

EESTI MAAÜLIKOOL, PÕLLUMAJANDUS- JA  
KESKKONNAINSTITUUT  
PÕLLUMAJANDUSUURINGUTE KESKUS

HUUMUSBILANSI MUDEL TAIMEKASVATUSE  
JÄTKUSUUTLIKKUSE HINDAMISE TÖÖVAHENDINA

Projekti juht: Enn Lauringson

Projekti täitjad: Alar Astover  
Hugo Roostalu  
Karin Kauer  
Liina Talgre  
Priit Penu  
Valli Loide

2015

## Sisukord

Sissejuhatus.....	3
1. Põllumuldade mullaspetsiifilise huumusbilansi kalkulaatori arendus.....	6
1.1 Mullaspetsiifiline huumusbilansi kalkulaator .....	20
1.2 Huumusbilansi kalkulaatori testimine põldkatsetel.....	25
1.3 Täiendavad arendusettepanekud .....	28
Kasutatud kirjandus .....	30
2. Mulla orgaanilise süsiniku dünaamika stimulatsioonimudelid .....	32
2.1. Ülevaade.....	32
2.2. Töö metoodika.....	39
2.3. Tulemused .....	40
Kasutatud kirjandus .....	55
Kokkuvõte.....	57

## Sissejuhatus

Mulla orgaaniline aine ja eriti selle püsivam osa huumus on võtmekomponent mullaviljakuse kujunemisel. Muldade tasakaalustatud huumusesisund on nii agronoomilistest kui ka ökoloogilistest aspektidest lähtuvalt üha suurema tähelepanu keskmes. Põllumulla huumusesisaldus ja -varu on mõjutatud väetamisest, külvikorrast, mullaharimisviisidest, kuivendusest jpm teguritest. Samas on muutused mulla huumusesisundis pikaldased ja on usutavalt tuvastatavad alles enam kui 4–6 aasta möödudes. Mitmed uuringud on näidanud, et ainuüksi teatud aastate järel määratud mulla orgaanilise süsiniku sisalduse näitajate võrdlemine ei anna alati usaldusväärset teavet mulla huumusesisundist. Huumusbilanss väljendab mineraliseerunud ehk lagunenu ja juurdetekkinud huumusvaru vahet ning selle alusel saab hinnata rakendatud maakasutuse mõju mulla orgaanilise aine tasakaalule. Mulla huumusvarust mineraliseerub aastas 1–3% ja see on seda intensiivsem, mida rohkem on külvikorras mustkesa, rühvelkultuure ja teravilju. Seega, sõltub mullaviljakus külvikorras olulisel määral haljasväetiskultuuride kasvatamisest ja orgaaniliste väetiste kasutamisest. Mulla talitlemisvõime säilitamiseks nii produktiivsuse kui keskkonnahoiu seisukohalt peab muld saama pidevalt „värsket” orgaanilist ainet koguses, mis kompenseeriks talitlemise käigus tehtud kulutused.

Mulla huumust peetakse mullaviljakuse tähtsaimaks näitajaks, millest sõltuvad paljud mulla omadused, mullas kulgevate protsesside iseloom ja taimkatte produktsiooni tase. Huumus on mulla orgaanilise aine üks mitmest esinemisvormist. Kuna tüüpilises parasniiskes põllumullas moodustab huumus suurema osa kogu orgaanilisest ainest, siis kõnekeeles kasutatakse neid ka sünonüümidenä. Mulda viidava orgaanilise aine arvel paraneb muldade huumusesisund, sellest tulenevalt ka mulla toiterežiim, struktuursus, füüsikalised ja hüdrofüüsikalised omadused. Kõige olulisem on, et rikkalik orgaanilise aine muldaviimine mõjub soodsalt mulla elustikule ja mulla bioloogilisele aktiivsusele. Paraneb mulla puhverdusvõime, neelamismahutavus, infiltratsioon ja toimub toitainete bioloogiline sidumine. Huumus soodustab kivimite murenemist ja mulla mineraalosa lagunemist. Samuti on mulla orgaaniline aine tihedalt seotud ökosüsteemi süsiniku- ja lämmastikuringega.

Mulla orgaanilise aine ja sellega tihedalt seotud süsiniku ja lämmastiku ringete kohta on koostatud maailmas arvukalt mudeleid, mis varieeruvad oma olemuselt lihtsatest arvutustabelitest kuni keerukate simulatsiooni/prognoosimudeliteni. Otseselt ilma eelneva kohandamiseta meie tingimustesse ülekantavaid mudeleid siiski ei ole ning need pole seetõttu Eesti praktikas kasutatud leidnud. Mulla orgaanilise aine simulatsiooni/prognoosimudelid eeldavad tavaliselt arvukalt spetsiifilisi sisendandmeid, mille kättesaadavus põllu/talu tasandil on piiritletud. Samas pakuvad aastakümnete jooksul läbiviidud kohalike põldkatsete ja seire tulemused huumusbilansi mudelite väljatöötamiseks piisavalt teavet.

Uurimuse peamised eesmärgid olid:

1. Välja töötada Eesti tingimusi arvestav ja praktikas rakendatav põllumuldade huumusbilansi kalkulaator.
2. Testida teaduskirjanduses avaldatud süsiniku (huumuse) kontsentratsiooni ja varude simulatsiooni/prognoosimudelite toimimist Eesti mullaseire aladel ja tootmispõldudel.

Huumusbilansi leidmiseks on vaja teada mulla huumusvaru algseisu ning huumuse juurdetekke ja lagunemise suurust. Kõik huumuse juurdeteket ja lagunemist iseloomustavad koefitsiendid sõltuvad omakorda: 1) mulla omadustest; 2) orgaanilise aine sisendi kogusest ja kvaliteedist (taimejäänustega mulda jääva orgaanika peamiselt juurte ja põhuna ning orgaanilised väetised); 3) kultuurist ja agrotehnoloogiast (peamiselt mullaharimise mõjuna). Huumusbilansi leidmiseks on mitmeid erineva keerukusega võimalusi: 1) lihtsustatud arvutus huumuse juurdetekke ja lagunemise alusel (st lihtsustatud kalkulaator); 2) mulla ja agrotehnoloogia eripärasid arvestav mudel; 3) simulatsioonimudelid, millega on võimalik prognoosida võimalikke muutusi mullas pikaks perioodiks (nt et milline võiks olla etteantud tingimuste juures huumusvaru 10, 20 või 50 aasta pärast). Meie eesmärk oli välja töötada ja Eesti tingimustele kohandada kahe esimese lähenemise rakendamiseks vajalikud koefitsiendid ning testida tunnustatud rahvusvahelise ICBM simulatsioonimudeli toimimist kohalike andmestikega.

Aruandes on paralleelselt kasutusel terminid mulla orgaaniline süsinik ja huumus (viimane neist arvutuslik tulem esimesest eeldusega, et huumuse koostises on keskmiselt 58% süsinikku). Huumuskalkulaatori lõpptulem väljendatakse huumusena (kalkulaatoris algsisestus võimalused mõlemale), simulatsioonimudelite väärtused esitatakse orgaanilise süsinikuna kuna nad on algselt sellele loodud ja see tagab tulemuste rahvusvahelise võrreldavuse.

Käesoleva projekti eesmärkide täitmiseks analüüsiti erinevaid huumusbilansi mudeleid, mida on seni koostatud ja kasutatud Rootsis, Taanis, Saksamaal, Kanadas, USA-s, Suurbritannias, Venemaal jm. Mujal koostatud mudelid ei ole otseselt ilma eelneva kohandamiseta meie (Eesti) tingimustesse ülekantavad. Teaduslikes töodes välja pakutud orgaanilise ainega seonduvaid mudeleid pole senini meie tänapäeva mullaseires ega ka tootmistingimustes testitud. Kuna mulla huumusesisund määrab taimede toitainetega (lämmastikuga) varustatuse, siis oleks need mudelid abiks ka (lämmastik)väetamise optimeerimisel.

Ajalooline taustmaterjal on küll suhteliselt suuremahuline, kuid viimastel aastatel on mullaseire ja pikaajaliste katsete rahastamine olnud ebapiisav ning suhtelise kalliduse

tõttu on jäänud määramata sellesuunalised analüüsid peamiselt erinevates käimasolevates põldkatsetes. Mullas toimunud huumusesisalduse muutuste hindamiseks ja seega huumuskalkulaatori mudeli arvutamise baasandmete saamiseks oli vajalik katsetelt kogutud mullaproovidest määrata orgaanilise süsiniku sisaldus ja teatud katetelt/uurimisaladelt veel täiendavate proovide võtmine. Uuemad andmed on lisaks ajaloolistele vajalikud kahel peamisel põhjusel:

- uuenenud ja muutunud agrotehnooloogiaid (minimeeritud harimine, otsekülv, liblikõieliste osatähtsuse suurenemine, mahetootmine, põhu peenestamine ja sisseküünd jne) arvestavate baasandmete puudumine, kuid mis tänapäeval on hädavajalik

- muutunud on olulise baaskriteeriumi (Corg sisaldus/huumusesisaldus) määramise meetodika, kus tänapäeval kasutatakse oluliselt täpsemat ja ka kallimat meetodikat kui ajaloolistes uurimistes. Mõnedel mullatüüpidel on vaja teostada kordusanalüüsid Dumase Corg määramise meetodikaga. Paralleelmääramised on näidanud, et sõltuvalt mullaliigist on ajaloolise Tjurini meetodika ja kaasaegse Dumase meetodika erinevused kuni 25%. Antud projekti raames oli võimalus määrata täpse meetodikaga Corg nii mullaseire kui ka põldkatsete proovidest.

Huumusbilansi mudelit ei saa koostada 1–2 aasta katsetulemuste põhjal, vaid selleks on vaja kokku võtta kõik sellealased uurimistulemused ning võrrelda ja hinnata, millisel määral need langevad kokku mujal mudelites kasutatud näitajatega. Seejärel tuleb tõendada ehk valideerida mujal maailmas loodud huumuse tekke ja lagunemise koefitsiente, et hinnata, kuidas ja millisel tasemel on võimalik neid rakendada meie tingimustes.

Sellest lähtuvalt analüüsiti ja koostati nii Eesti kui sarnase mullastikkliimaatilise regiooni katseandmete ja teaduslikes töodes avaldatud andmete põhjal orgaanilise ainega seonduvate lähteandmete andmebaas. Huumusbilansi kalkulaatori kasutamine laiatarbelises tabelarvutusprogrammis (nt Excelis) ja veebirakenduses põhineks tootmisüksuse üldistele ja lihtsasti kasutatavatele andmetele. Projekti aruandes esitatav andmestik (ka töögrupi liikmete poolt korraldatud katsete tulemused) on läbi töötatud metaanalüüsi meetodil, st erinevates allikates pärit algandmestiku oleme koondanud kokku ja teostanud uue andmeanalüüsi.

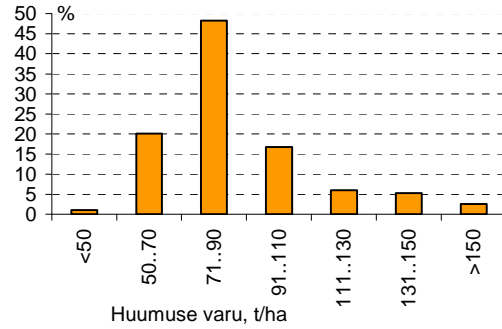
## 1. Põllumuldade mullaspetsiifilise huumusbilansi kalkulaatori arendus

Kõige enam on erinevaid rakenduslikke huumusbilansi mudeleid koostanud Saksamaa teadlased. F. Asmuse ja V. Hermanni (1977) ning G. Leitholdi, K.-J. Hülsbergeni, D. Micheli ja H. Schönmeieri (1997) huumusbilansi mudelid on osaliselt asukohapõhised, mis võtavad arvesse mulla omadusi, maakasutust, kasvatatavate kultuuride agrotehnikat ja lämmastikväetiste kasutamist. Eelpoolmainitud mudelite edasiarendus on VDLUFA (Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten) huumusbilansi mudel, mille koostamisel on lähtutud Saksamaal korraldatud pikaajaliste põldkatsete tulemustest (Engels jt, 2010). Seega oli vaja analüüsida ja hinnata, millisel määral on erinevate huumusbilansi mudelite koostamise meetodika ja tulemused meie tingimustes rakendatavad. Huumusbilansi kalkulaatori on koostamisel on tuginetud ka VDLUFA mudeli ja teiste kirjanduspõhiste katseandmete süsiniku bilansi ja humifikatsiooni arvandmetest, sest meil sellist terviklikku ülevaadet erinevate orgaaniliste ainete lagunemise ja humifikatsiooni kohta ei ole senini tehtud ega ka uuritud. Mujalt allikatest pärit andmed, mida oleme esitanud ümbertöötlemata kujul, on kas otseselt (autor, aastaarv) või kaudselt (katsete korraldaja, nt A. Piho jne) viidatud. Valdav osa projekti tulemustest saadi siiski kogutud andmestiku (ka töögrupi liikmete poolt korraldatud katsete tulemused) meta-analüüsil, st erinevates allikates pärit algandmestiku oleme koondanud kokku ja teostanud uue andmeanalüüsi. Kuid VDLUFA mudeli arvandmed ei ole Eesti tingimustesse otseselt ülevõetavad. Huumusbilansi lihtsustatud mudeli printsiipe ja olemuse saame üle võtta VDLUFA mudelist. Projekti käigus arvutati välja kohalikesse oludesse sobivad näitajad (humifikatsioonikoefitsiendid, süsiniku bilanss).

Varasemate uuringute analüüsiga töötati välja ja täiustati koefitsiente ja arvutusalgoritme, mis arvestavad erinevate agrotehnoloogiate (harimisviisid, tahe- ja vedelsõnniku kasutamine, haljasväetised, kompostid, vahekultuurid, põhu eemaldamine või muldaviimine jne) mõju mulla huumusbilansile.

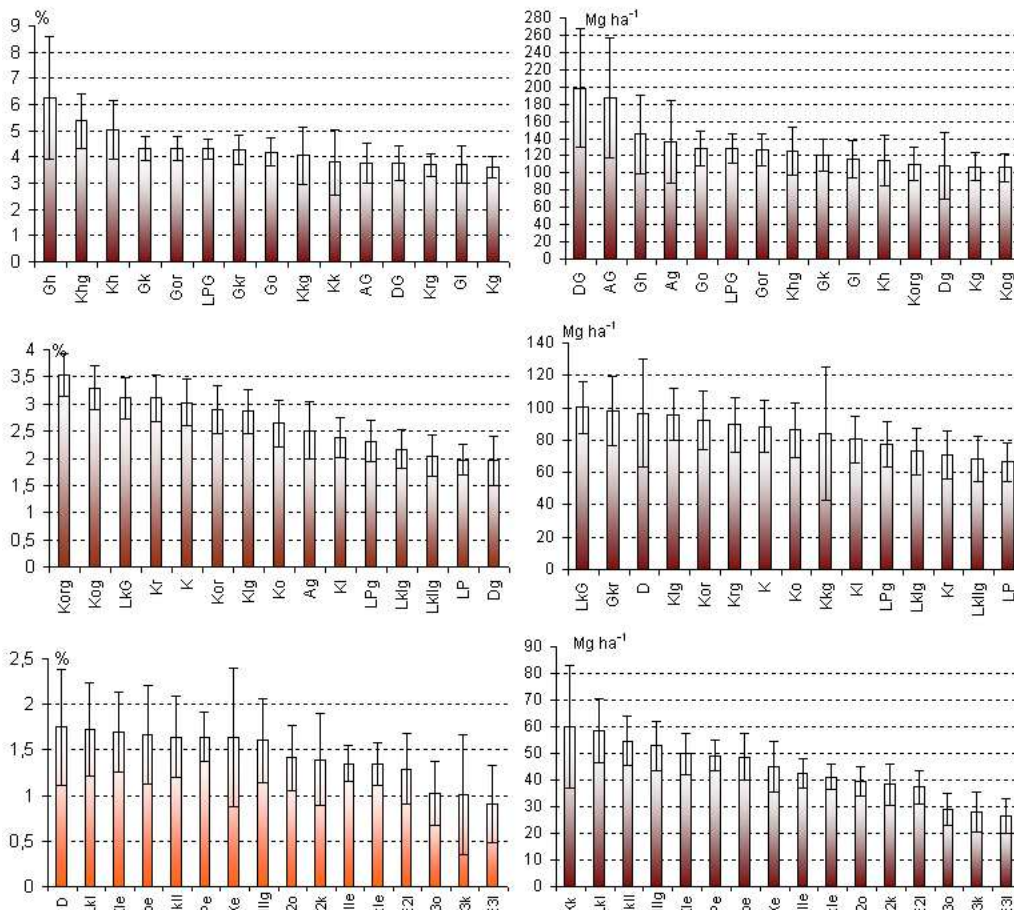
**Et huumusbilanss sõltub tootmistasemest, mullaviljakusest ja teistest omadustest, kasvatatavast kultuurist ja väetamisest, siis ka meie poolt koostatavas huumusbilansi algoritmis lähtutakse kõigepealt konkreetse põllu mulla omadustest nagu lõimisest, huumuse- või orgaanilise süsiniku sisaldusest, huumuskihi tusedusest ja selle lasuvustihedusest.**

Eesti 990 tuhandel hektaril paiknevatel põldudel on muldade huumusseisund väga suurtes piirides varieeruv mistõttu maakasutusega kaasnevad muutused huumusvarus mõjutavad konkreetse mulla omadusi, viljakust ja kasutussobivust erinevalt. Näiteks, Tartu maakonnas 21% põllumaadest paiknevad mullad, milliste huumusvaru on alla 70 t/ha, kuid siin levib ka muldi, milliste huumusvaru ületab oluliselt 150 t/ha (joonis 1.1).



Joonis 1.1. Tartu maakonna põllumaa jagunemine muldade huumusvarust lähtuvalt.

On leitud, et kui huumusbilanss on negatiivne (-2 t/ha/a), siis huumusvaestel muldadel on huumusvaru suhteline kahanemine üle kahe-kolme korra suurem. Asukohapõhise huumusbilansi mudelis on muldade huumusseisundi hindamisel vaja aluseks võtta konkreetse mulla huumusvaru, mis sõltub selle mulla huumuskihi tusedusest, lasuvustihedusest, räha-, veerise- ja klibu- ning huumusesisaldusest (joonis 1.2).



Joonis 1.2. Eesti mineraalsete põllumuldade huumusesisaldus ja huumusvaru. Vearivad joonisel tähistavad standardhälvet.

Mullaseire tulemusi on otstarbekas võrrelda mingi kindla hüdrofüüsikalise seisundi juures. Seega ka meie poolt tehtavad huumusbilansi arvutused tuleks teha muldade väliveemahutavusele vastava veesisalduse juures, mis iseloomustab muldade varakevadist niiskuse režiimi.

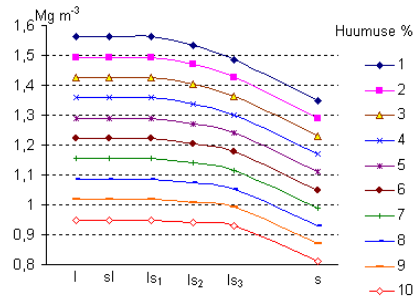
Mulla lasuvustihedus on teatavasti seda väiksem, mida suurem on mulla veesisaldus ja mida enam on mullas huumust. Andmebaasi analüüsil selgus, et põllumuldade künnikihis on mulla lasuvustiheduse ja huumusesisalduse ( $x$ , %) vaheline seos liiv-, saviliiv- ja kergetes liivsavimuldades järgmine:

$$Dm_{l-ls1} = 1,63 - 0,068x \quad R^2 = 0,68; \sigma = 0,08$$

Veesisalduse suurenedes savid paisuvad ja kuivades nende ruumala väheneb 20–30%. Sellest tulenevalt lähtusime keskmise- ja raske liivsavimulla ning savide lasuvustiheduse arvutamisel järgmistest seostest:

$$Dm_{ls2} = 1,601 - 0,066x \quad Dm_{ls3} = 1,549 - 0,062x \quad Dm_s = 1,41 - 0,060x$$

Seega, mida huumusrikkam ja raskema lõimisega on muld, seda väiksem on selle mulla lasuvustihedus (joonis 1.3).



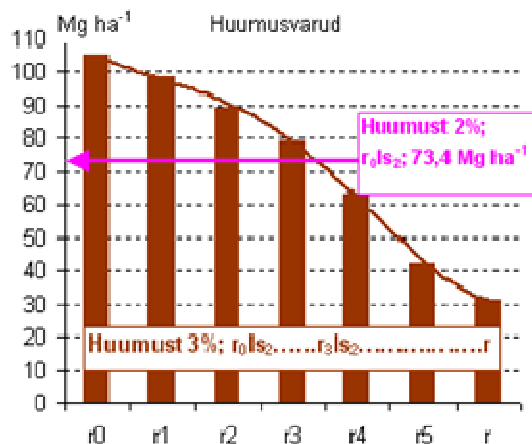
Joonis 1.3. Mineraalsete põllumuldade lasuvustihedus olenevalt lõimisest ja huumusesisaldusest.

Koreserikastes muldades tuleb arvestada kivisuse astmega, mistõttu väheneb ka muldade huumusvaru (joonis 1.4). Välja arvutatud koresest tingitud koefitsiendid on:

$$r1 - 0,94; r2 - 0,85; r3 - 0,75; r4 - 0,6; r5 - 0,4; r - 0,3.$$

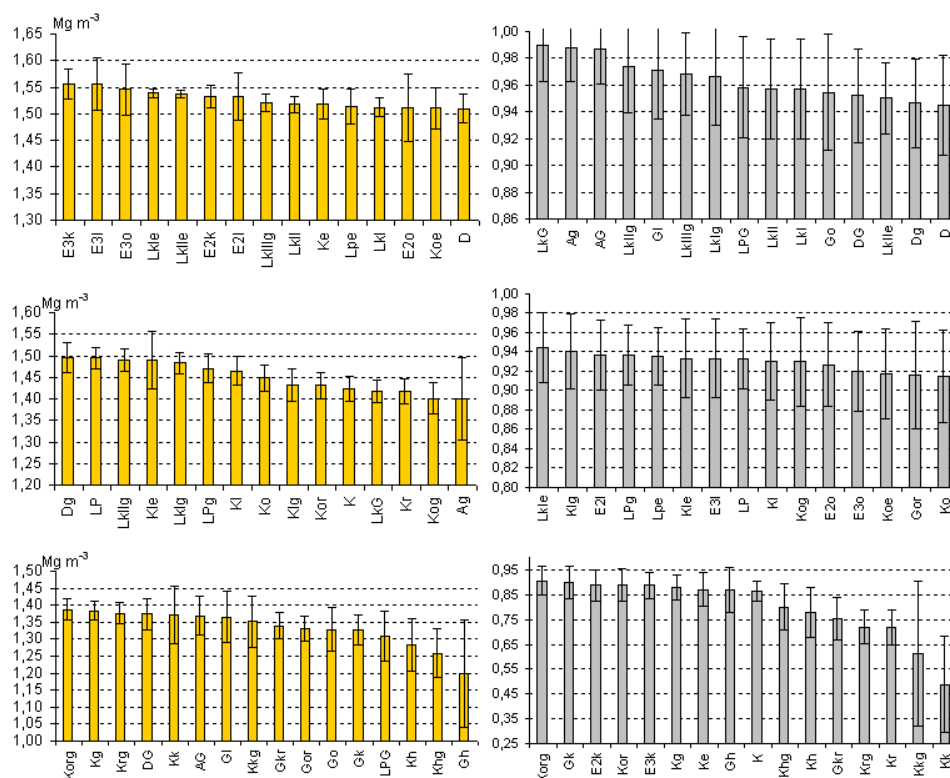
Koresisalduse aste on leitav mullakaardilt ja vastavad juhised selle tuvastamiseks antakse ka huumusvaru koostamise kasutusjuhendis.





Joonis 1.4. Liivsavimuldade huumusvaru sõltuvalt rähksuse astmest 25 cm tüseduses huumuskihis.

Meie põllumuldade lasuvustihedus ja koresesisaldus varieerub väga suurtes piirides, mida kindlasti on vaja huumusvaru kalkulaatoris arvestada (joonis 1.5).



Joonis 1.5. Eesti mineraalsete põllumuldade huumuskihi lasuvustihedus ja kivisusest tulenev koefitsient. Vearibad joonisel tähistavad standardhälvet.

Seega eeltoodu põhjal leiame konkreetse mulla algseisu huumusvaru järgmise valemi alusel:

$$H_v = d * D_m * h * k_k * 100,$$

kus  $H_v$  – mulla huumusvaru ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ),  $d$  – huumuskihi tüsedus (m),  $D_m$  – mulla lasuvustihedus ( $\text{Mg m}^{-3}$ ),  $h$  – huumusesisaldus (%) ja  $k_k$  – mulla kivisusega seonduv koefitsient.

Kalkulaatoris on kasutajal vaja huumusvaru hetkeseisu leidmiseks lähteandmetena sisestada huumuskihi tüsedus, orgaanilise süsiniku või huumusesisaldus, mulla lõimise. Kui kalkulaatori kasutajal puudub teadmine nendest näitajatest oma põllu kohta, siis saab ta lõimise, liigi ja enamasti ka huumuskihi tüseduse teada mullakaardilt.

Mulla huumusbilanss, huumuse juurdetuleku ja mineralisatsiooni vaherkord oleneb kasvatatavast kultuurist ja selle agrotehnikast, mulda viidava orgaanilise aine kogusest ning koostisest aga samuti mullastik-kliimaatilistest tingimustest. Katsete tulemuste ja kirjanduses avaldatud andmete põhjal on VDLUFA mudelis leitud olenevalt kasvatatavast kultuurist, tootmistasemest ja maakasutuse spetsiifikast (tava- või maheviljelus) mulla huumusbilansi piirväärtused (tabel 1.1). Väetiste tagasihoidlikum kasutamine põhjustab negatiivse huumusbilansi. Võttes arvesse, et huumuses on süsinikku 58%, väheneks VDLUFA mudeli järgi mulla huumusvaru teraviljade kasvatamisel 482–688 kg/ha/a ja kartuli puhul 1307–1720 kg/ha/a, kusjuures madala tootmistaseme korral mineraliseerub huumust rohkem kui kõrgema tootmistaseme korral. Heintaimede kasvatamisel aga huumusvaru suureneks kuni 1,2 t/ha/a.

Eesti tingimustes on senini arvatud (H. Vipperi eksperthinnangul), et teravilja ja kartuli kasvatamisel mulla huumusvaru väheneb vastavalt 1 ja 2 t/ha/a ja heintaimede all suureneb 2 t/ha/a. Eestis korraldatud pikaajaliste väetuskatsete tulemustest selgub, et võttes aluseks lämmastikubilansi, mineraliseerub väetamata mullal huumust aastas odra ja kartuli all vastavalt 1,2–1,8 t/ha ja 1–2,1 t/ha. Heintaimedega korraldatud katsetes on huumusvaru Eesti muldades suurenenud rohukamara tüübist ja väetamisest olenevalt keskmiselt 0,9–1,8 t/ha/a.

Tabel 1.1. Mulla huumuse süsiniku bilanss Saksamaa tingimustes olenevalt põllukultuurist (VDLUFA huumusbilansi mudel)

Kultuur	Huumuse C kg/ha/a		Kultuur	Huumuse C kg/ha/a	
	Kõrge tootmis-tase	Madal tootmistase ja mahetootmine		Kõrge tootmis-tase	Madal tootmistase ja mahetootmine
Rukis	-280	-400	Kaunviljad	160	240
Talitrustikalid	-280	-400	Kõrrelised heintaimed (saagiaasta)	600	700
Talinisu	-280	-400	Kõrrelised katteviljata, kevadkülv	400	450
Suvioder	-280	-400	Kõrrelised, allakülv	200	250
Suvinisu	-280	-400	Kõrrelised, suvine külv	100	125
Kaer	-280	-400	Liblikõielised (saagiaasta)	600	700
Taliraps	-280	-400	Liblikõielised katteviljata, kevadkülv	400	450
Suviraps	-280	-400	Liblikõielised, allakülv	200	250
Õililina	-280	-400	Liblikõielised, suvine külv	100	125
Silomais	-560	-800	Vahekultuur (talviseks katteks)	120	160
Kartul	-760	-1000	Vahekultuur (sügisel kõrde ja künd)	80	120

Mulda tagastuva orgaanilise aine koguste leidmiseks analüüsiti Eestis ja Euroopas korraldatud põldkatsete põhjal erinevate kultuuride biomassi struktuuri ja arvutati suhtarvud maapealse biomassi ja saagi koristusaegsete taimejuurte masside vahel (tabel 1.2). Tuginedes mitmetele uuringutele on tegelik juurte mass, mis ladestub mulda saagi koristusaegse massiga võrreldes juurevarisest tingituna ligikaudu 1,65 korda suurem, mida ka käesoleva huumusbilansi mudeli juures arvestati (Kuzyakov & Schneckenberger, 2004). Näiteks, erinevate odra väetuskatsete põhjal juurte ja terasaakide vaheline seos on järgmine:

$$y = 128,6 + 0,70x,$$

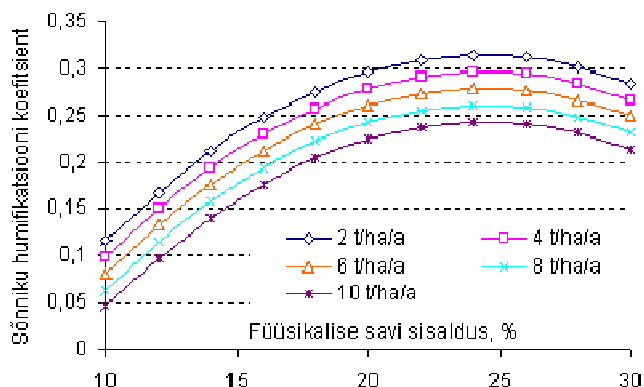
kus  $y$  – juurte mass  $\text{kg ha}^{-1}$  ja  $x$  – terasaak  $\text{kg ha}^{-1}$ .

Tabel 1.2. Põllukultuuride biomassi struktuur suhtarvudes saagi koristuse ajal

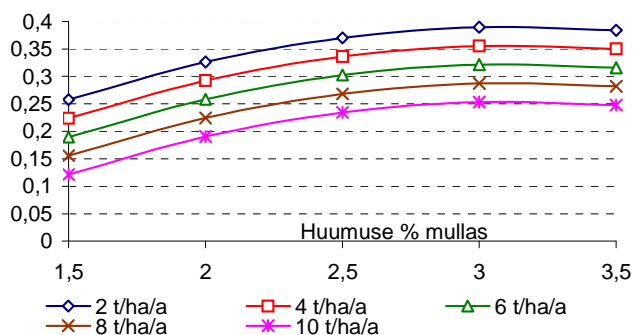
Kultuur	Põhk/saak	Juured/saak	Kultuur	Juured/maapealne mass
Teraviljad			Vahekultuurid	
Oder	0,8	0,43	Sinep	0,40
Suvinisu	0,9	0,36	Talirüps	0,66
Kaer	1,1	0,44	Taliraps	0,64
Talinisu	0,8	0,32	Õlirõigas	0,62
Rukis	1,3	0,48	Hernes	0,39
Tritikale	0,9	0,35	Uba	0,46
Raps	2	0,5	Raihein	0,64
Hernes	1	0,65	Keerispea	0,47
Uba	1,1	0,65	Rukis	0,63
Mais		0,2	Segu	0,51
	Pealsed/mugulad	Juured/mugulad		
Kartul	0,2	0,1		
Heintaimed				
	Juured/maapealne osa			
Lutsern	1,12			
Hübriidlutsern	1,08			
Punane ristik	0,8			
V. mesikas	1,0			
Kõrrelised	0,8			
Allakülvid 1. Aastal			Allakülvid 2. aastal	
Lutsern	0,75		Lutsern	0,58
Hübriidlutsern	0,63		Hübriidlutsern	0,54
Punane ristik	0,69		Punane ristik	0,40
V. mesikas	0,64		V. mesikas	0,47
Raihein	0,76			

Üldistuse lähteallikad: Buyanovsky, 1986; Jefferies, 1993; Kätterer jt, 1993; Bolinder jt, 1997; Klimanek, 1997; Pietola ja Alakukku, 2005; Braun jt, 2009; Gan jt, 2009; Bolinder, 2007; Hoyer 2009; Bolinder jt, 2010; Lauringson 2011; Talgre jt, 2009; Talgre jt, 2011.

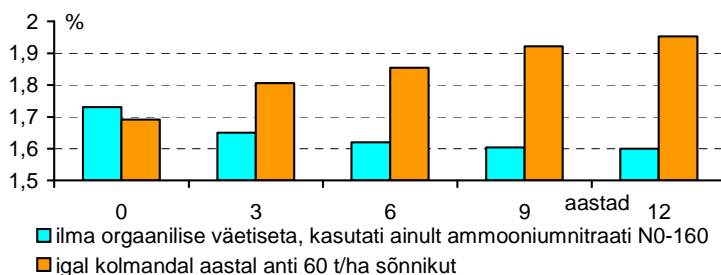
A. Piho poolt korraldatud külvikorra väetuskatsetes on uuritud, kuidas mineraalväetiste ja sõnniku kasutamine mõjutab muldade huumusseisundit. Toodud katsetulemuste analüüsist järeldub, et sõnniku humifikatsioon sõltub olulisel määral mulla lõimisest ja mulda viidava sõnniku kogusest (joonis 1.6, 1.7 ja 1.8). Põuakartlikes liiv- ja saviliivmuldades, kus valitsevad aeroobsed tingimused, mineraliseerub suur osa mulda viidavast orgaanilisest ainest ja huumust tekib oluliselt vähem kui seda raskema lõimisega muldades. Seega, orgaanilise aine humifikatsioon sõltub mullast, orgaanilise aine koostisest ja mulda viidavast kogusest. Toodud analüüsiandmeid on kasutatud huumuskalkulaatori koostamisel.



Joonis 1. 6. Mulla lõimise (füüsikalise savi sisalduse alusel) ja sõnnikukoguste mõju humifikatsioonile.



Joonis 1.7. Sõnniku KA humifikatsioonikoeffitsient külvikorras põua- ja parasniisketes muldades



Joonis 1.8. Näivleetunud mulla huumusesisalduse muutus külvikorras olenevalt väetamisest.

Võttes aluseks H. Kolbe (Kolbe, 2008; Kolbe, 2012) huumusbilansi andmed, arvutati erineva orgaanilise aine humifikatsiooni võrrandid sõltuvalt mulda viidavatest orgaanilise aine kogustest ja koostisest lähtuvalt (tabel 1.3). Esitatud võrrandite alusel saab arvutada huumuse juurdeteket. Juurte humifikatsioonikoeffitsient on mõnevõrra suurem kui

maapealsel biomassil, keskmiselt arvestati selleks 0,2 ehk 1 tonnist juurtest tekib mulda 200 kg huumust.

Tabel 1.3. Mulda viidava orgaanilise aine humifikatsioon sõltuvalt koostisest ja kogustest (H. Kolbe lähteandmete alusel)

Mulda viidav orgaaniline aine	Võrrand ( $y$ – kg huumust 1 tonni või $m^3$ kohta; $x_1$ – Mg $ha^{-1}$ ; $x_2$ – kuivaine %; $x_3$ – $m^3 ha^{-1}$ )
Värske sõnnik	$y = 6,99 + 1,86x_2 - 0,34x_1$
Käärinud sõnnik	$y = 10,48 + 1,94x_2 - 0,51x_1$
Veise vedelsõnnik	$y = 0,96 + 2,05x_2 - 0,02x_3$
Sea vedelsõnnik	$y = 1,00 + 1,31x_2 - 0,02x_3$
Värske kompost	$y = 13,98 + 1,94x_2 - 0,67x_1$
Valmis kompost	$y = 24,74 + 2,15x_2 - 1,20x_1$
Vedel biogaasi substraat	$y = 4,81 + 1,61x_2 - 0,03x_3$
Tahke biogaasi substraat	$y = 10,48 + 1,94x_2 - 0,51x_1$

Huumuse mineralisatsiooni ehk huumusvaru vähenemist mullas olenevalt kasvatatavast kultuurist ja selle saagitasemest on otseselt raske määrata, kuid üks võimalus selle arvutamiseks on teha seda kaudselt lämmastiku aktiivbilansi kaudu, mis kajastab, kui palju omastavad taimed lämmastikku mullavarudest. Kuna mulla lämmastiku ja huumuse/süsinikusisalduse vahel on tugev positiivne seos siis on selline lähenemist võimalik rakendada. Teades huumuse ja lämmastiku suhet mullas leiame mullast omastatud lämmastiku alusel mineraliseerunud huumuse kogused, kuid seda eeldusel, et ammonifikatsiooni- ja nitrifikatsiooniprotsessi tulemusena mineraalse lämmastiku varu stabiliseerub mullas. Seejuures tuleb arvestada, et huumuse ja lämmastiku suhe ei ole konstantne suurus, mida huumusvaesem on muld, seda kitsam on see suhe.

Praktilistel eesmärkidel võib mulla lämmastikusisalduse ja huumuse/lämmastiku suhte leidmisel lähtuda võrrandist:

$$y = 0,047x + 0,037,$$

kus  $y$  – mulla lämmastikusisaldus, %;  $x$  – mulla huumusesisaldus, %.

Lämmastikväetisi kasutades taimed ei omasta seda täielikult, vaid teatud osa, kusjuures seda väiksem on suhteline omastatavus, mida suurem on mulda viidav väetiskogus. Teraviljade puhul lähtusime võrrandist:

$$y = 65 - 0,1678x$$

kus,  $y$  – lämmastiku omastamise %;  $x$  – lämmastikväetiskogus, kg N  $ha^{-1}$ .

Odra poolt omastatud lämmastikukoguste arvutamisel lähtuti terade, põhu ja juurte kogustest ja nende lämmastikusisaldusest, mida kajastavad järgmised võrrandid:

$$y_1 = 1,46 + 0,11x_1 + 0,0034x_2$$

$$y_2 = 0,59 + 0,0011x_2$$

$$y_3 = 0,90 + 0,0019x_2$$

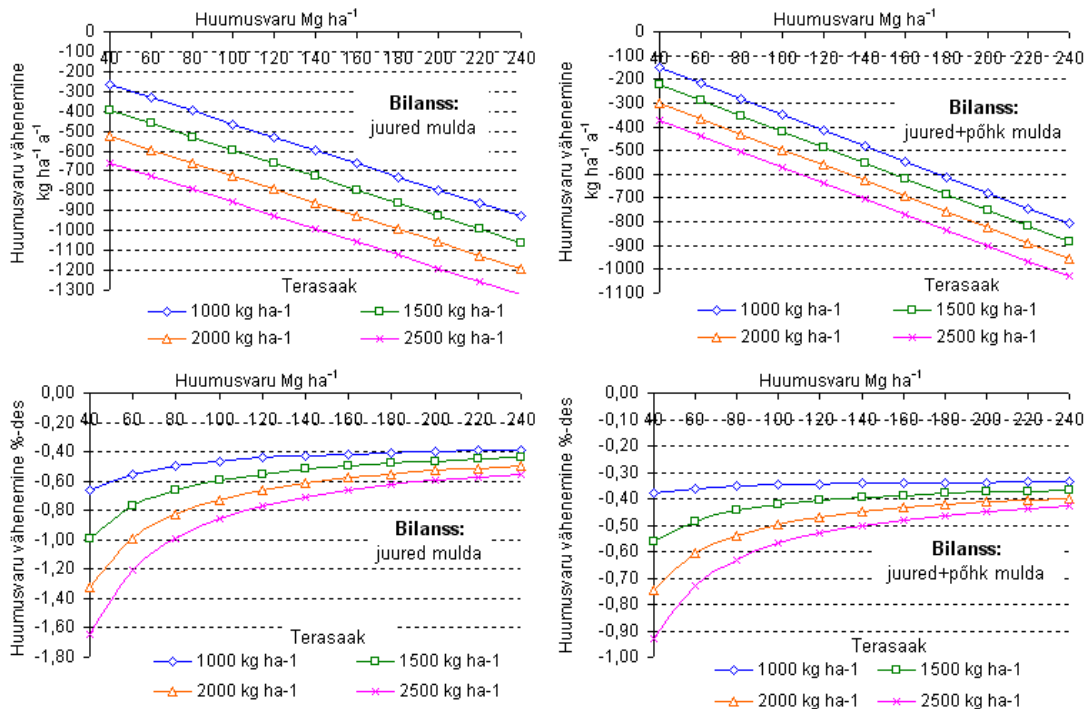
kus  $y_1$ ,  $y_2$  ja  $y_3$  – lämmastikuisaldus vastavalt terades, põhus ja juurtes, %;  $x_1$  – mulla huumusesisaldus, %;  $x_2$  – kasutatud lämmastikväetist, kg N ha<sup>-1</sup>.

Kui lämmastiku aktiivbilanss on negatiivne, s.o. väetistega mulda viidud omastatav lämmastikväetiskogus on väiksem odra biomassi lämmastiku kogusest, siis järelikult puudujääva osa lämmastikust taimed omastasid mullavarudest.

**Eelnevast lähtuvalt võime arvestada, et mullast, kasutatud väetiskogustest ja saagitasemetest sõltuvalt mineraliseerub ehk laguneb huumust ( $y$ , kg ha<sup>-1</sup>) odrapõllul aastas 140–2000 kg ha<sup>-1</sup>, kusjuures saagitasemest ( $x$ , kg ha<sup>-1</sup>) sõltuvalt kajastaks seda võrrand:**

$$y = 182,9 + 0,31x$$

Võttes arvesse nii huumuse mineraliseerumisest tingitud varu vähenemise kui ka mulda viidava orgaanilise aine humifikatsiooni tulemusena tekkiva huumuse kogused kujuneks väetamata odrapõllul huumusebilanss seda negatiivsemaks, mida suurem on muldade huumusvaru ehk mida väiksem on mulla lämmastikväetistarve (joonis 1.5).



Joonis 1.5. Mulla huumusbilanss väetamata odrapõllul.

Siin tuleb arvestada, et muldadel, kus huumusvaru on vaid 40 Mg ha<sup>-1</sup>, nende muldade efektiivne viljakus ei ületa oluliselt 1–1,5 Mg otra hektari kohta. Ka põhku mulda viies jääb huumusbilanss negatiivseks. Taolise meetodika alusel leitud tulemused on täiesti võrreldavad kirjanduse andmetega, odra kasvatamisel meie enamlevinud mineraalmuldadel, kus huumusvaru on 60–120 Mg ha<sup>-1</sup>, põhku mulda viimata huumusvaru väheneb aastas 300–800 kg ha<sup>-1</sup> ehk 0,4–1% esialgsest varust.

**Huumusbilansi võrrandid väetamata odra puhul on järgmised:**

1. – ilma põhku mulda viimata  $y = 130 - 3,32x_1 - 0,2623x_2$   $R^2=0,89$ ;  $\sigma = 65$

2. – põhk viiakse mulda  $y = 129 - 3,29x_1 - 0,1483x_2$   $R^2=0,84$ ;  $\sigma = 63$

kus  $y$  – huumusbilanss, kg ha<sup>-1</sup>;  $x_1$  – huumusvaru, Mg ha<sup>-1</sup>;  $x_2$  – terasaak kg ha<sup>-1</sup>.

**Huumusbilansi võrrandid lämmastikväetisi kasutades odrale on aga järgmised:**

1. – ilma põhku mulda viimata  $y = 322,1 - 2,4676x_1 + 9,4037x_3 - 0,0293x_3^2 - 0,3095x_2$ ;

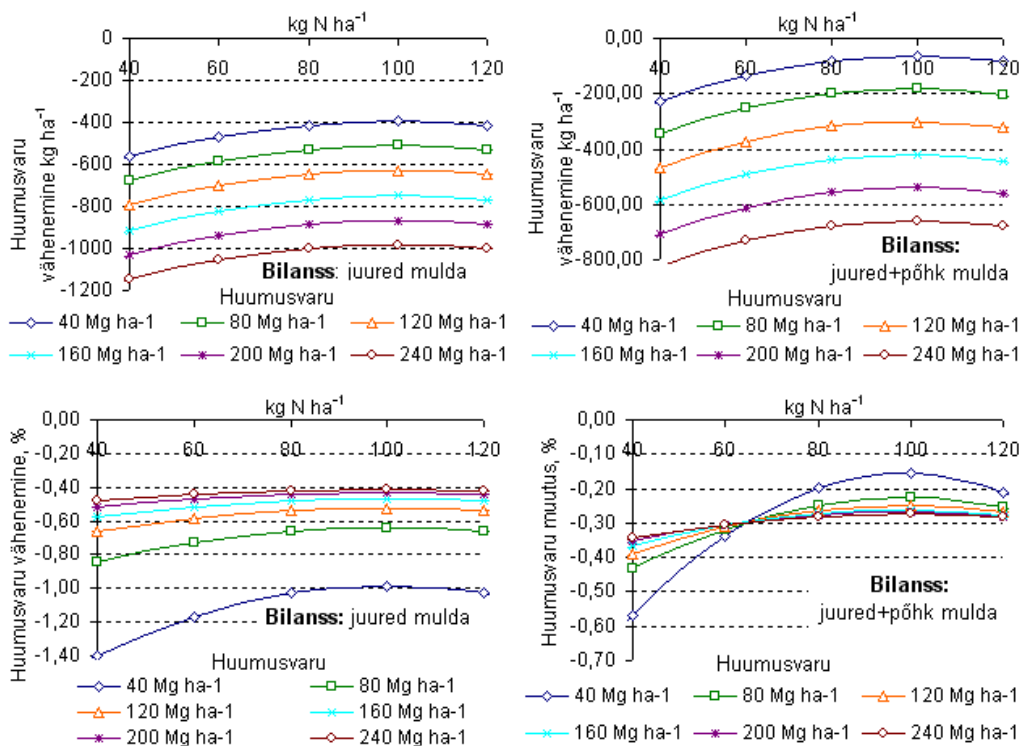
$n=1372$ ;  $R^2=0,89$ ;  $p<0,000$ ;  $se = 121$ .

2. – põhk viiakse mulda  $y = 324,6 - 2,3681x_1 + 9,5180x_3 - 0,0306x_3^2 - 0,2350x_2$ ;  $n=1372$ ;  
 $R^2=0,87$ ;  $p<0,000$ ;  $se = 113$ ,

kus  $y$  – huumusbilanss, kg ha<sup>-1</sup>;  $x_1$  – huumusvaru, Mg ha<sup>-1</sup>;  $x_2$  – terasaak kuivaines kg ha<sup>-1</sup>,  
 $x_3$  – kg N ha<sup>-1</sup>

Toodust järeldub, et kõige vähem kahaneb huumusvaru mullas kui lämmastikväetisnorm on ligikaudu 100 kg N ha<sup>-1</sup> (joonis 1.6). Seda loetakse odra väetamisel ka agronoomiliselt efektiivseks lämmastikväetisnormiks, mis tagab maksimaalse saagi. Antud joonisel on näitlikustavalt esitatud huumusbilanss 3 Mg ha<sup>-1</sup> terasaagi korral, mille tõenäosus väikese huumusvaruga mullal (40 Mg ha<sup>-1</sup>) on väga väike. Kui põhku ei viida mulda, siis väetatud mullal, huumusvaruga 80–120 Mg ha<sup>-1</sup>, mineraliseerub aastas huumusvarust 500–800 kg ha<sup>-1</sup> ehk 0,52–0,85%. Põhu sissekünni korral väheneks mulla huumusvaru aastas vaid 0,23–0,43%.





Joonis 1.6. Mulla huumusbilanss odra põllul (terasaak  $3 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) lämmastikväetisi kasutades

Sarnaselt eeltoodud odra näitele koostati mulla huumusvaru ja lämmastikväetiste kasutamist arvestavad algoritmid ka nisule ( $n=226$ ), nisule ( $n=226$ ), rukkile ( $n=321$ ), kaerale ( $n=285$ ), hernele ( $n=74$ ), kartulile ( $n=715$ ), rapsile ( $n=136$ ), punasele ristikule heinaks ja siloks ( $n=9$ ), punane ristik haljasväetiseks ( $n=34$ ), lutsernile heinaks ja siloks ( $n=34$ ), lutsernile haljasväetiseks ( $N=5$ ), põldheinale ( $n=909$ ) ja timutile ( $n=56$ ).

Lämmastiku aktiivbilansi alusel huumuse kulumise leidmisel on siiski teatud piirangud. Aastatel, mil mineraalväetist on küll kasutatud, ent ebasoodsa ilmastiku vms faktori mõjul jääb saagikus väga väikseks, siis jääb lämmastiku aktiivbilanss positiivseks, mis aga ei tähenda otseselt huumuse suuremat juurdeteket. Seetõttu rakendasime väga väikse teraviljade ja kartuli saagitaseme juures mudelis täiendavat piirangut, et ilma täiendavate orgaaniliste väetiste sisenditega ei saa nende viljelemisel huumusbilanss olla suurem kui  $-100 \text{ kg/ha/a}$  teraviljadel ja  $-500 \text{ kg/ha/a}$  kartulil. Fikseeritud kulumisega kultuurideks kalkulaatoris on mais ja vahekultuurid. Katteviljale allakülvide ja haljasväetiste korral praktikas saakide määramist ei toimu ning seega on kalkulaatoris antud järgnev soovitus: visuaalse hinnangu alusel valige haljasväetise biomassi saagitaseme. Saagitasemeteks on: väike, keskmine ja suur. Allakülvide korral, kui taimik jääb kasvama, on huumusbilansi tulem olenevalt saagikusest: väike  $+175$ ; keskmine  $+230$ ; suur  $+300$ . Biomassi

muldaviimise korral vastavalt: +250; +350; +450. Haljasväetiste korral on aluseks võetud taimiku maapealne kuivaine mass: väike 4,5 t/ha, keskmine 5,5–6 t/ha, suur 6,5–7 t/ha.

Et selgitada, millisel määral mõjutab mulla lõimis orgaanilise aine humifikatsiooni, selleks Eestis sihipäraseid katseid tehtud ei ole. Ainult A. Piho poolt korraldatud külvikorra katsete tulemustest võime järeldada, et liivmullas tekib sõnnikust kuni kolm korda vähem huumust kui seda kerges liivsavimullas. Ometi on huumusbilansi mudelis mulla lõimisest tulenevat humifikatsiooni erisusi vaja arvestada. Kaudselt võiks seda teha, kui lähtuda erineva lõimisega põllumuldade huumusesisalduse suhtarvudest (tabel 1.4). Kui võtta kerge liivsavimulla huumusesisaldus aluseks, siis põuakartlikes liivmuldades on huumusesisaldus 18–28% võrra väiksem ja gleistunud muldade erinevus on 18–25%.

Tabel 1.4. Põllumuldade huumusesisaldus olenevalt mulla lõimisest

Muld	Huumuse % /suhteline sisaldus $I_{s1}$ suhtes	Lõimis			
		Liiv	Saviliiv	Kerge liivsavi	Keskmine liivsavi
K	%	2,22	2,93	3,09	3,03
	suhteline sisaldus	0,72	0,95	1,00	0,98
Ko	%	2,02	2,61	2,78	2,67
	suhteline sisaldus	0,73	0,94	1,00	0,96
KI	%	2,02	2,50	2,52	2,49
	suhteline sisaldus	0,80	1,00	1,00	0,99
LP; Lk	%	1,71	2,14	2,09	2,08
	suhteline sisaldus	0,82	1,02	1,00	0,99
Kg	%	2,92	3,46	2,71	3,66
	suhteline sisaldus	0,79	0,93	1,00	0,99
Kog	%	2,57	3,22	3,41	3,30
	suhteline sisaldus	0,75	0,94	1,00	0,97
KIg	%	2,45	2,99	2,99	2,92
	suhteline sisaldus	0,82	1,00	1,00	0,98
LPg;L kg	%	2,17	2,31	2,58	2,37
	suhteline sisaldus	0,84	0,90	1,00	0,92

Seega, liivmuldade puhul tuleks mulda viidud orgaanilise aine humifikatsiooni vähendada 20–30%. Teistel lõimistel on korrigeerimisvajadus väiksem. Kalkulaatori esimeses versioonis kasutasime orgaaniliste väetiste humifikatsiooni diferentseerimiseks järgnevaid koefitsiente: liiv 0,75; saviliiv 0,96; kerge ja keskmine liivsavi 1,0; raske liivsavi 0,98; savi 0,95. Edaspidi on vajadus nende koefitsientide täiendamiseks ja mulla liigiti eristamiseks.

Samuti on vaja muldade huumusbilansi juures arvestada mullaharimise mõjuga. T. O. Westi, W. M. Posti ja paljude teiste teadlaste poolt üldistatuna on sadade põldkatsete põhjal on leitud, et tavaviljelusega võrreldes suureneb otsekülvi puhul mulla süsinikuarvu 10–60 g m<sup>2</sup> a<sup>-1</sup>, kuid mullaharimise mõju huumusbilansile on suurel määral mullastik-kliimaatilistest tingimustest, külvikorrast ja kasvatatavatest kultuuridest. Pikaajalistest põldkatsetest järeldub, et mulla süsinikuarvu suurenemine otsekülvi korral ei ole ajaliselt pidev, vaid kõige enam suureneb see 5–10 aasta vahemikus pärast otsekülvile üleminekut, kuid hiljem (15–20 a.) võib erinevus puududa. IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) ehk Valitsustevahelise Kliimamuutuste Nõukogu poolt soovitatud mudelites on otsekülvi korral tavaviljelusega võrreldes arvestatud mulla süsiniku akumulatsiooniks 10%. M. Krawutschke, C. Brocki, G. Leitholdi, B. Hofmanni, S. Tischeri, O. Christeni, T. Appeli, V. Bergi, O. Lauferi, ja M. Bai (Krawutschke, 2007) poolt Saksamaal erinevatel muldadel korraldatud pikaajalistes põldkatsetes, kus võrreldi minimeeritud mullaharimise ja tavakünni mõju muldade huumusseisundile, leiti, et minimeeritud mullaharimise korral on pindmise mullakihi huumusesisaldus küll suurem, kuid huumusvaru tervikuna oluliselt ei suurenenud (0,1–3,1% aastas). Mõnel mullal see aga isegi vähenes 0,1–0,4% aastas. Kuna muutused on väga marginaalsed, siis Saksamaa teadlaste senised soovitusel on huumusbilansi arvutuste juures mullaharimisviisi mitte arvestada (Krawutschke jt, 2009). Minimeeritud mullaharimise ja otsekülvi korral küll suureneb tavaliselt ülemises kihis orgaanilise aine kontsentratsioon, ent samas väheneb lasuvustihedus ja profiili kokkuvõttes ei pruugi muutust huumusvarus esineda. Kuigi hetkel puudub teaduslikult põhjendatud andmestik mullaharimisviiside alusel huumusbilansi arvutuste diferentseerimiseks, siis rakendasime hetkel kalkulaatoris minimeeritud harimise korral koefitsienti 1,05. Eesti tingimustes on vaja mullaseire ja edasiste uuringute käigus selgitada, kuidas mõjutab minimeeritud mullaharimine või otsekülv muldade huumusseisundit ja kuivõrd tuleks seda edaspidi orgaanilise aine humifikatsiooni ja mineralisatsiooni juures arvestada.

Eelkäsitletu põhjal võime lämmastiku aktiivbilansist lähtuvat huumusseisundi muutust põllul kajastada järgmise algoritmiga:

$$H_r = \frac{H_v - H_m + H_{oh} * k_l * k_{mh}}{H_v} * 100$$

kus  $H_r$  – mulla huumusvaru muutus, %-des;  $H_v$  – mulla algne huumusvaru, Mg ha<sup>-1</sup>,  $H_m$  – mineraliseerunud huumus, Mg ha<sup>-1</sup>;  $H_{oh}$  – mulda viidud orgaanilise aine humifikatsiooni tulemusena tekkinud huumus, Mg ha<sup>-1</sup>;  $k_l$  – orgaanilise aine humifikatsiooni lõimisest tingitud paranduskoefitsient;  $k_{mh}$  – orgaanilise aine humifikatsiooni mullaharimisest tingitud paranduskoefitsient.

### 1.1 Mullaspetsiifiline huumusbilansi kalkulaator

Programm on loodud tabelarvutusprogrammi MS Excel tarkvara baasil, seda on võimalik kasutada ka vabavaralise Libre Office tabelarvutusprogrammiga. Kalkulaator on tasuta kasutamiseks ja levitamiseks.

Orgaanilise aine sisaldust mullas mõjutavad peamiselt ilmastik, maakasutus, taimeistik, mulla lõimis ja veerežiim. Kuna huumusbilans sõltub tootmistasemest, mullaviljakusest ja teistest omadustest, kasvatatavast kultuurist ja väetamisest, siis antud huumusbilansi kalkulaatoris lähtutakse kõigepealt konkreetse põllu mulla omadustest nagu lõimisest, huumuse- või orgaanilise süsiniku sisaldusest, huumuskihi tusedusest ja selle lasuvustihedusest. Kalkulaatorit saab hetkel kasutada ainult mineraalmuldadel huumusbilansi arvutamiseks enamlevinud põllukultuuride külvikorra jaoks.

Kalkulaatori tulem väljendatakse huumusbilansina: huumust (kg/ha aastas) ja huumusvaru muutusena (% algsest huumusvarust aastas). Kalkulaator võimaldab leida tulemit konkreetse kõlviku kui ka kogu külvikorra kohta.

Kalkulaatori tööväljade täitmiseks valitakse kasvatatav kultuur ja sisestatakse selle kasvupind. Kultuurid on jaotatud nelja gruppi:

1. Teraviljad.
2. Muud kultuurid.
3. Heintaimed
4. Haljasväetised.

Iga grupi juures saab veeru kultuurid valikmenüüst (klõpsates väljale ja noole alt) valida sobiva kultuuri.

Kultuurid ja nende viljelemise juures tehtavad agrotehnooloogiliste võtete valikuvõimalused on toodud tabelis 1.5.

Saak märgitakse tera- ja kaunviljadel 14%, rapsil 9%-lise niiskuse juures. Kartulil märgitakse mugulasaagikus. Maisil saagikust ei märgita. Heintaimedel on võimalus valida saak kas kuiva heinana (kuivaine 83%) või silona (kuivaine 33%). Põldheina juures märgitakse ka visuaalse hinnangu järgi liblikõieliste esinemise % osatähtsus (10–90%).

Allakülvide puhul tuleb teha kõigepealt valik kas biomass viiakse mulda või jääb edasi kasvama. Allakülvi saagitase määratakse visuaalse hinnanguna järgmise skaala järgi: väike, keskmine suur. Sarnaselt hinnatakse ka haljasväetiste saagikus skaalana: väike, keskmine suur.

Teraviljadel on valikuvõimalus, kas põhk eemaldatakse põllult või jääb see põllule.

Harimisviisidest saab valida kas künd või minimeeritud harimine (sh otsekülv).

Mineraalväetiste kasutamisel tuleb teha vastav valik ning sisestada summaarne lämmastiku sisend elemendina (N, kg/ha).

Kalkulaatorisse sisestatakse mulla andmed (valikmenüüst)

Tabel 1.5. Huumusbilansi kalkulaatori valikud, sisestavad väärtused.

Kultuuride grupp	Valikud, sisestatavad väärtused		Selgitus	
1. Teraviljad: oder, kaer, rukis, nisu	Saak	t/ha	Terasaak 14% niiskuse juures	
	Põhu koristamine	ei/jah	Põhu eemaldamisele valida „jah“, vastasel juhul „ei“	
	Allakülv	Küntakse: ei/jah	Saak: Väike Keskmine Suur	Visuaalse hinnangu alusel valige allakülvi ädala saagitase
	Harimisviis	Künd/minimeeritud harimine		Minimeeritud harimise valik ka otsekülvile
	Orgaaniline väetis Väetise liik sh vahekultuur	Kasutusnorm, t/ha või m <sup>3</sup> /ha	Orgaanilise väetise kuivaine %	Tahketel väetistel t/ha ja vedelväetistel m <sup>3</sup> /ha. Vahekultuuri puhul kasutusnormi ja kuivaine % ei märgita.

	Mineraalne N väetisega väetamine	Ei/jah	N, kg/ha	Summaarne mineraalväetiste lämmastiku sisend elemendina
<b>2. Muud kultuurid</b>	Valikud, sisestatavad väärtused			Selgitus
Hernes, uba	Saak	t/ha		Terasaak 14% niiskuse juures
	Põhu koristamine	ei/jah		Põhu eemaldamisel valida „jah“, vastasel juhul „ei“
	Harimisviis	Künd/minimeeritud harimine		Minimeeritud harimise valik ka otsekülville
	Orgaaniline väetis Väetise liik sh vahekultuur	Kasutusnorm, t/ha või m <sup>3</sup> /ha	Orgaanilise väetise kuivaine %	Tahketel väetistel t/ha ja vedelväetistel m <sup>3</sup> /ha. Vahekultuuri puhul kasutusnormi ja kuivaine % ei märgita.
Kartul	Mugulasaak	t/ha		
	Orgaaniline väetis Väetise liik, sh vahekultuur	Kasutusnorm, t/ha või m <sup>3</sup> /ha	Orgaanilise väetise kuivaine %	Tahketel väetistel t/ha ja vedelväetistel m <sup>3</sup> /ha. Vahekultuuri puhul kasutusnormi ja kuivaine % ei märgita.
	Mineraalne N väetisega väetamine	Ei/jah	N, kg/ha	Summaarne mineraalväetiste lämmastiku sisend elemendina
Raps	Saak	t/ha		Terasaak 9% niiskuse juures
	Põhu koristamine	ei/jah		Põhu eemaldamisel valida „jah“, vastasel juhul „ei“
	Harimisviis	Künd/minimeeritud harimine		Minimeeritud harimise valik ka otsekülville
	Orgaaniline väetis Väetise liik, sh vahekultuur	Kasutusnorm, t/ha või m <sup>3</sup> /ha	Orgaanilise väetise kuivaine %	Tahketel väetistel t/ha ja vedelväetistel m <sup>3</sup> /ha. Vahekultuuri puhul kasutusnormi ja

				kuivaine % ei märgita.
	Mineraalne N väetisega väetamine	Ei/jah	N, kg/ha	Summaarne mineraalväetiste lämmastiku sisend elemendina
Mais	Harimisviis	Künd/minimeeritud harimine		Minimeeritud harimise valik ka otsekülville
	Orgaaniline väetis Väetise liik, sh vahekultuur	Kasutusnorm, t/ha või m <sup>3</sup> /ha	Orgaanilise väetise kuivaine %	Tahketel väetistel t/ha ja vedelväetistel m <sup>3</sup> /ha. Vahekultuuri puhul kasutusnormi ja kuivaine % ei märgita.
<b>3. Heintaimed</b>	Valikud, sisestatavad väärtused			Selgitus
Põldhein, koristatakse ei künta  Põldhein, koristatakse ja küntakse	Saak	Hein/silo	t/ha	Saak kas kuiva heinana (KA 83%) või silona (KA 33%)
	Liblikõieliste %	10–90		Hinnangule liblikõieliste osatähtsus taimikus
	Orgaaniline väetis Väetise liik	Kasutusnorm, t/ha või m <sup>3</sup> /ha	Orgaanilise väetise kuivaine %	Tahketel väetistel t/ha ja vedelväetistel m <sup>3</sup> /ha
Punane ristik koristatakse, ei künta  Punane ristik koristatakse, küntakse	Saak	Hein/silo	t/ha	Saak kas kuiva heinana (KA 83%) või silona (KA 33%)
	Orgaaniline väetis Väetise liik	Kasutusnorm, t/ha või m <sup>3</sup> /ha	Orgaanilise väetise kuivaine %	Tahketel väetistel t/ha ja vedelväetistel m <sup>3</sup> /ha
Lutsern koristatakse, ei künta  Lutsern koristatakse, küntakse	Saak	Hein/silo	t/ha	Saak kas kuiva heinana (KA 83%) või silona (KA 33%)
	Orgaaniline väetis Väetise liik	Kasutusnorm, t/ha või m <sup>3</sup> /ha	Orgaanilise väetise kuivaine %	Tahketel väetistel t/ha ja vedelväetistel m <sup>3</sup> /ha
Timut koristatakse,	Saak	Hein/silo	t/ha	Saak kas kuiva

ei künta  Timut koristatakse, künd				heinana (KA 83%) või silona (KA 33%)
	Mineraalne N väetisega väetamine	Ei/jah	N, kg/ha	Summaarne mineraalväetiste lämmastiku sisend elemendina
	Orgaaniline väetis Väetise liik	Kasutusnorm, t/ha või m <sup>3</sup> /ha	Orgaanilise väetise kuivaine %	Tahketel väetistel t/ha ja vedelväetistel m <sup>3</sup> /ha
<b>4. Haljasväetised</b>	Valikud, sisestatavad väärtused			Selgitus
Ristik ja mesikas haljasväetiseks Lutsern haljasväetiseks	Saak	Väike Keskmine Suur		Visuaalse hinnangu alusel valige haljasväetise biomassi saagitase
	Harimisviis	Künd/minimeeri tud harimine		Minimeeritud harimise valik ka otsekülville

Väetamine orgaanilise väetisega:

<b>Orgaanilised väetised</b>		Kasutusnorm, t/ha või m <sup>3</sup> /ha	Orienteeruv kuivaine %
Ilma väetisteta			18–25
Värske sõnnik			20–30
Käärinud sõnni			4–8
Veise vedelsõnnik			4–8
Sea vedelsõnnik			30–45
Värske kompost			35–55
Valmis kompost			4–10
Vedel biogaasi digestaat			25–35
Tahke biogaasi digestaat			
Vahekultuur (valikuid ei sisestata)			

Sisestatavad mulla andmed

Mulla lõimimis	Märgitakse tabelisse mullakaardi andmete põhjal Liiv (l) Saviliiv (sl) Kerge liivsavi (ls1) Keskmine liivsavi (ls2) Raske liivsavi (ls3) Savi (s)
Koresesisalduse aste	Märgitakse tabelisse mullakaardi andmete põhjal r0 (valik kui ülemises kihis koresevaba muld), r1, r2, r3, r4, r5, r
Süsinikusisaldus, % või Huumusesisaldus, %	Märgitakse tabelisse eelnevalt teostatud mullaanalüüsi põhjal.



	Mullaanalüüside puudumisel võib kasutada ka mulla erimi keskmisi väärtusi
Huumusekihi tusedus, cm	Märgitakse tabelisse mullakaardi või välitöödel määramise põhjal
Lasuvustihedus	Arvutab kalkulaator eelnevalt sisestatud lähteandmetest ja kasutatakse huumusvaru leidmisel

Kalkulaatori tulemile antakse vastav hinnang (tabel 1.6)

Tabel 1.6. Huumuskalkulaatori tulemid

Algne huumusvaru, t/ha		
Huumusbilanss, kg/ha aastas	Põllupõhiselt ja külvikorra kohta kaalutud keskmisena	
Huumusvaru muutus, % algarvust aastas	Põllupõhiselt ja külvikorra kohta kaalutud keskmisena	
Hinnang huumusbilansi tulemusele		
Huumusbilanss (huumust kg/ha/aastas)	Hinnang	Selgitus
< -350	Väga madal	Negatiivne mõju mullaviljakusele ja saagikusele
-350 kuni - 130	Madal	Ebasoodne madala huumussisaldusega muldadel, lühiajaliselt aktsepteeritav suure huumusvaruga muldadel
-129 kuni + 170	Optimaalne	Optimaalne, tagab saagikindluse, sobiv erineva huumussisaldusega muldadele
+171 kuni +520	Kõrge	Sobib eeskätt madala huumussisaldusega muldadele
> +521	Väga kõrge	Suureneb lämmastiku leostumise oht

## 1.2 Huumusbilansi kalkulaatori testimine põldkatsetel

Huumusbilansi kalkulaatorit toimimist testiti käimasolevates põldkatsetes (IOSDV ja ETKI Kuusiku väetuskatsed).

Tulemused näitasid, et huumuskalkulaatori arvutusmudeli tulem ühtis samasuunaliselt antud katsealadel läbiviidud laboratoorsete uuringu tulemustega (tabel 1.7 ja 1.8).

Töögrupi poolt jätkatakse täiendava testimisega nii põldkatsete kui ka mullaseire ja tootmistingimuste andmetega.

Tabel 1.7. Huumusbilansi kalkulaatori testimine ETKI Kuusiku väetuskatsel.

Aasta	Kultuur	Saak t/ha	Põhk mulda	Allakülvi saak	H %	Lõimis	Künnikihi tusedus	Koresus	N, kg/ha	Orgaaniline väetis	t/ha	KA %	Algne huumusvaru, t/ha	Huumusbilanss, kg/ha aastas	Huumusvaru muutus, % algarvust aastas
1998	Kartul	34,8			3	ls1	30	r2	90	Värske sõnnik	60	19	109	-629	-0,58
1999	Oder	2,0	jah	keskmine	3	ls <sub>1</sub>	30	r2	40				109	130	0,12
2000	Ristik haljasväetiseks	keskmine			3	ls1	30	r2					109	2984	2,74
2001	Oder	3,99	jah		3	ls1	30	r2	80				109	-175	-0,16
2002	Kartul	56,88			3,1	ls1	30	r2	90	Värske sõnnik	60	19	112	-1837	-1,64
2003	Oder	3,46	jah	suur	3,1	ls1	30	r2	40				112	-9	-0,01
2004	Ristik haljasväetiseks	suur			3,1	ls1	30	r2					112	3438	3,06
2005	Oder	5,18	jah		3,1	ls1	30	r2	80				112	-422	-0,38
2006	Kartul	30,9			3,2	ls <sub>1</sub>	30	r2	90	Värske sõnnik	60	19	115	-485	-0,42
2007	Oder	2,0	jah	keskmine	3,2	ls1	30	r2	40				115	130	0,11
2008	Ristik haljasväetiseks	väike			3,2	ls1	30	r2					115	2556	2,22
2009	Oder	5,45	jah		3,2	ls <sub>1</sub>	30	r2	80				115	-484	-0,42
2010	Kartul	24,2			3,3	ls1	30	r2	90	Värske sõnnik	60	19	118	-159	-0,13
2011	Oder	3,47	jah	suur	3,3	ls1	30	r2	40				118	-25	-0,02
2012	Oder	4,03	jah		3,3	ls1	30	r2	80				118	-204	-0,17
2013	Ristik haljasväetiseks	suur			3,3	ls1	30	r2					118	3455	2,92
													<b>Kokku</b>	<b>Keskmine</b>	<b>Keskmine</b>
<b>Kalkulaatori hinnang huumusseisundi muutustele aastatel 1998–2014</b>													<b>8264</b>	<b>517</b>	<b>0,45</b>
<b>Huumusseisundi muutus laboratoorsete analüüside põhjal (Huumuse % 1998. aastal 3% 2014. aastal 3,3%)</b>													<b>9000</b>		

Tabel 1.8. Huumusbilansi kalkulaatori testimine ETKI Kuusiku väetuskatsel.

Aasta	Kultuur	Saak t/ha	Põhk mulda	Allakülvi saak	H %	Lõimis	Künnikihi tusedus	Koresus	N, kg/ha	Algne huumusvaru, t/ha	Huumusbilanss, kg/ha aastas	Huumusvaru muutus, % algarvust aastas
1998	Kartul	40,15			2,4	ls1	30	r2	180	90	-2054	-2,29
1999	Oder	2,0	jah	keskmine	2,4	ls1	30	r2	80	90	130	0,14
2000	Ristik haljasväetiseks	keskmine	3,3		2,3	ls1	30	r2		86	2922	3,38
2001	Oder	4,09	jah		2,4	ls1	30	r2	120	90	-100	-0,11
2002	Kartul	59,3			2,4	ls1	30	r2	180	90	-3074	-3,42
2003	Oder	3,38	jah	keskmine	2,5	ls1	30	r2	80	93	200	0,21
2004	Ristik haljasväetiseks	suur	4		2,4	ls1	30	r2		90	3376	3,76
2005	Oder	4,58	jah		2,5	ls1	30	r2	120	93	-120	-0,13
2006	Kartul	27,1			2,5	ls1	30	r2	180	93	-1393	-1,50
2007	Oder	2,0	jah	keskmine	2,5	ls1	30	r2	80	93	130	0,14
2008	Ristik haljasväetiseks	väike			2,5	ls1	30	r2		93	2496	2,68
2009	Oder	5,34	jah		2,5	ls1	30	r2	120	93	-274	-0,29
2010	Kartul	25,4			2,6	ls1	30	r2	180	96	-1336	-1,39
2011	Oder	3,5	jah	keskmine	2,6	ls1	30	r2	80	96	200	0,21
2012	Ristik haljasväetiseks	suur			2,6	ls1	30	r2		96	3394	3,52
2013	Oder	3,89	jah		2,6	ls1	30	r2	120	96	-100	-0,10
										Kokku	Keskmine	Keskmine
<b>Kalkulaatori hinnang huumusseisundi muutustele 1998–2014</b>										<b>4397</b>	<b>275</b>	<b>0,30</b>
<b>Huumusseisundi muutus laboratoorsete analüüside põhjal (Huumuse % 1998. aastal 2,4% 2014. aastal 2,6%)</b>										<b>6000</b>		

### 1.3 Täiendavad arendusettepanekud

Iga kaasaegne teabesüsteem, sh huumusbilansi kalkulaator, vajab järjepidevat arendamist nii sisu kui ka kasutajaliidese osas. Edasisteks arendustöödeks on väga vajalik kasutajate poolne tagasiside.

Hetkel on kalkulaator välja töötatud mineraamuldade jaoks. Kuna osade tootajate põllukülvikorras võib esineda teatud hulgal turvastunud ja turvasmuldi, siis on vajadus ka neid muldi arvestavate huumubilansi algoritmide koostamiseks. Hetkel on kalkulaator koostatud eeldusel, et niisked mineraalmullad on heas kuivendusseisundis, ent vajadus oleks huumuse kulu ja juurdeteket diferentseerida ka lähuvalt tegelikust kuivendusseisundist. Huumusbilansi arvutstulemused sõltuvad hetkel mulla lõimisest, ent täiendavalt on võimalik seda eristada mulla erimi (st mulla liigi ja lõimise kombinatsiooni) tasemel. Mulla erimi mõju täpsustamine mineralisatsiooni ja humifikatsiooni koefitsientidele, muudaks kalkulaatori senisest veelgi rohkem asukohapõhiselt toimivaks.

Eesti tingimustes on vaja mullaseire ja edasiste uuringute käigus selgitada, kuidas mõjutab minimeeritud mullaharimine või otsekülv muldade huumusseisundit ja kuivõrd tuleks seda edaspidi orgaanilise aine humifikatsiooni ja mineralisatsiooni juures lähuvalt konkreetse mulla eripäradest arvestada.

Liblikõielised on mullaviljakuse tagajatena külvikorra võtmekultuurid. Et hinnata biomassi kogusaaki ja N bilansi, on vaja teada liblikõieliste osakaalu taimikus. Võimalikult täpse tulemuse saamiseks piisa kui hinnata taimikut seemnesegu põhjal, vaid seda peab tegema saagikoristuse ajal. Järelikult on vaja oleks luua antud programmile abiliides (juhend) liblikõieliste osakaalu määramiseks eraldi nii külvikorras olevate liblikõielistele-kõrrelistele (nt allakülvid) kui ka püsirohumaadele. Liblikõieliste hindaja võiks koosneda erinevate liblikõieliste osakaaluga taimikute fotodest. Fotodega seotud info peab pärinema teadusuuringutest, kus on määratud taimiku tegelik kooslus ja leitud liblikõieliste poolt seotud N osakaal.

Uuringuandmete täiendamisel on otstarbekas diferentseerida ka haljasväetiste külviaasta ja saagiaasta mõju erinevused. Edaspidi on vajalik läbi viia täiendavad uuringud vahekultuuride ja nende segude kohta, et täiendada kalkulaatorit taimiku põhjal saadava info alusel. Praegu arvestab kalkulaator vahekultuure ühe fikseeritud keskmise suuruse alusel. Eristamine võib vajalikuks osutada ka talvituvate vahekultuuride kasutamisel.

Mitmete kultuuride (kaunviljad, raps, liblikõielised heintaimed) osas tuginevad projekti raames koostatud algoritmid veel väikesel valimil, seega on nende kohta vajalik täiendavate katseandmete kogumine ja seoste edasine täpsustamine.

Samuti on vaja täiendavaid uuringuid/andmeid maisi mõju kohta huumusbilansile (taimejäänuste mõju, N väetise mõju). Hetkel on maisi viljelemise mõju arvestatud fikseeritud väärtusena.

Edaspidi oleks vajalik kalkulaatorisse lisada mitmeid väiksema kasvupinnaga kultuure: tritikale, spelta nisu (eeskätt maheviljeluses), õlina, õlituder, tatar. Kasvupinna laienedes ka sojauba. Köögivilja liikide arvukus on küllalt suur ja osade mõju üsna sarnane, siis võiks need jaotada 3–4 gruppi.

Kindlasti on vajalik mustkesa valikuga kalkulaatori täiendamine. Mustkesa arvestamine fikseeritud väärtusena pole väga keerukas, ent täiendavat analüüsi vajab selle mõju seostamine mullaspetsiifiliseks.

Orgaanilistest väetiste osas tuleb valikut täiendada mõningate alternatiivsete väetistega nagu järvemuda ning sõnnikute osas eristada vastavalt looma liigiti ja allapanumaterjalist lähtuvalt.

Peale esmast testperioodi on asjakohane ettepanekute alusel kohandada kalkulaatori kasutajaliidest ning vajadusel tellida arendustööna veebipõhise kasutajakeskkonna programmeerimine.

## Kasutatud kirjandus

- Asmus, F., & Herrmann, V. 1977. Reproduktion der organischen Substanz des Bodens, Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR, Institut für Landwirtschaftliche Information u. Dokumentation, Fortschrittsberichte für die Landwirtschaft und Nahrungsgüterwirtschaft, Band 15, Heft 11, 1977.
- Bolinder, M.A., Angers, D.A., Dubuc, J.P. 1997. Estimating shoot to root ratios and annual carbon inputs in soils for cereal crops. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 63, 61–66.
- Bolinder, M.A., Janzen H.H., Gregorich, E.G., Angers, D.A., Van den Bygaart, A.J. 2007. An approach for estimating net primary productivity and annual carbon inputs to soil for common agricultural crops in Canada. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 118, 29–42.
- Bolinder, M.A., Kätterer, T., Andrén, O., Ericson, L., Parent, L-E., Kirchmann, H. 2010. Long-term soil organic carbon and nitrogen dynamics in forage-based crop rotations in Northern Sweden (63–64°N) *Agriculture, Ecosystems and Environment* 138, 335–342.
- Braun, M. Schmid, H. Grundler, T. 2009. Vergleich verschiedener Kleegrasmischungen im ökologischen Landbau anhand der Wurzel- und Sprossleistung. n: Wiesinger, Klaus and Cais, Kathrin (Eds.) *Angewandte Forschung und Beratung für den ökologischen Landbau in Bayern; Öko-Landbau-Tag 2009*, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Freising-Weißenstephan, Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), no. 7/2009, pp. 35–42.
- Brock, C., Hoyer, U., Leithold, G., Hülsbergen, K-J. 2008. Entwicklung einer praxisanwendbaren Methode der Humusbilanzierung im ökologischen Landbau. (PDF)
- Buyanovsky, G.A., Wagner, G.H., 1986. Post-harvest residue input to cropland. *Plant Soil*. 93, 57–65.
- Engels, C., Reinhold, J., Ebertseder, T., Heyn, J. 2010. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben „Humusbilanzierung landwirtschaftlicher Böden – Einflussfaktoren und deren Auswirkungen“ 2010. 355 S.
- Gan, Y.T., Campbell, C.A., Janzen, H.H., Lemke R.L., Basnyat P., McDonald C.L. 2009. Carbon input to soil from oilseed and pulse crops on the Canadian prairies. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 132, 290–297.
- Hoyer, U., 2009. Ermittlung der Humusersatzleistung von Kulturpflanzen anhand eines C-Algorithmus. In: Giessener Schriften zum Ökologischen Landbau Band 1 Entwicklung einer praxisanwendbaren Methode der Humusbilanzierung im ökologischen Landbau. Hrsg: C Brock, U Hoyer, G Leithold, K-J Hülsbergen; S. 112–130.
- Jefferies, R.A. 1993. Cultivar responses to water stress in potato: effects of shoot and roots. *New Phytol.*, 123, 491–98.
- Klimanek, E-M. 1997. Bedeutung der Ernte- und Wurzelrückstände landwirtschaftlich genutzter Pflanzenarten für die organische Substanz des Bodens. *Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde* 41, 485–511.
- Kolbe, H. 2008. Einfache Verfahren zur Berechnung der Humusbilanz für konventionelle und ökologische Anbaubedingungen. <http://orgprints.org/13626/>
- Kolbe, H. 2012. Bilanzierungsmethoden und Versorgungsniveau für Humus. *Schriftenreihe*, Heft 19/2012. 103 S.

- Krawutschke, M. 2007. Einfluss differenzierter Bodenbearbeitung auf Gehalt und Dynamik der organischen Bodensubstanz in Ackerböden sowie deren Bedeutung für die Humusbilanzierung. Masterarbeit (PDF).
- Krawutschke, M., Brock, C., Leithold, G. 2009. Humusmenge in der Ackerkrume nach langjährig differenzierter Intensität der Grundbodenbearbeitung. Beiträge zur 10. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, 45–48. (PDF)
- Kuzyakov, Y., Schneckenberger, K. 2004. Review of estimation of plant rhizodeposition and their contribution to soil organic matter formation. Arch. Agron. Soil Sci. 50, 115–132.
- Kätterer, T., Hansson, A.-C. & Andrén, O. 1993. Wheat root biomass and nitrogen dynamics - effects of daily irrigation and fertilization. Plant and Soil 151:21–30.
- Lauringson, E., Talgre, L., Roostalu, H. Makke, A. 2011. Mulla humusseisundi ja toitainete bilansi reguleerimise võimaluste ning haljasväetiskultuuride fütoproduktiivsuse selgitamine tava- ja maheviljeluse tingimustes. Rakendusuuringu lõpparuanne. [www.pikk.ee/upload/files/Teadusinfo/Lauringson\\_PMaruanne.pdf](http://www.pikk.ee/upload/files/Teadusinfo/Lauringson_PMaruanne.pdf)
- Leithold, G., Hülsbergen, K.-J., Michel, D. & Schönmeier, H. 1997. Humusbilanz – Methoden und Anwendung als Agrar-Umwelt-Indikator. In: Initiativen zum Umweltschutz, Bd. 5, 43–54, Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück, Zeller-Verlag, 1997
- Pietola, L., Alakukku, L. 2005. Root growth dynamics and biomass input by Nordic annual field crops. Agriculture, Ecosystems and Environment 108 135–144.
- Talgre, L., Lauringson, E., Makke, A., Lauk, R. 2011. Biomass production and nitrogen binding of catch crop. Žemdirbystė=Agriculture, Vol. 98(No. 3), 251–258.
- Talgre, L., Lauringson, E., Roostalu, H., Astover, A., Eremeev, V., Selge, A. 2009. The effects of pure and undersowing green manures on yields of succeeding spring cereals. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science, 59(1), 70–76.

## 2. Mulla orgaanilise süsiniku dünaamika stimulatsioonimudelid

### 2.1. Ülevaade

Mulla süsinikuvaru, varude hindamine

Süsinikuvaru (C-varu) suur ruumiline varieeruvus ning suhteliselt aeglane muutumine muudavad varu hindamised otseste mõõtmisega võrdlemisi keerukaks (Conen et al., 2004). Kõige mugavam oleks C-varu hindamist teostada korduvate proovide võtmisega, kuid see on väga tömahukas, aeganõudev ning kulukas protsess. Lisaks on mõnede muutumistulemuste ülekandmine suuremale skaalale kaheldava usaldusväärsusega (Palusuo, 2008). Nende raskuste ületamiseks on loodud erinevaid simulatsioonimudeleid hindamaks C-varu sisaldust ja muutusi muutuvates kliimatingimustes.

Mulla biokeemiliste protsesside uurimist ja modelleerimist on kajastatud alates 1940datest aastatest, kui loodi kaks (üks Prantsusmaal - 1945, teine USA-s - 1949) lihtsat C-varu simulatsiooni mudelit, mis põhinesid esimese astme kineetika võrrandil. Esimese astme kineetika võrrand kirjeldab C-varu muutumist ajas:

$$C_t = C_0 \cdot e^{-kt}$$

kus  $C_t$  on C-varu ajahetkel  $t$ ,  $C_0$  on algne OS varu. Antud võrrandi abil on võimalik C-varu hinnata mistahes ajahetkel. Tavaliselt ei esine looduses sellist situatsiooni, et orgaanilise aine (OA) sisend mulda puudub täielikult, seetõttu tuleb C-varu dünaamika ennustamisel arvestada ka mulda lisanduva OA kogust ja seda väljendatakse Henin-Dupuis valemiga (Henin & Dupuis, 1945):

$$C_t = C_0 e^{-kt} + \frac{hA}{k} (1 - e^{-kt})$$

kus  $C_t$  on C-varu ajahetkel  $t$ ;  $C_0$  on algne C-varu;

$e$  – naturaallõgaritm;

$k$  on orgaanilise aine lagunemiskonstant, mis kirjeldab orgaanilise aine kadu mineralisatsiooni või erosiooni tõttu aasta jooksul;

$h$  on aasta jooksul muldamineva orgaanilise aine humifikatsioonikoefitsient;

$A$  on aastane C sisend mulda tonnides.

Mitmed C-varu dünaamikat uurivad mudelid loodi 1970–1980 aastatel (Jenkinson and Rayner, 1977; Parton et al., 1983). Tänapäevaks on neid mudeleid pidevalt arendatud ning



lisandunud on mitmeid uusi (Jenkinson, 1990; McGrill, 1996; Paustian, 1994). Kuigi mudelid võivad olla ülesehituselt väga erinevad, ühendab neid see, et nad põhinevad jätkuvalt esimese astme kineetikal (Bolinder et al., 2007). Olenevalt uuritud bioloogiliste protsesside olemusest ja keerukusest, võivad mudelid teineteisest erineda suurel määral. Võimalik on eristada umbes 250 erineva keerukuse ja matemaatilistele kirjeldustele vastavat mudelit (Batlle-Aguilar et al., 2011)

Algselt loodud mudelite eesmärk oli anda ülevaatlik kirjeldus mullas toimuvatest protsessidest. Suurem osa tänapäeval kasutuses olevatest mudelitest on tihti algsete mudelite edasiarendused, mis on kohandatud vastamaks spetsiifilistele vajadustele. Modelleerimise eesmärkide hulka kuuluvad näiteks:

- hinnata ja ennustada inimtegevuse mõju kliimale;
- hinnata kliimamuutuse mõju mulla toiteainete sisaldusele;
- ennustada maakasutuse võimaliku mõju mulla süsinikuringetele (C-ringetele);
- prognoosida seoseid mullaviljakuse, saagikuse ja kasvukeskkonna omaduste muutumise vahel.

#### Mulla orgaanilise süsiniku dünaamika simulatsiooni mudelid

Kasutusel olevad mulla orgaanilise C-varu määramiseks välja töötatud mudeleid erinevad üksteisest peamiselt simulatsiooniks vajaminevate sisendite poolest, kuid kõik tuginevad jätkuvalt Henin-Dupuis valemile. Väga laialdaselt kasutatakse järgmisi mudeleid:

- RothC
- CENTURY
- ICMB

Valitud mudelid on protsessipõhised, kasutades ajasammuna nädala kuni aasta pikkust perioodi. Mudelid jaotavad mulla OA fraktsioonideks, vastavalt toimuvatele protsessidele ja lagunemiskiirusele. Peamisteks olulisteks kalibreerimisparameetriteks on keskmine õhutemperatuur ja sademete kogus teatud perioodi jooksul (kuu, nädal, päev), mulla savisisaldus, OA fraktsioneerimine ja vastavalt fraktsioonile korrektselt määratud lagunemiskonstandid. Ülevaade erinevate mudelite vajaminevatest sisenditest on toodud tabelis 2.1.

Smith jt. (1997) testisid üheksat mudelit seitsmel erineval parasvöötmes asuval katsealal. Kuus mudelit (ka käesolevas töös uuritud RothC, CENTURY, DAISY) näitasid oluliselt täpsemaid tulemusi, kui ülejäänud kolm (SOMM, ITE, Verbane). Suurimaks erinevuseks mudelite vahel on sisendite kalibreerimise võimalus, vastavalt uuritavale katsealale. Mudelid toimivad paremini, kui uuritava maa-ala tingimused sarnanevad mudeli

väljatöötamiseks kasutatud parameetritega (Smith et al., 1997). RothC ja CENTURY mudelid suutsid näidata häid tulemusi kõikide maakasutuse ja erinevate maaharimisvõtetega katsealadel (Bortolon et al., 2011).

Tabel 2.1. Mudelite sisendid

Mudel	Aja-samm	Ilmastikuandmed	Mullaandmed	Majandamine
RothC	Kuu	Sademete kogus (mm); evaporatsioon (mm); keskmine õhutemperatuur (°C)	Savisisaldus (%); mullakihi sügavus (cm)	Mulda mineva orgaanilise aine hinnanguline lagunemine; taimestikuga katvus; taimejäätmete kogus, t ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> ; sõnniku kogus, t ha <sup>-1</sup>
CENTURY	Kuu	Sademete kogus (mm); keskmine ja min õhutemperatuur (°C)	lõimis; mullakihi sügavus (cm); lasuvustihedus; algsed C-, N-, P- ja S-varud (g m <sup>-2</sup> )	Taimejäätmete ligniini sisaldus (mg g <sup>-1</sup> ); N sisendid (g m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup> ) (ka atmosfäärist ladestunud); erinevate C fraktsioonide lagunemiskonstandid (a <sup>-1</sup> )
ICMB	Aasta	Keskmine temperatuur (°C); sademete kogus (mm); evaporatsioon (mm)	Algne C-varu (t ha <sup>-1</sup> )	Taimejäätmete kogus, t ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> ; humifikatsioonikoefitsent; lagunemiskonstandid (a <sup>-1</sup> )

Mudeli valikul tuleb silmas pidada, millised sisendid on kättesaadavad (tabel 1); kas mudeli väljundid vastavad soovitud; mudel peab olema sobiv antud mulla ja kliima tingimustele – kui ette antud standardparameetrid ei sobi, siis võimalusel valida selline mudel, mida saab antud tingimustele parametrizeerida. Vastasel juhul simuleeritud ja reaalsetes tingimustes saadud tulemused ei ole võrreldavad ja lõpptulemusena antud mudel ei sobi ennustamiseks. Üldiselt on soovitatud, et C-varu muutuste hindamiseks kasutatava mudeli valimisel peaks kõigepealt alustama mudelitest RothC ja CENTURY, kuid kõige lihtsamini oli antud projekti raames kättesaadav ja rakendatav mudel ICBM, mistõttu hilisemad arvutused tehti mudeliga ICBM. Seda soodustas veel asjaolu, et mudel ICBM on väljatöötatud Eestile sarnastes tingimustes.

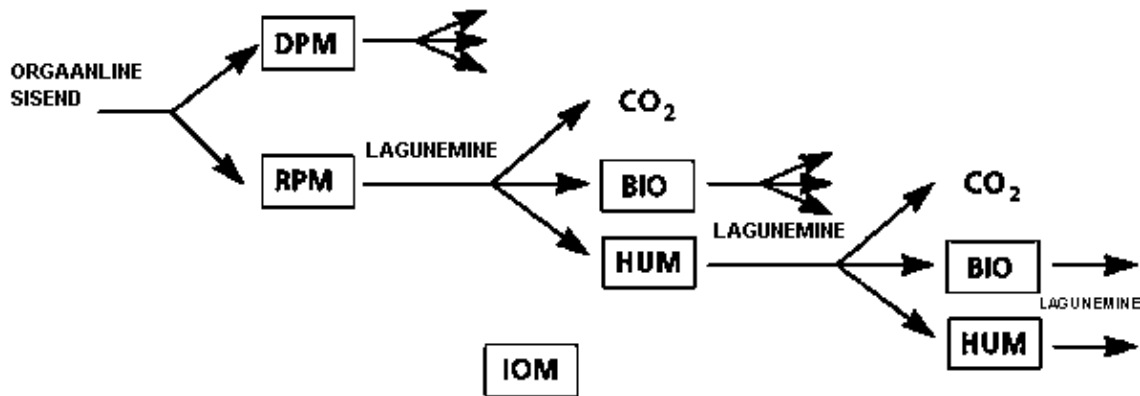
## RothC

Algselt loodi mudel RothC Rothamstedi pikaajalise põldkatse C-ringluse modelleerimiseks. Aastatel 1843–1856 panid Sir John Lawes ja Sir Henry Gilbert aluse mitmetele pikaajalistele põldkatsetele Rothamstedi katsejaamas. Kuigi osad katsetest katkestati taimehaiguste leviku või kehvide mullatingimuste tõttu, on tegemist kõige

vanemate käimasolevate katsetega maailmas. Tänu Sir Lawesi, Sir Gilberti ja järeltulevate põlvede teadlaste kogutud andmetele, on olemas märkimisväärne andmestik, mis kajastab C-varu muutusi mullas viimase 170 aasta jooksul. Hiljem arendati mudelit, et seda saaks kasutada ka erinevatel muldadel erinevates ilmastikutingimustes ning ka rohumaadel ja puistutel (Coleman & Jenkinson, 1999).

RothC modelleerib C-ringlust gleistumistunnusteta mullas, võttes arvesse erinevaid mullatüüpe, -temperatuuri, -niiskuse sisaldust ning kasvava taimestiku omadusi. Kasutades igakuist intervalli, on võimalik arvutada C-varu ( $t\ ha^{-1}$ ), mikroobse biomassi C kogus ( $t\ ha^{-1}$ ) ja leida mullas oleva C vanus  $\Delta^{14}C$  kaudu aastast kuni sajandite pikkusel ajaskaalal (Coleman & Jenkinson, 1999).

Mudel jagab mulla OA neljaks aktiivseks osaks ning üheks püsivaks (inertseks) osaks (joonis 2.1).



Joonis 2.1. Mulla orgaanilise aine jagunemine vastavalt RothC mudelile (Coleman & Jenkinson, 1999).

Antud mudeli OA aktiivsed fraktsioonid on: lagunev taimne materjal (DPM), vastupidav ning püsiv taimne materjal (RPM), mikroobne biomass (BIO) ning humifitseerunud OA (HUM). Antud mudelis on püsiv OA (IOM) defineeritud, kui OA fraktsioon, mis on inertne ning ekvivalentne üle 50 000 aasta radioaktiivse C vanusega. IOM-i fraktsiooni sisaldus arvutatakse vastavalt Fallooni valemile (Falloon et al., 1998):

$$IOM = 0.049 \times C^{1,139}$$

kus: C on mulla C-varu,  $t\ ha^{-1}$ , IOM - püsiv OA,  $t\ ha^{-1}$ .

Taimses materjalis olev C on jaotatud laguneva ja püsiva taimse materjali vahel, vastavalt antud fraktsioonide omavahelisele suhtele. Need komponendid lagunevad erinevatel kiirustel ning lagunemisprotsessi lõpp-produktideks on  $CO_2$  ning BIO+HUM.

Mulla savisisaldus on samuti üks sisendi parameetritest ning seda kasutatakse taimedele kättesaadava vee arvutamiseks. Savisisaldus mõjutab ka mulla OA lagunemist ning määrab moodustunud CO<sub>2</sub> ja BIO+HUM vahekorra.

Mudeli sisendid:

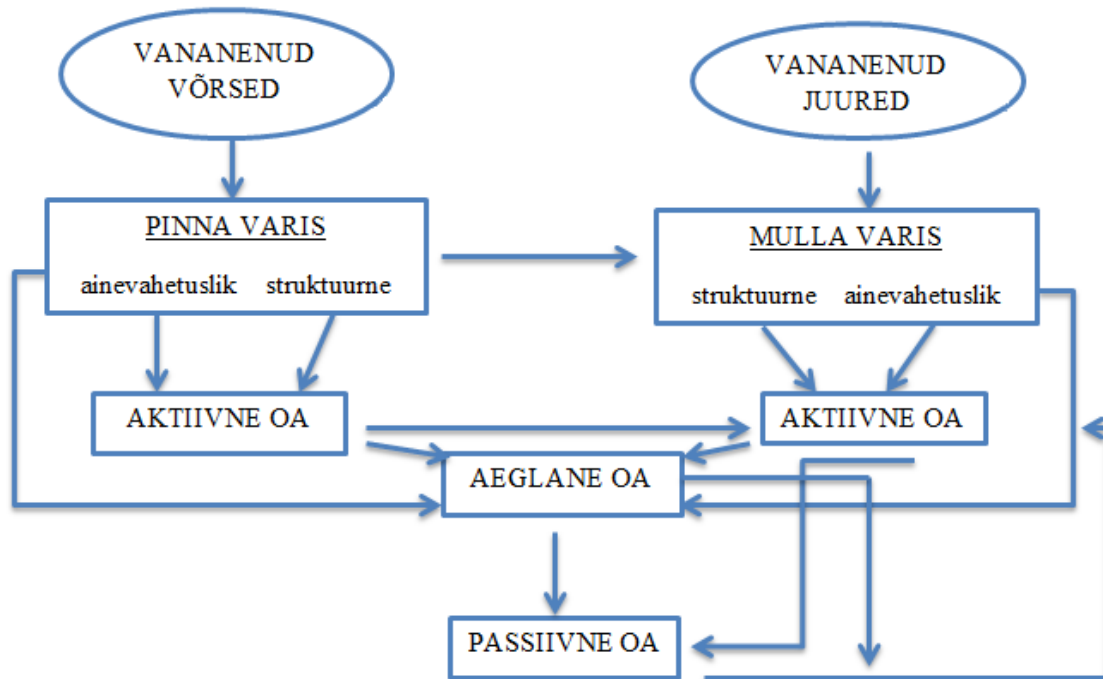
- Kliima andmed: igakuine sademete hulk (mm), igakuine aurustumine (mm), igakuine keskmine õhutemperatuur (°C);
- Mulla andmed: savisisaldus (%), püsiva OA (IOM) sisaldus, algne C-varu (t ha<sup>-1</sup>), uuritava mullakihi tüsedus (cm);
- Maakasutuse andmed: taimestik, igakuine mulda lisanduva OA (taimejäätmete) kogus (t ha<sup>-1</sup>), igakuine lisanduva sõnniku (FYM) kogus (t ha<sup>-1</sup>), lisanduva taimse materjali DPM/RPM suhe.

## CENTURY

Mudel CENTURY arendati algselt välja rohumaa mudade jaoks (Parton et al., 1987), kuid viimasel ajal kasutatakse seda ka põllu- (e.g. Falloon & Smith 2002) and metsamuldade (e.g. Kirschbaum & Paul 2002) C, N, P ja S ringluse modelleerimiseks muld-taim süsteemis (Parton et al., 1992). Lisaks arvutab mudel välja võimaliku produktiivsuse ja veetasakaalu mullas. Mudel vajab väga detailseid igakuiseid sisendandmeid ja koosneb mitmetest suurematest alam-mudelitest: OA/lagunemise alam-mudel, veevaru alam-mudel, taimede produktiivsuse alam-mudel (Di Tizio & Grego, 2008).

Orgaanilise aine alam-mudel jaotab OA kolmeks fraktsiooniks: aktiivseks, aeglaseks ja passiivseks (joonis 2.2).

Aktiivne fraktsioon (*active pool*) koosneb mulla mikroobidest ja mikroobsetest saadustest ning selle ringlus võib kesta kuudest mõne aastani, olenevalt keskkonnast ja mulla savisisaldusest. Aeglane fraktsioon (*slow pool*) koosneb püsivast taimsest materjalist ja stabiliseerunud mikroobsetest saadustest, mis on pärit algselt aktiivsest osast. Ringluse ajaskaala on 20-50 aastat. Passiivne fraktsioon (*passive pool*) koosneb stabiilsest OA, mis on lagunemisele väga vastupidav. Ringluse aeg umbes 400–2000 aastat. Passiivsesse ossa (aktiivsest ja aeglasest jaotusest) lisanduvate laguproduktide osakaal tõuseb mulla savisisalduse suurenemisega (Di Tizio & Grego, 2008).



Joonis 2.2. Orgaanilise aine jagunemine vastaval mudelile CENTURY (Di Tizio ja Grego, 2008).

Mudeli sisendid:

- iga fraktsiooni maksimaalsed lagunemismäärad, mida kirjeldavad lagunemiskonstandid. Tegelikud/reaalsed lagunemiskonstandid sõltuvad mulla lõimisest, keskkonna õhutemperatuurist ja niiskuse sisaldusest;
- mulla koostis (liiva-, liivsavi- ja savisisaldus), lasuvustihedus, mullakihi tusedus, OS ja lämmastiku sisaldus;
- kliimaatilised andmed: igakuine keskmine minimaalne ja maksimaalne temperatuur, igakuine sademete kogus;
- mullakihiks on alati arvestatud 20 cm tusedune kiht, sügavamate kihtide dünaamikat mudel arvesse ei võta.

## ICBM

Sarnaselt eelnevatele mudelitele, on ka mudel ICBM (Introductory Carbon Balance Model) arendatud kasutades pikaajalise katse andmeid (Hyvönen et al., 1996; Parton et al., 1983; Paustian et al., 1992; Persson & Kirchmann, 1994). Mudeli loomisel kasutati 35. aastase põldkatse (Uppsala, Rootsi) andmeid (Andren & Kätterer, 1997).

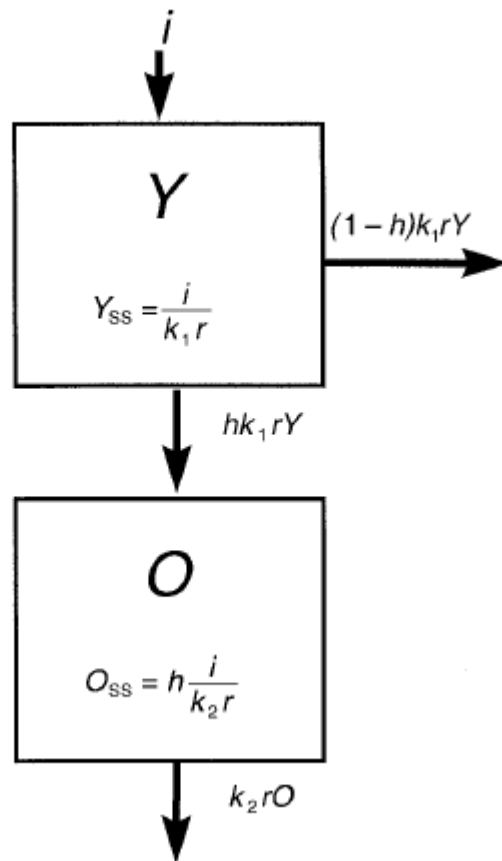
ICBM mudeli kaudu on võimalik vastata järgmistele küsimustele:

- Kas antud viljelussüsteemis toimub C-varu vähenemine või suurenemine?
- Mis juhtub mulla C-varu sisaldusega, kui õhutemperatuur tõuseb 5 kraadi?
- Kui palju OA sisaldus mullas suureneb, kui suureneb mulda mineva OA kogus?

- Miks on C sisaldus mõningates regioonides madalam võrreldes teiste regioonidega?

ICBM mudel jagab mulla OA kahte fraktsiooni: Noor (Y) ja vana (O) (joonis 2.3). Y sisendid on taimejäätmel ja surnud juured, O koosneb peamiselt Y laguproduktidest. Süsiniku fraktsioonid lagunevad vastavalt esimese astme kineetika võrrandile, omades lagunemiskonstante  $k_Y$  ja  $k_O$ .

Mudeli sisenditeks on ilmastikuandmed (päevane keskmine õhutemperatuur, sademete kogu ja aurumine) ja aastane OA sisendi suurus (Andren & Kätterer, 1997). Ilmastiku, mulla ja rakendatud harimisvõtete andmed on koondatud ühe näitaja  $r_e$  alla, mis mõjutab fraktsioone Y ja O lagunemist võrdselt. Näitaja  $r_e$  ei mõjuta humifikatsioonikoefitsienti  $h$ , mis kirjeldab seda osa Y-fraktsioonist, mis läheb O-fraktsiooni koostisse ja  $(1-h)$  on see osa, mis eraldub Y-fraktsioonist CO<sub>2</sub>-na. Mulla saviosakeste sisaldus mõjutab  $h$  väärtust.



Joonis 2.3. ICBM mudeli struktuur (Andren & Kätterer, 1997)

Mudel on kergesti parametrizeeritav ehk siis rakendatav ka teistes regioonides (Andren & Kätterer, 1997). Antud mudeliga simuleeritud tulemused ühtivad hästi reaalsete tulemustega, mis on saadud rakendades mudelit Rootsi ja Euroopa põldkatsetel/põllumuldadel (Karlsson et al., 2003), Lääne- ja Ida- Kanada

põllumajanduslikel aladel (Bolinder et al., 2006; Bolinder et al., 2007; Campbell et al., 2007), Norra haritavaal maal (Kynding Borgen et al., 2012) ja ka Sahaara (Aafrika) tingimustes (Andren et al., 2007).

## Töö eesmärk

Hinnata põllumajanduslikus kasutuses olevate muldade C-varu ajalist muutust erineva põllumajandusliku maakasutuse korral (põllumaa ja pikaajaline kultuurrohumaa). Testida Henin-Dupuis valemit Eesti põllumajanduslikus kasutuses olevate muldade C-varu ennustamisel ja ICMB mudelit erinevate külvikordade ja viljelusviisidega põllumuldadel.

## 2.2. Töö metoodika

Eesti põllumajanduslikus kasutuses olevate põllumuldade ja püsirohumaade C-varu ja selle ajalise muutuse hindamiseks kasutati Põllumajandusuuringute Keskuse (PMK) poolt perioodil 2002–2014 jooksul loodud põllumuldade agrokeemiliste omaduste andmebaasi, mida antud uuringu käigus täiendati vajalike kordusmõõtmistega. PMK on kogunud mullaomaduste iseloomustamiseks mullaproove alates 2002. aastast. C-varu muutuse hindamiseks kasutati samast asukohast erineval ajal kogutud mullaproovide OS sisalduse andmeid, mille omavahelisel võrdlemisel saadi kahe proovikogumise perioodi vahelisel ajal toimunud OS sisalduse muutused.

Kokku valiti uuringu käigus edasiseks C-varu muutuse analüüsiks 4779 (4111 põllumaa + 668 rohumaa) proovikohta üle Eesti. Sõltuvalt niiskusrežiimist on muldade OS sisaldused erinevad ja seetõttu jaotati nii põllu-, kui rohumaamullad 3 gruppi vastavalt mulla niiskusrežiimile: parasniisked mullad (kõik automorfsed normaalse arenguga parasniisked ja põuakartlikud mullad), märjad mullad (gleistunud- ja gleimullad) ja soomullad (turbahorisondiga mullad).

Mullaproovid koguti 0–15(20) cm mullakihist käsimullapuuriga koondproovi meetodil, kus üks proov iseloomustas 1–5 ha põllumulda sõltuvalt mullastiku kirjususest, seetõttu oli võimalik C-varu välja arvutada 20 cm pindmise mullakihi kohta. Süsinikuvahu arvutati välja 0–30 cm mullakihi kohta arvestades, et 20–30 cm sügavune mullakiht sisaldab 85% 0–20 cm mullakihi süsinikust.

Muldade C-varu arvutamisel kasutati valemit:

$$C\text{-varu (t ha}^{-1}\text{)} = BD \times OS \times D / 10 \quad (1)$$

kus BD on mulla lasuvustihedus ( $\text{g cm}^{-3}$ ), OS on orgaanilise süsiniku sisaldus ( $\text{mg g}^{-1}$ ), D on mullakihi tüsedus (cm).

Andmebaas lasuvustiheduse andmeid ei sisaldanud. Lasuvustihedus arvutati välja kasutades Post-Kwon valemit (Post & Kwon, 2000):

$$BD = 100 / \{ (OA/10/0.244) + [(100 - (OA/10)) / 1.64] \}$$

(2)

kus OA on orgaanilise aine sisaldus mullas ( $\text{mg g}^{-1}$ ), 0.244 on orgaanilise aine lasuvustihedus, 1.64 on mulla mineraalse osa lasuvustihedus.

Arvutustel eeldame, et OA sisaldab 58% OS (Mann, 1986).

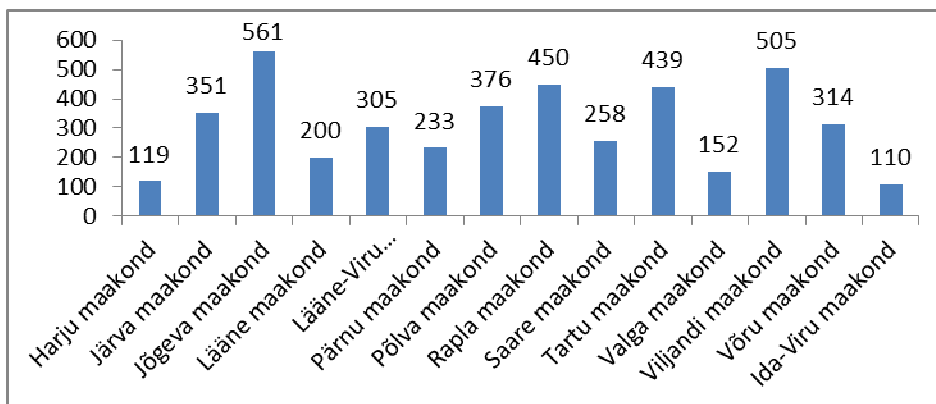
Mulla C-varu arvutamisel lahutati mullamassist korese ja kivide mass (Eesti keskmisena 5,5% mullamassist).

Henin-Dupuis valemit kasutati C-varu prognoosimisel seiremuldadel. Mudelit ICBM kasutati erinevate külvikordadega ja viljelusviisidega katsepõldudel, kus oli võimalik välja arvutada aastane OA sisend mulda, mis on oluline parameeter mudeli ICBM rakendamisel C-varu prognoosimiseks.

## 2.3. Tulemused

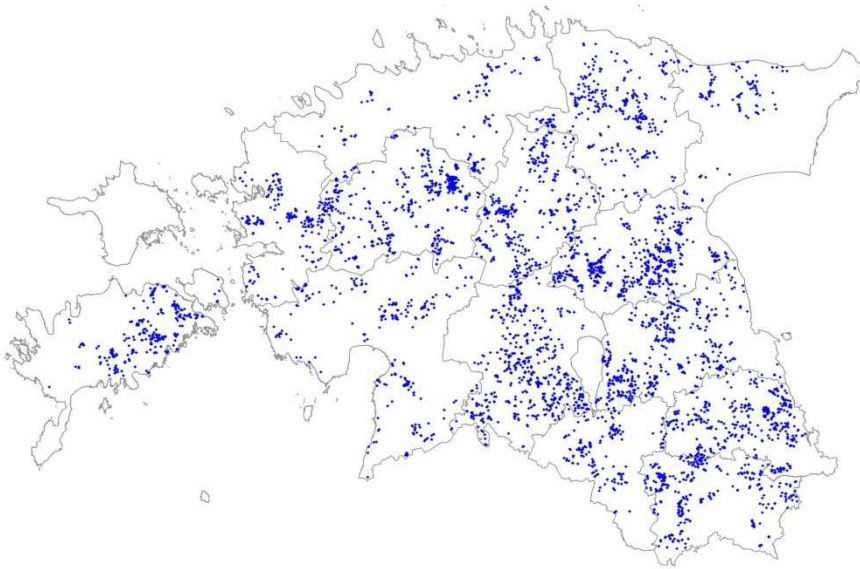
### Eesti põllumuldade seireandmed

Proovikohtade hajuvus maakondade lõikes on esitatud joonistel 2.4 ja 2.5. Jooniselt 2.4 selgub, et kõige enam oli proovikohti Jõgeva ja Viljandi maakonnas, kõige vähem Hiiu (puudusid) ja Ida-Viru maakonnas. Proovikohtade valikul lähtuti nii mullastikulisest aspektist kui ka põllumajandusmaa paiknemisest maakondades.



Joonis 2.4. Proovikohtade arv maakondade lõikes.





Joonis 2.5. Proovikohtade paiknemine

### **Põllumullad**

Põllumuldade andmebaas (N=4111) sisaldab andmeid mulla C-varude kohta, mis on määratud kahel erineval aastal, perioodi pikkus varieerus 1–8 aastat. Kõige rohkem oli C-varu andmeid viieaastase perioodi kohta (N=2076), kõige vähem 8 aasta (N=7) ja 1 aasta (N=53) kohta (tabel 2.2).

Tabel 2.2. Põllumullade C-varu dünaamika sõltuvalt perioodi pikkusest

Perioodi pikkus aastates	N	C-varu, t ha <sup>-1</sup>		C-varu muutus aastas, t ha <sup>-1</sup>
		Enne	Pärast	
1	53	109,3	109,0	-0,3
2	203	89,4	93,0	1,8
3	408	107,3	95,7* <sup>1</sup>	-3,8
4	697	106,5	93,0*	-3,4
5	2076	110,5	100,9*	-1,9
6	564	99,7	92,2*	-1,2
7	103	119,2	107,1*	-1,7
8	7	124,1	122,9	-0,2

<sup>1</sup> tärn osutab usutavale mulla C-varu muutusele antud perioodi jooksul.

Kõige suurema andmevalimiga oli 5 aastane periood (N=2076), seega edaspidine andmetöötlus hõlmas ainult neid andmeid. Mulla C-varu 5 aasta jooksul vähenes (tabel 2). Keskmise mulla C-varu oli algselt 111 t C ha<sup>-1</sup> ja hiljem 101 t C ha<sup>-1</sup>, mis tähendab, et mulla C-varu muutus aastas oli -1,9 t ha<sup>-1</sup>. Antud andmebaasis (N=2076) moodustasid 82

% parasniisked põllumullad (tabel 2.3). Märgade ja soiste põllumuldade osakaalud olid väiksemad, vastavalt 17% ja 1%.

Tabel 2.3. Põllumuldade C-varu muutused 5 aasta jooksul sõltuvalt muldade niiskusrežiimist

Niiskusrežiim	N	C-varu, t ha <sup>-1</sup>		C-varu muutus aastas, t ha <sup>-1</sup>
		Enne	Pärast	
Parasniiske	1696	92,1	84,0* <sup>1</sup>	-1,6
Märg	350	158,5	142,3*	-3,2
Soo	30	593,1	568,6	-5,1

<sup>1</sup> tärn osutab usutavale mulla C-varu muutusele antud perioodi jooksul.

Kõige suuremad mulla C-varud olid soistes muldades ja nendes muldades oli ka kõige suuremad C-varumuutused (-5,1 t ha<sup>-1</sup> aastas), kuigi need muutused ei olnud suure varieeruvuse tõttu statistiliselt usutavad (tabel 2.3). Parasniisketes ja märgades muldades C-varud vähenesid -1,6 ja -3,2 t ha<sup>-1</sup> aastas, vastavalt.

Põllumuldade C-varu muutused olid väiksemad savi- ja saviliivmuldades (tabel 2.4).

Tabel 2.4. Põllumuldade C-varu muutused 5 aasta jooksul sõltuvalt muldade lõimisest

Lõimis	N	C-varu, t ha <sup>-1</sup>		C-varu muutus aastas, t ha <sup>-1</sup>
		Enne	Pärast	
Liiv	789	122,8	105,0* <sup>1</sup>	-3,6
Liivsavi	1021	109,9	100,1*	-2,0
Lõimis määramata	14	132,0	110,4*	-4,3
Peenliiv	57	169,6	125,2*	-8,9
Savi	30	128,0	125,8*	-0,5
Saviliiv	149	87,9	80,8*	-1,4
Turvas	16	593,1	567,6*	-5,1

<sup>1</sup> tärn osutab usutavale mulla C-varu muutusele antud perioodi jooksul.

Huvitav on jälgida ka OS varu muutust sõltuvalt geograafilisest paiknemisest ja selgub (tabel 2.5), et suurimad emissioonid on Pärnu ja Harju maakonnas ning väiksemad Lõuna-Eesti maakondades. Selle põhjuseks on kindlasti Pärnu ja Harju maakonnas paiknevad rohked liigniisked haritavad mullad ning Lõuna-Eesti muldade üldiselt madalam OS sisaldus, mille tagajärjel on väiksem ka süsiniku emissioon.

Tabel 2.5. Põllumullade OS varu muutused viie aasta jooksul maakonniti

Maakond	N	C-varu, t ha <sup>-1</sup>		C-varu muutus aastas, t ha <sup>-1</sup>
		Enne	Pärast	
Harju maakond	219	186,0	170,1	-3,2
Ida-Viru maakond	165	126,7	116,3	-2,1
Jõgeva maakond	211	98,0	91,1* <sup>1</sup>	-1,4
Järva maakond	163	118,0	109,8*	-1,7
Lääne-Viru maakond	169	99,7	86,9*	-2,5
Lääne maakond	91	131,3	122,4	-1,8
Põlva maakond	282	70,8	73,2	0,5
Pärnu maakond	53	146,7	127,4*	-3,9
Rapla maakond	46	146,3	129,6*	-3,3
Saare maakond	176	119,8	94,7*	-5,0
Tartu maakond	192	105,9	97,3*	-1,7
Valga maakond	101	74,1	68,6	-1,1
Viljandi maakond	116	101,7	96,2	-1,1
Võru maakond	92	72,4	70,8	-0,3

<sup>1</sup> tärn osutab usutavale mulla C-varu muutusele antud perioodi jooksul.

### **Püsirohumaamullad**

Püsirohumaamuldade C-varu uuritud perioodide jooksul oluliselt ei muutunud (Tabel 6).

Tabel 6. Püsirohumaadel paiknevate muldade C-varumuutused

	N	C-varu, t ha <sup>-1</sup>		C-varu muutus aastas, t ha <sup>-1</sup>
		Enne	Pärast	
Kogu andmebaas	668	126,7	128,1	0,16

Parasniiskete püsirohumaamuldade C-varu oli keskmiselt 78–80 t ha<sup>-1</sup>, märgade 133 ja soiste 284–287 t ha<sup>-1</sup> (tabel 2.7). Sõltuvalt veerežiimist parasniiskete ja soiste püsirohumaadel C-varu veidi suurenes, kuid suurenemine ei olnud statistiliselt usutav (0,24–0,30 t ha<sup>-1</sup> aastas). Märgade püsirohumaade C-varu ei muutunud.

Tabel 2.7. Püsirohumaamuldade C-varu muutused sõltuvalt veerežiimist

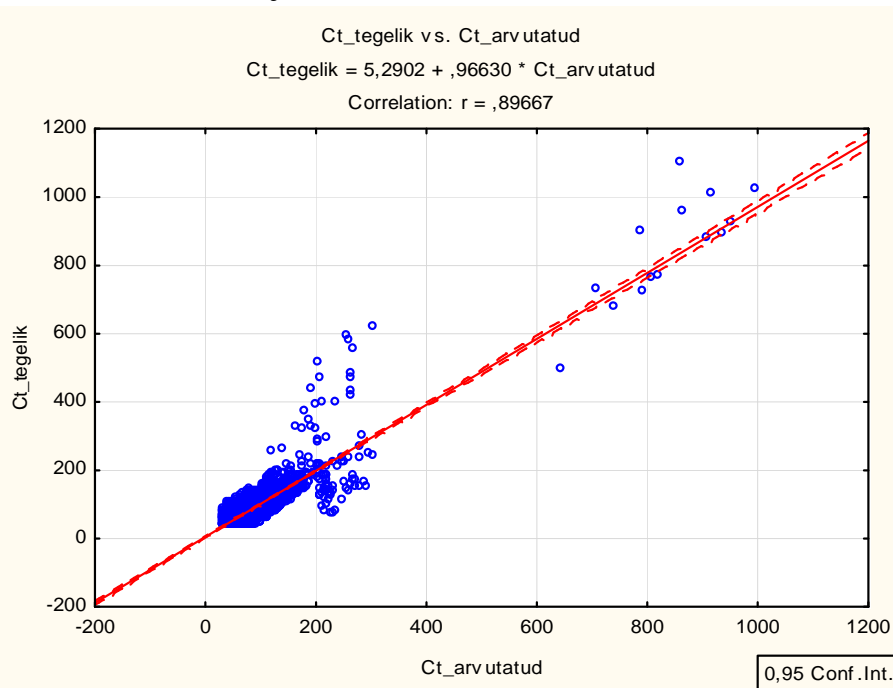
Niiskusrežiim	N	C-varu, t ha <sup>-1</sup>		C-varu muutus aastas, t ha <sup>-1</sup>
		Enne	Pärast	
Parasniiske	360	78,0	79,7	0,24
Märg	204	132,7	132,6	-0,03
Soo	104	283,8	287,0	0,30

## Süsinikuvaru prognoosimine

Henin & Dupuis valem

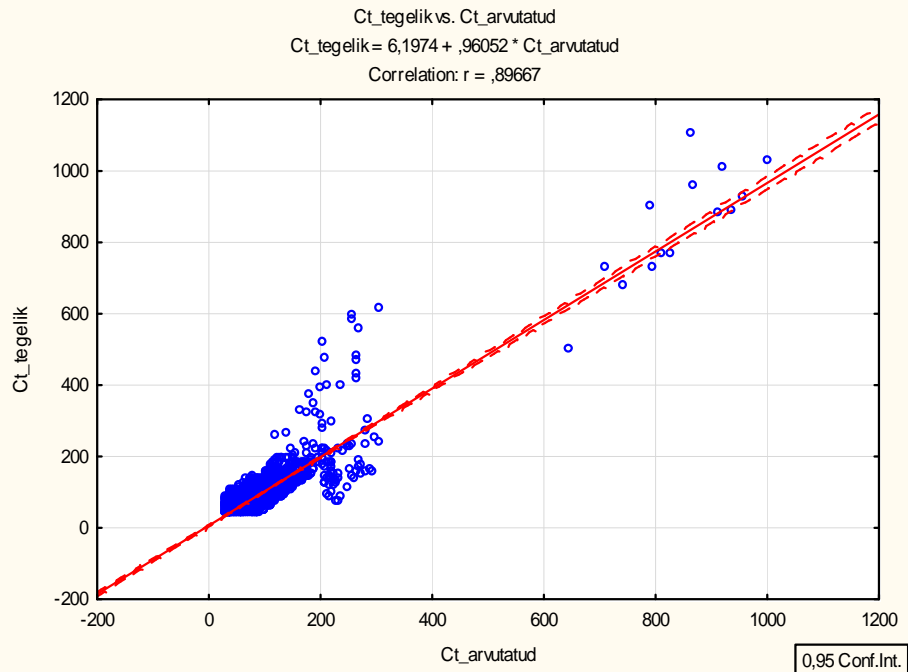
Eelpool toodud andmebaase kasutati Henin-Dupuis valemi testimisel Eesti tingimustes mulla C-varu prognoosimisel. Põllumuldade puhul kaasati need andmed, kus C-varu muutuse perioodi pikkus oli 5 aastat (N=2076) ja rohumaadel kaasati kogu andmebaas (N=668). Antud valemi kasutamisel seisneb peamine probleem parameetrite  $k$  ja  $h$  määramises. Teades tegelikku mulla C-varuja eeldades, et  $h=0,2$  ning aastane C sisend varieerub põllumuldadel  $1-3 \text{ t ha}^{-1}$  ja püsirohumaamuldades  $1-5 \text{ t ha}^{-1}$ , siis parima arvatud ja mõõdetud C-varu omavahelise korrelatsiooni juures, on võimalik leida orgaanilise aine lagunemiskonstant  $k$ .

Eeldades, et põllumuldade orgaanilise aine sisend on 3 tonni aastas, siis põllumuldade mõõdetud ja arvatud C-varu korrelatsioon on parim, kui orgaanilise aine lagunemiskonstant  $k=0,028$  (joonis 2.6).



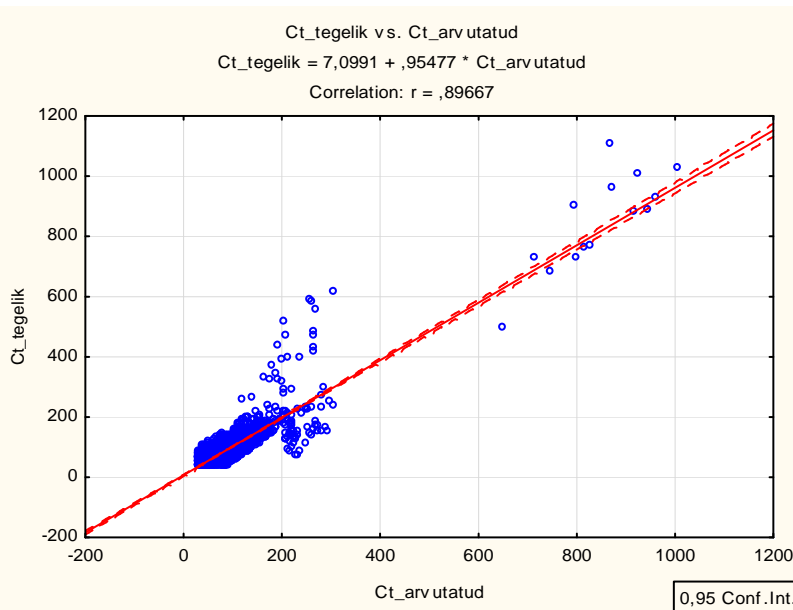
Joonis 2.6. Põllumuldade mõõdetud ( $Ct\_tegelik$ ) ja Henin-Dupuis valemiga arvatud ( $Ct\_arvutatud$ ) C-varu vaheline seos, kui orgaanilise aine sisend on 3 tonni aastas.

Kui orgaanilise aine sisend on 2 tonni aastas, siis seos on parim, kui orgaanilise aine lagunemiskonstant  $k=0,0268$  (joonis 2.7).



Joonis 2.7. Põllumuldade mõõdetud ( $Ct\_tegelik$ ) ja Henin-Dupuis valemiga arvutatud ( $Ct\_arvutatud$ ) C-varu vaheline seos, kui orgaanilise aine sisend on 2 tonni aastas.

Kui orgaanilise aine sisend on 1 tonni aastas, siis seos on parim, kui orgaanilise aine lagunemiskonstant  $k=0,0256$  (joonis 2.8).



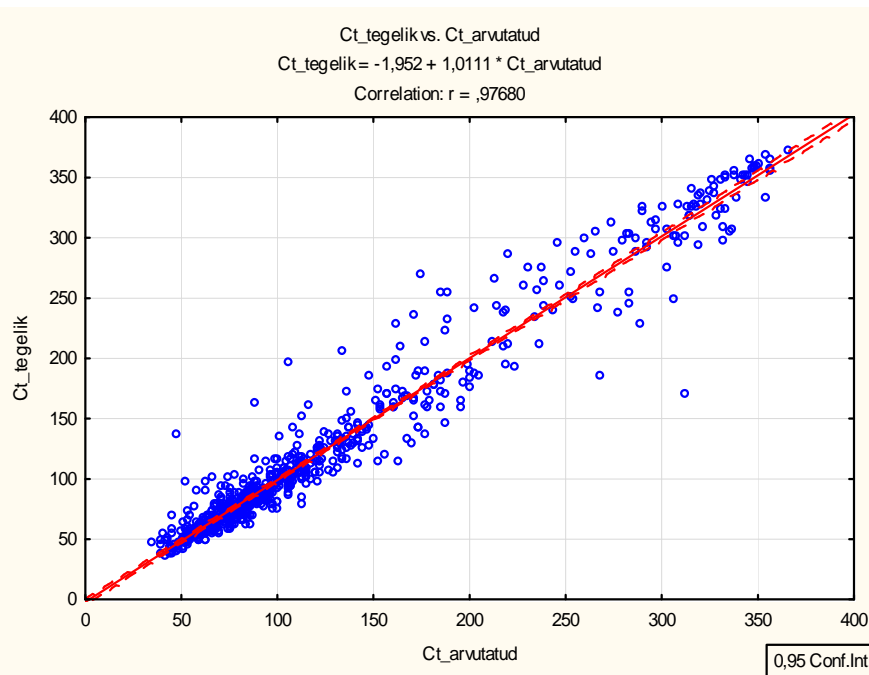
Joonis 2.8. Põllumuldade mõõdetud ( $Ct\_tegelik$ ) ja Henin-Dupuis valemiga arvutatud ( $Ct\_arvutatud$ ) OS varu vaheline seos, kui orgaanilise aine sisend on 1 tonni aastas.

Seega Eesti põllumuldade orgaanilise aine keskmine lagunemiskonstant  $k=0,027$ . Tuginedes PMK poolt kogutud seireandmetele, on Eesti põllumuldade OS bilanss

negatiivne. Algselt määratud OS varu oli keskmiselt  $111 \text{ t ha}^{-1}$ , viie aasta möödudes oli keskmine C-varu vähenenud  $101 \text{ t ha}^{-1}$ -ni. Kasutades Henin-Dupuis valemit vähenes 5 aasta jooksul C-varu veidi rohkem ( $98 \text{ t ha}^{-1}$ -ni) (tabel 2). Antud valemi järgi väheneb järgmise 5 aasta jooksul C-varu veelgi ( $87 \text{ t ha}^{-1}$ -ni) ja 36 aasta pärast (aastal 2050)  $47 \text{ t ha}^{-1}$ -ni. Arvestades kliimamuutustest tingitud kasvuperioodi pikenedesega potentsiaalne saagikus suureneb (Peltonen-Sainio et al., 2009), millest tulenevalt suureneb ka aastane C sisend (Parton et al., 1995). Seega, näiteks kui C-sisend on 3 t aastas, siis Henin-Dupuis valemi järgi on C-varu  $49 \text{ t ha}^{-1}$ , kuid kliimamuutused (soojem ja niiskem) soodustavad ka orgaanilise aine lagunemist (näiteks  $k=0,04$ ), siis Eesti põllumuldade C-varu on 2050. aastal  $30 \text{ t ha}^{-1}$ , kui jätkatakse samade agrotehniliste võtetega, kui seni.

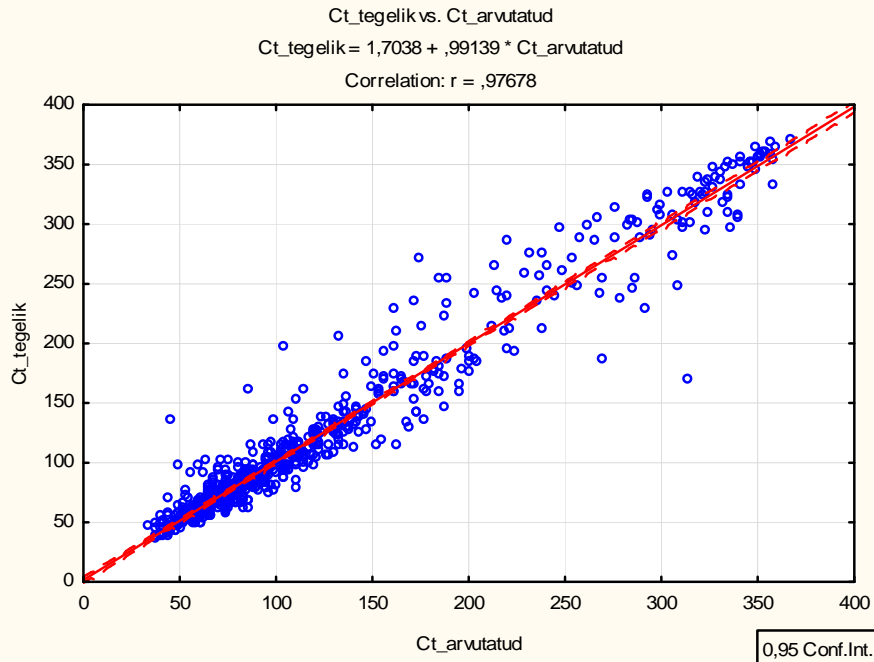
### Püsirohumaamullad

Püsirohumaade puhul eeldati, et orgaanilise aine sisendi varieeruvuse ulatus on suurem (1–5 tonni aastas). Eeldades, et püsirohumaade C-sisend on 5 tonni aastas, siis püsirohumaamuldade mõõdetud ja arvutatud C-varu korrelatsioon on parim, kui orgaanilise aine lagunemiskonstant  $k=0,006$  (joonis 2.9).



Joonis 2.9. Püsirohumaade mõõdetud ( $Ct\_tegelik$ ) ja Henin-Dupuis valemiga arvutatud ( $Ct\_arvutatud$ ) C-varu vaheline seos, kui C-sisend on 5 tonni aastas.

Kui C-sisend on 3 tonni aastas, siis seos on parim, kui orgaanilise aine lagunemiskonstant  $k=0,0039$  (joonis 2.10).



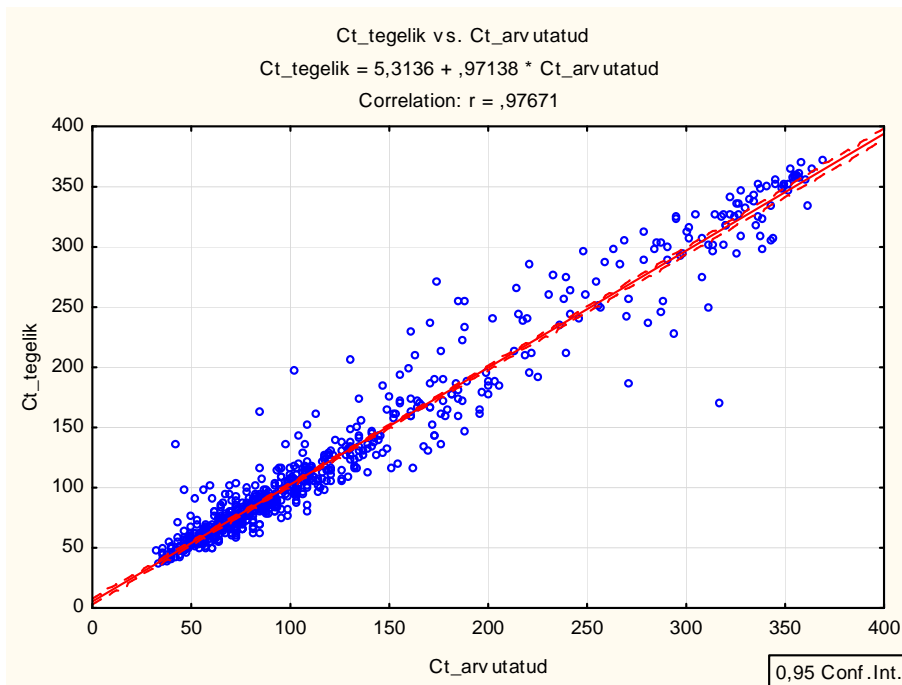
Joonis 2.10. Püsirohumaade mõõdetud ( $Ct\_tegelik$ ) ja Henin-Dupuis valemiga arvutatud ( $Ct\_arvutatud$ ) OS varu vaheline seos, kui orgaanilise aine sisend on 3 tonni aastas.

Kui C-sisend on 1 tonn aastas, siis seos on parim, kui orgaanilise aine lagunemiskonstant  $k=0,00175$  (joonis 2.11).

Seega Eesti püsirohumaamuldade orgaanilise aine keskmine lagunemiskonstant  $k=0,004$ .

Püsirohumaade keskmine C-varu oli  $127 \text{ t ha}^{-1}$ , 10 aastat hiljem C-varu oluliselt ei suurenenud ( $128 \text{ t ha}^{-1}$ ). Kasutades orgaanilise aine lagunemiskonstandina  $k=0,004$ , siis Henin-Dupuis valem andis sama tulemuse ( $128 \text{ t ha}^{-1}$ ). Tuginedes antud valemile C-varu püsirohumaamuldades suureneb järgmise 10 aasta jooksul  $129 \text{ t ha}^{-1}$ -ni ja aastaks 2050  $131 \text{ t ha}^{-1}$ -ni. Kliimamuutuste tingimustes eeldame, et aastane C-sisend rohumaa del on 5 tonni aastas, siis C-varu on aastal 2050  $141 \text{ t ha}^{-1}$ , kui arvestada lisaks ka aktiivsemat orgaaniline aine lagunemine (näiteks  $k=0,006$ ), siis 2050. aastal on Eesti püsirohumaade C-varu on  $136 \text{ t ha}^{-1}$ .

Põllumuldade lagunemiskonstant  $k$  oli oluliselt suurem ( $k=0,027$ ) võrreldes püsirohumaadega, kus  $k$  oli väiksem ( $k=0,004$ ), mis on ka ootuspärane, sest  $k$  sõltub harimisvõtetest ning põllumuldades toimub orgaanilise aine lagunemine kiiremini sõltuvalt erinevatest mulla harimisvõtetest. Põllumuldade  $k$  sõltus C-sisendi suurusest vähe. Rohumaamuldades C-sisendi koguse vähendamisel 40%, vähenes lagunemiskonstant  $k$  50%, mis näitab, et rohumaa del on C-sisendi määramine C-varu ennustamisel olulise tähtsusega.



Joonis 2.11. Püsirohumaade mõõdetud ( $Ct\_tegelik$ ) ja Henin-Dupuis valemiga arvutatud ( $Ct\_arvutatud$ ) C-varu vaheline seos, kui C-sisend on 1 tonni aastas.

### ICMB mudeli katsetamine Eesti tingimustes

ICBM mudeli katsetamiseks Eesti tingimustes kasutati Eesti Maaülikooli põllumajanduse- ja keskkonnainstituudi kolme pikaajalise põldkatse andmeid.

Katsete kirjeldused:

#### 1. Eerika katse

Katse rajati 1964.aastal. Uurimustöök vajaliku mulla saamiseks eemaldati 1964.a suvel katseväljakult (8 x 20 m) ülemised horisonid kuni 100 cm sügavuseni ning tekkinud süvend täideti katseala lähedalt põllult toodud BC-horisoni punakaspruuni karbonaatse keskmise raskusega liivsavimoreeniga, milles oli väga vähe huumust (0,22%) ja üldlämmastikku (0,018%). Katselapid isoleeriti üksteisest külgedelt kuni 1 m sügavuseni puulaudadega, katselappide pindala oli 1,5 m<sup>2</sup> (1 x 1,5 m).

Katse sisaldas järgmisi variante:

- 1) Ilma taimestikuta kontroll
- 2) Oder + P K ja mikroelemendid
- 3) Oder + P K mikroelemendid ja lämmastikku (N) 75 kg N ha<sup>-1</sup>



- 4) Oder + P K mikroelemendid+ reoveesete 25 t ha<sup>-1</sup>
- 5) Oder + P K mikroelemendid+ N75+ reoveesete 25 t ha<sup>-1</sup>
- 6) Kõrrelised, väetamata
- 7) Kõrrelised + P K ja mikroelemendid
- 8) Kõrrelised + P K ja mikroelemendid, N150 (2x 75 kg N ha<sup>-1</sup> )
- 9) Kõrrelised + P K ja mikroelemendid+ reoveesete 50 t ha<sup>-1</sup>
- 10) Kõrrelised väetamiseta + taimejäänused niitmisjärgselt jäeti mullapinnale, 2–3 niidet
- 11) Kõrrelised + reoveesete 50 t ha<sup>-1</sup>
- 12) Hübriidlutsern `Karlu` + P K ja mikroelemendid+ sõnnik 60 t ha<sup>-1</sup>
- 13) Kõrrelised ja ristik, väetamata
- 14) Kõrrelised ja ristik + P K ja mikroelemendid
- 15) Ida-kitsehernes `Gala` + P K ja mikroelemendid
- 16) Hübriidlutsern `Karlu` + P K ja mikroelemendid
- 17) Kõrrelised ja ristik + P K ja mikroelemendid+ reoveesete 50 t ha<sup>-1</sup>
- 18) Murutaime segu + reoveesete 50 t ha<sup>-1</sup>
- 19) Murutaime segu + kompost 60 t ha<sup>-1</sup>+ P K ja mikroelemendid.

Iga 7. aasta järel katse rajamise algusest on toimunud rohukamarate uuendamine variantidel 6-19, mis viidi läbi peamiselt umbrohtumise takistamiseks. Selleks kasvatati iga variandi katselapil aasta enne uuendamist vahekultuurina otra.

ICMB mudelit katsetati variantidel:

- 2) Oder + P K ja mikroelemendid
- 6) Kõrrelised, väetamata
- 13) Kõrrelised ja ristik, väetamata

## 2. IOSDV katse

IOSDV pikaajaline kolmeväljalise külvikorruga (kartul– suvinisu – oder) põldkatse rajati 1989.a. orgaaniliste ja mineraalsete lämmastikväetiste mõju uurimiseks Tartu lähedale Eerikale. Kasteala kõik kolm põldu (suurusega 15 x 150 m) on jagatud kolmeks erinevate orgaaniliste väetiste variantidega 5 m laiusteks ja 150 m pikkusteks põlluribadeks.

Esimene riba pole alates katse rajamisest saanud üldse orgaanilisi väetisi, teine riba on igal kolmandal aastal (kartulile) saanud hästi (üks aasta) käärinud tahedat veisesõnnikut esimestest külvikorra rotatsioonides (1990–2001) 60 t ha<sup>-1</sup>, viimastel aastatel (2002–2014) aga 40 t ha<sup>-1</sup>. Kolmandat põlluriba on väetatud mitmesuguste alternatiivsete orgaaniliste väetistega (põhk, haljasväetised, kompostid). Ristisuunas on need pikiribad jaotatud 10 m pikkusteks katselappideks, milliseid on väetatud viie erineva mineraalväetise normiga (0, 40, 80, 120 ja 160 kg N ha<sup>-1</sup>). Katse on toimunud kolmes korduses. Teraviljade põhk eemaldati põllult pärast saagi koristust. ICBM mudelit katsetati esimesel ja teisel ribal erinevate mineraalväetise normidaga.

### 3. Tava- ja maheviljelusviiside võrdluskatse

Tava- ja maheviljelusviiside võrdluskatse rajati 2008.aastal. Katses on viis üksteisele järgnevat põllukultuuri: punane ristik, talinisu, hernes, kartul ja oder punase ristiku allakülviga, mida kasvatatakse katsepõllul samaaegselt. Tavaviljeluses oli neli varianti – kontroll (N0 - väetamata) ning erinevad mineraalse lämmastikväetiste normid fikseeritud PK-väetisenormidega (tabel 2.8).

Tabel 2.8. Kasvuperioodi jooksul lisatud N, P ja K väetusnormid (kg ha<sup>-1</sup>) tavaviljelussüsteemides

Viljelussüsteem	Kartul ja talinisu			Oder punase ristiku allakülviga			Hernes		
	N	P	K	N	P	K	N	P	K
N0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N1	20 <sup>1</sup> +30 <sup>2</sup>	25	95	20;+20	25	95	20	25	95
N2	20+60+20 <sup>3</sup>	25	95	20;+60	25	95	20	25	95
N3	20+90+40	25	95	20;+90+10	25	95	20	25	95

<sup>1</sup> NPK mahapaneku/külviaegsed väetise normid;

<sup>2</sup> teine täiendav lisaväetamine N norm kasvuperioodi jooksul sõltuvalt kultuurist ja lõplikust N-väetise kogusest;

<sup>3</sup> kolmas täiendav lisaväetamise N norm kasvuperioodi jooksul sõltuvalt kultuurist ja lõplikust N-väetise kogusest.

Maheviljeluses oli kaks viljelussüsteemi – vahekultuuriga viljelussüsteem (O+CC) ning vahekultuuriga viljelussüsteem, mis on saanud külvikorras (enne kartulit) lisaks komposteeritud sõnnikut 40 t ha<sup>-1</sup> (O+CC+M). Vahekultuurid olid taliraps pärast hernelist, talirukis pärast kartulit ja raihein pärast talinisu. Katsed olid neljas korduses ja iga katselapi suurus oli 60 m<sup>2</sup>. Antud katsest eemaldati süsinikku põllult ainult põhisaagiga (terad, mugulad).

### Katsete algsed C-varud

Esialsed C-varud eeltoodud katsetel olid 4,3 t ha<sup>-1</sup> Eerika katsel 1964. aastal, IOSDV katsel keskmiselt 31 t ha<sup>-1</sup> 1990. aastal. Tava- ja maheviljelusviiside võrdluskatse C-varu varieerus katse rajamisel 2008. aastal 45,3–52,7 t ha<sup>-1</sup>. Mullaproovid koguti kõikidelt katsetelt 0–20 cm sügavuselt (ka katse alguses). Eerika katsel koguti proovid 2012. aastal, IOSDV katselt ning tava- ja maheviljelusviiside võrdluskatselt 2014. aastal. Lasuvustihedust ei määratud ja see arvutati välja Post-Kwon valemi (Post & Kwon, 2000) järgi.

### ICBM mudeli parameetrid

Süsinikuvaru prognoosimiseks vajaminevad mudeli parameetrid on:

- Mulla orgaanilise aine 'noore' ('young') ehk kergemini laguneva osa lagunemiskonstant  $k_y=0,8$  aastas.
- Mulla orgaanilise aine 'vana' ('old') ehk raskemini laguneva osa lagunemiskonstant  $k_o=0,007$  aastas.
- Antud katses moodustus orgaanilise aine sisend ainult maa-alusest osast, mille humifikatsiooni koefitsient oli  $h_{\text{maa-alune}}=0,3$ . Enamus taimejätmetel on see 0,12 ja sõnnikul on see umbes 0,35 (Andren ja Kätterer, 1997)

Orgaanilise aine sisend arvutati määratud maapealse biomassi kaudu kasutades C jaotumise koefitsiente (Tabel 2.9) (Bolinder et al., 2007). Kartuli puhul eeldati, et maapealne biomass on 890 kg ha<sup>-1</sup> ja 1060 kg ha<sup>-1</sup> maa-alune (juurte) kuivaine biomass (Bolinder et al., 2012; Carter et al., 2003).

Tabel 2.9. Süsiniku jaotumise koefitsiendid orgaanilise aine sisendi arvutamiseks

Katse	Kultuur	Põllu-majanduslik saak (terad)	Maa-pealne osa	Juured	Risosfäär (0,65*juurtes olevast C-st)
Eerika	Oder* <sup>1</sup>		0,441	0,339	0,220
	Kõrrelised		0,571	0,260	0,169
	Kõrrelised+ristik		0,298	0,426	0,277
IOSDV	Oder	0,451	0,400	0,090	0,059
	Nisu	0,322	0,482	0,118	0,078
Tava- ja maheviljelusviiside võrdluskatse	Ristik	0,571	0,400	0,09	0,196
	Hernes	0,233	0,577	0,115	0,169
	Oder	0,451	0,400	0,090	0,059
	Nisu	0,322	0,482	0,118	0,078
	Ristik	0,571	0,400	0,09	0,196

<sup>1</sup> Eerika katsel määrati maapealse biomassi mass (terad koos põhuga).

## Tulemused

### 1. Eerika katse

Odra ja kõrreliste + ristiku variandis ICBM mudel alahindas C-varu, kuid kõrreliste variandis ennustas C-varu täpselt (tabel 2.10). See osutab sellele, et kasutatud parameetrid ei ole odra ja kõrreliste+ristiku puhul sobivad ja on vaja leida sobivamad parameetrid, et C-varu prognoosida.

Tabel 2.10. Eerika katse süsinikusisend (C-sisend) aastas, mõõdetud süsinikuvaru (C-varu) aastatel 1964 ja 2012 ja arvutatud C-varu aastal 2012.

Variant	C-sisend, kg ha <sup>-1</sup>	C-varu, t ha <sup>-1</sup>		
		Mõõdetud		Arvutatud
		1964	2012	2012
Oder	215	4,3	17,9	6,2
Kõrrelised	2096	4,3	20,7	20,4
Kõrrelised+ristik	2108	4,3	29,0	21,4

## IOSDV katse

ICBM mudel ülehindas C-varu IOSDV katsel (tabel 2.11). Suuremad erinevused esinesid väetatud variantides, mis osutab selle, et C-varu ennustamisel on vaja arvestada väetamisest tingitud mõju ning mudelisse tuleb kaasata majandamist kirjeldav parameeter  $r_e$ .

Tabel 2.11. IOSDV katse süsinikusisend (C-sisend) aastas, mõõdetud süsinikuvaru (C-varu) aastatel 1990 ja 2013 ja arvutatud C-varu aastal 2013.

Mineraalse väetise N norm, kg ha <sup>-1</sup>	Orgaaniline väetis	C-sisend, kg ha <sup>-1</sup>	C-varu, t ha <sup>-1</sup>		
			Mõõdetud		Arvutatud
			1990	2013	2013
0		1027	31,0	29,9	31,6
40		1327	30,5	30,4	32,6
80	Puudub	1513	29,5	30,5	34,1
120		1581	31,6	32,2	35,0
160		1496	30,7	32,4	33,9
0		3688	30,0	34,5	40,6
40	40 t ha <sup>-1</sup>	3974	30,4	38,3	42,5
80	sõnnikut	4119	29,9	37,4	42,8
120	külvikorras	4149	30,6	37,8	43,5
160		4088	30,5	39,9	43,2

### Tava- ja maheviljelusviiside võrdluskatse

Mudelisse kaasati parameetrina sõnniku humifikatsioonikoefitsent  $h_{\text{sõnnik}}=0,35$ .

ICBM mudel ennustas C-varu kõige täpsemalt variantides, kuhu ei lisatud orgaanilisi ega mineraalseid väetisi ehk siis tavaviljeluse kontrollvariant ja maheviljeluse vaheskultuuride variant (tabel 2.12). Mineraalsete väetistega väetades mudel ülehindas ja väetades orgaaniliste väetiste alahindas C-varu.

Tabel 2.12. Tava- ja maheviljelusviiside võrdluskatse süsinikusisend (C-sisend) aastas, mõõdetud süsinikuvaru (C-varu) varu aastatel 2008 ja 2013 ja arvatud C-varu aastal 2013.

Viljelusviis	Mineraalse N norm, kg ha <sup>-1</sup>	Orgaaniline väetis	C-sisend, kg ha <sup>-1</sup>	C-varu, t ha <sup>-1</sup>		ICMB 2013
				2008	2013	
Tava	0	Puudub	3226	46,7	48,4	50,7
	(20) 40-50		3697	51,1	50,5	55,8
	(20) 80-100		3350	51,6	49,6	55,7
	(20) 120-150		3302	51,5	52,2	56,2
Mahe	0	Vahekultuurid	4415	52,7	56,5	57,2
	0	Vahekultuurid +40 t sõnnikut külvikorras	4762	45,3	58,2	50,9

#### Kokkuvõte

Viimastel aastatel (2002–2014) C-varu Eesti põllumuldades on vähenenud ning püsirohumaamuldades on püsinud stabiilsena. Põldudel sõltus C-varu vähenemine mullaveerežiimist. Kõige rohkem vähenes C-varu soomuldades (-5,1 t ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>), parasniisketes muldades vähenes C-varu -1,6 t ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>. Rohumaadel veerežiim C-varu muutustele mõju ei avaldanud. Põllumuldade C-varu vähenemine toimub kiiremini Lääne- ja Põhja-Eestis ning aeglasemalt Lõuna-Eestis. Lõimise järgi on suurimad C-varu vähenemised liivmuldadel. Henin-Dupius valem prognoosis väga hästi C-varu nii põllukui rohumaamuldadel. Edasine töö peab jätkuma rohumaamuldade aastase C-sisendi täpsemal määramisel, sest see mõjutab oluliselt C-varu prognoosimist tulevikus. ICBM mudeli rakendamiseks Eesti tingimustes peab mudelit kohandama leides Eesti tingimustesse sobivad näitajad, peamiselt just erinevate orgaanilise aine fraktsioonide lagunemiskontsandid.

## Kasutatud kirjandus

- Andren, O., Kihara, J., Bationo, A., Vanlauwe, B., Kätterer, T. 2007. Soil climate and decomposer activity in sub-Saharan Africa estimated from standard weather station data: A simple climate index for soil carbon balance calculations. *Ambio* 36, 379–386.
- Andren, O., Kätterer, T. 1997. ICBM: The introductory carbon balance model for exploration of soil carbon balances. *Journal of Applied Ecology* 7, 1226–1236.
- Battle-Aguilar, J., Brovelli, A., Porporato, A., Barry, D.A. 2011. Modelling soil carbon and nitrogen cycles during land use change. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 31, 251–274.
- Bolinder, M., VandenBygaart, A.J., Gregorich, E.G., Angers, D.A., Janzen, H.H. 2006. Modelling soil organic carbon stock change for estimating whole-farm greenhouse gas emissions. *Canadian Journal of Soil Science* 86, 419–429.
- Bolinder, M., Andren, O., Kätterer, T., de Jong, R., VandenBygaart, A., Angers, D., Parent, L., Gregorich, E. 2007. Soil carbon dynamics in Canadian agricultural ecoregions: Quantifying climatic influence on soil biological activity. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 122, 461–470.
- Bolinder, M.A., Janzen, H.H., Gregorich, E.G., Angers, D.A., VandenBygaart, A.J., 2007. An approach for estimating net primary productivity and annual carbon inputs to soil for common agricultural crops in Canada. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 118, 29–42.
- Bortolon, E.S.O., Mielniczuk, J., Tornquist, C.G., Lopes, F., Bergamaschi, H. 2011. Validation of the century model to estimate the impact of agriculture on soil organic carbon in Southern Brazil. *Geoderma* 167-168, 156–166.
- Campbell, C., VandenBygaart, A., Grant, B., Zentner, R., McConkey, B., Lemke, R., Gregorich, E., Fernandez, M. 2007. Quantifying carbon sequestration in a conventionally tilled crop rotation study in Southwestern Saskatchewan. *Canadian Journal of Soil Science* 87, 23–39.
- Carter, M.R., Kunelius, H.T., Sanderson, J.B., Kimpinski, J., Platt, H.W., Bolinder, M.A., 2003. Productivity parameters and soil health dynamics under long-term 2-year potato rotations in Atlantic Canada. *Soil Tillage and Research* 72, 153–168.
- Di Tizio, A., Grego, S. 2008. Soil organic carbon balance using Century model. *Transworld Research Network* 37/661, 145–157.
- Falloon, P., Smith, P. 2002. Simulating SOC changes in long-term experiments with RothC and CENTURY: Model evaluation for a regional scale application. *Soil use and Management* 18, 101–111.
- Hyvönen, R., Agren, G., Andren, O. 1996. Modelling long-term carbon and nitrogen dynamics in an arable soil receiving organic matter. *Ecological Applications* 6, 1345–1354.
- Coleman, K., Jenkinson, D.S. 1999. RothC-26.3 - A model for the turnover of carbon in soil. *NATO ASI Series I* 38, 237–246.
- Conen, F., Zerva, A., Arrouays, D., Jolivet, C., Jarvis, P.G., Grace, J., Mencuccini, M. 2004. The carbon balance of forest soils: Detectability of changes in soil carbon stocks in temperate and boreal forests. *Garland Science/BIOS Scientific Publishers, Southampton* 233–247.
- Hénin S., Dupuis M. 1945. Essai de bilan de la matière organique du sol, *Annales agronomiques* 11, 17–29.

- Jenkinson, D.S. 1990. The Turnover of Organic Carbon and Nitrogen in Soil. *Philosophical Transactions of the Royal Society* 329, 361–368.
- Jenkinson, D.S., Rayner, J.H. 1977. The turnover of organic matter in soils from some of the Rothamsted classical experiments. *Soil Science* 123, 298–305.
- Kynding Borgen, S., Grønlund, A., Andren, O., Kätterer, T., Tveito, O.E., Bakken, L., Paustian, K. 2012. Estimated CO<sub>2</sub> emissions from cropland in Norway using IPC. *Greenhouse Gas Measurement and Management* 2, 5–21.
- Karlsson, L.O.T., Andren, O., Kätterer, T., Mattsson, L. 2003. Management effects on topsoil carbon and nitrogen in Swedish long-term field experiments - budget calculations with and without humus pool dynamics. *European Journal of Agronomy* 20, 137–147.
- Mann, L.K., 1986. Changes in soil carbon storage after cultivation. *Soil Science* 142, 279–288.
- McGrill, W.B. 1996. Review and classification of ten soil organic matter (SOM) models. *Global Environmental Change* 38, 111–132.
- Palusuo, T. 2008. Soil carbon modelling as a tool for carbon balance studies in forestry. *Doktoritöö, Dissertationes Forestales* 61, Helsingi Ülikool, 9–13.
- Paustian, K. 1994. Modelling soil biology and biochemical processes for sustainable agriculture research. Pankhurst C.E (Eds). *Soil biota: management in sustainable farming systems*, CSIRO, USA, 182–193.
- Smith, P., Smith, J., Powlson, D., McGill, W., Arah, J., Chertov, O., Coleman, K., Franko, U., Parton, W., Jenkinson, D. 1997. A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments. *Geoderma* 81, 153–225.
- Parton, W.J., Scurlock, J.M.O., Ojima, D.S., Schimel, D.S., Hall, D.O., Group Members SCOPEGRAM. 1995. Impact of climate change on grassland production and soil carbon worldwide. *Global Change Biology* 1, 13–22.
- Post, W.M., Kwon, K.C. 2000. Soil carbon sequestration and land-use change: Processes and potential. *Global Change Biology* 6, 317–327.
- 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.
- Parton, W., Anderson, D., Cole, C., Stewart, J. 1983. Simulation of soil organic matter formation and mineralization in semiarid agroecosystems. Georgia, USA.
- Paustian, K., Parton, W., Persson, J. 1992. Modeling soil organic matter in organic-amended and nitrogen-fertilized long-term plots. *Soil Science Society of America Journal* 56, 476–488.
- Persson, J., Kirchmann, H. 1994. Carbon and nitrogen in arable soils as affected by supply of N fertilizers and organic manures. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 51, 249–255.



## Kokkuvõte

Muldade tasakaalustatud huumusseisund on nii agronoomilistest kui ka ökoloogilistest aspektidest lähtuvalt üha suurema tähelepanu keskmes. Mulla orgaanilise aine ja sellega tihedalt seotud süsiniku ja lämmastiku ringete kohta on koostatud maailmas arvukalt mudeleid, mis varieeruvad oma olemuselt lihtsatest arvutustabelitest kuni keerukate simulatsiooni/proгноosimudeliteni. Otseselt ilma eelneva kohandamiseta meie tingimustesse ülekantavaid mudeleid siiski ei ole ning need pole seetõttu Eesti praktikas kasutatud leidnud.

Uurimuse peamised eesmärgid olid:

1. Välja töötada Eesti tingimusi arvestav ja praktikas rakendatav põllumuldade huumusbilansi kalkulaator.

2. Testida teaduskirjanduses avaldatud süsiniku (huumuse) kontsentratsiooni ja varude simulatsiooni/proгноosimodelite toimimist Eesti mullaseire aladel ja tootmispõldudel.

Kuna huumusbilans sõltub tootmistasemest, mullast, kasvatatavast kultuurist ja väetamisest, siis ka meie poolt koostatud huumusbilansi kalkulaatoris lähtuti kõigepealt konkreetse põllu mulla omadustest nagu lõimisest, huumuse- või orgaanilise süsiniku sisaldusest, huumuskihi tusedusest ja selle lasuvustihedusest.

Varasemate uuringute meta-analüüsiga töötati välja ja täiustati koefitsiente ja arvutusalgoritme, mis arvestavad erinevate agrotehnoloogiate (harimisviisid, tahe- ja vedelsõnniku kasutamine, haljasväetised, kompostid, vahekultuurid, põhu eemaldamine või muldaviimine jne) mõju mulla huumusbilansile. Kalkulaatoris on kasutajal vaja huumusvaru hetkeseisu leidmiseks lähteandmetena sisestada huumuskihi tusedus, orgaanilise süsiniku või huumusesisaldus, mulla lõimis.

Mulda tagastuva orgaanilise aine koguste leidmiseks analüüsiti Eestis ja Euroopas korraldatud põldkatsete põhjal erinevate kultuuride biomassi struktuuri ja arutati suhtarvud maapealse biomassi ja saagi koristusaegsete taimejuurte masside vahel. Arvutati välja erineva orgaanilise aine humifikatsiooni võrrandid sõltuvalt mulda viidavatest orgaanilise aine kogustest ja koostisest lähtuvalt. Koostatud algoritmide abil saab arvutada huumuse juurdeteket.

Huumuse mineralisatsiooni ehk huumusvaru vähenemist mullas olenevalt kasvatatavast kultuurist ja selle saagitasemest on otseselt raske määrata, kuid kuna mulla huumuse- ja lämmastikusisaldus on tugevas positiivses seoses, siis on seda võimalik arvutada kaudselt lämmastiku aktiivbilansi kaudu.

Kalkulaatori esimest versiooni saab kasutada mineraalmuldadel huumusbilansi arvutamiseks. Kalkulaatori tulem väljendatakse huumusbilansina: huumust kg/ha aastas ja huumusvaru muutusena, % algsest huumusvarust aastas. Kalkulaator võimaldab anda tulemit konkreetse kõlviku kui ka kogu külvikorra kohta. Tulemused võimaldavad anda hinnangu senitehtud agrotehnilistele võtete mõjust huumusemajandusele ning on abiks abinõude planeerimiseks huumusemajanduse korrastamisel.

Programm on loodud tabelarvutusprogrammi MS Excel tarkvara baasil, seda on võimalik kasutada ka vabavaralise Libre Office tabelarvutusprogrammiga. Kalkulaator on tasuta kasutamiseks ja levitamiseks. Iga kaasaegne teabesüsteem, sh huumusbilansi kalkulaator, vajab järjepidevat arendamist nii sisu kui ka kasutajaliidese osas. Edasisteks arendustöödeks on väga vajalik kasutajate poolne tagasiside.

#### Mulla orgaanilise süsiniku dünaamika stimulatsioonimudelid

Süsinikuvaru (C-varu) suur ruumiline varieeruvus ning suhteliselt aeglane muutumine muudavad varu hindamised otseste mõõtmisega võrdlemisi keerukaks. Nende raskuste ületamiseks on loodud erinevaid simulatsioonimudeleid hindamaks C-varu sisaldust ja muutusi muutuvates kliimatingimustes. Kõik C-varu simulatsioonimudelid tuginevad esimese astme kineetika võrrandile ja on kirjeldatavad Henin-Dupuis valemiga. Sellele valemile tuginedes on arendatud erinevaid mudeleid, mis erinavad üksteisest simulatsiooniks vajaminevate sisendite poolest. Väga laialdaselt kasutatakse mudeleid RothC, CENTURY ja ICBM. Käesolevas uurimustöös katsetati Henin-Dupuis valemit C-varu hindamiseks Eesti põllumajanduslikus kasutuses olevate põllu- ja püsirohumaamuldadel. ICBM mudeli testimiseks kasutati Eesti Maaülikooli kolme pikaajalisele katse andmeid. Tulemused näitasid, et viimastel aastatel (2002–2014) on Eesti põllumuldade reaalses tingimustes mõõdetud C-varu vähenenud ning püsirohumaamuldades on püsinud stabiilsena. Henin-Dupuis valem prognoosis väga hästi C-varu nii põllu- kui rohumuldadel. Edasine töö peab jätkuma rohumaa muldade aastase C-sisendi täpsemal määramisel, sest ilmnes, et C-sisend mõjutab oluliselt C-varu prognoosimist tulevikus. ICBM mudeliga saadud tulemused oli võrreldavad mõõdetud C-varu sisaldustega, kuid siiski peab ICBM mudeli rakendamiseks Eesti tingimustes mudelit kohandama leides Eesti tingimustesse sobivamad näitajad, peamiselt just erinevate orgaanilise aine fraktsioonide lagunemiskontsandid.

Simulatsioonimodelite testimise tulemeid saab kasutada projekti raames koostatud asukohapõhise huumusbilansi kalkulaatori edaspidisel täiustamisel. Töögrupi poolt jätkatakse täiendava testimisega nii põldkatsete kui ka mullaseire ja tootmistingimuste andmetega.

Peale esmast testperioodi on asjakohane ettepanekute alusel kohandada kalkulaatori kasutajaliidest ning vajadusel tellida arendustööna veebipõhise kasutajakeskkonna programmeerimine.