

Nõuded väetisegraanulitele

Kalvi Tamm ja Raivo Vettik



Publikatsioon on koostatud [MTÜ Põllukultuuride klaster](#) innovatsioonitegevuse „Mahevätiste prototüüpide masinkäideldavuse testimine“ raames.

MTÜ Põllukultuuride klasteri eesmärk on leida lahendused mullaviljakuse, toitainete leostumise ja taimekaitsevahendite jääkide mulda kumuleerumise probleemile, mis puudutab suurt osa taimekasvatusega tegelevatest põllumajandusettevõtetest. Klasteri liikmeskonna moodustavad Eesti eesrindlikud põllumajandusettevõtjad, kes on huvitatud koostöös teadlastega nimetatud probleemidele lahenduste otsimisest, et hiljem saadud tulemusi oma ettevõttes rakendada ning teistele kogemusi jagada.

Klasteri tegevused on rahastatud Euroopa Maaelu Arengu Põllumajandusfondist (EAFRD) ja Eesti maaelu arengukava (MAK) 2014–2020 Innovatsiooniklasteri toetuse meetmest ning Euroopa Liidu teadusuuringute ja innovatsiooni programmist Horisont 2020. Toetuslepingu number on 817819.

<https://mullakaitse.ee/>

Võtmesõnad: väetisegraanulid, nõuded graanulitele, graanulite laotamine

Esikaane foto: Struviidi graanulid kilepakendis. Foto autor Kalvi Tamm.

Summary

Kalvi Tamm and Raivo Vettik

The Centre of Estonian Rural Research and Knowledge

The publication has been compiled within the framework of the innovation activity "Testing the machinability of organic fertilizer prototypes", led by the [MTÜ Põllukultuuride klaster](#) (NGO Crop Cultures Cluster).

The aim of the MTÜ Põllukultuuride klaster is to find solutions to the problems of soil fertility, leaching of nutrients and the accumulation of plant protection product residues in the soil, which affects a large part of the agricultural enterprises involved in crop cultivation. The membership of the cluster is made up of leading Estonian farmers who are interested in finding solutions to the mentioned problems in cooperation with researchers, to apply the obtained results in their company and share their experience with others.

The activities of the cluster have been financed by the European Agricultural Fund for Rural Development (EAFRD) and the Innovation Cluster Support measure of the Estonian Rural Development Plan (MAK) 2014–2020 and the European Union's research and innovation program Horizon 2020. The number of the grant agreement is 817819. Web page is <https://soilprotection.earth/>

This publication gives overview about technological stages of fertilizer granules from the factory to the field soil; environmental conditions affecting fertilizer granules; requirements for fertilizer granules; general requirements; requirements before spreading, during spreading and after spreading. The overview is written in Estonian.

Key words: fertiliser granules, requirements for granules, spreading of granules.

Sisukord

1. Sissejuhatus	4
2. Tehnoloogilised etapid väetisegraanuli liikumisel tehasest kuni põllu mulda	6
3. Väetisegraanuleid mõjutavad keskkonnatingimused.....	8
4. Nõuded väetisegraanulitele.....	9
4.1. Üldised nõuded	9
4.2. Laotamise eel.....	10
4.3. Laotamise ajal.....	11
4.4. Laotamise järel.....	18
Kasutatud kirjandus	21

1. Sissejuhatus

MTÜ Põllukultuuride klasteri üks eesmärk on granuleeritud maheväetiste prototüüpide arendamine. See sisaldab järgmisi innovatsioonitegevusi:

- **Granuleeritud maheväetiste lähtematerjalide kaardistamine ja analüüs.** Hinnatakse seadusandlike regulatsioonide, et tagada mahetootmise nõuetele vastavus. Hangitakse ja vajadusel eeltöödeldakse granuleerimiseks vajalikud lähtematerjalid. Teostatakse lähtematerjalide täiendavad laboratoorsed analüüsid. Alategevused käsitlevad mitmetoimeliste lubiväetiste võimalikke lähtematerjale ning krohmseentega rikastatud maheväetiste lähtematerjale.
- **Granuleerimise protsessi ja retsepti arendus.** Laboratoorsel granuleerimisseadmel sobivate lähteainete (põlevkivituhk, biosüsi, jm lisandid), sideainete sobivate vahekordade ning granuleerimisprotsessi parameetrite välja töötamine. Graanulite kuivamiskiiruse määramine tööstusliku protsessi optimeerimiseks. Tehakse graanulite tugevuse ja vastupidavuse määramine erinevate retseptide, fraktsioonilise koostise ja niiskussisalduste järgi. Laboratoorse granulaatoriga toodetakse KBFI poolt väetise prototüüpide väiksemahulised partiid labor- ja nõukatsete jaoks. Graanulite valmistamine masinkäideldavuse testimiseks ning põld-, tootmis- ja demokatseteks tehakse partner Ecolan OY eksperimentaalse ja tööstusliku granuleerimisseadmetega.
- **Labor- ja nõukatsed, taimkatsed kontrollitud tingimustes.** Väetiste prototüüpidega viiakse läbi laboratoorsed analüüsid, inkubatsioonikatsed ja taimkatsed kontrollitud tingimustega kasvuruumis ja kasvuhuones eesmärgiga hinnata nende efektiivsust ja mõju keskkonnale.
- **Maheväetiste prototüüpide masinkäideldavuse testimine.** Koostatakse ülevaade väetisegraanulitele esitatavatest

tehnilistest nõuetest, teostatakse graanulite masinkäideldavuse testid ja viiakse läbi väetise külvi demokatse.

- **Välikatsed ja tasuvusanalüüs.** Labor- ja nõukatsetes kõige perspektiivsemaks osutunud väetise prototüüpidega viiakse läbi põld- ja tootmis-demokatse. Kogu protsessi ahelale tehakse tasuvusanalüüs.
- **Ristöieliste nuutri biotõrje võimalused.** Laboratoorselt ja nõukatsetes ning tootmistingimustes selgitada biopreparaatide ja loodavate maheväetiste mõju ristöieliste nuutri levikule.

Käesolev aruanne on loodud innovatsioonitegevuse **Maheväetiste prototüüpide masinkäideldavuse testimine** raames, mille üks eesmärk on koostada ülevaade väetisegraanulitele ja nende käitlemisele esitatavatest tehnilistest nõuetest.

Nõuded on vajalikud selleks, et:

- sätestada graanulite omadused, mis peaks püsima teatud piires alates valmimisest kuni mulda jõudmiseni;
- sätestada nõuded graanulite käitlemistingimustele, mille korral graanulite omadused on tagatud;
- mullas toimuvad protsessid saaks muuta graanulis olevad ained sihrühmadele (taimed ja mikrobioloogilised rühmad) kättesaadavaks;
- graanuleid oleks võimalik põllu pinnaühikule laotada ettenähtud koguses – nii ühtlase kui ka asukohapõhise laotamise korral.

Arendatavate mahegraanulite lähteaineteks on: põlevkivituhk, biosüsi, vinass ja lihakondijahu. Kuna mitmetoimelise lubiväetise põhikomponendiks kavandatud põlevkivituhal ei olnud projekti taotlemisel veel mahetootmises kasutamise luba, siis laiendati lähtematerjalide valikut puutuha ning lubjakivijahuga. Osades maheväetiste prototüüpides kasutatakse krohmseeni.

Väetisegraanulitele esitatavate tehniliste nõuete kirjeldamiseks on vaja koostada ülevaade: tehnoloogilistest etappidest, mida väetisegraanul läbib teekonnal alates tehasest kuni põllul oleva taimeni; väetisegraanuleid mõjutatavatest keskkonnatingimustest neil etappidel;

nõuetest graanulitele sõltuvad tehnoloogilisest etapist ja ohutusnõuetest väetisegraanulitele.

Ülevaade antakse ka nõuetest mineraalväetiste graanulitele ja nende graanulite füüsikalistest omadustest.

2. Tehnoloogilised etapid väetisegraanuli liikumisel tehasest kuni põllu mulda

Tehnoloogilised etapid, mida väetisegraanul võib läbida teekonnal tehasest kuni taimeni põllul, on järgmised:

- laadimine tehase hoidlast veokile;
- vedu väetist müüva ettevõtte hoidlasse;
- hoiustamine müüja hoidlas;
- laadimine hoidlas veokile;
- transport põllumajandusettevõttesse;
- laadimine talu lattu või põllule (joonis 1);
- ettevõttes hoiustamine (joonis 2);
- laadimine taluhoidlast veokile (joonis 3);
- vedamine hoidlast põllule (joonis 4);
- põllul laadimine laoturile (joonis 5);
- laotamine põllule (joonis 6);
- väetise segamine mullaga.



Joonis 1. Suurkottide laadimine (*ICL Fertilizers Europe, 2012*)



Joonis 2. Suurkotid ettevõtte hoiukohas (*Bulk Bags – An Important Part of the Agricultural Industry, 2022*)



Joonis 3. Suurkottide laadimine hoiukohast haagisele (*Avant Equipment, 2022*)



Joonis 4. Suurkottide vedu haagisega põllule (*Consignment of Fertiliser Delivered to Galway, 2022*)



Joonis 5. Väetise laadimine suurkotist laoturi mahutisse (*Farmers Weekly, 2022*)



Joonis 6. Granuleeritud väetise laotamine põllule (Agro-Masz, 2022)

Sealt järgmine ja viimane etapp, mis ei ole enam tehnoloogiline, aga siiski väga oluline, on väetisegraanulite lagunemine ja väetises olevate toiteainete jõudmine taimedeni. See peaks toimuma nii mulla kui taimega seotud füüsikaliste, keemiliste ja bioloogiliste protsesside tulemusena. Tehnoloogiliste võtete eesmärk on neid protsesse nii majanduslikult kui keskkondlikult soodsalt mõjutada.

3. Väetisegraanuleid mõjutavad keskkonnatingimused

Väetisegraanuleid mõjutavad keskkonnatingimused tehnoloogilistel etappidel on:

- temperatuur (vahemik Eestis -30 kuni +30);
- õhuniiskus (vahemik Eestis 20% kuni 100%) (Õhuniiskus, 2022);
- vibratsioon;
- löögid kukumisel või masinaelementide poolt;
- surve ülemiste graanulite või teisalduselementide (transportööri labad, teo kruvipind jmt) poolt;

- hõõrdejõud libisemisel mööda torusid või kaldpindasid;
- bioloogiline kontakt (bakterid, seened, putukad, närilised, linnud jne);
- keemiliselt agressiivsed ained;
- elektromagnetilised mõjud (näiteks staatiline elekter);
- kiirgused (valgus, UV kiirgus, infrapunakiirgus, jt).

4. Nõuded väetisegraanulitele

4.1. Üldised nõuded

Väetisegraanulid ise peaks olema keskkonnale võimalikult ohutud ja **ei tohiks**:

- hälbida ettenähtud omadustest,
- kahjustada teisi graanuleid,
- kahjustada seadmete ja hoidlate konstruktsioone,
- kahjustada mulda,
- sisaldada keskkonnoohtlikke aineid üle lubatud piirmäära,
- eritada ohtlikke gaase või vedelikke,
- olla inimestele, loomadele ja lindude tervisele ohtlik kokkupuutel nahaga, või väikeses koguses allaneelamisel. Kui allaneelamine on tervisele ohtlik, siis graanulid peaks olema ebameeldiva maitse ja lõhnaga ning mitteisuäratava välimusega. Vt lisainfo kasti Väetiseseadus.
- Vt ka Põllumajandusministri määrus: Nõuded väetise koostisele väetise liikide kaupa. (Nõuded..., 2022) Vastu võetud 10.08.2022 nr 46.

Väetiseseadus (Väetiseseadus, 2022) (jõustumise kuupäev 16.07.2022) sätestab väetisele ja selle käitlemisele esitatavad nõuded, mis tagavad väetise ohutuse inimese ja looma elule ja tervisele, varale ja keskkonnale ning väetise soodsa mõju taimel ja taimekasvatustasandusele.

Väetiseseadust ei kohaldata:

- 1) töötlemata orgaanilisele väetisele;
- 2) töötlemata looduslikule väetisele;
- 3) reo- ja heitvee settele ning sellest valmistatud kompostile.

Seadust ei kohaldata väetise Eestist väljaspool Euroopa Liidu tolliterritooriumi asuvasse riikidesse ega territooriumidele (edaspidi liiduväline riik) ning Euroopa Liidu liikmesriiki toimetamise korral, kui välislepingust ei tulene teisiti.

Väetis peab olema:

- 1) nõuetekohase kasutamise korral ohutu inimese ja looma elule ja tervisele, samuti varale ja keskkonnale;
- 2) vastavuses väetise koostisele kehtestatud nõuetega;
- 3) nõuetekohaselt märgistatud;
- 4) kantud väetiseregistrisse (<https://portaal.agri.ee/avalik/#/vaetised>), välja arvatud ELi väetisetoode.

Väetise pakendi materjal ja konstruktsioon peavad tagama, et säiliks tootja garanteeritud väetise omadused ning et väetise käsitlemine oleks ohutu väetise tootjalt tarbijani liikumise kestel. Väetise pakend peab vastama pakendiseaduse ja väetiseseaduse nõuetele.

Tarbijale turustatakse väetist suletud müügipakendis, mida ei saa pärast avamist enam esialgsel viisil sulgeda.

Väetise müügipakendil peab olema selgesti nähtav, loetav ja kustumatu eestikeelne märgistus, mis üheselt mõistetavalt kirjeldab väetise koostist ning väetise kasutamise otstarvet ja tingimusi.

Puisteväetise puhul või juhul, kui teavet ei ole võimalik kanda väetise pakendile selle kuju või mõõtmete tõttu, kantakse märgistus kaasasolevale teabelehele.

4.2. Laotamise eel

Laotamisele eelnevates tehnoloogilistes etappides tuleb tagada graanulite suuruse ja tiheduse ühtlikkus, et vältida väetise fraktsioneerumist enne väetiselaoturisse jõudmist. Seega peaks graanulid olema toodetud võimalikult ühtlase kvaliteediga ja peaks püsima terved.

Graanulite piisav kõvadus tagab, et hoiustamisel ülemised graanulid ei purustaks alumiseid. Graanulite omaduste hindamisel peab olema määratud suurim väetisekihi tusedus, mille korral on tagatud alumiste graanulite püsimine tervena. Yara soovitus on ladustada ühes vinas mitte rohkem kui kolme suurkotti, et vältida väetisegraanulite paakumist.

Graanulid peavad olema ka piisavalt kõvad ka selleks, et vastu panna:

- 1) laadimisel kukkumislöökidele ja laadimisseadmete survele (joonis 7);
- 2) transpordil nii veokis kui laoturi kastis vibratsioonile (joonis 8);
- 3) laotamiseadme löökidele (joonis 9).

Graanulid ei tohiks enne põllu pinnale jõudmist paakuda (vt jaotis 4.4).

Väetiste omaduste kontrollimine (Yara, 2022).

Väetisel peavad olema kindlad omadused, et saavutada ühtlane laotus. Seetõttu on oluline kontrollida, kas kogu väetis, mida kasutatakse, pärineb samast partiist või on kasutusel ka vanu laojääke. Ka sama tüüpi väetis võib olla toodetud erinevates tehastes, mis võib tähendada väikeseid erinevusi graanuli suuruses ja kujus. See tähendab, et ühe toote kaks partiid võivad vajada erinevaid väetisekülviku seadistusi ja eraldi testimist ning kalibreerimist.

Graanulid võivad ajaga laguneda, seega laojäägis olev vana väetise laotamise eel tuleb väetiselaoturit taasseadistada. Väetise omadusi mõjutaba ka vinnastamise kõrgus.



Joonis 7. Granuleeritud väetise laadimine laoturisse (Kuhn, 2022)



Joonis 8. Granuleeritud väetise transport laoturiga (*Farming Simulator 22*)



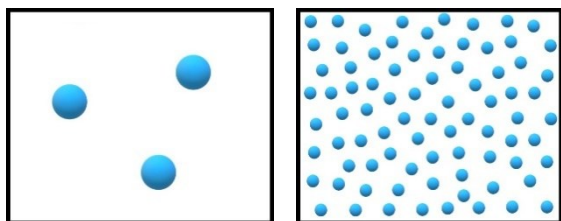
Joonis 9. Ketastega tsentrifugaallaotusseade (*Simulation of ..., 2022*)

4.3. Laotamise ajal

Laotamise kvaliteeti mõjutavad graanulite füüsikalised omadused on (vt ka tabel 2):

- 1) graanulite suurus;
- 2) graanulite tihedus;
- 3) puistetihedus;
- 4) graanulite kuju;
- 5) survetugevus;
- 6) voolavus;
- 7) pinna ja ruumala suhe;
- 8) hõõrdetegur ja
- 9) hügrosoopsus.

Sealjuures on oluline, et need omadused oleks kõigil ühe toote graanulitel võimalikult ühesugune ehk ühtlikkus. Graanulite omaduste **ühtlikkus** aitab tagada toiteaine ühtlase jaotuse põllu pinnaühiku kohta. Toiteainete ühtlasema jaotuse tagamiseks peaks väetiseosakesed olema võimalikult väikesed (joonis 10).



Joonis 10. Graanulite paiknemine pinnal kui graanulite läbimõõdu erinevus on kolmekordne aga graanulite ruumalade summa on sama

Samas, paisklaotusel on liiga väikeste ja kergete graanulite lennumaa lühike (kuna lennuinerts on õhutakistuse suhtes väike) ja nad alluvad ka lihtsamini tuuletriivile.

Graanulite ühtliku suuruse ja tiheduse korral väetis ei fraktsioneeru. Fraktsioneerumisel väiksemad/tihedamad osakesed kogunevad laoturi väetisekasti põhja ja suuremad/hõredamad pealmisesse kihti (joonis 11).

Samuti ei tohiks graanulid puruneda paisklaotamise käigus. Kui väetis puruneb, siis laotusühtlikkus väheneb, kuna erineva suuruse

ja tihedusega väetiseosakeste lennuomadused ja allumine tuuletriivile on erinev. See puudutab ka väetiste segu, kus osakeste füüsikalised omadused on erinevad.



Joonis 11. Väetiste segu fraktsioneerumine väetiselaoturi kastis (BASF-Effizient düngen, 2012)

Graanulite suurus

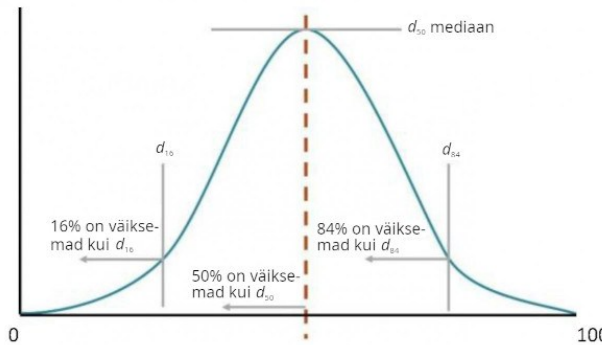
Graanulite suurus, peaks olema selline, et:

- nad mahuksid läbi avadest, mis jäävad teekonnale alates väetisekastist kuni väljumiseni laotamisorganist;
- graanulitega põllule annustatavad ained jaotuksid põllule võimalikult ühtlaselt (joonis 10);
- teatud tasemest nõrgem tuul ei tekitaks laotamise ajal graanulite olulist triivi;
- graanulid laguneksid ja seega toitained saaksid taimedele kättesaadavaks sobiva kiirusega (vt jaotis 4.3).

Uuringud on näidanud, et juba tuul kiirusega 3 m s^{-1} võib mõjutada graanulite maabumist paari meetri ulatuses (Cool jt, 2016).

Graanulite suurus on osakeste keskmise läbimõõduga kogu väetiseproovi kohta. Kuna väetis koosneb tegelikult erineva suurusega osakestest, siis esitatakse väetiste puhul tavaliselt osakeste suurusjaotus, mis näitab suuruse varieeruvust (joonis 14). Nii osakeste suurus kui ka suurusjaotus mõjutavad otseselt

spetsifikatsioonilehtedel esitada ühe või mõlemad andmed. Osakeste suurus (d_{50}), GSI, UI või SGN määratakse kas sõelte või osakeste suuruse analüsaatori abil. Mõlemad protsessid võimaldavad mõõta läbimõõdu suuruse jaotust, nagu on näidatud joonisel 14. (Fulton ja Port, 2016).



Joonis 14. Näide väetise osakeste jaotusest, ja kuidas väljenduvad d_{16} , d_{50} ning d_{84} osakaalud väetise portsjonis (Fulton ja Port, 2016)

Järgnev sisaldab teavet ja võrrandeid, mida kasutatakse nende erinevate mõõdikute arvutamiseks.

d_{50} on väetiseportsjoni keskmine osakeste suurus ja kõige enam kasutatav parameeter osakeste suuruse väljendamiseks. Enamik väetisetootjaid esitab ühikud tavaliselt millimeetrites.

SGN väärtused näitavad osakeste keskmist (mitte mediaan) suurus, mis on korrutatud 100-ga. Näiteks 1,5 mm keskmise osakese suurusega väetis võrdub $SGN = 150$. Sõelte kasutamisel tähendab $SGN=150$, et 50% osakestest jäi 1,5 mm avaga sõelale (Fulton ja Port, 2016).

Seguväetise tegemisel aitab SGN hinnata üksikute väetiste sobivust omavahel segamiseks. Soovitavad on segud, mille komponentide SGN-de erinevused ei ole üle 10. Sel juhul on väetiste segu võimalik ühtlaselt

laotada ja segregatsiooni oht minimaalne. Segregatsiooni all on siin mõeldud oluliselt erineva suuruse tõttu 1) graanulite fraksioneerumist laoturi kastis ja 2) põllul jaotuse ebahütlust (erinevad suurused erinevatel kaugustel) erineva lennukaugu tõttu (joonis 10). Tabelis 1 on esitatud SGN-i suunised.

Tabel 1. Lihtväetiste sobivus segamiseks lähtuvalt suuruse suuniväärtuste (*Size Guide Number - SGN*) erinevustest. (Fulton ja Port, 2016)

SGN	Eeldatav sobivus
0-10	Hea sobivus
20	Keskmine sobivus (käitlemise erivõtted võivad aidata vähendada segregatsioonist)
Üle 20	Ei sobi

GSI (*Granulometric Spread Index* - granulomeetriline jaotusindeks) on parameeter, mida kasutatakse väetise osakeste suuruse jaotuse või varieeruvuse hindamiseks. Mida väiksem on GSI väärtus, seda ühtlasem on väetise osakeste suurus ja eeldatavasti ka laotus. Ideaalis võiks arvutuslik GSI olla alla 15, et tagada ühtlane laotus. GSI arvutamise valem on järgmine:

$$\frac{(d_{84} - d_{16})}{2 d_{50}} 100$$

kus d_{16} , d_{50} ja d_{84} , on väetiseproovi graanulite läbimõõt vastavalt 16%, 50% ja 84% ja protsentiili tasemel (Fulton ja Port, 2016).

See tähendab, et kui võtta väetisproovist juhuslikkuse alusel 100 graanulit, reastada need väiksemast (d_1) suuremani (d_{100}) ja mõõta 17., 51. ja 85. graanuli läbimõõdud, siis on võimalik öelda, 16% graanulitest on väiksemad (või võrdne) kui 17. graanuli läbimõõt (d_{16}), 50% graanulitest on väiksemad (või võrdne) kui 51. graanuli läbimõõt (d_{50}) ja 84% graanulitest on

väiksem (või võrdne) kui 85. graanuli läbimõõt (d_{84}).

UI (*uniformity index* – ühtlikkuse indeks) on teine arvutuslik parameeter, mis väljendab osakeste suuruse suhtelist varieerumist. UI väärtus vahemikus 40–60 näitab, et väetiseosakesed on ühtlase suurusega. Mida suurem on UI väärtus, seda ühtlasem on osakeste suuruse varieeruvus väetiseproovis. Eelnimetatud vahemikust väljapoole jäävad väärtused näitavad osakeste suuruse jaotuse suurt varieeruvust. UI on väetiseproovi suuremate (d_{95}) ja väiksemate (d_{10}) graanulite suhe korrutatud 100-ga:

$$\left(\frac{d_{95}}{d_{10}}\right) 100$$

kus d_{95} on sõela ava suurus, millele jääb 95% väetiseproovist (väiksemad avad), d_{10} on sõela ava suurus, mille jääb 10% proovist (suuremad avad) (Fulton ja Port, 2016).

Graanulite tihedus. Tihedus ehk tõeline tihedus on materjali mass ruumalaühiku kohta, kusjuures välja on arvatud kõik tühimikud osakeste vahel ja sees. Tabelis 2 on esitatud mineraalväetiste graanulite tiheduse väärtused. Graanulite suurem tihedus:

- suurendab graanulite voolavust seadmetes tänu suuremale raskusjõule,
- vähendab tuule mõju graanulite lennukaugusele ja kandumist koos tuulega ehk tuuletriivi,
- suurendab lennukaugust tänu suuremale lennuinertsile õhutakistuse suhtes.

Puistetihedus (ingl k. *Bulk density*) on graanulite portsjoni massi ja ruumala suhe (kg m^{-3} või t m^{-3}), kaasa arvatud üksikute osakeste vaheline ruum. Määramiseks kaalutakse portsjon koos teatud mahu ja massiga mõõteanumaga. Puistetiheduse mõõtetulemusi saab esitada mitmel viisil, mistõttu on oluline silmas pidada,

millist neist väetise laotamisel kasutatakse. Puistetihedus võib olla "sõre" (nimetatakse ka "sõredalt valatud", ingl k. *Loose Pouring*) või "pakitud" (nimetatakse ka "koputatud"). Laoturite kontrollerite või arvutite seadistamisel kasutatakse termineid *Loose Pouring* või *Bulk density*.

„Sõre“ puistetihedus – mahutisse valatud materjali mass mahuühiku kohta, kui see on vabalt anumasse valatud. Mõõtmise standardprotokolli kirjeldab ISO 7837:1992.

„Pakitud“ puistetihedus – mahutisse valatud materjali mass mahuühiku kohta, mille korral on anumal seni mehhaaniliselt koputatud, kuni maht enam ei muutu. Mõõtmise standardprotokolli kirjeldab ISO 7837:1992.

Sarnaselt osakeste tihedusele, kui väetise puistetihedus on ebaühtlane, on tulemuseks ebaühtlik laotus. Kui laotatakse väetiseportsjoneid, mis on sama toitainete sisaldusega massiühiku kohta, kuid erinevate puistetihedustega, siis tuleb uue portsjoniga töö alustamise eel väetiselaotur uuesti reguleerida, kui laoturi annustamismehhanism toimib mahu alusel.

Graanulite kuju võib väetiste löikes erineda. Kuju võib liigitada ümarateks (kerajad või munajad), kuupjateks, ristkülikjateks ja ebakorrapärasteks. Karbamiid ja DAP (diammooniumfosfaat) on näiteks kerajad, samas kui kaaliumkloriid on ebakorrapärase kujuga. Kuju võib mõjutada materjali käitumist transpordi ja laotamise ajal. Ümarad graanulid tavaliselt veerevad piki laotusketta labasid, aga kipuvad mõnikord annustamisel pörklema ja tekitavad pöörlevale kettale/labale kergeid lööke. Ebakorrapärase kujuga graanulid pigem libisevad mööda laotusketaste labasid ja siin mõjutab hõõrdetegur graanulite algiirust rohkem kui ümarate graanulite puhul. Samuti on ebakorrapärased graanulid segregatsioonile kalduvad kui ümarad graanulid. Erineva

kujuga väetiste segamine suurendab selgelt segregatsiooni võimalust. Kuid graanulite suuruste erinevus mõjutab segregatsiooni palju rohkem kui nende kuju (Fulton ja Port, 2016).

Survetugevus on *International Fertilizer Development Center* defineeritud kui graanulite vastupidavus deformeerumisele või purunemisele rõhu all (IFDC, 1986). Survetugevus on eriti kasulik granuleeritud materjali käitlemiseks ja ladustamiseks oluliste omaduste määramisel ning koormuspiiride määramisel kottides või puistes ladustamisel. Survetugevust väljendatakse sel põhjusel kg/graanuli kohta. Survetugevus njuutonites (N) on jõud, mida graanulid suudavad enne purunemist taluda.

Ladustamine, transport ja laotamine võivad mõjutada granuleeritud väetise osakeste tihedust ja osakeste suurust. Purunemise tõttu võib nende omaduste varieeruvus olla segatud väetistes suurem kui üksikväetiste puhul, mistõttu tekivad suuremad probleemid peenosise ja tolmuga. Seetõttu on oluline arvestada graanulite survetugevust, et tagada põllul ühtlik jaotus.

Survetugevus mõjutab otseselt puistelaiust ja laotusketta lubatud pöörlemissagedust. Tugevamaid graanuleid saab laiali laotada kõrge pöörlemissagedusega (üle 800 p min⁻¹). Õrnu graanuleid tuleb laotada väiksema pöörlemissagedusega, mille tulemuseks on aga väiksem puistelaius. Õrnu graanuleid tuleks laotada pöörlemissagedusega alla 800 p min⁻¹ ja pöörlemissageduse eriväärtusena määratakse ketta suurim pöörlemissagedus, mille juures ei täheldata graanulite purunemist. Kiire viis survetugevuse mõõtmiseks põllul on üksikute graanulite muljumine pöidla ja nimetissõrmega:

1) pöidla ja nimetissõrme vahel purustatud graanulid on "õrnad"; laotusketta pöörlemissagedus peaks tavaliselt olema alla 700 p min⁻¹;

2) nimetissõrme ja kõva pinna vahel purustatud graanul on "kesktugev"; laotusketta pöörlemissagedus peaks tavaliselt olema vahemikus 700–800 p min⁻¹;

3) nimetissõrme ja kõva pinna vahel purunematuks jääv graanul on „tugev“; laotusketta pöörlemissagedus peaks tavaliselt olema üle 800 p min⁻¹.

(Fulton ja Port, 2016)

Voolavus tähendab materjali võimet voolata niisketes tingimustes, seega on see oluline omadus, mida tuleb silmas pidada väetiste käitlemisel, annustamisel ja hoiustamisel. Voolavus võib mõjutada annustamise ja paiknemise täpsust. Paremini voolavaid materjale saab annustada suuremas koguses ja nende osakesed ei kipu transpordil kokku kleepuma. Niiskuse suurenedes kleepuvad vähem voolavad materjalid kokku, muutes nende annustamise ja ühtlase kasutamise raskeks. Halb voolavus suurendab osakeste segregatsiooni ja vähendab puistelaiust. Segatud väetiste voolavus mõjutab toote segregatsiooni ja puistelaiust. (Fulton ja Port, 2016)

Pinna ja ruumala suhe. Graanulite suuruse puhul on oluline osakese pinna pindala ja graanuli ruumala ehk pinna:ruumala suhe. Seda tähistatakse järgmiselt: SA:V (*Surface Area:Volume*) või SA/V. SA:V on oluline väetiste ja mullaparandusainete kasutamisel, sest see mõjutab toitainete omastamise kiirust. Mida suurem on graanulite pindala graanulite ruumala suhetes, ehk mida suurem on pindala:ruumala suhe, seda suurem osa graanulite ainest on kontaktis mullaga - see soodustab graanulites olevate toitainete kiiremat omastamist mullaelustiku ja taimede pool. Ja vastupidi, kui graanulite pindala:ruumala suhe on väike, siis on graanulite lagunemine ja seega nendega annustatud toitainete omastamine aeganõudvam. Kuigi

enamikul juhtudel soovivad tootjad toitainete kiiremat mõju, saab toote SA:V-d kasutada ka toitainete omastamise perioodi pikkuse reguleerimiseks, näiteks kui on vaja toota kontrollitult või aeglaselt toitaineid vabastavate väetiste tootmisel. (Fulton ja Port, 2016).

Väetisegraanulite pinna kvaliteet (Yara, 2022). Väetisegraanulite pinna katmine on oluline väetise kvaliteedi säilitamisel, sest kaitseb neid niiskuse ning mehaaniliste vigastuste eest käitlemisel. Graanulite pinna katmine tagab:

- vähenenud veeimavuse, kui väetist hoitakse niiskes keskkonnas;
- väiksema paakumise;
- vähema tolmu moodustumise.

Lisaks sellele kasutatakse graanulite pinna katmisel sageli pigmenti, et erinevatel toodetel oleks kindel värv ning neid oleks kergem ära tunda. Katmiseks kasutatavad ained parandavad väetiste kvaliteeti ning need on taimedele, mullaelustikule ning inimestele ohutud.

Hõõrdetegur on materjali ja muu pinna, näiteks laotusketaste, pinnase, õhu jms vahel tekkinud hõõrdumine. Suurem hõõrdetegur pikendab kontakti laotusketastega, põhjustades suurema väljumisnurga ja ebaühtlasema laotuse. Hõõrdetegur ja osakeste kuju on otseselt seotud sellega, kuidas ja millal granuleeritud väetiseosake laoturist väljub. (Fulton ja Port, 2016). Hõõrdumine on graanulite lagunemine tolmuks graanul-graanuli või graanul-seade kokkupuute tagajärjel. Hõõrdumine peaks olema võimalikult väike, et vähendada toote kadusid tolmunähtude ohtlikku töökeskkonda ja leevendada muid tolmu seotud probleeme. (Carlson ja Le Capitaine, 2022)

Hõõrdumist mõjutavad tegurid. Osakeste kuju avaldab otseselt mõju hõõrdumisele. Nurgelisel graanulitel on teravate servade pörkamise tõttu suurem hõõrdumine kui ümaratel graanulitel.

Sel põhjusel peetakse ümaraid graanuleid soositumateks (Carlson ja Le Capitaine, 2022).

Tolmu moodustumine (Yara, 2022). Väga suures koguses väetisetolmu (joonis 13) põhjustab töökohal tõsiseid ebamugavusi ja terviseriske. Seetõttu on enamikes riikides käitlemisel tekkida võiva tolmu hulk seadusega piiratud. Tolm ja peenikesed väetiseosakesed tekivad õhku tavaliselt selliste väetiste käitlemisel, millel on:

- suur veeimavus;
- graanuli pinna kehv struktuur ning tugevus;
- madal vastupidavus mehaanilistele vigastustele;
- palju mehaanilist kahjustusi käitlemisahelas;
- Käitlemine olnud kulunud seadmetega (nt kaabitsad, täitelaadurid, külvikud jne).

Ümbritsevasse keskkonda kanduv väetisetolm põhjustab nii majanduslikku kahju toitainete kao näol aga kui ka keskkonna reostamist



Joonis 13. Palju tolmu tekib kergesti purunevate väetisepelletite laotamisel paisklaoturiga (Kalvi Tamm)

Hügrooskoopsus. Hügrooskoopsete materjalide korral toimub toote ja ümbritseva atmosfääri vaheline niiskuse ülekandmine. Tulemuseks võib toote koostis erineda tootelehel olevast ning toote käitlemisel ja toimel võib esineda hälbeid.

Samuti võib see soodustada kristalliliste ühenduste teket graanulite vahel, mille tõttu toimub paakumine. Hügroskoopsust reguleeritakse üldiselt toote keemilise koostise abil, samuti pinnatöötuse või niiskuse imendumist takistavate pinnakatete abil. (Carlson ja Le Capitaine, 2022). Paakumise vältimiseks töödeldakse väetisi erinevate ainetega, mis sisaldavad pindaktiivseid ühendeid ja peenikest laenguteta pulbrit. Pindaktiivsed ained kontrollivad kristallide moodustumist, näiteks et ei tekiks tugevamaid kristallisildasid. Pulber vähendab väetiseosakeste pealispinna kontaktpinda. (Yara, 2022)

Mõned väga hügroskoopsed väetised märguvad tunduvalt kergemini ja seda madalama õhuniiskuse korral kui teised. Väetis hakkab vedelikku imama siis, kui õhu veeauru rõhk ületab väetise enda veeauru rõhku. Õhk sisaldab niiskust veeauruna ja seetõttu avaldab see veeauru rõhku (p_{H_2O}), mida määratakse temperatuuri ja õhuniiskuse abil. Soe õhk võib sisaldada rohkem vett kui külm. (Yara, 2022)

Vee sisseimamine väetise käitlemise ajal vähendab selle kvaliteeti. Teades õhutemperatuuri ja -niiskust ning väetise enda temperatuuri, saab määrata, kas väetis hakkab endasse vett imama või mitte. (Yara, 2022)

Tüüpiliselt tõuseb veeimavuse kõver madala õhuniiskuse korral aeglaselt, kuid teatud õhuniiskuse juures või vahemikus võib see tõusta hüppeliselt. Seda õhuniiskuse väärtust nimetatakse väetise kriitiliseks niiskuseks. Kriitiline niiskus läheb alla, kui õhutemperatuur tõuseb. Liiga suur väetiste veeimavus toob kaasa soovimatud tagajärjed (Yara, 2022):

- väetiseosakesed muutuvad järk-järgult pehmeks ja kleepuvaks;
- osakeste maht suureneb;
- osakesed hakkavad pragunema;
- toimub pleekimine, värvimuutused;
- väetiseosakeste tugevus väheneb;
- suureneb paakumise oht;
- suureneb risk tolmu ja peenikeste väetiseosakeste tekkimiseks;
- lao põrandad muutuvad niiskeks ja libedaks;
- stabiliseeritud ammooniumnitraat kaotab oma termostabiilsuse;
- põllule laotamise ühtlus võib väheneda;
- seadmed ummistuvad;
- tekib hulk kasutamiskõlbamatut väetist.

Lahustuvus. Samaselt hügroskoopsusele mõjutab lahustuvus ehk lahustumiskiirus üldist lagunemiskiirust. Üks viis selle reguleerimiseks on pinnatöötlus ja pinnakatted (Carlson ja Le Capitaine, 2022).

4.4. Laotamise järel

Väetisegraanulite omadused peavad tagama väetises olevate taimedele vajalike ainete jõudmise taimedeni ettenähtud vormis ja koguses.

Mulda jõudmise järel peaksid graanulid lagunema ja neis olevad ained lahustuma, et graanulites olevad toitained jõuaksid mullalahusesse. Lagunemist ja lahustumist soodustavad mulla suurem niiskus ja sobiv temperatuur (mullas olev vesi ei ole siis

külmunud ja protsessidele on optimaalne temperatuur vajalik).

Graanulite lahustumine peaks toimuma optimaalse aja vältel. Kui see toimub liiga kiiresti, siis on oht, et osa graanuleis olevaid toitained lendub ennem õhku või uhutakse sademetevee poolt sügavamatesse mullakihtidesse kui taimed jõuavad need ära tarbida. Kui aga lahustumine on liiga aeglane, siis suureneb tõenäosus, et pärast taimedepoolset tarbimise lõppu (kasvuperioodi lõppemise või koristuse tõttu) mullavette lahustunud toitained leostuvad.

Tabel 2. Andmed turul olevate mineraalväetiste graanulite kohta

Väetisegraanulite parameetrid	Parameetri määramise põhjendus	Parameetri keskmine	Parameetri vahemik
Suurus (mediaan - d_{50}), mm (Fulton ja Port, 2016)	Väiksem suurus tagab laoturis doseerimisseadmesse mahtumise, avade läbimise laoturis liikumisel ja toiteainete jaotuse põllul. Optimaalne suurus tagab paremad lennuomadused paisklaotusel ja nõrgema allumise tuuletriivile.	2,3	1,5–3,2
Kuju (Fulton ja Port, 2016)	Ümarad graanulid pigem veerevad mööda pindu (parem voolavus) ja hõõrduvad vähem (vähem tolmu) ning on ka vähem altid kihistuma.		
Tihedus, kg m ⁻³ (Fulton ja Port, 2016)	Suurem tihedus tagab laoturis hea voolavuse, head lennuomadused paisklaotusel ja nõrgema allumise tuuletriivile.	1600	1200–2000
Puistetihedus, kg m ⁻³ (Fulton ja Port, 2016)	Sisend väetise transpordi- ja hoiustamismahu vajaduse kavandamiseks.	960	720–1200
Puistenurok	Aitab hinnata väetise voolavust läbi tehniliste sõlmede. Mida väiksem on puistenurok, seda parem on voolavus.		
Granulomeetrilise jaotuse indeks (<i>Granulometric Spread Index – GSI</i>) (Fulton ja Port, 2016)	Ühtlasema suurusega graanulite korral on ka laotamisühtlus parem. Ideaalis võiks olla <15		
Ühtlikkuse indeks (<i>Uniformity Index – UI</i>) (Fulton ja Port, 2016)	Ühtlasema suurusega graanulite korral on ka laotamisühtlus parem. Väärtus 40–60 näitab, et osakesed on ühtlase suurusega, mida suurem number, seda ühtlasem		
Survetugevus, kg/graanulile (Fulton ja Port, 2016)	Graanuli purunemiskindlus hoiustatavas vimas.	3	0,8–5. Mõni väetiselik talub ka 48.
Löögitugevus (Fulton ja Port, 2016)	Soovitav on, et graanul kannataks väetiselaoturi laotamistaldriku pöörlemikiirust >800 rpm (graanul ei ole purustatav nimetissõrme ja laua vahel). Muidu tuleks laotamisel seda kiirust vähendada.		
Hügrokoopsus e veemavus	Kuni mulda jõudmiseni peaks graanulid olema võimalikult vähe hügrokoopsed, et ei toimuks paakumist, püsiks väetise kvaliteedi ühtlikkus ja ei suureneks väetise transpordikulu. Mullas peaks graanulid olema hügrokoopsed, see soodustab nende lagunemist ja toitainete omastatavust taimed poolt.		
Lahustuvus	Sellest sõltub, kui kiiresti erituvad graanulid olevad toitained mulda ja 1) saavad taimedele omastatavaks ning 2) muutuvad		

	leostumisaltiteks. See teadmine on sisendiks väetise laotamise ajastamisel.		
Paakuvus ehk graanulite kokkukleepuvus, mille tulemusel võivad tekkida klombid	Klompidel on väike voolavus, nad ei pruugi mahtuda läbi graanulite liikumisteel olevate avade ja kanalite ning tekitavad seetõttu ummistusi. Nii ummistuste kui klompide suuruse tõttu muutub paakunud väetise laotus ülimalt juhitamatuks ning väetise tõhusus väheneb oluliselt. Samas suureneb oluliselt oht keskkonnale.		
Abrassiivsus, hõõrdetegur (Fulton ja Port, 2016)	Abrassiivsed materjalid kulutavad kiiremini pindu mida mööda nad libisevad ja seega mõjutavad nende pindade eluiga. Sealjuures nende pindade materjaliosakesed kanduvad keskkonda tekitades peenosakestena reostust.	0,5	0,3–0,7
Ladustamiskihi suurim tusedus	Väetise omaduste hindamisel peab olema määratud suurim väetisekihi tusedus, mille korral on tagatud alumiste graanulite püsimine tervena.		
Graanuli lennukaugus paisklaotusel	Sisend väetiselaoturi töökiiruse ja efektiivse haardelaiuse määramisel, väetiselaoturi seadistamisel ja laotamise tootlikkuse arvutamisel.	Sõltub graanulite ja väetiselaoturi omadustest.	

Kasutatud kirjandus

- Agro-Masz, 2022. <https://www.rolnymarket.eu/rozsiewacz-wapna-i-nawozu-rewo-agro-masz/#pid=10> (03.10.2022)
- Antille, D.L.; Gallar-Redondo, L. ; Godwin, R.J. (2013) Determining the particle size range of organomineral fertilisers based on the spreading characteristics of the material. ASABE Meeting Presentation, Paper Number: 13-1620197. DOI: 10.13031/aim.20131620197. https://www.researchgate.net/publication/259391115_Determining_the_particle_size_range_of_organomineral_fertilisers_based_on_the_spreading_characteristics_of_the_material (05.10.2022)
- Avant Equipment, 2022. <https://www.avantequipment.co.uk/avant-loader-attachments-big-bag-transporter.html> (03.10.2022)
- Nõuded..., 2022. Nõuded väetise koostisele väetise liikide kaupa. <https://www.riigiteataja.ee/akt/113082022002> (03.10.2022)
- BASF-Effizient düngen. 2012. Mischdünger und ihre Tücken. <https://www.effizientduengen.de/files/mischduenger.php> (01.01.2012)
- Bulk Bags – An Important Part of the Agricultural Industry, 2022. <https://westernpackaging.com/bulk-bags-important-part-agricultural-industry-today/> (03.10.2022)
- Carlson ja Le Capitaine, 2022. Physical Specifications for Granular Fertilizer and Soil Amendment Products. <https://feeco.com/physical-specifications-for-granular-fertilizer-and-soil-amendment-products/> (22.11.2022)
- Consignment of Fertiliser Delivered to Galway, 2022. <https://www.ifa.ie/campaigns/consignment-of-fertiliser-delivered-to-galway/> (03.10.2022)
- Cool, S.R.; Pieters, J.G.; Van Acker, J.; Van den Bulcke, J.; Mertens, K.C.; Nuyttens, D.R.E.; Van De Gucht, T.C.; Vangeyer, J. (2016). Determining the effect of wind on the ballistic flight of fertiliser particles. Biosystems Engineering, 151. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2016.10.011. https://www.researchgate.net/publication/309432957_Determining_the_effect_of_wind_on_the_ballistic_flight_of_fertiliser_particles (05.10.2022)
- Farmers Weekly, 2022. <https://www.fwi.co.uk/arable/crop-management/nutrition-and-fertiliser/five-reasons-spring-fertiliser-applications-improve-yields> (03.10.2022)
- Farming Simulator 22. (05.10.2022)
- Fulton ja Port, 2016. Physical Properties of Granular Fertilizers and Impact on Spreading. Ohio State University Extension. <https://ohioline.osu.edu/factsheet/fabe-5501> (22.11.2022)
- ICL Fertilizers Europe, 2012. <https://www.iclfertilizers.com/Fertilizers/ICLFDDeutschland/Pages/PhotoGallery> (01.01.2012)
- IFDC, 1986. https://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PNABE495.pdf (22.11.2022)
- Kuhn, 2022. <https://www.kuhn-usa.com/crop/fertilizer-spreaders/axis-402-502-h-emc-w#q=1&slide=5> (05.10.2022)
- Simulation of Granular Organic Fertilizer Application by Centrifugal Spreader, 2022. <https://www.mdpi.com/2073-4395/11/2/247> (05.10.2022)
- Väetiseseadus, 2022 <https://www.riigiteataja.ee/akt/750350?leiaKehtiv> (03.10.2022)
- Õhuniiskus, 2022. Suhteline õhuniiskus (%) 1991–2020. <https://www.ilmateenistus.ee/kliima/kliimanormid/ohuniiskus/> (22.11.2022)
- Yara, 2022. Väetised ja ohutus. <https://www.yara.ee/vaetised-ja-ohutus/> (22.11.2022)