

# Berekeningsmethoden voor de leidingweerstand van mengmest

Ir. M.W.M.F. Arts  
Dr. Ir. T. van Vliet (LUW)  
Ing. M.G. Telle  
Ir. P.J.W. ten Have

imag-dlo



SIGN: R 606-91/12  
EX. NO:  
MLV:

rapport 91-12  
augustus 1991  
prijs f 20,00

558992

CIP-GEGEVENS KONINKLIJKE BIBLIOTHEEK, DEN HAAG

**Berekeningsmethoden**

Berekeningsmethoden voor de leidingweerstand van mengmest / M.W.M.F. Arts . . . [et al.]. – Wageningen : Instituut voor Mechanisatie, Arbeid en Gebouwen (IMAG-DLO). – III. Met lit. opg. – Met samenvatting in het Engels.

ISBN 90-5406-004-2

NUGI 849

Trefw.: mengmest en leidingweerstand.

© 1991

IMAG-DLO

Postbus 43 – 6700 AA Wageningen

Telefoon 08370-76300

Telefax 08370-25670

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

*All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system of any nature, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior written permission of the publisher.*

# Voorwoord

Uit ervaring is bekend dat de stromingsweerstand van mengmest verscheidene factoren hoger kan zijn dan van water. Bij het IMAG verscheen in 1984 een publikatie over mestpompen waarin de vermengbaarheid van mengmest is ingedeeld naar drogestofgehalte. Aan die drogestofklassen was een factor ten opzichte van de stromingsweerstand van water door leidingen gekoppeld.

In 1987 is het IMAG gestart met een meer fundamenteel onderzoek naar de stromingseigenschappen van mengmest. Reeds in de beginfase van het onderzoek ontstonden contacten met de vakgroep Reologie van de Universiteit Twente en met de sectie Zuivel en Levensmiddelen-natuurkunde van de Landbouwniversiteit. Bijzondere dank is verschuldigd aan T. van Vliet (LUW) voor de wetenschappelijke begeleiding en aan mevr. A.E.A. de Groot-Mostert (LUW) voor de instructies bij de bediening van de apparatuur. Voor de modelmatige verwerking van de resultaten is gebruik gemaakt van moderne computergestuurde apparatuur voor de reometrie.

Een aantal berekeningen konden worden geverifiëerd met nauwkeurig uitgevoerde metingen aan verschillende soorten mest. Veel dank aan J.A. Huizing en aan H.A. Scheffer is hier op zijn plaats.

Dit rapport is met name bedoeld voor diegenen die met, zowel klein- als grootschalig, transport van mest te maken hebben en met de stroming van mest in apparatuur. Wij vertrouwen hiermee een bijdrage te hebben geleverd aan de oplossing van stromingsproblemen die zij daarbij kunnen ondervinden.

Financiële ondersteuning door het Financieringsoverleg Mest- en Ammoniakonderzoek (FOMA) heeft de uitvoering van het project gestimuleerd.

Ir. A.A. Jongebreur  
directeur

# Inhoud

|   |    |
|---|----|
| <b>Voorwoord</b> .....  | 3  |
| <b>Samenvatting</b> .....   | 5  |
| <b>Abstract</b> .....   | 6  |
| <b>1 Inleiding</b> .....  | 7  |
| <b>2 Berekeningsmethoden</b> .....  | 8  |
| 2.1 Algemeen .....  | 8  |
| 2.2 Reologische modellen .....  | 8  |
| 2.3 Pijpstroming .....  | 9  |
| 2.3.1 Laminaire stroming .....  | 10 |
| 2.3.2 Turbulente stroming .....   | 12 |
| 2.3.3 Overgangsgebied laminaire-turbulente stroming .....                         | 12 |
| 2.3.4 Berekening van de stromingsweerstand .....                                  | 14 |
| 2.4 Stroming door appendages .....  | 18 |
| 2.5 Minimale en maximale stromingsnelheid .....                                   | 19 |
| 2.5.1 Minimale stroomsnelheid .....   | 19 |
| 2.5.2 Maximale stroomsnelheid .....   | 20 |
| <b>3 Vergelijking met praktijkgegevens</b> .....                                  | 21 |
| <b>4 Discussie</b> .....  | 23 |
| <b>5 Conclusie</b> .....  | 25 |
| <b>Symbolen, afkortingen en begrippen</b> .....                                   | 26 |
| <b>Summary</b> .....  | 28 |
| <b>Literatuur</b> .....   | 29 |
| <b>Bijlagen</b> .....   | 30 |
| <b>Bijlage 1 Reologische gegevens van diverse soorten mest</b>                    |    |
| Tabel 1 Viscositeit en viscositeitsgedrag van rundermengmest bij 20 °C            |    |
| Tabel 2 Viscositeit en viscositeitsgedrag van varkensmengmest bij 20 °C           |    |
| Tabel 3 Viscositeit en viscositeitsgedrag van een kippemest (17,4 % ds) bij 20 °C |    |
| Tabel 4 Viscositeit en viscositeitsgedrag van een zeugemest                       |    |
| Tabel 5 Viscositeit en viscositeitsgedrag van een vleeskalvergier                 |    |
| <b>Bijlage 2 Berekening van de stromingsweerstand in leidingen</b>                |    |
| <b>Bijlage 3 Berekening minimale stroomsnelheid</b>                               |    |

# Samenvatting

Dit rapport behandelt de berekening van drukverliezen van verschillende soorten mengmest in rechte pijpen waarbij wordt uitgegaan van bekend veronderstelde reologische gegevens.

Bij de gebruikelijke berekeningen van de stromingsweerstand van vloeistoffen in leidingen wordt een constante viscositeit aangenomen. Echter de viscositeit van mengmest hangt behalve van het drogestofgehalte ook af van de stroomsnelheid. Bij toenemende afschuifnelheid (relatieve stroomsnelheid van de vloeistofdeeltjes ten opzichte van elkaar) neemt de viscositeit af. Alleen bij dunne mest en bij gier is de viscositeit onafhankelijk van de stroomsnelheid.

Door de stromingsafhankelijke viscositeit zijn de gebruikelijke berekeningsmethoden voor bijvoorbeeld water niet geschikt. Uit eerder onderzoek aan mengmesten van runderen, varkens en kippen bleek dat de stromingsafhankelijke viscositeit beschreven kan worden met bepaalde, bekende modellen voor niet-Newtonse vloeistoffen (Ostwald-de Waele, Herschel-Bulkley). Met behulp van die modellen werden, gebruikmakend van berekeningsmethoden voor niet-Newtonse vloeistoffen, de drukverliezen bij stroming door pijpen berekend. Uitgewerkte voorbeelden van deze berekeningen voor bovengenoemde soorten mengmest zijn gegeven. Daarnaast werden berekeningen uitgevoerd via het klassieke diagram van de wrijvingscoëfficiënt in afhankelijkheid van het Reynoldsgetal. Bij het Reynoldsgetal werd de schijnbare viscositeit gebruikt, dat is de viscositeit van de vloeistof onder de heersende omstandigheden. De berekende waarden voor runder- en varkensmengmest zijn vergeleken met de gemeten waarden bij een proefopstelling op praktijkschaal. De afwijking lag tussen ca. 10 en 25%. Omdat er geen wezenlijk verschil tussen de verschillende methoden werd gevonden, wordt de voorkeur gegeven aan de berekening met het genoemde klassieke diagram met aangepast Reynoldsgetal.

Voor de meest gebruikte leidingdiameters (72,5, 90 en 150 mm) zijn grafieken gegeven met berekende drukverliezen in afhankelijkheid van het drogestofgehalte van runder- en varkensmengmest en van de stroomsnelheid in de pijp.

Om het ook mogelijk te maken voor de drukberekeningen uit te gaan van water zijn in grafiekvorm voor runder- en voor varkensmengmest verhoudingsgetallen gegeven. Uit deze grafieken blijkt duidelijk dat het niet voldoende is bij de berekening van drukverliezen uit te gaan van de diersoort en het drogestofgehalte.

Een aanbeveling is gedaan over de minimale en maximale stroomsnelheden in verband met respectievelijk uitzakkingsverschijnselen en waterslag.

# Abstract

This report deals with the calculation of pressure losses of different slurry types in straight pipes. Because of the dependence of the viscosity with the conditions during flow of nearly all slurries, the conventional methods for calculating pressure losses in pipe-lines are not suitable.

From earlier investigations it appeared that the slurry of cattle, pigs and hens could be described by known models for non-Newtonian liquids and the parameters of the models have been established. These data were used in this report in equations for the pressure loss of non-Newtonian liquids in straight pipes. The calculations are given in detail. Besides this the classical diagram of the friction coefficient with the Reynolds Number was used as a calculation method. For the viscosity in de Reynolds Number the apparent viscosity (which is the viscosity as it appears under the conditions of flow) was used. No essential differences between the applied methods were found. The method with using the classical diagram and the apparent viscosity is preferred. Calculated values for cattle and pig slurry were compared with experimental data from a pipe rig on a commercial scale. Deviations were from about 10 till 25%.

Graphs with calculated pressure losses for cattle and for pig slurry for straight pipes with ID of 72.5, 90 and 150 mm are given, depending of dry matter content and of flow rate. Besides that a graphical comparison with water is presented.

Minimum and maximum advised flow rates are given.

# 1 Inleiding

Met de introductie van mestkelders onder de stallen voor runderen en varkens rond 1960 is het transport van mest sterk gemechaniseerd. De min of meer gescheiden opvang van vaste mest en gier werd toen grotendeels vervangen door een gezamenlijke opvang, resulterend in mengmest. Een belangrijke eigenschap van mengmest is de verpompbaarheid. Het transport van mest kan zowel volgens een continu werkend systeem als op discontinue wijze plaatsvinden. Bij continue systemen worden mestpompen gebruikt van het centrifugaal- of het verdringertype. Bij het discontinue systeem wordt de mest ladingsgewijs in een tank gezogen middels een vacuüm. Aanvankelijk bedroeg de leidinglengte slechts enkele meters maar deze afstand werd groter door uitbreiding van de boerderijen en door de bouw van mestsilo's op het erf. Momenteel komen nog grotere afstanden voor omdat in toenemende mate de silo's gesitueerd moeten worden op milieuhygiënisch meer verantwoorde plaatsen. Om bodembeschadiging van natte percelen te voorkomen, kan de mest op het land worden gebracht door een trekker waarop een verdeelinrichting (bijvoorbeeld een sproeikop) is gemonteerd. De verdeelinrichting is met een lange soepele slang verbonden met een pomp-tankwagen die langs de weg of op de kopakker is geparkeerd. Een mogelijke toekomstige ontwikkeling is een leidingsysteem vanaf de boerderij naar een centrale mestopslag. Door de langere leidingen en het toenemende drogestofgehalte van de mest neemt de leidingweerstand toe en is er technisch en economisch behoefte aan een optimaal leidingsysteem.

Bosma en Verkaik (1984), Heeres (1986) en Huizing en Heeres (1986) hebben de drukverliezen van mest in leidingen vergeleken met die van water. Dit resulteerde in een globale indeling van mest naar stromingseigenschappen op basis van het drogestofgehalte. Bij de indeling werden verhoudingsfactoren gegeven voor de weerstand in pijpleidingen ten opzichte van water. Door het toenemend belang van een juiste dimensionering van leidingen en pompen is er behoefte aan een nadere precisering van de verhoudingsfactoren.

Het doel van het onderzoek is na te gaan hoe de stromingsweerstand voor mengmest in rechte pijpen kunnen worden berekend, als uitgegaan wordt van reologische gegevens; welke methode de voorkeur heeft en hoe groot de afwijkingen met de werkelijkheid zijn.

## 2 Berekeningsmethoden

### 2.1 Algemeen

Bij de stroming van vloeistoffen moet onderscheid gemaakt worden tussen homogene en heterogene systemen. Mest is een suspensie en behoort tot de heterogene systemen. Deze kunnen ten aanzien van de ontmenging worden onderscheiden in stabiele en niet-stabiele systemen; beide komen bij mest voor. In eerste instantie wordt bij de berekeningen uitgegaan van stromingstoestanden waarbij geen afzetting of opdrijven van stoffen plaatsvindt. Verder moet onderscheid worden gemaakt tussen al of niet-Newtonse vloeistoffen. De Newtonse vloeistoffen zijn gekenmerkt door een viscositeit die onafhankelijk is van de stroomsnelheid maar wel afhangt van de temperatuur. Bij niet-Newtonse vloeistoffen is de viscositeit ook afhankelijk van de stroomsnelheid. De relevante parameter voor de stroomsnelheid in relatie tot de viscositeit is de afschuifnelheid; dat is het verloop van de snelheid bij laminaire stroming loodrecht op de stromingsrichting. Verder is bij de stroming nog van belang of deze laminair of turbulent is. Bij laminaire stroming verplaatsen de vloeistofdeeltjes zich uitsluitend in de richting van de stroming. Bij turbulente stroming is de beweging van de deeltjes niet alleen in de stroomrichting waardoor de stroming visueel veel onregelmatiger is. Bij laminaire stroming heeft de ruwheid van de pijp, indien relatief klein ten opzichte van de diameter, geen invloed op de stromingsweerstand; bij turbulente stroming wel.

### 2.2 Reologische modellen

Uit de literatuur (Türk, 1987; Schofield, 1984) en uit eerder onderzoek bij het IMAG (Arts, nog niet gepubliceerde resultaten) bleek dat de gebruikelijke soorten mengmest een niet-Newtonse stromingsgedrag vertonen en dat daardoor de viscositeit niet met één waarde kan worden aangegeven. De viscositeit is het quotiënt van afschuifspanning en afschuifnelheid. Bij Newtonse vloeistoffen is dit quotiënt onafhankelijk van de afschuifnelheid. Bij niet-Newtonse vloeistoffen is de aldus berekende viscositeit, die dan schijnbare viscositeit wordt genoemd, afhankelijk van de afschuifnelheid. Voor de weergave van de viscositeit van een niet-Newtonse vloeistof is een reogram nodig, waarin de schijnbare viscositeit gegeven is als functie van de afschuifnelheid. Arts (loc. cit.) heeft de viscositeiten van diverse Nederlandse soorten mengmest beschreven met een regressievergelijking uit een reologisch model.

Uit laatstgenoemd onderzoek zijn in bijlage 1 voor een aantal gebruikelijke soorten mest van runderen, varkens, kippen, zeugen en kalveren in tabelvorm de viscositeiten bij een aantal afschuifnelheden gegeven. Daarnaast zijn de parameters vermeld van de reologische modellen die bij de betreffende mestsoort gebruikt kunnen worden. De reologische eigenschappen worden behalve door de concentratie van de droge stof ook bepaald door de aard en de vorm ervan. Er is evenwel vanuit gegaan dat de variaties van de twee laatstgenoemde factoren beperkt zijn door de vrij uniforme voeding van de Nederlandse landbouwhuisdieren. De gemeten soorten worden tot de meest voorkomende in Nederland gerekend. Bij het daadwerkelijk ontwerpen van leidingen moet men uiteraard wel nagaan of de mest daaraan voldoet. Is dit niet het geval dan moet van de betreffende mest een reogram worden bepaald.



## 2.3 Pijpstroming

Bij de berekening van de leidingweerstand moet eerst worden vastgesteld of de stroming laminair of turbulent is. Bepalend daarvoor is het Reynoldsgetal  $Re$ .

$$Re = \frac{\rho * v * d}{\mu} \quad (1)$$

met:  $v$  gemiddelde stroomsnelheid [m/s]  
 $\rho$  soortelijke massa [kg/m<sup>3</sup>]  
 $d$  inwendige diameter van de leiding [m]  
 $\mu$  dynamische viscositeit [Pa·s]

Als het Reynoldsgetal kleiner is dan 2300 is de stroming altijd laminair; boven  $Re = 5000$  is zij als regel turbulent.

In veel gevallen is het nodig de afschuifnelheid in de pijp te kennen. Als de vloeistof Newtons is en de stroming laminair, geldt voor de afschuifnelheid aan de wand:

$$\dot{\gamma}_w = \frac{8 v}{d} \quad (2)$$

Voor deze afschuifnelheid wordt ook wel de benaming Newtonse afschuifnelheid gebruikt. Bij benadering geldt de formule ook voor niet-Newtonse vloeistoffen. Is bij niet-Newtonse vloeistoffen de stromingsindex  $n$  van een reologisch model bekend, dan kan bovenstaande formule worden aangepast:

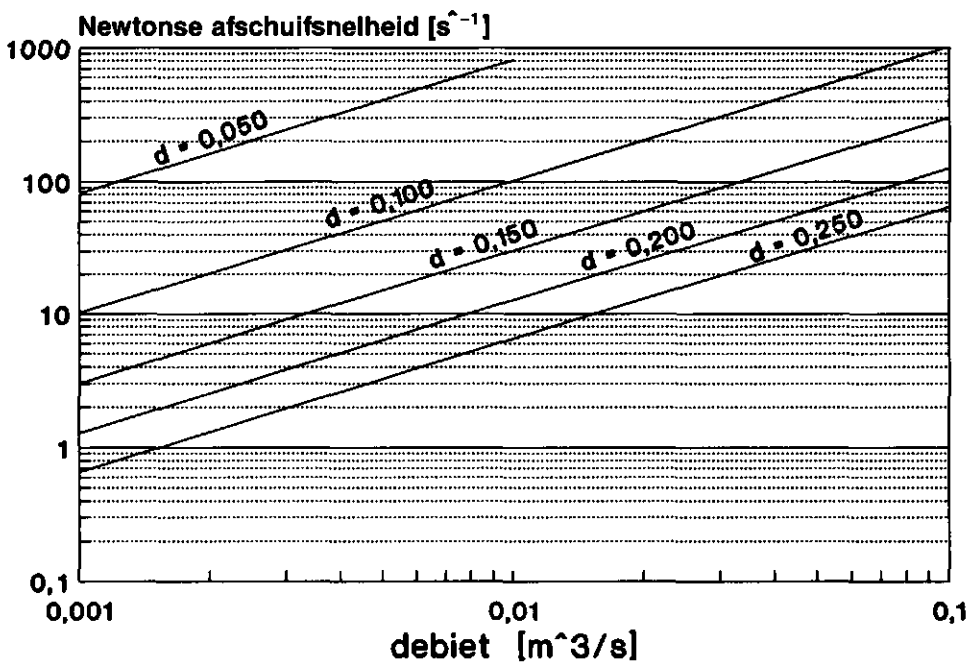
$$\dot{\gamma}_w = \left( \frac{3n + 1}{4n} \right) * \frac{8 v}{d} \quad (3)$$

In figuur 1 is de afschuifnelheid voor een Newtonse vloeistof grafisch gegeven als functie van het debiet en de pijpdiameter. Voor niet-Newtonse vloeistoffen moet de correctiefactor volgens vergelijking 3 worden gebruikt. Deze factor is eveneens in figuur 1 opgenomen.

Analoog aan het Reynoldsgetal voor Newtonse vloeistoffen is het veralgemeend Reynoldsgetal voor niet-Newtonse vloeistoffen gedefinieerd. In de meest eenvoudige vorm is dit:

$$Re' = \frac{\rho * v * d}{\mu_a} \quad (4)$$

met  $\mu_a$  de schijnbare viscositeit [Pa·s].



Figuur 1 Relatie tussen debiet, pijpdiameter en afschuifsnelheid aan de wand.

Figure 1 Relationship between flow, pipe diameter and shear velocity at the wall.

#### Correctie voor niet-Newtonse vloeistoffen

| stromingsindex n | vermenigvuldigingsfactor |
|------------------|--------------------------|
| 1,0              | 1,00                     |
| 0,9              | 1,03                     |
| 0,8              | 1,06                     |
| 0,7              | 1,11                     |
| 0,6              | 1,17                     |
| 0,5              | 1,25                     |
| 0,4              | 1,38                     |

#### 2.3.1 Laminaire stroming

Bij Newtonse vloeistoffen kan voor de berekening van het drukverlies  $\Delta p$  bij stroming in een pijp de volgende formule, die op een dimensie-analyse is gebaseerd, worden gebruikt (Bird et al, 1960):

$$\Delta p = \lambda * \frac{\Delta l}{d} * \frac{1}{2} * \rho v^2 \quad (5)$$

hierbij is de waarde van de dimensieloze  $\lambda$ , de wrijvingscoëfficiënt, afhankelijk van het getal van Reynolds. De formule kan zowel voor laminaire als voor turbulente stroming worden gebruikt.

Wordt de stroming tot het laminaire gebied beperkt dan kan de wet van Poiseuille worden

gebruikt:

$$\Delta p = \frac{32 \mu \Delta l v}{d^2} \quad (6)$$

Combinatie van (5) en (6) levert voor het laminaire gebied:

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (7)$$

De wrijvingscoëfficiënt bij laminaire stroming is volgens de metingen van Nikuradse (Huisman, 1969) onafhankelijk van de wandruwheid. De relatieve wandruwheid  $d/\epsilon$  was bij die metingen maximaal 30 ( $\epsilon$  is de wandruwheid in m).

Bij de bepaling van het Reynoldsgetal voor niet-Newtonse vloeistoffen, zoals de meeste soorten mengmest, moet de schijnbare viscositeit worden gebruikt. De schijnbare viscositeit (bij de heersende afschuifsnelheid) kan worden verkregen uit een tabel (bijlage 1) of uit een reogram. Hieronder wordt de methode beschreven voor reogrammen die benaderd kunnen worden met een regressievergelijking volgens Ostwald-de Waele, respectievelijk Herschel-Bulkley.

Voor mestsoorten waarvan het viscositeitsgedrag kan worden beschreven met een regressievergelijking volgens Ostwald-de Waele geldt:

$$\tau = k * \dot{\gamma}^n \quad (8)$$

hierin zijn  $\tau$  de afschuifspanning [Pa]  
k de consistentie-index [Pa·s<sup>n</sup>].

De laatstgenoemde formule is ook bekend onder de naam machtwet of power law.

Bij mest met een zwichtspanning kan het viscositeitsgedrag meestal beschreven worden met een regressielijn van het Herschel-Bulkley model:

$$\tau = \tau_0 + k * \dot{\gamma}^n \quad (9)$$

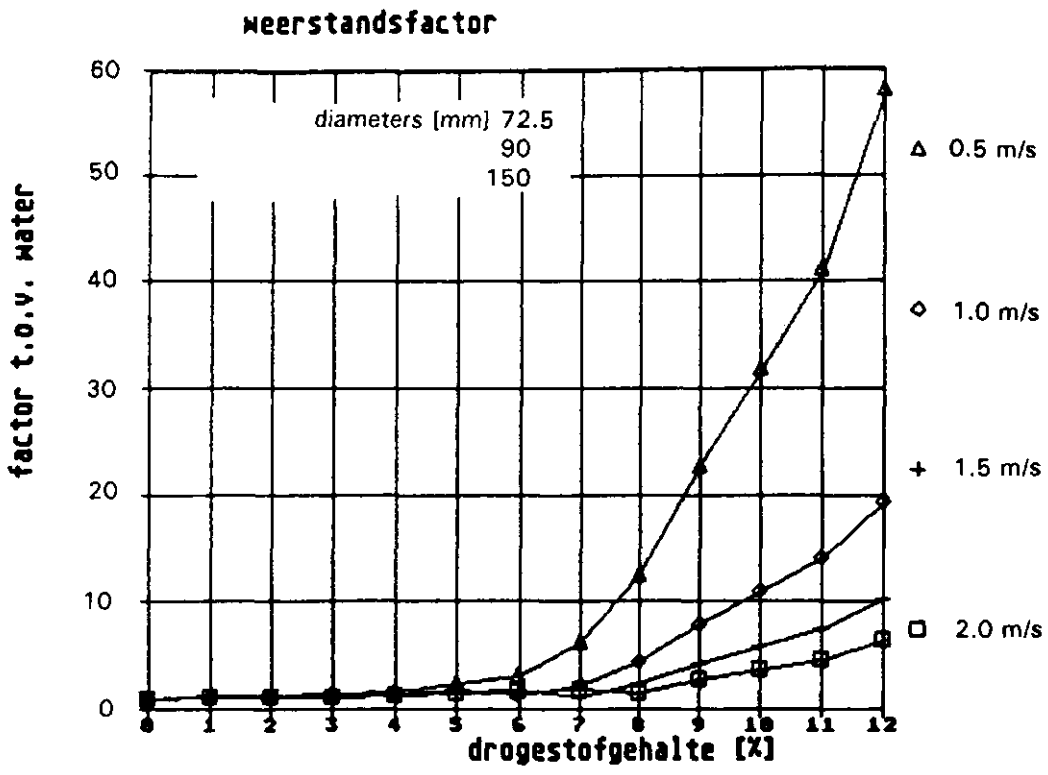
hier is  $\tau_0$  de zwichtspanning [Pa].

Bij formule (9) is aangenomen dat de zwichtspanning onafhankelijk is van de stroomsnelheid. Dit is toegestaan omdat het niet een reële zwichtspanning is maar een fit-parameter.

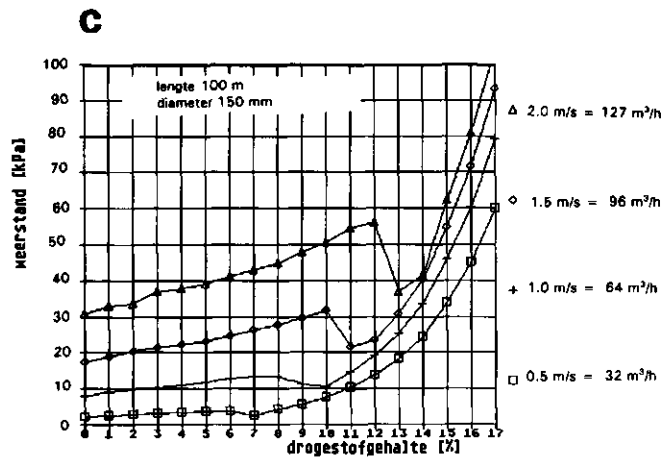
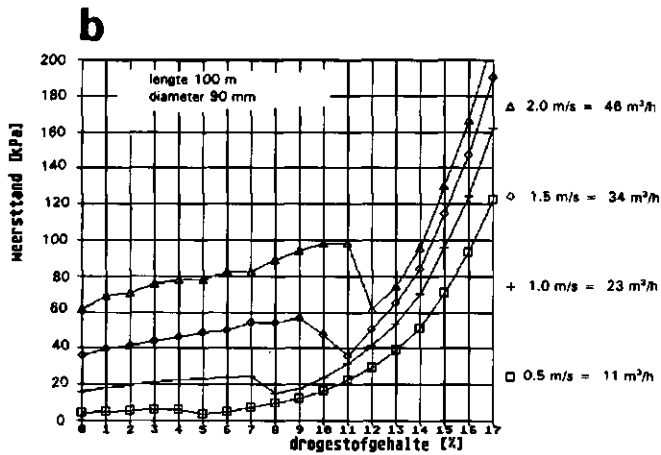
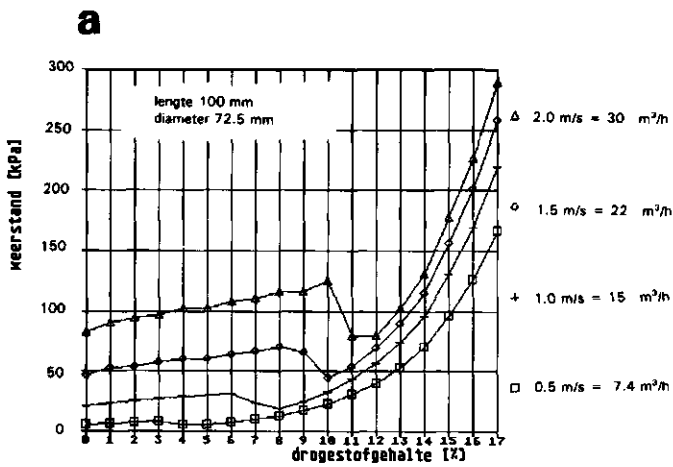
Als voor een vloeistof de vergelijking van Ostwald-de Waele voldoet, kan –gebruikmakend van formule (3)– de schijnbare viscositeit als volgt worden berekend:

$$\mu_a = f(\dot{\gamma}) = k * \left( \frac{3n + 1}{4n} \right)^n * \left( \frac{8 * v}{d} \right)^{n-1} \quad (10)$$

Voldoet bij een vloeistof de Herschel-Bulkley vergelijking, dan is een goede benadering (Giesekus & Langer, 1977):



**Figuur 4** Verhouding tussen drukverlies van rundmengmest en water in een rechte pijp.  
**Figure 4** Comparison between pressure loss of cattle slurry and water in a straight pipe.

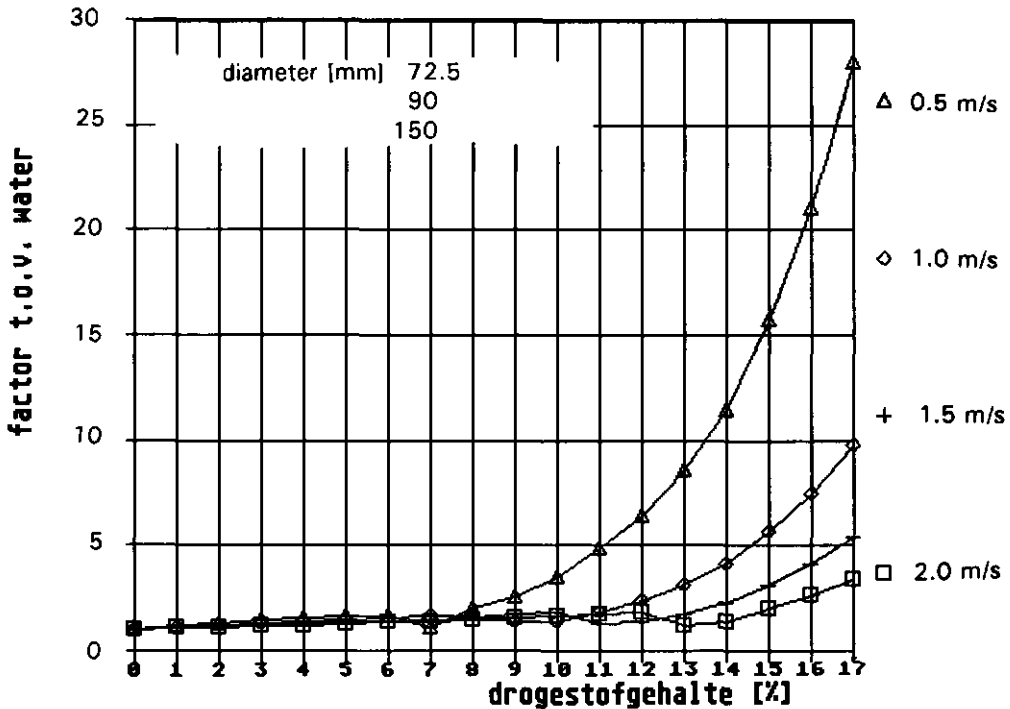


**Figuur 5** Drukverlies van varkensmengmest in een rechte pijp.

**Figure 5** Pressure loss of pig slurry in a straight pipe

- a diameter 72,5 mm
- b diameter 90 mm
- c diameter 150 mm

## weerstandsfactor



Figuur 6 Verhouding tussen drukverlies van varkensmest en water in een rechte pijp.

Figure 6 Comparison between pressure loss of pig slurry and water in a straight pipe.

### 2.4 Strooming door appendages

Ook hier geldt dat ten behoeve van een drukberekening eerst bepaald moet worden of de strooming laminair of turbulent is. Bij turbulente strooming kan dezelfde weerstandswaarde worden genomen als bij Newtonse vloeistoffen. De weerstand bij laminaire strooming voor niet-Newtonse vloeistoffen moet experimenteel worden bepaald, maar als men hierover geen gegevens heeft, moet een adequate factor worden ingezet. Huizing, Arts e.a. (1991) hebben de door Perry & Green (1985) gehanteerde factoren vergeleken met de gemeten waarden van een 90° bocht ( $r = d$ ). Tussen  $v = 0,3$  en  $1,6$  m/s variëerde de weerstandsfactor ten opzichte van water volgens de metingen van  $1,3 \dots 14,6$  en volgens Perry van  $0,9$  tot  $12$ . Op grond van de publikatie van Huizing en Arts (loc. cit.) wordt bij  $v \geq 1$  m/s de factor  $2,5$  voorgesteld en bij lagere snelheden een factor  $14$ . Zowel volgens Perry als bij de metingen nam met het toenemen van de stroomsnelheid de weerstand ten opzichte van water af. Volgens Perry is bij  $Re' = 1291$  de factor  $0,9$  en volgens Huizing c.s. (loc. cit.) is deze  $1,3$ .

Het drukverlies bij plotselinge verwijdingen is volgens Wilkinson (1960) voor niet-Newtonse vloeistoffen:

$$\Delta p = \left( \frac{3n + 1}{n + 1} \right) \left[ \left( \frac{A_1}{A_2} \right)^2 - \left( \frac{A_1}{A_2} \right) \right] \frac{\rho v_1^2}{A_1^2} \quad (17)$$

waarin  $A_1$  en  $A_2$  respectievelijke doorsneden stroomop- en stroomafwaarts en  $v_1$  de stroomsnelheid stroomopwaarts is. Het drukverlies kan sterk worden beperkt door de leidingovergangen geleidelijk te laten plaatsvinden.

## 2.5 Minimale en maximale stroomsnelheid

### 2.5.1 Minimale stroomsnelheid

In het algemeen behoort mest tot de categorie bezinkbare suspensies. Als de stroomsnelheid in een pijp beneden een bepaalde waarde komt, treedt uitzakking van de zwaarste deeltjes op. Door Cheng (1970), Frost (1983) en Perry & Green (1985) zijn vergelijking opgesteld waarmee de minimale stroomsnelheid is te bepalen waarbij de vorming van een blijvende bezinklaag in een pijp wordt voorkomen.

De door Cheng (1970) en Perry & Green (1985) gebruikte formule luidt:

$$\frac{v^2 \rho_1}{gD(\rho_s - \rho_1)} = 0,0251 \left( \frac{v d \rho_m}{\mu_1} \right)^{0,775} \quad (18)$$

Hierin is  $v$  de minimale stroomsnelheid waarbij bezinken wordt voorkomen als 85% van de deeltjes kleiner is dan de aangegeven diameter  $D$ . Als  $D > 2$  mm moet een andere vergelijking worden gebruikt (Perry & Green, 1985):

$$v = 1,35 * \left( \frac{2gD(\rho_s - \rho_1)}{\rho_1} \right)^{0,5} \quad (19)$$

Eckstädt (1978) geeft hogere snelheden dan berekend met vergelijking (18) om uitzakken van mest te voorkomen. Zie tabel 6.

**Tabel 6** Minimale transportsnelheid van mest in drukleidingen volgens Eckstädt (1978).

**Table 6** Minimum velocity of slurry in pipeline-systems according to Eckstädt (1978).

| Leiding-<br>diameter<br>[mm] | Minimale stroomsnelheid [m/s] |                |               |
|------------------------------|-------------------------------|----------------|---------------|
|                              | varkensmest                   | rundermest     |               |
|                              |                               | $ds \leq 10\%$ | $ds \leq 6\%$ |
| 80                           | 0,38                          | 0,32           | 0,18          |
| 100                          | 0,45                          | 0,36           | 0,20          |
| 125                          | 0,55                          | 0,40           | 0,23          |
| 150                          | 0,60                          | 0,45           | 0,26          |
| 175                          | 0,65                          | 0,48           | 0,28          |
| 200                          | 0,75                          | 0,50           | 0,30          |
| 250                          | 0,80                          | 0,55           | 0,33          |
| 300                          | 0,90                          | 0,58           | 0,35          |
| 400                          | 1,00                          | 0,65           | 0,40          |
| 500                          | 1,10                          | 0,70           | 0,45          |

In bijlage 3 is een voorbeeld van een berekening van de minimale stroomsnelheid gegeven.

### 2.5.2 Maximale snelheid

Bij het sluiten van een afsluiter kan bij hoge stroomsnelheden een drukstoot ontstaan. Volgens Heeres (1986) ontstaat de volgende drukstoot bij plotseling sluiten:

$$\Delta P = \frac{a}{g} \cdot 10^4 \cdot \Delta v \quad (20)$$

hierin is:  $\Delta P$  de drukstoot in Pa

$a$  de voortplantingsnelheid van de drukgolf in de leiding met mest [m/s]

$\Delta v$  de snelheidsverandering van de vloeistof door het sluiten [m/s]

bij  $\Delta v = 2$  m/s en met  $a = 100$  m/s (deze waarde geldt voor water in PVC-buizen) wordt  $\Delta P \approx 0,20$  MPa. In de praktijk is gebleken dat deze drukstoot toelaatbaar is. De maximale snelheid van mengmest in leidingen met afsluiters die praktisch momentaan kunnen worden gesloten is daarmee ca. 2 m/s.



### 3 Vergelijking met praktijkgegevens

In het IMAG-project "Leidingen en pompen" zijn bij een aantal soorten mest de leidingweerstand gemeten (Huizing en Arts, 1990). De gemeten waarden voor rundermengmest zijn vergeleken met berekende waarden.

De berekeningen zijn op drie verschillende wijzen uitgevoerd: op grond van reologische metingen aan mengmest waaraan drukmetingen zijn uitgevoerd, op grond van reologische gegevens uit een groot aantal metingen (algemene tabel rundermengmest) en tenslotte op grond van constante factoren ten opzichte van de weerstand van water volgens Bosma en Verkaik (1984).

Bij de berekeningen op basis van de algemene tabel is uitgegaan van de viscositeitswaarden van rundermengmest en van de parameters van het model van Ostwald-de Waele volgens tabel 1 van bijlage 1. De overgang laminair-turbulent is genomen bij  $Re' = 2300$ . De inwendige ruwheid van de pijp is gesteld op 0,25 mm. Bij turbulente stroming is de wrijvingscoëfficiënt bepaald uit figuur 2 (diagram van Prandtl e.a.); het Reynoldsgetal is, afhankelijk van de afschuifnelheid, bepaald met de viscositeitswaarden uit tabel 1 van bijlage 1. Genoemd diagram is eveneens gebruikt bij laminaire stroming en newtons gedrag. Bij niet-Newtonse vloeistoffen en laminaire stroming is de leidingweerstand berekend met formule 13 en de parameters uit tabel 1 van bijlage 1.

De berekeningen volgens de reologische metingen van de betreffende mest zijn analoog uitgevoerd als hierboven, zij het uiteraard met de bijbehorende waarden voor de viscositeiten. Bij de berekeningen met de constante factor is uiteraard uitgegaan van de berekende weerstand voor water.

De metingen en de resultaten van de berekeningen zijn verzameld in tabel 7. Bij de berekeningen kwamen zowel positieve als negatieve afwijkingen voor. De grootste afwijkingen werden geconstateerd bij gebruik van de constante factor (-74 tot +95%). Bij gebruik van de algemene tabel waren de afwijkingen tussen -17 en +25%. De afwijkingen bij de berekeningen met de reologische gegevens voor de betreffende mest waren tussen -8 en +33%. Uit de resultaten kon derhalve niet worden geconcludeerd dat de viscositeitsmetingen van de betrokken mest een betere voorspelling gaven dan de met de algemene tabel verkregen waarden.

**Tabel 7** Vergelijking tussen metingen en berekeningen van leidingweerstand van rundermengmest.

**Table 7** Comparison between measurements and calculations of pressure drops in pipe-lines of cattle slurry.

Drogestofgehalte: 9,5%

Dry matter content: 9.5%

Lengte rechte pijp: 100 m

Length of straight pipe: 100 m

| Debiet | Snelheid | Leidingweerstand [kPa/100 m] en afwijking [%] |
|--------|----------|---|
|--------|----------|---|

**Voorbeeld 3**

Berekening van het drukverlies volgens Herschel-Bulkley voor kippemest.

Volgens bijlage 1, tabel 3 geldt voor een kippemest met 17,4 % ds: zwichspanning ( $\tau_0$ ) = 4,78 Pa, consistentie-index ( $k$ ) = 0,86, stromingsindex ( $n$ ) = 0,68. Inwendige diameter van de leiding 90 mm;  $v = 1$  m/s;  $Q = 22,9$  m<sup>3</sup>/h

Substitutie van bovenstaande waarden in vergelijking (12) geeft:

$$\begin{aligned}
 Re' &= \left( \frac{\rho v d}{k} \right) \left( \frac{8v}{d} \right)^{1-n} \left( \frac{4n}{3n+1} \right)^n \\
 &= \left( \frac{1050 * 1 * 0,09}{0,86} \right) \left( \frac{8 * 1}{0,09} \right)^{(1-0,68)} \left( \frac{4 * 0,68}{3 * 0,68 + 1} \right)^{0,68} = 428 \tag{27}
 \end{aligned}$$

De stroming is dus laminair en vergelijking (14) mag worden gebruikt:

$$\begin{aligned}
 \frac{\Delta p}{\Delta l} &= \frac{4\tau_0}{d} + \frac{4k}{d} \left( \frac{3n+1}{4n} \right)^n \left( \frac{8 * v}{d} \right)^n \\
 &= \frac{4 * 4,78}{0,09} + \frac{4 * 0,86}{0,09} \left( \frac{3 * 0,68 + 1}{4 * 0,68} \right)^{0,68} \left( \frac{8 * 1}{0,09} \right)^{0,68} = 1083 \left[ \frac{\text{Pa}}{\text{m}} \right] \tag{28}
 \end{aligned}$$

De alternatieve methode met de weerstandscoefficiënt verloopt als volgt.

Berekening van de afschuifnelheid volgens vergelijking (3):

$$(3 * 0,68 + 1)/(4 * 0,68) * (8 * 1/0,09) = 99,3 \text{ s}^{-1}$$

Volgens tabel 3 in bijlage 1 is de schijnbare viscositeit dan 245 mPa · s.

Volgens vergelijking 4 is het veralgemeend Reynoldsgetal:

$$Re' = 1050 * 1 * 0,09/(245 * 10^{-3}) = 386$$

De stroming is dus laminair. De wrijvingscoëfficiënt volgens vergelijking (7):  $64/386 = 0,1659$

Dan is volgens vergelijking (5) de leidingweerstand per meter:

$$\Delta p = 0,1659 * \frac{1}{0,09} * \frac{1}{2} * 1050 * 1^2 = 989 \text{ [Pa]} \tag{29}$$

De berekening met de weerstandscoefficiënt levert een 9% lagere waarde voor het drukverlies op.

### Bijlage 3 Berekening minimale stroomsnelheid

Berekening minimale stroomsnelheid in een pijp van 150 mm met varkensmest (drogestofgehalte 7%) om uitzakken van zanddeeltjes met  $D = 400 \mu\text{m}$  te voorkomen. De berekening loopt via trial and error omdat  $\eta = f(v)$ ; neem vooreerst aan en controleer daarna  $v = 0,2 \text{ m/s}$ ; dan is in dit voorbeeld  $\eta_a = 30 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ .

Volgens vergelijking 18 geldt dan:

$$\frac{v^2}{10 * 0,0004} \left( \frac{1000}{2500 - 1000} \right) = 0,0251 \left( \frac{v^2 * 0,150 * 1030}{30 * 10^{-3}} \right)^{0,775} \quad (30)$$

$v = 0,169 \text{ m/s}$ ; afgerond  $v = 0,2 \text{ m/s}$ . Dit klopt met de aanname en de berekening is dus geldig. Volgens tabel 6 van Eckstädt zou de minimale snelheid voor varkensmest  $0,6 \text{ m/s}$  moeten zijn. Volgens de formule zou dit gelden bij een viscositeit van  $4 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ . Het bijbehorende drogestofgehalte is dan slechts 1%.