agricultural diffuse pollution control surface-flow treatment wetland on the agricultural soil health and fertility and on the quality and yield of the crop. Furthermore, the impact of the sediment was compared with other common soil amendment methods that improve soil fertility: NPK mineral fertilizer and digestate, and with original agricultural soil.

The hypotheses of this thesis are:

- Sediment improves soil fertility and organic carbon content.
- Sediment ensures an equivalent result in terms of crop yield and quality compared to mineral fertilizer and digestate.

For the research, a large-scale field experiment was conducted during one vegetation period from May until September 2023, in Estonia. The sediment effect was compared with control, digestate and NPK mineral fertilizer. During continuous measurements and observations, data on soil and plant parameters were collected from six sampling points in each plot area (size 48 m²) for four months. The crop used in this experiment was spring wheat “Happy”

Soil samples collected at the beginning and end of the experiment were analysed for pH, carbon, and nutrient content, and throughout the experiment, an automatic analyser collected

data on soil temperature in each amendment plot. To monitor plant growth, plant heights were measured weekly from sampling points in each amendment plot, and total biomass was collected at the end of the experiment to compare biomass growth and calculate the grain yield. To support the results and find correlations, an automatic weather station was also installed, which collected data on air temperature and precipitation throughout the test period.

The main conclusion from the results of the experiment is that the sediment from agricultural diffuse pollution control surface-flow treatment wetland has a positive effect on the growth and yield of spring wheat. The high moisture content of the sediment helped to reduce the negative effect of the dry spring and provided the necessary moisture for wheat seed germination. In other amendment plots, the lack of soil moisture caused a one-week delay in plant emergence.

The content of nutrients (phosphorus, nitrogen, and potassium) in the soil of the sediment amendment plot did not differ from other amendment plots (control, mineral, digestate), but the carbon content in the soil was significantly higher in the sediment plot. The high moisture and high organic carbon content of the sediment from the agricultural diffuse pollution control surface-flow treatment wetland had a positive effect on the yield of spring wheat in this experiment, thanks to which the sediment experimental area had the highest yield compared to other experimental areas. Adding nutrients to the sediment plot would potentially increase yield further due to the already high organic carbon content, but this would require further investigation.

The sediment from agricultural diffuse pollution control surface-flow treatment wetland has great potential to be used to improve the health of agricultural soils from a circular economy perspective. The use of sediment in agriculture would make it possible to reduce the use of synthetic fertilizers and help achieve the goals of sustainable agriculture. The long-term effects of surface-flow treatment wetland sediment on agricultural soil should be investigated with additional experiments.

Tänuavaldused

Käesoleva töö autor soovib tänada oma juhendajaid, Kuno Kasakut ning Margit Kõiv-Vainikut, suure toetuse ja abi ning mõistva suhtumise eest. Autor soovib tänada oma isa, Kaino Loppi, kes aitas teostada suures osas põllutöid ning jagas soovitusi vilja kasvatamise osas ning Tagametsa Mahe OÜ-d koostöö eest. Lisaks soovib autor tänada oma peret, sõpru ja kursusekaaslasi, kes toetasid ja aitasid kaasa antud bakalaureuse töö valmimisele ning keskkonnatehnoloogia uurimisrühma liikmeid, kes abistasid katse läbiviimisel ja proovivõttudel.

Käesoleva bakalaureusetöö valmis Eesti Teadusagentuuri (grant nr PSG714) ja Haridus- ja teadusministeeriumi poolt finantseeritava Kestliku maakasutuse tippkeskuse (Center of Excellence - FutureScapes) raames.

KASUTATUD KIRJANDUS

- Akinyemi, F. O., & Ifejika Speranza, C. (2022). Agricultural landscape change impact on the quality of land: An African continent-wide assessment in gained and displaced agricultural lands. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 106, 102644. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102644>
- Alexander, R. B., Smith, R. A., Schwarz, G. E., Boyer, E. W., Nolan, J. V., & Brakebill, J. W. (2008). Differences in Phosphorus and Nitrogen Delivery to The Gulf of Mexico from the Mississippi River Basin. *Environmental Science & Technology*, 42(3), 822–830. <https://doi.org/10.1021/es0716103>
- Alexandratos, N., & Bruinsma, J. (2012). World Agriculture towards 2030/2050: The 2012 revision. *Agricultural Development Economics Division*. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.288998>
- Astover, A. (2005). *Eesti mullastik ja muldade kasutussobivus*. Eesti Maaülikool. Baltic Agro. (n.d.). *Põldude lupjamine tõstab saagikust ja saagi kvaliteeti*. BalticAgro. Vaadatud 14.05.2024 <https://www.balticagro.ee/mahe/poldude-lupjamine-1>
- Bonanse, R., Filippi, I., Wunderlin, D., Marino, D., & Amé, M. (2017). The Fate of Glyphosate and AMPA in a Freshwater Endorheic Basin: An Ecotoxicological Risk Assessment. *Toxics*, 6(1), 3. <https://doi.org/10.3390/toxics6010003>
- Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P. W., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., Barrett, K., Blanco, G., Cheung, W. W. L., Connors, S., Denton, F., Diongue-Niang, A., Dodman, D., Garschagen, M., Geden, O., Hayward, B., Jones, C., ... Péan, C. (2023). *IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (First)*. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Carpenter, S. R., Caraco, N. F., Correll, D. L., Howarth, R. W., Sharpley, A. N., & Smith, V. H. (1998). Nonpoint pollution of surface water with phosphorus and nitrogen. *Ecological Applications*, 8(3), 559–568. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(1998\)008\[0559:NPOSWW\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(1998)008[0559:NPOSWW]2.0.CO;2)
- Cherlinka, V. (2020). Crop Yield: Increased Productivity With Precision Technologies. *EOS Data Analytics*. Vaadatud 20.01.2024 <https://eos.com/blog/crop-yield-increase/>
- Cooper, J. P., & Tainton, N. M. (1968). Light and temperature requirements for the growth of tropical and temperate grasses. *Herbage Abstracts*, 38(3), 167–176.
- Crocetti, P., González-Camejo, J., Li, K., Foglia, A., Eusebi, A. L., & Fatone, F. (2022). An overview of operations and processes for circular management of dredged sediments. *Waste Management*, 146, 20–35. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.04.040>
- Czekała, W. (2022). Digestate as a Source of Nutrients: Nitrogen and Its Fractions. *Water*, 14(24), 4067. <https://doi.org/10.3390/w14244067>
- Dai, X. J., Xiao, X., Dai, W. T., Liu, S. H., Dong, X. Y., Shen, R. F., & Zhao, X. Q. (2023). Comparison of Nitrate and Ammonium Leaching of Soils Collected from Different Regions of China: A Soil Column Experiment. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 23(4), 6059–6070. <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01464-4>
- Di Luca, G. A., Maine, M. A., Mufarrije, M. M., Hadad, H. R., Pedro, M. C., Sánchez, G. C., & Caffaratti, S. E. (2017). Phosphorus distribution pattern in sediments of natural and

- constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 108, 227–233. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.08.038>
- Erisman, J. W., Sutton, M. A., Galloway, J., Klimont, Z., & Winiwarter, W. (2008). How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nature Geoscience*, 1(10), 636–639. <https://doi.org/10.1038/ngeo325>
- Grand View Research. (2023). *Phosphate Fertilizer Market Size & Share Report (GVR-2-68038-284-6*; p. 150).
- Hagan, R. M. (1955). Factors affecting soil moisture—Plant growth relations. *Symposium II*, 82–102.
- Ho, K. T., Burgess, R. M., Pelletier, M. C., Serbst, J. R., Ryba, S. A., Cantwell, M. G., Kuhn, A., & Raczewski, P. (2002). An overview of toxicant identification in sediments and dredged materials. *Marine Pollution Bulletin*, 44(4), 286–293. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(01\)00251-X](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(01)00251-X)
- Islam, M. A., Obour, A. K., Saha, M. C., Nachtman, J. J., Cecil, W. K., & Baumgartner, R. E. (2013). Grain Yield, Forage Yield, and Nutritive Value of Dual-Purpose Small Grains in the Central High Plains of the USA. *Crop Management*, 12(1), 1–8. <https://doi.org/10.1094/CM-2012-0154-RS>
- Järvan, M., Vettik, R., Koppel, M., Sooväli, P., & Saue, T. (2020). *Hea põllumajandustava*. Eesti Taimekasvatuse Instituut.
- Johannesson, K. M., Andersson, J. L., & Tonderski, K. S. (2011). Efficiency of a constructed wetland for retention of sediment-associated phosphorus. *Hydrobiologia*, 674(1), 179–190. <https://doi.org/10.1007/s10750-011-0728-y>
- Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2009). *Treatment wetlands* (2nd ed). CRC press.
- Kanger, J., Kevvai, T., Kevvai, L., Kärblane, H., Astover, A., Ilumäe, E., Lauringson, E., Loide, V., Penu, P., Rooma, L., Sepp, K., Talgre, L., & Tamm, U. (2014). *Väetamise ABC*. Põllumajandusuuringute Keskus. https://dspace.emu.ee/xmlui/bitstream/handle/10492/6169/vaetamise_ABC.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Kasak, K., Piirimäe, K., & Vahtrus, S. (2016). *Veekaitsemeetmed põllumajanduses*. SA Eestimaa Looduse Fond.
- Kenk, O. (2023). Põllumehed on hädas öökülmade ja mitme aasta suurima põuaga. *ERR*. Vaadatud 20.05.2024 <https://www.err.ee/1609001957/pollumehed-on-hadas-ookulmade-ja-mitme-aasta-suurima-pouaga>
- Keskkonnaministri määrus nr 12. (2020). *Kääritusjäägi ohutus- ja kvaliteedinäitajad*. Keskkonnaminister. https://www.riigiteataja.ee/aktilisa/1260/5202/0003/Lisa_2.pdf
- Kiani, M., Raave, H., Simojoki, A., Tammeorg, O., & Tammeorg, P. (2021). Recycling lake sediment to agriculture: Effects on plant growth, nutrient availability, and leaching. *Science of The Total Environment*, 753, 141984. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141984>
- Kiani, M., Zrim, J., Simojoki, A., Tammeorg, O., Penttinen, P., Markkanen, T., & Tammeorg, P. (2023). Recycling eutrophic lake sediments into grass production: A four-year field experiment on agronomical and environmental implications. *Science of The Total Environment*, 870, 161881. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161881>
- Kibblewhite, M. G., Ritz, K., & Swift, M. J. (2008). Soil health in agricultural systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1492), 685–701. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2178>

- Kirchmann, H., & Lundvall, A. (1993). Relationship between N immobilization and volatile fatty acids in soil after application of pig and cattle slurry. *Biology and Fertility of Soils*, 15(3), 161–164. <https://doi.org/10.1007/BF00361605>
- Koppel, R. (2021). *Mis mõjutab nisu langemisarvu?* Põllumajandus. Vaadatud 14.05.2024 <https://www.pollumajandus.ee/uudised/2021/07/29/mis-mojutab-nisu-langemisarvu>
- Koszel, M., & Lorencowicz, E. (2015). Agricultural Use of Biogas Digestate as a Replacement Fertilizers. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 7, 119–124. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.12.004>
- Kouřimská, L., Poustková, I., & Babička, L. (2012). The use of digestate as a replacement of mineral fertilizers for vegetables growing. *Scientia Agriculturae Bohemica*, 43(4), 121–126. <https://doi.org/10.7160/sab.2012.430401>
- Krasilnikov, P., Taboada, M. A., & Amanullah. (2022). Fertilizer Use, Soil Health and Agricultural Sustainability. *Agriculture*, 12(4), 462. <https://doi.org/10.3390/agriculture12040462>
- Kvaliteeditingimused*. (2023). Scandagra. Vaadatud 24.03.2024 <https://scandagra.ee/viljainfo/vastuvott/vilja-kvaliteeditingimused/>
- Liu, Q., Xu, H., & Yi, H. (2021). Impact of Fertilizer on Crop Yield and C:N:P Stoichiometry in Arid and Semi-Arid Soil. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(8), 4341. <https://doi.org/10.3390/ijerph18084341>
- Loria, E. R., Sawyer, J. E., Barker, D. W., Lundvall, J. P., & Lorimor, J. C. (2007). Use of Anaerobically Digested Swine Manure as a Nitrogen Source in Corn Production. *Agronomy Journal*, 99(4), 1119–1129. <https://doi.org/10.2134/agronj2006.0251>
- Maa-amet—Fotoladu*. (2023). Vaadatud 02.02.2024 <https://fotoladu.maaamet.ee/?basemap=hybriidk&zlevel=14,26.72351,58.28257&overlay=tyhi>
- Madissoo, Ü. (2022). *Analüüsiprotokoll* (22; p. 1). Põllumajandusuuringute Keskus.
- Maluleke, I. (2020). *The effects of drought on agriculture*. Grainsa. Vaadatud 29.01.2024 <https://www.grainsa.co.za/the-effects-of-drought-on-agriculture>
- Mendes, L. R. D., Tonderski, K., & Kjaergaard, C. (2018). Phosphorus accumulation and stability in sediments of surface-flow constructed wetlands. *Geoderma*, 331, 109–120. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.06.015>
- Möller, K., & Müller, T. (2012). Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth. *Engineering in Life Sciences*, 12(3), 242–257. <https://doi.org/10.1002/elsc.201100085>
- Moss, B. (2007). Water pollution by agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363, 659–666. <https://doi.org/doi:10.1098/rstb.2007.2176>
- MTÜ Eesti Seemneliit. (n.d.). *Soovituslikud külvinormid*. Vaadatud 27.11.2023 <https://seemneliit.ee/soovituslikud-kulvinormid/>
- Noorvee, A., Pöldvere, E., & Mander, Ü. (2007). The effect of pre-aeration on the purification processes in the long-term performance of a horizontal subsurface flow constructed wetland. *Science of The Total Environment*, 380(1–3), 229–236. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.10.008>
- Oldfield, E. E., Bradford, M. A., & Wood, S. A. (2019). Global meta-analysis of the relationship between soil organic matter and crop yields. *Soil*, 5(1), 15–32. <https://doi.org/10.5194/soil-5-15-2019>

- Pahalvi, H. N., Rafiyya, L., Rashid, S., Nisar, B., & Kamili, A. N. (2021). Chemical Fertilizers and Their Impact on Soil Health. In G. H. Dar, R. A. Bhat, M. A. Mehmood, & K. R. Hakeem (Eds.), *Microbiota and Biofertilizers, Vol 2*. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-61010-4_1
- Pandey, N. (2018). Role of Plant Nutrients in Plant Growth and Physiology. In M. Hasanuzzaman, M. Fujita, H. Oku, K. Nahar, & B. Hawrylak-Nowak (Eds.), *Plant Nutrients and Abiotic Stress Tolerance* (pp. 51–93). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-9044-8_2
- Pepe, J. F., & Heiner, R. E. (1975). Plant Height, Protein Percentage, and Yield Relationships in Spring Wheat. *Crop Science*, *15*(6), 793–797. <https://doi.org/10.2135/cropsci1975.0011183X001500060016x>
- Pistilli, M. (2023, June 6). *Top 10 Phosphate Countries by Production*. Investing News Network. Vaadatud 3.10.2023 <https://investingnews.com/daily/resource-investing/agriculture-investing/phosphate-investing/top-phosphate-countries-by-production/>
- Posit team (2024). RStudio: Integrated Development Environment for R. Posit Software, PBC, Boston, MA. URL <http://www.posit.co/>.
- Pöldnurk, J. (2023, July 4). Põuane kevad-suvi põhjustas veenappuse, millest taastumine võtab aega. *Keskkonnaagentuur*. Vaadatud 20.05.2024 <https://keskkonnaagentuur.ee/node/1302>
- Prasad, R., & Chakraborty, D. (2019). *Phosphorus Basics: Understanding Phosphorus Forms and Their Cycling in the Soil*. Alabama Cooperative Extension System. Vaadatud 01.04.2024 <https://www.aces.edu/blog/topics/crop-production/understanding-phosphorus-forms-and-their-cycling-in-the-soil/>
- Renella, G. (2021). Recycling and Reuse of Sediments in Agriculture: Where Is the Problem? *Sustainability*, *13*(4), 1648. <https://doi.org/10.3390/su13041648>
- Robock, A. (2003). Soil Moisture. In *Encyclopedia of Atmospheric Sciences* (pp. 987–993). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-12-227090-8/00169-X>
- Rótolo, G. C., Francis, C., Craviotto, R. M., Viglia, S., Pereyra, A., & Ulgiati, S. (2015). Time to re-think the GMO revolution in agriculture. *Ecological Informatics*, *26*, 35–49. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2014.05.002>
- Russel, D. A., & Williams, G. G. (1977). History of Chemical Fertilizer Development. *Soil Science Society of America Journal*, *41*(2), 260–265. <https://doi.org/10.2136/sssaj1977.03615995004100020020x>
- Samuel, A., & Dines, L. (Eds.). (2023). 4—Fertilisers and manures. In *Lockhart and Wiseman's Crop Husbandry Including Grassland (Tenth Edition)* (pp. 81–114). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85702-4.00014-5>
- Saunders, D. L., & Kalff, J. (2001). Nitrogen retention in wetlands, lakes and rivers. *Hydrobiologia*, *443*(1/3), 205–212. <https://doi.org/10.1023/A:1017506914063>
- Scandagra. (n.d.). *Suvinisu Happy*. Scandagra. Vaadatud 24.04.2024 <https://scandagra.ee/wp-content/uploads/scee-suvinisu-happy-2019.pdf>
- Selman, M., Greenhalgh, S., Diaz, R., & Sugg, Z. (2008). Eutrophication and hypoxia in coastal areas: A global assessment of the state of knowledge. *World Resources Institute*, *284*, 1–6.
- Semeniuk, V., & Semeniuk, C. (2004). Sedimentary fill of basin wetlands, central Swan Coastal Plain, southwestern Australia. Part 1: Sediment particles, typical sediments,

- and classification of depositional systems. *Journal of the Royal Society of Western Australia*, 87, 139–186.
- SubSed. (n.d.). *Review of legislation on dredged sediment management* (SUBSED LIFE17 ENV/IT/000347; “Sustainable Substrates for Agriculture from Dredged Remediated Marine Sediments: From Ports to Pots”). Vaadatud 14.05.2024 <http://www.lifesubsed.com/wp-content/uploads/2019/03/SUBSED-Deliverable-A.1-Review-of-legislation-on-dredged-sediment-management.pdf>
- Talpsep, I., Kasak, K., Piirimäe, K., & Tamm, I. (2012). *Tehismärgalad: Põllumees puhastab vett*. SA Eestimaa Looduse Fond. https://issuu.com/ivartamm/docs/tehismargalad_170x240_sept2012_veeb2_eraldi
- Tambone, F., Scaglia, B., D’Imporzano, G., Schievano, A., Orzi, V., Salati, S., & Adani, F. (2010). Assessing amendment and fertilizing properties of digestates from anaerobic digestion through a comparative study with digested sludge and compost. *Chemosphere*, 81(5), 577–583. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.08.034>
- The European Parliament and the Council of the European Union. (2019). *Regulation (EU) 2019/1009 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 laying down rules on the making available on the market of EU fertilising products and amending Regulations (EC) No 1069/2009 and (EC) No 1107/2009 and repealing Regulation (EC) No 2003/2003*.
- UCDavis. (n.d.). *Low Organic Matter: Soil Health*. UC Davis Global Soil Health Portal. Vaadatud 23.04.2024 <https://soilhealth.ucdavis.edu/soil-challenges/low-organic-matter>
- Unesco (Ed.). (2015). *Water for a sustainable world*. UNESCO.
- United Nations. (n.d.). *Population*. United Nations. Vaadatud 29.01.2024 <https://www.un.org/en/global-issues/population>
- US EPA. (2021). *Circular Economy*. United States Environmental Protection Agency. Vaadatud 23.05.2024 <https://www.epa.gov/circulareconomy/what-circular-economy>
- US EPA. (2022). *Agriculture Nutrient Management and Fertilizer*. United States Environmental Protection Agency. Vaadatud 29.09.2023 <https://www.epa.gov/agriculture/agriculture-nutrient-management-and-fertilizer>
- Vitosh, M. L. (1996). *N-P-K fertilizers*. Cooperative Extension Service. https://www.canr.msu.edu/field_crops/uploads/archive/E0896.pdf
- Vos, R., & Bellù, L. G. (2019). Global Trends and Challenges to Food and Agriculture into the 21st Century. In *Sustainable Food and Agriculture* (pp. 11–30). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812134-4.00002-9>
- Vymazal, J. (2010). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. *Water*, 2(3), 530–549. <https://doi.org/10.3390/w2030530>
- Wan, M. T., Kuo, J.-N., McPHERSON, B., & Pasternak, J. (2006). Agricultural Pesticide Residues in Farm Ditches of the Lower Fraser Valley, British Columbia, Canada. *Journal of Environmental Science and Health, Part B: Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes*, 41(5), 647–669. <https://doi.org/10.1080/03601230600701817>
- Ward, A. J., Hobbs, P. J., Holliman, P. J., & Jones, D. L. (2008). Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource Technology*, 99(17), 7928–7940. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.02.044>
- Wickham H (2016). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York. ISBN 978-3-319-24277-4, <https://ggplot2.tidyverse.org>.

- Wickham H, Averick M, Bryan J, Chang W, McGowan LD, François R, Grolemond G, Hayes A, Henry L, Hester J, Kuhn M, Pedersen TL, Miller E, Bache SM, Müller K, Ooms J, Robinson D, Seidel DP, Spinu V, Takahashi K, Vaughan D, Wilke C, Woo K, Yutani H (2019). “Welcome to the tidyverse.” *Journal of Open Source Software*, 4(43), 1686. doi:10.21105/joss.01686.
- Wickham H, Vaughan D, Girlich M (2024). *tidyr: Tidy Messy Data*. R package version 1.3.1, <https://github.com/tidyverse/tidyr>, <https://tidyr.tidyverse.org>.
- Xu, Y., Hu, H., Liu, J., Luo, J., Qian, G., & Wang, A. (2015). pH dependent phosphorus release from waste activated sludge: Contributions of phosphorus speciation. *Chemical Engineering Journal*, 267, 260–265. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.01.037>
- Xue, R., Shen, Y., & Marschner, P. (2016). Low soil water content during plant growth influences soil respiration and microbial biomass after plant removal and rewetting. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 16(4), 955–966. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162016005000068>
- Yara. (2017). *Nisusaagi kvaliteedi tõstmine*. Yara. Vaadatud 24.04.2024 <https://www.yara.ee/kultuurtaimed/nisu/nisu-saagi-kvaliteet/>
- YaraMila. (2022). *YaraMila NPK(S) 21-8-12 (7)*. Yara Eesti. Vaadatud 24.04.2024 <https://www.yara.ee/yara-vaetised/yaramila/yaramila-npks-21-8-12-7-prill/>
- Yousaf, M., Li, J., Lu, J., Ren, T., Cong, R., Fahad, S., & Li, X. (2017). Effects of fertilization on crop production and nutrient-supplying capacity under rice-oilseed rape rotation system. *Scientific Reports*, 7(1), 1270. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01412-0>
- Zahid, H. J., Robinson, E., & Kelly, R. L. (2016). Agriculture, population growth, and statistical analysis of the radiocarbon record. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(4), 931–935. <https://doi.org/10.1073/pnas.1517650112>

Lisa 1. Katseala mulla algne koostis

Kiht I tähistab esimest proovi mulla pindmisest kihist ning Kiht II tähistab u 30 cm sügavusel paiknevat kihti. AL- toitaine taimedele omastatavas vormis.

Proov	Fosfor (AL)	Kaalium (AL)	Kaltsium (AL)	Magneesium (AL)	Lahustunud lämmastik	Lahustunud orgaaniline süsinik
	mg/100 g	mg/100 g	mg/100 g	mg/100 g	mgN/kg	mgC/kg
Kiht I	21,9	103,2	169	28,3	56	561
Kiht II	10,8	40,2	88	12,6	44	507
Keskmine	16,3	71,7	128,6	20,4	50	534
Kogus (mg/kg)	163,3	717,1	1286,2	204,2		
Kogus (%)	0,016	0,072	0,129	0,020	0,005	0,053

Lisa 2. Väetistarbe klassid ja toiteelementide sisaldused

Toiteelementide sisaldused on toodud ühikus mg/kg.

(alates 2013. aastast määratuna Mehlich 3 meetodil). Lühivariant. (Kanger *et al.*, 2014)

Väetistarbe klass	P*	K*	Mg*	Cu*	Mn*	Zn*	B**	B**
Mineraalmullad, orgaaniline süsinik C <9% (huumusesisaldus <15%)*								
Väga suur	<20	<55	<45	-	-	-	<0,8	<1,0
Suur	20...45	56...130	45...100	<1,5	<75	<2,2	0,8...1,2	1,0...1,5
Keskmine	46...90	131...240	101...150	1,5...2,5	75...150	2,2...5,0	1,3...1,8	1,6...2,7
Väike	91...145	>240	151...220	>2,5	>150	>5,0	>1,8	>2,7
Väga väike	>145	-	>220	-	-	-	-	-
Glei-, turvastunud- ja turvasmullad, orgaaniline süsinik C >9% (huumusesisaldus >15%)*								
Väga suur	<20	<140	-	-	-	-	<0,9	<0,5
Suur	20...45	141...290	<190	<1,5	<75	<2,2	0,9...1,2	0,5...0,8
Keskmine	46...95	291...580	195...300	1,5...2,5	75...150	2,2...5,0	1,3...1,8	0,9...1,2
Väike	96...170	>580	>300	>2,5	>150	>5,0	>1,8	>1,2
Väga väike	>170	-	-	-	-	-	-	-

* Mehlich 3 väljatõmbelohus

** vesilahus

*** Huumusesisaldus=C_{org}×1,72

Lisa 3. Sette koostis ja vajalik sette kogus vastavalt toitainete vajadusele AL- taimedele omastatav vorm.

Toitaine	Planeeritav saak, t/ha	Vajalik toitaine kogus, g/m²	Toitainete sisaldus settes, mg/100g	Toitaine % sisaldus settes	Vajalik sette kogus, kg/m²
Lämmastik	4,0	11,5	5,65	0,00565	203,54
Fosfor	4,0	0,9	6,2	0,00618	14,56
Kaalium	4,0	3,3	7,0	0,00699	47,21
Magneesium	-	-	101,6	0,10161	-
Kaltsium	-	-	827,4	0,82738	-
Süsinik	-	-	-	10,3	-

Lisa 4. Kultuuride väetamine

(Kanger *et al.*, 2014).

Lämmastikuga:

Kultuur	Planeeritav saak, t/ha	Lämmastiku tarve		
		Mulla orgaanilise C sisaldus, %		
		<1	1...2	>2
		vaja anda taimetoiteelementi, kg/ha		
Suviteravili				
Suvinisu	3,0	90	80	70
	4,0	115	105	95
	5,0	140	130	120
	6,0	–*	155	145
	7,0	–*	200	190

Fosforiga:

Kultuur	Planeeritav saak, t/ha	Fosfori tarve				
		väga suur	suur	keskmine	väike	väga väike
		vaja anda taimetoiteelementi, kg/ha				
Suviteravili						
Suvinisu	3,0	26	20	13	6	-
	4,0	30	27	22	18	9
	5,0	–*	30	25	21	11
	6,0	–*	–*	28	24	14
	7,0	–*	–*	31	27	17

Lisa 5. Digestaadi analüüsiprotokoll
(Madissoo, 2022)



PÕLLUMAJANDUSÜRINGUTE KESKUS
AGRICULTURAL RESEARCH CENTRE



ANALÜÜSIPROTOKOLL nr 22 – 000280 AKL

Leht 1 (1)

Klient (kontaktisik): **TARTU BIOGAAS OÜ (Alo Kähr)**

Aadress: **Roseni II Tallinn**

E-post: **alo.kahr@biogasestonia.ee**

Toote (materjali) nimetus: **DIGESTAAT**

Proovi vastuvõtmise kuupäev: **27.01.2022**

Määratud parameetrid:

Jrk. nr.	Parameetri nimetus	Tulemus	Laiend-määramatus, k=2	Analüüsimeetodi alus
1.	Kuivaine (%)	7,2	± 0,4	EVS-EN 13040 *
2.	Orgaaniline aine (%) kuivaines	81,9	-	GOST 27980-88 *
3.	Lämmastik – N (%)	0,39	± 0,031	Kjeldahli meetod
4.	Fosfor – P (%)	0,056	± 0,012	Märgtuhastus + ICP-OES
5.	Kaalium – K (%)	0,286	± 0,06	Märgtuhastus + ICP-OES
6.	pH _{H2O}	8,1	-	2003/2003 EC Annex III Method 4*
		Tulemus	Laiend-määramatus, mg/kg, k=2	
7.	Tsink – Zn (mg/kg)	8,0	± 1,3	PMK-JJ-1A *

Märkused:

1. Analüüsitulemused kehtivad ainult analüüsiks toodud proovi kohta.
2. Analüüsiprotokoll on lubatud kopeerida ainult tervikuna, osaliseks kopeerimiseks peab olema labori luba.
3. Analüüsiprotokoll ei asenda müügi puhul sertifikaati.
- 4.* Analüüsimeetod ei kuulu akrediteeritud meetodite hulka

Analüüsid teostatud: 27.01. – 01.02.2022

Protokolli väljastamise aeg: 01.02.2022

Analüüsiprotokolli koostas:

AKL peaspetsialist Ülle Madissoo

Agrokeemia laboratooriumi juhataja:

Aita Kruus (tel. 672 9126)
/allkirjastatud digitaalselt/

Reg nr 7000042
<http://pmk.agri.ee>

Teaduse 4, Saku
75501 Harjumaa EESTI

Labori asukoht
Karjavärava tee 2, Juuliku, Saku vald, Harjumaa

Lisa 6. Digestaadi vajalik kogus katsealale toiteelemendi järgi

Toitaine	Planeeritav saak, t/ha	Vajalik toitaine kogus, g/m²	Toitaine sisaldus digestaadis %	Vajalik digestaadi kogus kg/m²
Lämmastik	4.0	11,5	0,39	2,95
Fosfor	4,0	0,9	0,056	1,61
Kaalium	4,0	3,3	0,286	1,15

Lisa 7. Avaveelise tehismärgala sette pestitsiidide analüüsi tulemused

Näitaja	Katsemeetod	Tulemus	Näitaja	Katsemeetod	Tulemus
1,2,3-Triklorobenseen (µg/kg KA)	STJnrU63a	< 1	1,2,4-Triklorobenseen	STJnrU63a	< 1
1,3,5-Triklorobenseen	STJnrU63a	< 1	1,2,3,5-/1,2,4,5-Tetraklorobenseen	STJnrU63a	< 1
1,2,3,4-Tetraklorobenseen	STJnrU63a	< 1	Pentaklorobenseen	STJnrU63a	< 1
Heksaklorobenseen	STJnrU63a	< 1	2,4-D	STJnrU97	< 0,6
2,4-D 2-EHE	STJnrU63a	< 1	Aklonifeen	STJnrU63a	< 5
Alakloor	STJnrU63a	< 5	Aldriin	STJnrU63a	< 1
alfa-Endosulfaan	STJnrU63a	< 1	alfa-Heksaklorotsükloheksaan	STJnrU63a	< 1
alfa-Klordaan	STJnrU63a	< 5	Ametrüün	STJnrU97	< 0,3
Amidosulfuroon	STJnrU97	< 0,3	AMPA	STJnrU93A	8,6
Atrasiin	STJnrU63a	< 5	Atsetamipriid	STJnrU97	< 0,4
beeta-Endosulfaan	STJnrU63a	< 1	beeta-Heksaklorotsükloheksaan	STJnrU63a	< 1
Bentasoon	STJnrU97	< 4	Bifenoks	STJnrU63a	< 5
Bifentriin	STJnrU63a	< 5	Boskaliid	STJnrU63a	< 10
delta-Heksaklorotsükloheksaan	STJnrU63a	< 1	Deltametriin	STJnrU63a	< 10
Desetiül-atrasiin	STJnrU97	< 0,2	Diasinoon	STJnrU63a	< 5
Dieldriin	STJnrU63a	< 1	Diflubensuroon	STJnrU97	< 2
Diflufenikaan	STJnrU97	< 1	Dikamba	STJnrU97	< 1500
Diklobeniil	STJnrU63a	< 5	Diklorofoss	STJnrU97	< 0,7
Dikloroprop-P	STJnrU97	< 0,8	Dikofool	STJnrU63a	< 5
Dimetakloor	STJnrU63a	< 10	Dimeteenamiid-P	STJnrU97	< 0,3
Dimetoaat	STJnrU97	< 0,2	Dimoksüstrobiin	STJnrU97	< 0,3
Diuroon	STJnrU97	< 0,4	Endosulfaansulfaat	STJnrU63a	< 1
Endriin	STJnrU63a	< 1	Epoksikonasool	STJnrU63a	< 10
epsilon-Heksaklorotsükloheksaan	STJnrU63a	< 1	Esfenvaleraat	STJnrU63a	< 10
Ethopropos	STJnrU97	< 0,8	Etofeenproks	STJnrU97	< 4
Fenitrotioon	STJnrU63a	< 5	Fenpropatriin	STJnrU63a	< 5
Fenpropidiin	STJnrU63a	< 10	Fenpropidiin	STJnrU97	< 0,7
Fenpropimorf	STJnrU63a	< 10	Fenvaleraat	STJnrU63a	< 5
Fluroksüüpüür	STJnrU97	< 4	Flutsütrinaat	STJnrU63a	< 5
Fosfamidoon	STJnrU63a	< 5	gamma-Heksaklorotsükloheksaan	STJnrU63a	< 1
gamma-Klordaan	STJnrU63a	< 5	Glüfosaat	STJnrU93A	< 2
Heksaklorobutadieen	STJnrU63a	< 1	Heptakloor	STJnrU63a	< 1
Heptakloor-eksoepoksiid	STJnrU63a	< 1	Heptakloor-endoepoksiid	STJnrU63a	< 1

Imidaklopriid	STJnrU97	< 0,3	Isobensaan	STJnrU63a	< 1
Isodriin	STJnrU63a	< 1	Isoprokarb	STJnrU97	< 0,3
Isoproturoon	STJnrU97	< 0,5	Kinoksüfeen	STJnrU97	< 0,8
Kloormekvaat kloriid	STJnrU97	< 0,5	Klopüraliid	STJnrU97	< 30
Kloridasoon	STJnrU97	< 0,3	Kloridasoon- desfenüül	STJnrU97	4,4
Klorofenvinfoss	STJnrU63a	< 5	Kloroksuroon	STJnrU97	< 0,4
Kloropüriifoss	STJnrU63a	< 5	Klorotoluroon	STJnrU97	< 0,6
Klotianidiin	STJnrU97	< 0,3	Krimidiin	STJnrU63a	< 10
Kvintoseen	STJnrU63a	< 5	ambda-Tsühalotriin	STJnrU63a	< 5
Linuroon	STJnrU97	< 0,3	Malatioon	STJnrU97	< 0,5
MCPA	STJnrU97	< 0,6	Mepikvaat kloriid	STJnrU97	< 0,2
Metabensτίαςuroon	STJnrU97	< 0,2	Metakriifoss	STJnrU63a	< 5
Metasakloor	STJnrU97	< 0,2	Metiokarb	STJnrU97	< 0,9
Metobromuroon	STJnrU97	< 0,3	Metoksükloor	STJnrU63a	< 1
Metoksuroon	STJnrU97	< 0,3	Metolakloor	STJnrU63a	< 5
Metribusiin	STJnrU63a	< 10	metüül-Kloropüriifoss	STJnrU63a	< 5
metüül-Pirimifoss	STJnrU63a	< 5	Mireks	STJnrU63a	< 5
Monolinuroon	STJnrU97	< 0,5	Napropamiid	STJnrU97	< 0,8
Nikosulfuroon	STJnrU97	< 0,2	o,p'-DDD	STJnrU63a	< 5
o,p'-DDE	STJnrU63a	< 5	o,p'-DDT	STJnrU63a	< 1
Oksüklordaan	STJnrU63a	< 5	Ometoaat	STJnrU97	< 1
p,p'-DDD	STJnrU63a	< 1	p,p'-DDE	STJnrU63a	1,4
p,p'-DDT	STJnrU63a	3,5	Permetriin	STJnrU63a	< 10
Pinoksadeen	STJnrU97	< 0,6	Prometriin	STJnrU63a	< 5
Propaam	STJnrU63a	< 10	Propakvisafop	STJnrU97	< 0,9
Propamokarb- hüdrokloriid	STJnrU97	< 0,3	Propasiin	STJnrU63a	< 5
Propikonasool	STJnrU63a	< 10	Protiokonasool-destio	STJnrU63a	< 10
Sebutüülasiin	STJnrU63a	< 5	Simasiin	STJnrU97	< 0,2
Spiroksamiin	STJnrU97	< 1	Tebukonasool	STJnrU97	< 0,3
Teflubensuroon	STJnrU97	< 0,9	Terbutriin	STJnrU97	< 0,5
Terbutüülasiin	STJnrU63a	< 5	Tiaklopriid	STJnrU97	< 0,4
Tiametoksaam	STJnrU97	< 0,3	Triadimenool	STJnrU97	< 0,2
Triallaat	STJnrU63a	< 10	Trifluraliin	STJnrU63a	< 5
Tritosulfuroon	STJnrU97	< 0,5	Tsüaanasiin	STJnrU63a	< 5
Tsübutriin	STJnrU97	< 0,5	Tsüflutriin	STJnrU63a	< 10
Tsüpermetriin (isomeeride segu)	STJnrU63a	< 10	Asitromütsiin	STJnrU97	< 0,7
Diklofenak	STJnrU97	< 0,7	Erütromütsiin	STJnrU97	< 0,7
Klaritromütsiin	STJnrU97	< 0,7			

Lisa 8. Raskemetallide sisaldus settes

Näitaja	Katsemeetod	Tulemus	Ühik
Arseen (As)	STJnrMU91A *	< 5	mg/kg KA
Kaadmium (Cd)	EVS-EN 16170	< 1	mg/kg KA
Kroom (Cr)	EVS-EN 16170	17	mg/kg KA
Nikkel (Ni)	EVS-EN 16170	8,2	mg/kg KA
Plii (Pb)	EVS-EN 16170	5,5	mg/kg KA
Tsink (Zn)	EVS-EN 16170	46	mg/kg KA
Vask (Cu)	EVS-EN 16170	7,3	mg/kg KA
Elavhõbe (Hg)	US EPA 7473	0,024	mg/kg KA

*akrediteerimata meetod

Lisa 9. Kvaliteedinõuded toidunisule

(Kvaliteeditingimused, 2023)

Kvaliteedinäitaja	I kat	II kat	III kat	IV kat	V kat
Proteiin %, minimaalne	14	13	12	11	10
Niiskus, %	11...14	11...14	11...14	11...14	11...14
Mahukaal kg/ha, minimaalne	77	76	75	74	73
Langemisarv sek, minimaalne	275	250	240	210	180
Kleepvalk %, minimaalne	28	26	24	22	20

Lisa 10. Kompleksväetise NPK koostis

(YaraMila, 2022).

N	21%	P	3,5%	P₂O₅	8.02%
NO₃	8,3%				
NH₄	12,3%	K	10%	K₂O	12%
Mg	1,2%	S	2,6%	SO₃	6,5%
B	0,02%				

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Lii Lopp,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose „Põllumajanduslikku hajukoormust vähendava avaveelise tehismärgala sette mõju mulla viljakusele ja teravilja kasvule“, mille juhendajad on Kuno Kasak ja Margit Kõiv-Vainik, reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Lii Lopp

26.05.2024