

KARTULI MUDELI PARAMEETRID ERINEVATEL VÄETATUSE TASEMETEL

Jüri Kadaja

Eesti Maaviljeluse Instituut

Abstract. Kadaja, J. 2006. Parameters of Potato Model on Different Levels of Fertilization. – Transactions of ERIA No 71, 137–152.

The main purpose of this work was development of potato production model POMOD based on the principle of maximum plant productivity and the method of reference yields, mainly in the direction of including the influence of soil fertility into the model. The model parameters were determined on the basis of three year field experiments for late variety 'Anti', mid-late variety 'Ants' and mid variety 'Agria' in the conditions of four fertilization levels. The complex data recorded on these experiments included growth dynamics of plant organs and leaf area index (LAI), soil moisture, meteorological elements and solar radiation. Growth functions and specific leaf weight (SLW) were calculated.

Differences in growth functions, LAI and SLW were analysed depending on the fertilization levels. It was concluded on the basis of parameters calibration and computations by the model, that in case of used model structure the fertilization level was described by the differences in growth functions and curves of SLW. The variables describing supply of plants with nutrients had reliable correlation neither with model parameters calibrated for different fertilization levels nor with errors of yields computed by the model.

Keywords: modelling, potato, fertilization, growth functions, specific leaf weight

Jüri Kadaja, Department of Mechanization, Estonian Research Institute of Agriculture, 13 Teaduse St., 75501 Saku, Estonia

Sissejuhatus

Kaasaegses põllumajandusteaduses nagu ka teistes teadusvaldkondades on matemaatilised mudelid leidnud endale kindla koha. Mudelid on ennast "sisse sõõnud" ka paljudesse praktilistesse põllumajanduslikesse analüüsi-, prognoosi- ja juhtimismeetoditesse ning tehnilistesse lahendustesse.

Käesolev töö kuulub taimeproduktiooniprotsessi modelleerimise valdkonda ja on üheks edasiarenduseks eesti teadlaste poolt 1960-datel aastatel alustatud taimekoosluste kiirgusrežiimi uurimise ja modelleerimise alasele teadussuunale (Ross 1966, 1981; Ross, Tooming, 1968; Tooming 1977, 1984).

Antud töö aluseks olev kartuli produktiooniprotsessi mudel POMOD (Sepp, Tooming, 1991; Kadaja 2004b; Kadaja, Tooming, 2004) on esialgselt välja töötatud 80-datel aastatel ilmastiku mõju arvessevõtuks. Selle mudeli lähtealuseks oli Heino Toominga poolt avastatud maksimaalse produktiivsuse printsiip ja selle alusel välja töötatud etalonsaakide meetod (Tooming, 1977, 1984). Lähtudes nendest aluspõhimõtetest erineb antud mudel küllaltki oluliselt teistest taimekoosluste jaoks välja töötatud mudelitest. Mudel POMOD kuulub suhteliselt lihtsat tüüpi mudelite klassi, mille koostamisel on lähtutud sellest, et mudel poleks liiga keerukas praktilisteks rakendusteks, võimaldaks aga olla kasutatav ka mitmesuguste uuringuliste eesmärkide lahendamiseks. Sellise lähenemistee võimaldavad eelnimetatud teoreetilised

agroökoloogilised printsiibid.

Käesoleva uurimistöö põhieesmärgiks oli mudeli POMOD edasiarendus, peamiselt toitainetega varustatuse mõju arvessevõtuks. Oma olemuselt oli töö otsingulise iseloomuga, kuna arvestades mudeli ülesehituse erinevusi võrreldes teiste kartuli mudelitega (Haverkort, MacKerron, 1994; Kabat *et al.*, 1995), ei olnud nende mudelite vastavate plokkide inkorporeerimine mudelisse POMOD teostatav.

Töö alustamisel arvestasime kolme võimalikku hüpoteesi: 1) mudeli parameetritest on väetatuse tasemega seotud taimede fotosünteesi kirjeldavad parameetrid (fotosünteesi valguskõvera algtõus, kohastumiskiirus, fotosünteesi ja hingamise väärtused valgusküllastuse juures) ja lehtede pindtihedus; 2) mullaviljakus mõjutab fotosünteesi produktide jaotumist erinevate organite vahel, st kasvufunktsioone; 3) mullaviljakuse mõju tuleb mudelisse osaliselt või täielikult sisse viia täiendava limiteeriva faktorina, mis vähendab fotosünteesi, nagu senises versioonis teevad seda mullaniiskus ja õhutemperatuur (Kadaja, Tooming, 2004).

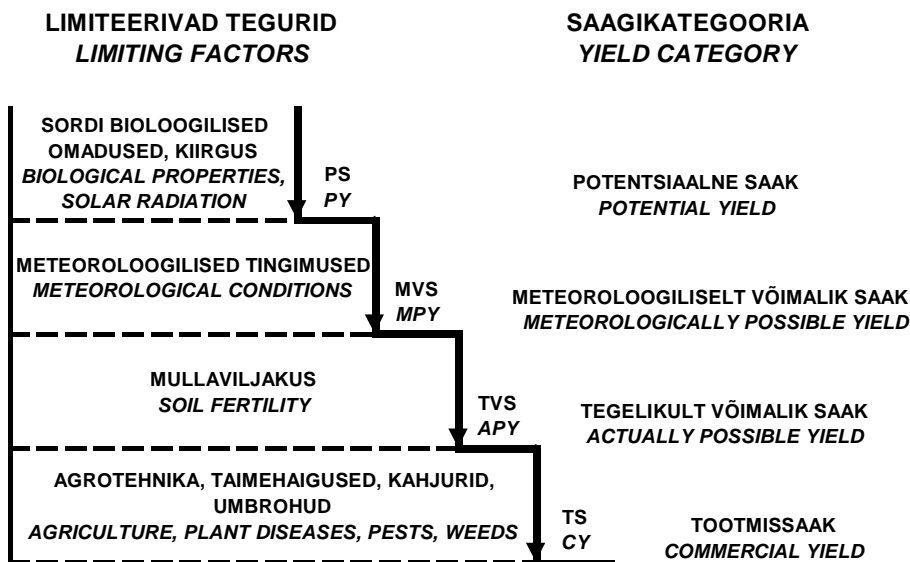
Töö baseerus välikatsetel mudeli parameetrite määramiseks ja nendele väetamise mõju selgitamiseks, katseandmete statistilisel analüüsil, vajalike parameetrite määramisel ja mudeliga tehtud arvutustel.

Kartuli produktsiooniprotsessi mudel

Kartuli produktsiooniprotsessi mudel POMOD (POtato MODeL) (Sepp, Tooming, 1991; Kadaja, 2004b; Kadaja, Tooming, 2004) on üles ehitatud lähtuvalt etalonsaakide meetodist, mis omakorda baseerub maksimaalse produktiivsuse printsiibil. Viimase kohaselt on taimede adaptatsioon suunatud taimede maksimaalse efektiivsuse ja nende koosluse maksimaalse produktiivsuse tagamisele (Tooming, 1967, 1984, 1988). Etalonsaakide meetod vaatleb maksimaalset produktsiooni ja maksimaalseid saake erinevatesse agroökoloogilistesse gruppidesse jaotatud faktorite mõju all. Kõige üldisemalt moodustuvad need grupid bioloogilistest, meteoroloogilistest, mullastikulistest ja agrotehnilistest faktoritest. Maksimaalseid saake, mida iga grupi faktorite mõju all on võimalik saada ja mis ühtlasi on piirväärtusteks üleminekul ühelt grupilt teisele, nimetatakse etalonsaakideks. Etalonsaagid moodustavad agroökoloogiliselt põhjendatud taustsüsteemi, mis on paljude probleemide lahendamisel sobivaks võrdlusaluseks nii mudelitega arvutatud kui tegelikkuses saadud saakidele. Etalonsaakide meetod on algselt välja töötatud H. Toominga (1977, 1984) poolt ning seda on täiendatud tema, E. E. Žukovskij ja artikli autori koostöös (Žukovskij *et al.*, 1989, 1990). Etalonsaakide põhikategooriatena vaadeldakse potentsiaalset, meteoroloogiliselt võimalikku, tegelikult võimalikku ja tootmissaaki (joonis 1).

Potentsiaalne saak (PS) on maksimaalne saak, mida on võimalik saada antud bioloogiliste omadustega kultuurilt või sordilt olemasolevates kiirgustingimustes. Kõigi teiste faktorite mõju loetakse optimaalseks. Sisuliselt väljendab see saagikategooria kiirgusressursse antud kultuuri või sordi kasvatamiseks väljendatuna saagi ühikutes.

Meteoroloogiliselt võimalik saak (MVS) on saak, mida antud sordilt on võimalik saada olemasoleva päikesekiirguse ja meteoroloogiliste tingimuste korral. Optimaalseteks loetakse kõik mullaviljakuse ja agrotehnikaga seotud mõjurid. Seega väljendab MVS saagi ühikutes avaldatud agrometeoroloogilisi, pikemas perspektiivis aga agrokliimaatilisi ressursse.



Joonis 1. Etalonsaagid ja nendes arvesse võetavad limiteerivad tegurid
Figure 1. Reference yields and limiting factors considered in each

Tegelikult võimaliku saagi (TVS) väärtuse määramisel osalevad peale PS ja MVS juures nimetatud mõjurite veel mullaviljakusest tingitud faktorid. Optimaalseks loetakse selle saagikategooria korral agrotehnika, puudevaks taimehaiguste, -kahjurite ja umbrohtude mõju. TVS näol on tegemist mullastiku ressursse väljendava näitajaga tegelike meteoroloogiliste või kliimatingimuste korral.

Tootmissaak (TS) on saagikategooria, mille korral tulevad arvesse kõik saagi kujunemist mõjutavad faktorid. See on saak, mida saadakse reaalses põllutingimustes.

Antud uurimuse eesmärgid on seotud üleminekuga meteoroloogiliselt võimaliku saagi arvutustelt tegelikult võimaliku saagi arvutamisele. Järgnevalt vaatleme mudeli neid aspekte, mis on seotud sissejuhatuses toodud hüpoteesidega.

Taimse biomassi jaotumist erinevate organite vahel kirjeldavad mudelis kasvufunktsioonid. Kasvufunktsioonid esinevad vastavalt kasvustaadiumile kas vegetatiivsete või reproduktiivsete kasvufunktsioonidena.

Tähistame taime kogu massi M ja erinevate organite massid m_i , kus i näitab organi järjekorra numbrit, näiteks $i = 1$ – lehed, 2 – varred, 3 – juured, 4 – mugulad. Reeglina kasutatakse kasvufunktsioonide määramisel kuivmassi, kuna toormass on väga sõltuv kudede veesisaldustest, viimane omakorda väliskeskkonna tingimustest.

Kasvufunktsioonid tulenevad Rossi kasvuvõrrandist (Ross, 1966), mis kirjeldab organite biomassi muutu Δm_i ajas:

$$\frac{\Delta m_i}{\Delta t} = A_i \frac{\Delta M}{\Delta t} + m_i B_i. \quad (1)$$

Vegetatiivse kasvu funktsioonid A_i näitavad üldise juurdekasvu ΔM jaotumist erinevate organite vahel:

$$A_i = \frac{\Delta m_i}{\Delta M} . \quad (2)$$

Reproduktiivse kasvu funktsioonid B_i iseloomustavad seda teiste organite biomassi osa, mis kahaneb peale vastava organi vegetatiivse kasvu lõppemist ($A_i = 0$) aine mugulatesse ülemineku tõttu:

$$B_i = \frac{\Delta m_i}{\Delta t} \frac{1}{m_i} . \quad (3)$$

Kasvufunktsioonide A_i ja B_i väärtused on määratavad katseandmete baasil kasvudünaamika biomeetristest mõõtmistest. Nagu varasemad tööd on näidanud, on kasvufunktsioonid sobiv avaldada bioloogilises ajas, kasutades ajavahemiku Δt asemel keskmiste ööpäevaste temperatuuride summat üle 0°C (Sepp, 1983).

Mudeli fotosünteesi plokiga seotud parameetrite määramine toimus antud töös kalibreerimise meetodil, kuna nende otsene mõõtmine ei olnud vastava aparatuuri puudumise tõttu veel võimalik. Oma olemuselt on kalibreerimise meetod optimumi leidmise ülesanne. Mudeli või tema mingi plokiga viiakse läbi rida arvutusi, muutes iga lahenduse korral otsitavate parameetrite väärtusi. Tulemusena leitakse parameetrite kombinatsioon, mille korral kriteeriumiks võetud arvutustulemuste viga võrreldes tegelike mõõdetud väärtustega tuleb minimaalne. Töö käigus katsetati kalibreerimise alusena erinevaid mõõdetud suurusi ja mitmeid vea kriteeriume. Lõpptulemusena jäädi pidama maksimaalse lehepinna indeksi kui fotosünteesiva substantsi ja lõppsaagi kui oodatava tulemi koos võrdlemise juurde. Veakriteeriumitena olid vaatluse all keskmine viga, keskmine absoluutne viga, ruutkeskmine viga ja nende suhtelised variandid. Tulemuste võrdluse baasil jäädi ruutkeskmiste suhteliste vigade juurde. Seega leiti kalibreerimise käigus iga katse korral erinevate variantide baasil maksimaalse lehepinna indeksi ja lõppsaagi arvutustulemuste ruutkeskmised vead, viimaste suhted vastavate näitajate keskmistesse väärtustesse ja summeeriti need suhted.

Olulise parameetrina on mudelis kasutuses lehtede pindtihedus, mis on ühelt poolt katsetes mõõdetav, teiselt aga seob fotosünteesi ja gaasivahetuse parameetreid lähtudes maksimaalse produktiivsuse printsibiist valemiga:

$$\mu = \frac{a}{\sigma_1} \cdot \frac{1 - \sqrt{c}}{\sqrt{c}} \frac{1}{\Pi} , \quad (4)$$

kus a – fotosünteesi valguskõvera algdõus, σ_1 ja σ_2 – fotosünteesi ja hingamise intensiivsus valgusküllastuse juures, Π – kohastumiskiirgus ehk kiirguse intensiivsus, mille korral tema kasutamine taimlehe poolt toimub kõige efektiivsemalt ja c tähistab suhet σ_2/σ_1 .

Limiteerivate faktorite mõju on mudelisse sisse viidud eksponentsiaalse kujuga funktsioonina, näiteks temperatuuri korral avaldub tema mõjufunktsioon Ψ_T kujul (Polevoj, 1978):

$$\Psi_T = \exp\left[-a_T(T - T_{opt})^2\right], \quad (5)$$

kus T – õhutemperatuur (°C), T_{opt} – fotosünteesi optimaalne temperatuur (°C), a_T - empiiriline koefitsient (K⁻²).

Katse ja mõõtmised

Kartuli põldkatsed mudeli parameetrite määramiseks toimusid kolmel aastal vahemikus 2002 kuni 2004.

Aastal 2002 toimus katse EMVI Üksnurme katsepõllul (59°17' N; 24°37' E) keskmise sügavusega kamarkarbonaatsel saviliivmullal. Eelviljaks oli raps. 2003. ja 2004. a. asus katse EMVI katsepõllul Kõbu aias (59°16' N ja 24°38' E) gleistunud saviliivmullal. Eelviljaks oli oder. Uurimise all oli kokku kolm sorti: hiline sort 'Anti' 2002. ja 2003. a., keskhiline sort 'Ants' 2002. a. ja keskvalmiv sort 'Agria' 2003. ja 2004. a.

Kartul oli pandud 0,7 m laiustesse vagudesse tihedusega 4 taime jooksva meetri kohta (5,71 taime m⁻²). Kõik katsed olid maha pandud neljas väetusvariandis. Kasutati kompleksväetist Kemira–Cropcare 10–10–20 kogustes, mis vastavad 0, 500, 1000 ja 1500 kg h⁻¹, põhitoitelementide järgi vastavalt N₀P₀K₀, N₅₀P₂₀K₈₅, N₁₀₀P₄₀K₁₇₀ ja N₁₅₀P₆₀K₂₅₅.

2002. a. vegetatsiooniperiood oli soojusega hästi varustatud mai algusest septembri keskpaigani. Juba kevad oli põuane ja antud tendents jätkus läbi suve. Alates augusti keskelt langes mulla veevaru närbumisniiskuseni ja paiguti alla selle ning täheldada võis kartulipealsete närbumist. Kartuli vegetatsiooni lõpetas öökülm 20. septembril.

2003. a. oli kevad hiline ja kartul mahapanek toimus alles mai lõpus. Jätkuvad madalad temperatuurid põhjustasid sordil 'Anti' tõusmepõletikku. Lühikesele soojaperioodile järgnes alates augusti keskelt kiire temperatuuri langus ning septembri alguses esinenud tugevad öökülmad lõpetasid kartuli vegetatsiooni. Ka 2003. a. oli kuivapoolne, kuid tingituna sademete soodsamast jaotusest, mulla tüübist ja põhjavee mõjust, jäi veevaru poolemeetrises kihis kogu kasvuperioodi vältel optimaalsetesse piiridesse.

2004. a. toimus kartulipanek küll juba mai esimese dekaadi lõpul, kuid järgnev pikk külm periood aeglustas kartuli tärkamist ja soodustas tõusmepõletikku. Suvi oli sademeterohke, jahe ja vähese päikesekiirgusega. Esimene sajuperiood, mis tingis tugeva liigniiskuse, esines 26. juunist kuni 6. juulini (kokku 146 mm). Kuigi juba see periood tingis mugulate mädanemist, elasid taimed selle üle. 28–29. juulil pooleteise ööpäeva jooksul sadanud 130 mm (viie päevaga 161 mm) ujutas kartulivaod täielikult üle ja põhjustas taimede hävimise.

Antud töö eesmärkidest lähtudes olid kõige olulisemateks katsete põhjal määratavateks näitajateks kartuli kasvufunktsioonid, lehtede pindtiheduse dünaamika ning väetisainete kogused mullas ja taimedes. Mudeliga kalibreerimiseks tehtavate arvutuste seisukohalt lisandusid neile vajalike näitajatena lehepinna indeksi dünaamika, mugulate lõppsaak, mullaniiskus ja meteoroloogilised näitajad..

Kartuli kasvufunktsioonid arvutamine baseerub taimede ja nende erinevate organite kasvudünaamikal. Kasvudünaamika määramise õigsus sõltub oluliselt proovideks valitud taimede representatiivsusest. Parema esinduslikkuse saavutamiseks määrati põllul eelnevalt taimede lihtsad biomeetriselised parameetrid: taimede kõrgus ja/või võrsete pikkus, arv ja tugevus ning nende jaotused. Lihtsate parameetrite

regulaarseks mõõtmiseks märgistati igal vaatlusvariandil kaks kuni neli kümnest taimest koosnevat kontrolltaimede gruppi. Iga kontrolltaimede grupp paiknes kahel kõrvuti asuval vaol, kummalgi 5 taime.

Kuni taimede kokkukasvamiseni mõõdeti nende kõrgus kogu katselapi ulatuses. Paralleelselt toimus ka kontrolltaimede kõrguse mõõtmine, võimaldamaks hinnata nende representatiivsust. Hiljem jätkusid kõrguse mõõtmised kuni pealsete lamandumise alguseni ainult kontrolltaimedel. Võrsete arv, nende pikkus ja tugevus määrati regulaarselt kontrolltaimedel. Nende mõõtmistega alustati, kui pealsed olid kasvanud 20–30 cm kõrguseks. Võrsete pikkus mõõdeti alates maapinnast vahetult võrse väljatuleku kohalt kuni tipmiste lehtede otsteni. Võrsete arvud registreeriti iga taime korral nende tugevusklasside kaupa. Võrsete tugevust hinnati neljas klassis: väga tugevad – tugevalt hargnenud võrsed, sageli ainuke võrse taime kohta; tugevad – jämedad ja tugeva lehestikuga, kuid oluliselt hargnemata võrsed; pooltugevad – eelmistest peenemad, hõredama lehestikuga, enamasti mõnevõrra hilisemad kõrvalvõrsed, aga ka võrsed taimedel, kus võrsete arv on suur; nõrgad – peened ja nõrgad võrsed, hilised kõrvalvõrsed ja võrsed hiljem tärganud ning kiratsema jäänud taimedel.

Kasvudünaamika määramiseks võeti vegetatsiooni jooksul igast variandist proovid 7–9 tähtajal (2004. a. piirdus proovide arv tänu kartuli varasele hävimisele neljaga). Iga proov sisaldas 10 kuni 20 taime.

Varases kasvustaadiumis, enne tõusmete ilmumist ja vahetult pärast tõusmist, kui taimede pealsed veel üksteist ei mõjutanud, võeti proovitaimed vagude otstest, kas igast vaost otsmine taim või mingi muu seaduspära alusel.

Edaspidi kasutati taimede valikuks lihtsaid parameetreid, mille jaotused määrati nende mõõtmise alusel. Esmalt, kui taimede suurus oli tihedas seoses nende kõrgusega, kasutati taimede valiku indikaatorina kõrgust. Katselapil tervikuna või kontrolltaimedel mõõdetud taimede kõrgused jaotati 5 cm vahemike kaupa klassidesse ja koostati kõrguste esinemise sagedusjaotus. Proovitaimed valiti välja vastavalt sellele jaotusele.

Hiljem, kui taimed saavutasid juba ligikaudu täis kasvukõrguse, võeti lisaks taimede kõrgusele arvesse ka võrsete arv ja nende tugevus. Kontrolltaimedel tehtud vaatluste põhjal arvutati välja, milline peaks etteantud proovitaimede hulga korral olema erinevat klassi võrsete arv. Proovi võtmisel järgiti, et ka see jaotus oleks kogu proovi kohta summaarselt esindatud. Alates pealsete lamandumise algusest asendati taimede kõrguse kasutamine indikaatorina võrsete summaarse pikkusega. See tähendab, et kõigi proovis olevate taimede võrsete pikkuste summa pidi võrduma kontrolltaimede baasil arvatud vastava arvu taimede võrsete pikkuste summaga. Kahel viimasel aastal võeti pooled proovitaimedest järjest, viietaimeliste gruppidena, ülejäänud taimedega sobitati jaotused ja summaarsed parameetrid paika. Proovitaimede valikul jälgiti, et valitud taimede kõrval ei paikneks tühikuid, seda nii tõusmata jäänud taimede kui ka varem võetud proovide tõttu.

Viimane proov selles mõõtmiste seerias võeti antud variandi kontrolltaimedest, mida vegetatsiooni jooksul kasutati lihtsate biomeetriliste parameetrite määramiseks.

Võetud proovitaimed töödeldi laboratooriumis. Taimed pesti ja nende organid eraldati. Eraldi olid vaatluse all lehed, varred, idud ja varte maaalune osa koos stoolonitega, juured ning mugulad. Hilisemas kasvustaadiumis eristati veel kolletunud lehti ja kulu. Eraldatud organid lasti pesuveest kuivada ja kaaluti. Umbes pool proovideks võetud taimede mahust töödeldi taimhaaval, ülejäänud koos, enamasti viiest

taimest koosnevate gruppidega. Varasemas kasvustaadiumis, mil organite kogused olid väikesed, kuivatati kogu organite mass kuivatuskapis kuivmassi saamiseks. Hiljem, kui kogu taimse massi kuivatamine polnud enam võimalik, segati antud proovi kõigi taimede vastavad eraldatud organid ja võeti iga organi kohta neli juhuslikku proovi, määrati nende toormassid, kuivatati ja kaaluti uuesti. Saadud toor- ja kuivmassi alusel arvutati kuivaine sisalduse osakaal. Kasutades nelja korduse keskmist kuivaine osakaalu arvutati organite kuivaine sisaldus kogu proovis.

Kuivaine proovi valitud lehtede pindala mõõdeti laboratoorse pindala mõõturiga AAC-400. Nende lehtede kuivaine sisalduse ja pindala suhtena arvutati lehtede pindtihedus. Viimane oli omakorda aluseks kogu proovi lehtede pindala ning kartuli lehepinna indeksi määramisel.

Lõpliku mugulasaagi määramiseks jäeti igal katselapil osa vagusid kasvudünaamika proovide võtmisest puutumata. Reeglina toimus dünaamika proovide võtt katselapi keskosast, saagiproovideks kasutati vaod kahelt poolt katselapi külgmisest osast, kus paiknesid ka alalised vaatluskohad kontrolltaimedega. Mugulasaagi määramiseks ei kasutatud äärevagusid ega vagusid, mille kõrvalvaost oli võetud dünaamika proove. Lõpp-proovid võeti käsitsi. Vähemalt 3 taime vagude otstest jäeti proovist välja, samuti jäid välja üksikud tühikukohad ja vahetult nende kõrval paiknenud taimed. Ühildamiseks tulemusi kontrolltaimedest saadud prooviga, määrati lõpp-proovi vaolõikude ulatuses ka taimede ning erinevatesse tugevuse kategooriatesse kuuluvate võrsete arv. Kuivaine sisalduse alusel, mis määrati kontrolltaimedest tehtud lõppproovist, saadi lõplik mugulasaagi kuivmass.

Taimse materjali lämmastiku, fosfori ja kaaliumi sisaldus lasti määrata Tartus EPMÜ loomakasvatuse instituudi söötade laboratooriumis, reeglina intensiivse kasvu perioodil ja mugulates vegetatsiooni lõpul.

Mullaniiskuse mõõtmised toimusid umbes kümnapäevaste vahedega mullapuuri-termostaadi meetodil kuni poole meetri sügavusele 10 cm mullakihtide kaupa. Iga tulemit leiti nelja korduse keskmisena. 2003. a. tehti paralleelseid mullaniiskuse mõõtmisi mullaniiskuse mõõturiga Thetaprobe. Mulla veevaru arutamiseks vajaliku mulla lasuvustiheduse määramine toimus kaks korda vegetatsiooniperioodil 10 cm kihtide kaupa kuni poole meetri sügavuseni. Kasutati silinderpuuri meetodit.

Mulla analüüsid lämmastikuühendite määramiseks telliti EPMÜ biokeemia laboratooriumist, ülejäänud elemendid lasti määrata Põllumajandusuuringute Keskuses. Mullaproovid võeti analüüsiks neljal korral: mahapaneku-eelselt enne väetise külvi, pealsete ning mugulate intensiivse kasvu perioodil ja pärast koristust.

Meteoroloogilised näitajad registreeriti igal aastal katsepõllu vahetus naabruses. 2002. a. asusid mõõturid katsest umbes 200 m, järgnevatel aastatel umbes 100 m kaugusel. Õhutemperatuur ja -niiskus mõõdeti 2 m kõrgusel avatud alal intervalliga 12 min. Sademete mõõtmine toimus paralleelselt Tretjakovi ja automaatse sademetemõõturiga RG2-M. Viimane andis 6–10% vähendatud tulemused. Tegelik sademete käik saadi automaatse sademetemõõtuuri alusel arvestades võrdlusele leitud parandeid. Sademetemõõtjate võrdlev analüüs viitas ka sellele, et intensiivsete sademetega perioodil registreerib automaatne sademetemõõtur tegelikust suurema impulsside arvu (üks impulss vastab 0,2 mm sademetele).

Summaarse päikesekiirguse andmetena kasutati 2002. ja 2003. a. Harku meteoroloogiajaamas (kaugus katsest 15 km) ning 2004. a. Üksnurme katsealal (2 km) registreeritud andmeid.

Tulemused ja arutelu

Kasvudünaamika määramise tulemused näitasid, et kõige suuremad väetusvariantide vahelised erinevused esinevad pealsete massis. Nii lehtede, kui ka varte kuivmass kasvavad taimedele antud väetise koguse suurenemisel. Juurte suurem mass ja mugulate varasem ning kiirem kasv olid iseloomulikud väetamata ning vähemväetatud variandile.

2002. a. võis täheldada kõigi tugevamalt väetatud variantide kasvu aeglasemat algust. Mugulate kasvu osas on see nähtus üldine (Vos, 1994), antud juhul aga kehtis see kogu taimse biomassi suhtes. Ilmselt võib antud nähtust seletada vee kättesaadavuse raskenemisega väga kuivast mullast suurema lahustunud ainete kontsentratsiooni tõttu mullavees.

Mugulate lõppsaagi dispersioonanalüüs näitas, et väetusvariantide järgi lõppsaagid oluliselt ei eristu. Usaldatav positiivne korrelatsioon lisatud väetise koguse ja mugulate lõppsaagi vahel esines ainult 2002. a. 'Anti' katses. Üldjuhul eristub teistest ainult väetamata kontrollvariant. Üheks põhjuseks võib olla ka see, et kartuli vegetatsioon katkes kõigil vaatlusalustel aastatel enne pealsete loomulikku kuivamist, mis alandab tugevamini just enamväetatud variantide saaki. Korrelatsioonanalüüs mugulate lõppsaagi ja mullas ning taimses materjalis esinenud toitainete sisalduse vahel andis 99% tõenäosusega usaldatavad seosed ainult mulla kaaliumisisaldusega.

Lehepinna indeksi osas oli väetusvariantide erinevus märgatav. Eranditult andis kõige väiksemad lehepinna väetamata variant. 2002. a., kui kasvuperiood osutus öökülmaga piiratuks ainult tugevalt väetatud variantide korral, avaldus väga selgelt enam väetatud variantide lehepinna nihkumine hilisemale ajale. 2003. a. katses lõpetas varane öökülm kõigi variantide lehtede eksistentsi enneaegselt, kusjuures võib oletada, et vähemalt 'Anti' enamväetatud variantide korral ei suutnud lehepind saavutada veel oma maksimumväärtust.

Maksimaalse lehepinna indeksi korrelatsioon nii mulla kui taimse materjali toitainete sisaldusega (tabel 1) osutus märgatavalt paremaks kui lõppsaagil. Kasutati kolmel korral tehtud mullaanalüüside andmeid, millest esimene langes juuli algusesse, teine intensiivsesse mugulakasvu perioodi ja kolmas toimus peale kartuli koristust.

Lämmastiku sisaldusega mullas (määrati ainult 2003. ja 2004. a) omas maksimaalne lehepind arvestatavat seost ainult kasvu alguses staadiumis. Hilisemad mõõtmised usaldatavat korrelatsiooni ei näidanud. Fosfori ja kaaliumiga osutus seos kõige tugevamaks intensiivse mugulakasvu perioodil, s.o juuli lõpul ja augusti algul. Siiski väärub märkimist, et maksimaalse lehepinna indeksi seos kaaliumi sisaldusega mullas on 99% tõenäosusega usaldatavas korrelatsioonis kogu vegetatsiooniperioodi vältel.

Lehtede endi toitainete sisaldusega oli maksimaalse lehepinna indeks positiivses korrelatsioonis, sealjuures lämmastiku ja fosforiga 0.99 usaldatavuse nivool. Samas on teiste organite toitainete sisaldusega tendents vastupidine, kuigi usaldatavaks 0.95 nivoo juures osutus negatiivne korrelatsioon ainult varte kaaliumisisalduse korral.

Maksimaalse lehepinna indeksi korrelatsioon nii mulla kui taimse materjali toitainete sisaldusega osutus märgatavalt paremaks kui lõppsaagil.

Lehtede pindtihedus (LPT) on taimede tärkamise perioodil kõrge, olles suurusjärgus 0,1 kg kuivainet 1 m² lehepinna kohta. Edasi toimub kiire langus, mis aeglustub alates vahemikust 0,05–0,06 kg m⁻². Selles piirkonnas võib esineda ka ajutisi

tugevamaid allalööke, seda kuni hiljem saavutatava stabiilse taseme väärtusteni välja (Kadaja, 2005). Need allalöögid on olnud statistiliselt olulised ning võivad olla seotud vihmasemate ja vähese kiirgusfooniga perioodidega. Teise hüpoteesina tuleb kõne alla mingi toitainete ajutine puudujääk juurte mittepiisava väljaarenemise tõttu.

Tabel 1. Lehepinna indeksi maksimaalse väärtuse korrelatsioonikordajad mulla ja taimse materjali toitainete sisaldusega

Table 1. Correlation coefficients between leaf area index and nutrient elements in soil and plant material

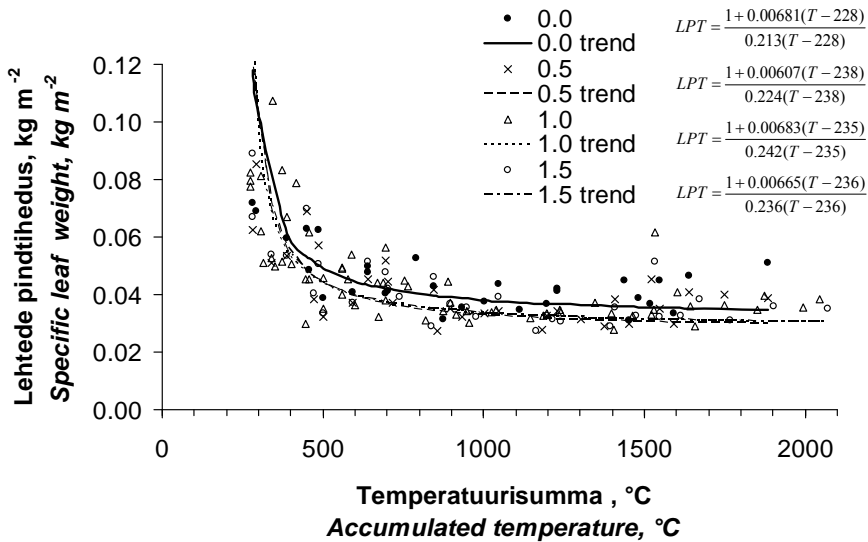
Mullaproovide võtmise aeg <i>Time of taking soil samples</i>	Toiteelement mullas <i>Nutrition element in soil</i>		
	NO ₃ – N	P	K
Juuli algus / <i>Beginning of July</i>	0,906**	0,054	0,755**
Augusti algus / <i>Beginning of August</i>	0,459	0,840**	0,809**
Peale koristust / <i>After harvest</i>	0,415	0,567*	0,628**
Taimorgan <i>Plant organ</i>	Toiteelement taimses materjalis <i>Nutrition elements in plant material</i>		
	N	P	K
Lehed / <i>Leaves</i>	0,655**	0,693**	0,573*
Varred / <i>Stems</i>	-0,453	-0,344	-0,54*
Mugulad / <i>Tubers</i>	-0,464	-0,343	-0,447

** $p = 0.01$; * $p = 0.05$

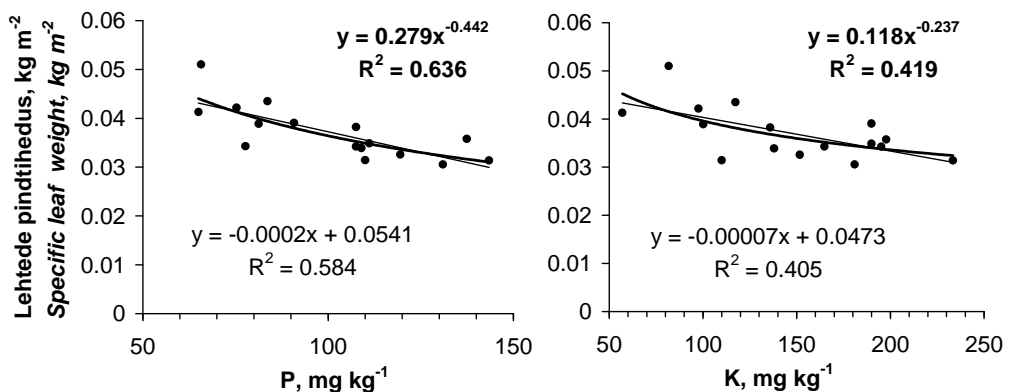
Mugulate intensiivse kasvu perioodiks langeb LPT 0,03 kg m⁻² piirkonda. Teistest mõnevõrra kõrgemad pindtiheduse väärtused esinevad väetamata kontrollvariandil. See võib olla kaudne, kuna kontrollvariandi lehestik on teistest märgatavalt hõredam ja lehtede valgustatus kogu lehestiku ulatuses parem. Samuti on väetamata variandid olnud kõige vastuvõtlikumad haigustele (kuivlaikus jt.) ning lokaalseid kuivanud laiike esinenud lehtedel varem kui teistel variantidel. Ka nende nähtuste olemasolu näib suurendavat lehtede pindtihedust. Erinevalt väetist saanud variantide jaoks aproksimeeritud kõverad langesid praktiliselt kokku (joonis 2).

Lehtede pindtiheduse seost N, P ja K sisaldusega mullas ja taimlehtedes analüüsiti alates mugulate intensiivse kasvuperioodi algusest (ligikaudu juuli keskelt). Varasemal perioodil võivad juba ühepäevased nihked mõõtmiste vahel ületada variantidest tingitud LPT erisusi. Kogu valimi (erinevad sordid erinevate aastate erinevatel tähtaegadel) LPT korrelatsioonikordajad toitelementide sisaldusega mullas näitavad usaldatavat negatiivset seost NO₃-N ($r = -0,49$; $p = 0,05$), P ($r = -0,49$; $p = 0,01$) ja K ($r = -0,44$; $p = 0,01$) korral. Kuna regressiooniseosed on ühesuunalised ja korrelatsioonikoefitsiendid ligikaudu võrdsed, võime igat faktorit kasutada prediktorina, ei saa aga teha järeldusi seose põhjuslikkuse kohta. Seda näitab ka asjaolu, et osakorrelatsioonid ei ületa usaldatavuse nivood.

Üksikutest sortidest oli LPT ja mulla toitainete sisalduse vaheline negatiivne seos tugevam 'Anti' korral ning kõige paremini aproksimeeritav astmefunktsiooni kujul (joonis 3). Parim seos esines fosfori sisaldusega. Teiste sortide puhul ületati usaldatavuse piir ainult mõnel üksikul mõõtmiskorral.



Joonis 2. Kartuli lehtede pindtiheduse (LPT) aproksimeeritud ajaline käik temperatuurisummades (T) väetatuse erinevate tasemete juures (0.0 – N₀P₀K₀, 0.5 – N₅₀P₂₀K₈₅, 1.0 – N₁₀₀P₄₀K₁₇₀, 1.5 – N₁₅₀P₆₀K₂₅₅)
Figure 2. Approximated time dependences in sums of temperature (T) of potato specific leaf weight (LPT) on different levels of fertilization (0.0 – N₀P₀K₀, 0.5 – N₅₀P₂₀K₈₅, 1.0 – N₁₀₀P₄₀K₁₇₀, 1.5 – N₁₅₀P₆₀K₂₅₅)



Joonis 3. Kartuli lehtede pindtiheduse seosed fosfori (P) ja kaaliumi (K) sisaldusega mullas sordi 'Anti' korral
Figure 3. Relationships between specific leaf weight of potato and soil phosphorus (P) and potassium (K) content in case of the variety 'Anti'

Lehtede N, P ja K sisaldusega on LPT seos samuti negatiivne. Korrelatsioonikordajad on toodud tabelis 2.

Mitmes regressiooni korrelatsioonikordaja omas kogu valimi korral väärtust 0,87 ning seos on esitatav kujul:

$$m_t = 0,0641 - 0,59 N + 2,50 P - 0,31 K, \quad (6)$$

kus N , P ja K sisaldused on antud suhtarvudena (kg kg^{-1}) lehtede kuivmassi ühiku kohta, lehtede pindtihedus m_t avaldub ühikutes kg m^{-2} . Osakorrelatsioonide põhjal jäi LPT seos lämmastikuga olulisuse nivoole $p = 0,01$, seos kaaliumiga langes nivoole $p = 0,05$ ja fosforiga kadus sootuks.

Tabel 2. Kartuli lehtede pindtiheduste ja lehtede N , P ja K sisalduse vaheliste seoste korrelatsioonikordajad

Table 2. Correlation coefficients between specific leaf weight of potato and N , P and K content in the leaves

	n	N	P	K
Kõik kokku / All	15	-0,810**	-0,471*	-0,676**
‘Anti’	7	-0,834**	-0,160	-0,634
‘Agria’	8	-0,951**	-0,921**	-0,719*

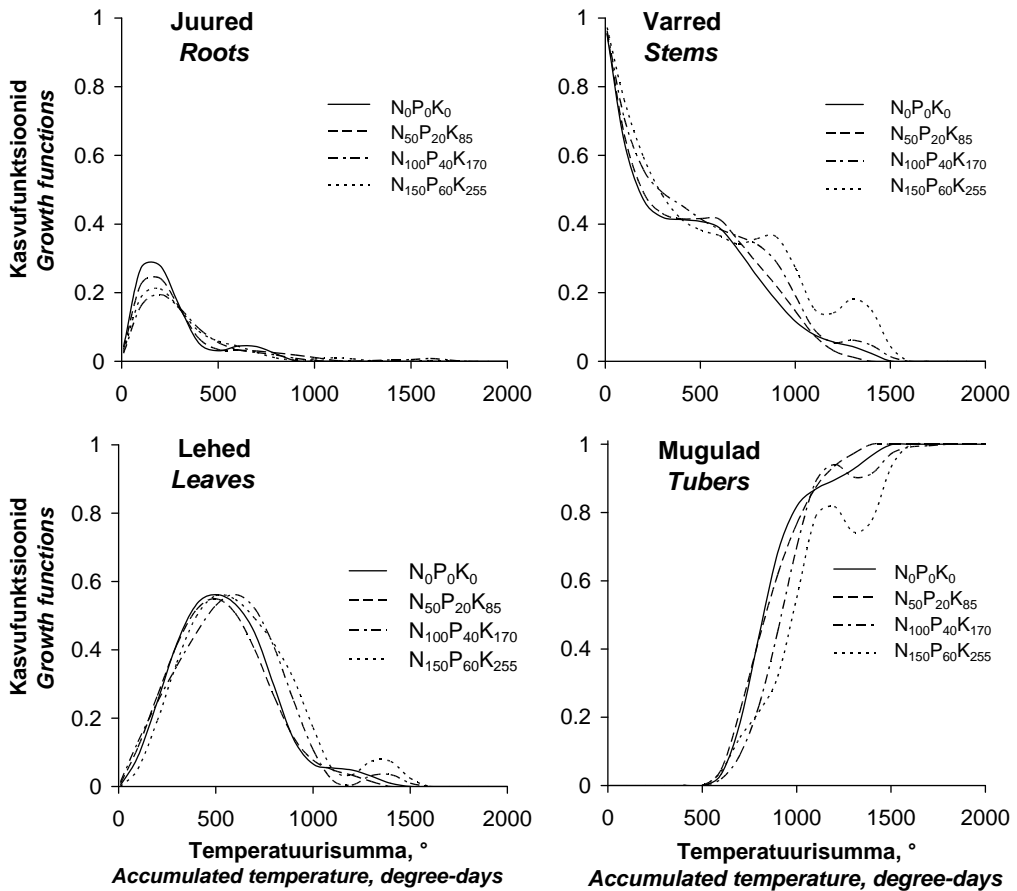
** $p = 0.01$; * $p = 0.05$

Kartuli vegetatiivsed kasvufunktsioonid määrati valemi (2) alusel. Üldise seaduspärasusena hakkab silma, et enamväetatud variantide korral kestavad lehtede kasvufunktsiooni kõrgemad väärtused kauem, mis tagab nende suurema lehepinna moodustumise (joon. 4–6). Sealjuures on ‘Anti’ ja ‘Antsu’ lehtede kasvufunktsioon väetamata ja vähemväetatud variantidel nihutatud ka veidi varasemaks. Varte kasvufunktsioonid langevad enamväetatud variantidel samuti aeglasemalt ja omavad enamusel juhtudel täiendavat hilist maksimumi või kõrgendatud väärtusi temperatuurisumma $1000\text{--}1500^\circ$ vahemikus (Kadaja, 2004a). Mugulate kasvufunktsiooni tõus on kiirem vähemväetatud variantidel, samuti on neil enamusel juhtudel kõrgem juurte kasvufunktsiooni maksimum.

Reproduktiivsete kasvufunktsioonide määramine kujunes küllaltki hinnanguliseks, kuna võimalikke mõjutavaid tegureid on palju ja valemi (3) järgi määratud väärtused väga muutlikud. Erinevatest katsetest ja erinevatest väetusvariantidest saadud tulemuste analüüs lubab pidada sobivaks vahemikku $0,0003 - 0,0006 \text{ K}^{-1}$. Kalibreerimisarvutustes on kasutatud väärtust $0,0005 \text{ K}^{-1}$.

Mudeli POMOD olulisimateks parameetriteks, mille vahetu määramine ei olnud antud töö käigus otseselt võimalik, olid fotosünteesiga seotud parameetrid: fotosünteesi valguskõvera algtõus a , fotosünteesi ja hingamise intensiivsus valgusküllastuse juures σ_1 ja σ_2 ning kohastumiskiirgus \overline{II} . Lehtede pindtiheduse valem (4) seob neid parameetreid. Kuna lehtede pindtihedus on mõõdetav suurus, on selle seose abil võimalik eelpool nimetatud parameetrite kalibreerimisel vähendada süsteemi vabadusastet ühe võrra. Mõõdetud lehtede pindtiheduse märkimisväärne muutus vegetatsiooni alguses tingib seda, et kõik fotosünteesi ja gaasivahetuse valguskõvera parameetrid ei saa olla konstantsed kogu kasvuperioodi vältel. Kõige suurema tõenäosusega võib muutuvaks lugeda kohastumiskiirguse. Katsetasime täiendavalt ka teiste parameetrite muutmist vegetatsiooni ulatuses, mis vähendavad kohastumiskiirguse amplituudi. Tulemused paranesid, mis on ka loomulik, kuna kaasnes täiendavate parameetrite sissetoomine (vabadusastmete arv suureneb). Siiski

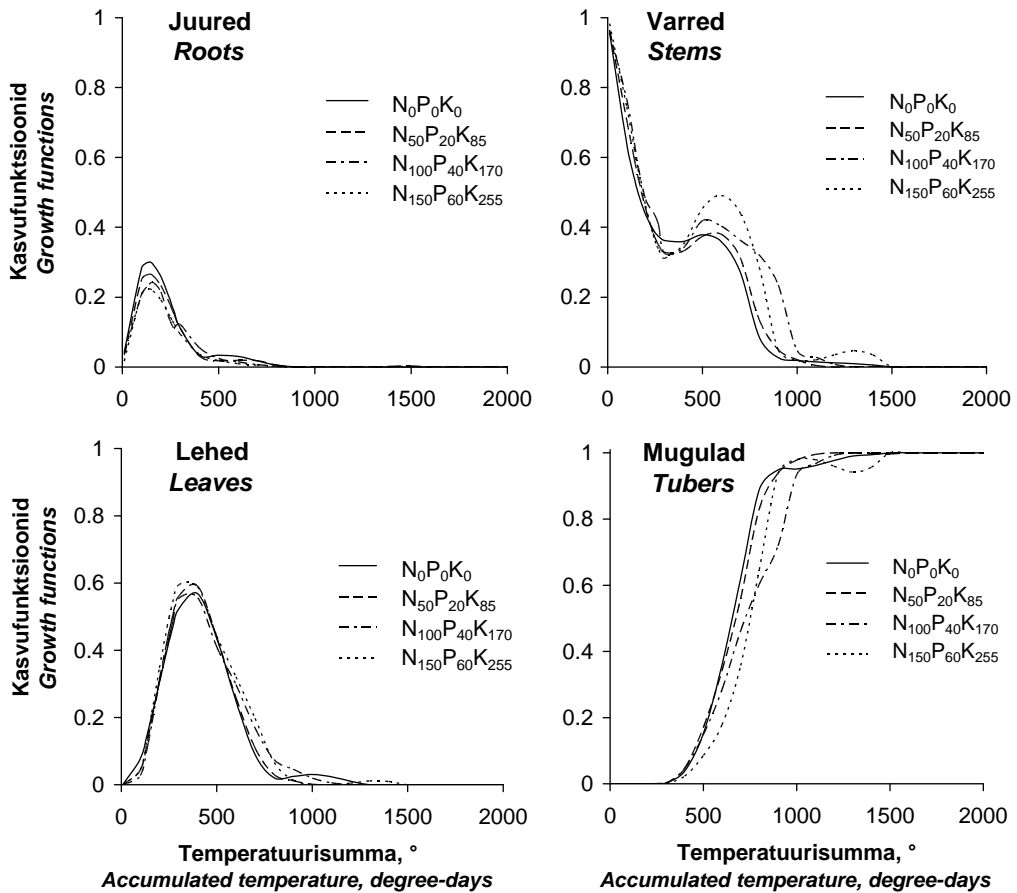
jäime esialgu parameetrite a , σ_1 ja σ_2 konstantsete väärtuste juurde, kuni vajalike fotosünteesi mõõtmiste võimalikuks saamiseni või üht ehk teist hüpoteesi kinnitavate mõõtmistulemuste leidmiseni kirjandusest.



Joonis 4. Sordi ‘Anti’ kasvufunktsioonid erinevate väetustasemetega juures, keskmistatult üle aastate 2002–2003

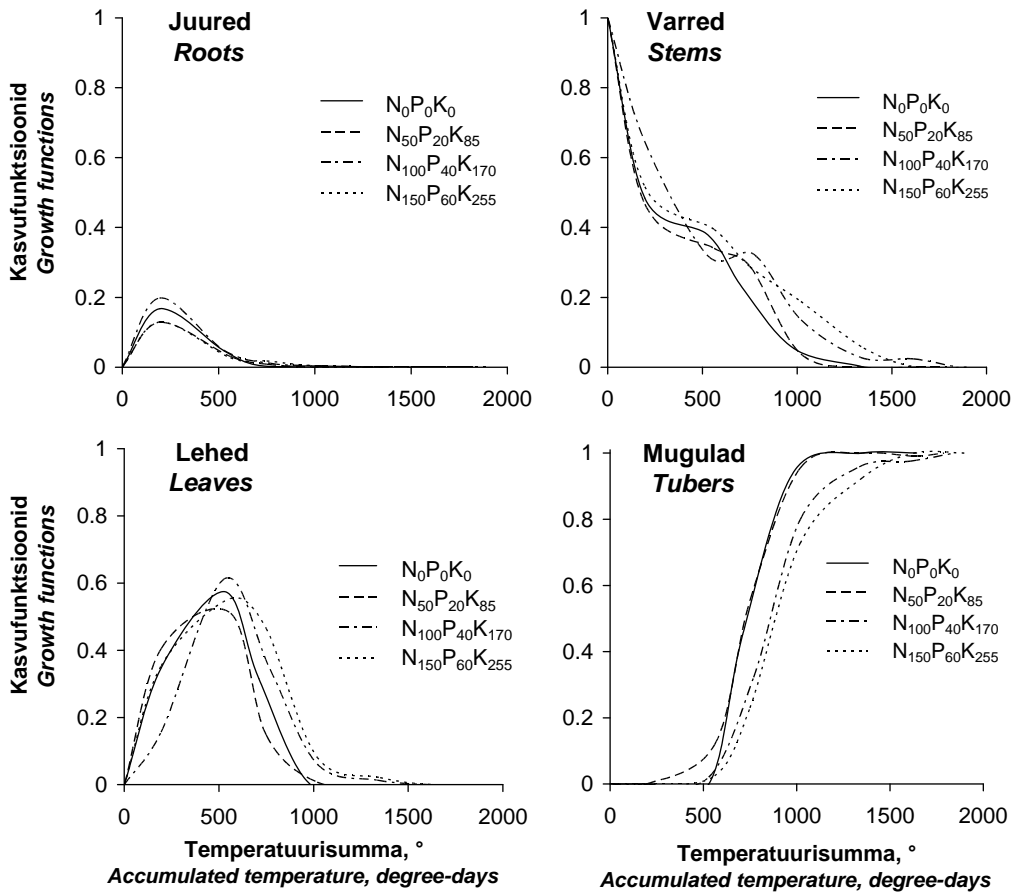
Figure 4. Growth functions of the variety ‘Anti’ by different fertilization levels, averaged over the years 2002–2003

Kuna seose (4) aluseksvõtul $\overline{\Pi}$ muutub vastavalt sellele seosele ja σ_2 varieerimine viga ei mõjuta (mõjutab ainult $\overline{\Pi}$ väärtust), võib kalibreerimistulemusi vaadelda a ja σ_1 tasapinnas. Tulemused näitavad, et selles tasapinnas kujunevad välja hüperboolsed kõverad, mille ulatuses on arvutusviga suhteliselt miinimumi lähedane. Kuna arvutusvea absoluutne miinimum oli mitmel juhul kandunud kirjandusest leitud a hinnangute suhtes liiga madalale ning σ_1 väärtus vastavalt liiga kõrgele, valisime nendel juhtudel lahendiks eelnimetatud kõveratel asuvad punktid, mis ei kattunud täpselt absoluutse miinimumvea asukohaga. Valikul lähtusime ka sellest, et antud sordi erinevate aastate kalibreerimiskõverad paikneksid valitavas punktis võimalikult lähestikku.



Joonis 5. Sordi 'Agria' kasvufunktsioonid erinevate väetustasemetega juures, keskmistatult üle aastate 2003–2004
Figure 5. Growth functions of the variety 'Agria' by different fertilization levels, averaged over the years 2003–2004

Kalibreerimine toimus iga katse kohta eraldi. Esialgu kalibreeriti parameetrid eraldi ka iga väetusvariandi kohta. Võttes ühe kalibreeritavatest parameetritest konstantseks (kord a , kord σ_1), leiti minimaalsele veale vastavalt kõveral teise parameetri väärtused. Saadud parameetrite väärtusi korreleeriti vastavatele variantidele antud väetisekogustega ning mulla ja taimse materjali toitainete sisaldusega. Korrelatsioonid osutusid mitteusaldatavateks ja seosed erinevatel aastatel sageli vastupidisteks. See tulemus lükkas ümber ühe võimaliku tööhüpoteesi, mille järgi toitainete mõju võiks mudelis käsitleda läbi fotosünteesiga seotud parameetrite. Järgmise sammuna kalibreerisime vaatlusalused parameetrid iga katse kõigile väetusvariantidele korraga. Saadud tulemused on toodud tabelis 3.



Joonis 6. Sordi 'Ants' kasvufunktsioonid erinevate väetustasemetel juures 2002. a.
Figure 6. Growth functions of the variety 'Ants' by different fertilization levels in 2002

Tabel 3. Kalibreerimise tulemused fotosünteesi ja gaasivahetuse parameetritele
Table 3. Parameters of gross and net photosynthesis established by calibration

Sort Variety	Aasta Year	a , $\text{kgCO}_2 \text{ s}^{-1} \text{ W}^{-1}$	σ_1 , kgCO_2 $\text{kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$	$\overline{\Pi}$ piirid / limits of $\overline{\Pi}$, W m^{-2}	σ_2 , $\text{kgCO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$
'Ants'	2002	0.000052	0.14	26–65	0.008
'Anti'	2002	0.000050	0.12	25–70	0.009
'Anti'	2003	0.000050	0.12	25–74	0.008
'Agria'	2003	0.000048	0.14	25–72	0.009
'Agria'	2004	0.000048	0.12	27–57	0.008

a – the initial slope of photosynthesis irradiance curve; σ_1 and σ_2 – the photosynthesis and respiration rates at the saturated PAR density; $\overline{\Pi}$ – the irradiation density of adaptation, i.e. the PAR density at which the PAR use efficiency in net photosynthesis has its maximum.

Mudeli parameetrite kalibreerimise järel arvutati neid parameetreid kasutades iga variandi korral välja biomassi kogunemise käik ning leiti tekkivad vead. Saadud vigu võrreldi väetusvariantide kaupa lisatud väetiste koguste ning mulla ja taimse massi toitainete sisaldustega. Usaldatavat seost ei esinenud. Seega langes ära ka vajadus ja võimalus kasutada teist võimalikku tööhüpoteesi, s.o. korrigeerida lahenduse käiku täiendava, toitumusest põhjustatud limiteeriva faktori sissetoomisega. Saadud tulemused viivad järeldusele, et antud struktuuriga mudeli ülesehituse korral kirjeldavad toitainetega varustatuse mõju ära erinevused nende variantide kasvufunktsioonide ja lehtede pindtiheduse käigus.

Saagi arvutamisel saadi paremad tulemused 2003. a. andmete baasil määratud parameetritega, suhteline viga jäi keskmiselt 10% piirimaile. 2002. a. korral ulatusid suhtelised vead kuni 20%. 2004. a. mil katsest saadud maksimaalne mugulate mass jäi väga madalaks, oli suhteline viga kõrge, absoluutsed vead jäid aga 2003. a. tasemest veidi madalamaks.

Järeldused

Mudeli parameetrite kalibreerimine ja saadud parameetrite alusel tehtud arvutused näitasid, et antud struktuuriga mudeli ülesehituse korral kirjeldavad toitainetega varustatuse mõju ära erinevused nende variantide kasvufunktsioonide ja lehtede pindtiheduse käigus. Seetõttu langes ära vajadus ja võimalus kasutada varem planeeritud tööhüpoteesi tuua toitainetega varustatuse mõju sisse läbi fotosünteesi ja gaasivahetusega seotud parameetrite ja/või täiendavate limiteerivate faktorite.

Tänuavaldused

Uurimust ja artikli koostamist on toetanud Eesti Teadusfond (grandid nr. 5020 ja 6092). Autor on tänulik Luule Tartlanile abi ja nõuannete eest katsete läbiviimisel ning Luule Kurimule ja Erika Vesikule suure töö eest, mille nad tegid ära taimede kasvudünaamika määramisel.

Kasutatud kirjandus

- Haverkort, A.J., MacKerron, D.K.L. (Eds.) 1994. *Potato ecology and modelling of crops under conditions limiting growth*. Proceedings of the Second International Potato Modeling Conference, held in Wageningen 17–19 May, 1994. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London, 379 p.
- Kabat, P., Marshall, B., van der Broek, B.J., Vos, J., van Keulen, H. (Eds.) 1995. *Modelling and Parametrization of the Soil–Plant–Atmosphere System*. Wageningen Pers, Wageningen, 513 p.
- Kadaja, J. 2004a. Influence of fertilisation on potato growth functions. – *Agronomy Research* **2**, (1), 49–55.
- Kadaja, J. 2004b. Kartuli produktiooniprotsessi dünaamiline mudel ja selle rakendused. – *Agraarteadus* **15**, (2), 74–89.
- Kadaja, J. 2005. Kartuli lehtede pindtihedus ja selle sõltuvus väetamise tasemest. – *Agronomia* 2005. Teadustööde kogumik 220. EPMÜ Agronoomiateaduskond – EMVI – JSAI, Tartu, lk. 81–83.
- Kadaja, J., Tooming, H. 2004. Potato production model based on principle of maximum plant productivity. – *Agricultural and Forest Meteorology* **127**, (1–2), 17–33.

- Polevoj, A.N. 1978. Dinamičeskaja model' formirovanija urožaja kartofelja. – *Meteorologija i Gidrologija*, (7), 79–85.
- Ross, J. 1966. K matematičeskomu opisaniju rosta rastenij. *Doklady AN SSSR* **171**, (2), 481–483.
- Ross, J. 1981. *The Radiation Regime and Architecture of Plant Stands*. Dr W. Junk Publishers, The Hague–Boston–London, 391 p.
- Ross, J., Tooming, H. 1968. Oslablenie prjamoj i summarnoj radiacii vnutri posevov sel'skohozjaistvennyh kul'tur i opicyvajuščie eë poluempiričeskie formuly. – *Aktinometrija i optika atmosfery*. Valgus, Tallinn, pp. 283 – 288.
- Sepp, J. 1983. Éksperimental'noe opredelenie funkcij rosta kartofelja. – Tooming, H., Karing, P. (Eds.) *Agroklimatičeskie uslovija i produktivnost' sel'skohozjaistvennyh kul'tur*. Trudy VNIISHM 11. Gidrometeoizdat, Leningrad, s. 36–40.
- Sepp, J., Tooming, H. 1991. *Resursy produktivnosti kartofelja*. Gidrometeoizdat, Leningrad, 261 s.
- Žukovskij, E.E., Sepp, J., Tooming, H. 1989. O verojatnostnoj koncepcii rasčota i prognoza étalonnyh urožaev. – *Vestnik Sel'skohozjaistvennoj Nauki*, (5), 68–79.
- Žukovskij, E.E., Sepp, J., Tooming, H. 1990. Verojatnostnye prognozy étalonnyh urožaev: realizacija i prognozy. – *Meteorologija i Gidrologija*, (1), 95-102.
- Tooming, H. 1967. Mathematical model of plant photosynthesis considering adaptation. – *Photosynthetica* **1**, (3–4), 233–240.
- Tooming, H. 1977. *Solnečnaja radiacija i formirovanie urožaja*. Gidrometeoizdat, Leningrad, 200 s.
- Tooming, H. 1984. *Ekologičeskie principy maksimal'noj produktivnosti posevov*. Gidrometeoizdat, Leningrad, 264 s.
- Tooming, H. 1988. Principle of maximum plant productivity. – K. Kull, T. Tiivel (Eds.) *Lectures in theoretical biology*. Valgus, Tallinn, pp. 129–138.
- Vos, J. 1994. Nitrogen and the growth of potato crops. – *Potato Ecology and modelling of crops under conditions limiting growth*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London, pp. 115–128.