

MEDEDELINGEN LANDBOUWHOGESCHOOL
WAGENINGEN • NEDERLAND • 79-7 (1979)

HERSCHIKKING VAN STORTGOEDEREN
DOOR TANDEN VAN
GRONDBEWERKINGSWERKTUIGEN

(with a summary in English)

(ontvangen 16-III-79)

J. K. KOUWENHOVEN

*Vakgroep Grondbewerking, Landbouwhogeschool,
Wageningen, Nederland*

Mededelingen Landbouwhogeschool
Wageningen 79-7 (1979)
is ook gepubliceerd als proefschrift

INHOUD

| | |
|---|----|
| 1. INLEIDING | 1 |
| 2. MATERIALEN EN METHODEN | 2 |
| 2.1. Stortgoederen | 2 |
| 2.2. Tanden | 2 |
| 2.3. Modelbak | 2 |
| 2.4. Materiaaleigenschappen | 3 |
| 2.5. Inleggen van stortgoederen en markeurs | 3 |
| 2.6. Bepalingen | 3 |
| 3. RESULTATEN | 5 |
| 3.1. Menging en ontmenging van grondaggregaten (I) | 5 |
| 3.2. Menging van glasbollen (II) | 5 |
| 3.3. Diameter en mechanisch gedrag van glasbollen (III) | 6 |
| 3.4. Ontmenging van glasbollen (IV) | 7 |
| 3.5. Ontmenging in het veld (V) | 7 |
| 4. SUMMARY | 9 |
| 4.1. Introduction | 9 |
| 4.2. Methods | 9 |
| 4.3. Results | 9 |
| 4.3.1. Rearrangement of soil aggregates by tines (I) | 10 |
| 4.3.2. Rearrangement of glass spheres by tines (II; IV) | 10 |
| 4.3.3. Particle properties and handling factors (III) | 10 |
| 4.3.4. Rearrangement of bulk solids in the field (V) | 11 |
| Enige benamingen en definities | 12 |
| Enige afbeeldingen van materialen en methoden | 16 |

Deze publikatie is een samenvatting van een onderzoek dat uitvoerig wordt behandeld in de volgende tijdschriftartikelen:

- I. J. K. Kouwenhoven & R. Terpstra: Mixing and sorting of granules by tines.
J. agric. Engng Res. 15(1970): 129-147.
- II. J. K. Kouwenhoven & R. Terpstra: Mixing of glass spheres by tines.
J. agric. Engng Res. 18(1973): 321-332.
- III. J. K. Kouwenhoven & R. Terpstra: Effect of sphere diameter on the mechanical behaviour of glass spheres.
J. agric. Engng Res. 20(1975): 363-378.
- IV. J. K. Kouwenhoven & R. Terpstra: Sorting of glass spheres by tines.
J. agric. Engng Res. 22(1977): 153-163.
- V. J. K. Kouwenhoven & R. Terpstra: Sorting action of tines and tine-like tools in the field.
J. agric. Engng Res. 24(1979): 95-113.

1. INLEIDING

Een karakteristiek effect van grondbewerkingswerktuigen is het verplaatsen van grond. Hierbij treedt veelal, vooral bij gebruik van getande grondbewerkingswerktuigen, ontmenging op. De factoren, die de snelheid en mate van ontmenging beïnvloeden en de wijze waarop het proces verloopt, zijn nader bestudeerd in aansluiting op de resultaten van het in de twintiger jaren in Duitsland verrichte onderzoek naar de herschikking van stortgoederen door tanden.

Stortgoederen komen veelvuldig voor op landbouwbedrijven en -industrieën, b.v. in de vorm van kunstmest, granulaten, granen, peulvruchten, aardappelen en bieten. Ook losse grond is als een stortgoed te beschouwen. Deze stortgoederen worden vervoerd, gemengd en gesorteerd, terwijl op het veld (vooral door getande grondbewerkingswerktuigen) relatief grote kluiten, stenen, knollen en stolonen naar het oppervlak worden gebracht, terwijl zaden, kunstmest e.d. in de grond worden gebracht door hetzelfde proces, ontmengen of sorteren genaamd.

Dit vindt plaats in de tweede fase van losmakende grondbewerkingen (volgens de klassifikatie van Koolen, 1977)*, die wordt gekenmerkt door sterke relatieve bewegingen tussen de korrels, in dit geval grondaggregaten en bijvoorbeeld zaden of kunstmestkorrels.

Daar onderzoek naar mengen en sorteren, samengevat in de term 'herschikken', van stortgoederen weinig zinvol is, wanneer het gedrag en de eigenschappen van de betrokken stortgoederen niet bekend zijn, is ook aandacht besteed aan het bepalen van taludhoeken en vastestoffrakties, zoals die beïnvloed worden door o.a. grootte, vorm, oppervlakteruwheid en dichtheid van de korrels.

In het veld worden de resultaten, afgezien van het effect van de genoemde eigenschappen, beïnvloed door behandelingsfactoren, zoals vochtgehalte, grootte, vorm, stand en voortbewegingssnelheid van de tanden en door het aantal bewerkingen.

De invloed van de korreleigenschappen en behandelingsfactoren op de herschikking van korrels is bestudeerd in een modelproef. Daar de maximumsnelheid 1 m/s bedroeg zijn door 'spuiten' veroorzaakte effecten vrijwel buiten beschouwing gebleven. Oorspronkelijk zijn luchtdroge grondaggregaten gebruikt, die in verband met de hoge eisen aan slijtvastheid en reproduceerbaarheid, al spoedig zijn vervangen door glasbollen, die binnen iedere grootteklasse zeer homogeen waren.

Met de uit dit onderzoek verkregen kennis van de processen kan men in principe de effecten van getande grondbewerkingswerktuigen onder bepaalde omstandigheden verklaren, beïnvloeden en voorspellen.

* Meded. Landbouwhogeschool, Wageningen 77-17(1977).

2. MATERIALEN EN METHODEN

2.1. STORTGOEDEREN

Bij de proeven zijn de volgende stortgoederen gebruikt;

- Luchtdroge aggregaten van Almkerkklei (ca. 40% <math>< 2 \mu\text{m}</math>) in de frakties: <math>< 3 \text{ mm}</math>, 3-6 mm, 6-10 mm en 10-20 mm. De gewichtspercentages van de frakties in mengsels bedroegen respectievelijk: 40%, 20%, 20% en 20%.
- Glasbollen van de firma Sigmund Lindner, 8581 Warmensteinach, West-Duitsland, met nominale diameters van 3 mm, 5 mm, 8 mm en 12 mm. In mengsels is van elk der frakties een gewichtspercentage van 25% gebruikt.
- Zaden van verschillende landbouwgewassen bij vergelijking van materiaaleigenschappen.
- Cokes in de fractie 6-10 mm.

Als markeurs zijn geverfde grondaggregaten en gekleurde glasbollen gebruikt.

2.2. TANDEN

In de praktijk toegepaste eggetanden waren ter beschikking gesteld door de firma F. Hesterberg & Söhne, 5828 Ennepetal-Milspe/Westf., West-Duitsland, door bemiddeling van de Heer G. N. van Lobbergt; I type veertand is verschaft door de firma Lely Industries te Maasland; de modeltanden zijn vervaardigd door de TFDL te Wageningen. Deze waren gemaakt van roestvrij staal, ze hadden een breedte van 30 mm en zijn toegepast in drie standen: Stekend (120°), recht (90°) en slepend (60° ten opzichte van de horizontaal in de bewegingsrichting van de tand).

2.3. MODELBAK

De bak waarin de modelproeven zijn uitgevoerd was eveneens vervaardigd door de TFDL te Wageningen. Hij was 2000 mm lang, 200 mm hoog en 300-500 mm breed. De glazen voorwand was in stappen van 50 mm verplaatsbaar en voorzien van een ruitwerk van $20 \times 20 \text{ mm}$.

Om de verplaatsingen van de korrels om de tand te kunnen lokaliseren, zijn de verplaatsingen vóór de tand gescheiden van de verplaatsingen achter de tand door de ruimte achter- respectievelijk vóór de tand, met platen op te vullen. Deze 'vulplaten' hadden dezelfde werkbreedte als de modeltand en werden bewogen door een gleuf in de verschuifbare zijwanden van de modelbak. In de lengterichting van de bak waren rails aangebracht, waarover een wagen met een reliëfmeter en een plaatsmeter kon worden verplaatst (afb. 1, 5 en 6).

Voor kwalitatieve metingen is gebruik gemaakt van de modeltanden, die langs

de glazen voorwand, gebruikt als symmetrievlak, werden voortbewogen en voor kwantitatieve metingen van 3, op een onderlinge afstand van 160 mm aan een ijzeren balkje bevestigde, praktijktanden. Dit balkje met tanden werd tussen de opeenvolgende werkgangen zodanig zijdelings verplaatst, dat de werking van een zigzag eg werd nagebootst. De gebruikelijke rijsnelheden bedroegen 0,01 m/s, 0,10 m/s, 0,45 m/s en 0,80 m/s.

2.4. MATERIAALEIGENSCHAPPEN

De oppervlakteruwheid en de onrondheid van de glasbollen van de 4 frakties konden worden vergeleken door toepassing van interferentiemikroskopie; de ruwheid van grondaggregaten, cokes en zaden is niet gemeten.

De grootte van de korrels is bepaald door 25 korrels elk 4 maal met een schuifmaat te meten; uit de verkregen resultaten is alleen van glasbollen de onrondheid berekend en van glasbollen, grondaggregaten en zaden de vormfaktor.

De korreldichtheid is bepaald met de pyknometermethode.

De massadichtheid is bepaald met behulp van grote vaten, zowel vóór als na trillen. Uit de daarbij verkregen gegevens is de vastestoffractie berekend.

Taludhoeken zijn op 4 manieren gemeten: Als storthoek, breukvlakshoek, 2-dimensionale breukvlakshoek en dynamische breukvlakshoek. De laatste twee zijn op vergelijkbare wijze gemeten voor glasbollen, grondaggregaten en verschillende zaden.

2.5. INLEGGEN VAN STORTGOED EN MARKEURS

Het stortgoed is in lagen ingelegd met behulp van een voorraadbak, voorzien van een uitloopplaat ter breedte van de modelbak. Hierbij liep een laag van één korreldikte bij een lage rijsnelheid (0,05 m/s) uit de bak. De laagdikte was bij het inleggen van homogene materialen evenredig met de korrelgrootte; bij heterogene stortgoederen zijn lagen van gelijke dikte ingelegd van materiaal dat vooraf volledig gemengd was (afb. 2).

Bij korrelgrootteverhoudingen $< 0,5$ was het noodzakelijk een correctie toe te passen voor ontmenging tijdens inleggen en monsternamen.

Na inleggen van heterogene stortgoederen met diameterverhoudingen $> 0,5$, is ten behoeve van de reproduceerbaarheid het gehele profiel nog enigszins verdicht door tikken; de vastestoffractie nam hierdoor toe met 6 à 7%.

2.6. BEPALINGEN

Voor kwalitatieve bepalingen is na voorwaartse beweging de modeltand gefixeerd en het reliëf in de omgeving van de tand opgemeten (1×1 cm). Verder

zijn de verplaatsingen van de markeurs bepaald met de plaatsmeter. Met behulp van deze metingen konden stroombanen worden samengesteld (afb. 3, 4 en 6).

Met de reliëfmeter kon niet alleen het door de tand veroorzaakte mikroreliëf worden bepaald, maar ook het transport in de rijrichting, de dilatatie en de vastestoffractie voor en na de bewerking (afb. 5).

Verplaatsingen tijdens het bewegen van de tand zijn vastgelegd met een Bolex 16 mm filmkamera, die aan dezelfde arm als de tand was bevestigd. De resultaten zijn geanalyseerd met een Proti filmlezer, waarmee elk filmbeeldje apart kon worden bekeken (afb. 1 en 3).

Voor kwantitatieve bepalingen is het bewerkte profiel in lagen uitgeschept, waarna de lagen werden uitgezeefd (bij grond), of de aantallen uit iedere laag afkomstige markeurs geteld. Bij het mengen van homogene stortgoederen zijn m.b.v. de uitwisselingspercentages na 2 bewerkingen, 'mengschema's' opgesteld voor het door simulatie bepalen van de mengsnelheid. De ontmengsnelheid van heterogene stortgoederen kon alleen worden bepaald door bewerkingen uit te voeren, totdat het evenwicht vrijwel was bereikt.

De invloed van de korreldichtheid is bepaald door het aantal korrels van de lichtste soort voor en na bewerking aan het oppervlak te tellen.

Bij sorteren is de mate van ontmenging, na een bepaald aantal bewerkingen, uitgedrukt in de gemiddelde afwijking van de situatie bij volledige menging. Deze heeft het voordeel dat alle korreleigenschappen erin hebben meegespeeld, maar het nadeel dat hij afhankelijk is van het aantal monsterlagen. Hij moet worden berekend voor de fractie die het laatst de evenwichtstoestand bereikt.

3. RESULTATEN

3.1. MENGING EN ONTMENGING VAN GRONDAGGREGATEN (I)

Een zaaibed is in feite een, meestal als gevolg van bewerking met getande grondbewerkingswerktuigen, min of meer ontmengd heterogeen stortgoed. In verband daarmee is het eerste onderzoek naar de herschikking van stortgoederen door tanden van grondbewerkingswerktuigen, voor wat het kwantitatieve gedeelte betreft, uitgevoerd met in de praktijk gebruikte eggetanden in een mengsel van luchtdroge grondaggregaten. Hierbij bleek dat brede, stekende tanden bij lage rijnsnelheden een stortgoed met grote verschillen in korrelgrootte en korrel-dichtheid en met een laag vochtgehalte snel ontmengden.

De ontmenging bleek voornamelijk vóór de tand plaats te vinden en door een gelijktijdig achter de tand optredend mengproces weer gedeeltelijk te worden gereduceerd. Uit de verplaatsing van gemarkeerde deeltjes vanuit een vergelijkbare uitgangspositie, konden stroombanen worden gekonstrueerd. Een snelle ontmenging ging vaak gepaard met een langzame menging.

Voor homogene stortgoederen kon het verloop van het mengproces, met behulp van de percentages uitgewisseld materiaal na 2 bewerkingen, verder worden gesimuleerd om de mengsnelheid te berekenen en met één getal te karakteriseren. Het verkrijgen van deze gegevens vereiste een grote mate van nauwkeurigheid, die alleen kon worden bereikt door een hoge graad van uniformiteit van het stortgoed en door een zorgvuldige monstername.

Bij heterogene stortgoederen kwamen grote korrels bij een korrelgrootteverhouding van $>0,5$ zowel voor als achter de tand relatief hoog in het profiel terecht en bereikten het eerst hun eindniveau. Bij diameterverhoudingen $<0,5$ vielen de kleine korrels door de gaten tussen de grotere korrels. Dit gebeurde vaker naarmate meer materiaal in beweging gebracht werd, wat vooral bij (ver)brede en stekende tanden het geval was.

Een volledige ontmenging kon door getande werktuigen niet worden bereikt, maar de mate van ontmenging in de evenwichtstoestand kon wel worden beïnvloed. De evenwichtstoestand werd gekenmerkt door het feit dat de gemiddelde verticale korrelverplaatsing tot nul was gereduceerd.

3.2. MENGING VAN GLASBOLLEN (II; III)

Om het herschikkingsproces beter te kunnen analyseren, is vervolgens het mengen apart bestudeerd. Hierbij is het meest gekeken naar verplaatsingen in het verticale vlak. In dwarsdoorsnede konden twee zones worden onderscheiden: Eén met een sterke naar beneden gerichte verplaatsing van weinig glasbollen, hoofdzakelijk achter de tand gelegen, en daarnaast één met een minder grote verplaatsing van veel glasbollen omhoog en opzij van de tand. De op- en neer-

waartse verplaatsingen zijn positief gekorreleerd en bepalen de mengselnelheid.

Tijdens de voortbeweging bevond zich achter de tand een 'gat', dat na passage door van achteren en van opzij en door om de tand stromende korrels weer werd opgevuld. Korrels, die via de bovenkant van het 'gat' stroomden werden het sterkst naar beneden verplaatst.

Met hogere rijsnelheden en meer stekende tanden werd het 'gat' dieper en kwamen korrels uit diepere lagen in een gunstige positie om (minder ver) naar beneden te gaan, totdat het 'gat' tot aan de bodem reikte. Het beschreven proces kon dan niet meer plaats vinden; de korrels stroomden in meer horizontale banen om de tand, waardoor de verticale verplaatsingen afnamen. Dit kwam tot uiting in een lagere mengselnelheid. De dilatatie, de hoogte en de afstand van de zijdelingse opstuwing tot de tand namen bij een hogere rijsnelheid en een meer stekende tandstand echter toe.

De invloed van korrelgrootte van de glasbollen op de mengselnelheid was aanvankelijk niet duidelijk omdat de verschillen in gemiddelde verticale verplaatsing gering waren, terwijl de mengselnelheid geen verband met de diameter liet zien. Verder onderzoek liet echter een duidelijk positief verband zien tussen de grootte van de korrels en de mengselnelheid. Dit kon worden verklaard uit het verschil in verticale spreiding vóór de tand onder invloed van de korrelgrootte.

3.3. DIAMETER EN MECHANISCH GEDRAG VAN GLASBOLLEN (III)

De relatieve korrelgrootte is de belangrijkste eigenschap die van invloed is bij de herschikking van stortgoederen door tanden. De gebruikte glasbollen bleken vrijwel niet te verschillen in oppervlakteruwheid, korreldichtheid en onrondheid.

Bij de modelproeven speelde ook de interactie van de korrelgrootte met de wand van het vat en met de wijze en snelheid van inleggen een rol. Dit kwam tot uiting in de vastestoffractie van het uit het betreffende stortgoed samengestelde bed.

Empirisch is vastgesteld, dat voor het maken van bedden van gelijke dichtheid de hoeveelheid ingelegd materiaal per tijdseenheid evenredig moest zijn met de korrelgrootte van het stortgoed. Na tikken en na correctie op wandinvloed werd een (berekende) vastestoffractie van 0,64 bereikt voor de grootste fracties.

De taludhoek van de glasbollen is op 4 verschillende manieren bepaald: α_p , storthoek; α_c , breukvlakshoek; α_{d2} , 2-dimensionale breukvlakshoek en α_{sj} , dynamische breukvlakshoek. De taludhoek weerspiegelt de stroombaarheid van een stortgoed. De stroombaarheid neemt af naarmate de taludhoeken groter worden. Alle taludhoeken namen toe met de grootte van de korrels. De taludhoek α_{d2} , bleek voor glasbollen gemiddeld 27° , voor zaden 31° en voor grondagregaten 42° te bedragen.

De methode met de spleetbak (α_{d2}) lijkt het meest geschikt om te standaardiseren. Daarbij moeten de bodem en de wanden van de spleetbak aan duidelijke eisen van ruwheid en gladheid voldoen, terwijl de lengte, maar ook de andere afmetingen niet te klein moeten zijn (minstens 50-maal de korrelgrootte).

Het uiteindelijk effect van het bewerken van een bed wordt verder voor een groot deel bepaald door behandelingsfactoren, zoals de rijsnelheid en stand van de tand.

3.4. ONTMENGING VAN GLASBOLLEN (IV)

Ontmenging is opgetreden in alle drie coördinaatrichtingen: De kleinste korrels werden het verst in de rijrichting meegenomen en naar beneden verplaatst, terwijl de grootste bollen het verst opzij rolden. Evenals bij het mengen, had bij het ontmengen de verplaatsing van de korrels in het door de tand bewerkte deel van het bed, in dwarsdoorsnede gezien, een draaiend karakter.

De verschillen in verplaatsing tengevolge van de korrelgrootte veroorzaken de ontmenging. De verschillen waren het grootst in de hogere lagen van het door de tand bewerkte gedeelte van het bed. Ontmengen bleek niet alleen voor de tand op te treden, maar ook, zij het in geringere mate, achter de tand. Bij lage rijsnelheid en een slepende tandstand lag de nadruk op de ontmenging vóór de tand.

Vertikale verplaatsingen namen af met een toenemende rijsnelheid en een meer stekende tandstand. Met een toenemend aantal bewerkingen nam de absolute verticale verplaatsingsafstand van de samenstellende korrels af, tot een konstante waarde in de evenwichtstoestand. Geringe verticale verplaatsingen in de evenwichtstoestand wezen op een aanzienlijke mate van gelaagdheid, die weer gepaard ging met een relatief sterke dilatatie.

De mate van ontmenging in de evenwichtstoestand, mede bepaald door de menging achter de tand, was sterker met toenemende rijsnelheid en een meer stekende tandstand. Het aantal bewerkingen om de evenwichtstoestand te bereiken was echter relatief groot.

Het evenwichtsniveau werd het eerste bereikt door de grootste korrels, wanneer de kleine korrels niet door de gaten tussen de grotere korrels infiltreerden. Was dit laatste wel het geval, dan bereikten de kleinste korrels het eerst een evenwichtsniveau.

3.5. ONTMENGING IN HET VELD (V)

Bij bewerkingen in het veld wordt de ontmenging beïnvloed door verschillen in stroombaarheid van de betrokken stortgoederen en voor een groot deel bepaald door de korrelgrootteverhoudingen, die in het veld altijd zodanig zijn dat korrelinfiltratie optreedt. De vastestofffractie neemt af naarmate de korrels minder in grootte verschillen.

De stroombaarheid van een heterogeen stortgoed lijkt groter te zijn dan de stroombaarheid van de grootste fraktie in dat stortgoed. Vuil en vocht doen de stroombaarheid afnemen. Bovendien spelen ook behandelingsfactoren een rol, die wat vocht en rijsnelheid betreft, meestal op een hoger niveau liggen dan bij de modelproeven. Bij bepaling van materiaaleigenschappen, bleek de stroombaar-

heid zowel van glasbollen als van grondaggregaten en zaden af te nemen met een toenemende korrelgrootte, -dichtheid en oppervlakteruwheid.

In het veld blijken behandelingsfactoren geen kwalitatieve wijzigingen in het bij modelproeven gevonden proces te veroorzaken: Een grotere tandbreedte geeft een sterkere ontmenging. Daar er in de praktijk een positief verband bestaat tussen tandbreedte, tandafstand en de werkdiepte van de tanden, kan de invloed van de tandbreedte op de ontmenging niet zonder meer worden toegepast op het effect van een werktuig in het veld.

De bij de modelproeven gebruikte rijsnelheid komt ongeveer overeen met de loopsnelheid van trekdieren. In de gemotoriseerde landbouw is de rijsnelheid in het veld ongeveer tweemaal zo hoog. Het bij de modelproeven gevonden proces wordt dan minder belangrijk, maar de ontmenging in het horizontale vlak door 'spuiten' neemt toe. Dit laatste is nadelig voor het bedekken van met een zaaïmachine gezaaid zaad, maar een voordeel voor het oppervlakkig inwerken van op het oppervlak gestrooide korrels en het met grond bedekken van (kleine) onkruidplanten.

In een zaaibed neemt het aantal grote holten tussen de relatief grote aggregaten naar het oppervlak toe. Het beoordelen van de kwaliteit van een zaaibed aan het oppervlak is dan ook in feite onmogelijk. In de zaailaag is het aandeel van fijne aggregaten en kleine holten veel groter dan aan het oppervlak, terwijl ook de vastestoffractie veel groter is. De vastestoffractie van het zaaibed als geheel is tengevolge van stratifikatie echter afgenomen door de bewerking. Dit is gunstig ter beperking van watererosie. Voor de kieming van zaden is vooral de fractie < 3 mm, die de zaailaag een hoge vastestoffractie en een hoog vochtgehalte geeft, van groot belang.

Niet alleen fijne aggregaten, maar ook breedwerpig gestrooide zaden, granulaat en kunstmest worden door herschikking in de grond gebracht. Zaaionkruiden kunnen worden bestreden door het 'begraven' van de zaden of door de kleine onkruidplanten met grond te bedekken en wortelonkruiden door de rhizomen met getande grondbewerkingswerktuigen naar boven te brengen. Bij herschikking naar bovengebrachte stenen beperken erosie, terwijl aardappelverliesknollen door gebruik van getande werktuigen zo hoog mogelijk in het profiel worden gehouden, waardoor ze meer kans lopen te bevriezen.

Samenvattend kan men zeggen, dat het herschikken van stortgoederen op het landbouwbedrijf een belangrijk proces is, wat grotendeels met behulp van modelproeven kon worden geanalyseerd.

4. SUMMARY

4.1. INTRODUCTION

During tillage operations, soil aggregates and other bulk solids such as seeds, fertilizers, stones, tubers (left by the potato harvester) and roots, are often displaced from one layer to another by a sorting process causing the larger particles to be displaced into higher layers and smaller particles into lower layers. This process is influenced by particle properties and handling factors, and is counteracted by mixing.

The influence of particle properties and handling factors on mixing and sorting was studied in the laboratory both qualitatively and quantitatively.

4.2. METHODS

Most of the experiments were done in a model soil bin filled with glass spheres and worked with normal and model tines. Localization of the processes and flow of the particles around the (model) tines were determined by filming and measuring the displacement of coloured markers, whereas mixing and sorting intensity and the sorting degree were determined by sieving or by counting the markers from different layers after working the bulk solid with normal harrow tines.

Tines were used in three positions: Forward facing, straight and backward facing; travelling speeds were: 0.01, 0.10, 0.45 and 0.80 m/s. Four fractions of bulk solid were used, monosized and polysized. The influence of particle properties on angularity and fractional solids content were determined. Dilatancy and relief were measured by means of a micro-reliefmeter; positions were determined using a position indicator.

4.3. RESULTS

4.3.1. *Rearrangement of soil aggregates by tines (I)*

With respect to seedbed and seedbed preparation, experiments were started using dry soil aggregates as the bulk solid, that was accompanied by interparticle percolation. Sorting was characterized by sorting degree and sorting intensity and mixing by mixing intensity. It became apparent that mixing mainly occurs behind the tine and is influenced by the type and inclination of the tine and by tine travelling speed. The direct connection between particle size and mixing intensity was probably caused in front of the tine. Wider and more backward facing tines increased mixing intensity. Sorting mainly occurred in front of the tine. The greater the amount of material moved and the greater the difference in size of the particles involved, the higher was the sorting intensity.

The final effect of the rearrangement of bulk solids by tines as a result of sorting and mixing actions could only be understood if the various processes were studied separately.

4.3.2. *Rearrangement of glass spheres by tines (II; IV)*

Because of the necessity for high demands on uniformity of the bulk solid used, especially on the narrow limits of particle size (at mixing), dry soil aggregates were replaced by glass spheres. The sizes of glass spheres were chosen so that interparticle percolation did not occur, allowing the possibility of studying the flow of particles around the tine.

The experiments revealed that mixing occurs by a strong downward displacement of a small number of spheres behind the tine and by a small sideways and upward displacement of a large number of spheres alongside of the tine. Mixing intensity increases with a decreasing travelling speed, more backward facing inclination of the tines and larger particle diameters.

Both backward facing tine inclination and low travelling speeds had a similar effect on the mixing intensity. Differences in mixing intensity of monosized bulk solids mainly originated from differences in dispersion in front of the tine; dispersion was stronger with increasing particle size.

Even without interparticle percolation, sorting mainly occurred in front of the tine, strongest with low travelling speeds and backward facing tines. Sorting intensity decreased with an increase in travelling speed and a more backward facing inclination of the tines.

In the equilibrium state, the bulk solid was found to be sorted to a higher degree after working with a high travelling speed and forward facing tines. A high sorting degree was characterized by small vertical displacements at a pass of the tine, by a strong stratification and so by a relatively pronounced dilatancy.

When interparticle percolation was absent, sorting intensity was determined by the smallest fraction. Forward facing tines were accompanied by a relatively high sorting intensity and a high sorting degree.

4.3.3. *Particle properties and handling factors (III; V)*

Particle properties like size, shape, surface roughness and apparent particle density and handling factors such as size ratios, moisture content and travelling speed, influenced bed properties and sorting results: relatively large, oblong, rough and light particles were displaced into higher layers and vice versa. The process is accelerated, when the bulk solid is dry and worked at a low travelling speed.

For glass spheres, the diameter was the predominating particle property determining the results of the experiments. With an increasing sphere diameter, bed properties such as fractional solids content and angularity increased. In order to obtain reproducible beds for mixing experiments, the depth of the inserted layers was related to the diameter of the spheres involved. Tapping increased fractional solids content by an average of about 6 per cent.

Bed properties can only be determined significantly if determination methods

are standardized. For standardized methodology large containers with sufficiently roughened bottoms and very smooth walls, low speeds and tapping to improve reproducibility, are advised. The 2-dimensional angle of repose, α_{d2} , is the one that can be determined easily and objectively. The angles of repose increased and so flowability decreased, with an increasing particle size, surface roughness and apparent particle density. The fractional solids content of a cultivated layer is inversely related to the size ratio of the particles (and to the sorting degree).

4.3.4. *Rearrangement of bulk solids in the field (V)*

Particle properties are more varied in the field than in the model experiments; handling factors such as moisture content and travelling speed are higher.

Throwing and sorting by interparticle percolation normally occur in the field. Throwing offers the possibility of killing weed seedlings by covering them with soil and of incorporating granulated chemicals and broadcasted seeds superficially.

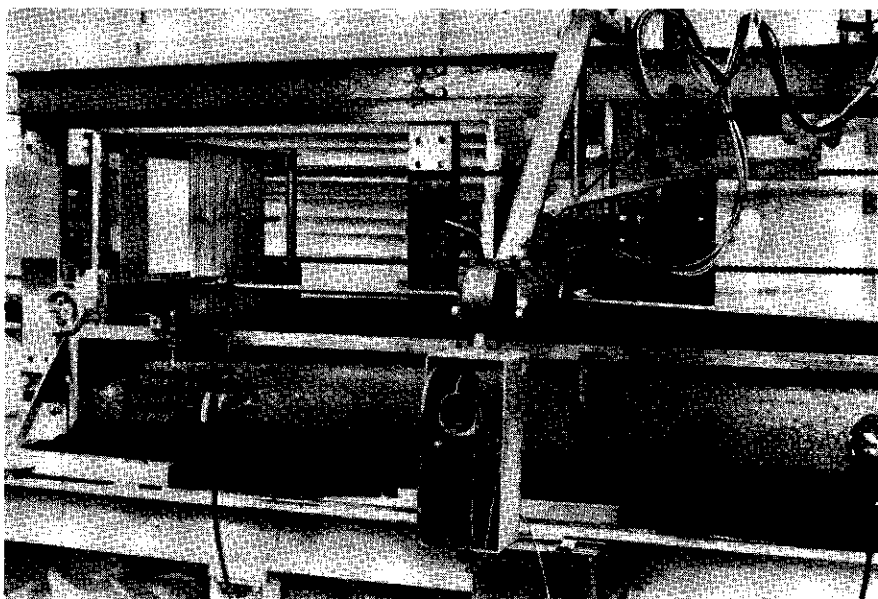
Sorting in the field is of paramount importance: fine soil aggregates, seeds and granulated chemicals are placed into or near the seed placement zone, clods and stones are transported upward with respect to erosion control and rhizomes are brought to the surface as a measure of mechanical weed control. When draught animals are used, sorting is predominant; when tractors are applicated, throwing becomes more important as the travelling speed increases.

Sorting intensity in the field is highest for forward facing and wide or widened tines and tine-like tools, when moisture content is low, with a great variation of flowability of the particles involved and with low (< 1 m/s) travelling speeds.

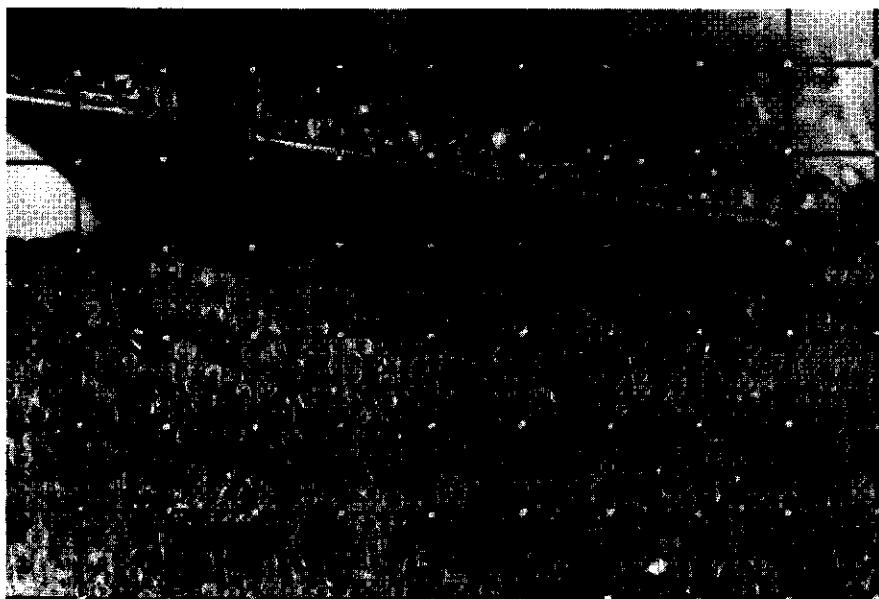
The effects of tined tillage tools in the field could largely be explained from model experiments using dry soil aggregates and glass spheres.

ENIGE BENAMINGEN EN DEFINITIES

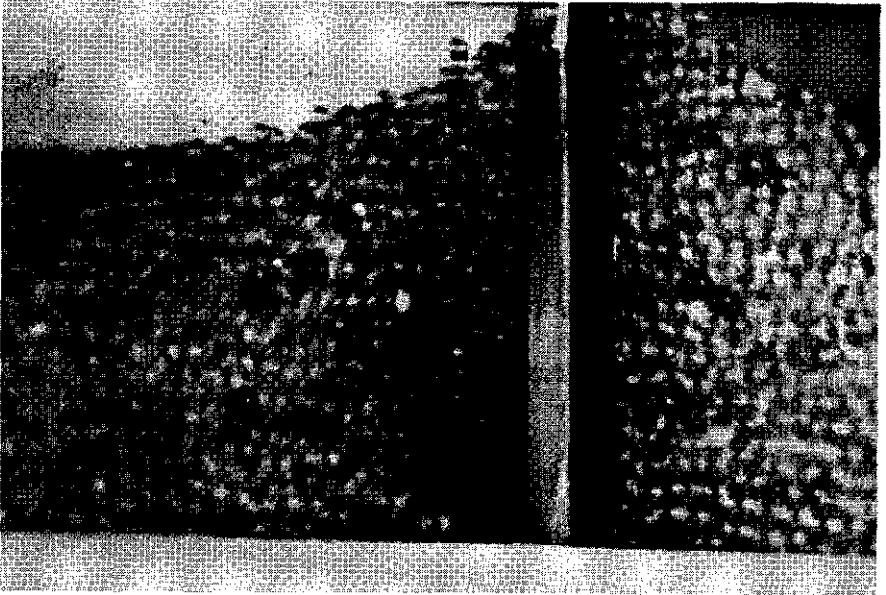
| Nederlandse benaming | Engelse benaming | Definitie |
|----------------------|---------------------------|---|
| Herschikken | rearrange | uitwisseling van korrels tussen lagen in een stortgoed door mengen en/of sorteren |
| Stortgoed | bulk solid | grote hoeveelheid afzonderlijke korrels die met elkaar of bijna met elkaar in aanraking zijn |
| Mengen | mixing | herschikken van korrels van een (homogeen) stortgoed tot een hogere graad van gemengdheid |
| Ontmengen | sorting | herschikken van korrels van een (heterogeen) stortgoed tot een lagere graad van gemengdheid |
| Taludhoek | angle of repose | hellingshoek van het vrije oppervlak van een onder vastgelegde omstandigheden gevormd bergje stortgoed |
| Vastestoffractie | fractional solids content | som van de korrelvolumes van een stortgoed gedeeld door het totaalvolume van dat stortgoed |
| Korrel dichtheid | apparent particle density | massa van een korrel gedeeld door het korrelvolume |
| Behandelingsfactoren | handling factors | alle factoren die de herschikking van een stortgoed beïnvloeden, behalve de korreleigenschappen |
| Sputten | throwing | verplaatsing van korrels door een werktuig (in dwarsrichting), waarbij ze tijdelijk niet met elkaar in aanraking zijn |
| Homogeen | homogeneous | zonder verschillen in korreleigenschappen die herschikking beïnvloeden |
| Vormfactor | shape factor | verhouding van de diameter van de ingeschreven bol ten opzichte van die van de omgeschreven bol van een korrel |
| Massadichtheid | apparent powder density | massa van een stortgoed, gedeeld door het totaalvolume van dat stortgoed, zonder de massa van de media in de tussenuitruimten |
| Dilatatie | dilatancy | volumeverandering van een stortgoed als gevolg van onderlinge korrelbewegingen |
| Ontmengsnelheid | sorting intensity | aantal bewerkingen nodig om de evenwichtstoestand te bereiken in een heterogeen stortgoed |
| Stroombaarheid | flowability | de mate waarin een stortgoed tot stromen in staat is |
| Stratifikatie | stratification | herschikking van de korrels in een heterogeen stortgoed tot een laagsgewijze ligging |
| Evenwichtstoestand | equilibrium state | toestand waarbij het gemiddeld niveau van alle korrels bij verdere bewerking konstant blijft |
| Korrelinfiltratie | interparticle percolation | het vallen van kleine korrels door de gaten tussen de grotere korrels in een stortgoed |



1. Overzicht van de modelbak; links wagen met reliefmeter en plaatsmeter en rechts arm met (model)tand en filmkamera.



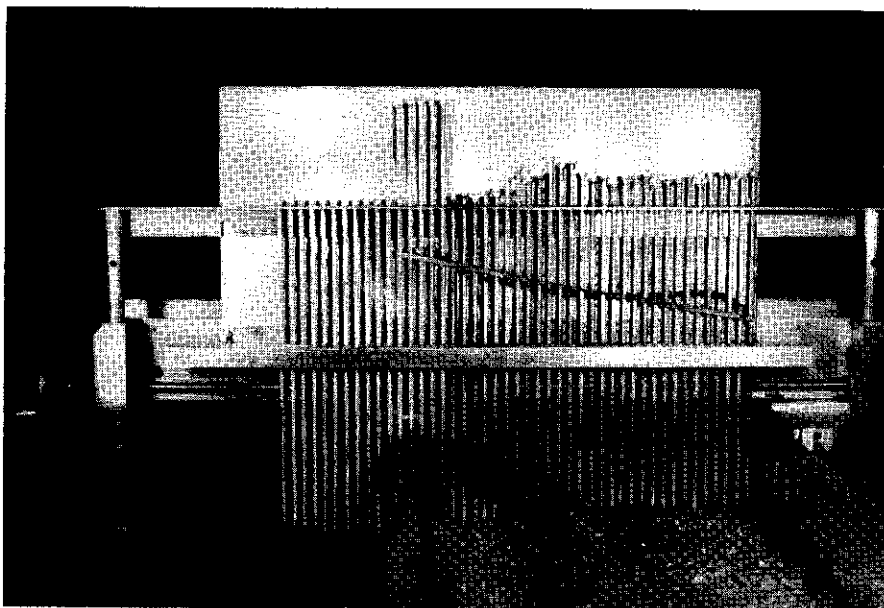
2. Inleggen van een mengsel van glasbollen met markeurs



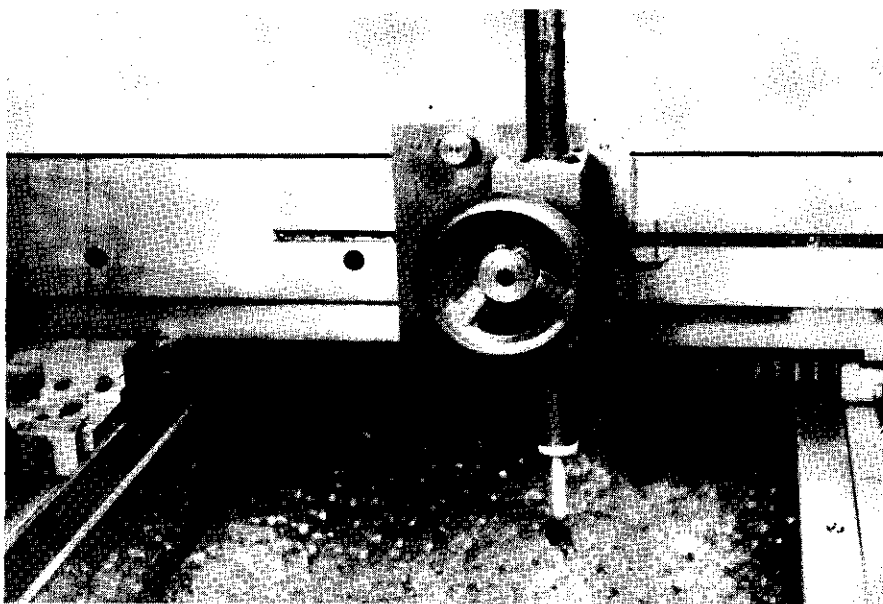
3. Strooming van glasbollen om een bewegende tand (filmbeeld).



4. Het fixeren van een tand



5. Reliefmeter voor het meten van de vorm en hoogte van het oppervlak



6. Plaatsmeter voor het bepalen van de plaats van de markeurs