

INSTITUUT VOOR LANDBOUWTECHNIEK EN RATIONALISATIE

Rapport 118

ENKELE ASPECTEN VAN DE TRILTECHNIEK

J.A. Huizing

1070
196

Dr. S. L. Mansholtlaan 12 - Wageningen

tel. 08370-3041

2287394

Rapport 118

ENKELE ASPECTEN VAN DE TRILTECHNIEK

J.A. Huizing

Overneming alleen toegestaan na overleg met de schrijver

118-4

I N H O U D

	Blz.
1. Gebruikte symbolen	1
2. Inleiding	2
3. Samenvatting en conclusies	3
4. Literatuuronderzoek	4
5. Literatuurlijst	5
6. Wat zijn trillingen ?	6
7. Toepassingsmogelijkheden van mechanische trillingen	6
7.1. Trilgoten of -buizen	6
7.1.1. Transport	6
7.1.2. Doseerinstallatie	7
7.1.3. Bunkerafsluitinrichting	7
7.2. Tril tafels	7
7.3. Losse vibratoren	8
7.4. Wenteltransporteurs of spiraalvoerders	8
7.4.1. Verticaal transport	8
7.4.2. Het afzonderlijk en in gerichte stand aanvoeren	8
8. Trillingsbronnen	9
8.1. Kruk-drijfstaangmechanisme	9
8.2. Vibratoren	10
8.3. Onbalansmotoren	11
9. De werking van een trilgoot	12
9.1. Werpgetal - W	14
9.2. Machinekenmerk - K	16
10. Transportverloop van goederen op een trilgoot	16
10.1. Gemiddelde transportsnelheid (theoretisch)	20
10.2. Gemiddelde transportsnelheid (praktisch)	23
10.2.1. Materiaalconstante η_M	23
10.2.2. De laaghoogte η_L	23
10.2.3. De helling waaronder het transport plaatsvindt η_H	23
11. Constructieve aanwijzingen	24
12. Suggesties voor toepassing in de landbouw	26

1. GEBRUIKTE SYMBOLEN

r	[mm]	amplitude	
ω	[rad./sec]	hoeksnelheid	
ϕ	[o]	faseverschuivingshoek	
f	[Hz]	frequentie	
t	[sec.]	tijd	
t_s	[sec.]	sprongtijdstip	
t_t	[sec.]	treftijdstip	
s	[mm]	afgelegde weg	
v	[mm/sec]	snelheid	
a	[mm/sec ²]	versnelling	
u	[mm]	} horizontale componenten van	{ afgelegde weg snelheid versnelling } van deeltjes
\dot{u}	[mm/sec]		
\ddot{u}	[mm/sec ²]		
x	[mm]	} horizontale componenten van	{ afgelegde weg snelheid versnelling } van de goot
\dot{x}	[mm/sec]		
\ddot{x}	[mm/sec ²]		
y	[mm]	} verticale componenten van	{ afgelegde weg snelheid versnelling } van de goot
\dot{y}	[mm/sec]		
\ddot{y}	[mm/sec ²]		
z	[mm]	} verticale componenten van	{ afgelegde weg snelheid versnelling } van deeltjes
\dot{z}	[mm/sec]		
\ddot{z}	[mm/sec ²]		
β	[o]	instelhoek	
g	[mm/sec ²]	versnelling van de zwaartekracht	
W	[-]	werpgetal	
K	[-]	machine-kenmerk	
G	[kg]	gewicht	
P	[kg]	massakracht	
n	[-]	hulpwaarde	
η_M	[-]	} constanten voor	{ materiaal laaghoogte helling
η_L	[-]		
η_H	[-]		

2. INLEIDING

Wanneer men ziet hoe een hoeveelheid stortgoederen zich verplaatst op een trilgoot, dan valt meteen op, dat dit verplaatsen met een grote regelmaat gebeurt. De vloeiende stroom, die men waarneemt lijkt een beweging, die zonder schokken plaatsvindt.

De rustige beweging en de regelmaat zijn twee factoren, die zeer aantrekkelijk zijn voor toepassing in land- en tuinbouw. Het voorkomen van beschadigingen bij het verwerken en een nauwkeurige dosering, bij o.a. het zaaien of poten, kunnen waarschijnlijk de kwaliteit van het produkt verhogen, resp. de arbeidstijd verkorten.

Op grond van bovengenoemde perspectieven heeft het Instituut voor Landbouwtechniek en Rationalisatie gemeend om in haar onderzoek aandacht te moeten besteden aan deze mogelijkheden met als doel in de toekomst praktische toepassingen te realiseren.

Het project: "Toepassing van de triltechniek in de landbouw", is in 1967 op het werkprogramma geplaatst.

Dit rapport moet worden gezien als een verhandeling over de grondbeginselen van de triltechniek, een overzicht van de reeds bestaande trilapparatuur en de toepassing hiervan.

3. SAMENVATTING EN CONCLUSIES

Hoewel trillingen dikwijls ongewenst zijn, kan men, wanneer deze trillingen in een bepaalde richting worden uitgeoefend, er in de techniek een dankbaar gebruik van maken.

Behandeld worden o.a. verschillende trillingen, hun ontstaan en de toepassingsmogelijkheden.

Een zeer regelmatig transport van stortgoederen is met behulp van een trilgoot of -buis te bereiken. Wanneer aan bepaalde voorwaarden van versnellingskrachten wordt voldaan, geschiedt dit verplaatsen van de goederen sprongsgewijze met het gevolg, dat trilgoot en goederen slechts zeer kort met elkaar in contact zijn en er praktisch geen slijtage optreedt. Om de transportsnelheid te berekenen worden formules afgeleid. De capaciteit van een trilgoot is laag t.o.v. bandtransporteurs, elevatoren, vijzels, enz. In vele gevallen zijn de nevenverschijnselen belangrijker dan de capaciteit van het transport zelf, waarbij vooral de sprongafstand in verhouding tot de frequentie een belangrijke rol speelt.

Om de werking van een trilgoot optimaal te doen zijn, moeten de juiste verhoudingen van frequentie, amplitude en instelhoek worden gekozen, hetgeen veel rekenwerk en moeizaam uitproberen met zich meebrengt. Met behulp van elektronische rekenmachines zijn hiervoor diagrammen opgesteld, die bij het ontwerpen van een trilinstallatie van nut kunnen zijn.

Tot slot worden in dit rapport enkele suggesties gedaan voor mogelijke toepassing in de landbouw.

4. LITERATUURONDERZOEK

Voornamelijk in gebieden met kolen- en ijzerertsminen vond voor het verplaatsen van de bij deze industrieën behorende grondstoffen, het transport aanvankelijk plaats met behulp van schudgoten. Uit deze schudgoten zijn naderhand de trilgoten ontwikkeld, waardoor de eerste nagenoeg geheel verdrongen zijn.

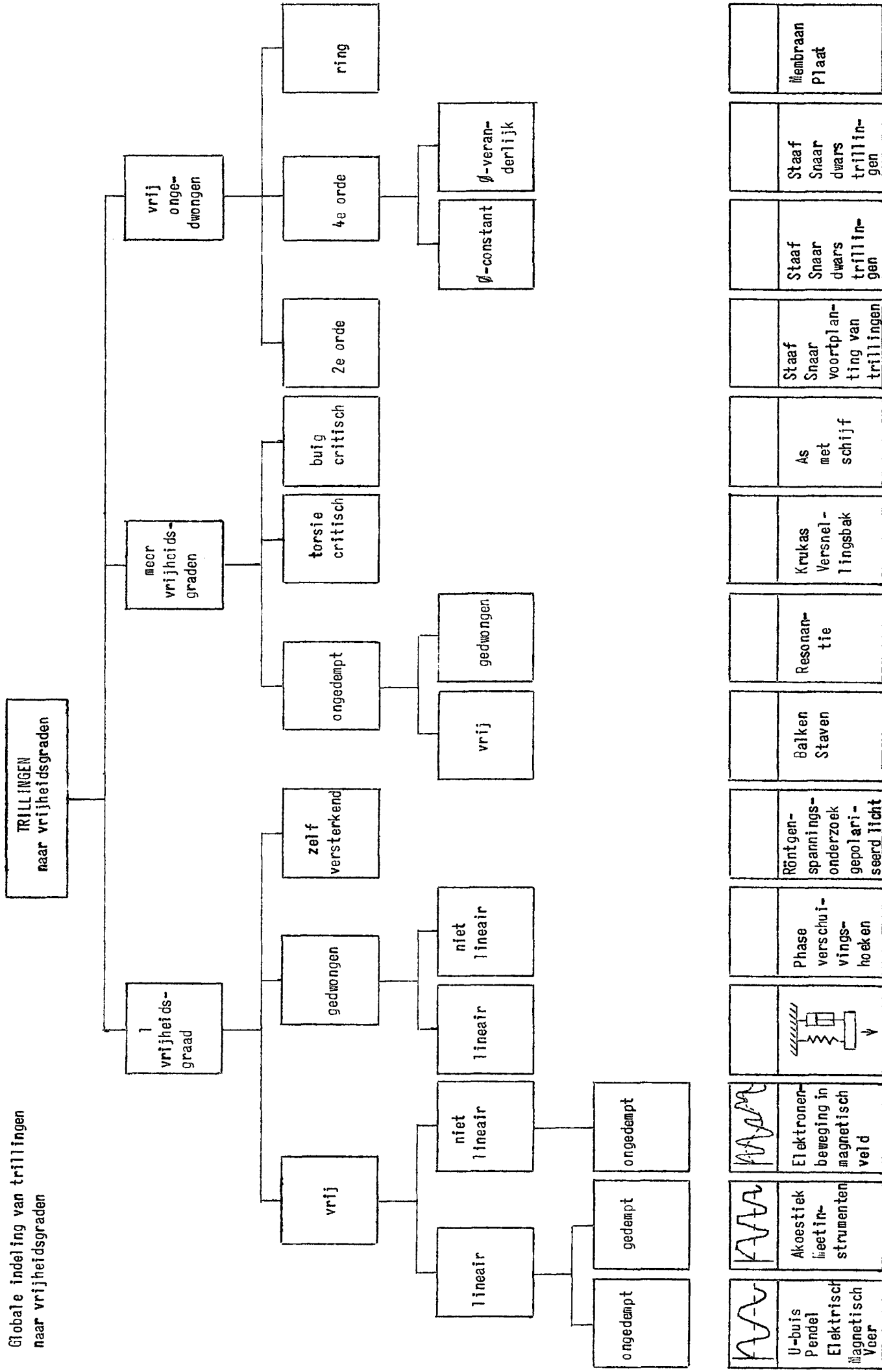
Ook het feit, dat in de mijnindustrie nogal veel stofverwekkende goederen worden verwerkt, is aanleiding geweest om de stortgoederen, zonder al te veel beroering, te verplaatsen. In plaats van een afgedekte trilgoot kan bijvoorbeeld heel eenvoudig een buis in trilling worden gebracht. Het is niet verwonderlijk, dat om bovenstaande redenen vooral in Duitsland veel onderzoek op het gebied van trilgoten is verricht.

Er is een afzonderlijk instituut, verbonden aan de technische hogeschool te Hannover, dat zich bezighoudt met transporttechniek. Veel onderzoek werd verricht door Dr. Ing. S. Böttcher (1) naar de beweging van goederen op trilgoten en door Dr. Ing. K.H. Wehmeier (2) naar het transportverloop op bedoelde trilgoten.

5. LITERATUURLIJST

1. Böttcher, S.
Beitrag zur Klärung der Gutbewegung auf Schwingrinnen.
Fördern und Heben, 1958, Heft 3, 4, 5
2. Wehmeier, K.H.
Untersuchungen zum Fördervorgang auf Schwingrinnen.
Fördern und Heben, 1961 (11)
3. Wehmeier, K.H.
Schwingförderrinnen-Berechnung, Konstruktion und Betrieb.
Fördern und Heben, 1963, Heft 12
4. Düring, K.
Berechnung der Amplituden von elektrodynamischen Förderrinnen mit
gerichteten Schwingungen.
Fördern und Heben, 1963, Heft 10
5. Rachner, H.G. und L. Junk
Schwingförderer in Giessereien.
Sonderabdruck "Giesserei", 51 (1964), Heft 7
6. Grünwald, F.
Transporting equipment with electromagnetic vibrators in mines.
Overdruk uit: A.E.G. Mitteilungen, 48 (1958) 6/7
7. Brosch, L., A. Lang und W. Ternette
Transduktorische Steuerung und Regelung von Vibratoren.
Overdruk uit: A.E.G. Mitteilungen 51 (1961) 3/4
8. Wehmeier, K.H.
Gegenwärtiger Stand der Schwingfördertechnik. Grundlagen und Bauarten
von Schüttelrutschen und Schwingrinnen.
V.D.I. Zeitschrift, 108 (1966) 23

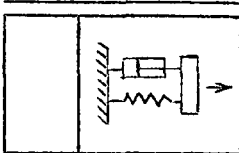
Globale indeling van trillingen naar vrijheidsgraden



FAA
U-buis
Pendel
Elektrisch
magnetisch
Vcer

FAA
Akoeestiek
meetin-
strumenten

FAA
Elektronen-
beweging in
magnetisch
veld



Phase
verschuiv-
ings-
hoeken

Röntgen-
spannings-
onderzoek
gepolari-
seerd licht

Balken
Staven

Resonan-
tie

Krukas
Versnel-
lingsbak

As
met
schijf

Staaft
Snaar
voortplan-
ting van
trillingen

Staaft
Snaar
dwars
trillingen

Staaft
Snaar
dwars
trillingen

Membraan
Plaat

6. WAT ZIJN TRILLINGEN ?

Trillingen komen in vele vormen, afzonderlijk of in combinatie met elkaar, voor. Een volledige indeling van het gehele gebied is dan ook niet te geven.

In afb. 1 is een globaal overzicht gegeven, waarbij een aantal trillingen zijn ingedeeld naar vrijheidsgraden. Voor het algemeen begrip kan men zeggen, dat bij een trilling een fysische grootte zodanig met de tijd verandert, dat bepaalde kenmerken terugkeren. Een bijzondere plaats wordt in dit verband ingenomen door de periodieke trillingen (afb. 2). Deze trillingen kunnen een harmonisch of een sinusvormig verloop hebben. Een harmonische trilling ontstaat door de projectie van een eenparige cirkelbeweging met een aantal constante waarden. Het verloop kan enkelvoudig of samengesteld zijn.

Is een van de waarden r of ω veranderlijk met de tijd, dan heet de trilling sinusvormig. De in afb. 2 weergegeven sinusvormige trilling wordt een zweving genoemd.

Voor de triltechniek, die in dit rapport wordt behandeld, is het noodzakelijk, dat bepaalde trillingen in een zekere richting worden uitgeoefend en dat deze gerichte trillingen een harmonisch verloop hebben.

7. TOEPASSINGSMOEGELIJKHEDEN VAN MECHANISCHE TRILLINGEN

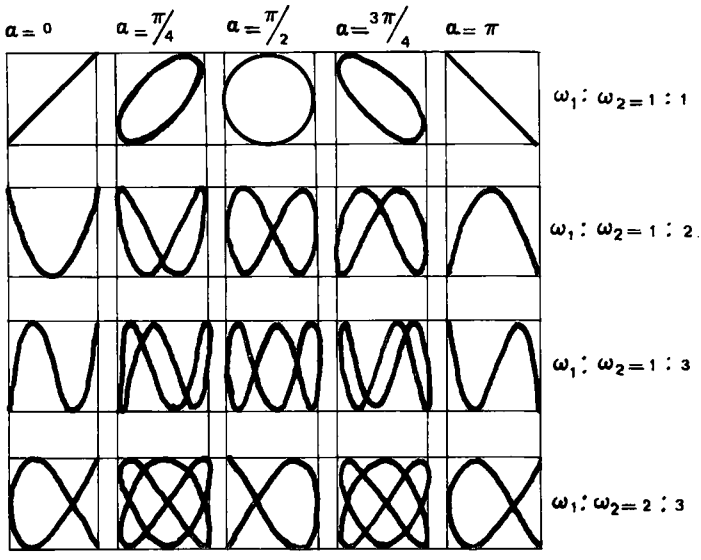
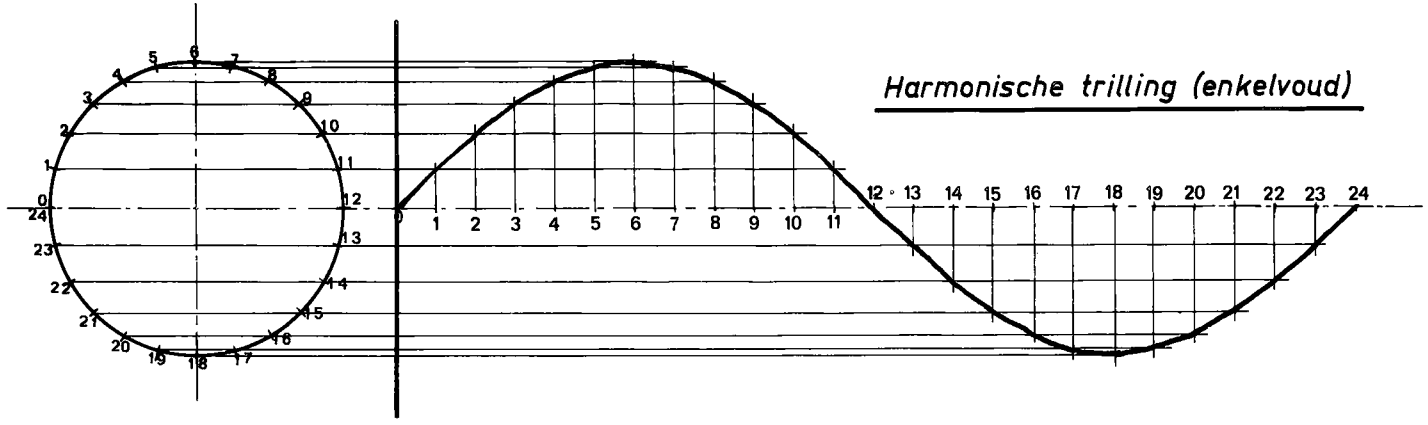
In een bepaalde richting uitgeoefend, kunnen mechanische trillingen in de triltechniek o.m. worden toegepast voor:

- 7.1. Trilgoten of -buizen
- 7.2. Tril tafels
- 7.3. Losse vibratoren
- 7.4. Wenteltransporteurs (spiraalvoerders)

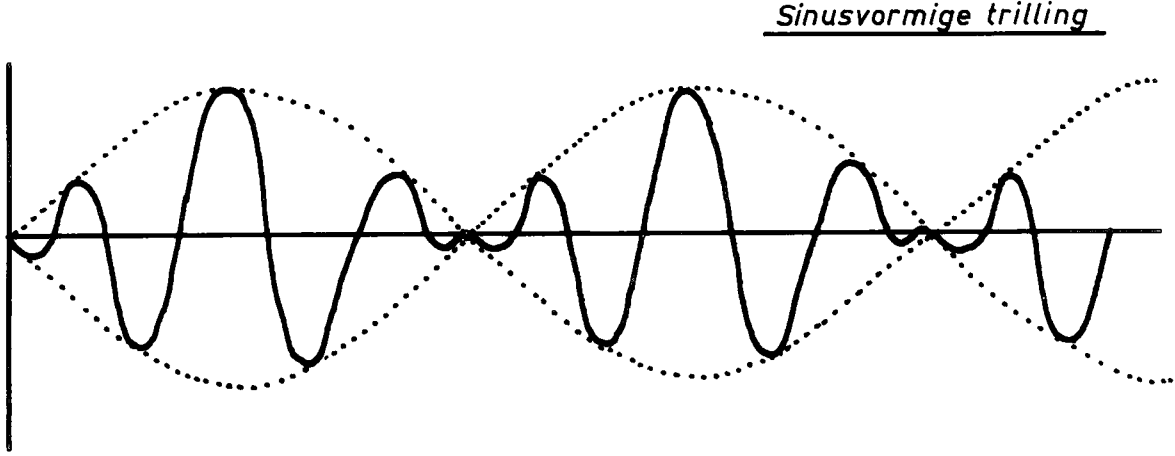
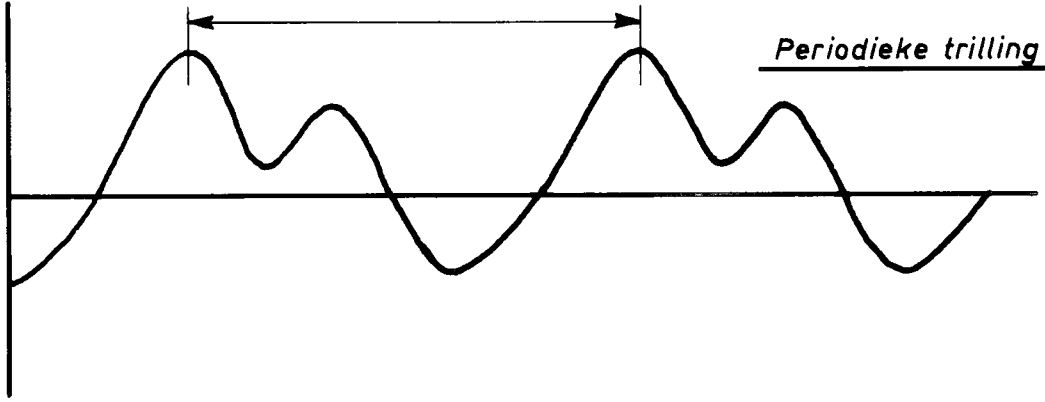
7.1. Trilgoten of -buizen worden o.a. toegepast voor:

7.1.1. Transport (afb. 3, 4 en 5)

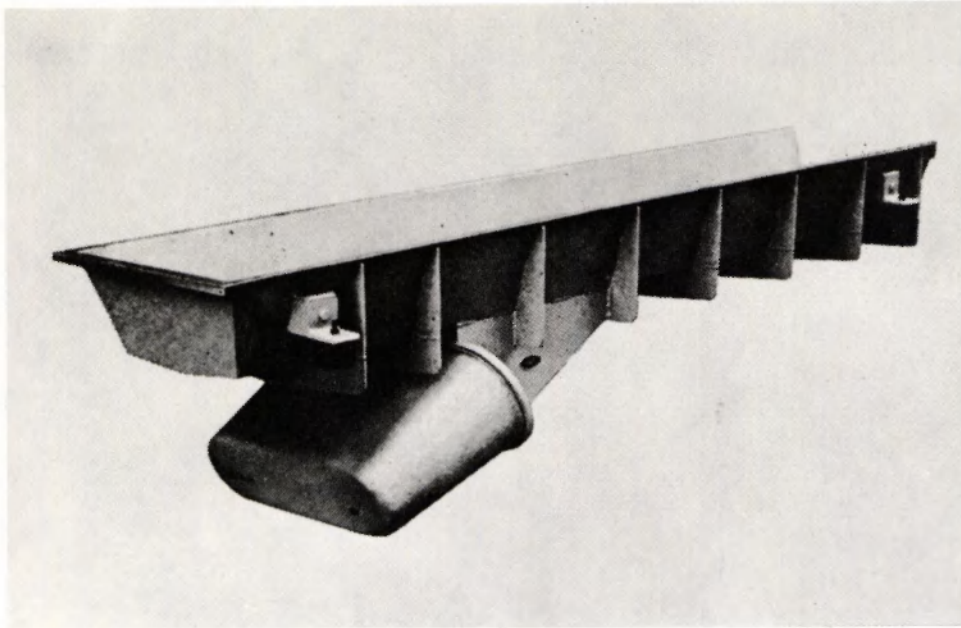
Wanneer het alleen gaat om het verplaatsen van goederen, dan is wegens de geringe capaciteit, een trilgoot zeer in het nadeel, vergeleken bij bandtransporteurs, elevatoren, vjzels, enz. Voor meer speciale doeleinden, waarbij de nevenverschijnselen belangrijker zijn dan het transport zelf, biedt een trilgoot of -buis goede mogelijkheden.



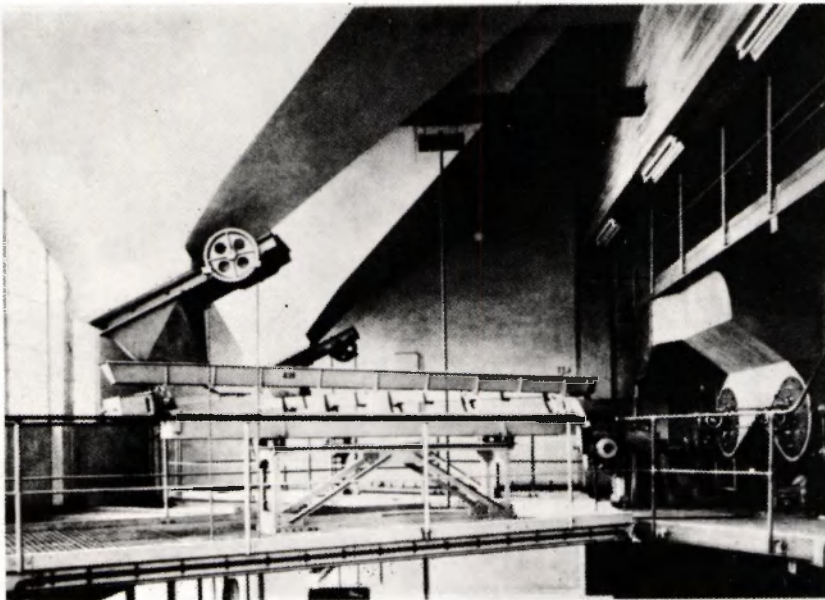
Harmonische trilling (samengesteld)



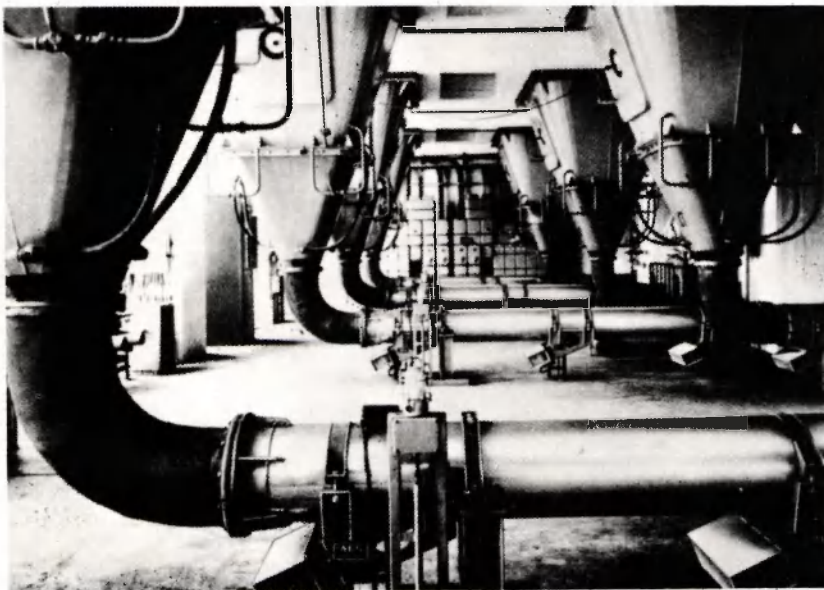
Afb. 2 Drie veel voorkomende trillingsvormen.



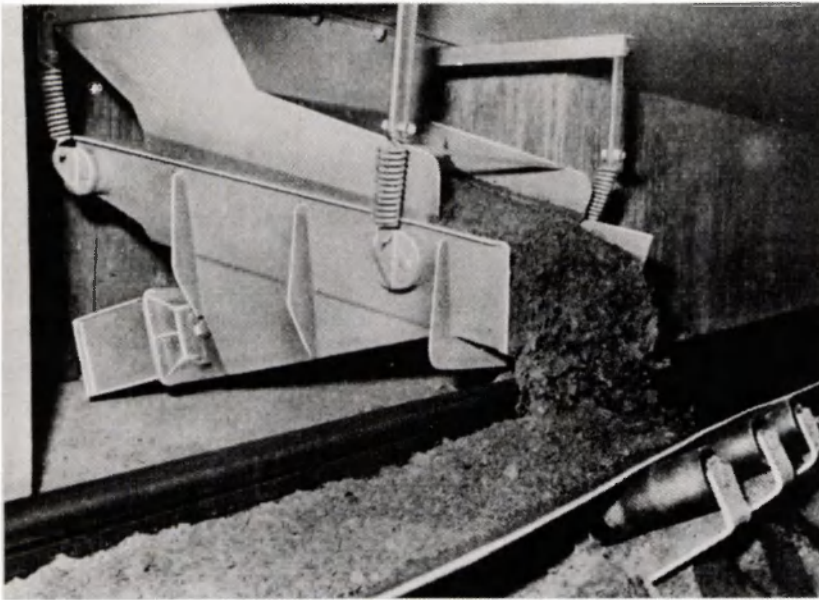
Afb. 3 Trilgoot voor transport van stortgoederen. De aandrijving bestaat hier uit een elektromagnetische vibrator.



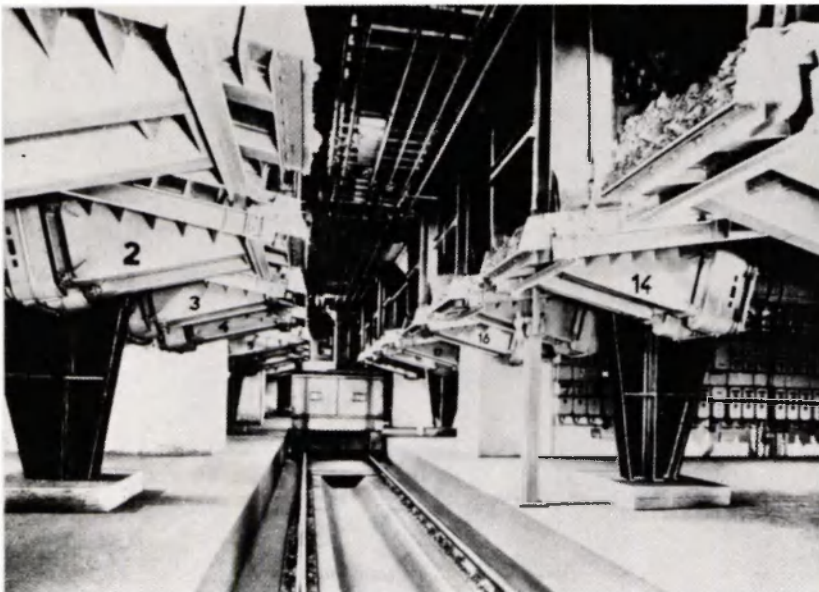
Afb. 4 Elektromagnetische trilgoot voor transport van kolen in een ketelhuis.



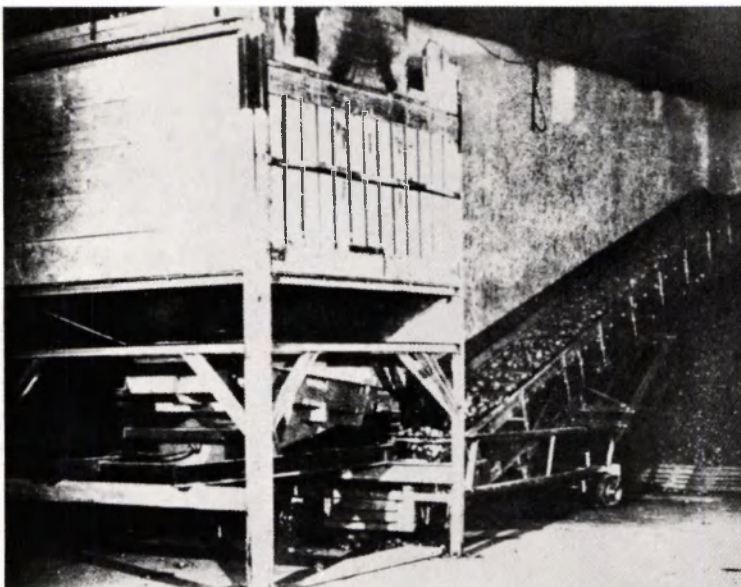
Afb. 5 Trilbuis voor het transport van stoffige goederen (poederkool) in een elektriciteitscentrale.



Afb. 6 Elektromagnetische trilgoot als doseerinstallatie voor een transportband.



Afb. 7 Een serie elektromagnetische trilgoten, gebruikt als doseer- en bunkerafsluitinrichting bij het samenstellen van charges in een ijzergieterij.



Afb. 8 Elektromagnetische trilgoot, gebruikt als los- en sluitinrichting onder een bunker met aardappelen.

Enkele voorbeelden zijn:

- Transport van stofgevende goederen door een gesloten trilgoot of -buis.
- Transport met verwarming, droging of afkoeling, bijv. trilgoot met dubbele bodem.
- Transport met ontwatering, zeping of menging.
- Transport van goederen op een leesband.

7.1.2. Doseerinstallatie (afb. 6 en 7)

Door de regelmatige stroom van stortgoederen op een trilgoot, is deze bij uitstek geschikt als doseerinstallatie. Een hoeveelheidsregeling kan eenvoudig bestaan uit een schuif, die de laagdikte op de trilgoot regelt.

Enigszins afhankelijk van de aandrijving (zie 8.2.) kan met het doseren onder de volle capaciteit worden gestopt en opnieuw worden gestart. Het start- en/of stopcommando kan worden gegeven door een tijds- of gewichtsafstelling. Deze doseerinstallatie leent zich derhalve zeer goed voor automatische processen.

Voorbeelden zijn:

- De verpakkingindustrie voor levensmiddelen, veevoeder, kunstmest, enz.
- In ijzergieterijen, glas- of betonfabrieken voor het samenstellen van ladingen (charges) voor ovens of menginstallaties.
- Regelmatige dosering in een maalinrichting (hamermolen) of het ontijzeren van grondstoffen op een draaiende, magnetische rol.

7.1.3. Bunkerafsluitinrichting (afb. 7 en 8)

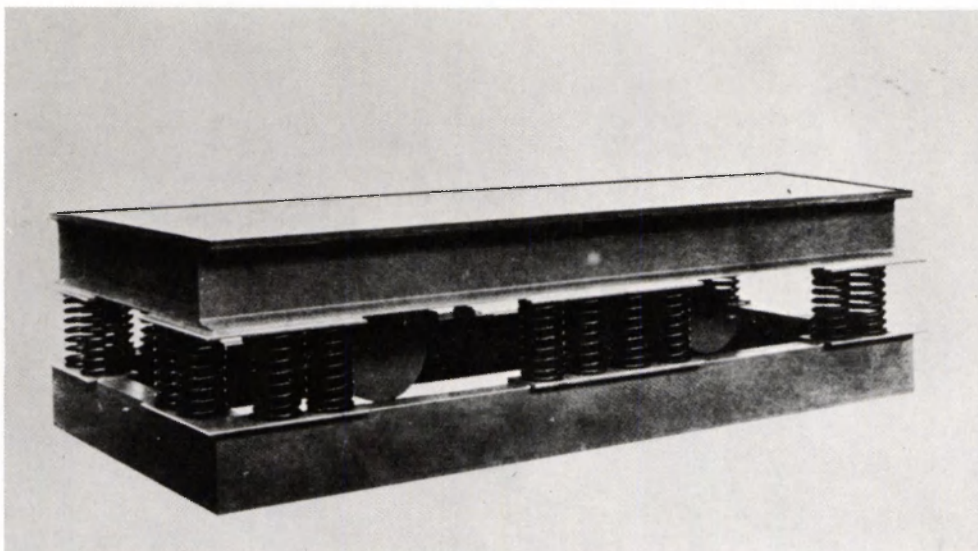
Als bunkerafsluitinrichting vormt de trilgoot een ideale oplossing. De trilgoot dient hier als los- en als sluitinrichting, kan onder de volle bunkerdruk aanlopen en is eenvoudig op afstand te bedienen.

7.2. Tril tafels (afb. 9)

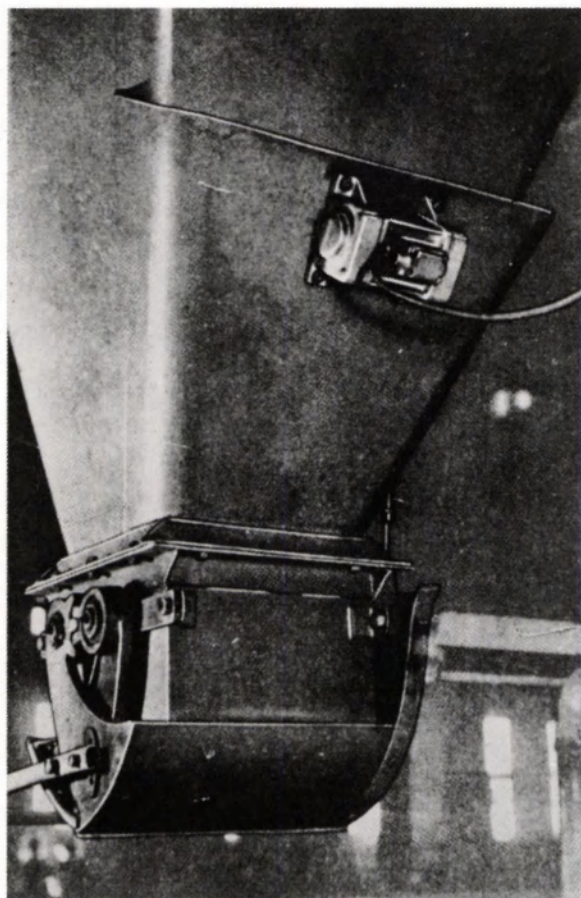
Bij een triltafel is de richting van de trillingen dikwijls niet zo belangrijk omdat het hierbij niet gaat om het verplaatsen van goederen.

Enkele toepassingen zijn:

- Het inklinken van stoffen, tijdens of na het vullen in alle soorten emballage.



Afb. 9 Triltafel, uitgerust met onbalansmotoren.



Afb. 10 Losse vibrator ter voorkoming van brugvorming in een silo.

- Het intrillen en ontluchten van gietmassa's in vormen.
- Het leegtrillen van gietvormen.

7.3. Losse vibratoren (afb. 10)

Een losse vibrator kan door zijn geringe afmetingen eenvoudig aangebracht worden. De richting van de trilling is niet van primair belang.

Toepassingen zijn:

- Op bouwwerken voor het verdichten van betonspecie.
- In de industrie, o.a. bij het vervaardigen van betonelementen.
- Bij het lossen van materialen uit bunkers, silo's, enz. ter voorkoming van brugvorming.

7.4. Wenteltransporteurs of spiraalvoerders

Wenteltransporteurs zijn eigenlijk langgerekte trilgoten, die spiraalvormig zijn gewonden en een stijging hebben van 3 tot 10 graden. Omdat het hier weer gaat om het verplaatsen van goederen, is de richting van de trillingen van belang. De wenteltransporteur wordt toegepast voor:

7.4.1. Verticaal transport (afb. 11)

De capaciteit is zeer gering. De lange transportweg (afb. 11, + 15 meter) kan echter nuttig zijn bij een warmte-uitwisseling. De constructie van de wenteltransporteur leent zich hiervoor gemakkelijk door de aanwezige kern, waaromheen de spiraal is opgebouwd. Dit wordt o.a. toegepast bij het koelen van kunststof-granulaat.

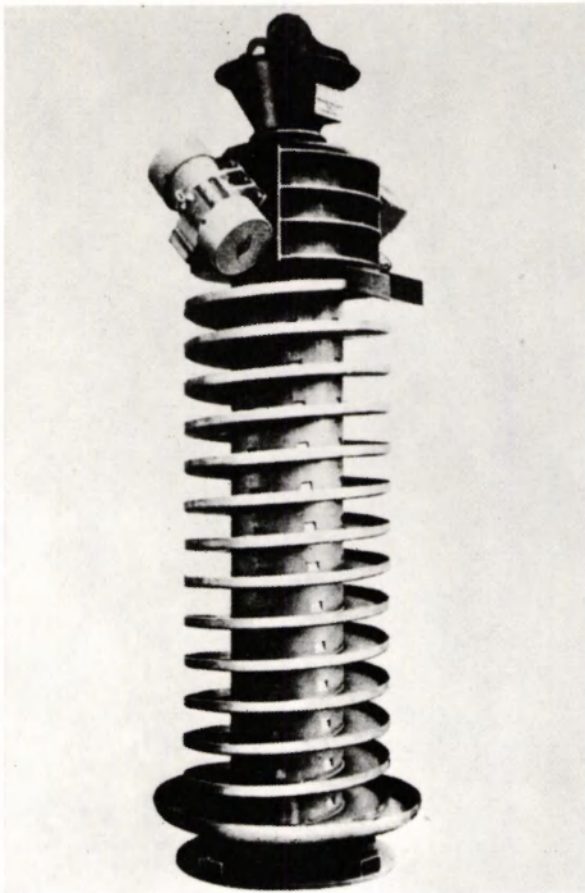
7.4.2. Afzonderlijk en in gerichte stand aanvoeren (afb. 12 en 13)

Door het aanbrengen van afstrijkers, doorvalopeningen, enz. kan de spiraalvormige baan zodanig worden uitgevoerd, dat gelijkvormige delen slechts in één bepaalde stand en één voor één de spiraal kunnen verlaten.

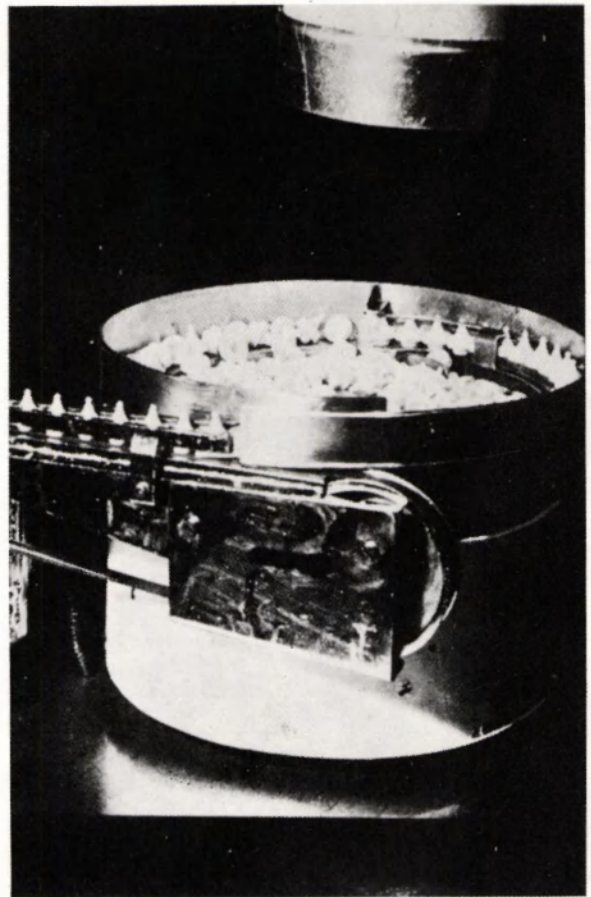
Hiervan wordt gebruik gemaakt in o.a.:

- De metaalindustrie bij de voeding van automatische draaibanken.
- In de verpakkingsindustrie bij de aanvoer van bijv. sluitdoppen op flessen.

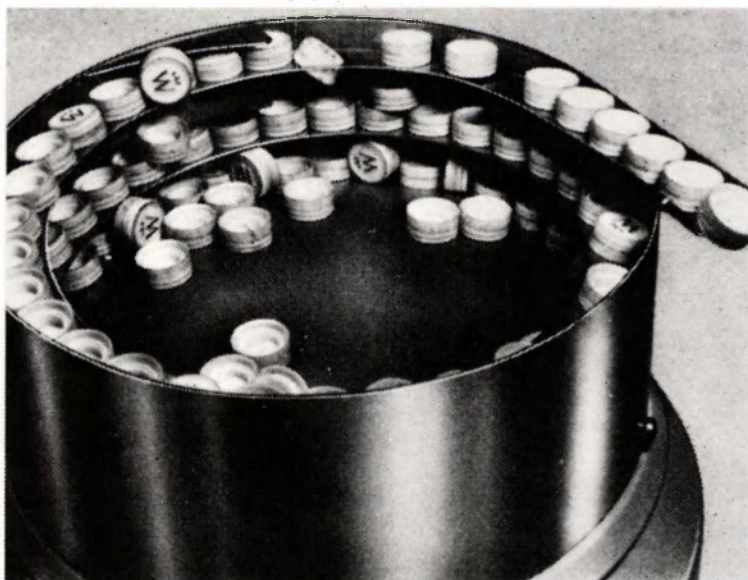
Speciaal vanwege de afzonderlijke (stuksgewijze) aanvoer kan ook een telmechanisme worden bediend.



Afb. 11 Wenteltransporteur voor verticaal transport. Aandrijving: twee diametraal aangebrachte onbalansmotoren.

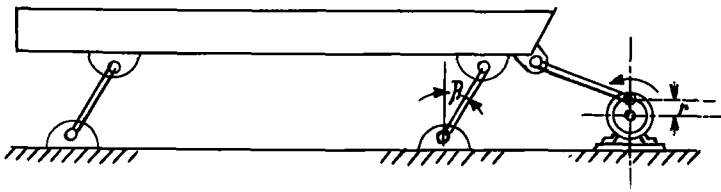


Afb. 12 Spiraalvoeder voor het afzonderlijk en gericht aanvoeren van onderdelen in de metaalindustrie.

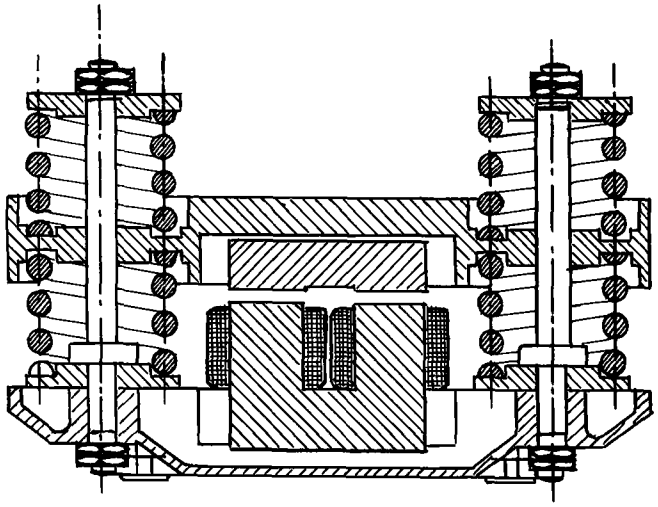
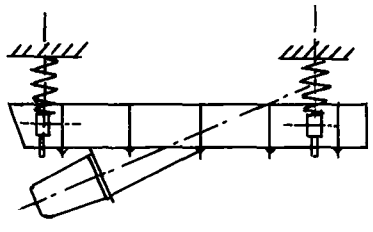


Afb. 13 Spiraalvoeder voor het gericht aanvoeren van sluitdoppen voor flessen.

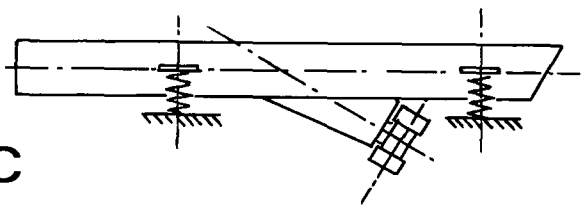
TRILLINGSBRONNEN



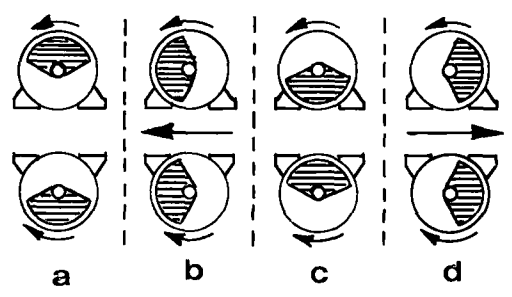
A



B



C



Afb. 14 Aandrijvingsvormen voor trilgoten.
A. kruk-drijfstaangmechansme; B. elektromagnetische vibrator; C. onbalansmotor.

Na het verlaten van de spiraal passeert het voorwerp een lichtstraal van een fotocel, waardoor een telling mogelijk is.

8. TRILLINGSBRONNEN

8.1. Kruk-drijfstangmechanisme (afb. 14 A)

In afb. 15 is de kruk-drijfstangbeweging afgeleid. Aangenomen wordt, dat de kruk r een eenparige beweging rechtsom maakt en dat op het tijdstip $t = 0$, de kruk zich in de dode stand A bevindt. Na verloop van de tijd t heeft de kruk een boog A-D beschreven. De afgelegde horizontale weg van het uiteind van de drijfstang L is dan gelijk aan s .

Door differentiatie zijn de formules voor de snelheid v en de versnelling a af te leiden.

Het oudste aandrijfsysteem voor trilgoten is het kruk-drijfstangmechanisme, dat werd overgenomen van de schudgoten. Als aandrijfsysteem voor trilgoten is dit mechanisme bijna geheel verdrongen door de vibratoren (zie 8.2) en de onbalansmotoren (zie 8.3).

Door een van de trilgoot gescheiden krukas moeten via een drijfstang, de versnellingskrachten worden overgebracht. Door een regelbare aandrijving of een regelbare gelijkstroommotor is de frequentie van de trilgoot in te stellen. Daar echter de massakrachten kwadratisch oplopen met de frequentie, wordt aan deze regeling wel enige beperking opgelegd. De overbrenging met tandwielen of V-snaren tussen motor en krukas is bovendien minder geschikt om hoge frequenties toe te laten. Een nadeel van de trilgoten met een kruk-drijfstangaandrijving is nog, dat de massakrachten in de regel onder de volle belasting moeten worden opgewekt en dat deze krachten in het fundament van de gehele opstelling doorwerken. Een trillingvrij opgesteld grondraam moet dan ook wel dikwijls het drie- tot viervoudige gewicht van de trilgoot zelf hebben.

Door het plaatsen van veren tussen het grondraam en de trilingstallatie, kan van de resonantieversteking gebruik worden gemaakt om de gewenste amplituden met minder versnellingskracht te onderhouden. De aanloopkrachten worden bij een dergelijke opstelling echter vergroot. Een trilgoot, aangedreven door een kruk-drijfstangmechanisme, wordt meestal toegepast wanneer het gaat om het verplaatsen van een grote stroom van stortgoederen over een langere afstand.

Vergeleken bij de andere aandrijfsystemen heeft de bedoelde trilgoot de grootste transportsnelheid, werkt met de laagste frequentie en een relatief grote amplitude.

Orde van grootte: $\bar{u} = 700 \text{ mm/sec}$
 $f = 10 \text{ Hz}$
 $r = 15 \text{ mm}$

8.2. Vibratoren (afb. 14 B)

Een veel toegepaste aandrijving voor trilgoten is de elektromagnetische vibrator. Bij deze opstelling gaat het om twee vrijtrillende massa's:

- a) de goot zelf, met daarmee vast verbonden, het anker van een elektromagneet en
- b) een vrije massa, die zich via voorgespannen schroef- of bladveren tegen het anker kan afzetten.

De verhouding tussen het gewicht van het magneetgedeelte en de veerspanning wordt zodanig gekozen, dat in de buurt van het resonantiegebied wordt gewerkt. Door het ontbreken van draaiende delen heeft een elektromagnetische trilgoot het voordeel, dat er praktisch geen onderhoud wordt gevraagd en dat door het ontbreken van roterende massa's de trilgoot ogenblikkelijk stopt bij het uitschakelen van de spanning. Om deze laatste reden is deze trilgoot dan ook bijzonder geschikt voor nauwkeurige dosering.

Wanneer een wisselstroom met een sinusvormig verloop en een frequentie van 50 Hz aan een magneet wordt aangesloten, zal er aan de trilgoot een frequentie van 100 Hz ontstaan. Door voorschakeling van een eenweg-gelijkrichter kan deze frequentie tot de helft worden teruggebracht. Een trilgoot, aangedreven door een vibrator met een frequentie van 50 Hz, geeft dan echter nog 3000 trillingen/min. Dit hoge trillingsgetal laat slechts een kleine amplitude toe om de anders te groot wordende massakrachten, uit constructief oogpunt, nog te kunnen beheersen.

Het gevolg van dit alles is, dat de transportsnelheid van een elektromagnetische trilgoot betrekkelijk laag zal blijven.

Orde van grootte: $\bar{u} = 100 \text{ mm/sec}$
 $f = 50 \text{ Hz}$
 $r = 1 \text{ mm}$

De transportsnelheid kan eenvoudig en tijdens het werk worden geregeld. Door de ankerspanning van de vibrator te wijzigen, zal eveneens de amplitude veranderen.

Deze spanning kan het best worden geregeld met transductoren. Een regeling met behulp van voorschakelweerstand is eveneens mogelijk, maar is wegens de stroomverliezen minder aantrekkelijk.

8.3. Onbalansmotoren (afb. 14 C)

Bij een trilgoot, aangedreven door onbalansmotoren, gaat het evenals bij vibratoren om twee trillende massa's: de goot en de onbalansen. Het verschil is echter, dat deze massa's nu niet door koppelveren met elkaar zijn verbonden.

Een door onbalansmotoren aangedreven trilgoot moet derhalve een verende plaatsing hebben in een fundament, of door middel van veren of rubberbuffers worden opgehangen. Deze ondersteuning dienen zo zacht te zijn, dat de eigen frequentie van de goot ver beneden de versterkerfrequentie ligt.

Doorgaans wordt dit type trilgoten door twee onbalansmotoren aangedreven. Op de aseinden van deze motoren zijn aan één of aan beide zijden, onbalansschijvenparen aangebracht. Een van de schijven zit vast op de as geklemd, terwijl de andere tussen een bepaalde minimum- en maximumwaarde verstelbaar is. Voor het verkrijgen van de noodzakelijk gerichte versnellingskrachten aan de trilgoot, draaien de beide onbalansmotoren tegengesteld synchroon. Door deze synchronisatie werken de centrifugaalkrachten samen in de trillingsrichting en heffen zij in de loodrecht daarop staande richting elkaar op (afb. 14 C in a en c, opheffing; in b en d samenwerking). Het verstellen van de onbalansschijven kan niet tijdens het bedrijf plaatsvinden. Een regeling van de goederenstroom op een hier bedoelde trilgoot bestaat meestal uit een schuif, waarmee de laagdikte wordt ingesteld.

De centrifugaalkrachten van de roterende onbalansen moeten door de lagers van de motoras worden opgenomen. Deze, meestal flink overdimensioneerde rollenlagers, leggen aan de frequentie toch bepaalde beperkingen op.

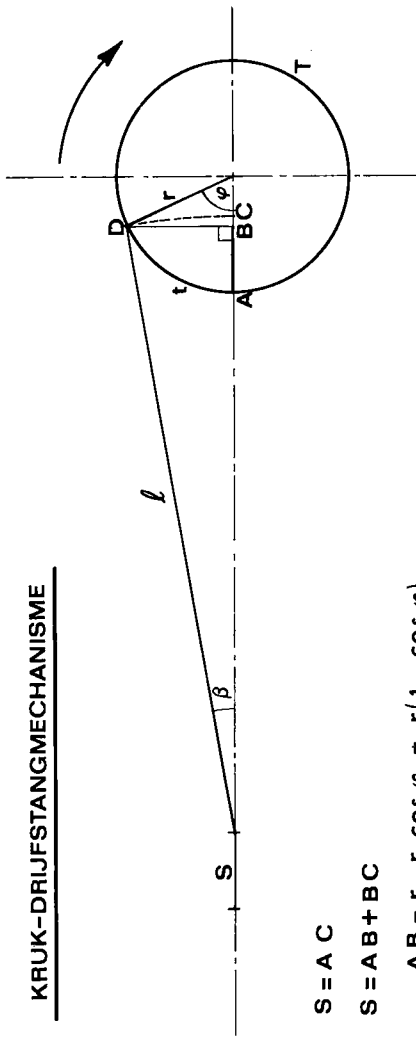
Orde van grootte: $\bar{u} = 300 \text{ mm/sec}$

$f = 25 \text{ Hz}$

$r = 6 \text{ mm}$

Het voordeel van door onbalansmotoren aangedreven trilgoten ligt vooral in de mechanisch eenvoudige opbouw.

KRUK-DRIJFSTANGMECHANISME



$S = A C$

$S = A B + B C$

$A B = r - r \cdot \cos \varphi = r(1 - \cos \varphi)$

bg AD: omtr.cirkel = t : T

$r \varphi : 2 \pi r = t : T$

$\varphi = \frac{2 \pi t}{T}$ (frequentie $f = \frac{1}{T}$)

$\varphi = 2 \pi f t$

$A B = r(1 - \cos 2 \pi f t)$

$B C = l - l \cos \beta = l(1 - \cos \beta)$

$B D = l \sin \beta = r \cdot \sin \varphi$

$\sin \beta = \frac{r}{l} \sin \varphi$

$\cos \beta = \sqrt{1 - \sin^2 \beta} = \sqrt{1 - \left(\frac{r}{l} \sin \varphi\right)^2}$

$\cos \beta$ (als $\frac{r}{l}$ klein is) $\approx 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{r}{l} \sin \varphi\right)^2$

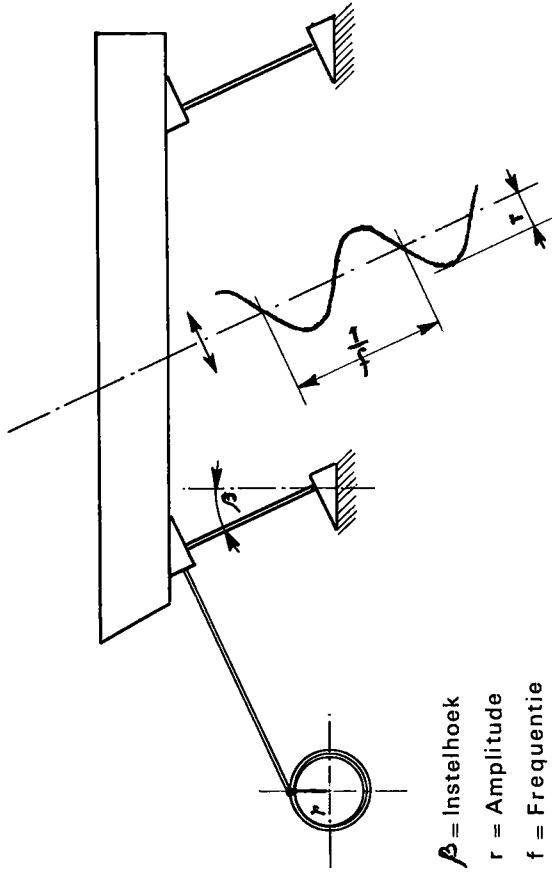
$B C = l \left[1 - \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{r}{l} \sin \varphi\right)^2 \right\} \right]$

$S = A B + B C = r(1 - \cos 2 \pi f t) + l \left[1 - \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{r}{l} \sin \varphi\right)^2 \right\} \right]$

Weg $S_t = s_t = r(1 - \cos 2 \pi f t) + \frac{r^2}{2l} \sin^2 2 \pi f t$

Snelheid $\dot{S}_t = v_t = 2 \pi f r (\sin 2 \pi f t + \frac{r}{l} \sin 4 \pi f t)$

Versnelling $\ddot{S}_t = a_t = 4 \pi^2 f^2 r (\cos 2 \pi f t + \frac{r}{l} \cos 4 \pi f t)$



β = Instelhoek

r = Amplitude

f = Frequentie

$y = s \cdot \sin \beta$

$\dot{y} = \dot{s} \cdot \sin \beta$

$\ddot{y} = \ddot{s} \cdot \sin \beta$

$s = r(1 - \cos 2 \pi f t)$

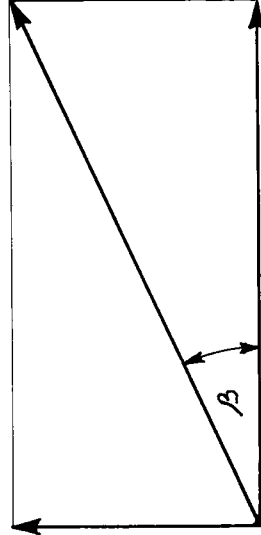
$\dot{s} = 2 \pi f r \sin 2 \pi f t$

$\ddot{s} = 4 \pi^2 f^2 r \cos 2 \pi f t$

$x = s \cdot \cos \beta$

$\dot{x} = \dot{s} \cdot \cos \beta$

$\ddot{x} = \ddot{s} \cdot \cos \beta$



Afb. 16 Voorstelling van de gootbeweging met horizontale en verticale ontbondenen.

Afb. 15 Afleiding kruk-drijfstaangbeweging.

9. DE WERKING VAN EEN TRILGOOT

De onder hoofdstuk 8 genoemde trillingsbronnen geven aan een trilgoot een beweging met een harmonisch verloop. Voor deze beweging gelden de formules van het kruk-drijfstangmechanisme, afgeleid in afb. 15:

$$s = r (1 - \cos 2 \pi f t) + l \left[1 - \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{r}{l} \sin \phi \right)^2 \right\} \right]$$

De verhouding kruk/drijfstang (r/l) is zeer klein, zodat verwaarlozing van het laatste deel van de formule geen noemenswaardige fout geeft. Bovendien komt bij een aandrijving met elektromagnetische vibratoren of onbalansmotoren de hoek ϕ niet ter sprake. Voor een nadere beschouwing van de beweging van de trilgoot wordt daarom in het vervolg met onderstaande, vereenvoudigde formules gewerkt:

$$\text{Weg} = s = r (1 - \cos 2 \pi f t)$$

$$\text{Snelheid} = \dot{s} = v = 2 \pi f r \sin 2 \pi f t$$

$$\text{Versnelling} = \ddot{s} = a = 4 \pi^2 f^2 r \cos 2 \pi f t$$

Om een transporterende beweging van de goederen op een trilgoot te verkrijgen, is het voorwaarde, dat de goot zich vooruit-opwaarts en terug-neerwaarts beweegt. Deze schuine bewegingsrichting wordt bereikt door de aandrijving van de goot onder een bepaalde hoek t.o.v. de horizontale lijn met de goot te plaatsen: de instelhoek β .

Om de juiste beweging, zowel in horizontale als in verticale richting te kennen, dient de afgeleide beweging te worden ontbonden in een x- en een y-component.

Voor de horizontale component van de gootbeweging krijgen we dan:

$$\text{Weg} = x = \cos \beta \cdot r (1 - \cos 2 \pi f t)$$

$$\text{Snelheid} = \dot{x} = \cos \beta \cdot 2 \pi f r \sin 2 \pi f t$$

$$\text{Versnelling} = \ddot{x} = \cos \beta \cdot 4 \pi^2 f^2 r \cos 2 \pi f t$$

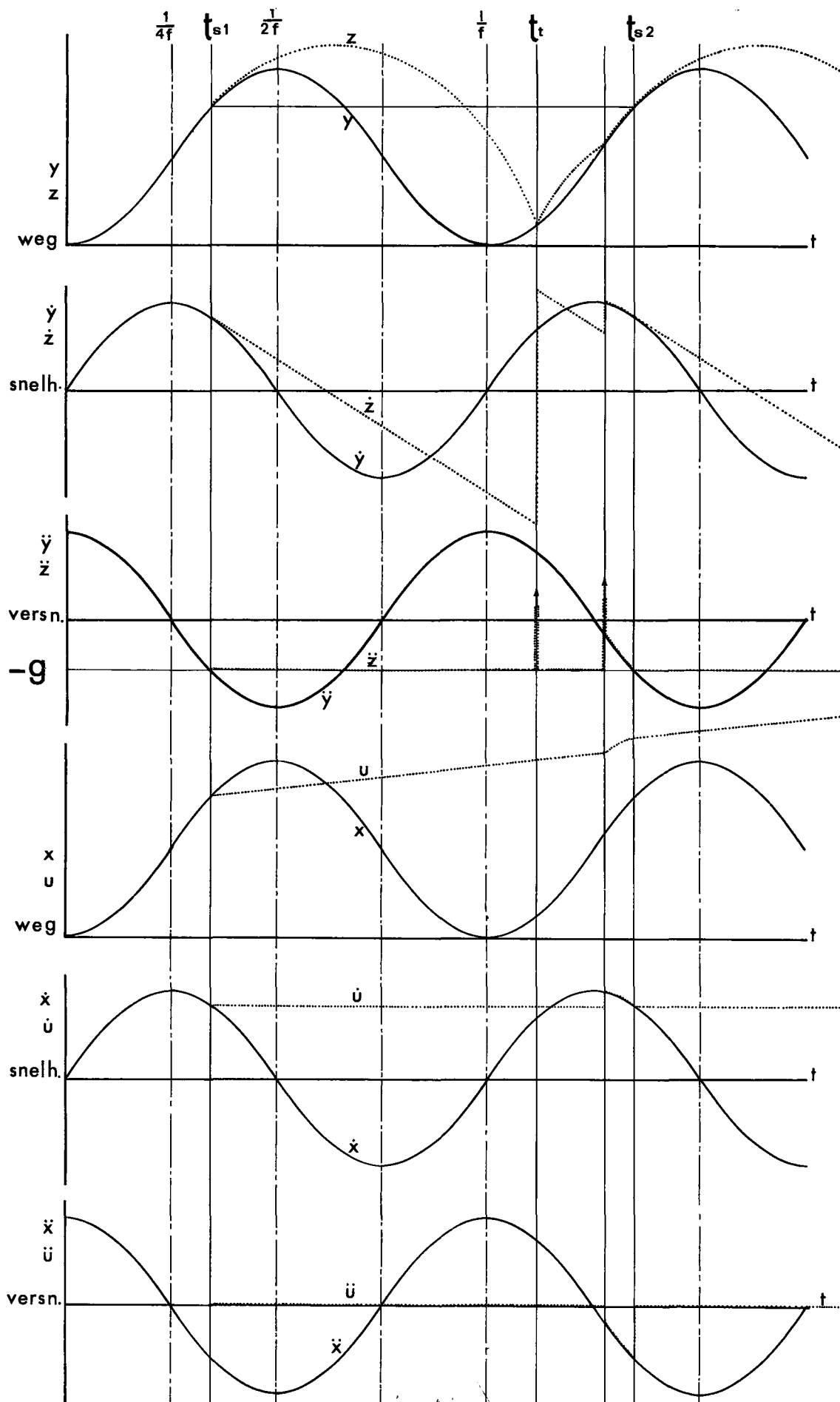
Voor de verticale componenten worden deze bewegingen:

$$\text{Weg} = y = \sin \beta \cdot r (1 - \cos 2 \pi f t)$$

$$\text{Snelheid} = \dot{y} = \sin \beta \cdot 2 \pi f r \sin 2 \pi f t$$

$$\text{Versnelling} = \ddot{y} = \sin \beta \cdot 4 \pi^2 f^2 r \cos 2 \pi f t$$

Op het deeltje werken de zwaartekracht, de normaalkracht en de wrijvingsweerstand. Onder invloed van deze krachten verkrijgt een deeltje in bepaalde situaties dezelfde snelheden en versnellingen als de goot.



Afb. 17 Voorstelling van het weg-, snelheids- en versnellingsverloop van een trillgootbeweging en van zich hierop bevindende delen als functie van de tijd. y en z zijn de verticale componenten van de goot, resp. de delen, x en u de horizontale componenten van de goot, resp. de delen.

Wanneer nu de verticale gootversnelling \ddot{y} in neerwaartse richting gelijk wordt aan de versnelling van de zwaartekracht g , dan zullen op dat tijdstip de normaal- en de wrijvingskrachten tussen goot en deeltje verdwijnen en er ontstaat een drukloos contact tussen deze beide. Wordt de verticale versnelling van de goot \ddot{y} in neerwaartse richting groter dan de versnelling van de zwaartekracht, dan wordt het contact tussen goot en deeltje geheel verbroken.

Vanaf het tijdstip dat $\ddot{y} = -g$, het zogenaamde sprongtijdstip t_s , volgt het deeltje een kogelbaan en staat het, afgezien van luchtweerstand, alleen nog bloot aan de zwaartekracht. Na een zekere tijd treft het deeltje weer de goot. Vanaf dit treftijdstip t_t neemt het deeltje opnieuw deel aan de bewegingen van de goot, tot op het tijdstip t_{s2} waar het contact met de goot opnieuw verloren gaat.

Het verplaatsen van deeltjes op een trilgoot vindt dus plaats met een sprongverloop, waarbij de deeltjes beurtelings deel hebben aan de gootbeweging en zelfstandig een deel van een kogelbaan doorlopen. Hierbij wordt aangenomen, dat geen botseffecten optreden, dus dat op het moment van treffen de deeltjes direct het bewegingspatroon van de goot volledig volgen. Het sprongverloop zal niet optreden, wanneer $\ddot{y}_{\min} \geq -g$ (of $\ddot{y}_{\max} \leq g$). De goot verkrijgt zijn maximale, verticale versnelling in neerwaartse richting op het tijdstip $t = \frac{1}{2f}$ (afb. 17). Is op dit tijdstip de versnelling \ddot{y}_{\max} niet groter dan g , dan zal het contact tussen de deeltjes en de goot niet worden verbroken.

Onder de voor de trilgoot geldende aanname, dat contact gelijke bewegingen inhoudt, bestaat een schudgoot niet (d.w.z. hij transporteert niet, omdat de goederen zich t.o.v. de goot niet horizontaal verplaatsen). Toch bestaan schudgoten. Meestal voor grover materiaal, waarbij de mate van deelneming aan de gootbeweging afhangt van de normaalkrachten, die voorwaarts groter zijn dan achterwaarts. Daardoor zijn bij de achterwaartse gootbeweging de wrijvingskrachten kleiner en treedt dus meer glijden op dan bij de voorwaartse beweging. Bij trilgoten is de achterwaartse fase contactloos.

Het sprongtijdstip t_s is te berekenen uit de gelijkstelling van de verticale gootversnelling \ddot{y}_{t_s} en de versnelling van de zwaartekracht $-g$

$$\ddot{y}_{t_s} = -g$$

$$\text{Daar } \ddot{y} = \sin\beta \cdot 4\pi^2 f^2 r \cos 2\pi ft$$

$$\text{volgt: } -g = \sin\beta \cdot 4\pi^2 f^2 r \cos 2\pi f t_s$$

$$\text{en: } t_s = \frac{1}{2\pi f} \text{bg} \cos\left(-\frac{g}{4\pi^2 f^2 r \sin\beta}\right)$$

Voorbeeld:

Een transportgoot wordt aangedreven door een elektromagnetische vibrator.

de frequentie, $f = 50$ Hz

de amplitude, $r = 0,5$ mm

de instelhoek, $\beta = 30^\circ$

Gevraagd:

Het sprongtijdstip t_s .

Oplossing:

$$t_s = \frac{1}{2\pi f} \text{ bg } \cos \left(- \frac{g}{4\pi^2 f^2 r \sin \beta} \right)$$

$$t_s = \frac{1}{2\pi \cdot 50} \text{ bg } \cos \left(- \frac{9810}{4\pi^2 \cdot 50^2 \cdot 0,5 \cdot \sin 30^\circ} \right)$$

$$t_s = 0,0063 \text{ sec}$$

=====

9.1. Werpgetal - W

Het sprongtijdstip t_s is van groot belang voor het transportverloop van goederen op een trilgoot. Dit tijdstip is afhankelijk van drie, voor de trilinstallatie kenmerkende eigenschappen:

1. de frequentie f
2. de amplitude r
3. de instelhoek β

Ten aanzien van deze eigenschappen kan nu een dimensieloze waarde worden ingevoerd, waardoor de verhouding wordt uitgedrukt van de maximale, verticale gootversnelling tot de versnelling van de zwaartekracht.

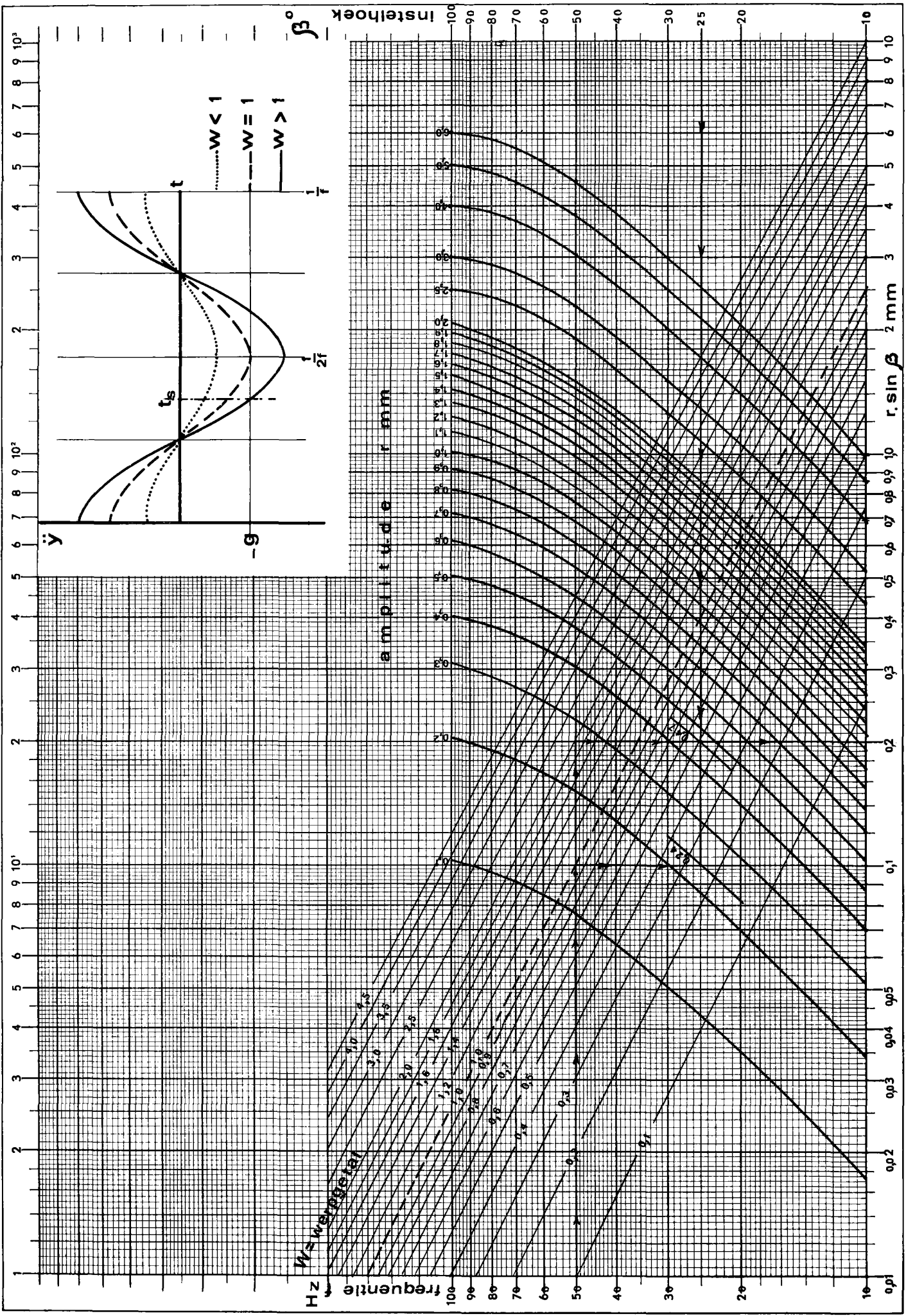
Deze verhouding wordt het werpgetal W genoemd.

$$W = \frac{\ddot{y}_{\max}}{g} = \frac{4\pi^2 f^2 r \sin \beta}{g}$$

en hiermede volgt: $t_s = \frac{1}{2\pi f} \text{ bg } \cos \left(- \frac{1}{W} \right)$

Met de gegevens uit het voorbeeld wordt:

$$W = \frac{4\pi^2 \cdot 50^2 \cdot 0,5 \cdot \sin 30^\circ}{9810} = 2,51$$



Afb. 18 Diagram voor het werpgetal W als functie van f , r en β .

Is W kleiner of gelijk 1, dan wordt de versnelling van de zwaarte-
kracht niet overschreden en wordt het contact tussen deeltjes en
goot niet verbroken. Er treden dan geen sprongen meer op en men
spreekt niet meer van een trilgoot, maar van een schudgoot.

Dus $W \leq 1$. Geen sprongverloop (schudgoot).

$W > 1$. Sprongverloop (trilgoot).

zie afb. 18, rechts boven.

De grootte van W geeft het transportverloop aan. Wanneer de aan de
trilinstallatie gebonden grootheden f , r en β bekend zijn, is W te
berekenen.

Het onderlinge verband tussen deze grootheden komt tot uiting in het
diagram (afb. 18), waarin de grenslijn ($W = 1$) is aangegeven. Verder
blijkt, dat eenzelfde W met verschillende waarden voor f , r en β te
bereiken is.

Voorbeeld bij afb. 18:

Een transportgoot heeft een frequentie van 50 Hz en een instelhoek
 β van 25° . Wat moet de amplitude tenminste zijn voor het optreden
van sprongverloop?

Oplossing:

Bij $f = 50$ Hz wordt een horizontale lijn getrokken tot $W = 1$. In het
snijpunt van deze lijnen wordt een verticale lijn neergelaten tot de
horizontale lijn, vanaf $\beta = 25^\circ$. De waarde van de amplitude r (als
parameter in het diagram) op dit snijpunt blijkt te zijn: $r = 0,24$ mm.
Dit is dus juist de grenswaarde voor het sprongverloop.

Wil men met deze goot een grotere waarde voor W , bijv. $W = 2$ en daar-
bij de frequentie en de instelhoek behouden, dan volgt uit het dia-
gram, dat de amplitude moet worden vergroot tot $r = 0,47$ mm.

In het eerdergenoemde voorbeeld waren f , r en β de bekenden en werd
het werpgetal gevraagd.

Met behulp van het diagram is deze onbekende snel af te lezen.

Bij $\beta = 30^\circ$ volgt men de lijn naar links tot de parameter $r = 0,5$ mm.
In dit snijpunt volgt men de lijn verticaal naar boven tot de fre-
quentie 50 Hz. In dit snijpunt leest men de waarde af van het werp-
getal W . Dit is 2,5.

9.2. Machinekenmerk - K

In de praktijk moet met de keuze van de frequentie en de amplitude terdege rekening worden gehouden. De voor de constructie optredende massakrachten kunnen bij de vergroting van f en r een te grote omvang aannemen. Met de maximale gootversnelling

($\ddot{s}_{G_{\max}} = 4 \pi^2 f^2 r$) wordt de grootste optredende massakracht

$$P_{\max} = \frac{G}{g} \cdot 4 \pi^2 f^2 r.$$

Uit constructieve overwegingen wordt daarom een waarde ingevoerd, waarbij rekening wordt gehouden met de maximaal optredende massakrachten.

Deze waarde, het machinekenmerk - K, geeft de verhouding aan tussen de maximaal optredende gootversnelling en de versnelling van de zwaartekracht. Afgezien van de richting van de verschillende versnelingen wordt deze dimensieloze waarde uitgedrukt als

$$K = \frac{4 \pi^2 f^2 r}{g}$$

De grootste optredende massakracht wordt dan: $P_{\max} = K \cdot G$

Het verschil tussen K en W is, dat het bij K gaat om de maximale gootversnelling en bij W om de maximale verticale versnellingscomponent \ddot{y}_{\max} . Deze component wordt mede bepaald door de instelhoek β . De betrekking tussen W en K kan derhalve worden gegeven door:

$W = K \cdot \sin \beta$. In het reeds genoemde getallenvoorbeeld wordt K:

$$K = \frac{4 \pi^2 f^2 r}{g} = \frac{4 \pi^2 \cdot 50^2 \cdot 0,5}{9810} = 5,02$$

De optredende massakrachten moeten, naar gelang de constructieve uitvoering, door de aandrijving opgebracht of door ondersteunings-elementen worden opgenomen. Om de massakrachten binnen redelijke grenzen te houden, gaat men er bij het ontwerpen van een trilinstallatie doorgaans van uit, dat K niet hoger wordt dan 6.

10. TRANSPORTVERLOOP VAN GOEDEREN OP EEN TRILGOOT

In punt 9 is het sprongtijdstop t_s berekend uit de formule:

$$t_s = \frac{1}{2 \pi f} \operatorname{bg} \cos \left(- \frac{1}{W} \right)$$

Neemt men aan, dat een deeltje tot het tijdstip t_s vast is verbonden met de trilgoot, dan zullen deeltje en goot tot het tijdstip t_s nog dezelfde snelheid hebben, om direct daarna los van elkaar te komen. Op het tijdstip t_s is ook de plaats van deeltje en goot in het x - y coördinatensysteem te bepalen. Als voorbeeld dienen weer de reeds genoemde gegevens:

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$r = 0,5 \text{ mm}$$

$$\beta = 30^\circ$$

$$t_s = 0,0063 \text{ sec.}$$

$$\begin{aligned} \text{De plaats: } x_{t_s} = u_{t_s} &= r \cos \beta (1 - \cos 2 \pi f t_s) \\ &= 0,5 \cdot 0,866 (1 - \cos 2 \pi \cdot 50 \cdot 0,0063) \\ &= 0,433 (1 - \cos 1,98) \\ &= 0,433 (1 + \cos 66^\circ 30') \\ &= 0,433 \cdot 1,4 = \underline{\underline{0,606 \text{ mm}}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{De horizontale snelheid: } \dot{x}_{t_s} = \dot{u}_{t_s} &= \cos \beta \cdot 2 \pi f r \cdot \sin 2 \pi f \cdot t_s \\ &= 0,866 \cdot 2 \pi \cdot 50 \cdot 0,5 \cdot \sin 2 \pi \cdot 50 \cdot 0,0063 \\ &= 136 \sin 66^\circ 30' \\ &= 136 \cdot 0,917 = \underline{\underline{124,7 \text{ mm/sec}}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{De plaats: } y_{t_s} = z_{t_s} &= \sin \beta \cdot r (1 - \cos 2 \pi f \cdot t_s) \\ &= 0,5 \cdot 0,5 (1 - \cos 1,98) \\ &= 0,25 (1 + \cos 66^\circ 30') \\ &= 0,25 \cdot 1,4 = \underline{\underline{0,35 \text{ mm}}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{De verticale snelheid: } \dot{y}_{t_s} = \dot{z}_{t_s} &= \sin \beta \cdot 2 \pi f \cdot r \cdot \sin 2 \pi f \cdot t_s \\ &= 0,5 \cdot 2 \pi \cdot 50 \cdot 0,5 \cdot \sin 2 \pi \cdot 50 \cdot 0,0063 \\ &= 78,5 \cdot \sin 66^\circ 30' \\ &= 78,5 \cdot 0,917 = \underline{\underline{72,0 \text{ mm/sec}}} \end{aligned}$$

Met de aanname, dat het deeltje op het tijdstip t_s dezelfde snelheid bezit als de trilgoot en dat de horizontale snelheidscomponent \dot{u} constant blijft, dan werkt op het deeltje, dat nu de bekende kogelbaan volgt, alleen nog de versnelling van de zwaartekracht. Gedurende de sprongtijd geldt voor de deeltjes:

$$t_s < t < t_t$$

$$\ddot{z} = -g$$

$$\dot{z} = -gt + C_1$$

$$z = -\frac{1}{2}gt^2 + C_1t + C_2$$

Voor $t = t_s$ volgt:

$$\ddot{z}_{t_s} = -g$$

$$\dot{z}_{t_s} = -g \cdot t_s + C_1 = r \sin \beta \cdot 2\pi f \sqrt{1 - \frac{1}{W^2}}$$

$$z_{t_s} = -\frac{1}{2} g \cdot t_s^2 + C_1 \cdot t_s + C_2 = r \sin \beta \left(1 + \frac{1}{W}\right)$$

Waaruit volgt: $C_1 = g \cdot t_s + r \sin \beta \cdot 2\pi f \sqrt{1 - \frac{1}{W^2}}$

$$C_2 = -\frac{1}{2} g t_s^2 - t_s \cdot r \sin \beta \cdot 2\pi f \sqrt{1 - \frac{1}{W^2}} + r \cdot \sin \beta \left(1 + \frac{1}{W}\right)$$

Voor de deeltjes geldt dus:

$$t_s \leq t \leq t_t$$

$$\ddot{z} = -g$$

$$\dot{z} = -g(t - t_s) + r \cdot \sin \beta \cdot 2\pi f \sqrt{1 - \frac{1}{W^2}}$$

$$z = -\frac{1}{2} g (t^2 + t_s^2) + (t - t_s) r \cdot \sin \beta \cdot 2\pi f \sqrt{1 - \frac{1}{W^2}} + g \cdot t_s \cdot t + r \cdot \sin \beta \left(1 + \frac{1}{W}\right)$$

$$= -\frac{1}{2} g (t - t_s)^2 + (t - t_s) r \sin \beta \cdot 2\pi f \sqrt{1 - \frac{1}{W^2}} + r \sin \beta \left(1 + \frac{1}{W}\right)$$

Voor $t = t_t$ volgt:

$$z_{t_t} = -\frac{1}{2} g (t_t - t_s)^2 + (t_t - t_s) r \sin \beta \cdot 2\pi f \sqrt{1 - \frac{1}{W^2}} + r \sin \beta \left(1 + \frac{1}{W}\right)$$

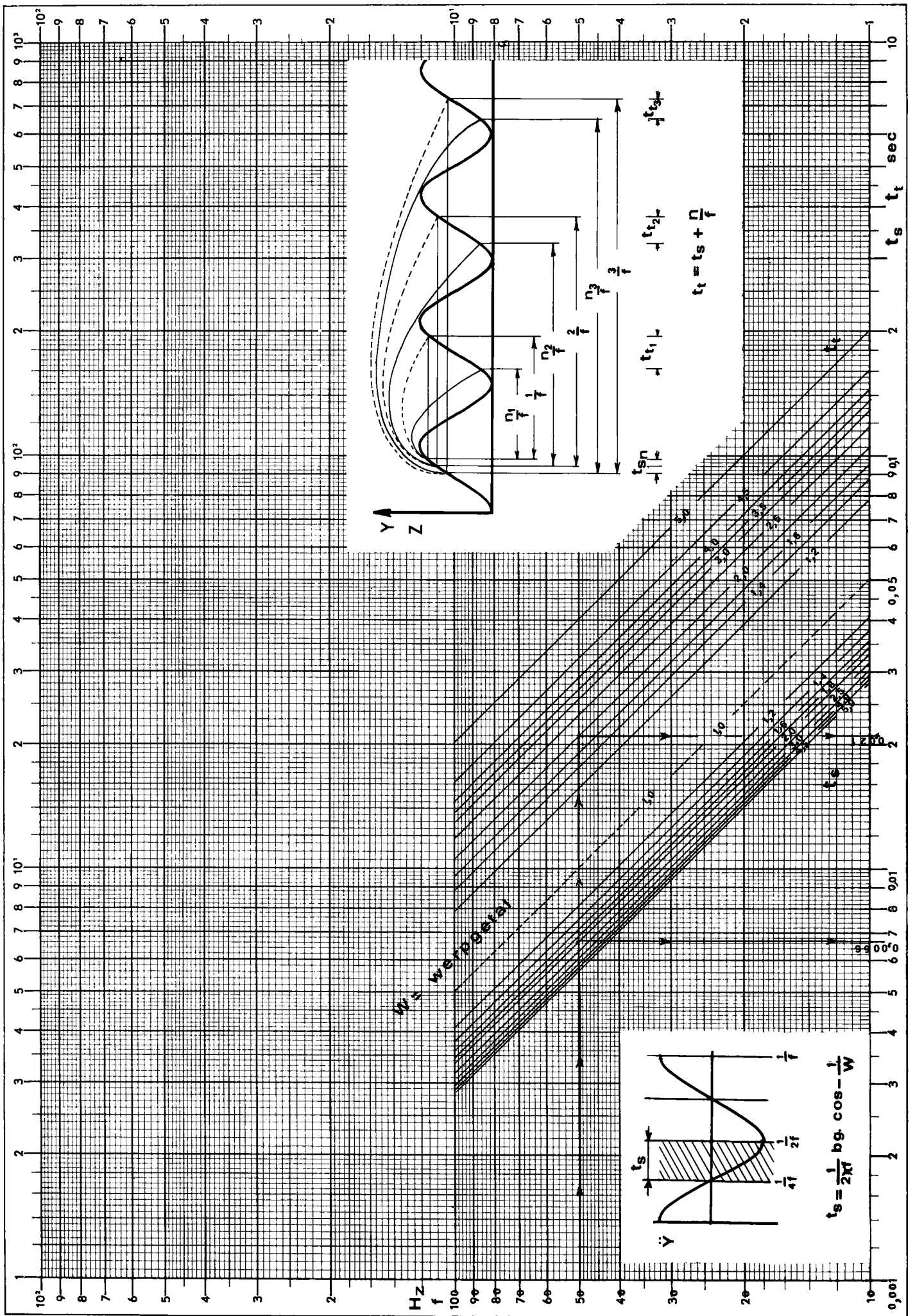
Tevens is op dit tijdstip:

$$y_{t_t} = r \sin \beta (1 - \cos 2\pi f \cdot t_t)$$

Wordt nu gesteld: $t_t = t_s + \frac{n}{f}$, dan volgt uit $z_{t_t} = y_{t_t}$

$$-\frac{1}{2} g \left(\frac{n}{f}\right)^2 + \frac{n}{f} \cdot r \sin \beta \cdot 2\pi f \sqrt{1 - \frac{1}{W^2}} + r \sin \beta \frac{1}{W} + r \sin \beta \cdot \cos 2\pi f \left(t_s + \frac{n}{f}\right) = 0$$

Hierin is $t_s = \frac{1}{2\pi f} \text{bg} \cos \frac{-1}{W}$



Afb. 19 Diagram voor het sprong- en het tref tijd stip als functie van f en W .

$$\begin{aligned} \text{dus: } \cos 2\pi f \left(t_s + \frac{n}{f} \right) &= \cos (2\pi f t_s + 2\pi n) \\ &= \cos 2\pi f \cdot t_s \cos 2\pi n - \sin 2\pi f \cdot t_s \sin 2\pi n \\ &= \cos bg \cos \frac{-1}{W} \cdot \cos 2\pi n - \sin bg \cos \frac{-1}{W} \sin 2\pi n \\ &= -\frac{1}{W} \cos 2\pi n - \sqrt{1 - \frac{1}{W^2}} \sin 2\pi n \end{aligned}$$

zodat volgt:

$$\begin{aligned} -\frac{1}{2} \frac{g}{r \sin \beta \cdot 4\pi^2 f^2} \cdot 4\pi^2 n^2 r \sin \beta + r \sin \beta \cdot 2\pi n \sqrt{1 - \frac{1}{W^2}} + \\ r \sin \beta \frac{1}{W} - r \sin \beta \cdot \frac{1}{W} \cos 2\pi n - r \sin \beta \sqrt{1 - \frac{1}{W^2}} \sin 2\pi n = 0 \\ -\frac{2\pi^2 n^2}{W} - \frac{\cos 2\pi n}{W} + \frac{1}{W} = \sqrt{1 - \frac{1}{W^2}} \{ \sin 2\pi n - 2\pi n \} \end{aligned}$$

$$W \sqrt{1 - \frac{1}{W^2}} = \frac{\cos 2\pi n + 2\pi^2 n^2 - 1}{2\pi n - \sin 2\pi n}$$

$$W = \sqrt{1 + \left(\frac{\cos 2\pi n + 2\pi^2 n^2 - 1}{2\pi n - \sin 2\pi n} \right)^2}$$

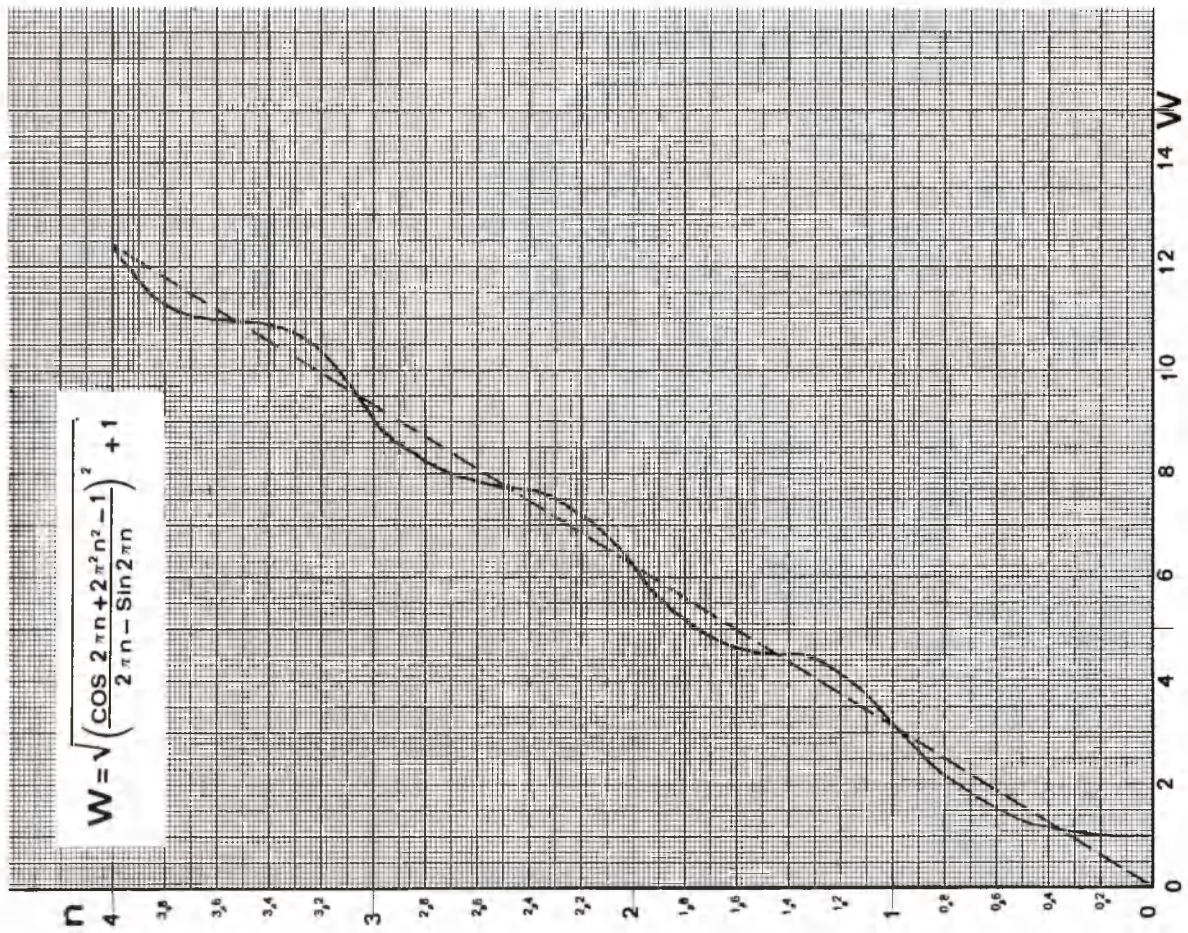
Het tijdstip, waarop de goot en de goederen elkaar weer treffen (het treftijdstip t_t), betekent het einde van de worp. Aangenomen wordt, dat er in het treftijdstip een volkomen onelastische stoot plaatsvindt tussen goot en delen en dat er vanaf bedoeld tijdstip geen relatieve beweging is tussen goot en delen ($z_{t_t} = y_{t_t}$).

De bepaling van het treftijdstip is van praktische waarde, omdat het leidt tot een bruikbare rekenmethode, waarmee de transportsnelheid van goederen op een trilgoot kan worden bepaald.

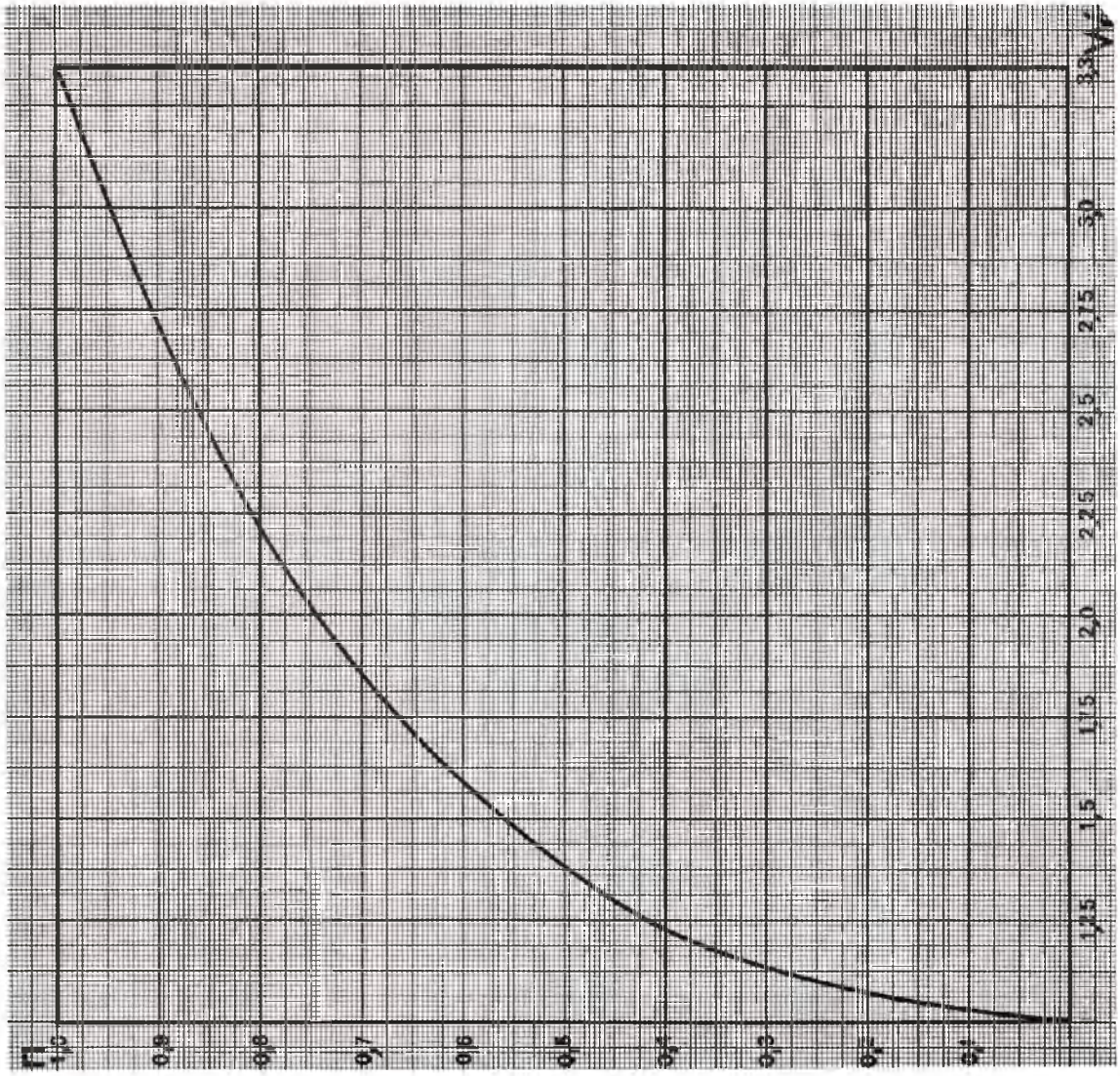
De voorwaarde $z_{t_t} = y_{t_t}$ levert de afgeleide impliciete transcendent vergelijking op. Door benaderingsmethoden is t_t te bepalen. Afb. 19 stelt een diagram voor waarin t_t , evenals t_s wordt uitgedrukt als functie van f en W .

Eenvoudiger wordt het wanneer de sprongduur in verhouding tot de periodesduur $\frac{1}{f}$ wordt uitgedrukt als n ; dan is het treftijdstip $t_t = t_s + \frac{n}{f}$. Voor de gevallen n_{geheel} ($= 0, 1, 2, 3, 4, \dots$) waarbij de sprongtijd juist gelijk is aan een volledige of veelvoud van een trillingsduur $\frac{1}{f}$, geeft de transcendent vergelijking voor het werpgetal, zeer korte uitdrukkingen voor W en t_t daar $\cos 2\pi n = +1$ en $\sin 2\pi n = 0$

$$n_{\text{geheel}}, \quad W = \sqrt{1 + \frac{2\pi^2 n^2}{2\pi n}} = 1 + \pi n$$



Afb. 20 Diagram voor het werpgetal als functie van n.



Afb. 21 Gedeelte van diagram (afb. 20) voor $1 < W < 3.3$ als functie van n.

In afb. 19 is rechtsboven het verloop getekend van de goot en de delen, waarbij de waarde n juist gelijk is aan een periodeduur of een veelvoud daarvan.

In onderstaande tabel zijn enkele waarden voor de hier bedoelde sprongtijd weergegeven.

n	W	t_s	t_t
0	1,0	$0,5 \cdot \frac{1}{f}$	$0,5 \cdot \frac{1}{f}$
1	3,3	$0,299 \cdot \frac{1}{f}$	$1,299 \cdot \frac{1}{f}$
2	6,36	$0,275 \cdot \frac{1}{f}$	$2,275 \cdot \frac{1}{f}$
3	9,48	$0,266 \cdot \frac{1}{f}$	$3,266 \cdot \frac{1}{f}$
4	12,61	$0,262 \cdot \frac{1}{f}$	$4,262 \cdot \frac{1}{f}$

In afb. 20 is het diagram voor W als functie van n weergegeven.

In afb. 21 is het gedeelte tussen $W = 1$ en $W = 3,3$ op vergrote schaal weergegeven.

In dit gebied heeft het sprongverloop een periodiek karakter. Boven $W = 3,3$ treedt een overperiodiek sprongverloop op.

Onderzoekingen hebben uitgewezen, dat het bij de gebruikelijke maximale gootversnellingen niet tot verbetering van het transportverloop leidt, wanneer met een zogenaamd overperiodiek sprongverloop wordt gewerkt.

Voor een optimale transportsnelheid is het daarentegen wel belangrijk, dat W zo dicht mogelijk tegen de 3,3 aan komt te liggen. De tijd, dat de goederen dan op de trilgoot liggen, blijft zo klein mogelijk bij een maximale sprongtijd. Dit is bijzonder belangrijk voor gemakkelijk slijtende stoffen. W wordt voor deze gevallen meestal op 2,4 tot 3,0 gesteld. Wanneer een zevende werking de belangrijkste overweging is, wordt W lager aangelegd.

10.1. Gemiddelde transportsnelheid (theoretisch)

Voor de praktijk is het belangrijk de transportsnelheid van goederen op een trilgoot te kunnen bepalen. Bij de volgende beschouwing wordt er van uitgegaan, dat het sprongverloop plaatsvindt binnen de tijd van één gootperiode ($1 < W < 3,3$), waardoor één volledige goederenbeweging plaatsvindt in de tijd $\frac{1}{f}$.

Gedurende deze tijd kan de horizontale verplaatsing van de goederen in twee delen worden gesplitst:

- a) u_s = horizontale verplaatsing gedurende de sprong,
 - b) u_c = horizontale verplaatsing gedurende het daaropvolgende contact.
- a) Een sprong begint op het tijdstip t_s en eindigt op t_t . Gedurende deze sprongtijd is de horizontale snelheid constant en wel gelijk aan de horizontale gootsnelheid op $t = t_s$

$$\text{dus: } \dot{x} = r \cdot \cos \beta \cdot 2\pi f \cdot \sin 2\pi f \cdot t_s$$

De verplaatsing gedurende de tijdsduur $t_t - t_s$ is dan: $u_s =$

$$(t_t - t_s) \dot{x} = r \cos \beta (t_t - t_s) (2\pi f \sin 2\pi f t)$$

Met $t_t - t_s = \frac{n}{f}$ en

$$t_s = \frac{1}{2\pi f} \text{ bg } \cos \frac{-1}{W} \text{ of } \sin 2\pi f t_s = \sqrt{1 - \frac{1}{W^2}}$$

$$\text{wordt } u_s = r \cos \beta \cdot 2\pi n \sqrt{1 - \frac{1}{W^2}}$$

- b) Op het tijdstip $t = t_t$ begint de contactperiode. Dit contact eindigt, wanneer de volgende sprong begint. In het beschouwde geval (met $1 < W < 3,3$) is dit op $t_{s2} = t_s + \frac{1}{f}$. Wordt gedurende de gehele contacttijd ideaal contact (dus geen glijden of botsen) verondersteld, dan is de horizontale verplaatsing van de deeltjes gelijk aan de horizontale verplaatsing van de goot tussen de tijden t_t en $t_s + \frac{1}{f}$.

$$\text{Zodat volgt: } u_c = x(t = t_s + \frac{1}{f}) - x(t = t_t)$$

$$\text{Hierin is: } x(t = t_s + \frac{1}{f}) = x(t = t_s)$$

$$\text{dus } u_c = x(t = t_s) - x(t = t_t)$$

$$= r \cos \beta \{ 1 - \cos 2\pi f t_s - 1 + \cos 2\pi f t_t \}$$

$$= r \cos \beta \{ \cos 2\pi f t_t - \cos 2\pi f t_s \}$$

Uit $z_{t_t} = y_{t_t}$ volgde hiervoor reeds:

$$-\frac{1}{2} g (t_t - t_s)^2 + (t_t - t_s) r \sin \beta \cdot 2 \pi f \sqrt{1 - \frac{1}{W^2}} +$$

$$r \sin \beta \left(1 + \frac{1}{W}\right) = r \sin \beta (1 - \cos 2 \pi f t_t)$$

Met $t_t - t_s = \frac{n}{f}$ volgt hieruit:

$$\cos 2 \pi f t_t = \frac{g}{2} \frac{n^2}{f^2} \frac{1}{r \sin \beta} - 2 \pi n \sqrt{1 - \frac{1}{W^2}} - \frac{1}{W}$$

met $\cos 2 \pi f t_s = \frac{-1}{W}$ volgt dan:

$$u_c = r \cos \beta \left\{ \frac{1}{r \sin \beta} \frac{g}{2} \frac{n^2}{f^2} - 2 \pi n \sqrt{1 - \frac{1}{W^2}} \right\}$$

Voor de horizontale verplaatsing gedurende een periode is dus:

$$u = u_s + u_c = \frac{g}{2} \frac{n^2}{f^2} \cotg \beta .$$

De gemiddelde snelheid over een periode en dus ook de gemiddelde transportsnelheid is dan:

$$\bar{u} = u \cdot f = \frac{g n^2}{2 f} \cotg \beta .$$

Voorbeeld:

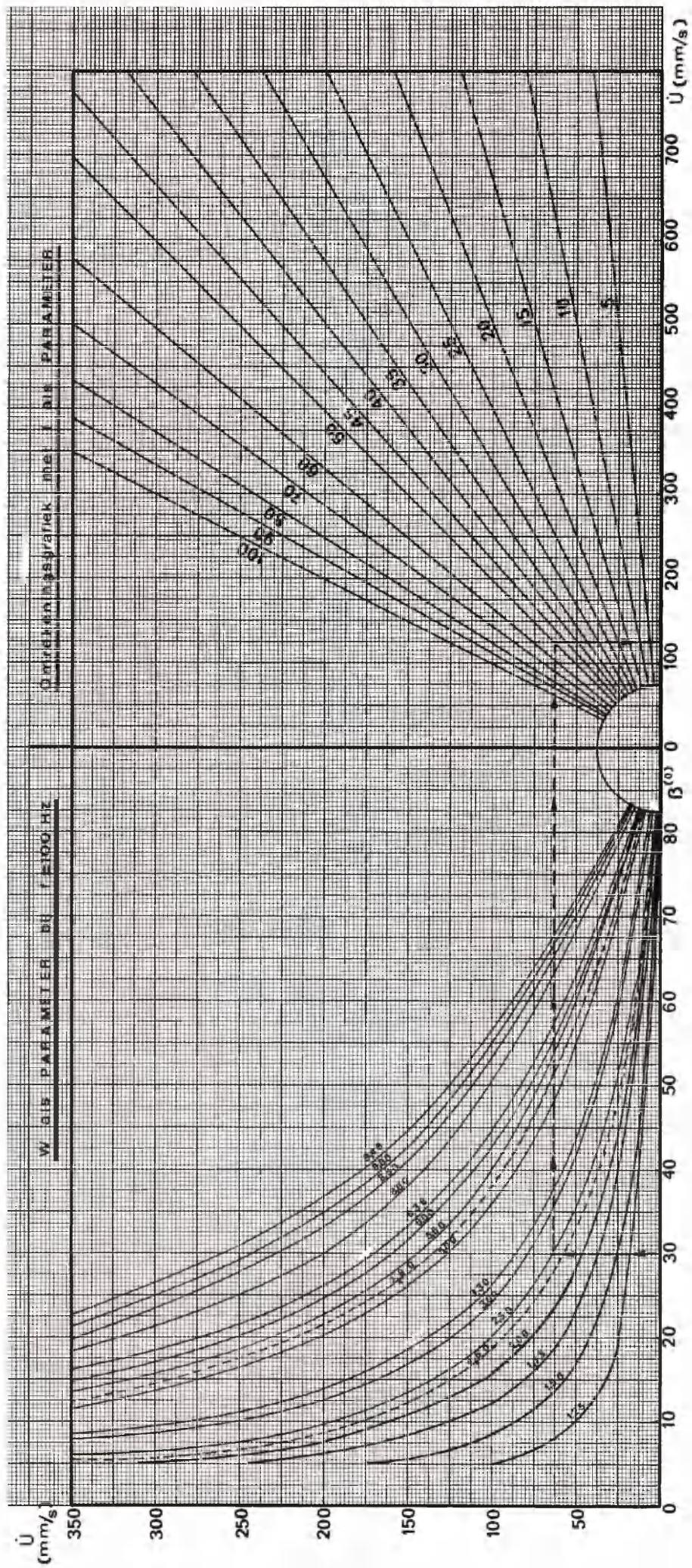
Gemiddelde transportsnelheid volgens afb. 21. $W = 2,51 \longrightarrow n = 0,86$

$$\bar{u} = \frac{g n^2}{2 f} \cotg 30^\circ = \frac{9810 \cdot 0,86^2}{2 \cdot 50} 1,732 = \underline{\underline{125,7 \text{ mm/sec}}}$$

Bezien we deze gemiddelde transportsnelheid en de in hoofdstuk 10 (blz. 16) berekende horizontale snelheid op het sprongtijdstip, dan blijkt er weinig verschil te zijn.

$$\bar{u} = 125,7 \text{ mm/sec en } \dot{x}_{t_s} = \dot{u}_{t_s} = 124,7 \text{ mm/sec.}$$

Om het omvangrijke rekenwerk voor de theoretische transportsnelheid te ontlopen, kan men gebruik maken van het diagram volgens afb. 22. In het linker gedeelte van het diagram is W als parameter uitgezet bij een frequentie van 100 Hz tegen verticaal de theoretische transportsnelheid en horizontaal de instelhoek. In het rechter gedeelte van het diagram is f als parameter getekend.



Afb. 22 Diagram voor de theoretische transportsnelheid U .

Het diagram wordt als volgt gebruikt:

Voorbeeld: $\beta = 30^{\circ}$
 $W = 2,5$
 $f = 50 \text{ Hz}$

Op het snijpunt van 30° met $W = 2,5$ kan \dot{u} worden afgelezen, echter bij een frequentie van 100 Hz. De theoretische transportsnelheid bij $f = 50 \text{ Hz}$ wordt dan uit het rechter deel van het diagram gevonden en blijkt in dit geval 125 mm/sec te zijn.

Opmerking: In het linker deel van het diagram zijn nog de lijnen $W = 4,60$ en $W = 7,80$ getekend. Deze lijnen liggen lager dan resp. $W = 2,50$ en $W = 5,50$.
De reden hiervan is, dat de sprongafstand juist over de top van de periode valt. De transportsnelheid kan in deze gevallen aanzienlijk dalen.

10.2. Gemiddelde transportsnelheid (praktisch)

Behalve van het reeds genoemde werpgetal is de werkelijke transportsnelheid van de goederen op een trilgoot nog afhankelijk van de volgende factoren:

10.2.1. Materiaalconstante η_M

De materiaalconstante is altijd kleiner dan 1 en neemt af met het stortgewicht van de goederen en met de korrelgrootte. Bovendien is η_M afhankelijk van de vochtigheid en de neiging tot kleven van de goederen.

Onder normale omstandigheden ligt η_M in de orde van 0,85.

Zeer fijne, stofvormige goederen met een korrelgrootte kleiner dan 0,06 mm zijn niet te transporteren. Hierbij speelt de luchtdoorlaat een rol; de goederen zullen op een luchtkussen gaan zweven en niet meer met de goot in aanraking komen.

10.2.2. De laaghoogte η_L

De werkelijke transportsnelheid neemt af bij een grotere laaghoogte; maximaal kan nog ongeveer 300 mm voorkomen, η_L ligt tussen 1 en 0,75.

10.2.3. De helling waaronder het transport plaatsvindt η_H

Behalve van de helling, waaronder de goederen moeten worden verplaatst, is η_H ook afhankelijk van de wrijving tussen trilgoot en goederen.

Voor stijgend transport is η_H kleiner dan 1; een stijging tot 15° is in het algemeen mogelijk.

Bij dalend transport wordt de snelheid van de goederenstroom groter; waarden van 2 tot 5 kunnen voorkomen, wanneer de daling meer dan 15° bedraagt. De grens ligt hierbij bij het afglijden van de goederen, waarbij er slijtage aan trilgoot of aan goederen zal ontstaan.

De theoretisch gevonden transportsnelheid moet dus met de hier genoemde factoren worden vermenigvuldigd, om de werkelijke snelheid te vinden. In vele gevallen moeten de constanten proefondervindelijk worden bepaald.

11. CONSTRUCTIEVE AANWIJZINGEN

Zoals reeds genoemd onder par. 9.2. gaat men bij het ontwerpen van een trilgoot graag uit van een zekere K-waarde (het machinekenmerk), om de optredende massakrachten in de berekening te betrekken.

$$K = \frac{4 \pi^2 \cdot f^2 \cdot r}{g}$$

Bij een ontwerp zal verder een zekere transportsnelheid in de regel als eis worden gesteld (par. 10.1.)

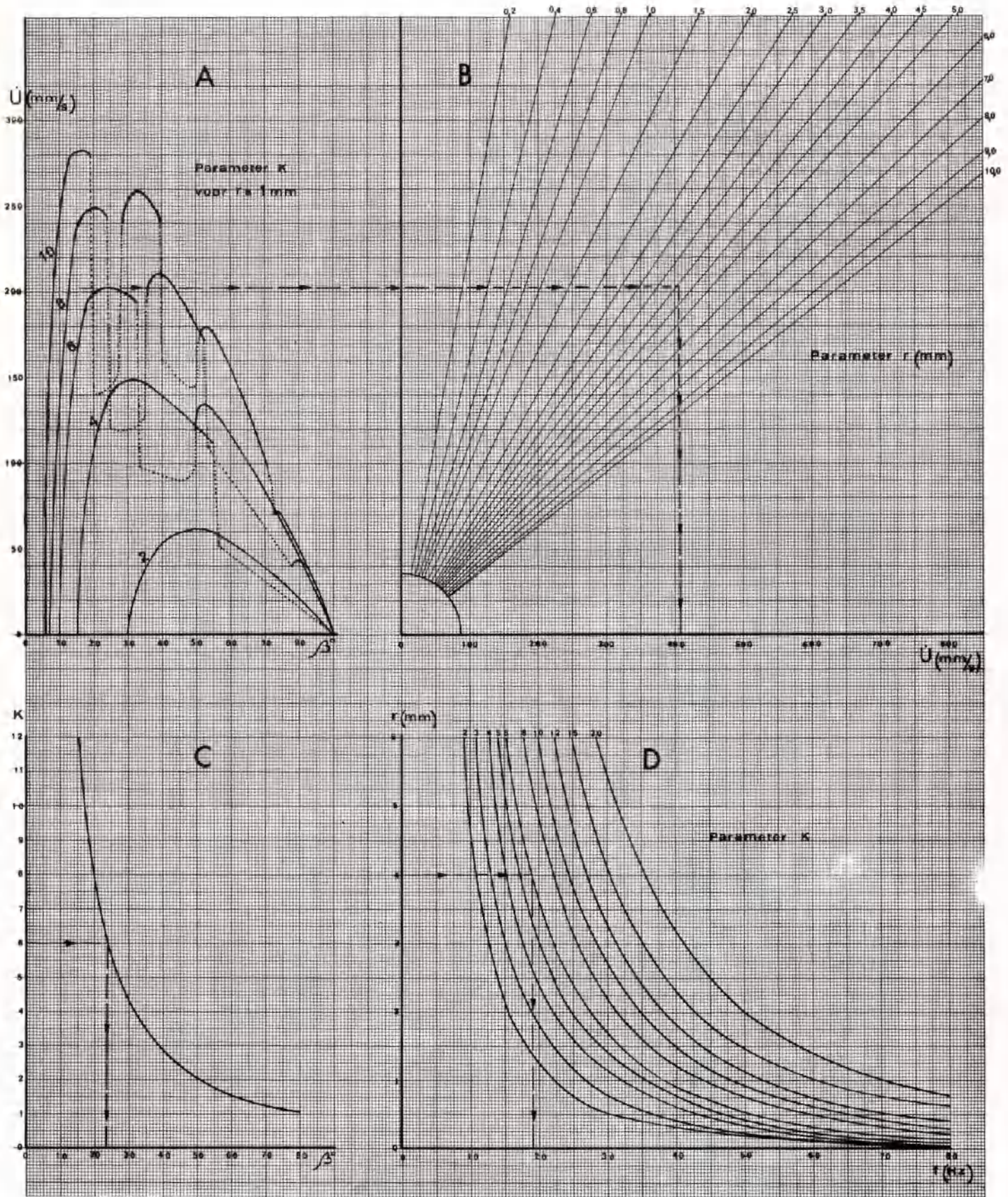
$$\bar{u} = \frac{g}{2} \cdot \frac{n^2}{f} \cdot \cotg \beta .$$

Het gaat hierbij dus om twee vergelijkingen met drie onbekenden. Met de randvoorwaarden dat:

$$f > 0, r > 0, W > 1 \text{ en } n > 0$$

hebben deze vergelijkingen bij aanname van een zekere instelhoek β slechts één oplossing voor f en r . Na aanname van hoek β is het niet mogelijk de gewenste transportsnelheid te bereiken met een grotere frequentie en een kleinere amplitude, dan wel een kleinere frequentie en een grotere amplitude. De aanname van hoek β is niet willekeurig.

Om omvangrijk rekenwerk en moelzaam uitproberen te vermijden, heeft men met behulp van elektronische rekenapparatuur aan de Technische Hogeschool voor transporttechniek te Hannover een diagram (afb. 23 A) opgesteld. In dit diagram is K voor een vaste amplitude van 1 mm als parameter uitgezet tegen verticaal de transportsnelheid en horizontaal de instelhoek. (Uit dit diagram blijkt onmiddellijk de ongunstige invloed op de transportsnelheid, die veroorzaakt wordt door de onjuiste sprongafstand.)



Afb. 23 Hulpdiagrammen bij de constructie.

Als toelichting op afb. 23 wordt nu met behulp van de getekende diagrammen het volgende voorbeeld genoemd.

Een trilgoot met een maximaal toelaatbaar kenmerk $K = 6$ dient goederen sprongsgewijze te transporteren met een gewenste snelheid van tenminste 400 mm/sec.

Afb. 23 A

De meest gunstige instelhoek bij de maximale waarde $K = 6$ (voor $r = 1$ mm) blijkt te zijn $23,5^\circ$ (zie ook afb. 23 C).

Afb. 23 B

Voor de vereiste transportsnelheid van bijv. 410 mm/sec (bij $K = 6$) moet evenwel de amplitude niet 1 mm maar 4 mm bedragen.

Afb. 23 C

Is een variant op diagram A.

Afb. 23 D

Geeft tenslotte bij $K = 6$ en de uit B gevonden amplitude van $r = 4$ mm de gewenste frequentie $f = 19$ Hz.

Ter controle van dit voorbeeld kan de theoretische berekening nogmaals dienen.

Gegevens:

$$K = 6$$

$$\beta = 23,5^\circ$$

$$r = 4 \text{ mm}$$

$$f = 19 \text{ Hz}$$

$$\bar{u} = 410 \text{ mm/sec}$$

Controle:

$$W = K \cdot \sin \beta = 6 \cdot \sin 23,5^\circ = 2,39 \quad (\text{punt 9.2.})$$

$$n = (\text{bij } W = 2,39) = 0,83 \quad (\text{afb. 21})$$

$$\bar{u} = \frac{g}{2} \cdot \frac{n^2}{f} \cdot \cotg \beta = \frac{9810}{2} \cdot \frac{0,83^2}{19} \times \cotg 23,5^\circ = 410 \text{ mm/sec} \quad (\text{punt 10.1.})$$

12. SUGGESTIES VOOR TOEPASSING IN DE LANDBOUW

De aantrekkelijke zijde van het triltransport, zoals dit in de inleiding is genoemd, zal voor praktische toepassing in land- en tuinbouw wel de nodige moeilijkheden meebrengen.

Wanneer de gebruikelijke land- en tuinbouwwerktuigen in grote lijnen worden ingedeeld als: grondbewerkings-, verzorgings-, zaai-, oogst- en verwerkingsmachines, dan dient men er rekening mee te houden dat, behalve de meeste verwerkingsmachines, praktisch alle andere machines mobiele werktuigen zijn, die over een betrekkelijk oneffen oppervlakte worden gebruikt.

Een stroombron voor de aandrijving van de trilapparatuur is niet aanwezig. Een op een trekker gebouwde generator zou hier kunnen worden toegepast.

Bij de grondbewerking en de verzorging van grond of gewassen lijkt de toepassing van de triltechniek niet direct aantrekkelijk, omdat er veel kans zal bestaan op verdichting van de bodem.

Voor het zaaien en poten kan worden gedacht aan het gericht aanvoeren van zaai(poot)goed, dat één voor één op de gewenste plaats in de grond moet worden gebracht. Een wenteltransporteur zal, afgezien van de zeer geringe capaciteit, een onregelmatig produkt niet met gelijke tijdsintervallen kunnen afwerpen, hetgeen tot uiting zal komen in de onderlinge afstanden van het produkt in de bodem. Een afzonderlijk, nauwkeurig werkend verdeelmechanisme zal dan voor de juiste dosering moeten zorgen.

Het verdeelmechanisme vormt dus het essentiële onderdeel. In plaats van een wenteltransporteur zou het produkt ook via een goot of buis, eventueel voorzien van een vibrator, naar het verdeelmechanisme kunnen worden gevoerd.

Bij het oogsten gaat het meestal om produkten die uit of van de grond moeten worden gehaald. Lostrillen van produkten zou het oogsten op zich in zoverre misschien kunnen verlichten, dat deze produkten lossen in de bodem komen. Door de afhankelijkheid van de weersomstandigheden is de oogstduur in de land- en tuinbouw in de regel zeer kort. De oogstmachines hebben diensvolgens een relatief hoge capaciteit, die via trillingen moeilijk haalbaar zal zijn.

In de tuinbouw wordt wel gebruik gemaakt van een mechanische oogstplukker. Hierbij wordt een tak of een stam in beweging gebracht, waardoor de vruchten worden losgeschud. Ook bij het bestuiven van tomaten wordt wel een trillende staaf tegen een bloemstengel gehouden, waardoor het stuifmeel losraakt.

Bij de verwerkingsmachines, die veelal stationair zijn en in of nabij de bedrijfsgebouwen zijn opgesteld, zal het waarschijnlijk wel mogelijk zijn om met behulp van trillingen diverse toepassingen te vinden. Men kan in dit verband denken aan zeefinstallaties, leesbanden en sorteerinrichtingen. Ter voorkoming van brugvorming in graan-, of voedersilo's kan een vibrator goede uitkomsten bieden.

Ook bij het nauwkeurig doseren, eventueel met gewichts- of tijdsregeling, van krachtvoer voor vee zijn trillinstallaties zeker bruikbaar.
