

HÄRKÄPAVUN JÄÄNNÖSTYPEN OTTO ERI VILJELYKASVEILLA

Jaakko Haarala
Maisterintutkielma
Maataloustieteiden
maisteriohjelma
Kasvinviljelytiede
Helsingin yliopisto
Maataloustieteiden
osasto
2019

HELSINGIN YLIOPISTO — HELSINGFORS UNIVERSITET —
UNIVERSITY OF HELSINKI

Tiedekunta/Osasto — Fakultet/Sektion — Faculty Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta		Osasto — Sektion — Department Maataloustieteiden osasto
Tekijä — Författare — Author Jaakko Haarala		
Työn nimi — Arbetets titel — Title Härkäpavun jäännöstypen otto eri viljelykasveilla		
Oppiaine — Läroämne — Subject Kasvintuotantotieteet, kasvinviljelytiede		
Työn laji — Arbetets art — Level Maisterintutkielma	Aika — Datum — Month and year Huhtikuu 2019	Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages 68 s.
Tiivistelmä – Referent - Abstract <p>Ilmastomuutos tuo mukanaan Suomeen äärioloja, jotka lisäävät tynen huuhtoutumista, mutta myös mahdollisuuksia pidempinä ja lämpimimpinä kasvukausina. Viimeisen kahdenkymmenen vuoden aikana lajikejalostus ei ole kuitenkaan lisännyt käytännön satotasoa, vaan sadot ovat jopa taantuneet. Laskeneet satotasot eivät selity pelkästään laskeneilla typpilannoitustasoilla, ja satokuilua onkin lähdetty ratkaisemaan monimuotoisemmalla viljelykierrolla, joihin sisältyy esimerkiksi härkäpapua. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää esikasvina toimineen härkäpavun (<i>Vicia faba</i> L.) vaikutusta maaperän liukoisiin typpivaroihin ja seuraavien viljelykasvustojen typpidynamiikkaan.</p> <p>Tutkimus toteutettiin Haltialan pellolla satunnaistettuna täydellisten lohkojen kerrannekokeena, jossa käsiteltynä oli yhteensä kuusi kasvia ja neljä lannoitustasoa. Kasvustoista mitattiin lehtivihreäpitoisuus, lehtialaindeksi (LAI) sekä määritettiin kuiva-aineen kehittyminen ja koeruuduista otettiin maanäytteet vähintään viidesti kasvukauden aikana. Biomassamääritysten pohjalta analysoitiin kasvinosien typpipitoisuudet ja laskettiin typpisadot. Maanäytteet uutettiin (2M KCl) NH_4^+- ja NO_3^--N-pitoisuuksien määrittämiseksi. Kasvustojen typpidynamiikkaa (NUE, UPE, UTE, NHI), typpisatoja ja koeruutujen mineralisaatiota sekä mineraalityppipitoisuuksia vertailtiin lannoitus ja esikasvi taustatekijöinä.</p> <p>Lämmin ja kuiva kasvukausi viivästytti kasvustojen sulkeutumista ja epätasaisuus vaikutti tuloksiin enemmän kuin esikasvi tai lannoitus. Lannoittamattomat kasvustot eivät eronneet tilastollisesti biomassaltaan tai tynenotoltaan lannoitetuista. Kasvien tynenotto vaikutti enemmän maaperän NO_3^--N kuin NH_4^+-N-pitoisuuksiin. Härkäpavesikasvi lisäsi kauran lehtialan kestoa (LAD). Laskennallinen mineralisaatio oli suurin nollalannoitusruuduissa, keskimäärin 127 N kg ha⁻¹. Kasvustojen UPE, UTE ja NUE jäivät pieniksi maan pintahorisontin ollessa lakastumisrajalla koko kesän.</p> <p>Härkäpavulla on hyvin todennäköisesti vaikutusta maan typpivaroihin, mutta tarkemmat arviot vaativat syvemmälle maahan ulottuvia mittauksia ja edullisemman kasvukauden.</p>		
Avainsanat — Nyckelord — Keywords Härkäpapu, typensidonta, esikasviarvo, mineralisaatio, tynenotto		
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited Helsingin yliopiston digitaalinen arkisto HELDA		
Muita tietoja — Övriga uppgifter — Further information Työtä ohjasi professori Pirjo Mäkelä		

HELSINGIN YLIOPISTO — HELSINGFORS UNIVERSITET —
UNIVERSITY OF HELSINKI

Tiedekunta/Osasto — Fakultet/Sektion — Faculty Faculty of Agriculture and Forestry		Osasto — Sektion — Department Department of Agricultural Sciences	
Tekijä — Författare — Author Jaakko Haarala			
Työn nimi — Arbetets titel — Title Residual nitrogen contribution of faba bean to succeeding crop plants			
Oppiaine — Läroämne — Subject Plant Production Sciences, Crop Science			
Työn laji — Arbetets art — Level M.Sc. Thesis		Aika — Datum — Month and year April 2019	Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages 68 p.
Tiivistelmä — Referat — Abstract <p>In Finland, the climate change induces extreme weather events, which will increase nitrogen leaching from soils, but it may also increase temperatures and lengthen growing seasons in favor of crops. However, in past twenty years plant breeding has not increased practical yields, which have in fact reverted. The decreased yield levels can not be explained solely by reduced nitrogen fertilization levels, thus narrowing the yield gap has been begun from introducing more diverse cropping rotations, which for example include faba bean. The aim of this study was to study the pre-crop effect of faba bean (<i>Vicia faba</i> L.) to soil mineral nitrogen levels and the nitrogen dynamics of the succeeding crop plants.</p> <p>The study was conducted as a field experiment in Haltiala with completely randomized block design including six plant and four fertilizer treatments. Leaf chlorophyll, leaf area index (LAI) and dry matter accumulation were determined and soil samples were taken at least five times during growing season. Nitrogen contents of different plant parts were analyzed to assess total nitrogen yield. Soil samples were extracted with 2M KCl solution to determine $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ concentrations. Crop nitrogen dynamics (NUE, UPE, UTE, NHI), nitrogen uptake, soil nitrogen mineralization and mineral nitrogen contents were compared with fertilization and pre-crop as covariates.</p> <p>Warm and dry growing season delayed canopy closure and uneven emergence affected the results more than pre-crop or fertilization. Zero-N plots did not significantly differ from fertilized plots in biomass or nitrogen accumulation. Nitrogen uptake had greater impact on soil $\text{NO}_3^-\text{-N}$-levels than on $\text{NH}_4^+\text{-N}$-levels. Faba bean as pre-crop increased leaf area duration in oats. Apparent mineralization was highest in zero-N plots, averaging 127 N kg ha⁻¹. Crop UPE, UTE and NUE were low because of below wilting-point moisture content of the topsoil layer.</p> <p>Faba bean has most likely affected the soil nitrogen reserves, but more precise estimations require deeper measurements and more favorable growing season.</p>			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords Faba bean, nitrogen fixation, pre-crop value, mineralization, nitrogen uptake			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited University of Helsinki Digital Archives HELDA			
Muita tietoja — Övriga uppgifter — Further information The thesis was supervised by Professor Pirjo Mäkelä			

LUETTELO TUTKIELMASSA KÄYTETTÄVISTÄ LYHENTEISTÄ

BNF	Biological nitrogen fixation, biologinen typensidonta
C/N-suhde	Hiili-typpisuhde
GDD	Growing degree days, lämpösumma
Kaura 0 N	Kaura, jonka typpilannoitustaso oli 0 kg ha ⁻¹ ja esikasvina härkäpapu
Kaura 50 N	Kaura, jonka typpilannoitustaso oli 50 kg ha ⁻¹ ja esikasvina härkäpapu
Kaura 90 N	Kaura, jonka typpilannoitustaso oli 90 kg ha ⁻¹ ja esikasvina kaura
LAD	Leaf area duration, lehtialankesto
LAI	Lehtialaindeksi
N	Typpi
NH ₄ ⁺	Ammoniumtyppi
NO ₂ ⁻	Nitriittityppi
NO ₃ ⁻	Nitraattityppi
NUE	Nitrogen use efficiency, typenkäytön hyötysuhde
Rapsi 0 N	Rapsi, jonka typpilannoitustaso oli 0 kg ha ⁻¹ ja esikasvina härkäpapu
Rapsi 90 N	Rapsi, jonka typpilannoitustaso oli 90 kg ha ⁻¹ ja esikasvina härkäpapu
UTE	Utilization efficiency, typen sadonmuodostuksen tehokkuus
UPE	Uptake efficiency, lannoitetypenoton tehokkuus

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	7
2 KATSAUS KIRJALLISUUTEEN	9
2.1 Typen kierto viljelysteemeissä	9
2.1.1 Typen mineralisaatio ja immobilisaatio	10
2.1.2 Ympäristöolosuhteiden vaikutus mineralisaatioon ja immobilisaatioon	11
2.1.3 Eloperäisen aineksen hiili-typpisuhde	12
2.3 Härkäpaju typensitojaesikasvina	14
2.3.1 Härkäpavun esikasviarvo	14
2.3.2 Härkäpavun typenotto ja -sidonta	15
2.3.3 Jäännöstypen mineralisaatio kirjallisuudessa	16
2.4 Typpi kasvinravitsemuksessa	18
2.4.1 Viljelykasvien typenotto	18
3 TUTKIMUKSEN TAVOITTEET	21
4 AINEISTO JA MENETELMÄT	22
4.1 Kenttäkoe ja käsittelyt	22
4.2 Havainnot ja näytteenotto	24
4.2.1 Maanäytteet	24
4.2.2 Kasvustonäytteet ja havainnot	25
4.2.3 Sadonkorjuu	26
4.2.4 Kasvukauden sää	26
4.3 Kemialliset analyysit	27
4.3.1 Maan ammonium- ja nitraattityppipitoisuus	27
4.3.2 Kasvinosien typpi- ja hiilipitoisuus	27
4.4 Laskutoimitukset	27
4.5 Tilastolliset menetelmät	28
5 TULOKSET	29
5.1 Kasvukauden sää- ja kosteusmittaukset	29
5.2 Kasvustojen morfologiset ominaisuudet	31
5.2.1 Kasvuston lehtivihreäpitoisuus	31
5.2.2 Kasvuston lehtialaindeksi	31
5.2.3 Kasvuston biomassa	32
5.2.4 Kasvuston sato ja satokomponentit	34

5.2.5 Typenotto	36
5.3 Maaperän mineraalityypipitoisuudet	38
5.4 Kasvustojen typenkäyttö ja maaperän typen mineralisaatio	38
5.4.1 Kasvustojen typenkäytön tehokkuus	38
5.5 Typenoton vaikutus maaperän tyypipitoisuuteen ja kasvuston lehtialaindeksiin.....	41
6 TULOSTEN TARKASTELU	43
6.1 Biomassa ja typenotto vaihteli runsaasti sekä kasvukauden aikana että kasvilajeittain.....	43
6.1.1 Lehtivihreäpitoisuus vaihteli kasvurytmin, kasvilajin ja lannoituksen myötä.....	43
6.1.2 Lehtialaindeksi korreloi typenoton kanssa	43
6.1.2 Kuumuus heikensi sadonmuodostusta, mutta nosti valkuaispitoisuutta	44
6.1.3 Typenotto oli runsasta, mutta lannoitetyypenkäytön tehokkuus jäi heikoksi	46
6.2 Kasvustojen typenotto vaikutti ruutujen mineraalityypipitoisuuksiin	47
6.2.1 Maaperän kuivuus heikensi mineralisaatiota muokkauskerroksessa kasvukaudella 2018.....	48
6.2.2 Vuoden 2018 härkäpapukasvuston mineralisaatiopotentiaali.....	49
6.3 Tutkimuksen virhelähteet ja ongelmat.....	50
7 JOHTOPÄÄTÖKSET	50
8 KIITOKSET	51
LÄHTEET.....	52
Liite 1: NÄYTTEENOTTOAJANKOHTA	66
Liite 2: VILJELYKASVIEN FRAKTIOINTITULOKSET	67

1 JOHDANTO

Suomen ilmasto muuttuu ja kasvukausien väliset erot ja ääriolosuhteet lisääntyvät jatkuvasti, kun globaali ilmastonmuutos etenee. Ilmaston lämpeneminen heijastuu N:n kiertoon viljelyjärjestelmissä sekä maaperädynamiikkaan, sillä talvet ovat todennäköisemmin entistä vähälumisempia ja maan routiminen heikkenee erityisesti Etelä-Suomessa (Mikkonen ym. 2014), kun taas kesälämpötilat nousevat entisestään ja sadanta muuttuu entistä epäsäännöllisemmäksi (Gregow ym. 2011). Lämpimien talvien ansiosta vetenä laskeutuva talvisadanta voi aiheuttaa ylimääräisiä N- ja fosforihuuhtoutumisia vesistöihin, ja jatkuvasti kosteana säilyvä maa ylläpitää denitrifikaatiobakteerien aktiivisuutta (Paasonen-Kivekäs ym. 2009). Nämä voivat osaltaan köyhdyttävät maaperän N-varantoja, muodostaen kasvihuoneilmiötä edistäviä N-oksidgeja. Entistä lämpimämmät kesät heikentävät viileisiin olosuhteisiin sopeutuneiden suomalaisten viljelykasvien satoa (Peltonen-Sainio ym. 2010) ja kasvukauden loppuun painottuva sadanta (Ilmasto-opas 2019), esim. suurina, yksittäisinä muutaman päivän rankkasateina, voi huuhtoa suuria määriä liukoista N:ä pois pelloilta kasvien käytettävistä (Paasonen-Kivekäs ym. 2009).

Ilmastonmuutosta on yleisesti pidetty uhkana ihmiskunnalle sekä ruoantuotannolle (Meehl ym. 2007) ja mukaan lukien Suomen maataloudelle, mutta joidenkin teorioiden mukaan ilmaston lämpenemisen pitäisi jopa lisätä viljelykasvien mahdollisuuksia ja satoa myös Suomessa (Peltonen-Sainio ym. 2009). Keskilämpötilan noususta huolimatta viime vuosina on havahduttu nykyisten viljelyjärjestelmien kestävyYTEEN, kun pitkän aikavälin tarkastelussa lajikejalostuksen luomat mahdollisuudet satopotentialin kasvuun eivät kuitenkaan ole toteutuneet käytännössä. Joissain tapauksissa satotasot ovat kääntyneet jopa laskuun (satokuilu) (Peltonen-Sainio ym. 2015).

N on yleisin kasvien kasvua rajoittava tekijä (Paasonen-Kivekäs ym. 2009) ja etsittäessä esimerkkiratkaisuja satokuilun kaventamiseksi voidaan todeta, että kasvintuotannon N-lannoitustasot ovat laskeneet (Evira (julkaisuvuosi ei tiedossa), ref. Peltonen-Sainio ym, 2015) EU:n yhteiseen maatalouspolitiikkaohjelmaan liittymisen jälkeen. Laskeneet lannoitustasot eivät kuitenkaan riitä selittämään koko satokuilua geneettisen potentiaalın ja toteutuneen satotason välillä (Peltonen-Sainio ym. 2015), koska esimerkiksi vehnän ja kauran NUE on parantunut (Muurinen 2007).

Kasvinjalostuksen ja satoisampien lajikkeiden lisäksi parempaa maanviljelyn kannattavuutta sekä riskienhallintaa on sittemmin selvitetty satokuilun kaventamisen kautta, ja mahdollisia ratkaisuja satokuilulle on etsitty negatiivisesti vaikuttavista abioottisista ja bioottisista tekijöistä, kuten maan tiivistymisestä ja kasvitaudeista. Näiden satoihin vaikuttavien tekijöiden minimoimista on esitetty ratkaistavan esimerkiksi monimuotoisemman viljelyvuorotuksen kautta, johon sisältyy palkokasveja (Peoples ym. 2009). Palkokasveihin kuuluvalla härkävavulla ja sen viljelyn lisääntymisellä pidentyvän kasvukauden ansiosta voi olla merkittäviä positiivisia vaikutuksia, alentaen viljojen tautipainetta (yhteisten taudinaiheuttajien puuttuessa) ja ne jättävät lisäksi jälkeensä orgaanista N:ä kasvinjäänteissä, jotka mineralisoituessaan toimivat N-lannoitteena seuraaville viljelykasveille (Peoples ym. 2009).

Härkäpapukasvuston kasvinjäänteissä maaperään päätyvän orgaanisen N:n dynamiikkaa ja mineralisaatiota on tutkittu maailmalla jonkin verran (Senaratne ja Hardarson 1988, Schwenke ym. 1998, Peoples ym. 2001, Turpin ym. 2002, Nyberg ja Lindén 2008), mutta eri olosuhteissa ja eri tavoin suoritettujen mittausten pohjalta on vaikeaa tehdä suoraa johtopäätöstä Suomen olosuhteisiin sovellettuna. Vertailukelpoisuutta on hankaloittanut tähän mennessä se, että suuri osa tutkimuksista on tehty ilmasto- ja kasvuolosuhteiltaan Suomeen verrattuna täysin erilaisessa Australiassa. Lisäksi osassa tutkimuksista on tehty keskimääräistä tarkempia, mutta hankalampia määrittäviä, jotka sisältävät myös maanalaisen kasvuston sisältämän ja erittämän N:n (Turpin ym. 2002, Mayer ym. 2003a, 2003b).

Tällä hetkellä BNF:n painotus (29% kaikesta sidotusta N:stä) pääsääntöisenä viljelykasvien ravinne-N:n lähteenä on tärkein kehittyvissä maissa sekä teollistuneiden valtioiden luonnonmukaisissa viljelyjärjestelmissä (Fowler ym. 2013). Viljelykustannusten minimoinnin ja ravinteiden hyötykäytön tehostamisen tärkeys ovat kuitenkin korostuneet entistä enemmän nykypäiväisessä, kannattavassa kasvintuotannossa. Kun yhtälöön lisätään useimpien viljelykasvien hyvä N-lannoitusvaste (Valkama ym. 2013), lisääntynyt kiinnostus kestävästä kehityksestä kohtaan, halu vähentää riippuvuutta fossiilisista tuotantopanoksista ja kasvanut paine kasvivalvokasvutuotantoa kohtaan, saavutti mielenkiintoisuus aiheen ympärillä riittävän tason härkävavun kasvinjäänteiden mineralisaationopeuden selvittämiseen suomalaisissa olosuhteissa, sisältäen mineralisaatiosta viljelykasvien käytettäväksi päätyvän liukoisen N:n määrän ja sen oton seuraavan kasvukauden viljelykasveille.

2 KATSAUS KIRJALLISUUTEEN

2.1 Typen kierto viljelysteemeissä

Kasveille ja muille eliöille tärkeästä roolistaan johtuen N:n kierto viljelyjärjestelmissä on loputon ilmakehän, maaperän, vesistön, kasvien, eläinten ja maaperäeliöiden välillä. Yleisesti kasvit sisältävät 1,5 – 5 % kuiva-aineestaan eloperäistä N:ä (Haynes 1986). Viljelykasvin maaperästä ottaman N:n paluu kasvinjäänteistä takaisin viljelyjärjestelmään uusien kasvien hyödynnettäväksi ei kuitenkaan ole itsestäänselvyys, vaan kierron mahdollistavat maaperän lukuiset mikroflorat ja -faunat, sienet sekä muut pieneliöt (Bardgett 2005). Kasvinjäänteiden hajotuksessa osa niiden sisältämistä ravinteista immobilisoituu mikrobeihin ja ylimäärä mineralisoituu mineraaliravinteiksi, kun taas osa vapautuu hiilidioksidina ja muina kaasuina ilmakehään (Haynes 1986). Loput ravinteet hajotetusta kasvinjäänteestä siirtyvät osaksi hajotusta kestävästä stabiilia orgaanista ainesta (Haynes 1986).

Kasvinjäänteillä on tärkeä rooli maaperän N:n kierrossa, sillä yli 90 % maaperän N-varannoista on sitoutuneena kuolleeseen eloperäiseen ainekseen (Haynes 1986, Gregory ja Nortcliff 2013). Seuraavien viljelykasvien käyttöön vapautuu hitaasti vuosien saatossa mineraali-N:ä, kun kuolleet mikrobikasvustot ja kasvinjäänteistä muodostunut eloperäinen aines mineralisoidaan uudelleen (Haynes 1986). Kasvinjäänteiden ja muun eloperäisen aineksen hajotuksessa vapautuu myös muita tärkeitä kasvinravinteita (esimerkiksi fosforia sekä rikkiä), ja aines mahdollistaa suuren osan maan kationinvaihtokapasiteetista (Parfitt ym. 1995, Jalali ym. 2014). Eloperäisen aineksen maatumiseen vaikuttavat muun muassa aineksen laatu, mineraali-N:n pitoisuus maaperässä, jäänteiden hajotusta vastustava kemiallinen resistenssi (esim. ligniini) sekä maan kosteus ja lämpötila (Fox ym. 1990, Havlin ym. 2005).

Pieneliöille suotuisimmat olot kasvinjäänteiden hajottamiseen suomalaisissa peltoolosuhteissa ovat keväisin ja syksyisin, kun maaperän kosteus on riittävä ja kasvinjäänteitä on runsaasti. Kasvintuotannon ravinteiden hyötykäytön kannalta nämä ajankohdat ovat haasteellisia, sillä korkeimmillaan olevaa hajotusta ja ravinteiden mineralisaatiota harvoin on hyödyntämässä suurimmillaan N:n tai muiden ravinteiden tarpeessa oleva kasvusto. Kasvinjäänteiden mineralisaation ja seuraavien viljelykasvien N-oton asynkronisaation vuoksi N:n kohtalona on hyvin tyypillisesti huuhtoutuminen,

joka laskee satopotentiaalia ja ravinteidenkäytön hyötysuhdetta (Báth 2000, Havlin ym. 2005).

2.1.1 Typen mineralisaatio ja immobilisaatio

Ihmisenäkökuulmasta tarkasteltuna mikrobikokoluokassa toteutuvat mineralisaatio ja immobilisaatio ovat prosesseja, jotka tapahtuvat käytännössä samassa pisteessä ja kilpailevat keskenään hajotettavan aineksen resursseista (Paul 2007). Mineralisaatioissa maaperämikrobit, sienet ja muut pieneliöt hajottavat eloperäistä ainesta ja muuttavat niiden sisältämät ravinteet mineraalimuotoon, jolloin ne ovat kasveille käyttökelpoisia (Bardgett 2005). Hajotuksen yhteydessä on huomattava, ettei kaikki N mineralisoidu kasvien käytettäväksi, vaan immobilisoituu väistämättä osaksi hajotuksen suorittaneita mikrobistoja/sieniä (Gregory ja Nortcliff 2013). Nämä eliöt suorittavat hajotuksen kasvattaakseen omaa biomassaansa ja niiden sitoma N vapautuu vasta eliöiden hajotessa (Gregory ja Nortcliff 2013). N:ä immobilisoituu eniten silloin, kun hajotettava eloperäinen aines sisältää niukasti N:ä suhteessa mikrobiston omaan kasvuun (Paul 2007). Mineralisoitunut ylimääräinen N voi myös sitoutua väliaikaisesti maan kationinvaihtopaikoille (Havlin ym. 2005). Näistä syistä johtuen mineralisaatio ei lisää viljelykierrossa olevan N:n määrää absoluuttisesti kuten N-lannoitus väkilannoitteilla, vaan prosessi lisää kasvien saatavilla olevan N:n määrää (Paul 2007). Nettomineralisaatio, josta vapautuu kasvien kasvua hyödyttävää mineraali-N:ä, toteutuu vasta silloin, kun bruttomineralisaatio ylittää bruttoimmobilisaation (Paul 2007).

Mineralisaatio (immobilisaatio) alkaa maaperän eloperäisestä aineksesta, jossa N on liukenemattomina, eloperäisinä polymeereinä, kuten stabiilina orgaanisena aineksena (humuksena), proteiineina, aminosokereina (kitiininä) tai nukleiinihappoina (Havlin ym. 2005). Nämä polymeerit ovat liian suuria läpäistäkseen mikrobien solukalvon sellaisenaan, jotta eliöt voisivat hyödyntää polymeerejä tai niiden osia omaan kasvuunsa. Läpäisyn mahdollistamiseksi mikrobit ja sienet erittävät entsyymejä, jotka pilkkovat aminisaatioissa polymeerit aminohapoiksi, amiineiksi ja ureaksi (Bardgett 2005, Havlin ym. 2005).

Yhteisnimitys N-pitoisten polymeerien hajoamistuotteille on liukoinen eloperäinen N (DON, dissolved organic nitrogen), jota voi jossain tapauksissa olla maassa jopa enemmän kuin epäorgaanista N:ä (Bardgett ym. 2003). DON voi olla N-lähde sekä kasveille että heterotrofisille bakteereille ja sienille (Schimel ja Bennett 2004, Bardgett

2005), mutta kasveille N-lähteenä DON on korostunut lähinnä matalatuottoisissa viljelyjärjestelmissä (Bardgett ym. 2003). DON:in hiilen ollessa mikrobien kasvua rajoittava tekijä, ne erittävät ylimääräisen N:n NH_4^+ -muodossa maaperään (Bardgett 2005).

Maaperän bakteerit (esim. *Pseudomonas* spp., *Bacillus* spp. (Paul 2007)), sienet (esim. *Mucor* spp., *Penicillium* spp., *Trichoderma* spp. (Kajak 1997, Deacon ym. 2006)), sukkula- ja änkyrimadot (*Nematoda*, *Enchytraeidae* (Kajak 1997), niveljalkaiset (*Arthropoda* (Kajak 1997) ja lierot (esim. *Lumbricus terrestris* (Paul 2007)) vaikuttavat N:n mineralisaatioon hyödyntämällä kasvinjäänteitä sekä hajottajabakteereja ja -sieniä ravinnokseen (Paasonen-Kivekäs ym. 2009). Lierojen ulosteet, joissa kasvinjäännökset ja maapartikkelit sekoittuvat, ovat erinomaisia kasvualustoja muille hajottajabakteereille ja -sienille (Paasonen-Kivekäs ym. 2009). Kun selkärangattomat hyönteiset käyttävät sieniä ja bakteereja ravinnokseen, ne vapauttavat sienten ja bakteerien immobilisoimia ravinteita ulosteissaan ja eritteissään kasvien hyödynnettäväksi (Bardgett 2005).

2.1.2 Ympäristöolosuhteiden vaikutus mineralisaatioon ja immobilisaatioon

Kasvinjäänteitä ja muuta eloperäistä ainesta hajottavat pääasiassa mikrobit, joita on jopa 80 % maan eliöistä (Paasonen-Kivekäs ym. 2009). Kasvinjäänteiden tehokas hajotus edellyttää sopivaa maaperän kosteutta ja lämpötilaa (Berg ja McClaughery 2014) ja hajottajamikrobien aktiivisuus on maksimaalinen, kun maaperän kosteus on 60 % (Salazar ym. 2018). Mikäli maan kosteus laskee alle 50 %:n, mikrobien tehokkuus eloperäisen aineksen hajotuksessa vähenee (Howard ja Howard 1993), koska mikrobit alkavat muuntautua kestonuotoihin selviytyäkseen kuivan kauden yli. Näin tapahtuu esimerkiksi keskikesällä, jolloin veden haihdunta on yleensä suurempaa kuin sadanta. Jos maaperän kosteus nousee yli 60 %:n, maan happipitoisuus pienenee aerobisten hajottajien haitaksi, jolloin anaerobisten nitrifikaatiobakteerien osuus ja aktiivisuus lisääntyy (Paul 2007).

Vaikka maaperän kuivuminen heikentää mikrobien aktiivisuutta ja hyvin pitkälle edetessään mikrobitoiminnan (ja mineralisaation) päättymisen, kuivuminen ja sen jälkeinen uudelleenkostuminen stimuloivat eloperäisen aineksen hajotusta ja N:n mineralisaatiota (Van Schreven 1968, Salazar ym. 2018). Kuivuminen aiheuttaa luultavasti osittaisen mikrobisolukoiden hajoamisen, jotka ovat selviytyvien mikrobisolujen hajotettavissa ja mineralisoitavissa maan kostuttua uudelleen (Haynes

1986, Guo ym. 2014). Lisäksi maan kuivuminen luultavasti aiheuttaa halkeamia maahorisonttiin (Reatto ym. 2009) ja kostuminen maapartikkeleiden turpoamista, jolloin nämä fyysiset muutokset voivat paljastaa hajottamatonta materiaalia mikrobeille mineralisaation raaka-aineeksi (Haynes 1986, Navarro-García ym. 2012).

Lämpötilan vaikutus mineralisaatioon on huomattava, sillä mikrobien aktiivisuus lisääntyy lämpötilan kasvaessa (Howard ja Howard 1993, Havlin ym. 2005). Äkilliset lämpötilamuutokset (esimerkiksi keväällä tai syksyllä) lisäävät N:n mineralisaatiota, sillä aiheutunut lämpötilastressi tappaa jakautuvia mikrobeja ja vapauttaa niiden immobilisoiman N:n selviytyvien mikrobien mineralisoitavaksi (Biederbeck ja Campbell 1973).

2.1.3 Eloperäisen aineksen hiili-typisuhde

Maaperän sekä sinne päätyvien ja hajotettavien kasvinjäänteiden mineralisaatiopotentiaalin arvostelussa käytetään jäänteiden C/N-suhdetta (Kaye ja Hart 1997, Bardgett 2005), joka ilmaisee maaperän vallitsevan oletettavimmin joko nettomineralisaatioissa tai -immobilisaatioissa. Jotta maaperässä voisi toteutua välitöntä N:n mineralisaatiota, pitää C/N-suhteen olla alle kriittisen suhteen, jolle annetaan kirjallisuudessa vaihtelevia arvoja. Kaye ja Hart (1997) sekä Havlin ym. (2005) ilmoittivat hajottajabakteerien ja -sienten oman C/N-suhteen huomattavasti pienemmäksi kuin hajotettavien kasvinjäänteiden C/N-suhde yleensä on (Taulukko 1). Hajottajat kuitenkin käyttävät soluhengityksessään suuren osan eloperäisen aineksen hiilestä energiantuotantoon, jolloin käytännössä kriittinen suhde voi olla hajotettavassa aineksessa korkeampi kuin mitä teoriassa on määritetty (Kaye ja Hart 1997, Bardgett ym. 2003). Lyhyellä aikavälillä kasvinjäänteiden korkea C/N-suhde voi estää mineralisoituvan N:n saatavuutta kasveille, koska tällöin N sitoutuu hajottajiin. Vasta pidemmällä aikavälillä näihin hajottajiin sitoutunut N parantaa kasvien N-ottoa, kun hajottajat kuolevat ja niiden sisältämä N päätyy takaisin kiertoon (Cassman ym. 1996, Eagle ym. 2000). N-pitoisten kasvinjäänteiden mineralisaatiota onkin mahdollista pitkittää alentamalla kasvinjäänteiden C/N-suhdetta lisäämällä maaperään esimerkiksi viljojen olkia (Vinten ym. 1998, Schwendener ym. 2005, Kaewpradit ym. 2008). Tällöin välitön lannoitusvaikutus jää pieneksi ja se jakautuu pidemmälle ajanjaksolle, jolloin esimerkiksi N:n huuhtoutumisriski voi pienentyä ja NUE parantua.

Taulukko 1. Eri kasvinjäänteiden, hajottajabakteerien ja -sienten sekä mineralisaation rajojen C/N-suhteet.

Kasvi/hajottaja/tapahtuma	C/N-suhde	Lähde
Härkäpapu	36	Nyberg ja Lindén (2008)
Härkäpapu	32	Peltonen ja Anttila (2017)
Kaura	111	Peltonen ja Anttila (2017)
Kevätvehnä	106	Peltonen ja Anttila (2017)
Kevätrypsi	54	Peltonen ja Anttila (2017)
Öllyhamppu	91	Peltonen ja Anttila (2017)
Hajottajabakteerit ja -sienet	12 < 4	Kaye ja Hart (1997)
Hajottajabakteerit ja -sienet	8	Havlin ym. (2005)
Mineralisaation raja	≤ 25	Haynes (1986)
Mineralisaation raja	≤ 30	Kaye ja Hart (1997)
Mineralisaation raja	≤ 20	Havlin ym. (2005)
Mineralisaation raja	≤ 25	Paul (2007)
Mineralisaation raja	≤ 25	Peltonen ja Anttila (2017)

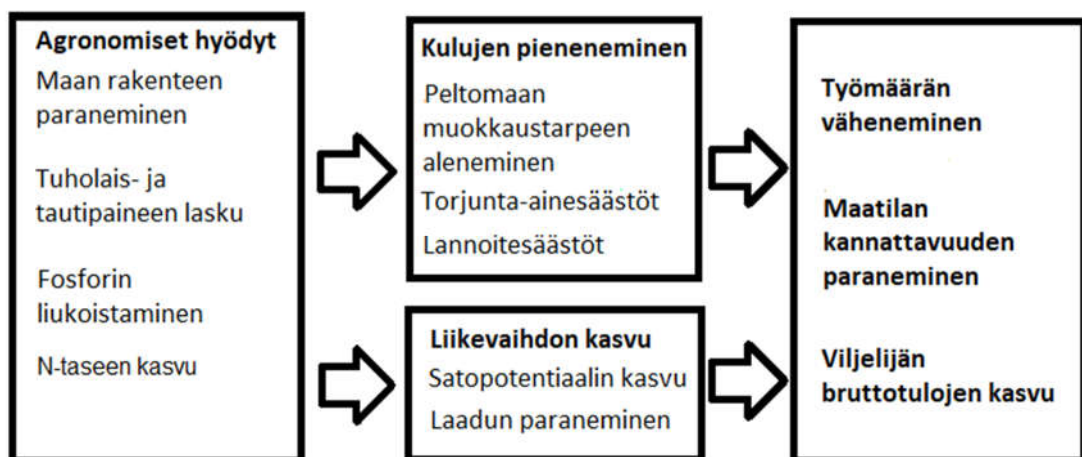
Haynesin (1986), Kayen ja Hartin (1997), Havlin ym. (2005), Paulin (2007) sekä Peltosen ja Anttilan (2017) esittämien kriittisten C/N-suhteiden (Taulukko 1) vaihteluista voidaan päätellä, että mineralisaatioon tarvittava suhde vaihtelee eri peltomaiden välillä, riippuen esimerkiksi eloperäisen aineksen määrästä ja maassa jo olevista mineraali-N-varannoista (peltomaan nykyisestä C/N-suhteesta). Hajotusprosessin tarkastelujakson kesto vaikuttaa olennaisesti siihen, havaitaanko tietyn C/N-suhteen kasvinjäänteistä N:n mineralisaatiota vai immobilisaatiota, sillä myös hyvin korkean C/N-suhteen kasvinjäänteistä toteutuu N:n mineralisaatiota riittävän pitkän tarkastelujakson aikana (Chen ym. 2014). Useimmat viljelykasvit ovat kuitenkin yksivuotisia, joten kasvinjäänteiden mineralisaatiosta tavoiteltavaan saman tai seuraavan kasvukauden N-lannoitusvaikutukseen yleensä suositetaan matalan C/N-suhteen kasvinjäänteitä. Tähän mennessä tutkituilla viljelykasveilla ei ole todettu olevan optimaalista C/N-suhdetta (Peltonen ja Anttila 2017), mutta kaksisirkkaisten C/N-suhde on korkeampi kuin yksisirkkaisten viljelykasvien suhde (Taulukko 1).

2.3 Härkäpapu typensitojaesikasvina

2.3.1 Härkäpavun esikasviarvo

Schilizzi ja Pannell (2001) ovat määritelleet esikasviarvon tietyn kasvin viljelyn arvokkuudeksi tietyssä viljelykierrossa. Käytännössä esikasviarvo muodostuu esikasvin kaikista kasvualustan viljavuuteen vaikuttavista tekijöistä, jotka edelleen toteutuvat sekä vaikutuksina seuraavan viljelykasvin sadon laadussa ja määrässä että toteutuneessa katetuotossa (Preissel ym. 2015). Vaikka esikasviarvoa käytetään yleensä positiivisen vaikutuksen kuvaamisessa, voivat vaikutukset olla myös negatiivisia, jotka ilmenevät monesti kasvin ollessa esikasvina itselleen (Robson ym. 2002, Preissel ym. 2015).

Täydellisen esikasviarvon määrittely tietylle kasville on hankalaa, sillä arvo muodostuu useammista osatekijöistä. Esimerkiksi härkäpavun esikasviarvo seuraavalle viljelykasville voi kokonaisuudessaan muodostua muutoksesta N-taseessa tai muiden ravinteiden saatavuudessa sekä tautipaineen ja/tai peltomaan fyysisen rakenteen muutoksista (Kuva 1, Peoples ym. 2009). Kuhunkin näistä osatekijöistä vaikuttavat puolestaan taustatekijät, esimerkiksi kasvukauden sääolosuhteet ja peltomaan laji (López-Bellido ym. 2012, Abdalla ym. 2015). Taustatekijät vaikuttavat voimakkaasti viljelykasvien kasvuun, jonka vuoksi ne säätelevät osatekijöiden ilmenemisen voimakkuutta esi- ja seuraavan viljelykasvin kasvukausien aikana (Kirkegaard ja Ryan 2014).



Kuva 1. Palkokasvien esikasviarvot viljelyjärjestelmiin (muokattu Preissel ym. 2015).

Jo pelkästään osatekijöiden vaihtelusta ja mahdollisista ristikytkennöistä johtuen, yleensä on järkevää yrittää muodostaa tarkka kuva vain yksittäisestä tietyn kasvin esikasviarvoa kasvattavasta osatekijästä, kuten härkäpavun tapauksessa N-lannoitusarvosta.

2.3.2 Härkäpavun typenotto ja -sidonta

Härkäpapu pystyy sitomaan muiden hernekasvien tapaan kasvuunsa vaatiman N:n härkäpapuun erikoistuneen *Rhizobium leguminosarum* -bakteerin kanssa muodostetussa symbioosissa (Carter ym. 1994). Kehityksensä alussa härkäpapu hyödyntää maaperän N-varantoja, mutta soveltuvan bakteerikannan löytyessä bakteeri infektoi härkäpavun juuren ja muodostaa BNF:n mahdollistavan juurinystyrän (Van Berkum ym. 1995). Nystyrän mahdollistamassa suojassa symbioosin toiminta jatkuu niin kauan, kun härkäpapu jakaa yhteyttämistuotteitaan energianlähteeksi N₂:n kaksoissidoksen hajottamiseksi ja muuttamiseksi kasvin hyödyntämään NH₄⁺-muotoon (Paasonen-Kivekäs ym. 2009). Runsaat maaperän N-varannot (Turpin ym. 2002) tai kasvin kokema kuivuusstressi (Guérin ym. 1991) kuitenkin vähentävät BNF:n osuutta kaikesta kasvustoon sidotusta N:stä, koska maaperän NH₄⁺ on suoraan käyttökelpoista (Haynes ja Goh 1978) ja NO₃⁻:n pelkistäminen NH₄⁺:ksi on energiataloudellisesti edullisempaa kuin BNF ilmakehästä (Kaschuk ym. 2009).

Tutkimuksissa (Taulukko 2) on todettu, että härkäpapu voi sitoa huomattavia määriä N:ä lannoituksesta tai maaperän N-varannoista huolimatta ja täten kasvattaa maaperän N-tasetta BNF:llä, jonka taso on vaihdellut 38 ja 88 %:n välillä kaikesta N-sidonnasta maanpäälliseen biomassaan. Vaikka härkäpavun ilmasta sitoman N:n osuus toteutuisikin maaperän N-taseen kasvun kannalta edullisen runsaana, vaikuttaa kasvuston biomassan muodostuminen enemmän lopulliseen tasemuutokseen (Peoples ym. 2001). Yleensä suuri osa (> 40 %) kasvuston sitomasta N:stä poistuu korjatun siemensadon mukana (Schwenke ym. 1998, Turpin ym. 2002, Nyberg ja Lindén 2008), jolloin nettovaikutus maan N-taseeseen jää varsin vaatimattomaksi ja kasvinjäänteiden suhteellinen N-pitoisuus pienenee (Taulukko 2). Kasvustojen sitoman N:n ja maanpäällisten kuiva-ainesatojen suhteesta laskettuna saataisiin maaperään netto-N:ä härkäpavun kasvinjäänteistä keskimäärin 12 kg ha⁻¹ tn⁻¹ kuiva-ainetta kohden (Taulukko 2).

2.3.3 Jäännöstypen mineralisaatio kirjallisuudessa

Näennäinen netto-N:n sidonta (Taulukko 2) ei kuitenkaan takaa, että puidun härkäpapukasvuston C/N-suhde olisi välttämättä optimaalinen välittömälle nettomineralisaatiolle (Senaratne ja Hardarson 1988, Nyberg ja Lindén 2008), vaan mineralisaatioon vaaditun N-pitoisuuden tulee kasvinjäänteissä olla riittävä (Taulukko 1). Senaratne ja Hardarson (1988) ovat todenneet härkäpapua seuranneiden durrin (*Sorghum bicolor* L) ja ohran (*Hordeum vulgare* L.) yhteenlasketun kokonais-N-oton olevan pelkän juuriston muokkaamiseen verrattuna 24 kg ha⁻¹ pienempi, kun härkäpapukasvuston juuret ja varsisto muokattiin yhdessä maahan. Pelkkien juuristojäänteiden kanssa ensimmäiselle kasville (durrille) nettomineralisaatio todettiin nopeammaksi, kun kaikista kasvinjäänteistä peräisin oleva N vapautui suuremmin vasta toiselle viljelykasville (ohrille) (Senaratne ja Hardarson 1988), koska yhteenlaskettu suhteellinen N-pitoisuus oli luultavasti pienempi kuin pelkällä juuristolla.

Kuten Senaratne ja Hardarson (1988) lisäksi havaitsivat härkäpavun ottavan kasvuunsa noin 20 kg ha⁻¹ vähemmän maaperän N:ä kuin kontrollin, myös Nyberg ja Lindén (2008) havaitsivat maaperässä olevan härkäpavun jälkeen 17 kg ha⁻¹ enemmän N:ä kuin kontrollin jälkeen. Kuitenkin toisen vuoden jälkeen, kauraesikasviin verrattuna nettomineralisaatio oli kuluneen vuoden aikana vain 3 kg N:ä ha⁻¹ suurempi (yhteensä 60 kg N:ä ha⁻¹) kun esikasvina oli ollut härkäpapu, ja kolmantena vuotena molempien esikasvien jäljiltä vuoden nettomineralisaatio oli tasaantunut 59 kg N:ä ha⁻¹ (Nyberg ja Lindén 2008). Kolmivuotisessa kanadalaisessa tutkimuksessa verrattiin härkäpavun ja ohran vaikutusta seuraavien viljelykasvien N-ottoon. Ensimmäisen vuotena vehnän N-otto oli 34 kg ha⁻¹ suurempi härkäpavun jälkeen, toisen vuoden jälkeen rapsin N-otto oli 27 kg ha⁻¹ suurempi, mutta kolmentena vuotena esikasvi ei enää vaikuttanut viljelykasvin N-ottoon (Lupwayi ja Soon 2016).

Johtopäätöksenä Senaratne ja Hardarson (1988) sekä Nyberg ja Lindén (2008) totesivat puidun kasvuston N-lannoitusvaikutuksen perustuvan härkäpavun kasvukauden aikana mineralisoituneeseen N:een, joka oli voinut N-omavaraisen härkäpavun jälkeen säilyä maassa edullisen talvikauden aikana huuhtoutumattomana ja päätynyt seuraavan kasvukauden kasvien hyödynnettäväksi.

Taulukko 2. Eri tutkimusten taustoja ja tuloksia härkäpavun N-sidonnasta sekä nettovaikutuksesta maaperän N-taseeseen.

Lähde	Lannoite + maaperä kylvössä (N kg ha ⁻¹)	Kasvuston kuiva-aine (tn ha ⁻¹)	N (kg ha ⁻¹)			Netto- lisäys	BFN: kasvuston N (%)	Sadonkorjuun jälkeinen varsiston N- pitoisuus (%)
			Kasvusto	Sidonta	Juuristo			
Jensen (1986)	0+84	5,1*	288	220	-	-	70	-
Jensen (1986)	50+84	5,1*	281	187	-	-	66	-
Senaratne ja Hardarson (1988)	20+?	5,6	113	85	11	59	75	1,6
Schwenke ym. (1998)	0+71	2,4	67	33	22	20	38	2,3
Schwenke ym. (1998)	0+53	4,6	120	97	40	53	60	2,2
Peoples ym. (2001)	0+?	?	180	135	48	84	75	-
Turpin ym. (2002)	0+13	8,6	284	250	66	136	88	2,1 - 2,6
Turpin ym. (2002)	50+?	8,4	340	275	66	157	81	3,3 - 4,1
Nyberg ja Lindén (2008)	0+?	8,6	180	?	27	65	?	1,29
Lupwayi ja Soon (2015, 2016)	11+?	5,6	243	184	-	94	76	2,8

*: vain siemensato

BFN: biologinen typensidonta

2.4 Typpi kasvinravitsemuksessa

Maapallon ilmakehän runsain alkuaine, N, on kemiallisesti passiivinen kaasu (N_2) muodostamansa kolmoissidoksen ansiosta, joten se on myös kasvinravinteena monissa luonnollisissa ja ihmisen luomissa viljelyekosysteemeissä yleisin kasvua rajoittava ravinne (Paasonen-Kivekäs ym. 2009). Kasvit eivät voi liittää kaasumuodossa olevaa N:ä metaboliassa yhdisteisiin, jonka vuoksi kasvien käyttämä N täytyy olla sidottuna esimerkiksi epäorgaaniseen muotoon NO_3^- , NO_2^- , tai NH_4^+ -muotoon (Criddle ym. 1988). Näitä N:n muotoja (pääasiassa NO_3^- ja NH_4^+) ne ottavat juurten avulla maanesteestä, josta se siirtyy kasviin pääasiassa massavirtauksen ja diffuusion avulla (Havlin ym. 2005), joskin sienijuurten tiedetään auttavan kasveja orgaanisen N:n ottamisessa (Paul 2007). Jos viljelykasvien käytettävissä olisi esikasvista vapautuvaa N:ä, toteutuva lannoitusvaikutus korvaisi suhteellisesti enemmän väkilannoitusta, sillä 50-75% levitetystä väkilannoite-N:stä päätyy viljelykasvien käyttöön (Lindén 2008) ja loppu on kasvien käyttämättömissä johtuen pääasiassa denitrifikaatio- ja ammoniakkipäästöistä sekä huuhtoutumisesta (Smil 1999, Crews ja Peoples 2004).

2.4.1 Viljelykasvien typenotto

Viljelykasvien käyttämien NO_3^- - tai NH_4^+ -muotojen ottamisen välillä voi olla eroja riippuen määristä ja kasvin kehitysvaiheesta, vaikka kasvien kasvu on yleensä parempaa NO_3^- :n ja NH_4^+ :n yhdistelmällä (Havlin ym. 2005). NH_4^+ :ä pidetään kasveille yhteyttämisen kannalta taloudellisempänä vaihtoehtona, sillä NO_3^- :n viljelykasvi joutuu pelkistämään NH_4^+ :ksi ennen sitomista glutamiiniin (Havlin ym. 2005). Toisaalta NH_4^+ :n ollessa kationi, suuret pitoisuudet kilpailevat otosta muiden kationien kanssa ja täten heikentää esim. kaliuminottoa (Havlin ym. 2005). Havlin ym. (2005) sekä Britto ja Kronzucker (2013) esittävät, että viljelykasvit voivat suosia jompaakumpaa mineraali-N:n muotoa riippuen esimerkiksi kasvin iästä, lajista ja ympäristöstä. Havlinin ym. (2005) mukaan viljoille (*Poaceae*) mineraali-N:n muodolla ei olisi merkitystä mutta, kaalikasvit (*Brassicaceae*) suosisivat NO_3^- :a ja koisokasvit (*Solanaceae*) suosisivat suurempaa NO_3^-/NH_4^+ -suhdetta.

Eri viljelykasvien N-otto sekä saatu lisätuotto jokaiselle käytetylle N-kilolle riippuu kasvin perimästä ja ympäristöolosuhteista. N-oton suora kvantitatiivinen määrittäminen ja vertailu ei tällöin ole mielekäs, koska yleensä sadonlisä käytettyä N-kiloa kohden

laskee, mitä enemmän sitä käytetään (Dreccer ym. 2000, Sylvester-Bradley ja Kindred 2009, Nyiraneza ym. 2012). Näistä syistä mielenkiintoisempi suure viljelykasvien N-oton erojen mittaamiseen on NUE, joka määritellään saatuna satona suhteessa käytettyyn N-lannoitukseen ($\text{kg kg}^{-1} \text{N}$) (Moll ym. 1982).

Mollin ym. (1982) määritelmän mukaan NUE koostuu lannoite-N:n oton (UPE) ja käytön (UTE) tehokkuudesta, josta UPE voidaan jakaa edelleen kasvuston kokonais-N:n sekä lannoitteesta otetun N:n suhteeseen ja UTE jakaa sadon kokonaismassan sekä kokonais-N:n suhteeseen. Toisin kuin haluttuun ajankohtaan ajoitettu lisälannoitus väkilannoitteella, ympäristöolosuhteista riippuvan kasvinjäänteiden mineralisaation ajoittumiseen ei juuri voida vaikuttaa. Täten korkea NUE (UPE) on haluttava ominaisuus härkävavun jälkeen viljeltävillä kasveilla, jotta kasvustot hyödyntäisivät mineralisoituneen N:n tehokkaasti ja huuhtoutumistappiot jäisivät minimaalisiksi. Härkävavun viljely esikasvina voi myös tehostaa seuraavien viljelykasvien NUE:ta parempien kasvuolosuhteiden, kuten tautipaineen alenemisen ansiosta (Angus ym. 2008).

Suomessa on tutkittu pohjoismaisten kaurojen ja kevätvehnien NUE:ta, UTE:a ja UPE:a (Muurinen ym. 2006, 2007). Edellä mainittuja ominaisuuksia on myös tutkittu ulkomailla ainakin kevätvehnältä, -rapsilta ja syysrapsilta (Fischer 1993, Hocking ym. 1997, Dreccer ym. 2000, Berry ym. 2010). Tutkimusten pohjalta tehtävä vertailu osoittaa, että öljykasveilla on yleisesti viljoja heikompi NUE ja UTE (Sylvester-Bradley ja Kindred 2009, Taulukko 3). Öljykasvien heikompa NUE:ta voidaan perustella öljykasvien siementen suuremmalla N-pitoisuudella (Dreccer ym. 2000) sekä rasvahapposynteesin suuremmalla yhteyttämistuotteiden tarpeella (Sinclair ja de Wit 1975). Eroja kasvien N-otossa ei kuitenkaan pitäisi ilmetä johtuen siitä, onko maaperän N peräisin lannoitteesta vai palkokasvin jäänteistä, sillä kasvinjäänteiden N:n oletetaan mineralisoituvan viimekädessä aina NH_4^+ :ksi (ja myöhemmin NO_3^- :ksi) (Havlin ym. 2005). Toisaalta, jos NH_4^+ :n nitrifikaatio NO_3^- :ksi on rajoittunut, kaalikasvien N-otto ja täten NUE voi vääristyä suhteessa viljoihin (Havlin ym. 2005).

Taulukko 3. Tutkimuksia eri viljelykasvien NUE:sta, UTE:sta ja UPE:sta. Taulukossa esitetyt arvot vastaavat Mollin ym. (1982) määritelmän mukaista laskentatapaa ja lannoitus on annettu kylvön yhteydessä.

Lähde	Lannoitus +		NUE (kg N kg ⁻¹)	UTE (kg N kg ⁻¹)	UPE (%)
	maaperä (N kg ha ⁻¹)	Kasvi			
Muurinen ym. (2006)	70+(40–85)	Kaura	27,1	-	-
Muurinen ym. (2007)	90+?	Kaura	26,3	45,8	62
Fischer (1993)	60+7,5	Kevätvehnä	39,0	62,0	63
Fischer (1993)	120+7,5	Kevätvehnä	32,9	54,0	61
Dreccer ym. (2000)	20+30*	Kevätvehnä	32,8	40,0	82
Dreccer ym. (2000)	110+30*	Kevätvehnä	39,0	41,0	95
Muurinen ym. (2006)	70+(40–85)	Kevätvehnä	29,4	-	-
Muurinen ym. (2007)	90+?	Kevätvehnä	16,8	33,7	58
Nyiraneza ym. (2012)	0+?	Kevätvehnä	-	50,5	-
Nyiraneza ym. (2012)	120+?	Kevätvehnä	13,3	42,8	31
Dreccer ym. (2000)	20+30*	Kevätrapsi	16,8	20,0	84
Dreccer ym. (2000)	110+30*	Kevätrapsi	20,6	24,0	86
Hocking ym. (1997)	50+?	Syysrapsi	17,0	-	-
Hocking ym. (1997)	100+?	Syysrapsi	14,0	-	-
Berry ym. (2010)	0+54	Syysrapsi	-	23,4	-

* astiakoe

3 TUTKIMUKSEN TAVOITTEET

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää härkäpavun esikasvivaikutusta maaperän mineraali-N-varoihin seuraavan kasvukauden aikana ja jäännös-N:n vaikutusta viljelykasvien N-dynamiikkaan. Aiheen aiemmat tutkimukset ovat sijoittuneet erilaisiin ympäristöolosuhteisiin, joten suomalaisten ympäristöolosuhteiden oletettiin johtavan erilaisiin tuloksiin kuin muualla.

Tutkimuksen nollahypoteesit olivat seuraavat:

1. Härkäpapu esikasvina ei vaikuta maaperän liukoisiin, kasvukauden aikaisiin N-varantoihin.
2. Härkäpapu esikasvina ei vaikuta seuraavien viljelykasvien N-dynamiikkaan.

4 AINEISTO JA MENETELMÄT

4.1 Kenttäkoe ja käsittelyt

Monivuotinen kenttäkoe oli perustettu vuonna 2017 ja sijaitsi Helsingin kaupungin omistaman Haltialan kotieläintilan pellolla (60° 15' 55.7" N, 24° 57' 27.5" E, 12 m.a.s.l.). Koekentän maalaji oli runsasmultainen hiuesavi, jonka pääravinteiden viljavuusluokka oli vähintään hyvä (Taulukko 3). Kenttäkoe oli satunnaistettujen täydellisten lohkojen koe (randomized complete block design, RCBD) neljällä kerranteella. Jokaisessa kerranteessa oli kymmenen koeruutua. Kerranteiden koeruudut olivat pinta-alaltaan 18,75 m² (15 x 1,25 m).

Taulukko 3. Tutkimuskentän viljavuusanalyysin tulokset vuodelta 2015.

Maalaji	Multa- vuus	pH	Ca (mg l ⁻¹)	P (mg l ⁻¹)	K (mg l ⁻¹)	Mg (mg l ⁻¹)	S (mg l ⁻¹)
HeS	rm	5,8	2600	20	310	410	17,5

Kenttäkoe muokattiin tasojrismellä 2-3 cm:n syvyyteen koeruutuihin nähden poikittain. Tasojrismän jälkeen rapsi-, hampuu- ja pellavaruudut jyrtsittiin 3-4 cm syvyyteen sekä kaura-, kevätvehnä- ja härkäpapuruudut 6-7 cm syvyyteen kelajyrismellä. Muokkauksen jälkeen koeruudut kylvölannoitettiin edellä mainittuihin muokkaussyvyysiin (Wintersteiger TC2700, Wintersteiger AG, Ried, Itävalta) 16. toukokuuta 2019. Kylvörivien väli oli 12,5 cm ja lannoiterivien 25 cm. Tiedot vuoden 2017 esikasveista ja vuoden 2018 viljelykasveista, lajikkeista, kylvötiheyksistä ja N-lannoituksista on esitetty taulukossa 4. Koeruutuihin numero neljä oli kylvetty vuoden 2017 keväällä härkäpapu ja aluskasviksi syysvehnä, joka ei kuitenkaan talvehtinut. Tästä syystä ruutuihin kylvettiin seuraavana keväänä kevätvehnä. Joissain ruuduissa kylvöä hankaloitti edellisen vuoden kasvinjäänteet, mikä saattoi vaikuttaa tasaiseen taimettumiseen.

Taulukko 4. Kenttäkokeen esikasvi vuonna 2018, kasvivalinnat, lajikkeet, kylvötiheydet ja lannoitukset vuonna 2018. Käytetty lannoite oli Premium Typpi (27-0-0) (Belor Agro Oy, Salo, Suomi).

Ruutu nro	Esikasvi 2017	Viljelykasvi 2018	Lajike 2018	Kylvötiheys (kpl m ⁻²)	NH ₄ NO ₃ (kg ha ⁻¹)
1	Avokesanto	Avokesanto	-	-	50
2	Härkäpapu	Härkäpapu	Kontu	70	20
3	Kaura	Kaura	Obelix	500	90
4	Härkäpapu/SV*	Kevätvehnä	Demonstrant	700	90
5	Härkäpapu	Rapsi	Smilla	150	90
6	Härkäpapu	Hamppu	Finola	200	50
7	Härkäpapu	Rapsi	Smilla	150	0
8	Härkäpapu	Kaura	Obelix	500	50
9	Härkäpapu	Kaura	Obelix	500	0
10	Härkäpapu	Pellava	Abacus	800	50

*: syysvehnä kylvetty aluskasviksi keväällä 2017

Koeruuduille kasvukauden aikana suoritettujen kasvinsuojelutoimenpiteiden on esitetty taulukossa 5. Yleisimmät torjutut rikkakasvit olivat juolavehänä (*Elymus repens* L.), peltoohdake (*Cirsium arvense* L.), peltovalvatti (*Sonchus arvensis* L.) ja hiirenvirna (*Vicia cracca* L.). Rikkakasveja kitkettiin osittain myös käsin niiden myöhäisen taimettumisen ja runsaiden paikallisten esiintymien vuoksi. Esimerkiksi hiirenvirnaa oli paikoitellen härkäpapuruuduissa jopa 50 % pinta-alasta. Koeruudut tihkukasteltiin (30 mm m⁻²) 14. kesäkuuta 2019.

Taulukko 5. Suoritetut kasvinsuojelutoimenpiteet kesällä 2019.

Päivämäärä	Viljelykasvi	Torjunnan kohde	Tehoaine	Määrä (g ha ⁻¹ a.i.)
14.6.2019	Härkäpapu	Juolavehnä	Kvitsalofoppi-P-etyyli ¹	125
14.6.2019	Rapsi	Juolavehnä	Kvitsalofoppi-P-etyyli ¹	125
14.6.2019	Kaura	Ohdake, valvatti, virna	MCPA ² + fluoksipyryri ² + klopyralidi ²	500 + 100 + 50
14.6.2019	Kevätvehnä	Ohdake, valvatti, virna	MCPA ² + fluoksipyryri ² + klopyralidi ²	500 + 100 + 50
14.6.2019	Rapsi	Ohdake, valvatti, virna	Klopyralidi ³	108
13.7.2019	Rapsi	Rapsikuoriainen	Lambda-syhalotriini ⁴	7,5

¹ Pilot, Nissan Chemical Corporation, Tokio, Japani

² Ariane S, Dow AgroSciences, Indianapolis, Yhdysvallat

³ Matrigon 72 SG, DuPont, Wilmington, Yhdysvallat

⁴ Karate 2,5 WG, Syngenta International, Basel, Sveitsi

4.2 Havainnot ja näytteenotto

4.2.1 Maanäytteet

Koeruuduista kerättiin maanäytteet viisi kertaa kasvukauden aikana, minkä lisäksi kevätvehnä-, härkäpapu- ja kaura 90N-koeruuduista otettiin vielä kuudes näyte (Liite 1). Jokaisesta ruudusta otettiin satunnaisesti kuusi näytettä (Mikko-maanäytekaira, Eurofins Viljavuuspalvelu Oy, Suomi), joista kolme siemenrivistä ja kolme siemenrivien rivivälistä. Kustakin ruudusta otetut näytteet yhdistettiin ja säilytettiin muovipusseissa pakastimessa vähintään -18 °C:ssa uuttamiseen asti. Viidennen näytteenottokerran ruutujen 2, 3, 4, 8 ja 9 näytteitä sekä kuudennen näytteenottokerran ruutujen 2, 3 ja 4 näytteitä säilytettiin kuitenkin +4,5 °C kylmiössä uuttamiseen asti.

NH_4^+ - ja NO_3^- -N:n määrittämiseksi näytteiden annettiin sulaa noin tunnin ajan huoneenlämmössä, jonka jälkeen näytettä punnittiin 20 g sentrifugiputkeen. Putkiin lisättiin 50 ml ultrapuhtaaseen veteen valmistettua 2M KCl-liuosta (>99,5 % KCl, Merck KgaA, Darmstadt, Saksa). Jokaiselle uuttokerralle valmistettiin lisäksi referenssinäytteet referenssimaasta edellä mainituin menetelmin.

Tämän jälkeen putkia ravisteltiin (VKS 75 A Control, Edmund Bühler GmbH, Bodelshausen, Saksa) kahden tunnin ajan ja sentrifugoitiin 15 minuuttia 3000 rpm (Hermle Z513K, HERMLE Labortechnik, Wehingen, Saksa). Supernatantti suodatettiin 2M KCl-liuoksella huuhdellun sininauhasuodatinpaperin (Whatman 589/3 150 mm, GE Healthcare, Chigago, Yhdysvallat) läpi. Suodatetut uutteen säilytettiin pakastimessa -18,5 °C:ssa.

Maan kosteus määritettiin kahdesta 3 g osanäytteestä samanaikaisesti mineraali-N-uuttojen kanssa. Osanäytteitä kuivattiin 105 °C:ssa uunissa (ULE 500, Memmert GmbH, Schwabach, Länsi-Saksa) vuorokauden ajan. Kuivaamisen jälkeen näytteitä jäähdytettiin 30 minuuttia eksikaattorissa ja punnittiin. Kenttäkokeen maaperän irtotiheys (P_{maa} , (g m^{-3})) määritettiin 24. huhtikuuta 2019 ottamalla näyte tilavuuskairalla, jonka kammion pituus oli 20 cm ja halkaisija 5 cm. Näytteitä otettiin kerranteittain kahdeksan näytettä yhteensä neljästä ruudusta. Näytteet kuivattiin vuorokauden ajan 105 °C:ssa.

4.2.2 Kasvustonäytteet ja havainnot

Kasvuston lehtivihreäpitoisuus mitattiin Apogee MC-100 -lehtivihreämittarilla (Apogee Instruments Inc, Logan, Yhdysvallat) aina kasvustonäytteiden ottamista edeltävänä päivänä. Kustakin ruudusta mitattiin 30 kasvin ylimmän lehden keskiarvo kolmesta 50 cm rivistä. Kapeita lehtiä mitattaessa mittaussensoriin asennettiin kutistusrenkas, joka pienensi mittausalaa noin 30 prosenttiin normaalista, virheen kasvaessa alle viisi prosenttia (Apogee Instruments 2018).

Kasvuston lehtialaindeksi mitattiin ACCUPAR LP-80 -lehtialamittarilla (METER, Pullman, Yhdysvallat) jokaisesta ruudusta kolmesti noin 20 cm korkeudelta maanpinnasta lehtivihreämittausten yhteydessä. Vehnän ja kauran lehtialaindeksin mittaamisessa käytettiin vehnän vakioarvoa $X = 0,96$ ja rapsin, härkäpavun ja hampun mittaamisessa käytettiin arvoa $X = 2,00$.

Kasvustonäytteet kerättiin ruuduista viidesti kasvukauden aikana (kasvullisessa vaiheessa, kukkien muodostumisvaiheessa, kukinnassa, jyvääntyttymisvaiheessa ja keltatuleentumisvaiheessa). Kevätvehnäkasvustosta otettiin kuitenkin kuusi näytettä (Liite 1). Näytteet kerättiin kolmesta 50 cm:n rivistä, kuitenkin jättäen ruutuun vähintään viisi neliometriä koskematonta pinta-alaa sadonkorjuuta varten. Härkäpapu, rapsit ja hamppu kerättiin leikkaamalla kasvit maanpinnan tasosta, viljat juurineen sivuversojen erottelua varten. Näytteet säilytettiin +4 °C fraktiointiin asti.

Näytteistä laskettiin kasvin lukumäärä, jonka jälkeen ne jaettiin kasvullisiin osiin (korsiin/varsiiin/versoihin/lehtiin) sekä sato-osiiin (röyhyihin/tähkiin/lituihin/palkoihin) ja punnittiin. Näytteet kuivattiin 60 °C:ssa (ULE 600 ja 800, Memmert GmbH, Schwabach, Länsi-Saksa ja UT 6200, Heraeus GmbH, Hanau, Saksa) vähintään kahden vuorokauden ajan, punnittiin ja säilytettiin paperipusseissa jauhamiseen saakka. Viimeiset näytteet puitiin Hege 16 -laboratoriopuimurilla (HEGE Germany, Hege, Saksa). Kauran, härkäpavun sekä vehnän siemensato seulottiin käsin 2 mm seulalla ja rapsi seulottiin 1,19 mm seulalla.

Kaikki kasvustonäytteet jauhettiin (seulakoko 1 mm, Ultra Sentrifugal Mill ZM 200, Retsch, Haan, Saksa) ja varastoitiin analyysijä varten huoneenlämmössä.

4.2.3 Sadonkorjuu

Koeruudut puitiin (Sampo Rosenlew SR2010, Sampo Rosenlew Oy, Pori, Suomi) 20. syyskuuta 2018. Sato lajiteltiin (LA-LS, Westrup A/S, Slagelse, Tanska) 4/1,8 mm seuloilla, rapsit 3/1,4 mm seuloilla. Saatu sato punnittiin, minkä lisäksi siitä määritettiin kosteus (Dickey-John GAC 2000, Dickey-John Co., Minnesota, Yhdysvallat), 1000 siemenen paino (Contador, Pfeuffer GmbH, Kitzingen, Saksa) sekä valkuais- ja öljypitoisuus NIR-laitteella (DA7200, Perten Instruments, Hägersten, Ruotsi).

4.2.4 Kasvukauden sää

Tutkimuskentällä mitattiin alueen lämpötilaa ja sadantaa antureilla, jotka liitettiin HOBO DataLoggereihin (Onset Computer Corporation, Bourne, Yhdysvallat). Maaperän kosteutta ja lämpötilaa mitattiin 10 ja 20 cm:n syvyyteen asennetuilla antureilla (5TM, Decagon Devices, Inc, Pullman, Yhdysvallat), jotka yhdistettiin EM-50-dataloggeriin

(METER Group, Inc., Pullman, Yhdysvallat). Mittalaitteet asennettiin 17. toukokuuta 2018, jolloin kokonaista vuorokausidataa oli saatavilla 18. toukokuuta 2018 alkaen.

4.3 Kemiaalliset analyysit

4.3.1 Maan ammonium- ja nitraattityypipitoisuus

Mineraali-N-utteet mitattiin Seilab Oy:n laboratoriossa (Seinäjoki, Suomi). Pakastetut uutteen sulatettiin ja mitattiin laimentamattomana spektrofotometrisellä analysaattorilla (Aquakem 250, ThermoFisher Scientific, MA, Yhdysvallat) SFS-EN ISO 11732 (NH₄⁺-N) ja SFS-EN ISO 13395 (NO₃⁻-N) -standardien mukaisesti.

4.3.2 Kasvinosien typpi- ja hiilipitoisuus

Kaikista jauhetuista kasvustonäytteistä punnittiin kasvinosittain noin 250 mg osanäyte, josta määritettiin näytteen N- ja hiilipitoisuudet Dumas-menetelmällä (vario MAX CN, Elementar Analysensysteme GmbH, Langenselbold, Saksa).

4.4 Laskutoimitukset

Kasvustojen kokonaisbiomassat ekstrapoloitiin yhteen neliometriin kertomalla yhteensä 1,5 m rivimatkalta otetut kasvustonäytteet vakiolla 5,333. Kasvustojen N-otto määritettiin kertomalla kasvuston neliöbiomassa kunkin kasvinosan määritetyllä N-pitoisuudella (Liite 2: Taulukko 3).

Eri kasvien N-oton tehokkuus (NUE) (Moll ym. 1982) laskettiin kaavalla

$$\text{NUE} = \text{UPE} * \text{UTE} \quad (1).$$

UPE laskettiin Muurisen ym. (2007) mukaan

$$\text{UPE} = \frac{N_{\text{kasvusto}} (\text{kg ha}^{-1}) - N_0 (\text{kg ha}^{-1})}{N_{\text{lannoitus}} (\text{kg ha}^{-1})} \quad (2),$$

jossa N_{kasvusto} on kasvuston N-otto viimeisellä näytteenottokerralla, N_0 nollalannoitusruudun N-otto ja $N_{\text{lannoitus}}$ on kasvustolle annetun lannoite-N:n määrä,

ja UTE laskettiin kaavalla

$$UTE = \frac{\text{Siemensato (kg ha}^{-1}\text{)}}{N_{\text{kasvusto}} \text{ (kg ha}^{-1}\text{)}} \quad (3).$$

N:n satoindeksi (NHI) laskettiin kaavalla

$$NHI = \frac{N_{\text{sato}} \text{ (kg ha}^{-1}\text{)}}{N_{\text{kasvusto}} \text{ (kg ha}^{-1}\text{)}} \quad (4),$$

jossa N_{sato} on siemensadon sisältämä N viimeisellä näytteenottokerralla.

Koeruutujen maaperän mineraali-N-pitoisuus laskettiin muuttamalla maanäytteiden uuttoluosten NH_4 - ja NO_3 -pitoisuudet pitoisuuksiksi 0-25 cm syvyydessä kaavalla

$$(C_{\text{näyte}} - C_{\text{sok}}) * \frac{(V_{\text{KCl}} + V_{\text{näyte}})}{M_{\text{näyte}}} * P_{\text{maa}} * 0,25 \quad (5),$$

jossa $C_{\text{näyte}}$ ja C_{sok} on maanäytteen ja sokean näytteen NH_4 - tai NO_3 -pitoisuus uuttoliuoksessa, vastaavasti, V_{KCl} uuttoliuoksen tilavuus (ml), $V_{\text{näyte}}$ uutetun maanäytteen vesipitoisuus (ml), $M_{\text{näyte}}$ uutetun maanäytteen kuivapaino (g) ja P_{maa} maaperän irtotiheys.

Koeruudun mineralisaatio (Taulukko 8) laskettiin kaavalla

$$\sum [(N_{\text{kasvusto } n+1} - N_{\text{kasvusto } n}) + (\text{NH}_4_{n+1} - \text{NH}_4_n) + (\text{NO}_3_{n+1} - \text{NO}_3_n)] - (N_{\text{lannoitus}} + N_{\text{siemen}}) \quad (6),$$

jossa n on näytteenottokerta ja NH_4 näytteenottokerran maaperän NH_4^+ -N, sekä NO_3 näytteenottokerran maaperän NO_3^- -N ja N_{siemen} on kylvösiemenen sisältämä N (kg ha^{-1}).

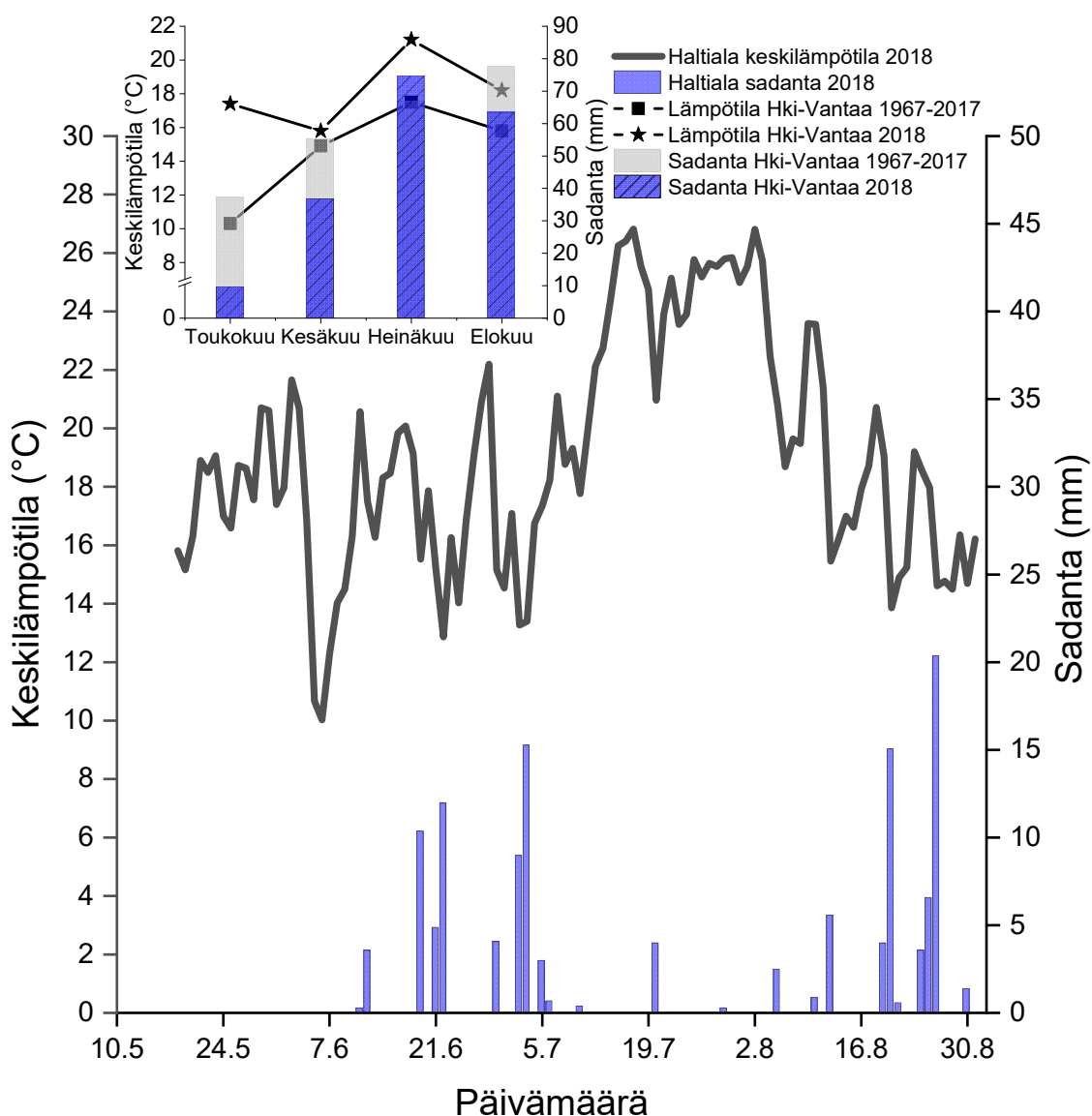
4.5 Tilastolliset menetelmät

Viljelykasvustojen jyväsadot ja satokomponentit analysoitiin SPSS-ohjelmistolla (versio 25.0, SPSS Inc., Chigago, Illinois, Yhdysvallat) käyttäen varianssianalyysia (ANOVA). Käsittelyjen eroavaisuuksia tutkittiin Tukeyn testin avulla. Sekä lehtialaindeksin että maaperän mineraali-N-pitoisuuden yhteyttä kasvustojen N-ottoon tutkittiin lineaariregressioanalyysillä. Satokomponentteihin sekä N-ottoon eniten vaikuttavat tekijät selvitettiin askeltavalla regressioanalyysillä.

5 TULOKSET

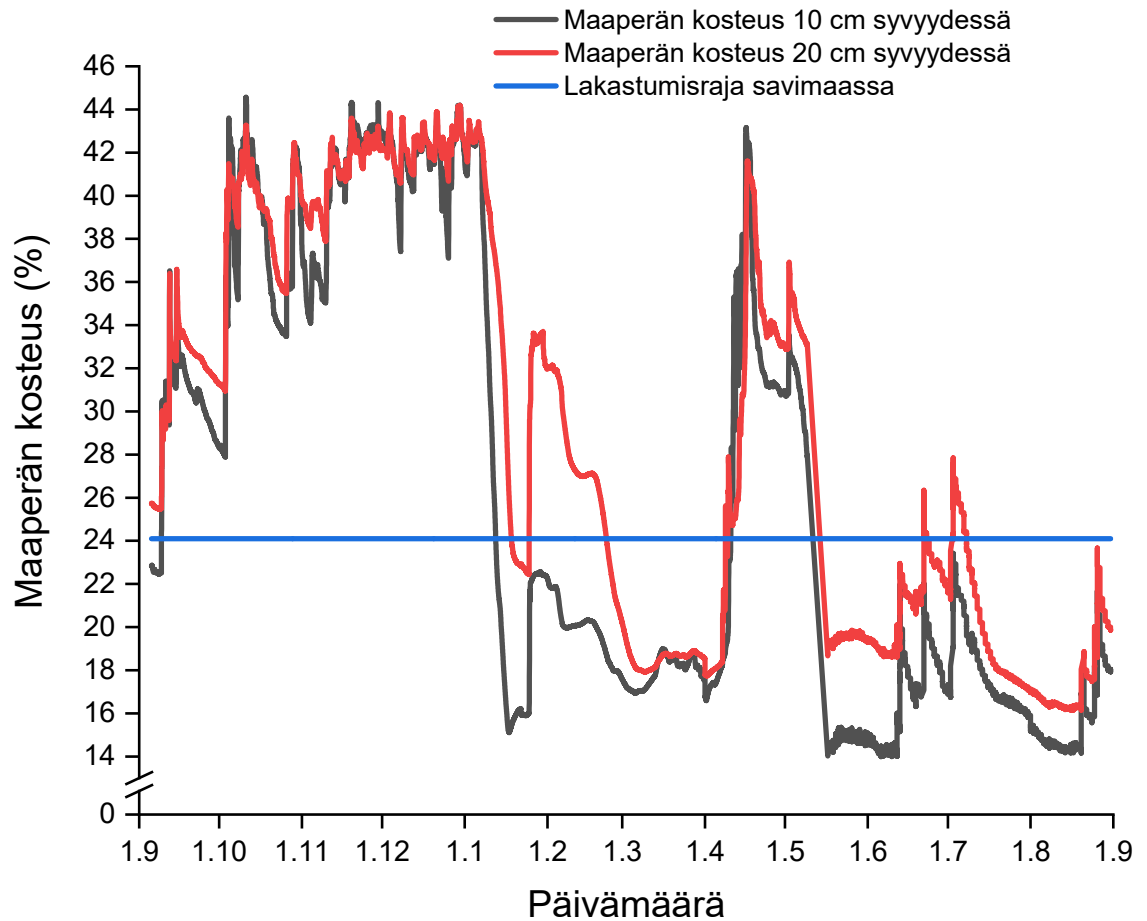
5.1 Kasvukauden sää- ja kosteusmittaukset

Kasvukausi 2018 oli viljelykasvien kannalta haastava, sillä kesäkuukausien ajan keskilämpötila oli niin Haltialan kenttäkoealueella kuin Helsinki-Vantaan lentokentällä pitkän ajan keskiarvoja huomattavasti korkeampi (Kuva 2). Kumulatiivinen sadanta oli kesä- ja elokuussa erittäin vähäistä ja kasvukauden aikana Helsinki-Vantaan lentokentän 50 vuoden keskiarvosta vain 53 % (Kuva 2).



Kuva 2. Keskilämpötila ja sadanta Haltialassa 18.5. – 31.8.2018 sekä Helsinki-Vantaan lentokentän mittausaseman keskilämpötila ja sadanta vuosilta 1967-2017 ja 2018.

Kenttäkokeen muokkauskerros oli syksyllä 2017 ja huhtikuussa 2018 huomattavasti kosteampi kuin kasvukauden aikana (Kuva 3). Pintamaan (10 cm) kosteus oli lakastumisrajan alapuolella suurimman osan kasvukaudesta (Kuva 3).

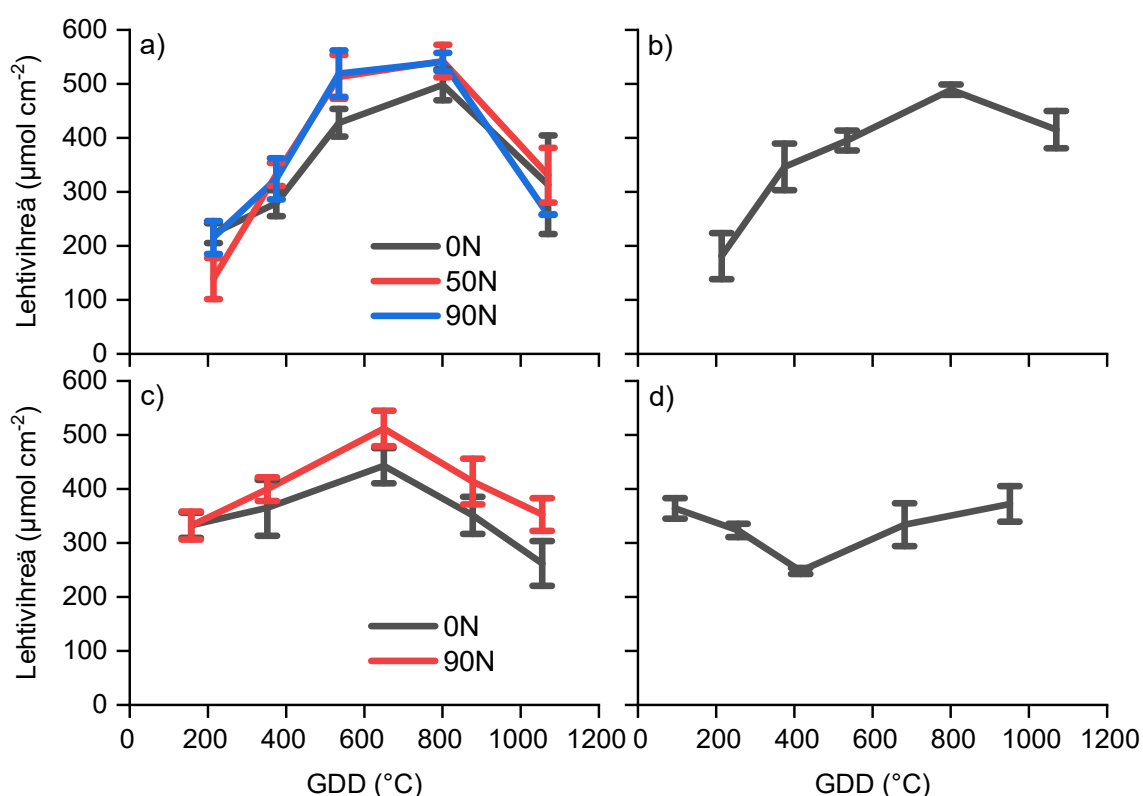


Kuva 3. Maaperän kosteuden keskiarvo (n = 12) Haltialan kenttäkoealueella 5.9.2017 - 9.5.2018 ja 17.5.2018 - 31.8.2018.

5.2 Kasvustojen morfologis-fysiologiset ominaisuudet

5.2.1 Kasvuston lehtivihreäpitoisuus

Kauran ja kevätvehnän lehtivihreäpitoisuus oli suurimmillaan kukinnan puolivälissä, kun orastumisen jälkeistä lämpösummaa (GDD) oli kertynyt 801 °C (Kuva 4). Rapsien suurin lehtivihreäpitoisuus ajoittui kukinnan alkuun (650 °C), kun taas härkäpavulla suurin pitoisuus ajoittui palkojen täyttymisvaiheeseen (951 °C).

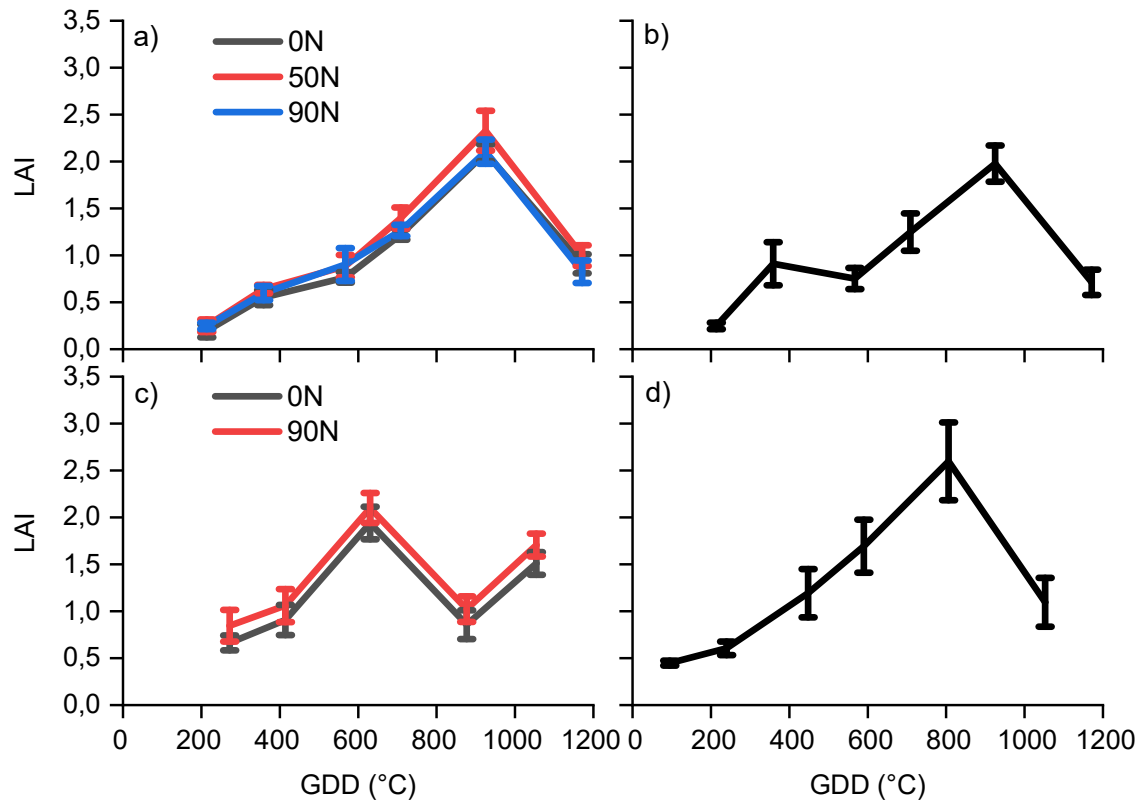


Kuva 4. Kauran (a), kevätvehnän (b), rapsin (c) ja härkäpavun (d) lehtivihreäpitoisuus Haltialan kenttäkokeessa kasvukaudella 2018. Janat kuvaavat keskivirhettä (n = 4).

5.2.2 Kasvuston lehtialaindeksi

Kauran, kevätvehnän ja härkäpavun LAI:n kehityskulku oli yhtäläinen koko kasvukauden ajan (Kuva 5). Viljojen LAI oli suurin, kun tehoisaa lämpösummaa oli kertynyt 925 °C orastumisesta ja härkäpavun vastaavasti 806 °C taimettumisesta. Muista kasvilajeista poiketen, rapsin LAI oli suurin, kun tehoisa lämpösumma oli 630 °C, jonka jälkeen LAI

pieneni, mutta suureni uudelleen 874 ja 1054 °C välillä (Kuva 5). Kauran ja kevätvehnän korkeinta LAI:ä selitti vain vegetatiivinen biomassa selityksasteen ollessa 33 % (Taulukko 8).

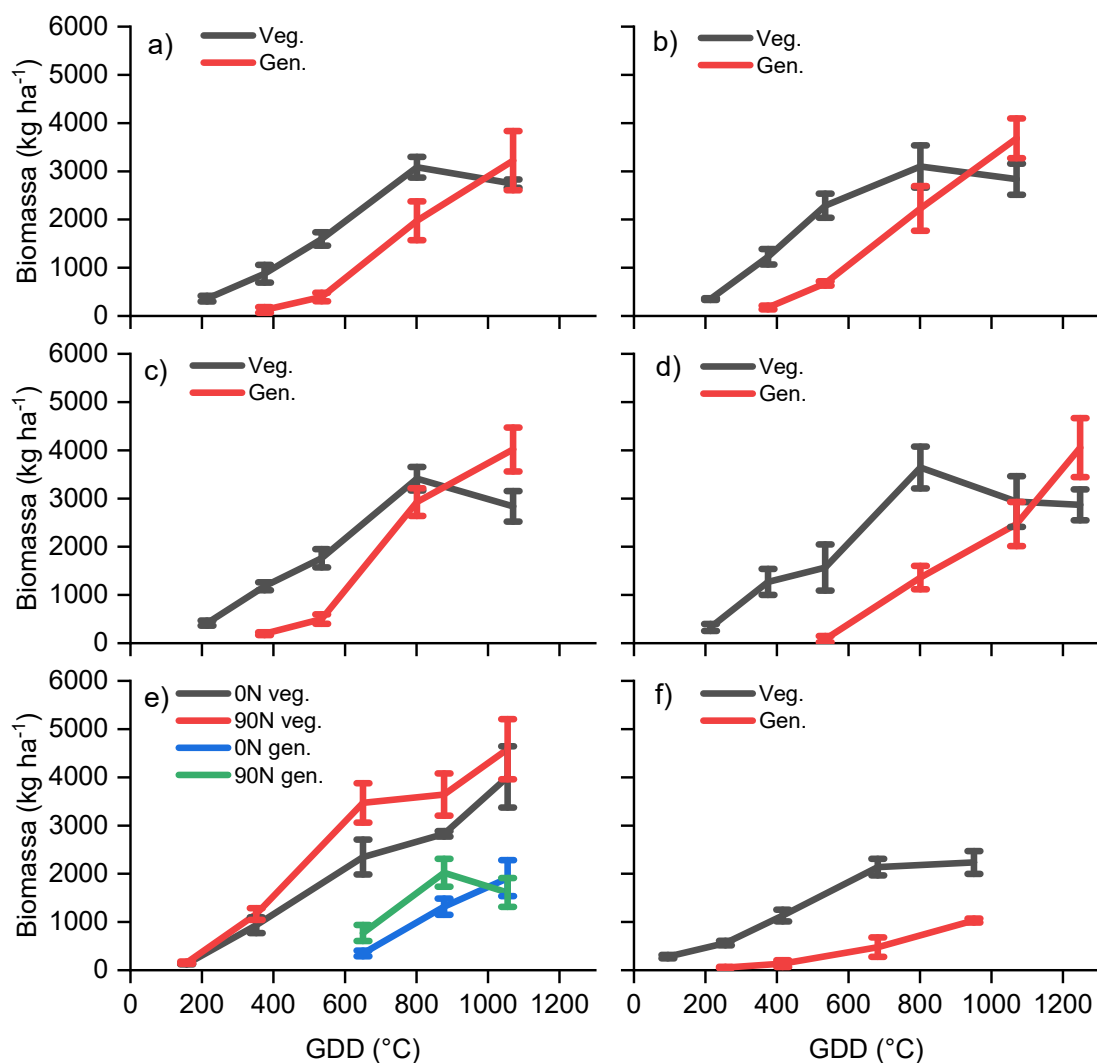


Kuva 5. Kauran (a), kevätvehnän (b), rapsin (c) ja härkäpavun (d) LAI Haltialan kenttäkokeessa kasvukaudella 2018. Janat kuvaavat keskivirhettä (n = 4).

5.2.3 Kasvuston biomassa

Kauran ja kevätvehnän vegetatiivinen massa suureni, kunnes lämpösummaa kertyi 801 °C GDD, jonka jälkeen vegetatiivinen biomassa pieneni (Kuva 6). Kauran generatiivinen massa muodostui vegetatiivista biomassaa suuremmaksi 801 ja 1070 °C välillä. Sen sijaan kevätvehnän generatiivinen massa oli vegetatiivista massaa suurempi vasta lämpösumman ollessa 1070 °C:n ja 1248 °C:n välillä. Rapsin ja härkäpavun vegetatiivinen massa ei pienentynyt missään vaiheessa. Rapsin vegetatiivinen massa oli suurin lämpösumman ollessa 1055 °C:ssa ja härkäpavun 951 °C:ssa (Kuva 6). Kauran generatiivisen massan kertyminen alkoi lämpösumman ollessa 375 °C ja kevätvehnän 535

°C. Härkäpavun generatiivinen massa alkoi kertyä jo lämpösumman ollessa 256 °C, kun taas rapsin generatiivisen biomassan alkoi vasta, kun lämpösumma oli 650 °C. Kauran ja kevätvehnän vegetatiivisen massan kertymistä selitti parhaiten kokonaisbiomassan (vegetatiivinen + generatiivinen massa) kertyminen (79 %) ja N-sato (17 %) (Taulukko 8).



Kuva 6. Viljelykasvien vegetatiivisen ja generatiivisen massan kertymä Haltialassa kasvukaudella 2018: a) kaura 0N, b) kaura 50N, c) kaura 90N, d) kevätvehnä, e) rapsi ja f) härkäpapu. Janat kuvaavat keskivirhettä (n = 4). Veg. = vegetatiivinen massa, Gen. = generatiivinen massa.

5.2.4 Kasvuston sato ja satokomponentit

Viljoista runsaimman sadon tuotti kaura 90N, jota seurasi kaura 50N ja kevätvehnä (Taulukko 6). Kauran lannoituksen myötä satoindeksi suureni N-lannoitustason mukaan, mutta kevätvehnän satoindeksi oli kaura 0N:ää pienempi ja viljoista pienin (Taulukko 6). Satoon vaikuttavista tekijöistä toisiaan parhaiten selittivät sato ja jyväpaino (90 %), joita lisäksi selitti N-sato (Taulukko 8). Jyväpaino selitti myös jyvien lukumäärää m^{-2} (76 %). Kauroista suurin valkuaispitoisuus, jyväpaino ja röyhyn jyvälukumäärä oli kaura 90N:lla, kun taas jyvien ja röyhyjen määrä m^{-2} oli suurin kaura 50N:lla (Taulukko 6). Jyvien valkuaispitoisuus selittyi NUE:lla (46 %), N-sadolla (30%) ja UPE:lla (24 %). Siitä huolimatta, että röyhyjen/tähkien lukumäärä (kpl m^{-2}) ja jyvien lukumäärä röyhyssä/tähkässä selittivät toisiaan, selittyi röyhyjen ja tähkien määrä (kpl m^{-2}) parhaiten NUE:lla (49 %) ja NO_3^- :lla (28 %). Lisäksi jyvien lukumäärää röyhyssä/tähkässä selitti parhaiten kokonaisbiomassa (46 %) ja jyvien lukumäärä (kpl m^{-2}) (28 %) (Taulukko 8).

Kevätvehnän sato ja sadon valkuaispitoisuus erosi ($P < 0,001$) kaura 90N:stä, mutta kauran lannoitustasojen (0 ja 50 N kg ha^{-1}) välillä ei ollut eroa muihin viljoihin (Taulukko 6). Eri viljalajien satokomponentit eivät eronneet toisistaan.

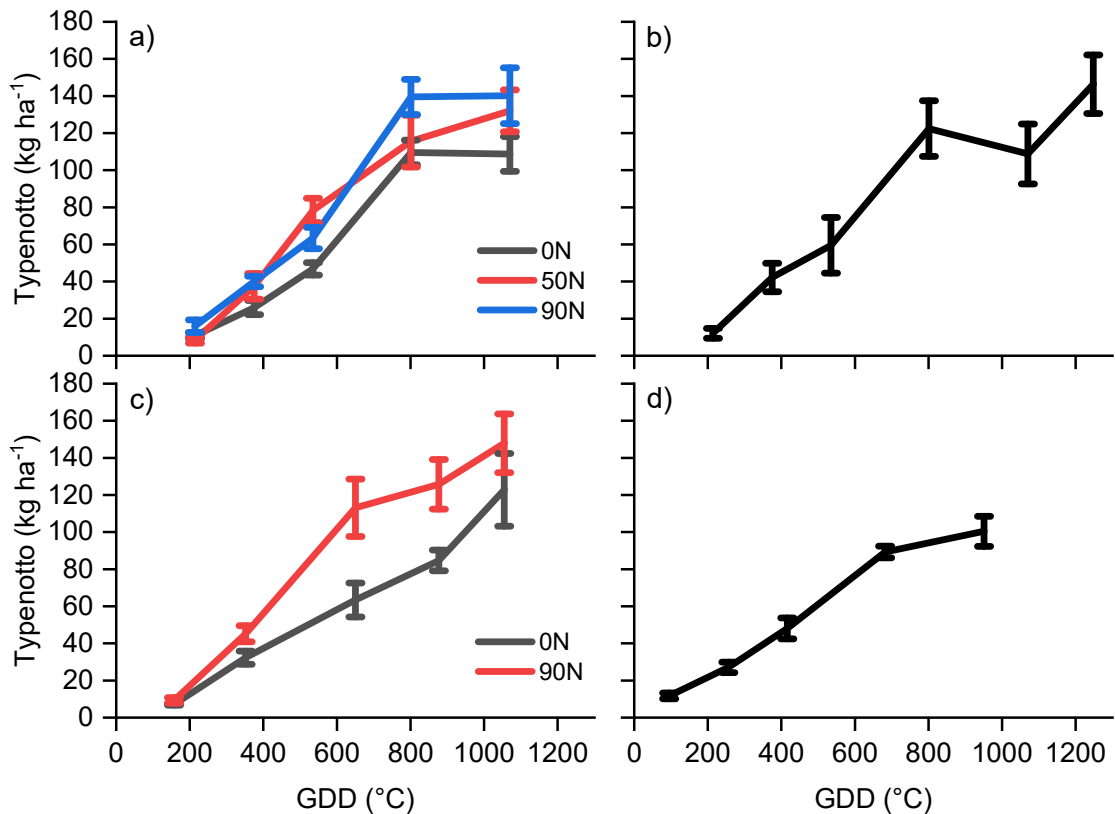
Taulukko 6. Viljelykasvien sato, satoindeksi, valkuaispitoisuus ja satokomponentit (keskiarvo±keskivirhe, n = 4) viimeisellä näytteenotokerralla (lämpösunnan kertymä: kaura 1070 °C, kevätvehnä 1248 °C, rapsi 1055 °C ja härkäpapu 951 °C taimettumisesta) Haltialassa kesällä 2018. Sadon valkuaispitoisuus on laskettu N-pitoisuudesta Mossén (1990) mukaan.

Viljelykasvi	Sato (kg ha ⁻¹)	Satoindeksi	Valkuaispitoisuus (%)	Jyväpaino (mg kpl ⁻¹)	Jyvälukumäärä (kpl m ⁻²)	Röyhyjen/tähkien määrä (kpl m ⁻²)	Jyvien lukumäärä röyhyssä/tähkässä (kpl)
Kaura 0N	2749±653	0,45	11,8±0,1	30,5±1,9	6901±299	537±115	14±3
Kaura 50N	3202±431	0,49	13,0±0,3	30,1±2,7	11127±2242	724±69	15±3
Kaura 90N	3547±332	0,52	13,2±0,1	32,3±1,9	11023±914	677±15	16±1
Kevätvehnä	2775±493***	0,39	15,8±0,5***	29,0±1,0	9419±1430	525±34	18±3
Rapsi 0N	523±148	0,09	27,7±0,3				
Rapsi 90N	406±107	0,07	28,4±0,3				
Härkäpapu	566±60	0,18	27,5±0,5				

*, **, ***: tulos eroaa merkitsevästi ($P < 0,05$), hyvin merkitsevästi ($P < 0,01$) tai erittäin merkitsevästi ($P < 0,001$) kaura 90N:sta.

5.2.5 Typenotto

N-otto oli runsainta kaikilla viljelykasveilla viimeisellä näytteenottokerralla, lukuun ottamatta kaura 0N, jonka N-otto pieneni hieman edellisestä määrittyskerrasta (Kuva 7). Määrällisesti eniten N:ä kasvukauden aikana ottivat rapsi 90N, kevätvehnä ja kaura 90N. Viljat ottivat runsaimmin N:ä, kun lämpösusuma oli 535 ja 801 °C välillä (kaura 50N 375-535 °C), jonka jälkeen ainoastaan kevätvehnän ja kaura 50N:n N-otto lisääntyi (Kuva 7). Rapsi 90N otti runsaimmin N:ä (68 kg ha⁻¹), kun lämpösusuma oli 352 ja 650 °C välillä ja rapsi 0N (38 kg ha⁻¹), kun lämpösusuma oli 877 ja 1055 °C välillä (Kuva 7). Viimeisellä näytteenottokerralla rapsikasvustojen N oli pääosin varsissa (45 % kokonais-N:stä), kun sen sijaan viljojen korsissa oli N:ä viimeisellä näytteenottokerralla 6-22 % ja härkäpavun varsissa 27 %. Viljojen N-ottoa selitti parhaiten (92%) kokonaisbiomassa (Taulukko 7).



Kuva 7. Kauran (a), kevätvehnän (b), rapsin (c) ja härkäpavun (d) N-otto Haltialan kenttäkokeessa kasvukaudella 2018. Janat kuvaavat keskivirhettä (n=4).

Taulukko 7. Kauran ja kevätvehnän mitattuja ja laskettuja satoa sekä N-ottoa selittävät tekijät perustuen askeltavaan regressioanalyysiin. NUE = N-käytön hyötysuhde, UPE = lannoite-N-käytön tehokkuus, UTE = N:n sadonmuodostuksen tehokkuus, NHI = N:n satoindeksi, NO₃⁻ = maaperän nitraattipitoisuus.

Selitettävä muuttuja	Selittävä muuttuja					
	Ensimmäinen	R ²	Toinen	R ²	Kolmas	R ²
NUE	UPE	0,880	UTE	0,986	Jyvien valkuaispitoisuus	1,000
UPE	NUE	0,880	UTE	0,980	Jyvien valkuaispitoisuus	1,000
UTE	NHI	0,618	Jyvien valkuaispitoisuus	0,988	NUE	1,000
LAI kukinnan aikaan	Vegetatiivinen biomassa	0,328				
N-otto	Kokonaisbiomassa	0,912	NO ₃ ⁻	0,961	NUE	0,999
Vegetatiivinen biomassa	Kokonaisbiomassa	0,789	N-sato	0,956	Röyhyt/tähkät m ⁻²	0,978
Jyväsato	Jyväpaino	0,905	N-sato	0,949		
N-sato	Jyväpaino	0,883	Jyvien valkuaispitoisuus	0,984	NUE	0,990
Jyvien valkuaispitoisuus	NUE	0,465	N-sato	0,757	UPE	1,000
Jyväpaino	Jyväsato	0,905	N-sato	0,982	UTE	0,993
Jyvät m ⁻²	Jyväpaino	0,763				
Röyhyt/tähkät m ⁻²	NUE	0,490	Jyvämäärä röyhyssä/tähkässä	0,716	NO ₃ ⁻	1,000
Jyvämäärä röyhyssä/tähkässä	Kokonaisbiomassa	0,459	Röyhyt/tähkät m ⁻²	0,676	Jyvät m ⁻²	0,959

5.3 Maaperän mineraalityypipitoisuudet

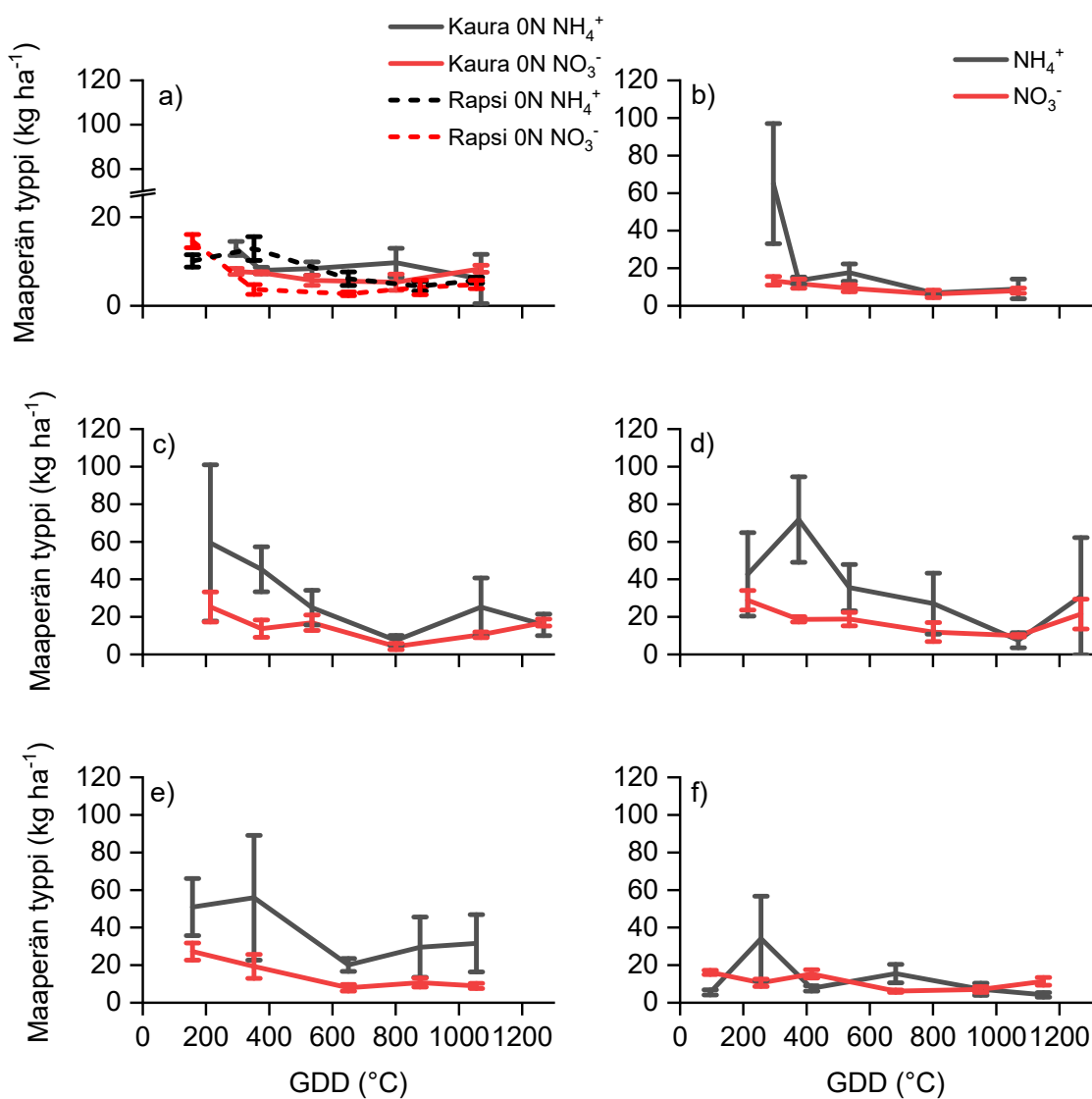
Lannoituksen myötä koeruutujen NH_4^+ -N-pitoisuus kasvoi merkittävästi (Kuva 8). Kevätvehnä-, rapsi 90N- ja härkäpapuruutujen NH_4^+ -N-pitoisuus kasvoi toiseen näytteenottokertaan, mutta laski tämän jälkeen. Rapsiruutujen NH_4^+ -N-pitoisuus oli pienin kolmannella, kauran neljännellä ja kevävehnän viidennellä näytteenottokerralla. NO_3^- -N-pitoisuuksiin verrattuna NH_4^+ -N-pitoisuuksien hajonta oli suuri, etenkin ensimmäisissä näytteissä (Kuva 8). Lannoittamattomien ruutujen NH_4^+ -N-tasot olivat kaikkein pienimmät, mutta niissäkin esiintyi hajontaa (Kuva 8). NO_3^- -N-pitoisuus oli lannoitetuissa ruuduissa huomattavasti matalampi eikä pitoisuus vaihdellut mittausten välillä yhtä runsaasti kuin NH_4^+ -N (Kuva 8). NO_3^- -N:n määrä kasvoi lähes kaikissa ruuduissa kasvukauden loppua kohden (Kuva 8).

5.4 Kasvustojen typenkäyttö ja maaperän typen mineralisaatio

Lannoitus vähensi kauran lehtialankestoa (LAD). LAD oli kaikkein lyhyin kaura 90N:llä (987 °C) ja pisin 0N:llä (1296 °C) (Taulukko 8). Kevätvehnän LAD oli kaura 90N:ää suurempi, mutta kaura 50N:ää pienempi. Rapsin ja härkäpavun lopullista LAD:ia ei laskettu kasvustojen tuleentumattomuuden vuoksi. Lannoituksen myötä N-sato ja koeruudun N-tase suurentivat (Taulukko 8), mutta kasvukauden aikainen N:n mineralisaatio oli pääsääntöisesti sitä pienempi mitä enemmän N-lannoitusta käytettiin. N:n mineralisaatio osoittautui suurimmaksi lannoittamattomissa koeruuduissa (kaura 0N; 118 N kg ha⁻¹ ja rapsi 0N; 133 N kg ha⁻¹). Kevätvehnän ja rapsin 90N -ruuduissa N:n mineralisaatio oli suurempi kuin kauran 90N-ruudussa.

5.4.1 Kasvustojen typenkäytön tehokkuus

Kaura 50N:n UPE oli kaura 90N:ää ja kevävehnää suurempi (Taulukko 8). Lannoitus vaikutti suhteellisesti hyvin vähän kauran UTE:een. Viljoista suurimman UTE:n saavutti kaura 90N ja pienimmän kevävehnä (Taulukko 8). NUE selittyi pääasiassa UPE:lla (88 %) ja UTE:lla (10 %) (Taulukko 7). UPE:a selitti NUE 88 % ja UTE 10 %, mutta UTE:a selitti NHI 62 % ja jyvien valkuaispitoisuus 37 % (Taulukko 8). Rapsi 0N:n UTE oli suurempi kuin rapsi 90N:n (Taulukko 8). Viljat eivät eronneet toisistaan NUE:n, UPE:n tai UTE:n suhteen.



Kuva 8. Ruutujen NH₄⁺- ja NO₃⁻-N-pitoisuus Haltialassa kasvukaudella 2018: a) kaura 0N ja rapsi 0N, b) kaura 50N, c) kaura 90N, d) kevätvehnä, e) rapsi 90N ja f) härkäpapu. Janat kuvaavat keskivirhettä (n = 4)

Taulukko 8. Viljelykasvien lehtialankesto (LAD), N-sato, N:n sadonmuodostuksen tehokkuus (UTE), lannoite-N-oton tehokkuus (UPE) ja N-käytön hyötysuhde (NUE) sekä ruutujen N-tase ja N:n mineralisaatio Haltialan kenttäkokeessa kasvukaudella 2018 (keskiarvo±keskivirhe, n = 4).

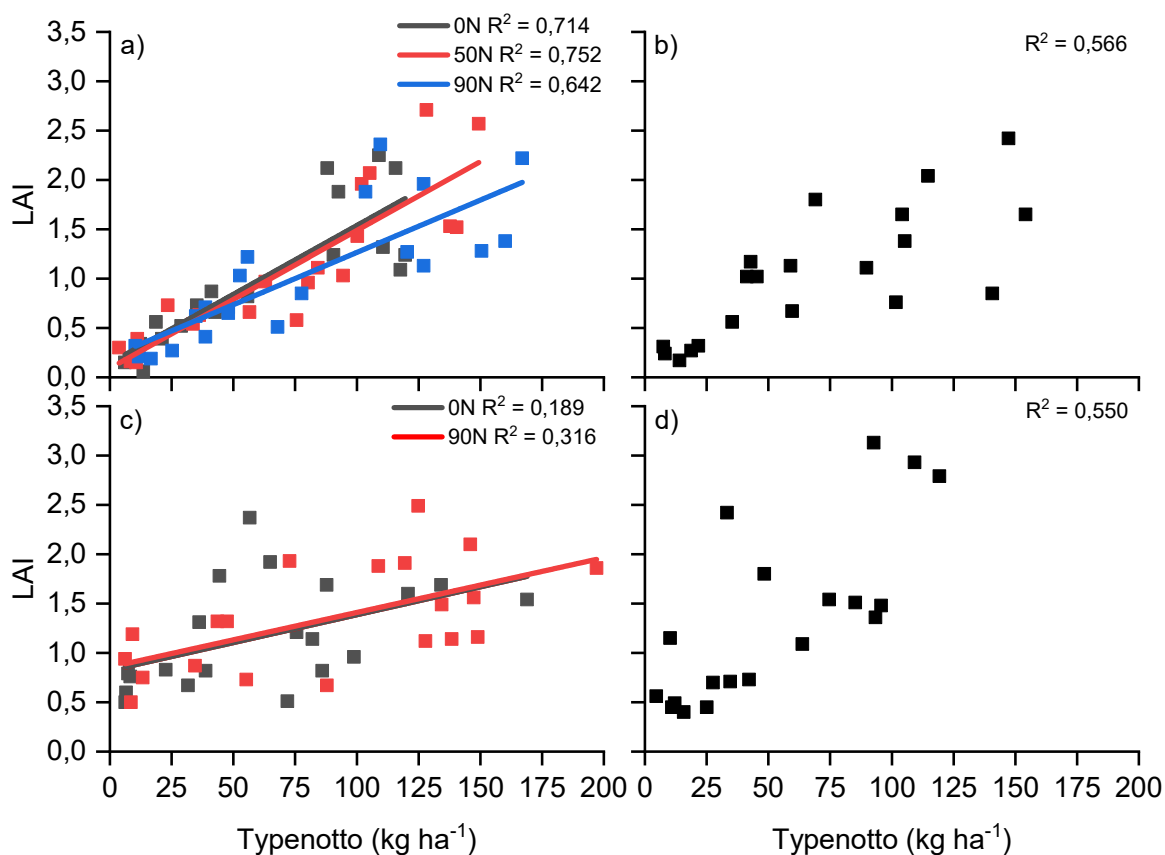
Viljelykasvi	N-lannoitus (kg ha ⁻¹)	LAD (°C)	N-sato (kg ha ⁻¹)	UTE (kg N kg ⁻¹)	UPE (%)	NUE (kg N kg ⁻¹)	Mitattu N-tase* (kg ha ⁻¹)	Mineralisaatio (kg N ha ⁻¹)
Kaura	0	1296	60,5±14,2	24,5±3,2			123,2	118,3
Kaura	50	1103	77,1±9,1	24,0±1,5	46±19	11,9±4,8	149,0	94,2
Kaura	90	987	87,4±8,7	25,4±0,8	35±14	8,7±3,5	175,9	81,0
Kevätvehnä	90	1055	80,8±12,4	18,5±1,4	42±15	8,5±3,1	198,8	102,5
Rapsi	0	> 1075	27,2±7,4	4,3±0,9			133,4	133,2
Rapsi	90	> 1075	21,6±5,5	3,0±0,9	28±15	0,5±0,2	188,4	98,2
Härkäpapu	20	> 1251	28,8±1,5	5,9±1,0			114,6	89,0

*: kokonais-N-otto + maaperän N-pitoisuus 0-25 cm maaprofilissa kokeen lopussa

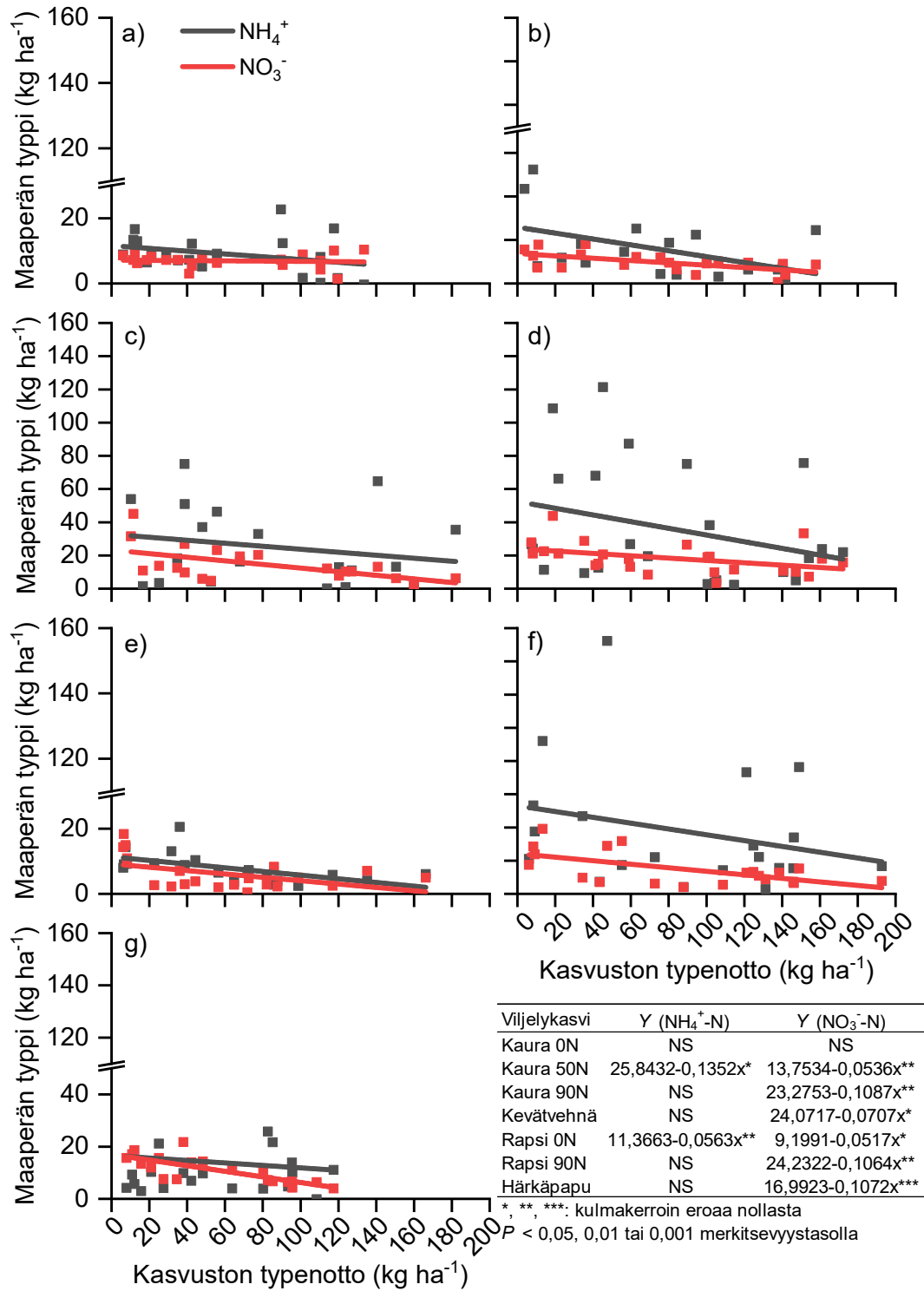
5.5 Typenoton vaikutus maaperän typpipitoisuuteen ja kasvuston lehtialaindeksiin

N-otto vaikutti erittäin merkitsevästi ($P < 0,001$) kaurajen lehtialaindeksiin (Kuva 9). Voimakkain korrelaatio oli kaura 50N:lla, jota seurasivat kaura 0N ja kaura 90N. Vaikutus oli myös kevätvehnällä erittäin merkitsevä ($P < 0,001$), mutta korrelaatio ei ollut yhtä voimakas kuin kauran. Merkitsevistä korrelaatiosta huolimatta LAI ei kuitenkaan selittänyt N-ottoa (Taulukko 7).

Koeruutujen maaperän N-pitoisuuden ja kasvuston N-oton lineaariregression perusteella kasvuston N-otto vaikutti ($P < 0,05$) maaperän NO_3^- -N-pitoisuuteen kaikissa muissa paitsi kaura 0N -ruudussa. (Kuva 10). NH_4^+ -N-pitoisuuteen vaikutti vain kaura 50N:n ja rapsi 0N:n N-otto.



Kuva 9. Kauran (a), kevätvehnän (b), rapsin (c) ja härkäpavun (d) N-oton vaikutus lehtialaindeksiin Haltialassa kasvukaudella 2018.



Kuva 10. N-oton ja koeruudun N-pitoisuuden lineaariregressio: a) kaura 0N, b) kaura 50N, c) kaura 90N, d) kevätvehnä, e) rapsi 0N, f) rapsi 90N ja g) härkäpapu.

6 TULOSTEN TARKASTELU

6.1 Biomassa ja typenotto vaihteli runsaasti sekä kasvukauden aikana että kasvilajeittain

6.1.1 Lehtivihreäpitoisuus vaihteli kasvurytmin, kasvilajin ja lannoituksen myötä

Vilja- ja rapsikasvustojen lehtivihreäpitoisuus oli suurin samaan aikaan kuin lehtien N-pitoisuus (Follett ym. 1992), kuten myös aiemmin Peltonen-Sainio (1997b) on havainnut. N-lannoituksen tiedetäänkin lisäävän lehtivihreäpitoisuutta (Follett ym. 1992). Neljännen (Zadoks 68) (Zadoks ym. 1974) ja viidennen (Zadoks 75-85) näytteenoton välillä lehtivihreäpitoisuus kuitenkin pieneni ilmeisesti johtuen siitä, että kasvit hajottivat kloroplasteja ja siirtivät lehdistä N:ä siemeniin (Yoneyama 1983). Kaura 90N:n lehtivihreäpitoisuus (Zadoks 85) oli pienempi kuin kevätvehnän (Zadoks 87), kaura 50N:n (Zadoks 77) ja kaura 0N:n (Zadoks 75) viimeisellä näytteenottokerralla, mikä saattoi johtua siitä, että kaura 90N -kasvusto tuleentui kaikkein tasaisimmin ja aikaisimmin. Härkäpavun pienin lehtivihreäpitoisuus kolmannella näytteenottokerralla (BBCH 60) (Hack 1992) saattoi puolestaan johtua vallinneesta korkeasta lämpötilasta ja vedenpuutteesta, koska kuivuuden on todettu vähentävän härkäpavun N-sidontaa (Katerji ym. 2011).

6.1.2 Lehtialaindeksi korreloi typenoton kanssa

Myöhäisissä (Zadoks 68 ja 85) kehitysvaiheissa kaura 50N:n LAI oli suurin. Yllättävästi kaura 0N:n LAI oli yhtä suuri kuin kaura 90N:n. Vaikka kevätvehnän lehtimassa oli suurempi kuin kauran, sen LAI oli toista näytteenottokertaa lukuun ottamatta koko kasvukauden ajan kauraa pienempi. Kevätvehnän LAI jäi pienemmäksi, 1,98, kun Hayn (1999) mukaan hyväkasvuisen kevätvehnän LAI on keskimäärin 3-5. Kevätvehnän kauraa suurempi lehtimassa saattoi johtua kuivuuden aiheuttamasta pienten ja tiheiden mesofyllisolukoiden muodostumisesta, minkä seurauksena lehdistä muodostuu paksuja ja niiden tilavuus vähenee (De Micco ja Aronne 2012). Myös kaurakasvuston LAI jäi pienemmäksi, noin 2,10, kuin Suomessa kauran keskimääräinen LAI yleensä, 5 (Peltonen 1990). Härkäpapakasvuston LAI on yleensä yhtä suuri kuin viljakasvustojen (Pulli ja Vestberg 1981, Peltonen 1990, Hay 1999, Hegab ym. 2014), mutta kasvukauden 2018 aikana se oli suurempi kuin viljojen. Tämä saattoi johtua siitä, että härkäpapakasvustossa

oli enemmän rikkakasveja, jotka lisäsivät LAI-arvoa muuttamalla kasvuston rakennetta peittävämmäksi, kuten esimerkiksi Gramig ym. (2006) ovat todenneet maissikasvustossa siinä esiintyvien rikkakasvien kanssa tapahtuvan.

Kaura 50N:n N-oton korrelaatio LAI:n kanssa oli voimakkain kun taas kevätvehnän korrelaatio oli heikoin. Vastaavasti kaura 50N tuotti myös eniten röyhyjä pinta-alayksikköä kohden ja kevätvehnä muodosti vähiten tähkiä pinta-alayksikköä kohden. Cai ym. (2015) mukaan vehnän runsas N-otto lisää sivuversojen määrää, jolloin lisääntynyt sivuversojen määrä nostaa lehtialaa ja kasvuston LAI:ä sekä röyhyjen ja tähkien määrää neliöllä. Kaikkien viljojen N-oton korrelaatio LAI:n kanssa oli voimakkaampi kuin Rajalan ym. (2007) havaitsema ohran N-oton ja LAI:n korrelaatio. Cai ym. (2015) havaitsivat, että jos kevätvehnän ja riisin N-otto on yhtä suuri, kevätvehnän lehtien N-pitoisuus muodostuu suuremmaksi kuin riisin. Tällöin kevätvehnän LAI jää samansuuruisella N-otolla pienemmäksi kuin riisin (Cai ym. 2015). Tässä tutkimuksessa kevätvehnän lehtien N-pitoisuus oli suurempi kuin kauran (Liite 2) yhtä suurella tai pienemmällä N-otolla. Täten kevätvehnän lehtien suuri N-pitoisuus saattaa selittää heikkoa N-oton ja LAI:n korrelaatiota kevätvehnäkasvustossa.

Kaikkien tutkittujen kasvustojen, rapsikasvustoa lukuun ottamatta, LAI suureni tasaisesti viidenteen näytteenottokertaan saakka, jonka jälkeen LAI pieneni kasvustojen tuleentumisen alettua. Rapsikasvusto saavutti suurimman LAI:n kolmannella näytteenottokerralla (BBCH 61), jonka jälkeen litujen muodostumisen alettua (BBCH 72) LAI pieneni. Rapsi alkoi muodostaa uusia lehtiä elokuussa sateiden jälkeen, minkä seurauksena LAI suureni (BBCH 82). Rapsin N-oton ja LAI:n korrelaatio jäi viljoja heikommaksi. Kukinnan jälkeen yleensä lidut muodostavat suurimman osan rapsin yhteyttävästä pinta-alasta (Gammelvind ym. 1996). Litujen määrä jäi kuitenkin kukinnan aikana vallinneen korkean lämpötilan (keskilämpötila yli 25 °C) vuoksi niukaksi.

6.1.2 Kuumuus heikensi sadonmuodostusta, mutta nosti valkuaispitoisuutta

Viljakasvustojen välillä vegetatiivisen massan muodostuminen oli lannoituksesta riippumatta lähes yhtä suurta. Vaikka kevätvehnäkasvuston biomassan muodostuminen oli hitaampaa kuin kauran, kevätvehnä muodosti lopulta yhtä paljon generatiivista massaa (4054 kg ha⁻¹) kuin kaura 90N (4017 kg ha⁻¹). Kevätvehnän jyväsato oli kuitenkin kaura 90N jyväsatoa niukempi ollen saman suuruinen kuin kaura 0N. Tämä johtui siitä, että

kevätvehnän jyväsadon osuus generatiivisesta sadosta (67 %) oli pienempi kuin kauran (86 %). Toisaalta, kauran helpeet eivät irtoa puinnissa, vaan ne säilyvät kiinni jyvässä myös puinnin jälkeen (Miller ja Fulcher 2011), jolloin punnittu jyväsato muodostuu todellista suuremmaksi. Viljasato oli kuitenkin varsin niukka, sillä virallisissa kokeissa Obelix-kauran sato on ollut 6331 kg ha⁻¹ ja Demonstrant-kevätvehnän 5803 kg ha⁻¹ (Laine ym. 2017). Kaura 50N:n, kaura 90N:n ja kevätvehnän jyvien valkuaispitoisuus oli korkeampi kuin virallisissa lajikekokeissa, mutta 1000 jyvän paino oli pienempi (Laine ym. 2017). Kuivuuden on todettu nostavan vehnäajikkeiden valkuaispitoisuutta (Zörb ym. 2017) ja keskimääräistä korkeampi valkuaispitoisuus saattaa johtua kasvin sisältämistä suurista N-varannoista suhteessa yhteyttämistuotteiden määrään (Zörb ym. 2017). Lisäksi korkeampi lämpötila on lyhentänyt jyväntäyttymisperiodia, koska kasvien lämpösummavaatimus on toteutunut lyhyemmässä ajanjaksossa (Asseng ja Van Herwaarden 2003) eikä vegetatiivisista osista luultavasti ehtinyt siirtyä jyviin yhteyttämistuotteita yhtä runsaasti kuin stressittömissä olosuhteissa on todettu jyväntäyttymisen aikana siirtyvän (Peltonen-Sainio 1991, Plaut ym. 2004).

Päivälämpötila oli rapsin kukinnan aikaan useampana päivänä 30-34 °C, kun jo kukinnan aikaisen 29 °C:n lämpötilan on todettu alentavan rapsin satoa (Morrison ja Stewart 2002, Gan ym. 2004, Elferjani ja Soolanayakanahally 2018). Kuumuus on saattanut heikentää rapsin siitepölyn itävyyttä merkittävästi (Peet ym. 1998), mistä johtuen sen sato jäi niukaksi (Laine ym. 2017). Koska rapsi 0N:n lehtimassa oli pienempi (Liite 1) kuin rapsi 90N:n, saattoi rapsi 0N haihduttaa vähemmän kuin rapsi 90N (Gammelvind ym. 1996). Tästä syystä lannoittamaton rapsikasvusto saattoi sietää kuivuutta paremmin (Albert ym. 2012) ja muodostaa runsaamman sadon kuin lannoitettu kasvusto. Myös Andersen ym. (1996) havaitsivat niukan N-lannoituksen (0 ja 100 kg ha⁻¹) johtavan runsaampaan rapsisatoon kuivissa oloissa kuin suuremman lannoituksen (200 kg ha⁻¹). Smilla-rapsin valkuaispitoisuus on ollut lajikekokeissa 23 % (Laine ym. 2017), kun tässä tutkimuksessa sen valkuaispitoisuus oli keskimäärin 28%. Kuivuus ja kuumuus (yli 29 °C) heikentävät rapsin rasvahapposynteesiä sekä siemenen täyttymisaikaa ja -kapasiteettia (Hatfield ja Prueger 2015), jotka yhdessä lisäävät siemenen valkuaispitoisuutta (Henry ja MacDonald 1978, Andersen ym. 1996, Aksouh ym. 2001, Elferjani ja Soolanayakanahally 2018)

Kaura 90N:n lehtialan kesto oli huomattavasti lyhyempi kuin muiden lannoitustasojen. Ilmiö saattoi johtua muiden ruutujen esikasvina olleen härkävun kasvinjäänteiden mineralisaatiosta, jonka myös Peltonen-Sainio ym. (1997) havaitsivat, kun vehnää

viljeltiin viherlannoituskasvina olleen rehuvirnan (*Vicia sativa* L.) jälkeen. Peltonen-Sainion (1997a) mukaan kuivuusoloissa kauran pitkä LAD vähentää röyhyn jyvälukumäärää, jyväntäytymisnopeutta ja siten satoindeksiä. Tämän tutkimuksen kaura 0N:n ja 50N:n jyvälukumäärä ja satoindeksi olivat linjassa Peltonen-Sainion ym. (1997) havaintojen kanssa, sillä niiden LAD oli pidempi ja satokomponentit niukemmat kuin kaura 90N:n. Kauran jyvälukumäärä oli kuitenkin suurempi kuin Peltonen-Sainion (1991) tutkimuksessa.

6.1.3 Typenotto oli runsasta, mutta lannoitetypenkäytön tehokkuus jäi heikoksi

Viljelykasvit ottivat runsaasti N:ä kuivasta kasvukaudesta huolimatta. Fischerin (1993) mukaan sadetettu kevätvehnä ottaa 60 kg ha⁻¹ N-lannoituksella yhteensä 72 N kg ha⁻¹ ja 120 kg ha⁻¹ N-lannoituksella 108 N kg ha⁻¹, mutta tässä tutkimuksessa N-lannoituksen kasvattaminen ei muodostanut yhtä selkeää vastetta kasvien N-ottoon. Härkäpavun esikasvivaikutus kaura 0N:n ja kaura 50N:n N-ottoon oli huomattavasti suurempi, keskimäärin 95 kg ha⁻¹, kuin Lupwayin ja Soonin (2016) määrittämä 34 kg ha⁻¹. Suuri esikasvivaikutus ilmeni matalana lannoitusvasteena, sillä kaura 50N:n N-otto oli vain 24 kg ha⁻¹ ja kaura 90N:n N-otto 32 kg ha⁻¹ kaura 0N:aa suurempi. Esikasvin vaikutus näkyi myös kaura- ja kevätvehnäkasvustojen NUE:ssa ja UTE:ssa, jotka olivat korkeintaan noin puolet aiemmin eri puolilla maailmaa raportoiduista arvoista (Fischer 1993, Dreccer ym. 2000, Muurinen ym. 2007, Nyiraneza ym. 2012). Muokkauskerroksen kosteuden ollessa ensimmäisen näytteenottokerran (BBCH 13) jälkeen lakastumisrajan alapuolella (Paasonen-Kivekäs ym. 2009) lannoite-N:n hyödynnys jäi heikoksi. Viljelykasvien N-ottoa on saattanut edistää korkea pohjavesi, minkä taso on sateisen kasvukauden jälkeen mitattu Haltialassa 10 - 48 cm:n syvyyteen maanpinnasta (Autio ja Honkanen 2006). Vaikka kasvien juuriston morfologia ja kehitys ei aina muutu selkeästi kuivuudessa (Ehdaie ym. 2012), on korkea pohjavesi luultavasti mahdollistanut kasvien N-oton syvemmistä maakerroksista.

Rapsin, etenkin 90N, N-otto oli myös runsasta, kun huomioidaan rapsikasvustojen noin neljä viikkoa muita kasvustoja myöhäisempi taimettuminen ja kuivempi maaperän muokkauskerros. Tässä tutkimuksessa rapsin N-otto oli kukinnan alussa keskimäärin 113 kg ha⁻¹ (rapsi 90N) ja 63 kg ha⁻¹ (rapsi 0N). Sen sijaan Hockingin ym. (1997) mukaan syysrapsin N-otto oli kukinnan alussa (BBCH 61) noin 100 kg ha⁻¹ (1988) ja 50 kg ha⁻¹ (1989) lannoitustason ollessa 100 N kg ha⁻¹. Rapsin UTE, 3,6 kg N kg⁻¹, jäi silti niukaksi

verrattuna Dreccerin ym. (2000) raportoimaan 53 kg N kg⁻¹ tai Berryn ym. (2010) 21 kg N kg⁻¹. Kasvukaudella vallinnut keskimääräistä korkeampi lämpötila saattoi osaltaan nopeuttaa fenologista kehitystä sekä nopeuttaa tuleentumista (Aksouh ym. 2001, Hatfield ja Prueger 2015). Tämä saattaa selittää rapsin varsien suurta N-pitoisuutta viimeisellä näytteenottokerralla (BBCH 82), sillä N varastoidaan vegetatiivisiin osiin ennen kukintaa (Rossato ym. 2001). Kasvukauden korkea lämpötila kuitenkin heikensi kukintaa sekä litujen muodostumista ja täten generatiivisen biomassan N-tarvetta (Tilsner ym. 2005), mikä selittää matalaa UTE:a.

6.2 Kasvustojen typenotto vaikutti ruutujen mineraalityypipitoisuuksiin

Kasvukauden alussa (20.6.) suurin NH₄⁺-N-pitoisuus oli kaura 50N-ruuduissa. Toisessa määrittäyksessä (27.6) ruutujen NH₄⁺-N-pitoisuus kuitenkin laski huomattavasti ja oli saman suuruinen kuin kaura 0N:n. Myös muissa ruuduissa esiintynyt suuri vaihtelu NH₄⁺-N-pitoisuuksissa saattoi johtua muokkauskerroksen kuivuudesta, mistä johtuen liukenemattomia lannoiterakeita on saattanut päätyä maanäytteeseen. Toisen ja kolmannen (27.6.-10.7.2018) sekä viidennen ja kuudennen (7.8.-20.8.2018) näytteenottokerran välillä maaperän NO₃⁻-N-pitoisuus kasvoi (kaura 90N-, härkäpapu-, kevätvehnärudut) ja NH₄⁺-N-pitoisuus laski. Tämä saattoi johtua näiden näytteenottokertojen välille ajoittuneista sadejaksoista ja niiden mahdollistamasta N:n nitrifikaatiosta, sillä maaperän kosteuden kasvaessa NH₄⁺-N:ä NO₃⁻-N:ksi muuttavien nitrifikaatiobakteerien aktiivisuus on saattanut myös kasvaa. (Paul 2007). Sateiden lisäksi Haltialan mahdollisesti korkealla tasolla ollut pohjavesi (Autio ja Honkanen 2006) saattoi edistää nitrifikaatiota sillä välin kun uutta NH₄⁺-N:ä mineralisoitui, sillä kasvustojen N-otto vaikutti enemmän ruutujen NO₃⁻-N-pitoisuuteen kuin NH₄⁺-N-pitoisuuteen. Esimerkiksi rapsiruutujen NO₃⁻-N-pitoisuus laski viljaruutuja pienemmäksi samaan aikaan, kun rapsikasvustojen N-otto lisääntyi eniten. Vastaavasti Dean ja Weil (2009) ja Tuulos ym. (2014) ovat havainneet, että viljoihin verrattuna rapsi suosii NO₃⁻-N:ä. Kasvit ottivat ja varastoivat ennen kukintaa kolmanteen (rapsi) tai neljälänteen (viljat) näytteenottokertaan mennessä nopean fenologisen kehityksen vuoksi (Aksouh ym. 2001, Hatfield ja Prueger 2015) runsaasti N:ä, minkä vuoksi kaikkien ruutujen NH₄⁺-N ja NO₃⁻-N-pitoisuudet laskivat (Rossato ym. 2001).

6.2.1 Maaperän kuivuus heikensi mineralisaatiota muokkauskerroksessa kasvukaudella 2018

Kenttäkoealueen maaperän kosteus oli alhainen. Alhaisessa maaperän kosteudessa esikasvinjäänteiden N:n mineralisaatio on hyvin hidasta tai olematonta (Macduff ja White 1985). Toisaalta, Paul ym. (2003) totesivat tilavuusmittaus-menetelmällä määritetyn maan vesipitoisuuden kuvaavan heikosti maaperän mineralisaatiopotentiaalia. Van Schrevenin (1968) mukaan sade mahdollisti N:n mineralisaatiota hetkellisesti, koska se herätti kestonmuodoissa säilyneet mikrobit hajottamaan kuivuuteen kuolleita mikrobeja. Myös Campbell ja Biederbeck (1982) havaitsivat N:n mineralisaatiota vehnän sängessä jopa 15 mm sateen jälkeen erittäin kuivassa maaperässä (kosteus 5-15 % w/w). N:n mineralisaatio oli täten mahdollista muokkauskerroksessa ensimmäisen (14.6.2018) ja kolmannen (10.7.2018) näytteenotokerran välillä, minä aikana vettä satoi yhteensä 59 mm ja kasvustoja kasteltiin 30 mm.

Kasvukauden aikana kaura 90N-ruuduissa mineralisaatiota tapahtui runsaasti, 81 N kg ha⁻¹ (Nyberg ja Lindén 2008), vaikkakin mineralisaatio oli muihin ruutuihin verrattuna tutkimuksen pienin. Kuivuuden heikentäessä viljelykasvien lannoite-N-ottoa muokkauskerroksesta, ruutujen laskennallinen mineralisaatio muodostui suurimmaksi kaura 0N ja rapsi 0N -ruuduissa. Vaikka kuivuus rajoitti muokkauskerroksessa tapahtuvaa mineralisaatiota kasvukauden 2018 aikana, N:ä saattoi mineralisoitua ruuduissa runsaan esikasvuston jäänteistä (siemensadot 5000-6000 kg ha⁻¹ vuonna 2017) keväällä 2018, jolloin kosteusolosuhteet mineralisaatiolle olivat otolliset. Peoplesin ym. (2001) mukaan härkävun kasvuolosuhteet määräävät suurelta osin kasvuston kyvyn muodostaa biomassaa. BNF on suorassa yhteydessä biomassan muodostukseen (Peoples ym. 2001), joten runsaan siemensadon tuottaneesta härkävun kasvustosta on jäänyt runsaasti N-pitoisia kasvinjäänteitä koeruutuihin. N:ä on voinut mineralisoitua myös jo esikasvin kasvuvuonna (Nyberg ja Lindén 2008), koska rehevä härkävun kasvusto on omavarainen eikä välttämättä hyödynnä maaperän tai lannoitteen N:ä (Jensen 1986, Turpin ym. 2002, Nyberg ja Lindén 2008).

Esikasvivaikutuksesta ja suuresta laskennallisesta mineralisaatiosta huolimatta lannoittamattomien ruutujen mineraali-N-pitoisuus säilyi vakaana kasvukauden ajan. Syksyllä 2017 maaperä oli kostea ja hajottajilla oli erinomaiset olosuhteet mineralisoida esikasvin jäänteiden sisältämää N:ä NH₄⁺-N:ksi, jonka nitrifikaatiobakteerit ovat edelleen

nitrifioineet NO_3^- -N:ksi (Paul 2007). Tämä NO_3^- -N on voinut huuhtoutua syvempiin kerroksiin sekä vuoden 2017 puolella, että keväällä 2018 lumen sulamisvesien mukana (Turtola ja Kempainen 1998). N-taseen muutokset näytteenotokertojen välillä muodostuivat joissain ruuduissa ajoittain negatiiviseksi, mikä saattoi johtua joko korkean pohjaveden mahdollistamasta N-otosta tai kasvustojen epätasaisesta kasvurytmistä.

Härkäpapuruuduissa mineralisaatio oli vähäistä ja keskimäärin 37 N kg ha^{-1} pienempi kuin kaura 0N ja rapsi 0N -ruuduissa. Jos esikasvina olleen härkäpavun mineralisaatiota tapahtui kasvukauden aikana, härkäpapuruutujen vähäiseksi laskettu mineralisaatio saattoi johtua erittäin lämpimästä ja kuivasta kasvukaudesta (Rovira ja Vallejo 1997, Peoples ym. 2001). Kuivuus suhteellisen matalajuuriselle kasville yhdessä maaperän valmiiksi runsaiden mineraali-N-varantojen kanssa saattoi vähentää härkäpavun BNF:ää ja saada sen hyödyntämään muokkauskerroksen N-varantoja (Guérin ym. 1991, Turpin ym. 2002). Tätä tukee havainto härkäpavun N-oton ja maaperän laskevan NO_3^- -pitoisuuden korrelaatiosta.

6.2.2 Vuoden 2018 härkäpapakasvuston mineralisaatiopotentiaali

Vuoden 2018 härkäpapakasvustojen painotettu N-pitoisuus viimeisellä näytteenotokerralla sadonkorjuun jälkeen oli 2,15 %. Tämä on saman suuruinen Schwenken ym. (1998) ja Turpinin ym. (2002) saaman painotetun N-pitoisuuden kanssa, mutta huomattavasti korkeampi kuin Senaratnen ja Hardarsonin (1988) raportoima 1,64 % sekä Nybergin ja Lindénin (2008) raportoima 1,29 %. Suotuisissa olosuhteissa, maaperän lämpötilan ollessa yli $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ja kosteuden yli 50 % v/v, kasvinjäänteistä voisi N-pitoisuuden perusteella mineralisaation kautta laskennallisesti vapautua yhteensä 72 N kg ha^{-1} . Schwenken ym. (1998) tutkimuksessa kasvuston biomassa ja kasvuston BNF (Taulukko 2) ovat hyvin lähellä tässä tutkimuksessa saatuja tuloksia, joten härkäpavun nettolisäys maan N-taseeseen kasvukaudelta 2018 saattaisi olla noin 20 N kg ha^{-1} . Härkäpavun N-lannoitusvaikutuksen määrä tarkentuisi, mikäli juuriston ja juuristoeritteiden sisältämä N kyettäisiin mittaamaan arvioinnin sijaan (Senaratne ja Hardarson 1988, Schwenke ym. 1998, Peoples ym. 2001, Nyberg ja Lindén 2008). Rochesterin ym. (1998) ja Turpinin ym. (2002) mukaan juuristo voi sisältää jopa $66\text{--}100 \text{ N kg ha}^{-1}$.

6.3 Tutkimuksen virhelähteet ja ongelmat

Kasvustojen biomassan ja N-oton keskivirhe muodostui suureksi, sillä siemenet itivät erittäin epätasaisesti kuivuudesta johtuen. Viimeisellä näytteenotokerralla siemensatoa ei punnittu ennen C:N-analyysiä. Kasvustoista korjattiin lopullinen sato, mutta puitu sato oli jopa yli 1000 kg ha⁻¹ niukempi kuin viimeisiin kasvustonäytteisiin perustuen oli odotettavissa. Eron saattaa selittää rapsin tuleentumisasteen erot (osa kasvustoista oli tuleentumaton) ja kaura- ja kevätvehnäkasvustojen ränsistyminen puimurin rikkoutumisesta johtuen. Lisäksi tuhoja aiheuttivat koekentällä kulkevat eläimet ja ihmiset.

Maanäytteet otettiin vahingossa osin myös siemenrivistä, kun ne olisi pitänyt ottaa ainoastaan siemenrivin molemmin puolin. Joistakin uuttoliuoksista mitatut NH₄⁺-N-pitoisuudet johtivat korjausvähennysten jälkeen maanäytteiden negatiivisiin NH₄⁺-N-pitoisuuksiin. Syytä tähän ei tiedetä.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Koska härkäpapua kasvinvuorotuksessa seuranneet ilman N-lannoitusta viljellyt kaura ja rapsi ottivat runsaasti N:ä suhteessa N-lannoitettuihin kasvustoihin jopa poikkeuksellisen kuivana kasvukautena 2018, näyttäisi härkäpavun jälkeen maaperään jäävän runsaasti N:ä. N-otto syvemmistä maakerroksista saattoi olla mahdollista viitaten aiemmin sateisen vuoden jälkeen korkealle tasolle mitattuun Haltialan pohjaveteen, sillä tätä kenttäkoetta edeltävä vuosi oli myös varsin sateinen.

Maaperässä on esikasvina olleen härkäpavun sadonkorjuun jälkeen kuluneen syksyn 2017 ja kevään 2018 aikana saattanut tapahtua runsaasti mineralisaatiota, sillä lannoittamattomien kasvustojen N-otto ei eronnut lannoitetuista. Poikkeuksellisen kuiva kasvukausi aiheutti kuitenkin runsaasti jopa koeruutujen sisäistä vaihtelua sekä kasvien biomassan muodostukseen että kasvurytmiin, mistä johtuen härkäpavun N-lannoitusarvoa ja sen vaikutusta viljelykasvien N-dynamiikkaan on vaikea arvioida kokonaisuutena. Härkäpavun tarkempi vaikutus seuraavan viljelykasvin N-dynamiikkaan voitaisiin arvioida toistamalla koe uudelleen viljelykasvien kannalta edullisemmissä kasvuolosuhteissa. Härkäpavun sekä muiden palkokasvien maanalaisen kasvun ja vuorovaikutuksen selvittäminen maaperän ja seuraavien kasvien N-dynamiikkaan vaatii erityisesti tutkimusta.

8 KIITOKSET

Haluan kiittää professori Pirjo Mäkelää aiheen vihjaamisessa, tutkielmani ohjaamisesta, neuvoista ja kannustuksesta vastoinkäymisistä huolimatta. Suuret kiitokset haluan myös osoittaa professori Laura Alakukulle, jonka projektissa sain tutkielmani suorittaa ja jonka rahoituksen turvin tutkielmani mittaukset ja määritykset oli mahdollista toteuttaa. Lisäksi olen kiitollinen yliopistonlehtori Asko Simojolle, vilpittömästä avusta liittyen maanäytteiden käsittelyyn sekä analysointiin. Kiitän myös Mikael Änäkkälän, Niila-Sakari Keijälän ja tutkimusmestari Markku Tykkyläisen työpanosta kenttäkokeen hoitoon ja mittauksiin liittyvissä asioissa.

LÄHTEET

- Abdalla, A.A., Ahmed, M.F., Taha, M.B. & El Naim, A.M. 2015. Effects of different environments on yield components of faba bean (*Vicia faba* L.). *International Journal of Agriculture and Forestry* 5: 1-9.
- Aksouh, N.M., Jacobs, B.C., Stoddard, F.L. & Mailer, R.J. 2001. Response of canola to different heat stresses. *Australian Journal of Agricultural Research* 52: 817-824.
- Albert, B., Le Cahérec, F., Niogret, M-F., Faes, P., Avice, J-C., Leport, L. & Bouchereau, A. 2012. Nitrogen availability impacts oilseed rape (*Brassica napus* L.) plant water status and proline production efficiency under water-limited conditions. *Planta* 236: 659-676.
- Andersen, M.N., Heidmann, T. & Plauborg, F. 1996. The effects of drought and nitrogen on light interception, growth and yield of winter oilseed rape. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B – Plant & Soil Science* 46: 55-67.
- Angus, J., Peoples, M.B., Kirkegaard, J., Ryan, M.H. & Ohlander, L. 2008. The value of break crops for wheat. Teoksessa: Unkovich, M. (toim). *Global Issues. Paddock Action. (Proceedings of the 14th Australian Agronomy Conference, 21-25 September 2008, Adelaide, South Australia)*. Gosford, Australia: The Regional Institute Ltd.
- Apogee Instruments. 2018. Owner's Manual: Chlorophyll Concentration Meter Model MC-100. <https://www.apogeeinstruments.com/content/MC-100-manual.pdf>. Julkaistu toukokuu 2018, viitattu 30.10.2018.
- Asseng, S. & Van Herwaarden, A.F. 2003. Analysis of the benefits to wheat yield from assimilates stored prior to grain filling in a range of environments. *Plant and Soil* 256: 217-229.
- Autio, L. & Honkanen, J. 2006. Haltialan metsän pohjaveden tason ja valumaveden laadun seuranta 2004-2005. Teoksessa: Honkanen, J. (toim.). *Haltialan metsäalueen luonto. Helsingin kaupungin ympäristökeskuksen julkaisuja 4/2006*. Helsinki: Helsingin kaupungin ympäristökeskus.

- Bardgett, R.D. 2005. *The Biology of Soil: A Community and Ecosystem Approach*. Biology of Habitats. Oxford: Oxford University Press. 254 s.
- Bardgett, R.D., Streeter, T.C. & Bol, R. 2003. Soil microbes compete effectively with plants for organic-nitrogen inputs to temperate grasslands. *Ecology* 84: 1277-1287.
- Berry, P.M., Spink, J., Foulkes, M.J. & White, P.J. 2010. The physiological basis of genotypic differences in nitrogen use efficiency in oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Field Crops Research* 119: 365-373.
- Berg, B. & McClaugherty. 2014. *Climatic Environment*. Teoksessa: Berg, B. & McClaugherty, C. 2014. *Plant Litter. Decomposition, Humus Formation, Carbon Sequestration*. Third Edition. Heidelberg: Springer.
- Biederbeck, V.O. & Campbell, C. A. 1973. Soil microbial activity as influenced by temperature trends and fluctuations. *Canadian Journal of Soil Science* 53: 363-376.
- Britto, D.T. & Kronzucker, H.J. 2013. Viewpoint: Ecological significance and complexity of N-source preference in plants. *Annals of Botany* 112: 957-963.
- Båth, B. 2000. Matching the availability of N mineralized from green-manure crops with the N-demand of field vegetables. *Acta Universitatis Agriculturae Sueciae: Agraria* 222. Uppsala: SLU Service/Repro. 29 s.
- Cai, C., Yin, X., He, S., Jiang, W., Si, C., Struik, P.C., Luo, W., Li, G., Xie, Y., Xiong, Y. & Pan, G. 2016. Responses of wheat and rice to factorial combinations of ambient and elevated CO₂ and temperature in FACE experiments. *Global Change Biology* 22: 856-874.
- Campbell, C.A. & Biederbeck, V.O. 1982. Changes in mineral N and numbers of bacteria and actinomycetes during two years under wheat-fallow in southwestern Saskatchewan. *Canadian Journal of Soil Science* 62: 125-137.
- Carter, J.M., Gardner, W.K. & Gibson, A.H. 1994. Improved growth and yield of faba beans (*Vicia faba* cv. Fiord) by inoculation with strains of *Rhizobium leguminosarum* biovar. *viciae* in acid soils in south west Victoria. *Australian Journal of Agricultural Research* 45: 613-623.

- Cassman, K.G., Gines, G.C., Dizon, M.A., Samson, M.I. & Alcantara, J.M. 1996. Nitrogen-use efficiency in tropical lowland rice systems: contribution from indigenous and applied nitrogen. *Field Crops Research* 47: 1-12.
- Chen, B., Liu, E., Tian, Q., Yan, C. & Zhang, Y. 2014. Soil nitrogen dynamics and crop residues. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 34: 429-442.
- Crews, T.E. & Peoples, M.B. 2004. Legume versus fertilizer sources of nitrogen: ecological tradeoffs and human needs. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 102: 279-297.
- Criddle, R.S., Ward, M.R. & Huffaker, R.C. 1988. Nitrogen uptake by wheat seedlings, interactive effects of four nitrogen sources: NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ and urea¹. *Plant Physiology* 86: 166-175.
- Deacon, L.J., Pryce-Miller, E.J., Frankland, J.C., Bainbridge, B.W., Moore, P.D. & Robinson, C.H. 2006. Diversity and function of decomposer fungi from a grassland soil. *Soil Biology and Biochemistry* 38: 7-20.
- Dean, J.E. & Weil, R.R. 2009. Brassica cover crops for nitrogen retention in the Mid-Atlantic coastal plain. *Journal of Environmental Quality* 38: 520-528.
- De Micco, V. & Aronne, G. 2012. Morpho-Anatomical Traits for Plant Adaptation to Drought. Teoksessa: Aroca, R. (eds.). *Plant Responses to Drought Stress: From Morphological to Molecular Features*. Berlin, Germany: Springer. s. 38.
- Dreccer, M.F., Schapendonk, A.H.C.M., Slafer, G.A. & Rabbinge, R. 2000. Comparative response of wheat and oilseed rape to nitrogen supply: absorption and utilisation efficiency of radiation and nitrogen during the reproductive stages determining yield. *Plant and Soil* 220: 189-205.
- Eagle, A.J., Bird, J.A., Horwath, W.R., Linqvist, B.A., Brouder, S.M., Hill, J.E. & van Kessel, C. 2000. Rice yield and nitrogen utilization efficiency under alternative straw management practices. *Agronomy Journal* 92: 1096-1103.
- Ehdaie, B., Layne, A.P. & Waines, J. G. 2012. Root system plasticity to drought influences grain yield in bread wheat. *Euphytica* 186: 219-232.

- Elferjani, R. & Soolanayakanahally, R. 2018. Canola responses to drought, heat, and combined stress: shared and specific effects on carbon assimilation, seed yield, and oil composition. *Frontiers in Plant Science* 9:1224.
- Evira. Julkaisuvuosi ei tiedossa. Keskimääräiset typpi- ja fosforilannoitteiden käytöt maalajeittain vuosina 1988-2012. Kausijulkaisussa: Peltonen-Sainio, P., Salo, T., Jauhiainen, L., Lehtonen, H. & Sieviläinen, E. 2015. Static yields and quality issues: Is the agri-environment program the primary driver? *Ambio* 44: 544-556.
- Fischer, R.A. 1993. Irrigated spring wheat and timing and amount of nitrogen fertilizer. II. Physiology of grain yield response. *Field Crops Research* 33: 57-80.
- Follett, R.H., Follett, R.F. & Halvorson, A.D. 1992. Use of a chlorophyll meter to evaluate the nitrogen status of dryland winter wheat. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 23: 687-697.
- Fowler, D., Coyle, M., Skiba, U., Sutton, M.A., Cape, J.N., Reis, S., Sheppard, L.J., Jenkins, A., Grizzetti, B., Galloway, J.N., Vitousek, P., Leach, A., Bouwman, A.F., Butterbach-Bahl, K., Dentener, F., Stevenson, D., Amann, M. & Voss, M. 2013. The global nitrogen cycle in the twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences* 368: 1-13.
- Fox, R.H., Myers, R.J.K. & Vallis, I. 1990. The nitrogen mineralization rate of legume residues in soil as influenced by their polyphenol, lignin, and nitrogen contents. *Plant and Soil* 129: 251-259.
- Gammelvind, L.H., Schjoerring, J.K., Mogensen, V.O., Jensen, C.R. & Bock, J.G.H. 1996. Photosynthesis in leaves and siliques of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Plant and Soil* 186: 227-236.
- Gan, Y., Angadi, S.V., Cutforth, H., Potts, D., Angadi, V.V. & McDonald, C.L. 2004. Canola and mustard response to short periods of temperature and water stress at different developmental stages. *Canadian Journal of Plant Science* 84: 697-704.
- Guo, X., Drury, C.F., Yang, X., Reynolds, W.D. & Fan, R. 2014. The extent of soil drying and rewetting affects nitrous oxide emissions, denitrification and nitrogen mineralization. *Soil Science Society of America Journal* 78: 194-204.

- Gramig, G.G., Stoltenberg, D.E. & Norman, J.M. 2006. Weed species radiation-use efficiency as affected by competitive environment. *Weed Science* 54: 1013-1024.
- Gregory, P.J. & Nortcliff, S. 2013. *Soil Conditions and Plant Growth*. 12th edition. Chichester: Wiley-Blackwell. 472 s.
- Gregow, H., Ruosteenoja, K., Juga, I., Näsman, S., Mäkelä, M., Laapas, M. & Jylhä, K. 2011. Lumettoman maan routaolojen mallintaminen ja ennustettavuus muuttuvassa ilmastossa. Ilmatieteen laitos. Raportteja 2011:5.
- Guérin, V., Pladys, D., Trinchant, J-C. & Rigaud, J. 1991. Proteolysis and nitrogen fixation in faba-bean (*Vicia faba*) nodules under water stress. *Physiologia Plantarum* 82: 360-366.
- Hack, H., Bleiholder, H., Buhr, L., Meier, U., Schnock-Fricke, U., Weber, E. & Witzemberger, A. 1992. Einheitliche Codierung der Phänologischen Entwicklungsstadien Mono- und Dikotylar Pflanzen. -Erweiterte BBCH-Skala, Allgemein-. *Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes* 44: 265-270.
- Hay, R.K.M. 1999. *Physiological Control of Growth and Yield in Wheat: Analysis and Synthesis*. Teoksessa: Smith, D.L. & Hamel, C. (eds.). *Crop Yield: Physiology and Processes*. Berlin, Germany: Springer-Verlag.
- Haynes, R.J. 1986. *Mineral Nitrogen in the Plant-Soil System*. Orlando: Academic Press, Inc. 483 s.
- Haynes, R.J. & Goh, K.M. 1978. Ammonium and nitrate nutrition of plants. *Biological Reviews* 53: 465-510.
- Havlin, J.L., Beaton, J.D., Tisdale, S.L. & Nelson, W.L. 2005. *Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management*. 7th edition. New Jersey: Pearson Education, Inc. 528 s.
- Hegab, A.S.A., Fayed, M.T.B., Hamada, M.M.A. & Abdrabbo, M.A.A. 2014. Productivity and irrigation requirements of faba-bean in North Delta of Egypt in relation to planting dates. *Annals of Agricultural Science* 59: 185-193.
- Henry, J.L. & MacDonald, K.B. 1978. The effects of soil and fertilizer nitrogen and moisture stress on yield, oil and protein content of rape. *Canadian Journal of Soil Science* 58: 303-310.

- Hocking, P.J., Randall, P.J. & DeMarco, D. 1997. The response of dryland canola to nitrogen fertilizer: partitioning and mobilization of dry matter and nitrogen and nitrogen effects on yield components. *Field Crops Research* 54: 201-220.
- Howard, D.M. & Howard, P.J.A. 1993. Relationships between CO₂ evolution, moisture content and temperature for a range of soil types. *Soil Biology and Biochemistry* 25: 1537-1546.
- Ilmasto-opas. 2019. Nykyinen ilmasto - 30 vuoden keskiarvot. <https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/suomen-muuttuva-ilmasto/-/artikkeli/1c8d317b-5e65-4146-acda-f7171a0304e1/nykyinen-ilmasto-30-vuoden-keskiarvot.html>. Viitattu 27.1.2019.
- Ilmatieteen laitos. 2018. Kasvukausi 2018. <https://ilmatieteenlaitos.fi/kasvukausi-2018>. Päivitetty 5.11.2018, viitattu 7.11.2018.
- Jalali, M., Mahdavi, S. & Ranjbar, F. 2014. Nitrogen, phosphorus and sulfur mineralization as affected by soil depth in rangeland ecosystems. *Environmental Earth Sciences* 72: 1775-1788.
- Jensen, E.S. 1986. Symbiotic N₂ fixation in pea and field bean estimated by 15N fertilizer dilution in field experiments with barley as a reference crop. *Plant and Soil* 92: 3-13.
- Järvi, A., Kari-Kärki, M., Laine, A., Salo, Y., Vuorinen, M., Mäkelä, L. & Kangas, A. 1998. Virallisten lajikekokeiden tulokset 1990-1997. Maatalouden tutkimuskeskuksen julkaisuja. Sarja A: 36. Jokioinen: Maatalouden tutkimuskeskus.
- Kaewpradit, W., Toomsan, B., Vityakon, P., Limpinuntana, V., Saenjan, P., Jogloy, S., Patanothai, A. & Cadisch, G. 2008. Regulating mineral N release and greenhouse gas emissions by mixing groundnut residues and rice straw under field conditions. *European Journal of Soil Science* 59: 640-652.
- Kajak, A. 1997. Effects of epigeic macroarthropods on grass litter decomposition in mown meadow. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 64: 53-63.
- Kaschuk, G., Kuyper, T.W., Leffelaar, P.A., Hungria, M. & Giller, K.E. 2009. Are the rates of photosynthesis stimulated by the carbon sink strength of rhizobial and arbuscular mycorrhizal symbioses? *Soil Biology & Biochemistry* 41: 1233- 1244.

- Katerji, N, Mastrorilli, M., Lahmer, F.Z., Maalouf, F. & Oweis, T. 2011. Faba bean productivity in saline-drought conditions. *European Journal of Agronomy* 35: 2-12.
- Kaye, J.P & Hart, S.C. 1997. Reviews: Competition for nitrogen between plants and soil microorganisms. *Trends in Ecology & Evolution* 12: 139-143.
- Kirkegaard, J.A. & Ryan, M.H. 2014. Magnitude and mechanisms of persistent crop sequence effects on wheat. *Field Crops Research* 164: 154-165.
- Laine, A., Högnasbacka, M., Niskanen, M., Ohralahti, K., Jauhiainen, L., Kaseva, J. & Nikander H. 2017. Virallisten lajikekokeiden tulokset 2009 – 2016. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 1/2017. Helsinki: Luonnonvarakeskus.
- Lindén, B. 2008. Efterverkan av olika förfrukter: inverkan på stråsädesgrödors avkastning och kvävetillgång - en litteraturoversikt. Avdelningen för precisionsodling 14. SLU: Avdelningen för precisionsodling.
http://www.vaxteko.nu/html/sll/slu/rapport_precisionsodling/RPO14/RPO14.PDF.
Tulostettu 12.1.2019.
- López-Bellido, L., Muñoz-Romero, V., Benítez-Vega, J., Fernández-García, P., Redondo, R. & López-Bellido, R.J. 2012. Wheat response to nitrogen splitting applied to a vertisols in different tillage systems and cropping rotations under typical Mediterranean climatic conditions. *European Journal of Agronomy* 43: 24-32.
- Lupwayi, N.Z. & Soon, Y.K. 2015. Carbon and nitrogen release from legume crop residues for three subsequent crops. *Soil Science Society of America Journal* 79: 1650-1659.
- Lupwayi, N.Z. & Soon, Y.K. 2016. Nitrogen-related rotational effects of legume crops on three consecutive subsequent crops. *Soil Science Society of America Journal* 80: 306-316.
- Macduff, J.H. & White, R.E. 1985. Net mineralization and nitrification rates in a clay soil measured and predicted in permanent grassland from soil temperature and moisture content. *Plant and Soil* 86: 151-172.
- Mayer, J., Buegger, F., Jensen, E.S., Schloter, M. & Heß, J. 2003a. Estimating N rhizodeposition of grain legumes using a ¹⁵N in situ stem labelling method. *Soil Biology and Biochemistry* 35: 21-28.

- Mayer, J., Buegger, F., Jensen, E.S., Schloter, M. & Heß, J. 2003b. Residual nitrogen contributions from grain legumes to succeeding wheat and rape and related microbial process. *Plant and Soil* 255: 541-554.
- Meehl, G.A., Stocker, T.F., Collins, W.D., Friedlingstein, P., Gaye, A.T., Gregory, J.M., Kitoh, A., Knutti, R., Murphy, J.M., Noda, A., Raper, S.C.B., Watterson, I.G., Weaver, A.J. & Zhao, Z-C. 2007. Global Climate Projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University. <https://wg1.ipcc.ch/publications/wg1-ar4/ar4-wg1-chapter10.pdf>. Viitattu 27.1.2019.
- METER Group. 2018. AccuPAR PAR/LAI Ceptometer Model LP-80 Operator's Manual. http://library.metergroup.com/Manuals/10242_Accupar%20LP80_Web.pdf. Muokattu 26.11.2018, viitattu 2.11.2018.
- Mikkonen, S., Laine, M., Mäkelä, H.M., Gregow, H., Tuomenvirta, H., Lahtinen, M. & Laaksonen, A. 2014. Trends in the average temperature in Finland, 1847-2013. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 29: 1521-1529.
- Miller, S.S. & Fulcher, R.G. 2011. *Microstructure and Chemistry of the Oat Kernel*. Teoksessa: Webster, F.H. & Wood, P.J. (toim.). *Oats: Chemistry and Technology*. Second edition. St. Paul, Minnesota, Yhdysvallat: AACC International, Inc. s. 83.
- Moll, R.H., Kamprath, E.J. & Jackson, W.A. 1982. Analysis and interpretation factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. *Crop Science* 74: 562-564.
- Morrison, M.J. & Stewart, D.W. 2002. Heat stress during flowering in summer *Brassica*. *Crop Science* 42: 797-803.
- Mossé, J. 1990. Nitrogen to protein conversion factor for ten cereals and six legumes or oilseeds. A reappraisal of its definition and determination. Variation according to species and to seed protein content. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 38: 18-24.

- Muurinen, S. 2007. Nitrogen Dynamics and Nitrogen Use Efficiency of Spring Cereals under Finnish Growing Conditions. Academic dissertation. Department of Applied Biology, Publication no. 29. Helsinki: University of Helsinki.
- Muurinen, S., Kleemola, J. & Peltonen-Sainio, P. 2007. Accumulation and translocation of nitrogen in spring cereal cultivars differing in nitrogen use efficiency. *Agronomy Journal* 99: 441-449.
- Muurinen, S., Slafer, G.A. & Peltonen-Sainio, P. 2006. Breeding effects on nitrogen use efficiency of spring cereals under northern conditions. *Crop Science* 46: 561-568.
- Navarro-García, F., Casermeiro, M.À. & Schimel, J.P. 2012. When structure means conservation: effect of aggregate structure in controlling microbial responses to rewetting events. *Soil Biology and Biochemistry* 44: 1-8.
- Nyberg, A. & Lindén, B. 2008. Åkerböror som förfrukt till vårsäd i ekologisk odling. Avdelningen för precisionsodling 15. SLU: Avdelningen för precisionsodling. http://www.vaxteko.nu/html/sll/slu/rapport_precisionsodling/RPO15/RPO15.PDF. Viitattu 10.12.2018
- Nyiraneza, J., Cambouris, A.N., Ziadi, N., Tremblay, N. & Nolin, M.C. 2012. Spring wheat yield and quality related to soil texture and nitrogen fertilization. *Agronomy Journal* 104: 589-599.
- Paasonen-Kivekäs, M., Peltomaa, R., Vakkilainen, P. & Äijö, H. 2016. Maan vesi- ja ravinnetalous. Ojitus, kastelu ja ympäristö. 2. täydennetty painos. Helsinki: Salaojayhdistys ry. 487 s.
- Paul, E.A. 2007. *Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry*. Canada: Elsevier Academic Press. 532 s.
- Paul, K.I., Polglase, P.J., O'Connell, A.M., Carlyle, J.C., Smethurst, P.J. & Khanna, P.K. 2003. Defining the relation between soil water content and net nitrogen mineralization. *European Journal of Soil Science* 54: 39-47.
- Parfitt, R.L., Giltrap, D.J. & Whitton, J.S. 1995. Contribution of organic matter and clay minerals to the cation exchange capacity of soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 26: 1343-1355.

- Peet, M.M., Sato, S. & Gardner, R.G. 1998. Comparing heat stress effects on male-fertile and male-sterile tomatoes. *Plant, Cell & Environment* 21: 225-231.
- Peltonen, P. 1990. Seasonal alterations in canopy architecture of oats (*Avena sativa* L.) and their relations to yield formation. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science* 40: 221-230.
- Peltonen, S. & Anttila, S. 2017. Peltojen kunnostus. ProAgria Keskusten Liiton julkaisu nro 1153. Vantaa: ProAgria Keskusten Liitto. 96s.
- Peltonen-Sainio, P. 1991. Effect of moderate and severe drought stress on the pre-anthesis development and yield formation of oats. *Journal of Agricultural Science in Finland* 63: 379-389.
- Peltonen-Sainio, P. 1997a. Leaf area duration of oat at high latitudes. *Journal of Agronomy and Crop Science* 178: 149-155.
- Peltonen-Sainio, P. 1997b. Nitrogen fertilizer and foliar application of cytokinin affect spikelet and floret set and survival in oat. *Field Crops Research* 49: 169-176.
- Peltonen-Sainio, P., Forsman, K. & Poutala, T. 1997. Crop management effects on pre- and post-anthesis changes in leaf area index and leaf area duration and their contribution to grain yield and yield components in spring cereals. *Journal of Agronomy and Crop Science* 179: 47-61.
- Peltonen-Sainio, P., Jauhiainen, L. & Hakala, K. 2010. Crop responses to temperature and precipitation according to long-term multi-location trials at high-latitude conditions. *Journal of Agricultural Science* 149: 49-62.
- Peltonen-Sainio, P., Jauhiainen, L., Hakala, K. & Ojanen, H. 2009. Climate change and prolongation of growing season: changes in regional potential for field crop production in Finland. *Agricultural and Food Science* 18: 171-190.
- Peltonen-Sainio, P., Salo, T., Jauhiainen, L., Lehtonen, H. & Sieviläinen, E. 2015. Static yields and quality issues: Is the agri-environment program the primary driver? *Ambio* 44: 544-556.
- Peoples, M.B., Bowman, A.M., Gault, R.R., Herridge, D.F., McCallum, M.H., McCormick, K.M., Norton, R.M., Rochester, I.J., Scammell, G.J. & Schwenke, G.D. 2001. Factors regulating the contributions of fixed nitrogen by pasture and

crop legumes to different farming systems of eastern Australia. *Plant and Soil* 228: 29-41.

- Peoples, M.B., Brockwell, J., Herridge, D.F., Rochester, I.J., Alves, B.J.R., Urquiaga, S., Boddey, R.M., Dakora, F.D., Bhattarai, S., Maskey, S.L., Sampet, C., Rerkasem, B., Khan, D.F., Hauggaard-Nielsen, H. & Jensen, E.S. 2009. The contributions of nitrogen fixing crop legumes to the productivity of agricultural systems. *Symbiosis* 48:1–17.
- Plaut, Z., Butow, B.J., Blumenthal, C.S. & Wrigley, C.W. 2004. Transport of dry matter into developing wheat kernes and its contribution to grain yield under post-anthesis waster deficit and elevated temperature. *Field Crops Research* 86: 185-198.
- Preissel, S., Reckling, M., Schläfke, N. & Zander, P. 2015. Magnitude and farm-economic value of grain legume pre-crop benefits in Europe: A review. *Field Crops Research* 175: 64-79.
- Pulli, S. & Vestberg, M. 1981. Genetic and management adaptation of field bean (*Vicia faba* L.) in Finland. *Journal of the Scientific Agricultural Society of Finland* 53: 328-340.
- Rajala, A., Peltonen-Sainio, P., Kauppila, R., Wilhelmson, A., Reinikainen, P. & Kleemola, J. 2007. Within-field variation in grain yield, yield components and quality traits of two-row barley. *Journal of Agricultural Science* 145: 445-454.
- Reatto, A., Bruand, A., Silva, E.M., Guéganl, R., Cousin, I., Brossard, M. & Martins, E.S. 2009. Shrinkage of mcicroaggregates in Brazilian latosols during drying: Significance of the clay content, mineralogy and hydric stress history. *European Journal of Soil Science* 60: 1106-1116.
- Robson, M.C., Fowler, S.M., Lampkin, N.H., Leifert, C., Leitsch, M., Robinson, D., Watson, C.A. & Litterick, A.M. 2002. The agronomic and economic potential of break crops for ley/arable rotations in temperate organic agriculture. *Advances in Agronomy* 77: 369-427.
- Rochester I. J., Peoples. M. B., Constable. G. A. & Gault, R. R.1998. Faba beans and other legumes add nitrogen to irrigated cotton cropping systems. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 38: 253–260.

- Rossato, L., Lainé, P. & Ourry, A. 2001. Nitrogen storage and remobilization in *Brassica napus* L. during the growth cycle: nitrogen fluxes within the plant and changes in soluble protein patterns. *Journal of Experimental Botany* 52: 1655-1663.
- Rovira, P. & Vallejo, V.R. 1997. Organic carbon and nitrogen mineralization under Mediterranean climatic conditions: the effects of incubation depth. *Soil Biology and Biochemistry* 29: 1509-1520.
- Salazar, A., Sulman, B.N. & Dukes, J.S. 2018. Microbial dormancy promotes microbial biomass and respiration across pulses of drying-wetting stress. *Soil Biology and Biochemistry* 116: 237-244.
- Schimel, J.P. & Bennett, J. 2004. Nitrogen mineralization: challenges of a changing paradigm. *Ecology* 85: 591-602.
- Schilizzi, S. & Pannell, D. 2001. The economics of nitrogen fixation. *Agronomie* 21: 527-537.
- Schwendener, C.M., Lehmann, J., de Camargo, P.B., Luizao, R.C.C. & Fernandes, E.C.M. 2005. Nitrogen transfer between high- and low-quality leaves on a nutrient-poor oxisol determined by ^{15}N enrichment. *Soil Biology & Biochemistry* 37: 787-794.
- Schwenke, G.D., Peoples, M.B., Turner, G.L. & Herridge, D.F. 1998. Does nitrogen fixation of commercial, dryland chickpea and faba bean crops in north-west New South Wales maintain or enhance soil nitrogen? *Australian Journal of Experimental Agriculture* 38: 61-70.
- Senaratne, R. & Hardarson, G. 1988. Estimation of residual N effect of faba bean and pea on two succeeding cereals using ^{15}N methodology. *Plant and Soil* 110: 81-89.
- Sinclair, T.R. & de Wit, C.T. 1975. Photosynthate and nitrogen requirements for seed production by various crops. *Science* 189: 565-567.
- Smil, V. 1999. Nitrogen in crop production: An account of global flows. *Global Biogeochemical Cycles* 13: 647-662.
- Sylvester-Bradley, R. & Kindred, D.R. 2009. Analysing nitrogen responses of cereals to prioritize routes to the improvement of nitrogen use efficiency. *Journal of Experimental Botany* 60: 1939-1951.

- Tilsner, J., Kassner, N., Struck, C. & Lohaus, G. 2005. Amino acid contents and transport in oilseed rape (*Brassica napus* L.) under different nitrogen conditions. *Planta* 221: 328-338.
- Turtola, E. & Kemppainen, E. 1998. Nitrogen and phosphorus losses in surface runoff and drainage water after application of slurry and mineral fertilizer to perennial grass ley. *Agricultural and Food Science in Finland* 7: 569-581.
- Turpin, J.E., Herridge, D.F. & Robertson, M.J. 2002. Nitrogen fixation and soil nitrate interactions in field-grown chickpea (*Cicer arietinum*) and fababean (*Vicia faba*). *Australian Journal of Agricultural Research* 53: 599-608.
- Tuulos, A., Yli-Halla, M., Stoddard, F. & Mäkelä, P. 2014. Winter turnip rape as a soil N scavenging catch crop in a cool humid climate. *Agronomy for Sustainable Development* 35: 359-366.
- Unkovich, M. J. & Pate, J. S. 2000. An appraisal of recent field measurements of symbiotic N₂ fixation by annual legumes. *Field Crops Research* 65: 211–228.
- Valkama, E., Salo, T., Esala, M. & Turtola, E. 2013. Nitrogen balances and yields of spring cereals as affected by nitrogen fertilization in northern conditions: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 164: 1-13.
- Van Berkum, P., Beyene, D., Temprano Vera, F. & Keyser, H.H. 1995. Variability among rhizobium strains originating from nodules of *Vicia faba*. *Applied and Environmental Microbiology* 61: 2649-2653.
- Van Schreven, D.A. 1968. Mineralisation of the carbon and nitrogen of plant material added to soil and of the soil humus during incubation following periodic drying and rewetting the soil. *Plant Soil* 28: 226-245.
- Vinten, A.J.A., Davies, R., Castle, K. & Baggs, E.M. 1998. Control of nitrate leaching from a nitrate vulnerable zone using paper mill waste. *Soil Use and Management* 14: 44-51.
- Yoneyama, T. 1983. Distribution of nitrogen absorbed during different times of growth in the plant parts of wheat and contribution to the grain amino acids. *Soil Science and Plant Nutrition* 29: 193-207.

Zadoks, J.C., Chang, T.T. & Konzak, C.F. 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research* 14: 415-421.

Zörb, C., Becker, E., Merkt, N., Kafka, S., Schmidt, S. & Schmidhalter, U. 2017. Shift of grain protein composition in bread wheat under summer drought events. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 180: 49-55.

LIITE 1: NÄYTTEENOTTOAJANKOHTA

Taulukko 1. Kasvusto- ja maanäytteiden ajankohdat Haltialan kenttäkokeessa kesällä 2018. Suluissa on ilmoitettu kasvin kehitysvaihe BBCH- tai Zadoks-asteikon mukaan (Zadoks 1974, Hack 1992).

Kasvi (kasvuasteikko)	Näytteenottokerta					
	1	2	3	4	5	6
Härkäpapu (BBCH)	14.6. (13)	27.6. (32)	10.7. (60)	24.7. (67)	7.8. (79)	20.8. (85) ²
Rapsi 0N (BBCH)	4.7. (13)	16.7. (33)	31.7. (61)	14.8. (72)	29.8. (82)	
Rapsi 90N (BBCH)	4.7. (13)	16.7. (33)	31.7. (61)	14.8. (72)	29.8. (82)	
Kaura 0N (Zadoks)	14.6. (21) ¹	27.6. (45)	10.7. (56)	24.7. (68)	7.8. (75)	
Kaura 50N (Zadoks)	14.6. (21) ¹	27.6. (45)	10.7. (56)	24.7. (68)	7.8. (77)	
Kaura 90N (Zadoks)	14.6. (21)	27.6. (47)	10.7. (56)	24.7. (68)	7.8. (85)	20.8. (91) ²
Kevätvehnä (Zadoks)	14.6. (21)	27.6. (40)	10.7. (52)	24.7. (64)	7.8. (75)	20.8. (87)

¹ maanäytteet otettiin kuusi vuorokautta myöhemmin (Zadoks 32).

² vain maanäyte ja lehtialaindeksi

LIITE 2: VILJELYKASVIEN FRAKTIOINTITULOKSET

Taulukko 2. Eri kasvinosien biomassa (g m^{-2}) näytteenottokerroittain ja fraktioiden prosenttiosuudet kunkin näytteenottokerran kokonaisbiomassasta. Näytteenottoajankohta on ilmoitettu Liitteessä 1.

Fraktio	Näytteenottokerta											
	1 (g m^{-2})	%	2 (g m^{-2})	%	3 (g m^{-2})	%	4 (g m^{-2})	%	5 (g m^{-2})	%	6 (g m^{-2})	%
Korret/varret												
Härkäpapu	11	39	24	39	55	43	124	48	151	46		
Rapsi 0 N	3	26	51	55	184	68	230	55	344	58		
Rapsi 90 N	3	22	63	54	256	60	290	51	363	59		
Kaura 0 N	16	44	57	58	110	55	217	43	205	34		
Kaura 50 N	15	42	75	54	161	54	222	42	205	31		
Kaura 90 N	18	44	75	54	127	56	254	40	211	31		
Kevätvehnä	13	40	78	61	97	59	261	52	208	38	77	11
Lehdet												
Härkäpapu	17	61	32	52	59	46	89	34	72	22		
Rapsi 0 N	10	74	42	45	51	19	53	13	57	10		
Rapsi 90 N	12	78	53	46	91	21	75	13	95	15		
Kaura 0 N	20	56	30	30	49	25	91	18	70	12		
Kaura 50 N	20	58	47	34	68	23	88	16	79	12		
Kaura 90 N	23	56	43	31	49	22	88	14	73	11		
Kevätvehnä	19	60	49	39	60	36	103	21	86	16	210	30
Sato-osat*												
Härkäpapu			6	9	14	11	48	18	103	17+14		
Rapsi 0 N					35	13	132	32	191	9+23		
Rapsi 90 N					77	18	202	36	161	7+19		
Kaura 0 N			12	12	39	20	197	39	322	46+8		
Kaura 50 N			18	13	67	23	223	42	368	49+7		
Kaura 90 N			20	14	50	22	293	46	402	52+7		
Kevätvehnä					8	5	136	27	247	46	405	40+18

* 5./6. näytteenoton sato-osat ovat siementen ja ruumenten summa (g/m^{-2}) ja prosenttiosuus kuvaa vastaavasti siementen ja ruumenten osuutta.

Taulukko 3. Eri kasvinosien N-pitoisuus (%) näytteenottokerroittain. Näytteenottoajankohta on ilmoitettu Liitteessä 1.

Fraktio	Näytteenottokerta					
	1 (%)	2 (%)	3 (%)	4 (%)	5 (%)	6 (%)
Korret						
Härkäpapu	4,27	2,74	2,36	2,23	1,82	
Rapsi 0 N	4,97	3,23	2,04	1,52	1,58	
Rapsi 90 N	5,46	3,38	2,27	1,66	1,85	
Kaura 0 N	2,48	2,36	2,01	1,63	1,19	
Kaura 50 N	2,43	1,88	2,33	1,76	1,39	
Kaura 90 N	3,81	2,57	2,51	1,85	1,41	
Kevätvehnä	3,21	2,67	3,21	2,03	1,44	1,20
Lehdet						
Härkäpapu	4,02	4,12	4,14	3,63	3,95	
Rapsi 0 N	5,77	4,17	2,91	2,37	3,55	
Rapsi 90 N	6,08	4,53	3,33	2,63	3,91	
Kaura 0 N	3,50	3,75	3,56	3,17	2,20	
Kaura 50 N	2,36	3,84	4,10	3,37	2,43	
Kaura 90 N	3,73	3,83	4,41	3,32	2,15	
Kevätvehnä	4,00	4,52	5,26	3,67	2,42	1,79
Sato-osat*						
Härkäpapu		5,16		4,95	5,10	
Rapsi 0 N			3,09	2,82	5,23	
Rapsi 90 N			3,19	2,88	5,35	
Kaura 0 N		2,13	1,89	2,38	2,20	
Kaura 50 N		2,13	1,99	2,16	2,43	
Kaura 90 N		2,14	2,08	2,18	2,46	
Kevätvehnä				2,35	2,41	2,93
Ruumenet						
Härkäpapu					3,06	
Rapsi 0 N					1,48	
Rapsi 90 N					1,63	
Kaura 0 N					1,67	
Kaura 50 N					1,64	
Kaura 90 N					1,59	
Kevätvehnä						1,57

* 1.-4. näytteenoton sato-osat ovat röyhyt/tähkät/palot/lidut kokonaisuudessaan, 5./6. näytteenotto sisältää siementen sisältämän N:n.