

**VILJAKASVIEN JUURISTON KUVANTAMISMENETELMÄN
KEHITTÄMINEN**



Ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö
Mustiala, Maaseutuelinkeinojen koulutusohjelma

kevät, 2020

Anniina Takkinen

Maaseutuelinkeinojen koulutusohjelma
Mustiala

Tekijä	Anniina Takkinen	Vuosi 2020
Työn nimi	Viljakasvien juuriston kuvantamismenetelmän kehittäminen	
Työn ohjaaja	Heikki Tapani Pietilä	

TIIVISTELMÄ

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli kehittää Boreal Kasvinjalostus Oy:n käyttöön sopiva viljakasvien juurten kuvantamiseen soveltuva menetelmä. Juuritutkimukselle ei ollut olemassa menetelmää, jolla tiedettiin saavutettavan luotettavia tuloksia. Opinnäytetyönä tutkittiin tapoja kasvattaa, valokuvata sekä mitata juuria.

Kasvatuskokeet toteutettiin idätyspaperilla. Kokeissa vertailtiin koemateriaalien käsiteltävyyttä ja koejärjestelyiden ajankäyttöä. Valokuvauksen osalta tutkittiin millaisilla kuvausasetuksilla sekä kameran asettelulla saavutetaan juurten mittauksen kannalta parhaat valokuvat. Juurten mittaukseen on olemassa kuvankäsittelyohjelmia, joilla voidaan mitata juuriston ominaisuuksia. Tämän opinnäytetyön puitteissa tutkittiin yhden ohjelmiston käyttöä.

Kuvantamiskokonaisuuden toimivuutta testattiin käytännössä neljällä BOR-kevätevehnälajikkeella sekä kahdella syysvehnälajikkeella. Kasvatusmenetelmällä saavutettiin tavoitteita vastaavia tuloksia. Lajikkeiden välillä voitiin nähdä eroja ja tulokset olivat vertailukelpoisia. Luotettavan lajikekuvauksen tuottaminen vaatii kuitenkin lisää kokeita.

Avainsanat juuristotutkimus, juuret, vehnä, kasvatusmenetelmät

Sivut 54 sivua, joista liitteitä 12 sivua

Degree Programme in Agricultural and Rural Industries
Mustiala

Author	Anniina Takkinen	Year 2020
Subject	Development of a phenotyping method for cereal root systems	
Supervisor	Heikki Tapani Pietilä	

ABSTRACT

The aim of this thesis was to develop a suitable method for phenotyping cereal root systems for the use of Boreal Plant Breeding Ltd. The company has not had a method for root phenotyping that was known to achieve reliable findings. As a research for the thesis, ways to grow, photograph and measure roots were studied.

Cultivation experiments were carried out on germinating paper. The experiments compared the manageability of the test materials and the time management of the experimental arrangement. As far as photographing is concerned, the experiments were to find out which shooting settings could be used to achieve the best pictures for root measurement. The camera positioning was also under research. There are many root phenotyping software that can be used to measure root system characteristics. The use of one software was studied for this thesis.

The functionality of the root phenotyping complex developed in this thesis was tested with four BOR spring wheat varieties and two winter wheat varieties. A cultivation method that corresponded with the aims of the research was achieved. Differences could be distinguished between the cultivars and the results were comparable. Reliable variety description would require more experiments.

Keywords root phenotyping, root system, wheat, cultivation methods

Pages 54 pages including appendices 12 pages

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	1
2	JUURISTO	2
2.1	Yleistä	2
2.2	Juuriston rakenne.....	3
2.2.1	Sirkkajuuri	3
2.2.2	Pääjuuri.....	3
2.2.3	Versojuuret	3
2.2.4	Rönsyjuuret	3
2.2.5	Juurikarvat	3
2.2.6	Ulkorakenne	4
2.2.7	Sisärakenne.....	6
2.3	Veden otto.....	6
2.4	Ravinteiden otto.....	7
3	VEHNÄN JUURISTO	9
4	JUURISTOTUTKIMUS.....	9
4.1	Kasvatusmenetelmät.....	10
4.1.1	Idätyspaperimenetelmä	10
4.1.2	Petrimaljamenetelmä	11
4.1.3	Ruukkumenetelmä	12
4.1.4	Minirhizotron.....	12
4.1.5	Rhizotron	13
4.1.6	Shovelomics.....	15
4.1.7	Trenching	16
4.1.8	Soil cores.....	17
4.2	Kuvankäsittelyohjelmat.....	17
5	KEVÄTVEHNÄAINEISTOJEN ESITTELY.....	18
5.1	Helmi	18
5.2	Leidi	18
5.3	Quarna.....	18
5.4	Jaarli.....	18
5.5	Urho.....	18
5.6	Bor14810	19
6	KEHITYSTYÖ	19
6.1	Sopivan menetelmän kehittäminen Boreal Kasvinjalostus Oy:n käyttöön.....	19
6.1.1	Kasvatusmenetelmä	19
6.1.2	Kuvaus.....	20
6.1.3	Kuvankäsittely	21
7	TULOKSET	21

7.1	Kuvantamismenetelmä	21
7.1.1	Kasvatusmenetelmä	21
7.1.2	Kuvaus.....	22
7.1.3	Kuvankäsittely	23
7.2	Koeaineiston tulokset.....	27
7.2.1	Itäminen.....	27
7.2.2	Pituuskasvu	27
7.2.3	Pinta-ala.....	29
7.2.4	Tilavuus.....	30
8	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	31
8.1	Kuvantamismenetelmä	31
8.2	Koeaineisto.....	33
	LÄHTEET	34

Liitteet

Liite 1	Helmi 31.1.2020
Liite 2	Leidi 31.1.2020
Liite 3	Quarna 31.1.2020
Liite 4	Jaarli 31.1.2020
Liite 5	Urho 31.1.2020
Liite 6	Bor14810 31.1.2020
Liite 7	Helmin pituuskasvu lajikemediaanina
Liite 8	Leidin pituuskasvu lajikemediaanina
Liite 9	Quarnan pituuskasvu lajikemediaanina
Liite 10	Jaarlin pituuskasvu lajikemediaanina
Liite 11	Urhon pituuskasvu lajikemediaanina
Liite 12	Bor14810 pituuskasvu lajikemediaanina
Liite 13	Helmin pinta-alan kehitys lajikekeskiarvona
Liite 14	Leidin pinta-alan kehitys lajikekeskiarvona
Liite 15	Quarnan pinta-alan kehitys lajikekeskiarvona
Liite 16	Jaarlin pinta-alan kehitys lajikekeskiarvona
Liite 17	Urhon pinta-alan kehitys lajikekeskiarvona
Liite 18	Bor14810 pinta-alan kehitys lajikekeskiarvona
Liite 19	Helmin tilavuuden kehitys lajikekeskiarvona
Liite 20	Leidin tilavuuden kehitys lajikekeskiarvona
Liite 21	Quarnan tilavuuden kehitys lajikekeskiarvona
Liite 22	Jaarlin tilavuuden kehitys lajikekeskiarvona
Liite 23	Urhon tilavuuden kehitys lajikekeskiarvona
Liite 24	Bor14810 tilavuuden kehitys lajikekeskiarvona

1 JOHDANTO

Juuristo on kasvin tärkein elin. Vaikka siitä ei saada satoa, on sen olemassaolo ja toiminta välttämätöntä kasvin sadonmuodostukselle. Kasvi ottaa veden ja ravinteet juuriston kautta, joita se tarvitsee aineenvaihduntaansa ja yhteyttämistuotteiden muodostamiseen. Juuret ankkuroivat kasvin maahan ja mahdollistavat vakaan kasvun. Juurissa kasvavat juurikarvat lisäävät juuriston pinta-alaa ja auttavat kasvia veden ja ravinteiden otossa. Jotkin kasvit voivat myös lisääntyä juuriston avulla, mutta viljelykasvimme lisääntyvät pääasiassa suvullisesti siemenistä.

Juurilla on tärkeä merkitys peltomaan hyvinvoinnille. Juuret kuivattavat ja murustavat maata sekä tuovat maahan orgaanista ainetta. Juuria ravintonaan käyttävät maaperän eläimet ja mikrobit vahvistavat maan rakennetta omalla toiminnallaan. Kasveilla, jotka kasvattavat tiheän ja syvän juuriston, on hyvä maanparannusvaikutus.

Eri kasvilajien juuristot eroavat toisistaan. Eroja tavataan myös lajiketasolla. Kaksisirkkaiset kasvit kasvattavat paksun pääjuuren, joka kasvaa suoraan alaspäin. Yksisirkkaisilla kasveilla sen sijaan pääjuuri surkastuu ja sen tilalle kasvaa tiheä hajajuuristo.

Juuristotutkimusta on tehty maailmalla jo kymmeniä vuosia. Juuriston rakenteen tutkimustapoja on kehitetty toisiaan tehokkaammiksi. Ilmastonmuutos on viime vuosina ajanut tutkijat ympäri maailmaa kehittämään kestävämpiä lajikkeita. Haluttuja ominaisuuksia uusiin vaihteleviin ympäristöoloihin ovat erityisesti kuivuudenkestävyys ja juuriston nopea kasvu. Ilmasto tulee muuttumaan kasvukausien välillä ja vain yhden kasvukaudenkin aikana voidaan kokea sään ääriolosuhteita. Tarvitsemme tulevaisuudessa viljelykasveja, jotka sopeutuvat kasvukautemme vaihteleviin kasvuoloihin.

Suomessa juuritutkimusta tehdään enenevässä määrin. Tutkijoita kiinnostaa erityisesti kasvien hiilen sidonta ja sen tehostaminen. Boreal Kasvinjalostus Oy on kiinnostunut juuritutkimuksesta erityisesti lajikkeiden kestävyden parantamisen osalta. Tällä hetkellä Boreal ei tee juuritutkimusta. Juurimorfologian tutkiminen vaatisi mittausmenetelmien ja mittausalustojen kehittämistä. Tässä tutkimuslaitokset ja yliopistot ovat vahvassa asemassa.

2 JUURISTO

2.1 Yleistä

Kasvien juuristot voidaan jaotella kuuluvaksi kahteen luokkaan; pääjuurisysteemiin tai versojuurisysteemiin. Pääjuurisysteemiin kuuluvan kasvin juuristo koostuu yhdestä pitkästä pääjuuresta ja siitä haarautuvista juurihaaroista. Pääjuuri syntyy siemenestä kehittyvästä alkeisjuuresta. Joillain kasveilla alkeisjuuri häviää jo varhaisen kehityksen aikana ja tilalle kasvaa runsas versojuuristo. Versojuurisysteemissä ohuet ja tasapaksut juuret haaroituvat pääjuurta niukemmin. Kasvin maanpäällisistä sekä täysikasvuisista osista kasvavat jälkijuuret ovat osa versojuuristoa. (Terävä & Kärner, 2008, s. 61-62)

Juurten päätehtävät ovat ottaa maasta vettä ja ravinteita kasvia varten, kiinnittää kasvi maahan sekä varastoida ravinteita. Juuristo varastoi myös ylimääräisiä ravintoaineita tulevaa kasvua varten. Juuret tuottavat kasvihormoneja ja kasvunsäätöitä ja ovat yhteistyössä maan mikrobien kanssa. Osa kasveista myös lisääntyy ja levittäytyy uusille kasvualueille juurten avulla. (Mylly, Gustafsson, Koppelmäki, Känkänen, Palojärvi & Alakukku, 2014, s. 3)

Juuret parantavat maan rakennetta tekemällä maahan reikiä, kuivattamalla maata ja tuomalla maahan eloperäistä ainesta. Juurten erittämä lima vahvistaa juurikäytävien seinämiä. Juurten muodostamat maahuokokset parantavat kumpaakin tärkeintä maan rakenneominaisuutta, reikäisyyttä sekä kestävyyttä, ja ovat siksi ratkaisevan tärkeitä maan rakenteelle. (Mylly ym., 2014, s. 4)

Juuret pyrkivät kasvamaan maassa vieden mahdollisimman vähän energiaa. Ne pyrkivät kasvamaan helpointa reittiä suoraan alaspäin. Hyväraakenteisessa maassa juuret pääsevät kasvamaan huokostilassa maahiukkasten ja murujen välissä, halkeamissa, lierokäytävissä ja juurikanavissa. (Mylly ym., 2014, s. 8)

Juuret tunkeutuvat maahan juuren kasvupaineen avulla. Juurikarvat, jotka kasvavat juuren kärjessä, kiinnittävät juuren maahan, jolloin kasvupaine voi kohdistua juuren kärjessä olevaan kasvupisteeseen. Juuren kasvupaine voi olla juuren poikkisuunnassa 0,5–0,9 megapascalialla (5–9 bar) ja pituussuunnassa yli 2 megapascalialla (20 bar). Juuren halkaisijan kasvaessa kasvupaine nousee jyrkästi, siksi paksummat juuret pystyvät tunkeutumaan tiiviimpään maahan. Viljojen juuret ovat tyypillisesti 0,2–0,4 mm paksuja. (Mylly ym., 2014, s. 8)

2.2 Juuriston rakenne

2.2.1 Sirkkajuuri

Alkeisjuuri on ensimmäinen juuri, joka työntyy ulos itävästä siemenestä. Alkeisjuuri kehittyy joko pääjuureksi tai se häviää yksilön aikaisessa kehitysvaiheessa, jolloin juuristo muodostuu hajajuurista. (Salonen, 2006, s. 9)

2.2.2 Pääjuuri

Pääjuuri kehittyy alkeisjuuresta ja se kasvaa suoraan alaspäin. Pääjuureen kehittyy tavallisesti runsaasti sivulle suuntautuneita juurihaaroja, sivujuuria. (Salonen, 2006, s. 9) Suoraan alaspäin kasvavaa, vahvaa pääjuurta kutsutaan paalujuureksi. (Myllys, Gustafsson, Koppelmäki, Känkänen, Palojärvi & Alakukku, 2014, s. 12) Pääjuuret tukevat kasvin maahan, kontrolloivat kasvusyvyyttä ja parantavat kasvin kykyä kasvaa tiivistyneellä maalla. (Wasaya, Zhang, Fang & Yan, 2018, s. 3)

2.2.3 Versojuuret

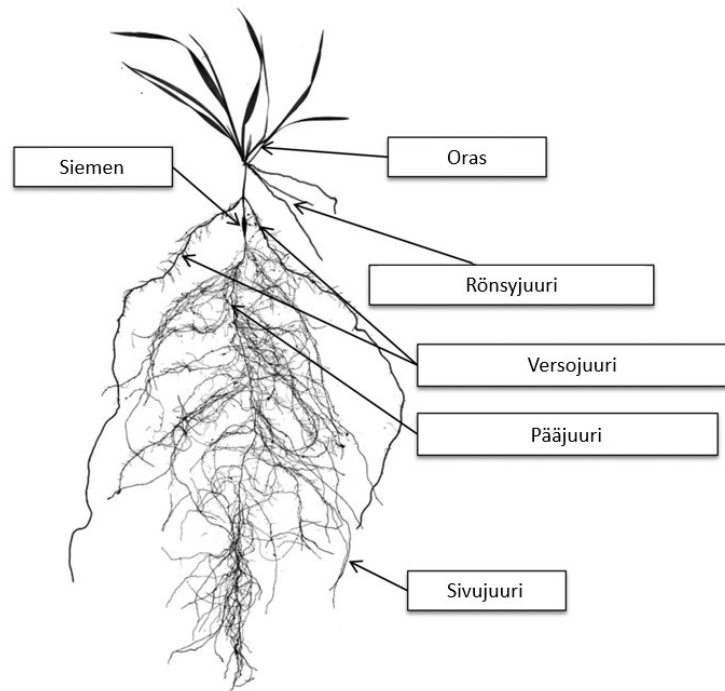
Versojuuret syntyvät kasvin varresta. Ne ovat tasapaksumpia, haaroittuvat vähemmän ja ovat lyhytikäisempiä kuin pääjuuret. Versojuuret kasvavat viistoon alaspäin. (Pankakoski, 2003, s. 39) Versojuuret ottavat maasta vettä ja ravinteita. (Wasaya ym., 2018, s. 3)

2.2.4 Rönsyjuuret

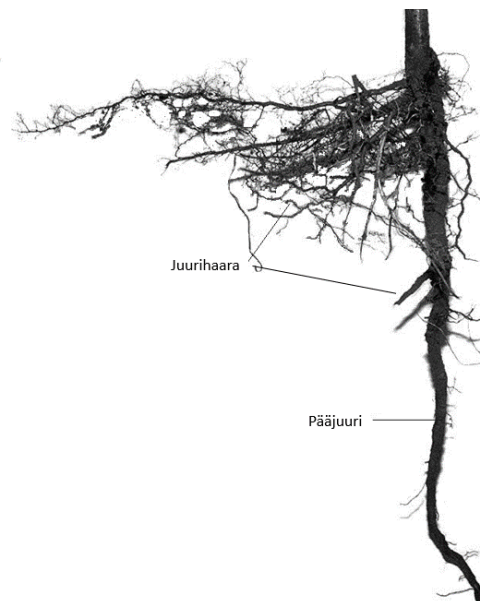
Rönsyjuuret ovat versojuuria, jotka muodostuvat kasvin maanpäällisiin varsiin, yleensä varren nivelkohtiin. Ne voivat kasvaa osittain maanpinnalla. Rönsyjuuret syntyvät tavallisesti johtojänteiden välisissä ydinsäteisissä varren pinnan alla olevasta solukosta. (Salonen, 2006, s.9)

2.2.5 Juurikarvat

Juurikarvat ovat juuren päällysketon soluista ulostyöntymiä pullistumia. Ne kasvavat karvavyöhykkeessä juuren kärjessä, jossa pituuskasvu on päättynyt. Juurikarvat avustavat juuria veden ja ravinteiden otossa ulompaa ja moninkertaisesti laajentuneen pinnan kautta. (Pankakoski, 2003, s. 40)



Kuva 1. Versojuuristo (Plantphysiology, 2015).



Kuva 2. Pääjuuristo (Pinterest n.d.).

2.2.6 Ulkorakenne

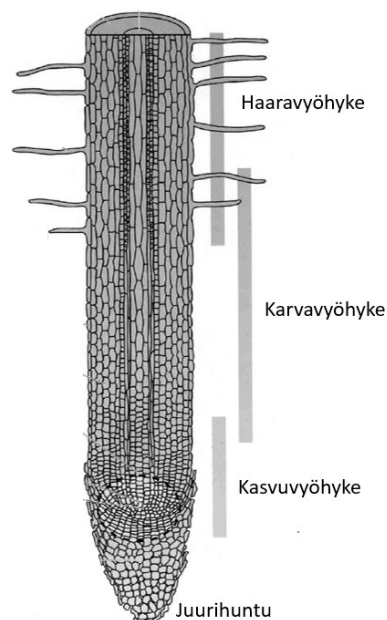
Juuren ulkorakenne muodostuu hunnusta sekä kasvu-, karva- ja haara-
vyöhykkeestä, jotka erottuvat juuren kärjessä. (Pankakoski, 2003, s. 39)

Huntu suojaa juuren kasvupistettä. Se on muutaman solukerroksen vahvuinen tuppi elävää solukkoa. Hunnun solut erittävät limaa, joka tekee juuren kärjen tahmaiseksi ja näin auttaa juurta tunkeutumaan helpommin maahan. Hunnun keskustassa sijaitsevat solut aistivat painovoiman ärsytyksen, joka ohjaa juuren kasvusuuntaa alaspäin. (Terävä & Kanervo, 2008, s. 64)

Hunnun sisällä sijaitsee kasvuyöhyke, jonka kärjessä on kasvupiste. Kasvupisteessä tapahtuu suurin osa juuren solunjakautumisesta. Juuri kasvaa pituussuunnassa nuorten solujen laajetessa. Solujen pituuskasvu on moninkertaista leveyskasvuun verrattuna. Solujen kasvaessa pituutta kasvusolukko työntyy eteenpäin. Kasvupisteessä syntyy myös uusia soluja. (Terävä & Kanervo, 2008, s. 64-65)

Kauempana juuren kärjestä sijaitsevalla karvavyöhykkeellä ei enää tapahdu pituuskasvua. Juurikarvat syntyvät karvavyöhykkeen päällysketon soluista. Päällysketon ulkoseinä on ohut ja läpäisevä, eikä sillä ole pintakelmua. (Pankakoski, 2003, s. 40)

Haaravyöhyke sijaitsee juuren kärjestä katsottuna uloimpana ja se kattaa suurimman osan juuresta. Juurikarvat kuolevat haaravyöhykkeellä juuren kasvaessa. (Terävä & Kanervo, 2008, s. 66) Päällysketon alainen solukerrokorkkiutuu ja alkaa kasvattaa haaroja. Kuten pääjuuri, myös sen haarat voidaan luokitella kasvu-, karva- ja haaravyöhykkeisiin. (Pankakoski, 2003, s. 40)



Kuva 3. Juuren ulkorakenne (ResearchGate, 2017).

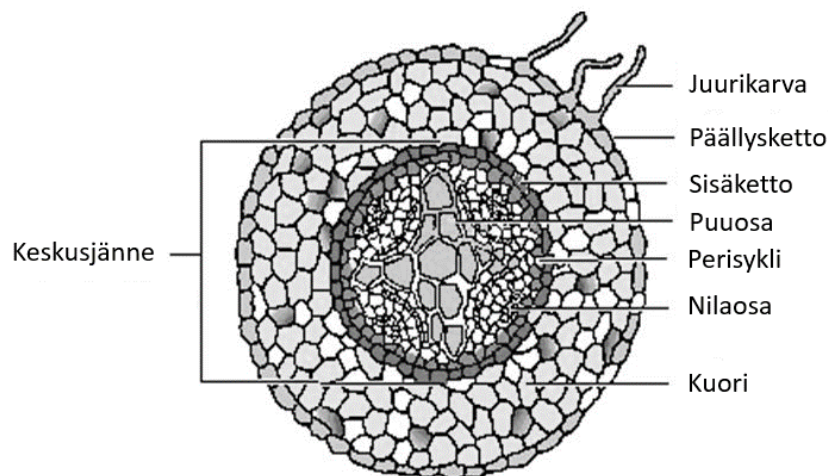
2.2.7 Sisärakenne

Juuren sisärakenteen muodostavat päällysketto, kuori ja keskusjänne. Sisärakenteen solukot muodostuvat kasvuvyöhykkeessä ja ovat erotettavissa karvavyöhykkeessä.

Päällysketto eli epidermi on yksikerroksinen, lyhytikäinen solukko, joka suojaa juuren pintaa. Epidermi muodostaa juurikarvoja, jotka edistävät juuren veden ja ravinteiden ottoa. (Terävä & Kanervo, 2008, s. 66)

Kuori siirtää vettä ja ravinteita pintasoluista kuoritylppysolujen kautta keskusjätteeseen ja toimii yhteyttämistuotteiden varastona. Kuoritylpyssä on runsaasti suuria soluvälejä, jotka johtavat hengitysilmaa juuren pinta- ja kärkiosiin kasvua ja ravinteiden ottoa varten sekä vettä ja siihen liuenneita ravinteita juuren keskuslieriöön. (Pankakoski, 2003, s. 41)

Keskusjänne on juuren ainoa johtojänne. Vesi ja ravinteet kulkeutuvat juuren keskusjätteen kautta verson johtojänteisiin. Keskusjänne rakentuu puu- ja nilasolukoista, joiden välissä on elävää perussolukkoa. Jälsi kehitty puu- ja nilasolukoiden väliseen perussolukkoon, joka saa aikaan juuren paksuuskasvun. (Pankakoski, 2003, s. 43)



Kuva 4. Juuren sisärakenne (Keuda, 2016).

2.3 Veden otto

Viljakasvit ottavat vettä lähes yksinomaan juurillaan maasta. Kasvi ottaa vettä ensisijaisesti juurten nuorten kärkiosien kautta. Juurten kärkiosassa on laajin vettä ottava pinta juurikarvojen ansiosta. Juurten vanhempien osien vedenottokyky heikkenee juurikarvojen kuollessa. (Pankakoski, 2003, s. 73)

Vesi kulkeutuu kasvin juuriin osmoosin avulla juurikarvasolujen kautta. Osmoosi on diffuusion muoto, jossa nesteen väkyyserot pyrkivät tasoittumaan. Vesi kulkee laimeammasta liuoksesta valikoivasti läpäisevän kalvon läpi väkevämpään. Kasvin solunesteessä on usein enemmän liuenneita aineita kuin maaperän vedessä. Koska kasvin soluneste on maanestettä väkevämpää, vesi siirtyy soluun. (Ruokatieto, n.d.)

Kasvi ei käytä vedenottotapahtumassa energiaa, koska veden otto maasta tapahtuu osmoosin avulla. Juuriston vedenottokunnossa pysyminen sen sijaan vaatii energiaa. Kasvi käyttää energiaa pelkästään kasvisolujen elossa pitämiseen. Solukelmuja on pidettävä puoliläpäisevinä, jotta osmoottinen imu voi syntyä. Juuriston kärkiosien kasvu vaatii runsaiten energiaa. Veden oton kannalta kärkiosien kasvu on välttämätöntä uusien juurikarvojen syntymisen takia, sillä ne vanhenevat nopeasti toimintakyvyttömiksi. (Pankkoski, 2003, s. 73)

Kasvit tarvitsevat vettä yhteyttämiseen, ravintoaineiden kuljettamiseen ja elintoimintojen sekä nestejännityksen ylläpitämiseen. Kasvit ottavat vettä tehokkaimmin voimakkaimman kasvun aikaan. Viljelykasveilla niin sanottujen kriittisten kausien aikaan veden puute on erittäin haitallista. Kevätviljoilla kyseinen aika on tähkäaiheiden muodostuessa kesäkuun puolen välin tienoilla. (Ruokatieto, n.d.)

Kasvin veden saannin edellytyksenä on, että juuret kasvavat nopeasti veden luo. (Ruokatieto, n.d.) Kasvi ottaa maasta vettä 300-900 litraa tuottaamaansa kuiva-ainekiloa kohti. Osa kasvin ottamasta vedestä sitoutuu kasvimassaan, mutta 95 – 98% haihtuu lehtien ilmarakojen kautta ilmaan. Yhteyttämiseen kuluu kasvin ottamasta vedestä vain noin prosentti. (Alakukku, Mikkola, Nuutinen, Palojärvi, Peltomaa, Peltonen, Pietola, Pitkänen & Rajala, 2002, s. 19)

2.4 Ravinteiden otto

Kasvien maasta ottamat ravinteet ovat maaperässä joko liuenneena maanesteeseen tai sitoutuneena maahiukkasten pinnoille tai maan orgaaniseen ainekseen. (Salonen, 2006, s. 47) Kasvit ottavat ravinteet kemiallisina ioneina ensi sijassa juurikarvojen ja juurien pintasolujen kautta. Ne pystyvät ottamaan ravinteita vähäisessä määrin myös lehtien kautta. (Pankkoski, 2006, s. 83)

Kasvi valikoi tarvitsemansa ravinteet maanesteen ravinnepitoisuuksista riippumatta. Ne otetaan pääasiassa sähköisesti varautuneina ioneina. Kun juuret ottavat ioneja maanesteestä, maanesteen ionivajaus korvautuu maahiukkasiasta irtautuvilla ioneilla. Lisäksi juurten soluhengityksessä maahan vapautuva hiilidioksidi muuttuu vedessä osittain hiilihapoksi ja edelleen vety- ja bikarbonaatti-ioneiksi. Nämä ionit vaihtuvat edelleen maanesteestä otettaviin ioneihin. Vetyionit syrjäyttävät maahiukkasiin

sitoutuneita kationeja ja vapauttavat niitä maanesteeseen juurten saataville. Juurikarvojen kiinnikasvu maahiukkasiin tehostaa ionien vaihtoa. (Pankakoski, 2003, s. 83-84)

Ionit pääsevät juurten soluseiniin esteettömästi diffuusion avulla. Kulkeutuminen tapahtuu sitä mukaa kuin ioneille tulee soluseinässä tilaa entisten siirtyessä solulimaan, jossa varsinainen ionien otto tapahtuu. Ravinteiden oton tehoon vaikuttavat maan lämpötila ja happamuus sekä juurten happensaanti ja yhteyttämistuotteiden saanti juuristoon. (Pankakoski, 2003, s. 84) Ionit liikkuvat maassa juuria kohti myös veden mukana massavirtauksena. Se perustuu kasvien veden haihduttamisesta aiheutuvaan maaveden absorboitumiseen juuriin. Kasvit synnyttävät eräänlaisen imun, joka saa veden liikkumaan juuria kohti. (Salonen, 2006, s. 47)

Kaikki ionit eivät ole maassa kasveille helpokäyttöisessä muodossa. Maan kationinvaihtokapasiteetti vaikuttaa ravinteiden käyttökelpoisuuteen kasveille. Kationinvaihtokapasiteetti tarkoittaa maan kykyä pidättää positiivisesti varautuneita ioneja maa-ainesten pinnoille. Maalaji, maan orgaanisen aineksen määrä, maan savimineraalien pitoisuus ja pH vaikuttavat maan kationinvaihtokapasiteettiin. Maan viljavuus riippuu maaperän kationinvaihtokapasiteettikyvystä. Riittävä kationinvaihtokapasiteettikyky vaihtelee maalajien välillä. Hyvän viljavuuden saavuttamiseksi hietamailla kationinvaihtokapasiteetin tulisi olla 15 cmol/l, savimailla arvo on 20 cmol/l. Ravinnesuhteiden osalta kalsiumin osuus kationinvaihtokapasiteetistä tulisi olla 60-75%, magnesiumin 10-20%, kaliumin 2-4% ja natriumin 0-2%. (Alakukku ym., 2017, s. 18)

Ravinteet ovat välttämättömiä kasvin kasvulle ja elintoimintojen ylläpitämiselle. Kasvien makroravinteita ovat hiili, happi, vety, typpi, fosfori, kalium, kalsium, rikki ja magnesium. Hivenravinteita ovat rauta, mangaani, sinkki, kupari, molybdeeni, boori ja kloori. Kasvit tarvitsevat makroravinteita yli 10 kg/ha/a ja hivenravinteita 0,1-1 kg/ha/a. (Alakukku, Jaakkola, Kari, Kleemola, Mäntylähti, Partanen, Peltonen, Puustinen, Savela, Sipiläinen, Tauriainen & Yli-Halla, 2009, s.9) Ravinteiden tarve eroaa jonkin verran kasvilajien välillä ja niiden puutoksesta aiheutuu häiriöitä kasvin kasvuun. (Ruokatieto, n.d.)

3 VEHNÄN JUURISTO

Vehnällä on hajajuuristo, jossa on yleensä kolme pääjuurta, jotka kasvavat suoraan alaspäin. Myöhemmät juuret kasvavat ensin laajemmalle ja suuntautuvat sitten alaspäin. Tiheä haarautuminen ja juurten kasvu lähes juuriston maksimisyvyyteen ovat tyypillistä vehnän juuristolle. Juuret ovat melko ohuita. (Myllys, Gustafsson, Koppelmäki, Känkänen, Palojärvi & Alakukku, 2014, s. 25) Vehnän juuristo laajenee kukintaan saakka. Kukinnan jälkeen juurten kasvu hidastuu tai loppuu kokonaan riippuen veden ja ravinteiden saatavuudesta. (Akman, 2011, s. 109) Kuivissa kasvuoloissa juuristoon kehittyy runsaasti juurikarvoja, jotta kasvi pystyy hyödyntämään tehokkaammin maahuokosten sitomaa vettä. (Myllys ym., 2014, s. 25)

Syysvehnällä on kevätvehnää syvemmälle ulottuva juuristo pidemmän kasvuajan vuoksi. Syysvehnä kasvattaa kylvösyksynä nimenomaan juuristoa. Juuristo on voinut saavuttaa 2/3 lopullisesta syvyydestään kasvukauden päättyessä, vaikka oraan korkeus olisi alle 10 cm. (Myllys ym., 2014, s. 25)

ELY:n vuonna 2014 julkaisemassa tutkimuksessa kerrotaan kevätvehnän kasvattaneen savimaalla 40 cm syvyyteen ulottuvan juuriston. Pääjuurten kerrotaan kasvaneen ylimmässä 15 cm syvyyteen hyvän mururakenteen vuoksi. Syysvehnän kasvutapa jäljitteli kevätvehnän kasvutapaa, mutta ulottui vain 35 cm syvyyteen maan tiivistymän takia.

Akmanin kirjoittamassa artikkelissa, 2011, esitetään, että kevätvehnän juuristo levittäytyy horisontaalisesti 30 – 60 cm ja kasvaa 100 cm syvyyteen. Syysvehnän juuristo voi ulottua jopa 220 cm syvyyteen.

Vehnän orailla, jotka kasvattavat useita vertikaalisesti kasvavia pääjuuria, juuristo kehittyy tiheämmäksi ja syvemmäksi. (Wasaya ym., 2018, s. 2-3) Nakamoto ja Oyanagi (1994) esittivät, että vehnän genotyypeillä, joilla on syvempi juuristo, alkiojuuret kasvavat kapeammassa kulmassa. Oyanagi (1994) esitti, että vehnän lajikkeilla, joilla on parempi kuivuuden kestävyys, alkiojuuret kasvavat kapeammassa kulmassa ja kasvattavat syvemmän juuriston. Kosteammassa olosuhteissa pärjäävät lajikkeet osoittivat kasvatavansa pinnallisemmat ja horisontaalisemmin kasvavat juuret. (M. Manschadi, Christopher, deVoil & L. Hammer, 2006, s. 832)

4 JUURISTOTUTKIMUS

Juurten havainnointi ja fenotyyppien määrittäminen ovat tärkeä ja olennainen osa kasvitutkimusta. Juuria koskevaa tutkimustietoa tarvitaan ymmärtämään kasvien kasvuprosesseja ja selviytymisstrategioita. Juuristotutkimuksella voidaan selvittää kasveille ominaisia kasvuilmiöitä sekä ympäristöolojen ja niiden vaihteluiden vaikutusta kasvien kehitykseen.

Käytettävissä olevia juuritutkimusmenetelmiä on runsaasti eri olosuhteissa toteutettaviksi. Laboratoriossa voidaan lyhyellä aikataululla seurata juurten alkukehitystä, kun taas täysikasvuisen juuriston tutkiminen vaatii pitkäjänteistä työskentelyä pellolla. Juurten tutkimiseen on kehitetty myös useita menetelmiä, joilla juuriston kehitystä voidaan seurata kasvihuoneessa pelto-oloja jäljittelevissä olosuhteissa.

4.1 Kasvatusmenetelmät

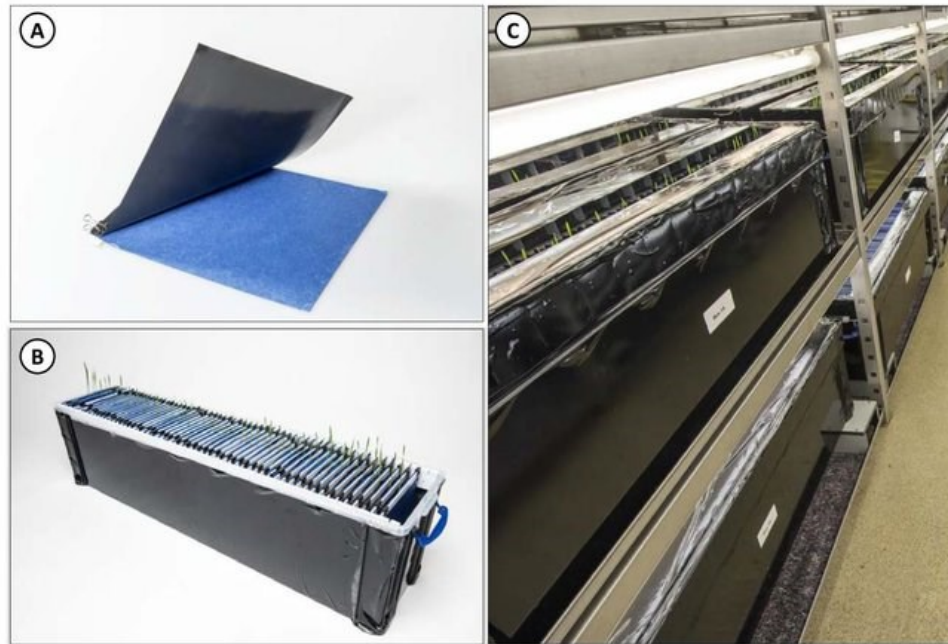
4.1.1 Idätyspaperimenetelmä

Idätyspapereita käytetään yleisesti itävyysprosentin laskemisessa. Perinteisesti itävyysprosentti lasketaan idättämällä 100 siementä kahden kostutetun idätyspaperin välissä. Siemenet asetetaan sopivin välimatkoin toisiinsa ja paperit kääritään rullaksi. Siemeniä idätetään kylmässä seitsemän päivää, jonka jälkeen ne nostetaan huoneenlämpöön ja kasvatusta jatketaan vielä kolme päivää. Itävyysprosentti saadaan jakamalla itäneiden siementen määrä siementen kokonaismäärällä ja kertomalla tulos sadalla. (Boreal, 2020)



Kuva 5. Itävyysprosentin laskeminen (Takkinen, 2020).

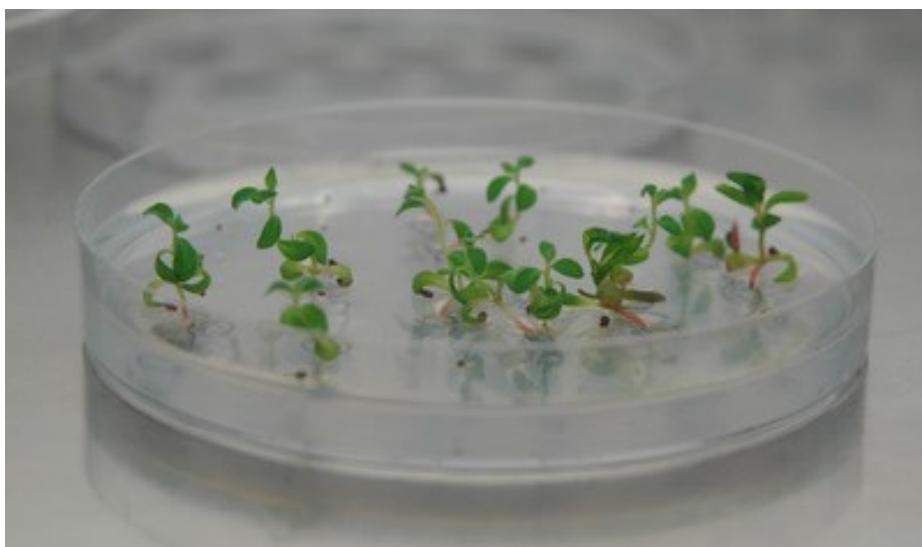
Tutkimustyössä idätyspapereita käytetään kasvualustana kasvatettaessa tutkimusaineistoja erilaisissa kasvatusalustoissa. Kasvatusalustoissa lämpötila ja kastelu on säädetty haluttuihin olosuhteisiin. Idätyspaperi voidaan asettaa myös suoraan skannerin päälle, joka tunnistaa ja piirtää juuren digitaaliseen muotoon. (O. Adu, Chatot, Wiesel & Dupuy, 2014)



Kuva 6. Kasvatus idätyspaperilla. (A) Idätyspaperi ja valolta suojaava peite, (B) kasvatusallas, (C) kasvatusaltaat hallittavissa olosuhteissa (ResearchGate, 2019).

4.1.2 Petrimaljamenetelmä

Siemenet kasvatetaan petrimaljassa yleisesti agar-kasvualustalla ravinneliuoksessa. Agar-jauhe liuotetaan ravinneliuokseen ja autoklavioidaan 121°C:ssa. Agar annostellaan petrimaljalle ja jäähtyessään alle 45°C, liuos jähmettyy. Siemenet kylvetään jähmettyneen liuoksen pinnalle. (Boreal, 2020)



Kuva 7. Agar -kasvualusta petrimaljalla (Acadia University 2017).

4.1.3 Ruukkumenetelmä

Siemenet kylvetään läpinäkyviin muoviruukkuihin 2 cm syvyyteen 2,5 cm etäisyydelle toisistaan. (Kuva 1.) Siemen asetetaan kasvualustaan alkio alaspäin ruukun seinää vasten juurten kasvun havainnoinnin helpottamiseksi. Läpinäkyvät ruukut peitetään valolta ja kastellaan kylvön yhteydessä. Kasvatuskokeen luonne määrittää kasvuajan kastelutarpeen. (Richard, Hickey, Fletcher, Jennings, Chenu & Christopher, 2015)

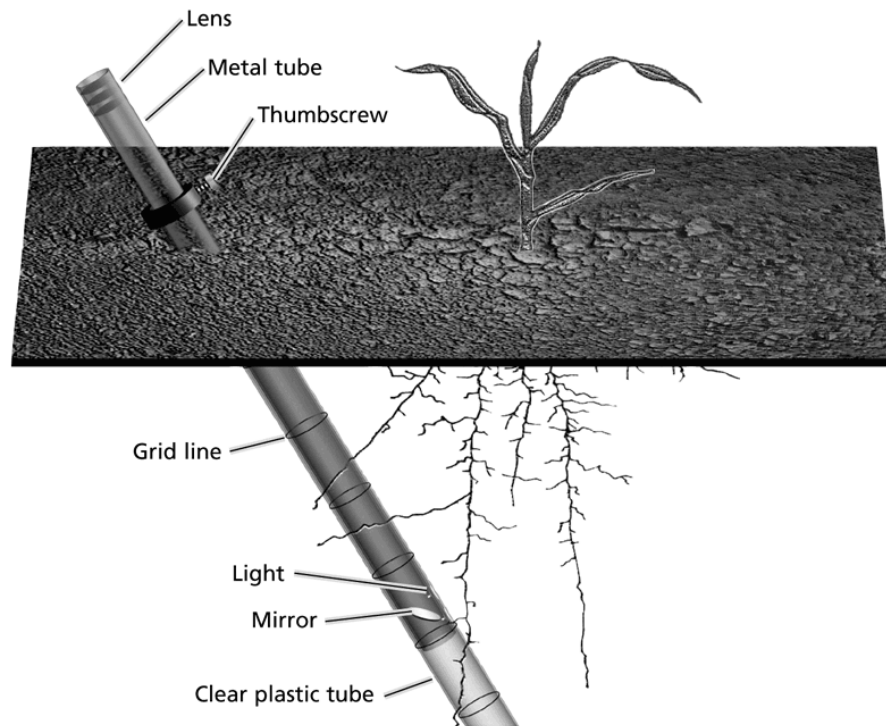
Mullalla täytetyt ruukut tarjoavat mahdollisuuden havaita juuria jossain määrin viljelyolosuhteita muistuttavissa olosuhteissa. Juurista voidaan mitata niiden pituutta, massaa, tiheyttä sekä kasvusyvyyttä. Tulosten saaminen vaatii kuitenkin juurten pesemistä mullasta, joka saattaa katkoa juuria ja näin ollen vääristää tuloksia. (Chen, Rengel & Đalović, 2015)



Kuva 8. Ruukkumenetelmä. Siemenet numeroitu havainnoinnin helpottamiseksi (Mill 2015).

4.1.4 Minirhizotron

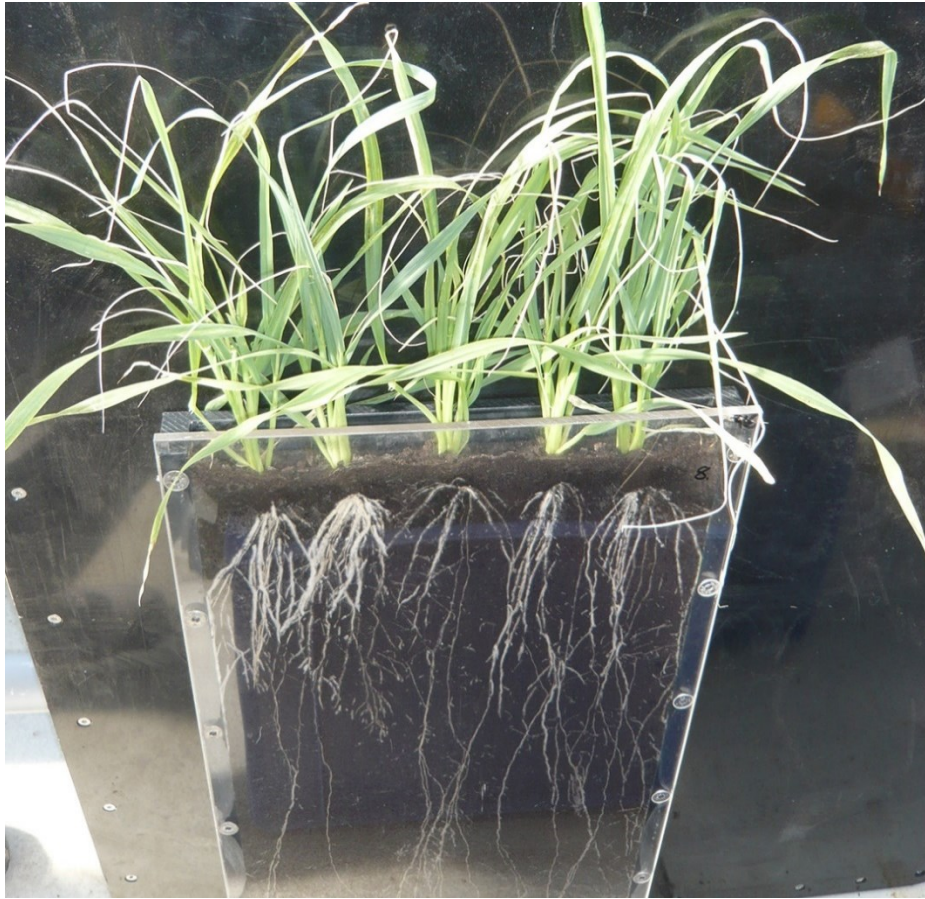
Minirhizotronit ovat läpinäkyviä muovi- tai lasiputkia, jotka on upotettu maahan noin 45° kulmassa tarkkailtavan kasvin läheisyyteen. (Kuva 3.) Putkeen asennetaan laite, jolla juuria voidaan havainnoida, esimerkiksi kamera tai suurennuslasi. Kamera voidaan asentaa putken maanpäälliseen päähän ja ottaa kuvia putken sisällä olevaa suurennuslasia hyödyntäen tai liikuttamalla kameraa putken sisällä ja ottamalla kuvia lasin läpi. Menetelmän avulla voidaan tutkia juurten tiheyttä ja kasvua. (Taiz, Zeiger, Møller & Murphy, 2015)



Kuva 9. Minirhizotron-menetelmä (Plant Physiology and Development 2015).

4.1.5 Rhizotron

Rhizotron on läpinäkyvä muovi- tai lasikammio, jonka seinämät mahdollistavat juurten kasvun tarkkailun lasin pinnalla. Kammio voi olla muodoltaan kapea suorakulmio (Kuva 9.) tai lieriö (Kuva 11.), joka täytetään halutulla maalajilla. Kasvi kylvetään kammion yläosaan lähelle seinämää, jotta juuret kasvaisivat näkyviin seinämän sisäpinnalle. Menetelmällä voidaan havainnoida juurten kasvua, pituutta, kokoa ja jakautumista. (Taiz ym., 2015; Nagel, Herrera, Jahnke & Schurr, 2013, s. 9) Rhizotronit rajoittavat vahvasti juurten kasvua vain kahteen suuntaan ja niiden juurtumistilavuus on hyvin pieni. (Chen, Rengel & Đalović, 2015)



Kuva 10. Rhizotron suorakulmaisessa kammiossa (Jülich 2013).



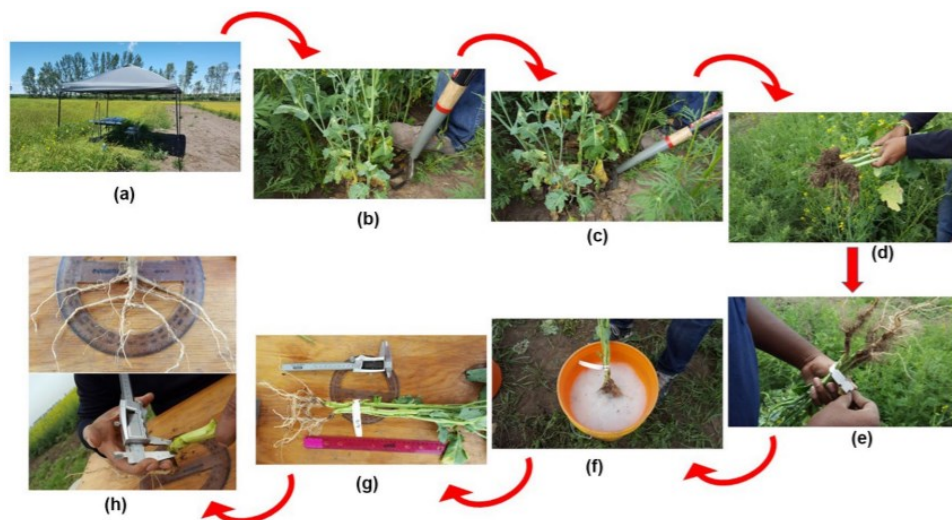
Kuva 11. Koneellinen Rhizotron -laitteisto. (Jülich 2012.)



Kuva 12. Rhizotube-kasvatusalusta, jossa kasvualustan ja lasin välissä on kalvo. Siemen kylvetään kalvon ja lasin väliin. (Institut Carnot Plant2Pro n.d.)

4.1.6 Shovelomics

Shovelomics-menetelmässä maata poistetaan kasvin ympäriltä pyrkien säilyttämään kaikki juuret ehjinä. Juuret erotellaan ympäröivästä maasta pesemällä ne varovasti vedellä. Juuriston rakennetta ja ominaisuuksia voidaan määrittää yksinkertaisesti juuria laskemalla ja mittaamalla tai kuvankäsittelyohjelman avulla. (Wasaya ym., 2018, s. 5)



Kuva 13. Shovelomics -menetelmä. (a) Työpiste pellolla, (b) edustavien yksilöiden valinta, (c) kaivaminen, (d) ylimääräisen maan poisto, (e) merkintä, (f) pesu, (g) työkalut, (h) mittaus (ResearchGate n.d.).

4.1.7 Trenching

Trenching-menetelmässä kasvit kasvavat pelto-olosuhteissa. Juuret kaivetaan esiin poistamalla ensin maata kasvin sivuilta. Juuristo harjataan varovasti esiin ja juurten rakenne taltioidaan. (Wasaya ym., 2018, s. 5)



Kuva 14. Trenching-menetelmä (ELY 2014).

4.1.8 Soil cores

Soil cores -menetelmää käytetään, kun halutaan selvittää juuriston saavuttama maksimisyvyys. Juurten syvyyttä mitataan erilaisia kairoja käyttämällä. Kairatuista näytteistä erotetaan juuret, joiden perusteella arvioidaan juuriston syvyys. (Wasaya ym., 2018, s. 5)



Kuva 15. Kairausmenetelmä. (Niziolomski 2018)

4.2 Kuvankäsittelyohjelmat

Juurten kuvantamismenetelmissä yhdistyvät tyypillisesti kuvaus ja kuvienkäsittely. Kuvankäsittelyohjelmat ovat luotettava ja nopea tapa tuottaa tuloksia kuvantamisprosessissa. Erilaisia kuvankäsittelyohjelmistoja juurille ovat esimerkiksi EZ-Rhizo, WinRhizo, Root Nav, SmartRoot, IJ_Rhizo, ImageJ ja Root Trace. Käytettävissä olevia kuvankäsittelyohjelmia on olemassa yli 30. (Wasaya ym., 2018, s. 4)

Kuvankäsittelyohjelmilla juuristosta voidaan mitata eri ominaisuuksia. Juurten pituuden lisäksi juuristosta mitattavia piirteitä ovat mm. juurten pinta-ala, tilavuus, sijainti, kasvukulma, haaroittuminen ja väri. Näiden pohjalta voidaan määrittää juuriston muotoa ja suuntautumista. Ohjelmistosta riippuen ominaisuuksia voidaan määrittää automaattisesti tai manuaalisesti. Juuria voidaan mallintaa sekä kaksi- että kolmiulotteisina kuvina. (Chen, Rengel & Đalović, 2015)

5 KEVÄTVEHNÄAINEISTOJEN ESITTELY

Kokeeseen valikoitui käytettäväksi neljä kevätnälajiketta ja kaksi syysvehnälajiketta. Kaikki lajikkeet ovat Boreal Kasvinjalostus Oy:n kehittämiä.

5.1 Helmi

Helmi on erittäin aikainen ja satoisa kevätnälajike. Helmen kasvuaika on 99 vuorokautta ja keskisato on 5721 kg/ha. Helmi on lyhyt- ja lujakortinen vehnälajike, jonka lakoprosentti on 6. Helmi menestyy hyvin erilaisissa olosuhteissa kaikilla maalajeilla. Kasvatuskokeessa käytetty siemenerä on vuodelta 2018. (Boreal n.d.)

5.2 Leidi

Leidi on myöhäinen, huippusatoisa kevätnälajike. Se on korsiominaisuuksiltaan lyhytkortinen lajike, jolla on hyvä laonkestävyys. Leidiä suositellaan viljeltäväksi I-vyöhykkeellä erityisesti savimailla. Sadon huippulukemiin pääsy edellyttää viljelylohkon hyvää kasvukuntoa. Kasvatuskokeessa käytetty siemenerä on vuodelta 2018. (Boreal n.d.)

5.3 Quarna

Quarna on satoisa laatuvehnä. Kasvuaika Quarnalla on 103 vuorokautta ja sen keskisato on 5735 kg/ha. Quarna on lyhytkortinen ja laonkestävä kevätnälajike. Quarnan kuivuudenkestävyys on lyhyen korren takia huono, joten sitä ei suositella viljeltäväksi poutivilla mailla. Kasvatuskokeessa käytetty siemenerä on vuodelta 2017. (Boreal n.d.)

5.4 Jaarli

Jaarli on laatuominaisuuksiltaan erinomainen kevätnälajike. Jaarlin sätotaso on 5570 kg/ha luokkaa ja kasvuaika noin 101 vuorokautta. Jaarlia suositellaan viljeltäväksi vyöhykkeillä I, II ja III. Kasvatuskokeessa käytetty siemenerä on vuodelta 2018. (Boreal n.d.)

5.5 Urho

Urho on aikainen ja viljelyvarma syysvehnä. Se on hyvin pakkasen ja lumihomeen kestävä. Urhon kasvuaika on 333 vuorokautta ja sen sätotaso on 5653 kg/ha. Urho on korreltaan keskipitkä ja lakoutuu vähän. Urhoa suositellaan viljelyvyöhykkeille I ja II. Kasvatuskokeessa käytetty siemenerä on vuodelta 2018. (Boreal n.d.)

5.6 Bor14810

Bor14810 on Borealin jalostusohjelman linjanumero. Kasvatuskokeessa käytetty siemenerä on vuodelta 2018. (Boreal n.d.)

6 KEHITYSTYÖ

6.1 Sopivan menetelmän kehittäminen Boreal Kasvinjalostus Oy:n käyttöön

Kokeen tavoitteena on kehittää juurten kuvantamiseen kokonaisuus, joka kattaa juurten kasvattamisen, kuvaamisen sekä mittaamisen. Menetelmän tavoitteena on tuottaa onnistuneita juurikuvia helposti ja nopeasti. Menetelmän hyödyntäminen jatkossa edellyttäisi suuren aineiston kuvantamista lyhyellä aikataululla.

6.1.1 Kasvatusmenetelmä

Kokeen suunnitteluvaiheessa päätettiin, että koe perustetaan idätyspaperille. Sopivaa kasvatusmenetelmää kehittäessä kokeiltiin useita eri tapoja idättää siemeniä.

Ensimmäinen koe perustettiin valkoiselle idätyspaperille. 22x30 cm idätyspaperille asetettiin kolme siementä kahdeksan senttimetrin välein toisistaan. Siemenet kiinnitettiin paperiin valkoisella kangasteipillä. Kiinnittämisessä testattiin myös muoviteippiä, mutta se ei pitänyt siementä kiinni kostutetussa paperissa. Myös siemenen kiinnittämistä liisterillä pohdittiin, mutta kangasteipin toimiessa hyvin, se valikoitui käytettäväksi kaikissa kokeissa. Idätyspaperi sijoitettiin pystyasennossa mustaan muovikansioon, jolla estettiin valon pääsy siemeniin. Tässä kokeessa kastelu suoritettiin suihkupullolla. Idätysalusta kasteltiin päivittäin kauttaaltaan kosteaksi. Koe osoitti, että juuret eivät erottuneet kuvankäsittelyvaiheessa valkoisesta taustasta.

Seuraava koe perustettiin mustalle kopiopaperille. Kasvatustapa oli muuten sama, siemenet kiinnitettiin alustaan kangasteipillä, idätyspaperi sijoitettiin kansioon ja se kasteltiin päivittäin kosteaksi. Kokeen perustamisvaiheessa epäilty ajatus kopiopaperin repeilemisestä kosteana osoittautui todeksi. Kokeen pohjalta tilattiin näytepakkaus erilaisia värillisiä idätyspapereita. Lisäksi todettiin, että vierekkäin sijoitettujen siementen juuret kasvoivat päällekkäin, jolloin juurten mittaaminen vaikeutui. Jatkossa yhdelle idätyspaperille asetettiin vain yksi siemen.

Idätyspaperit kuivuivat muovikansioissa hyvin nopeasti, joten haihtumista kokeiltiin hidastaa asettamalla kirkas muovi idätyspaperin päälle. Haihtuminen ei kuitenkaan merkittävästi hidastunut ja samalla idätysten käsittely

hidastui muovien siirtelyn myötä. Myös kansioiden käytännöllisyys kärsi materiaalien lisääntyessä.

Idätyspaperitoimituksessa saapui sinisiä ja ruskeita idätyspapereita, jotka muistuttivat materiaaliltaan pahvia, lisäksi yhtä ohuempaa, karkeaa materiaalia. Seuraavassa kokeessa idätyspaperi kiinnitettiin paperipuristimilla puiseen tukikeppiin ja keppi asetettiin roikkumaan muovilaatikon reunoilta. Muovilaatikon pohja täytettiin vedellä, jotta kastelu tapahtuisi kapillaarisen imun avulla. Noin 2 cm idätyspaperin alareunasta oli vedessä. Paperin päälle asetettiin muovisäkin pala estämään valon pääsy siemenen. Muovilaatikko -menetelmä oli tähän mennessä suoritetuista kokeista nopein ja käytännöllisin.

Muovisäkkejä oli työläs leikata ja ohutta materiaalia olisi tarvinnut käyttää useita kerroksia, joten niille haluttiin löytää korvaava vaihtoehto. Musta, UV-suojattu 0,4 mm muovikalvo vaikutti ihanteelliselta valosuojalta, mutta kyseisen muovin kustannuksen takia päädyttiin käyttämään käytettävissä olevaa 0,15 mm polyeteenimuovia.

Ensimmäinen laatikkokoe perustettiin 10.1. ja kuvaukset aloitettiin maanantaina 13.1. Tällöin huomattiin, että viikonlopuksi tiskipöydälle jätetyt idätykset olivat kasvaneet hyvin epätasaisesti, osa ei ollenkaan. Tämä johtui tiskipöydän lievästä kaltevuudesta, jonka takia noin puolet idätyspapereista olivat kuivuneet niin paljon, että itäminen oli osalla hidastunut ja osalla estynyt kokonaan. Siemenet oli järjestetty laatikoihin lajikkeittain.

6.1.2 Kuvaus

Kuvauksen osalta keskityttiin tutkimaan valokuvausasetuksia. Eri kameramerkkejä ja -malleja ei tutkittu tai vertailtu keskenään. Tutkimus tehtiin kokeilemalla millaisilla arvoilla kameran ISO-arvossa, F-luvussa sekä suljinajassa saavutettiin parhaimmat kuvat.

ISO-arvo tarkoittaa kameran valoherkkyyttä. Mitä suurempi ISO-arvo, sitä herkempi kamera on valolle eli kuva on kirkkaampi. F-luku kuvaa kameran aukon kokoa. Mitä suurempi aukko, sitä enemmän valoa pääsee kameraan ja kuvan valotus lisääntyy. Suljinaika on valotusaika eli kuinka kauan valoa pääsee kameran kennolle. Mitä suurempi valotusaika, sitä enemmän valoa kennolle pääsee.

Kameran asettelussa tutkittiin kameran asettamista kolmijalkaiseen jalustaan sekä statiiviin. Kuvia kokeiltiin ottaa eri etäisyyksiltä ja etäisyyden vaikutusta arvioitiin.

6.1.3 Kuvankäsittely

Kuvankäsittelyohjelmia verratessa kiinnitettiin huomiota ohjelmalla määritettäviin ominaisuuksiin sekä käyttökokemukseen. Myös kuvankäsittelyyn kuluvalle ajalle oli tärkeä merkitys.

Aluksi ladattiin kaksi kuvankäsittelyohjelmaa, SmartRoot ja ArchiRoot, joita oli tarkoitus verrata keskenään. Pian huomattiin, että ohjelman helpokäyttöisyydellä oli suuri merkitys, sillä käytön opettelu vaati huomattavasti aikaa. Ajankäytön vuoksi kuvankäsittelyn osalta päätettiin keskittyä tutkimaan SmartRootin käyttöä.

Kuvankäsittely vaati kuvien värisyvyyden ja värityksen muuttamista. Digitaalikuvausessa JPEG-tiedostomuodossa värisyvyys on yleisesti 24 bittiä ja kuvat ovat positiiveja. Positiivi on kuva, jossa kuvan väri ja kirkkaus vastaavat silminnähtäviä värejä. Kuvankäsittelyä varten kuvat muutettiin 8-bittisiksi negatiiveiksi, joka tarkoittaa käytännössä sitä, että kuvat olivat mustavalkoisia ja juuret erottuivat tummina vaaleampaa taustaa vasten. Kuvanmuokkaus tehtiin ImageJ-ohjelmalla, jonka liitännäisenä SmartRoot toimii.

ImageJ mittaa kuvien pikselimäärää eli kuinka monesta kuvapisteestä kuva muodostuu. Ohjelmalla tulee mitata kuvasta haluttu matka ja määrittää sille haluttu lukuarvo sekä yksikkö.

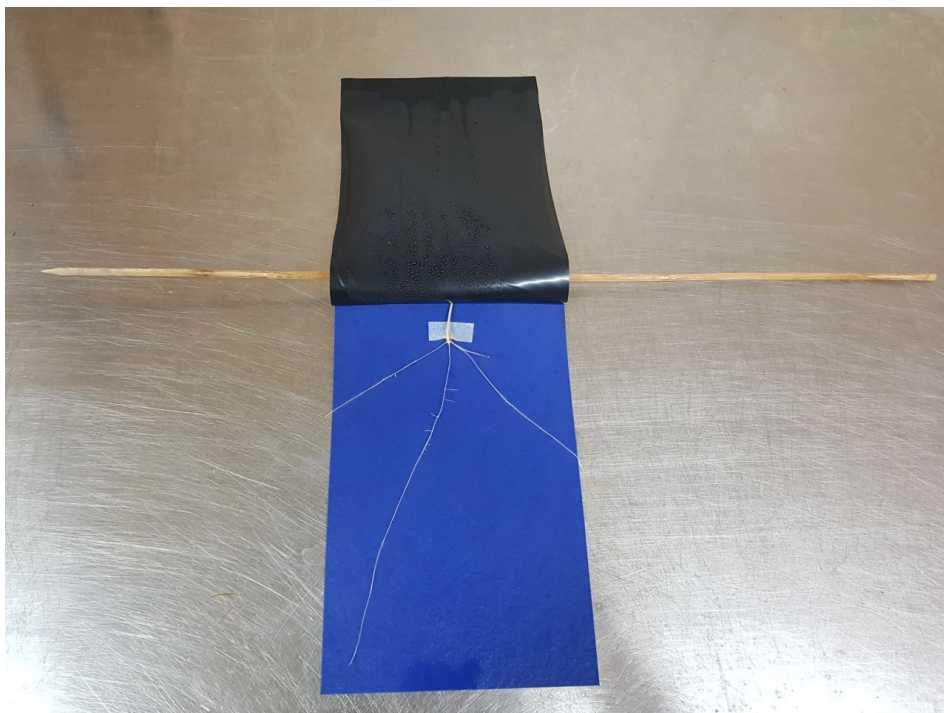
7 TULOKSET

7.1 Kvantamismenetelmä

7.1.1 Kasvatusmenetelmä

Koe suoritettiin kasvattamalla neljä kevävehnälaajiketta ja kaksi syysvehnälaajiketta sinisellä idätyspaperilla polyteenimuovilla peitettynä vedellä täytetyssä laatikossa. Siemenet steriloiitiin ennen idätystä liottamalla niitä 1 min 2,5 % natriumhydroksidiliuoksessa (NaOCl). Jokaisesta lajikkeesta kasvatettiin 10 yksilöä. Koe perustettiin perjantaina 24.1.2020 iltapäivällä. Koeasettelussa 60 kasvualustaa sijoitettiin kahteen laatikkoon niin, että kummassakin laatikossa oli 30 alustaa. Siemenet satunnaistettiin laatikoihin. Kasvualustat sijoitettiin huoneenlämpöön ja 4 cm alustojen alareunasta oli vedessä. Kasvualustat kostutettiin kauttaaltaan koetta perustettaessa edellytykseksi hyvälle itämiselle. Lisäksi laatikot peitettiin muovilla haihtumisen estämiseksi.

Kuvaukset aloitettiin 27.1., kolme päivää ja 60 h idätyksestä ja juuret kuvattiin 24 h välein viiden päivän ajan.



Kuva 16. Koeasettelu (Takkinen 2020).



Kuva 17. Satunnaistetut koejäsenet kasvatuslaatikoissa (Takkinen, 2020).

7.1.2 Kuvaus

Kuvaus suoritettiin Nikon D3300 -järjestelmäkameralla. Kamera asetettiin statiiviin 20 cm kuvausalustan yläpuolelle. Kuvat otettiin etälaukaisijalla kameran asetuksilla ISO400, F-luku 4,5 ja suljinaika 1/100. Kameran kosketusta pyrittiin välttämään mahdollisimman paljon, jotta kuvien laatu

pysyisi samana kuvausten ajan. Idätyspaperille merkattiin paikka kuvaus-
alustaan.

Jokainen siemen numeroitiin ja lajike sekä päivämäärä merkattiin kuvaan,
jotta kuvat eivät sekoittuisi keskenään. Lisäksi viivoitin asetettiin joka päivä
ensimmäiseen kuvaan kuvankäsittelyä varten. Kuvaukseen kului joka päivä
yksi tunti.



Kuva 18. Kokeen kuvausasettelu (Takkinen, 2020).

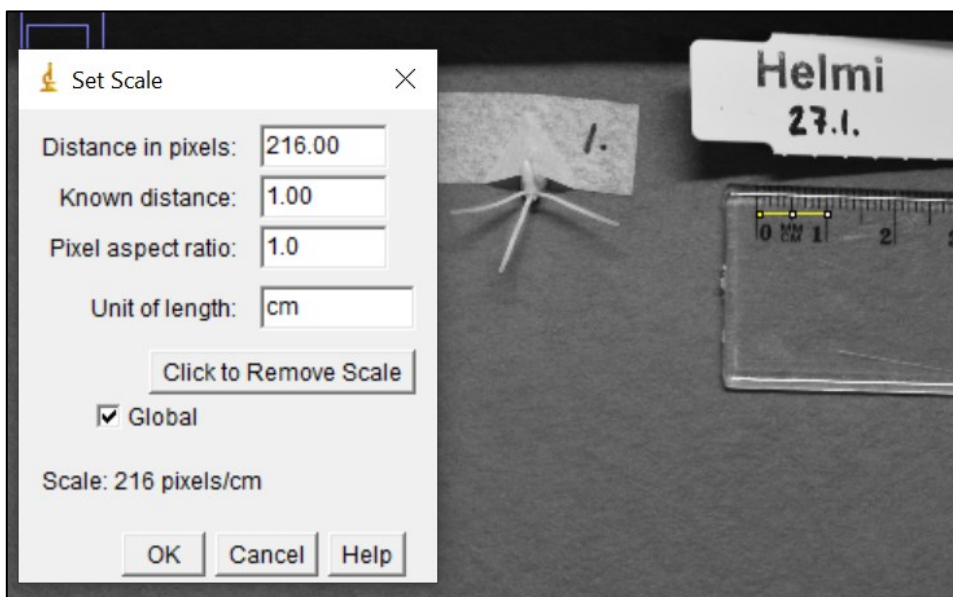
7.1.3 Kuvankäsittely

Kuvankäsittely aloitettiin määrittämällä kuville mittakaava. Yksikkö määri-
tettiin mittaamalla kuvaan sijoitetusta viivoittimesta 1 cm. Ohjelma mittasi
matkan pikselimäärän, jolle määritettiin arvo 1 ja yksiköksi senttimetri
(Kuva 18). Kaikissa kuvissa käytettiin samaa arvoa.

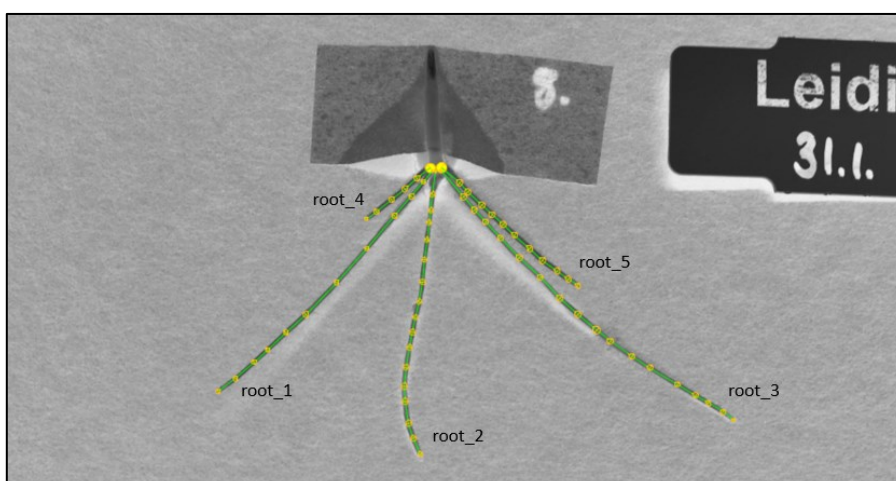
Juurten mittaus perustuu janalla kulkeviin solmuihin, jotka on tarkoitus
kohdistaa juuren keskiosaan koko juuren mitalle (Kuva 20). Ohjelma tun-
nistaa taustaa tummemmat alueet juureksi. Solmut mittaavat juuren

pitäuden lisäksi halkaisijan, joiden perusteella se laskee juuren pinta-alan ja tilavuuden. Mikäli solmut ovat juurta pienempiä tai suurempia tai kulkevat eri linjalla kuin juuri, tulokset vääristyvät.

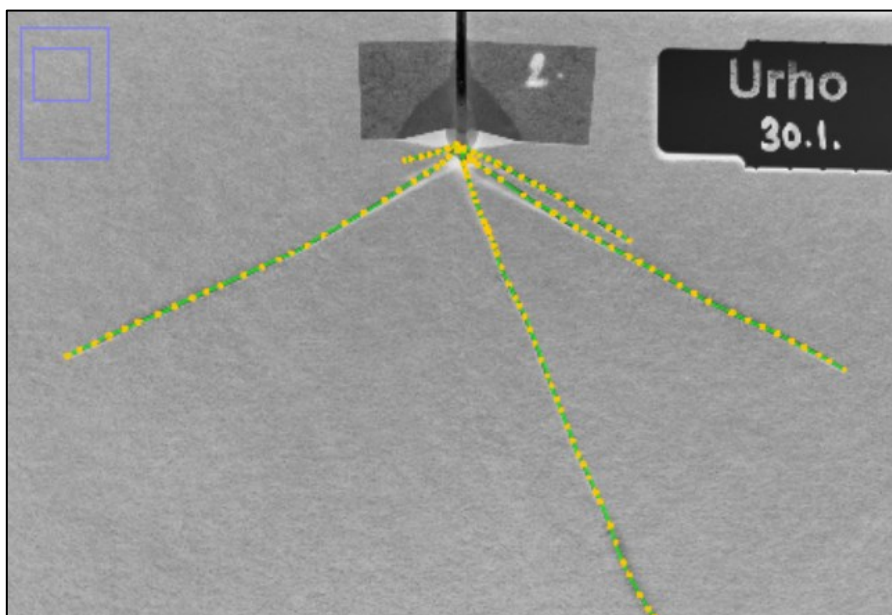
Juuret on nimetty järjestyksessä, niin että kolme nopeimmin kasvanutta juurta ovat nimetty vasemmalta oikealle root_1, root_2 ja root_3. Pääjuurten vasemmalle puolelle kasvanut juuri on nimetty root_4 ja pääjuurten oikealle puolelle kasvanut root_5. Kuudenneksi kasvanut juuri on nimetty root_6 sijainnista riippumatta (Kuva 19).



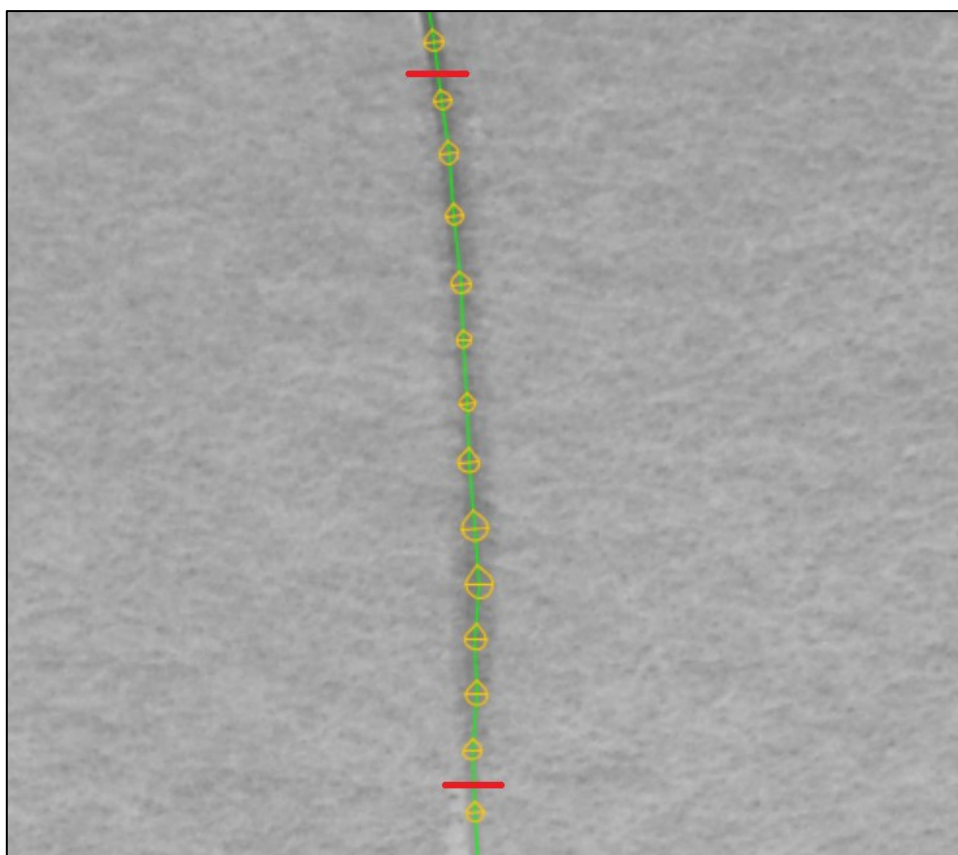
Kuva 19. Pitäuden määrittäminen SmartRoot -ohjelmalla (Takkinen, 2020).



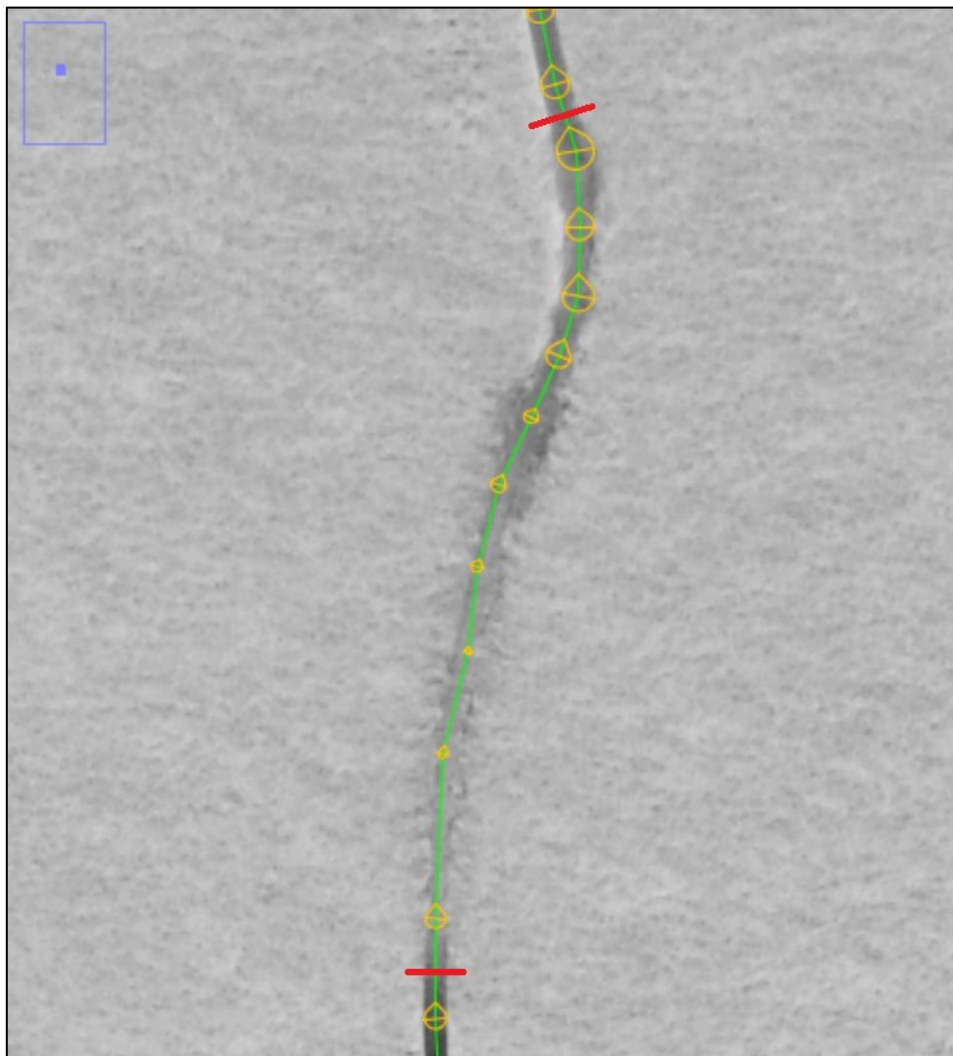
Kuva 20. Juurten nimeäminen (Takkinen 2020).



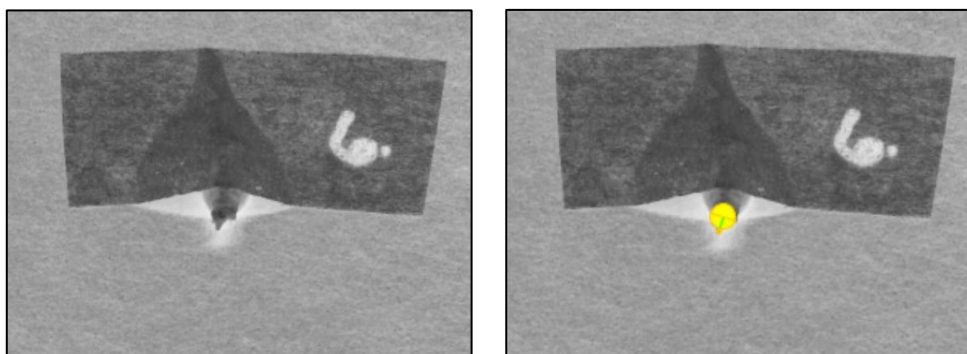
Kuva 21. SmartRoot -ohjelma mittaa juurten pituuden keltaisten mittasolmujen avulla. (Takkinen, 2020).



Kuva 22. Juuri ja juurikarvat ovat kuvassa sulautuneet toisiinsa, joten mittasolmut ovat viivojen välisellä alueella suuremmat kuin juuren halkaisija (Takkinen, 2020).



Kuva 23. Juuri on epätarkka viivojen väliseltä alueelta, joten ohjelma ei ole tunnistanut sitä kunnolla, ja mittasolmut ovat juuren halkaisijaa pienempiä (Takkinen, 2020).



Kuva 24. SmartRoot -ohjelma ei tunnista juuren kasvukohtaa, koska alkio ja juuret ovat samanväriset. Mittasolmu on piirtynyt koko alkion päälle. (Takkinen, 2020)

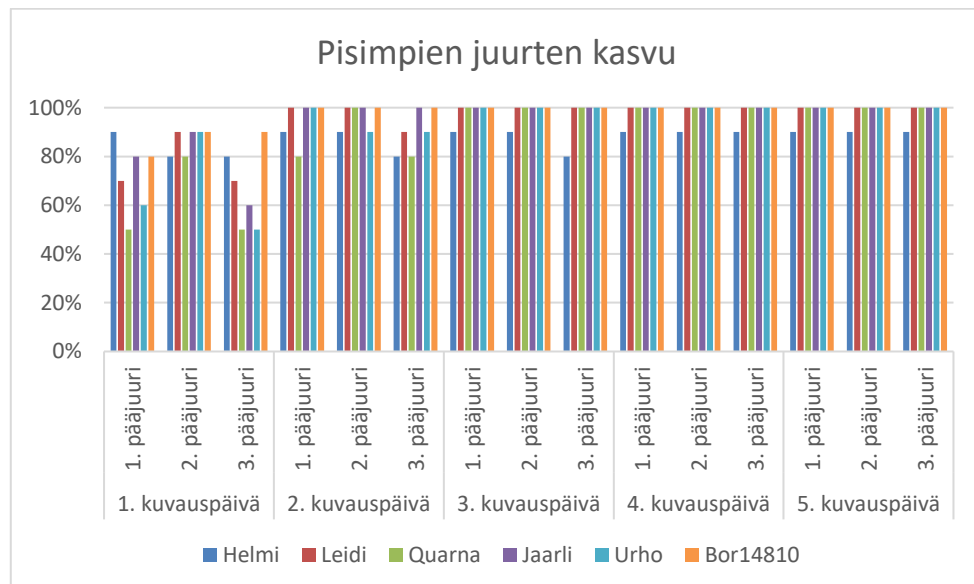
7.2 Koeaineiston tulokset

7.2.1 Itäminen

Kuvassa 25 on esitetty lajikkeiden pisimpien juurten kasvu. Y-akselilla on esitetty kasviyksilöiden määrä prosentteina ja x-akselilla pääjuuret sekä aikajana. Ensimmäisenä kuvauspäivänä idätyksestä oli kulunut 60 tuntia. Samasta taulukosta voidaan tarkastella myös itävyyttä.

Itäminen oli pääsääntöisesti nopeaa eikä juurten kasvutahdissa ollut merkittäviä eroja. 2. pääjuuri oli nopeakasvuisin ja 3. pääjuuri hidaskasvuisin. Suurimmalla osalla lajikkeista pääjuuret olivat kasvaneet kolmanteen kuvauspäivään mennessä. Helmillä itävyysprosentti oli 90, muilla lajikkeilla siemenet itivät 100 %.

Kuva 25. Lajikkeiden pääjuurten kasvu.



7.2.2 Pituuskasvu ja juuriston ulkomuoto

Helmillä juuret kasvoivat selkeästi sivuille ja alaspäin. Juuristojen rakenteet yksilöiden välillä eivät olleet identtisiä. Juurten suuntautumisessa oli huomattavissa suuria eroja eikä yksilöiden välillä ollut selkeää yhteneväisyyttä. Keskimmäinen pääjuuri oli voimakasvuisin ja sen huippupituus oli noin 18 cm. Neljällä muulla yksilöllä pisimmät juuret ylsivät 14 cm pituuteen. Kolmella yksilöllä juuret jäivät selkeästi muita lyhyemmiksi. Helmillä pisimpien juurten lajikemediaani oli 12,7 cm. Helmi-yksilöiden juuristokuvat viimeisenä kuvauspäivänä 31.1. on esitetty liitteessä 1.

Leidillä juuristojen rakenne yksilöiden välillä oli hyvin samanlainen. Keskimmäinen pääjuuri kasvoi muita juuria huomattavasti pidemmäksi ja

juuret sen molemmin puolin kasvoivat hyvin lähellä toisiaan. Kaikkien yksilöiden juuret jäivät varsin lyhyiksi. Juurten keskipituus oli vain noin 3 cm. Kahdella yksilöllä keskimmainen pääjuuri kasvoi yli 10 cm. Leidin huippupituus oli 14,2 cm ja pisimpien juurten lajike-mediaani oli 2,9 cm. Leidin yksilöiden juuristokuvat 31.1. on esitetty liitteessä 2.

Quarnalla juurten kasvu oli päivittäin hyvin tasaista. Juuristoissa oli yksilöiden välillä rakenteellisia yhdenmukaisuuksia. Juuret levittäytyivät tasaisin välimatkoin sivuille ja alas. Pisimpien juurten pituudet vaihtelivat 4,3 cm – 12,2 cm ja Quarnan lajike-mediaani oli 8,0 cm. Quarna-yksilöiden juuristokuvat 31.1. on esitetty liitteessä 3.

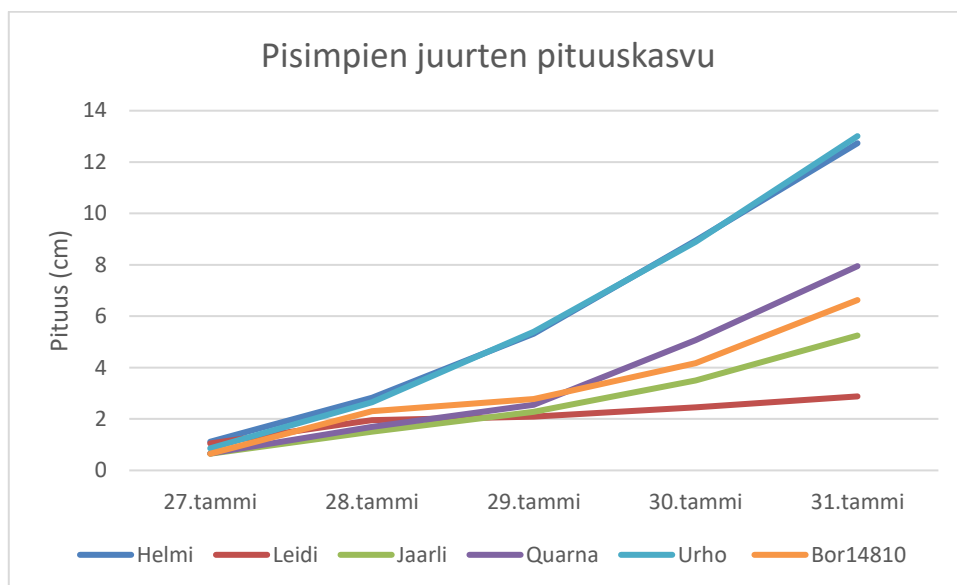
Jaarlilla pisimmälle kasvaneissa juuristoissa keskimmainen pääjuuri oli huomattavasti muita juuria pitempi. Kaikkien yksilöiden juuristot eivät muistuttaneet toisiaan. Jaarlilla oli myös yksilöitä, joiden reunimmaisat pääjuuret olivat kasvaneet pidemmäksi kuin keskimmainen pääjuuri. Kahden yksilön juuristot olivat keskimääräistä pienempiä ja kahdella yksilöllä juuristo oli keskimääräistä suurempi. Jaarlin huippupituudet kolmella yksilöllä olivat 12,0 cm, 9,3 cm ja 8,6 cm. Pisimpien juurten lajike-mediaani oli 5,3 cm. Jaarlin juuristokuvat 31.1. on esitetty liitteessä 4.

Urhon päivittäinen kasvu oli tasaista ja juuristot olivat rakenteeltaan yhdennäköisiä. Pääjuuret kasvoivat lähes yhtä pitkiksi ja levittyivät laajalle alueelle. Sivujuuret kasvoivat lähellä reunimmaisista pääjuurista. Kaksi yksilöä poikkesi muista lyhyemmällä juurilla. Urhon pisimmät juuret ylsivät 13 – 15 cm pituuteen. Urhon juuristokuvat 31.1. on esitetty liitteessä 5.

Bor14810:lla juurten kasvussa ei ollut havaittavissa selkeää yhdennäköisyyttä. Osalla yksilöistä keskimmainen pääjuuri kasvoi muita juuria pidemmäksi ja osalla pääjuuret olivat lähes samanmittaisia. Yhden yksilön juuret kehittyivät muita hitaammin, mutta neljällä yksilöllä juuret jäivät huomattavasti muita lyhyemmiksi. Lajikkeen huippupituus oli noin 13 cm. Bor14810-yksilöiden juuristokuvat 31.1. on esitetty liitteessä 6.

Juurten lajikekohtainen pituuskasvu on esitetty liitteissä 7 – 12.

Kuva 26. Lajikkeiden pisimpien juurten pituuskasvu lajikemediaanina.



7.2.3 Pinta-ala

Helmillä pinta-ala kasvoi lineaarisesti eikä yksilöiden kehityksessä ollut merkittäviä eroja. Helmin pääjuurten pinta-alat vaihtelivat kokeen lopussa 1,3 – 1,8² cm.

Leidin pinta-alan kasvu kiihtyi kasvatuspäivien lisääntyessä. 4. kuvauspäivänä kasvu kiihtyi neljällä juurella. Pääjuurten pinta-ala vaihteli 0,6 – 0,9 cm².

Quarnalla pääjuurten kasvu kiihtyi lähes päivittäin. Kokeen lopussa juurten pinta-alat vaihtelivat 0,96 – 1,3 cm².

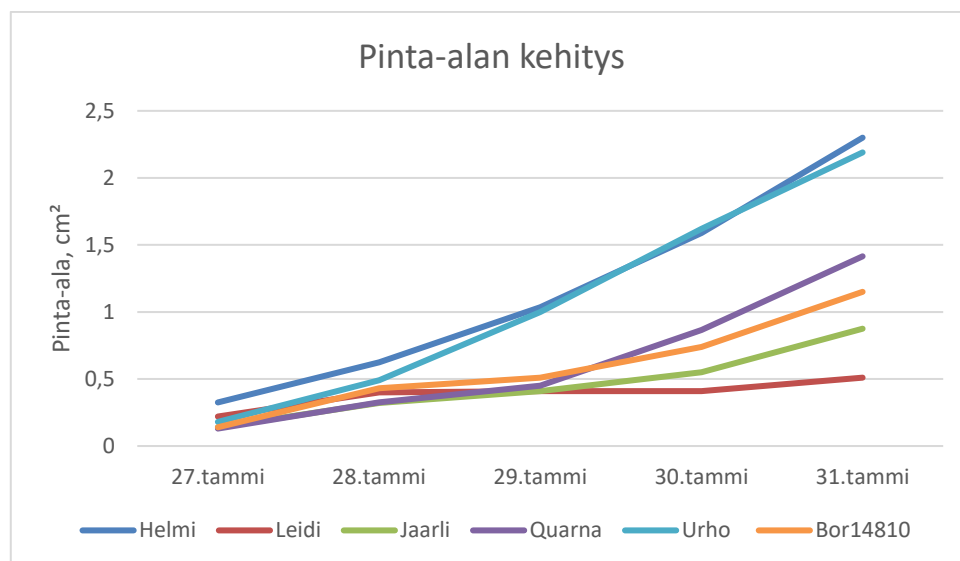
Jaarlilla 1. ja 3. pääjuuren kasvu hidastui 3. ja 4. kuvauspäivän välillä. 3. pääjuuren kasvu kiihtyi jälleen 2. pääjuuren kanssa 4. ja 5. kuvauspäivän aikana. Pinta-ala vaihteli 0,6 – 0,87 cm².

Urholla pääjuurten kasvu kiihtyi toisena kuvauspäivänä ja kasvu jatkui lineaarisena. Pääjuurten pinta-alat vaihtelivat kokeen lopussa 1,2 cm – 1,8 cm².

Bor14810 ensimmäisen pääjuuren kasvu kiihtyi toisena kuvauspäivänä, jonka jälkeen kasvu hidastui. Toisella pääjuurella kasvu kiihtyi kolmantena kuvauspäivänä. Kolmannen pääjuuren kasvu kiihtyi ja hidastui vuorotellen kuvauspäivien aikana. Pinta-alat vaihtelivat 0,9 – 1,3 cm².

Lajikekohtainen pinta-alan kehitys on esitetty liitteissä 13 – 18.

Kuva 27. Lajikkeiden pisimpien juurten pinta-alan kehitys lajikekeskiarvona.



7.2.4 Tilavuus

Helmillä tilavuuden kasvu kiihtyi kolmannella pääjuurella, toisella pääjuurella kasvu oli lähes lineaarista ja ensimmäisellä pääjuurella kasvun kiihtyminen ja hidastuminen vaihtelivat. Pääjuurten tilavuus vaihteli kokeen lopussa 0,02 – 0,03 cm³ välillä.

Leidillä tilavuuden kehitys kiihtyi toisella ja kolmannella pääjuurella, ensimmäisen pääjuuren tilavuuden kasvu kiihtyi ensin ja hidastui lopulta. Pääjuurten tilavuus vaihteli kokeen lopussa 0,009 – 0,01 cm³.

Quarnalla tilavuuden kehitys kiihtyi voimakkaasti toisella ja kolmannella pääjuurella. Ensimmäisellä pääjuurella tilavuuden kehitys oli lähes lineaarista. Pääjuurten tilavuudet vaihtelivat kokeen lopussa 0,01 – 0,02 cm³.

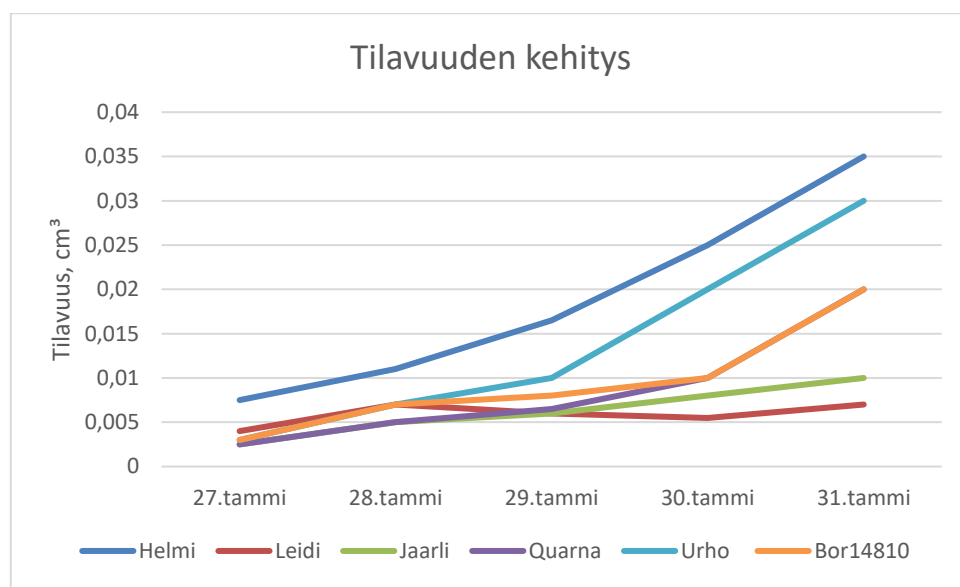
Jaarlilla ensimmäisen pääjuuren tilavuuden kasvu hidastui kolmantena kuvauspäivänä. Toisen pääjuuren tilavuuden kasvu kiihtyi päivittäin neljäntenä kuvauspäivään saakka, jolloin kasvu hidastui. Kolmannen pääjuuren tilavuuden kasvu kiihtyi hieman kuvausten aikana. Pääjuurten tilavuudet vaihtelivat kokeen lopussa 0,009 – 0,01 cm³.

Urholla tilavuuden kasvu hidastui toisena kuvauspäivänä ja kiihtyi kolmantena kuvauspäivänä. Toisen pääjuuren tilavuuden kasvu kiihtyi kuvausten alussa ja hidastui lopussa. Kolmannen pääjuuren kasvu kiihtyi lähes päivittäin. Kunkin pääjuuren tilavuus oli kokeen lopussa noin 0,02 cm³.

Bor14810 toisen pääjuuren kehitys oli lähes lineaarista. Yksilöiden ensimmäiset ja kolmannet pääjuuret olivat ensimmäisenä kuvauspäivänä vielä niin pieniä, että ne olivat kehittyneet kunnolla vasta toisena kuvauspäivänä. Kolmannen pääjuuren kehitys hidastui ensimmäiseen ja toiseen pääjuureen verrattuna.

Lajikekohtainen tilavuuden kehitys on esitetty liitteissä 19 – 24.

Kuva 28. Pisimpien juurten tilavuuden kehitys lajikekeskiarvona.



8 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

8.1 Kuvantamismenetelmä

Kasvatusmenetelmää kehitettäessä kokeiltiin erilaisia tekniikoita kasvat-
taa juuria idätyspaperilla. Kuvausjärjestelyn osalta tutkittiin kameran aset-
telua ja eri kuvausasetusten vaikutuksia kuvan laatuun. Kuvaamista varten
selvitettiin millaisilla säädöillä juurista saadaan onnistuneita kuvia kuvan-
käsittelyä varten. Ajankäytön vuoksi kuvankäsittelyn osalta perehdyttiin
käyttämään vain SmartRoot -ohjelmaa, jonka avulla mitattiin juurten pi-
tuus, pinta-ala ja tilavuus.

Kokeen puitteissa kehitetty kasvatusmenetelmä, jossa juuria kasvatetaan
idätyspaperilla laatikon reunalla roikkuen, oli toimiva tämän kokeen to-
teuttamiseen. Kokeen perustaminen vei kohtuullisen määrän aikaa ja oli
melko vaivatonta. Kasvatusalustojen käsittely oli helppoa ja nopeaa. Sie-
menten kiinnittämiseen käytetty kangasteippi toimi pääosin hyvin. Muuta-
malla yksilöllä oras kasvoi teipin alle, jolloin teippi saattoi irrota.

Valolta suojaamiseen käytetty 0,15 mm polyeteenimuovi oli liian ohutta, sillä se kaareutui idätyspaperista ulospäin. Lisäksi juuret liimautuivat osittain muoviin kiinni. Laatikoissa seisova vesi alkoi viikon kuluessa kokeen perustamisesta limautua, joten vesi tulisi pidemmällä kasvatusjaksolla vaihtaa puhtaaseen. Seitsemän päivän mittaiselle kasvatusjaksolle 15x24 cm mittainen idätyspaperi riitti juurten kasvualustaksi. Pidempi kasvatusaika vaatii suuremman alustan, jotta juuret eivät kasva alustan reunojen yli. Puiset tukikepit alkoivat homehtua kasvatuksen aikana muovilla peitetyiden laatikoiden kosteuspitäisyyden takia. Puulle vaihtoehtoisia materiaaleja ovat esimerkiksi muovi ja metalli. Kasvatusmenetelmän etuna on se, että sitä voidaan soveltaa erilaisiin olosuhteisiin muuttamalla mm. veden määrää ja kasvatuslämpötilaa.

Menetelmä vaatii kuvauksen osalta lisää tutkimustietoa. Kuvankäsittelyn onnistumiseksi juurten tulee selkeästi erottua taustasta. Kuvan värillä ja tarkkuudella on tässä tärkeä merkitys. Kokeessa ei onnistuttu tuottamaan kuvankäsittelyn kannalta optimaalisia kuvia, koska juurten tarkkuus ei ollut riittävä. Kameran asettaminen oikeisiin säätöihin juuriston kokonaisvaltaisen tarkennuksen ja kuvien sopivan valotuksen saavuttamiseksi ovat tekijöitä, jotka edellyttävät lisää tutkimusta.

Kokeen perusteella voidaan sanoa, että SmartRoot on toimiva tutkimuskäyttöön, mutta suurten aineistojen kuvantamiseen se on työläs ja hidaskäyttöinen. Kuvauksen onnistuminen ja kuvien hyvä laatu on tärkeä edellytys kuvankäsittelyn onnistumiselle. Kuvien koko tulisi stabiloida, jotta juurten mitat säilyisivät vertailukelpoisina. Myös kuvien terävyydellä on tärkeä rooli kuvankäsittelyssä. Epätarkkojen kuvien käsittely vaikeutuu, kun ohjelma ei erota juuria taustasta. Juuren halkaisija yhdistyy helposti myös juurikarvoihin. Ohjelmalla on hankala mitata vasta kasvunsa aloittaneita juuria, jotka sulautuvat väriltään alkioon. Juurten kasvukohta olisi hyvä merkitä siemeneen, jotta mittaus aloitettaisiin aina samasta kohdasta. Käsin määritettyjen mittauspisteiden välinen virhemarginaali sekä satunnaisvaihtelu on kuitenkin hyvin pientä, arviolta enimmillään 1 mm.

Kokeen puitteissa ei onnistuttu käyttämään SmartRootin toimintoja, joissa ohjelma piirtäisi juuret automaattisesti ja näyttäisi juurten päivittäisen kasvun samassa kuvassa. Myöskään ohjelman omaa tietokantaa ei onnistuttu hyödyntämään. Automaattinen piirto-toiminto nopeuttaisi kuvien käsittelyä ja tulosten analysointi olisi helpompaa, kun päivittäistä kasvua voitaisiin havainnoida yhdestä kuvasta.

8.2 Koeaineisto

Tutkimuksen tarkoituksena oli ensisijaisesti kehittää toimiva kuvantamismenetelmä ja lajikekokeella selvitettiin, voidaanko menetelmällä havaita eroja lajikkeiden välillä.

Itämisessä ei lajikkeiden välillä havaittu merkittäviä eroavaisuuksia. Urholla itäminen oli nopeinta; ensimmäisenä kuvauspäivänä kaikki siemenet olivat itäneet. Myös muilla lajikkeilla siemenet olivat pääosin itäneet ensimmäisenä kuvauspäivänä. Kaikilla lajikkeilla Helmiä lukuun ottamatta itävyysprosentti oli 100. Helmillä itävyysprosentti oli 90. Helmillä pääjuuret kehittyivät lajikkeista nopeimmin. Pääsääntöisesti pääjuuret olivat kasvanneet toiseen kuvauspäivään mennessä.

Lajikkeiden pituuskasvussa havaittiin huomattavia eroja. Pituuskasvun lisäksi juuristot vaihtelivat ulkomuodoltaan. Helmillä ja Urholla pääjuuret kasvoivat lähes yhtä pitkiksi, muilla lajikkeilla keskimäinen pääjuuri kasvoi selvästi pidemmäksi kuin muut juuret. Leidillä ja Bor14810:lla ulommat pääjuuret kasvoivat lähellä myöhemmin kasvaneita sivujuuria, kun taas muilla lajikkeilla juuret suuntautuivat selvemmin eri suuntiin. Kevätvehnistä Helmi kasvatti pisimmät juuret, Jaarli ja Leidi lyhyimmät. Syysvehnistä Urholla juuret kasvoivat pidemmiksi kuin Bor14810:lla.

Pinta-alan ja tilavuuden kehitys korreloi suoraan juurten pituuskasvuun, näin ollen Leidi ja Jaarli saavuttivat sekä pinta-alaltaan että tilavuudeltaan pienimmät tulokset. Niillä juuriston pinta-ala oli keskiarvoltaan noin $0,9 \text{ cm}^2$ ja tilavuus $0,01 \text{ cm}^3$. Helmillä, Quarnalla, Urholla ja Bor14810:lla pinta-alan keskiarvot sijoittuivat $1,3 - 1,8 \text{ cm}^2$ välille ja tilavuuden keskiarvo oli noin $0,03 \text{ cm}^3$.

Lajikkeiden välisen vaihtelun lisäksi tulokset vaihtelivat vahvasti myös lajikkeiden sisällä. Juuristojen ulkomuodoissa ja mittauksista saaduissa tuloksissa havaitut erot lajikkeiden sisällä olivat suuria. Koeaineisto koostui vain kymmenestä koejäsenestä, joten niiden perusteella ei voida vahvistaa lajikkeiden sisällä tapahtuvaa todellista vaihtelua.

Opinnäytetyön tulokset osoittavat, että kattavan lajikekuvauksen saaminen edellyttää lisää kokeita suuremmalla koeaineistolla. Jotta juuritutkimus voitaisiin ottaa osaksi Borealin jalostusohjelmaa, edellytyksenä on kuvaus- ja kuvankäsittelyprosessin automatisointi.

LÄHTEET

Acadia University (2017). Agar -kasvualusta petrimaljalla. Haettu 25.4.2020 osoitteesta <https://kcirvingcentre.acadiau.ca/9235.html>

Adu, M. O., Chatot, A., Wiesel, L. & Dupuy L. (2014.) A scanner system for high-resolution quantification of variation in root growth dynamics of Brassica rapa genotypes. *ResearchGate*. Haettu 12.4.2020 osoitteesta https://www.researchgate.net/figure/A-Schematic-representation-of-the-pouch-and-wick-system-used-to-grow-plants-in-the_fig1_310514402

Akman, M. (2011). Wheat root systems, genetics and methodology for evaluation of root characteristics: A review. *ResearchGate*. Haettu 25.4.2020 osoitteesta https://www.researchgate.net/publication/316853371_Wheat_Root_System_Genetics_and_Methodology_for_Evaluation_of_Root_Characteristics_A_Review

Alakukku, L., Heikkinen, J., Jauhiainen, L., Joonas, J., Kaila, E., Kari, M., Kesitalo, M., Känkänen, H., Mattila, T., Mustonen, A., Mylly, M., Myyrä, S., Nuutinen, V., Palojarvi, A., Peltonen, S., Peltonen-Sainio, P., Salo, T., Soinne, H., Tiusanen, J., Yli-Halla, M. & Äijö, H. (2017). *Peltojen kunnostus*. Ajasto Paperproducts.

Alakukku, L., Jaakkola, A., Kari, M., Kleemola, J., Mäntylähti, V., Partanen, E., Peltonen, J., Puustinen, M., Savela, P., Sipiläinen, T., Tauriainen, S. & Yli-Halla, M. (2009). *Ravinteet kasvintuotannossa*. Keuruu: Otava Kirjapaino Oy.

Alakukku, L., Mikkola, H., Nuutinen, V., Palojarvi, A., Peltomaa, R., Peltonen, S., Pietola, L., Pitkänen, J. & Rajala, J. (2002). *Maan rakenteen hoito*. Keuruu: Otava Kirjapaino Oy.

Boreal (n.d.) Helmi. Haettu 19.4. osoitteesta <http://boreal.fi/lajike/vehna/helmi/>

Boreal (n.d.) Jaarli. Haettu 19.4. osoitteesta <http://boreal.fi/lajike/vehna/jaarli/>

Boreal (n.d.) Leidi. Haettu 19.4. osoitteesta <http://boreal.fi/lajike/vehna/leidi/>

Boreal (n.d.) Quarna. Haettu 19.4. osoitteesta <http://boreal.fi/lajike/vehna/quarna/>

Boreal (n.d.) Urho. Haettu 19.4. osoitteesta <http://boreal.fi/lajike/vehna/urho/>

Chen, Y., Rengel, Z. & Đalović, I. (2015). Phenotyping for root traits. *ResearchGate*. Haettu 26.2.2020 osoitteesta <https://www.researchgate.net/publication/274700676> Phenotyping for Root Traits

ELY (2014). Trenching -menetelmä. Haettu 24.2.2020 osoitteesta https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/103454/ely%20juuristotieto_LR.PDF

Forschungszentrum Jülich (2012). Koneellinen Rhizotron -laitteisto. Haettu 13.4.2020 osoitteesta https://www.fz-juelich.de/ibg/ibg-2/EN/Research/ResearchGroups/JPPC/technologies/GROWSCREEN_rhizo/growscreen_rhizo_node.html

Foulkes, J. (2018). Wheat shovelomics II: Revealing relationships between root crown traits and crop growth. *Biorxiv*. Haettu 11.2.2020 osoitteesta <https://www.biorxiv.org/content/10.1101/280917v1.full>

Institut Carnot Plant2Pro (n.d.). Rhizotube -kasvualusta. (Haettu 26.2.2020 osoitteesta <http://plant2pro.fr/en/success-genetique-cat/87-rhizotubes-and-rhizocab-high-throughput-phenotyping-technologies>

Jülich (2013). Rhizotron suorakulmaisessa kammiossa. Haettu 26.2.2020 osoitteesta https://www.fz-juelich.de/ibg/ibg-2/DE/Projekte/eu/PhenoCrops/AP_Einzel/einzel_node.html

Keuda (2016). Juuren sisärakenne. Haettu 14.4.2020 osoitteesta <https://slideplayer.fi/slide/11178196/>

Manschadi, A. M., Christopher, J., deVoil, P. & Hammer, G. L. (2006). The role of root architectural traits in adaptation of wheat to water-limited environments. *Functional Plant Biology* 33/2006, s. 823-837. Haettu 11.2.2020 osoitteesta <https://www.publish.csiro.au/FP/FP06055>

Mill, A. (2015). Ruukkumenetelmä. Haettu 4.3.2020 osoitteesta https://twitter.com/anika_mill/status/615871234706960384

Myllys, M., Gustafsson, M., Koppelmäki, K., Känkänen, H., Palojärvi, A. & Alakukku, L. (2014). Juuristotietopaketti – Juuret maan rakenteen parantajina. *Faktaa* 8/2014. Haettu 10.2.2020 osoitteesta https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/103454/ely%20juuristotieto_LR.PDF?sequence=2

Nagel, K., Herrera, J., Jahnke, S. & Schurr, U. (2013). Root-root interactions: Extending our perspective to be more inclusive of the range of theories in ecology and agriculture using in-vivo analysis. *Annals of Botany* 6/2013, s. 9. Haettu 26.2.2020 osoitteesta https://www.researchgate.net/figure/Analysing-root-root-interactions-of-plants-grown-in-soil-filled-rhizotrons-A_fig2_235351748

Niziolomski, J. (2018). Kairaus -menetelmä. Haettu 24.2.2020 osoitteesta https://twitter.com/Joanna_Niz/status/976755516700594176

Pankakoski, A. (2003). *Puutarhurin kasvioppi*. 8.-11 painos. Helsinki: Edita Publishing Oy.

Pinterest (n.d.). Pääjuuristo. Haettu 19.4.2020 osoitteesta <https://fi.pinterest.com/pin/271764158739459262/>

Plant Physiology and Development (2015). Rhizotron -menetelmä. Haettu 26.2.2020 osoitteesta <http://6e.plantphys.net/topic05.02.html>

Plantphysiology (2015). Versojuuristo. Haettu 7.4.2020 osoitteesta <http://www.plantphysiol.org/content/168/3/953/tab-figures-data>

ResearchGate (2017). Juuren ulkorakenne. Haettu 14.4.2020 osoitteesta https://www.researchgate.net/figure/Main-tissues-and-regions-of-activity-in-an-onion-root-tip-source_fig1_279398426

ResearchGate (2019). Kasvatus idätyspaperilla. Haettu 13.4.2020 osoitteesta https://www.researchgate.net/figure/Root-phenotyping-set-up-used-for-screen-A-A-Growth-pouch-showing-blue-blotter_fig2_334728530

ResearchGate (n.d.). Shovelomics -menetelmä. Haettu 24.2.2020 osoitteesta https://www.researchgate.net/profile/Muhammad_Arifuzza-man/publication/332301308_Shovelomics_for_phenotyping_root_architectural_traits_of_rapeseed_canola_Brassica_napus_L_and_genome-wide_association_mapping/links/5cacc878458515cd2b0c08b7/Shovelomics-for-phenotyping-root-architectural-traits-of-rapeseed-canola-Brassica-napus-L-and-genome-wide-association-mapping.pdf

Richard, C., Hickey, L., Fletcher, S., Jennings, R., Chenu, K. & Christopher, J. (2015.) High-throughput phenotyping of seminal root traits in wheat. *Plant Methods* 11/2015, s. 8. Haettu 4.3.2020 osoitteesta <https://plantmethods.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13007-015-0055-9>

Ruokatieto (n.d.) Kasvin osat. Haettu 10.2.2020 osoitteesta <https://www.ruokatieto.fi/ruokakasvatus/ruokaketju-ruuan-matka-peltoilta-poytaan/luonto/kasvien-biologiaa/kasvin-osat>

Ruokatieto. (n.d.) Kasvien ravinteidenotto. Haettu 11.2.2020 osoitteesta <https://www.ruokatieto.fi/ruokakasvatus/ruokaketju-ruuan-matka-peltoilta-poytaan/luonto/kasvien-biologiaa/kasvien-ravinteidenotto>

Salonen, V. (2006). *Kasviekologia*. 1. painos. Helsinki: WSOY Oppimateriaalit Oy.

Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. & Murphy, A. (2015). Observing roots below the ground. *Plant physiology and development*. Haettu 26.2.2020 osoitteesta <http://6e.plantphys.net/topic05.02.html>

Terävä, E. & Kanervo, E. (2008). *Kasvianatomia*. Helsinki: Edita Publishing Oy.

Terävä, E. & Kanervo, E. (2008). *Kasvianatomia*. Helsinki: Edita Prima Oy.

Wasaya, A., Zhang, X., Fang, Q. & Yan, Z. (2018). Root phenotyping for drought tolerance: A review. *MDPI*. Haettu 11.2. osoitteesta <https://www.mdpi.com/journal/agronomy>

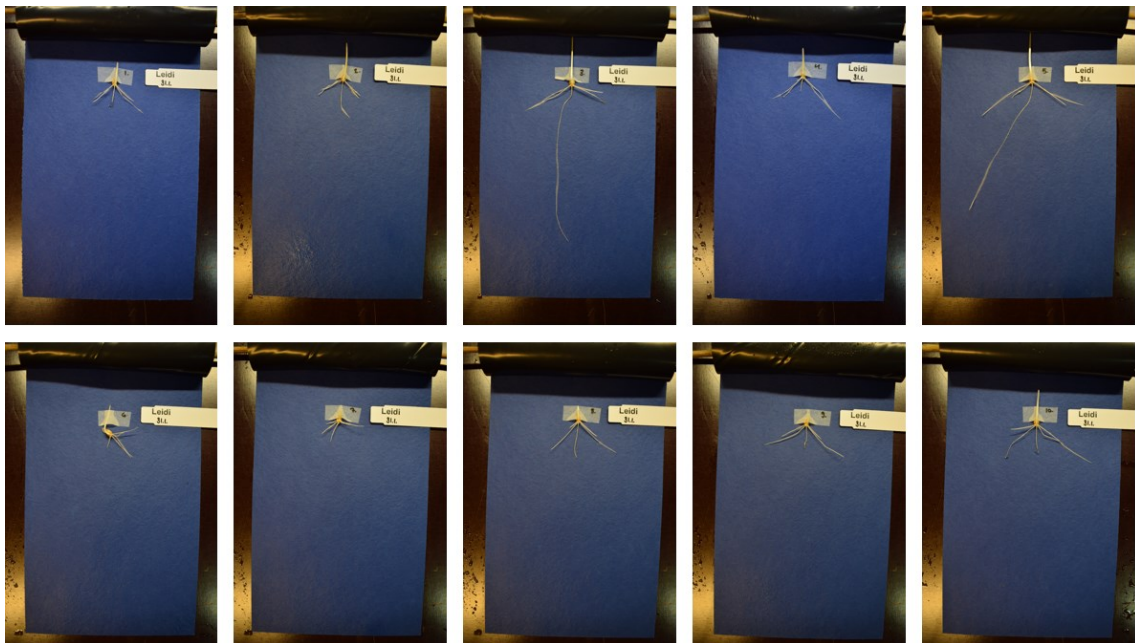
Liite 1

HELMI 31.1.2020

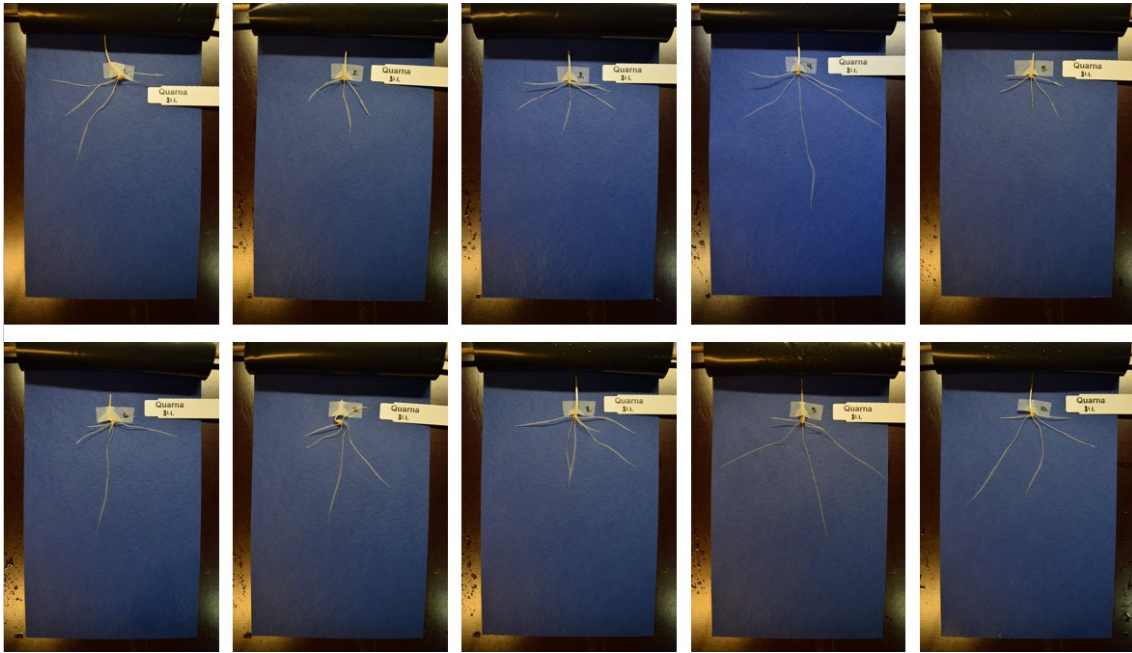


Liite 2

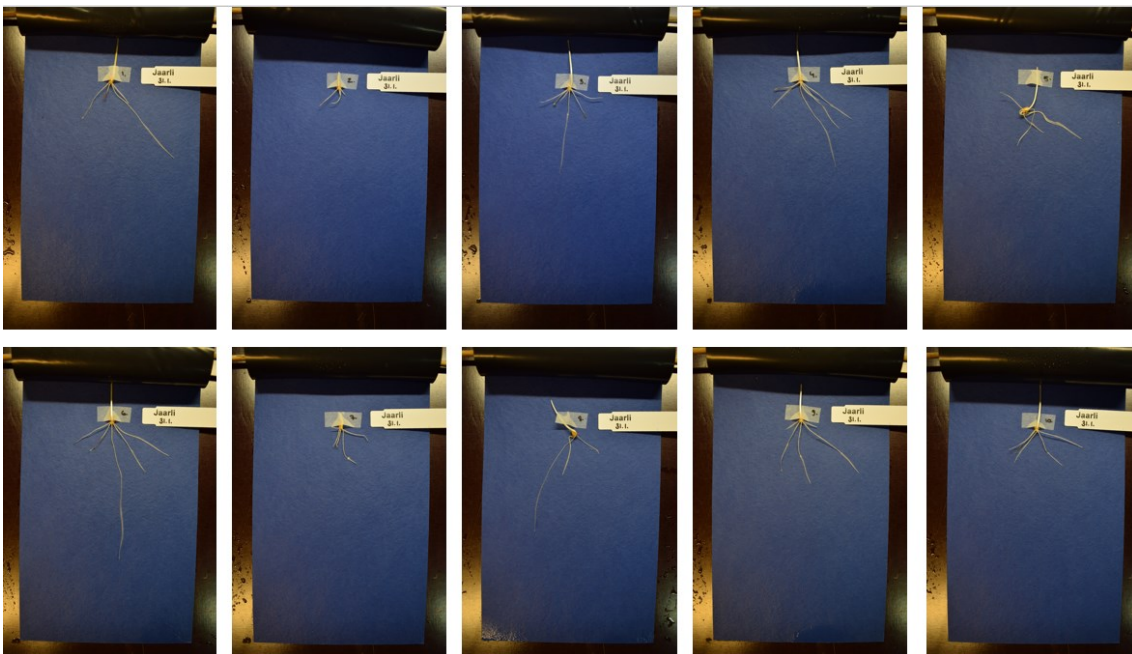
LEIDI 31.1.2020



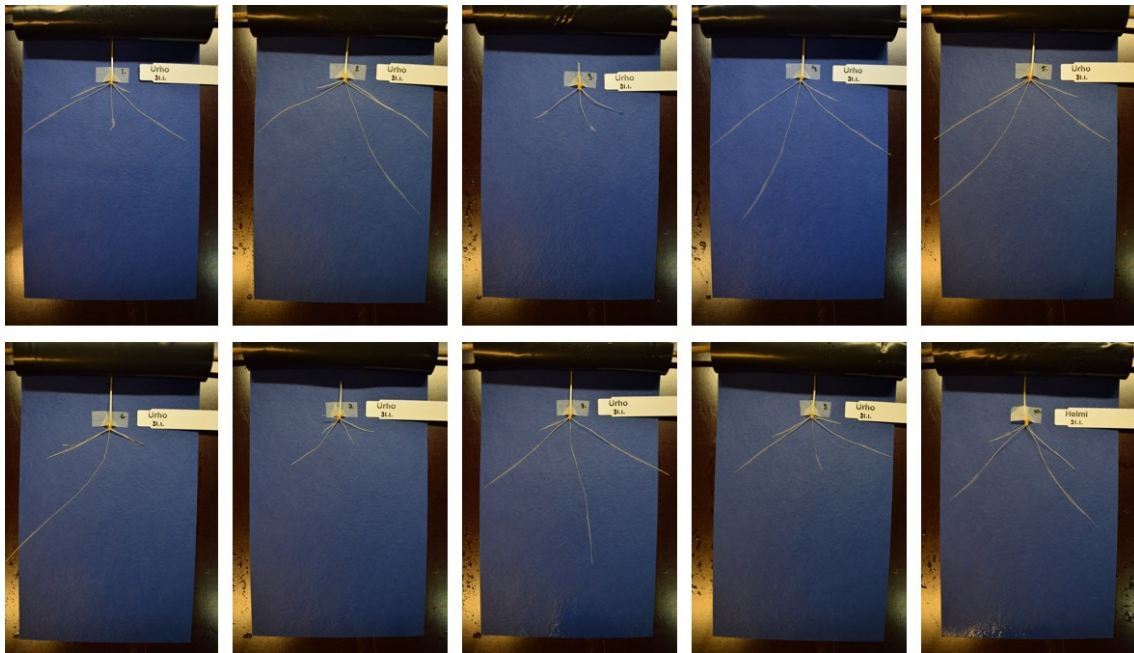
QUARNA 31.1.2020



JAARLI 31.1.2020



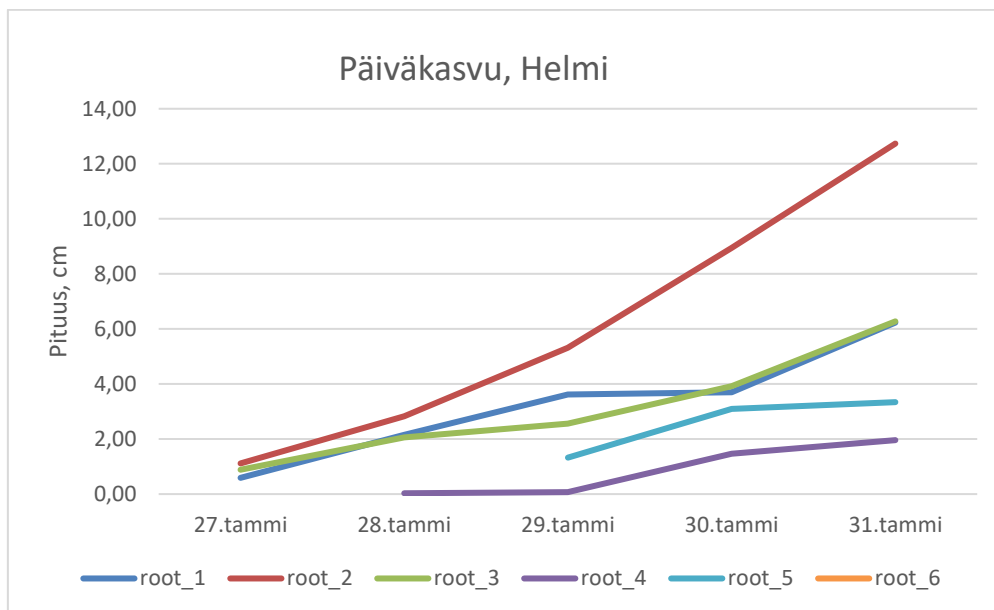
URHO 31.1.2020



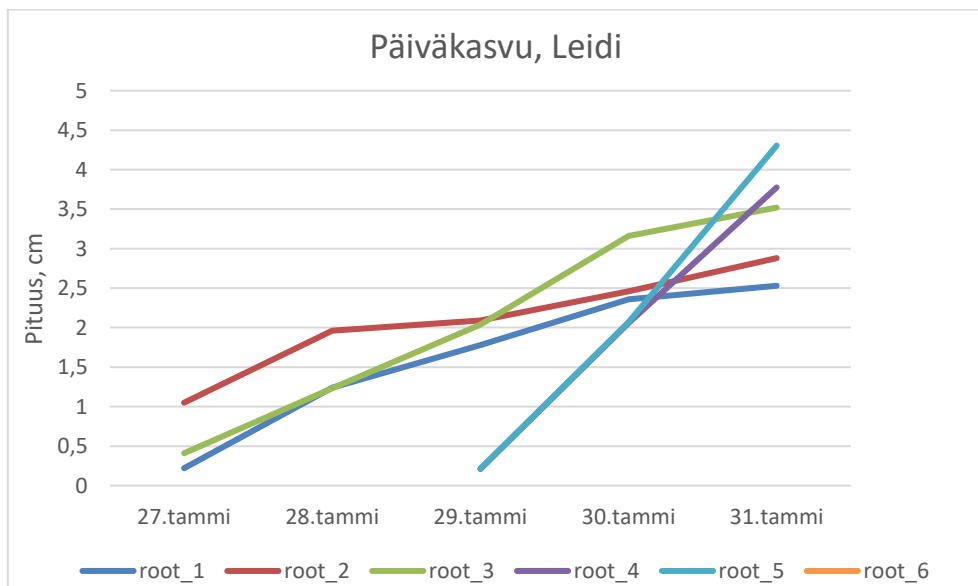
BOR14810 31.1.2020



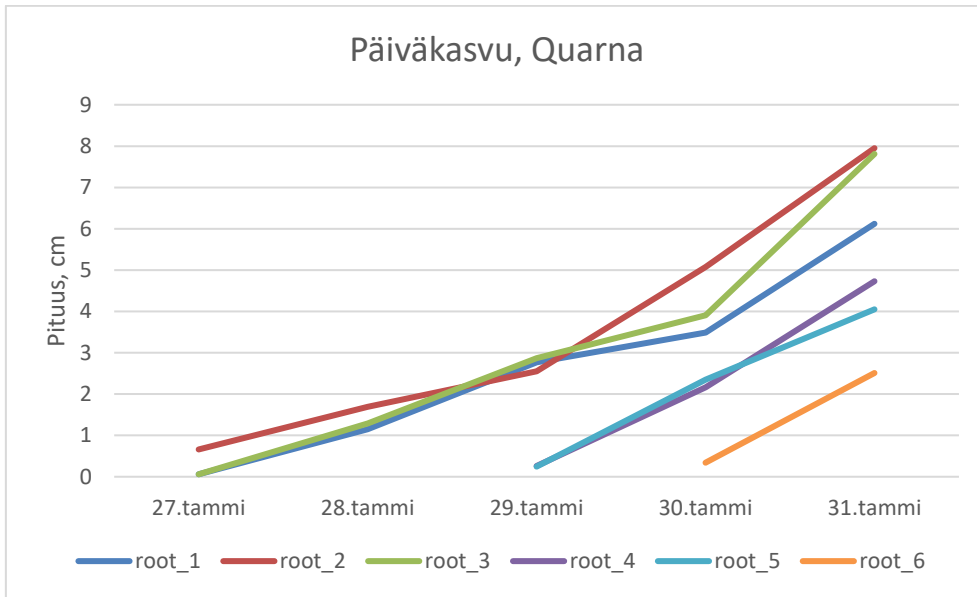
HELMIN PITUUSKASVU LAJIKEMEDIAANINA



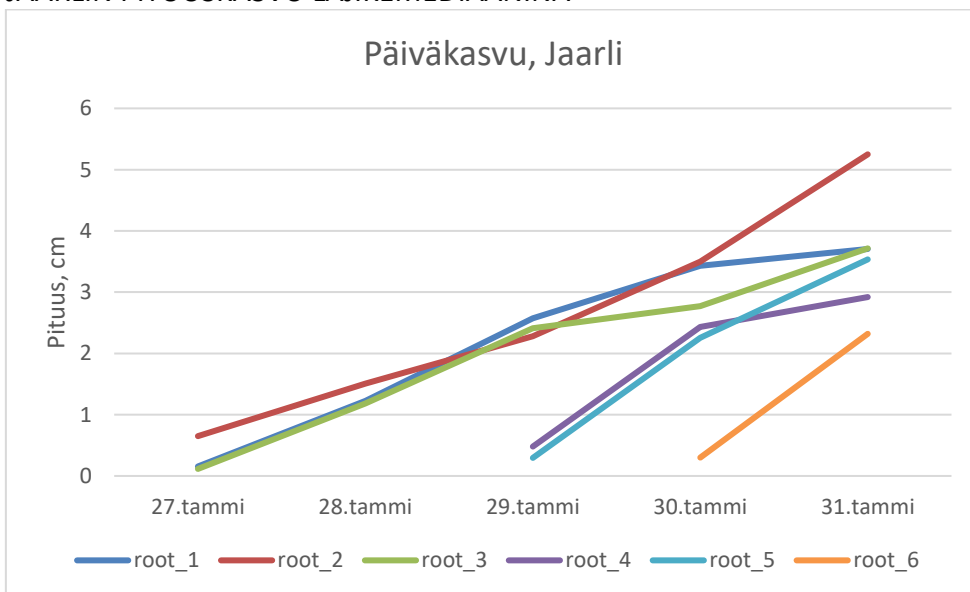
LEIDIN PITUUSKASVU LAJIKEMEDIAANINA



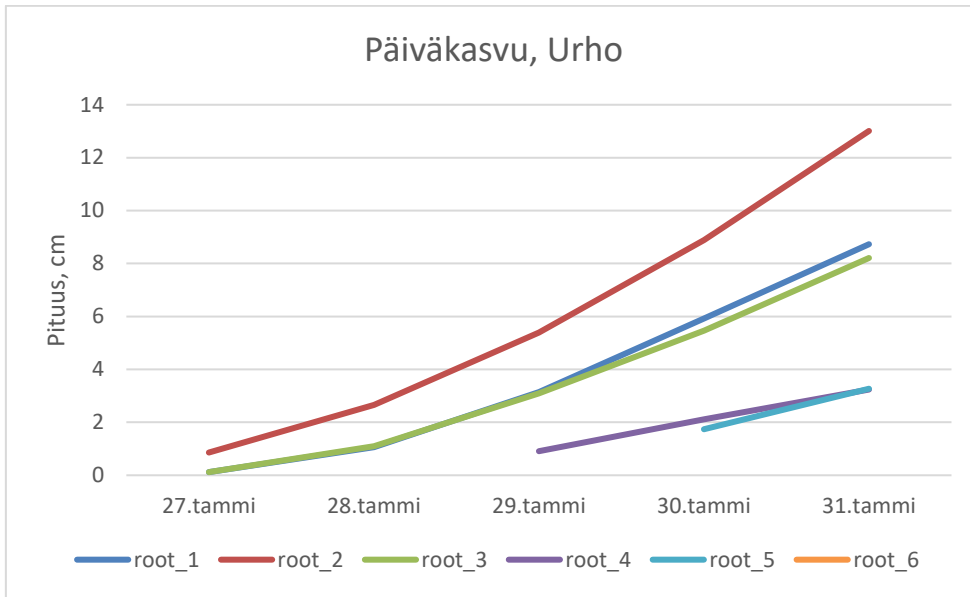
QUARNAN PITUUSKASVU LAJIKEMEDIAANINA



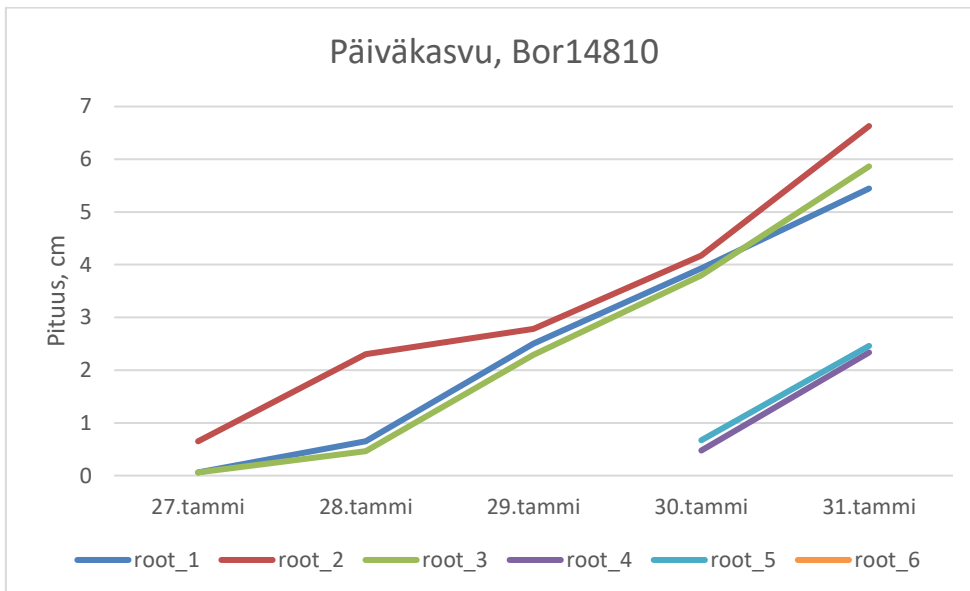
JAARLIN PITUUSKASVU LAJIKEMEDIAANINA



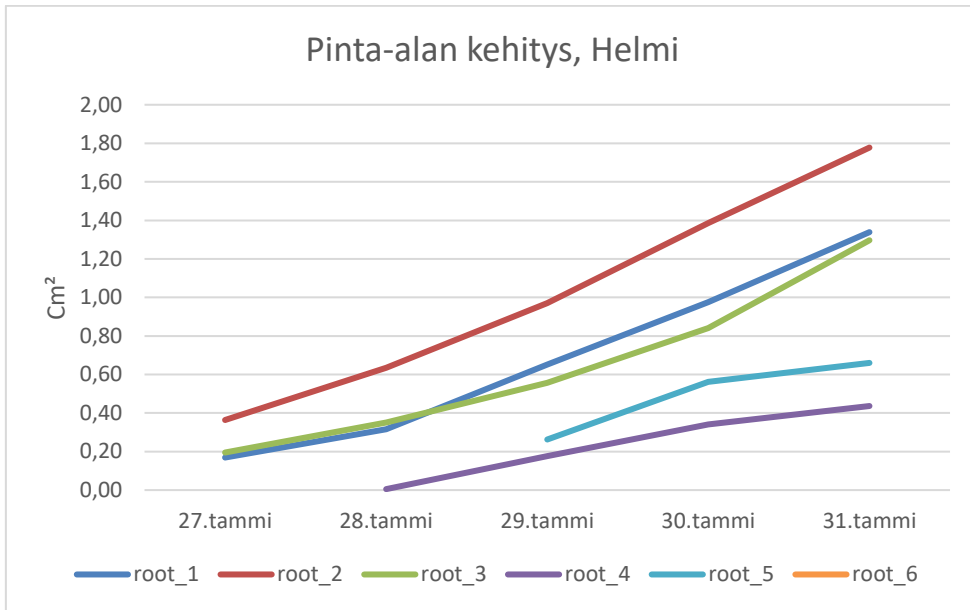
URHON PITUUSKASVU LAJIKEMEDIAANINA



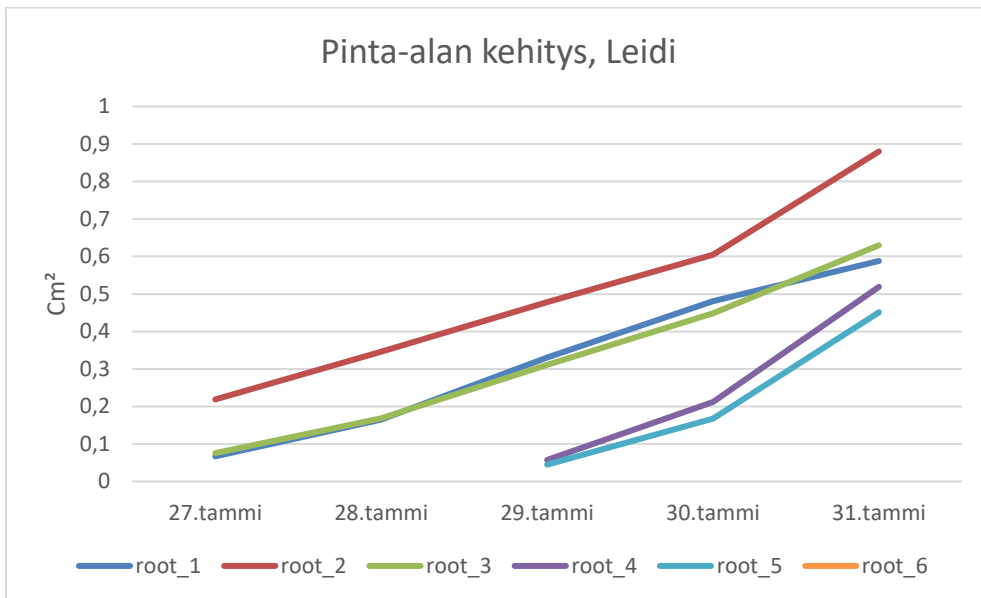
BOR14810 PITUUSKASVU LAJIKEMEDIAANINA



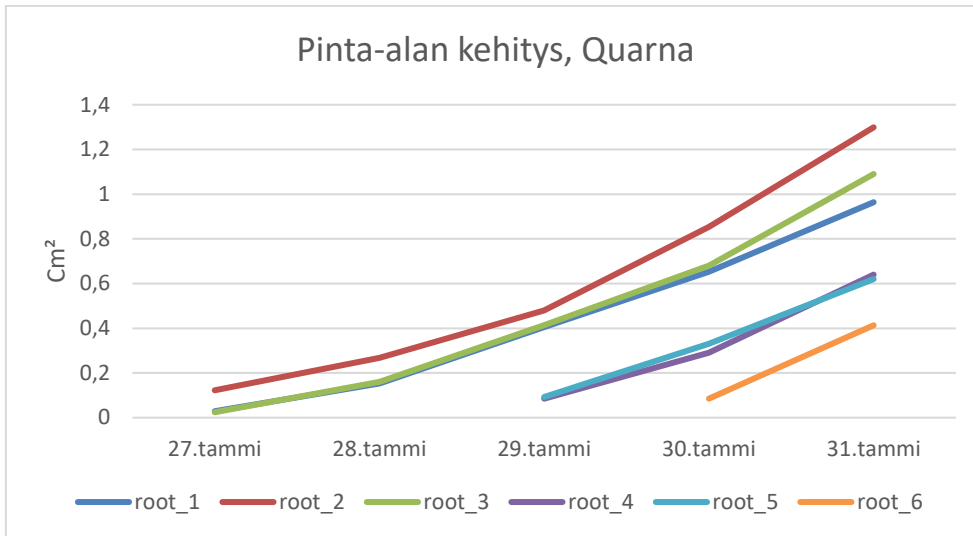
HELMIN PINTA-ALAN KEHITYS LAJIKEKASKIARVONA



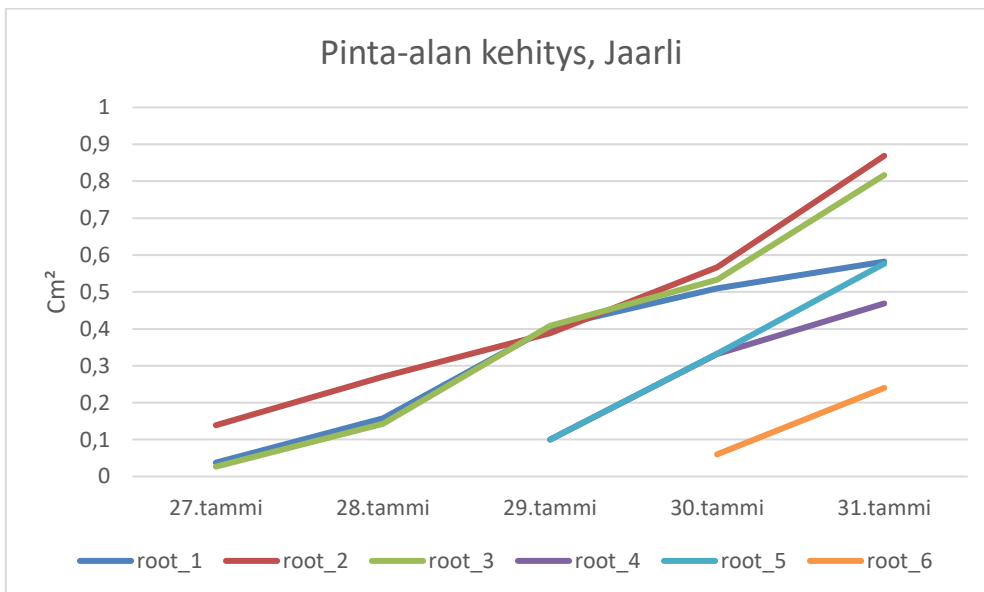
LEIDIN PINTA-ALAN KEHITYS LAJIKEKESKIARVONA



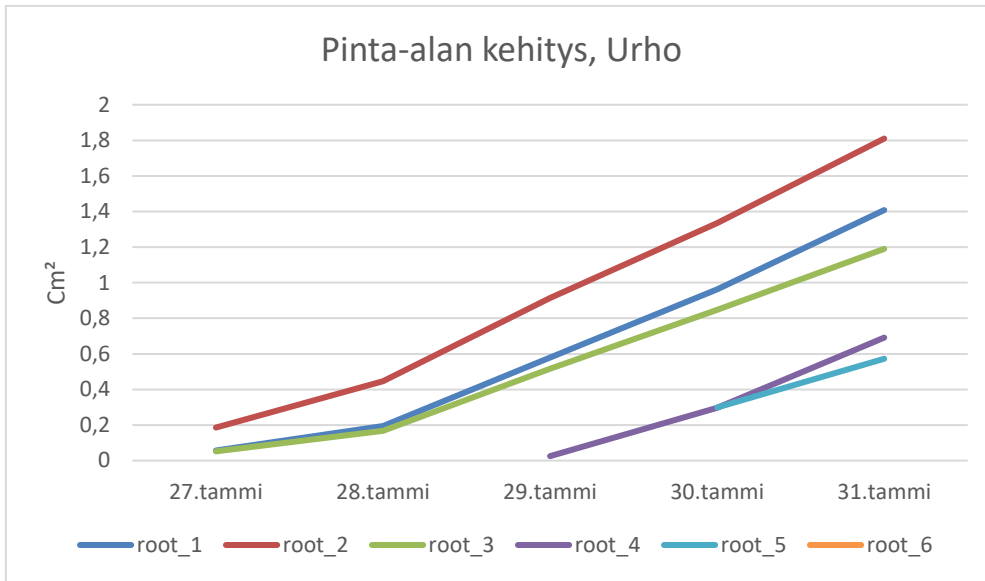
QUARNAN PINTA-ALAN KEHITYS LAJIKESKESKIARVONA



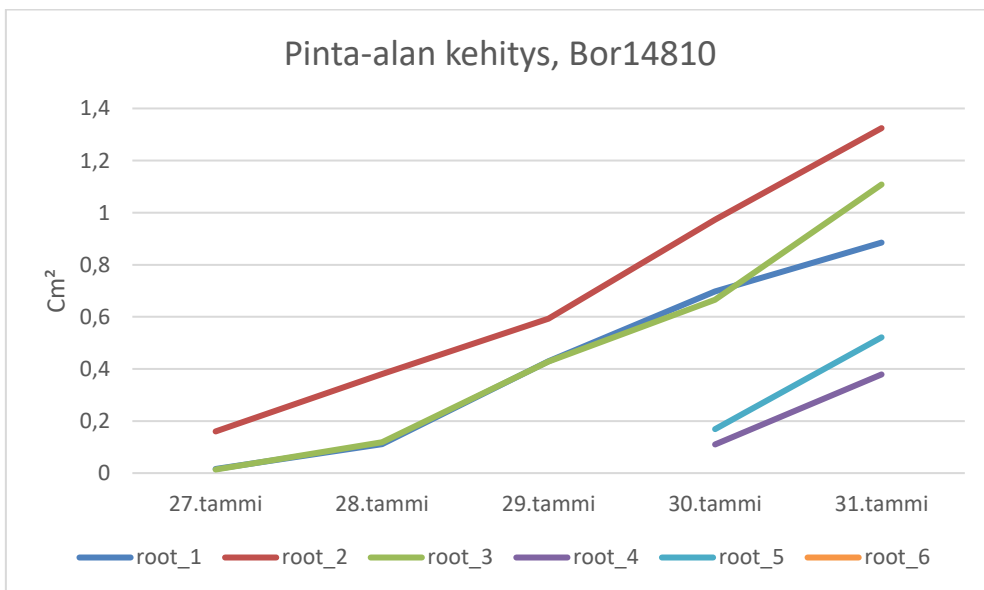
JAARLIN PINTA-ALAN KEHITYS LAJIKESKESKIARVONA



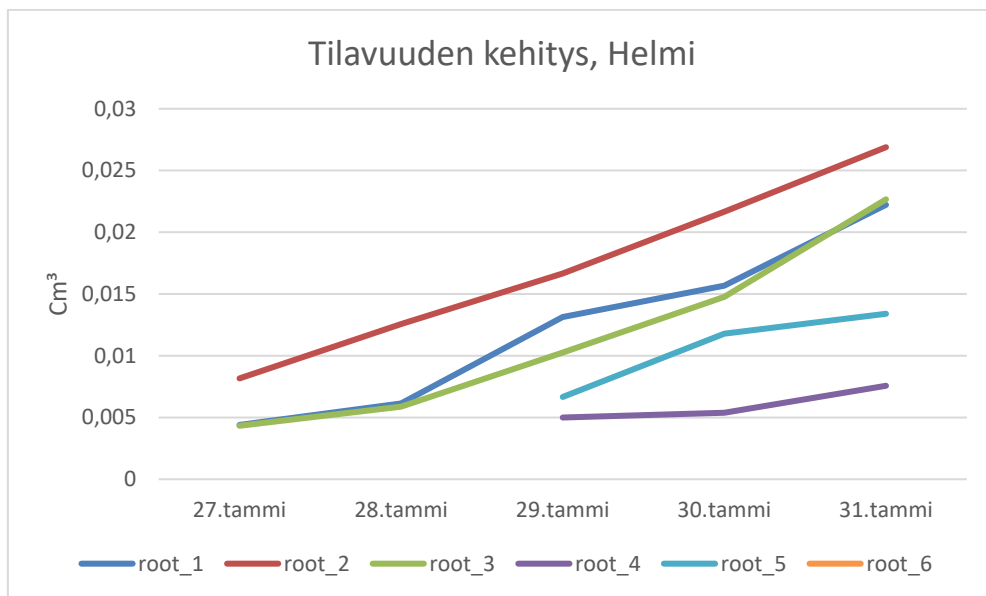
URHON PINTA-ALAN KEHITYS LAJIKESKESKIARVONA



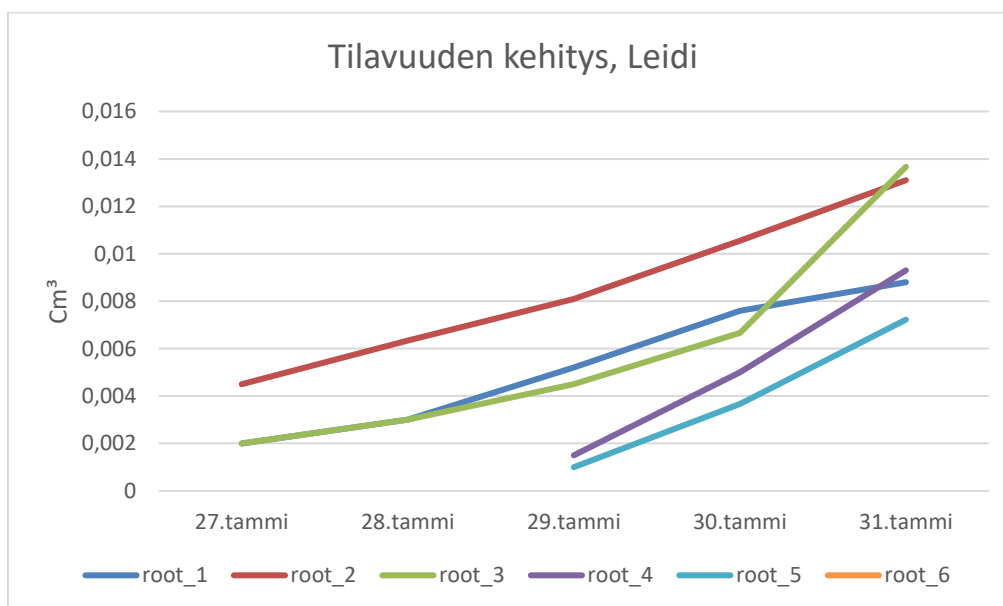
BOR14810 PINTA-ALAN KEHITYS LAJIKESKESKIARVONA



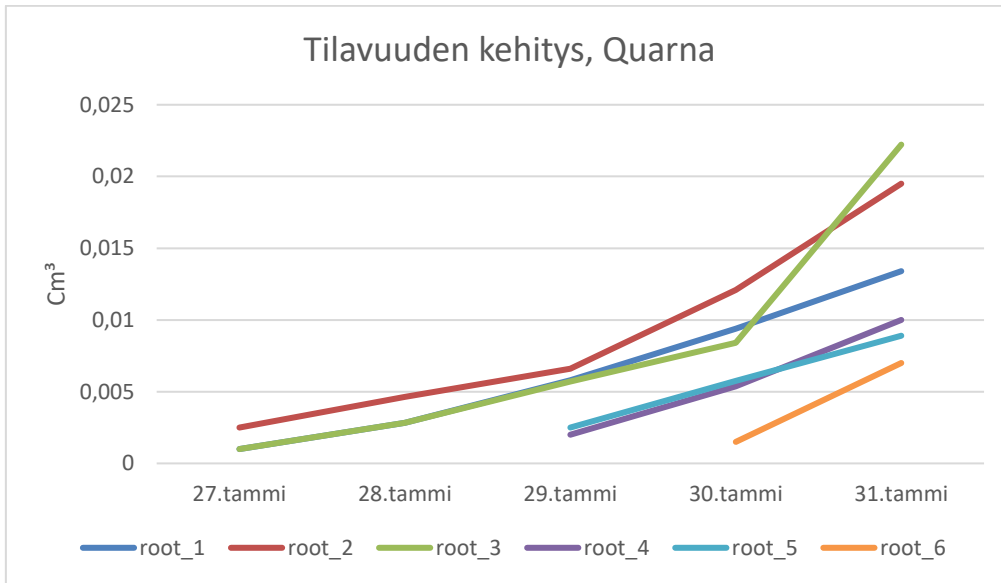
HELMIN TILAVUUDEN KEHITYS LAJIKESKESKIARVONA



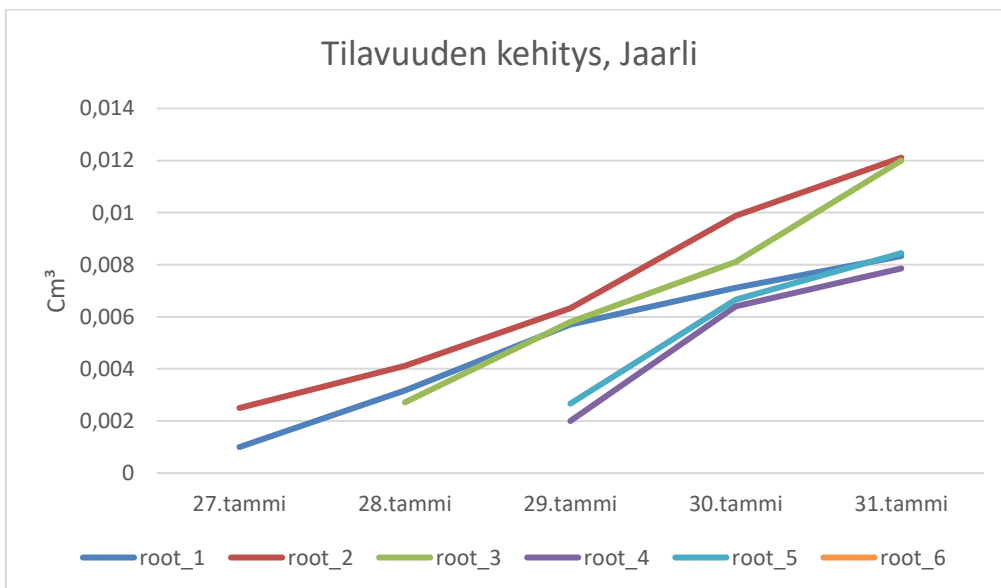
LEIDIN TILAVUUDEN KEHITYS LAJIKESKESKIARVONA



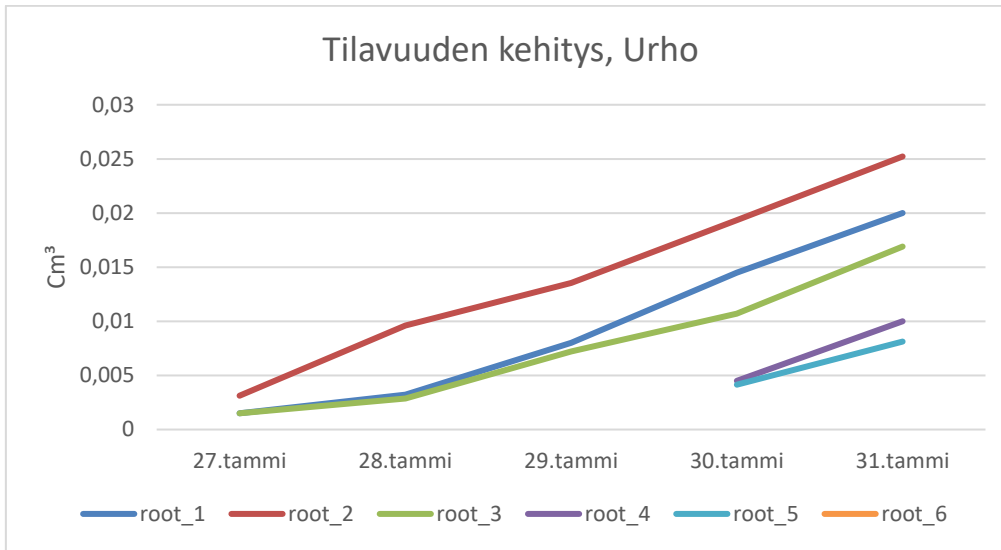
QUARNAN TILAVUUDEN KEHITYS LAJIKESKIARVONA



JAARLIN TILAVUUDEN KEHITYS LAJIKESKIARVONA



URHON TILAVUUDEN KEHITYS LAJIKESKESKIARVONA



BOR14810 TILAVUUDEN KEHITYS LAJIKESKESKIARVONA

