



CG-92-14

opdrachtgever:
Rijkswaterstaat, DWW

ontgroning bij persleidingbreuk

herinterpretatie M1007

november 1991

ontgronding bij persleidingbreuk

herinterpretatie M1007

D.R. Mastbergen



INHOUD

	<u>blz.</u>
1. <u>Samenvatting</u>	1
2. <u>Inleiding</u>	1
3. <u>Gebruikte symbolen en dimensieanalyse</u>	2
4. <u>Impulsflux en hydraulisch vermogen bij uitstroming uit een gat</u>	3
5. <u>Straalstroming in een medium</u>	3
6. <u>Ontgrondingsproces in de tijd</u>	4
7. <u>Permanentie leidingstroming na breuk</u>	5
8. <u>Herinterpretatie M1007</u>	6
9. <u>Afleiding nieuwe formules</u>	8
10. <u>Maximaal hydraulisch vermogen bij leidingbreuk</u>	12
11. <u>Rekenvoorbeelden</u>	14
12. <u>Conclusies</u>	17
13. <u>Referenties</u>	19

Lijst van figuren

- | | |
|---------------|--|
| Figuur 1 a, b | Ontgrondingskuilafmetingen
Resultaten M1007 |
| Figuur 2 a, b | Ontgrondingskuilafmetingen
Resultaten M1007 |
| Figuur 3 a, b | Kuilvormen |
| Figuur 4 a, b | Ontgrondingskuilafmetingen als
functie van het hydraulisch vermogen
(Dimensieloos) |
| Figuur 5 | Schets verschillende optredende
kuilvormen en bijbehorende lengte-
breedteverhoudingen |

1. Samenvatting

De proefresultaten van het experimentele onderzoek naar de ontgrondingskuilafmetingen bij persleidingbreuk, M1007, [3], alsmede een aantal praktijkgevallen zijn opnieuw geanalyseerd. Daartoe moesten een aantal grootheden opnieuw berekend worden uit de gearchiveerde meetgegevens.

Er zijn een aantal dimensieloze parameters afgeleid, gebaseerd op onder meer het hydraulisch vermogen en de impulsflux van de uitstromende straal en de gatdiameter. Met behulp van een regressieanalyse is een verbeterde correlatieformule voor de ontgrondingsbreedte bepaald, met in achtneming van een veiligheidsmarge van 5%. De ontgrondingslengte is direct gekoppeld aan de breedte. De mate waarin is ook onderzocht en blijkt afhankelijk van de geometrie van leiding en gat. De afgeleide nieuwe formules geven voor de beschikbare metingen een meer betrouwbare voorspelling van de afmetingen dan de oude.

De macht van de uitstroomsnelheid in de gevonden correlatieformule voor de kuilbreedte geeft aan, dat waarschijnlijk zowel de impulsflux als het hydraulisch vermogen van invloed zijn, mogelijk in verschillende stadia van het ontgrondingsproces.

2. Inleiding

Eind jaren zestig en begin jaren zeventig is door het Waterloopkundig Laboratorium te Delft in opdracht van Rijkswaterstaat een tweetal experimentele onderzoeken uitgevoerd naar de ontgrondingskuilafmetingen bij breuk in perswater- en gasleidingen, onder de projectnummers M1007 en M1136, [3], [4]. Dit hield verband met de veiligheid bij dijkdoorkruisingen.

Uit de proefresultaten is een rekenmethode afgeleid voor het schatten van de maximale lengte en breedte van de ontgrondingskuil, ontstaan bij leidingbreuk. Deze rekenmethode geeft een verband tussen de straalimpuls van het vrijkomende water of gas en de ontgrondingskuilafmetingen.

Meer recent onderzoek naar ontgroning door waterstralen, uitgevoerd door WL in het kader van het Gezamenlijk Speurwerk Baggertechniek, heeft aangetoond dat vooral het straalvermogen van belang is voor de afmetingen van de ontgrondingskuil. In dit licht zijn, in opdracht van de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van Rijkswaterstaat, de proefresultaten van M1007 opnieuw geïnterpreteerd, volgend op een soortgelijk onderzoek

met betrekking tot M1136 in opdracht van de Gasunie [5]. De resultaten van dit onderzoek zijn door de Gasunie hiertoe beschikbaar gesteld. In [5] is een nieuwe, verbeterde berekeningsmethode voor de ontgroning bij gasleidingbreuk voorgesteld.

Het onderzoek is uitgevoerd en gerapporteerd door ir. D.R. Mastbergen. Als tweede lezer heeft ir. J. Wijdieks gefunctioneerd, destijds betrokken bij het onderzoek M1007.

3. Gebruikte symbolen en dimensieanalyse

De volgende grootheden spelen een rol bij de ontgroning ten gevolge van uitstroming van vloeistof uit een gat in een pijpleiding.

ζ	breedte ontgrondingskuil	(m)
λ	lengte ontgrondingskuil	(m)
δ	dekking, dikte grondlaag boven buis	(m)
η	diepte ontgrondingskuil	(m)
μ	afvoercoëfficiënt gat	(-)
D	diameter buis	(m)
d	diameter gat	(m)
g	versnelling zwaartekracht	(m/s ²)
H	energiehoogte in leiding	(m)
I	impulsflux van uitstromende straal	(N)
P	hydraulisch vermogen van uitstromende straal	(W)
Q, Q_{uit}	uitstromend debiet	(m ³ /s)
ρ	dichtheid water of andere vloeistof	(kg/m ³)
t	tijd	(s)
v, v_{uit}	maximale snelheid uitstromend water	(m/s)
v_m	snelheid water in as van de straal	(m/s)

Met behulp van dimensie-analyse kunnen we de volgende dimensieloze grootheden afleiden, waarbij ρ , g en d als onafhankelijke gegeven parameters beschouwd kunnen worden:

$$\frac{v}{\sqrt{(g d)}} \quad \text{snelheidsparameter}$$

$$\frac{\lambda}{d}, \quad \frac{\zeta}{d}, \quad \frac{\eta}{d} \quad \text{geometrieparameters}$$

$$\frac{Q}{g^{1/2} d^{5/2}} \quad \text{debietparameter}$$

$$\frac{I}{\rho g d^3} \quad \text{impulsparameter}$$

$$\frac{P}{\rho g^{3/2} d^{7/2}} \quad \text{vermogensparameter}$$

4. Impulsflux en hydraulisch vermogen bij uitstroming uit een gat

Het debiet bij een uitstromende straal vloeistof door een rond gat met diameter d bedraagt:

$$Q_{\text{uit}} = \mu \frac{\pi}{4} d^2 v_{\text{uit}} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (1)$$

waarin μ de afvoercoëfficiënt van het gat is. Deze is afhankelijk van de grootte en de oriëntatie van het gat. In M1007 zijn uitgebreide berekeningen uitgevoerd om in een gegeven leidingsysteem met pomp en reservoir het uitstromend debiet en de bijbehorende uitstroomsnelheid te berekenen als functie van allerlei leidingparameters, zoals pompkarakteristiek, reservoirdruk en leidingweerstand. Het blijkt dat meestal in korte tijd na de leidingbreuk een toestand van permanentie ontstaat, waarbij het debiet een constante waarde aanneemt. Met behulp van deze gegevens kunnen we de impulsflux van de uitstromende straal berekenen:

$$I = \rho Q_{\text{uit}} v_{\text{uit}} = \rho \mu \frac{\pi}{4} d^2 v_{\text{uit}}^2 \quad [\text{N}] \quad (2)$$

en eveneens het hydraulisch vermogen:

$$P = \frac{1}{2} \rho Q_{\text{uit}} v_{\text{uit}}^2 = \frac{1}{2} \rho \mu \frac{\pi}{4} d^2 v_{\text{uit}}^3 \quad [\text{W}] \quad (3)$$

Het verschil tussen beide grootheden komt tot uiting in de macht van v_{uit} .

5. Straalstroming in een medium

Voor een ronde straal in een medium geldt volgens de theorie van de straaldiffusie, zie [1], dat de snelheid in de as van de straal op zekere afstand van het uitstroompunt omgekeerd evenredig met deze afstand afneemt, volgens:

$$v_m = 6 \frac{d}{x} v_{uit} \quad [m/s] \quad (4)$$

gerekend vanaf het punt $x = 6 d$, tot waar geldt $v_m = v_{uit}$. Dit betekent dat bij gegeven diepte de breedte van de straal lineair toeneemt met de lengte (x). Hieruit kunnen we een evenredigheid voor een ronde straal afleiden, als functie van de afstand x en de initiële impulsflux I of vermogen P :

$$v_m x = \left(2 \frac{P d}{\rho \mu}\right)^{1/3} \quad \text{of} \quad [m^2/s] \quad (5a)$$

$$= \left(\frac{I}{\rho \mu}\right)^{1/3} \quad [m^2/s] \quad (5b)$$

6. Ontgrondingsproces in de tijd

De ontgroning ten gevolge van een vloeistofstroom, per eenheid van tijd en breedte, is evenredig met de 'stream power', het vermogen van de stroming. Deze evenredigheid is gebaseerd op de theorie van Bagnold, zie bijvoorbeeld [2]. Het ontgrondingsproces schematiseren we door een zich in de richting van de uitstroomsnelheid uitbreidende kuil met constante diepte:

$$\rho g \eta \lambda \frac{d\zeta}{dt} = \frac{1}{2} \rho v^3 \lambda \quad [kgm/s^3] \quad (6)$$

De kuildiepte η kunnen we globaal gelijk stellen aan de buisdiameter D plus de dekking δ . De grootte van de ontgroningssnelheid $d\zeta/dt$ is afhankelijk van de grondsoort, de evenredigheidsconstante moet daarom proefondervindelijk worden bepaald. De proeven van M1007 zijn uitgevoerd met middelfijn 220 μm zand. Fijn zand is gemakkelijker transporteerbaar in suspensie dan grover zand. Daarentegen zal een bodem van vastgepakt fijn zand bij hoge stroomsnelheden minder snel eroderen dan een bodem van wat grover zand, vanwege de geringere doorlatendheid. Met behulp van vergelijking (5a) of (5b), waarin we voor de afstand x de kuilbreedte ζ invullen, vinden we hieruit de volgende differentiaal-vergelijking voor de ontgrondingskuillengte als functie van de tijd en het vermogen of de impulsflux:

$$\zeta^3 d\zeta = \frac{P}{\rho g \mu \eta} \frac{d}{dt} dt \quad \text{of} \quad [m^4] \quad (7a)$$

$$= \frac{1}{2} \left(\frac{I}{\rho \mu} \right)^{3/2} \frac{1}{\eta g} dt \quad [m^4] \quad (7b)$$

Door integratie volgt hieruit voor een constant hydraulisch uitstroomvermogen of impuls met $\zeta = 0$ op tijdstip $t = 0$:

$$\zeta = f(\tau) \left\{ \frac{P}{\rho g \mu} \frac{d}{\eta} t \right\}^{1/4} \quad \text{of} \quad [m] \quad (8a)$$

$$= f'(\tau) \left\{ \left(\frac{I}{\rho g \mu} \right)^3 \frac{g}{\eta^2} t^2 \right\}^{1/8} \quad [m] \quad (8b)$$

waarin $f(\tau)$ nog een proefondervindelijk te bepalen functie van de grondsoort is. Met deze vergelijking kunnen we de ontgronding als functie van de tijd berekenen, indien het vermogen bij de uitstroming in de tijd constant is.

Het ontgrondingsproces door gasstromen bij gasleidingbreuk verloopt relatief langzaam. Bij de proeven van M1136 was pas na een uur min of meer een eindtoestand bereikt. Onder deze eindsituatie van het ontgrondingsproces verstaan we de situatie waarin de kuil niet verder groeit. Gedurende de tijdsperiode tot het bereiken van de eindtoestand is het uitstroomvermogen bij een gasleidingbreuk zeker niet constant, het zal aanvankelijk zeer groot zijn en dan snel afnemen, zoals bij een explosie. Indien het verloop van de leidingdruk in de tijd na breuk bekend is of berekend kan worden, is het mogelijk ook een tijdsafhankelijke berekening van het ontgrondingsproces uit te voeren. In [5] is dit gedaan voor een gasleidingbreuk.

De constante functie $f(\tau)$, waarin τ een grondafhankelijke sterktemaat is, kunnen we uit de proefgegevens van M1007 echter niet meer vaststellen, omdat alleen de eindsituatie is beschouwd en niet het verloop van het ontgrondingsproces in de tijd.

7. Permanentie leidingstroming na breuk

Onder permanentie wordt verstaan de stationaire stromingstoestand in het leidingsysteem, d.w.z. de toestand na leidingbreuk waarin debiet en druk niet meer veranderen. In M1007 is gebleken dat de toestand van permanentie meestal maatgevend is, d.w.z. dat in tegenstelling tot de situatie bij gasleidingbreuk, het debiet bij permanentie groter is dan direct na breuk.

In de gevallen dat het debiet direct na breuk groter is dan bij permanentie, is de tijdsduur waarover dit plaatsvindt kort in verhouding tot de tijd waarover de ontgronding plaatsvindt. Het ontgrondingsproces door waterstromen verloopt weliswaar veel sneller dan bij gas. Bij de proeven van M1007 en ook bij de praktijkproeven Nijkerk en Swifterbant was al na ongeveer vijf minuten een stationaire toestand bereikt. Maar deze tijdsduur is meestal toch lang in verhouding tot de tijd waarover de toestand van permanentie zich instelt in het leidingsysteem na breuk. Daarom is ook dan het debiet bij permanentie meestal maatgevend.

We kunnen de tijd elimineren uit de vergelijkingen (6) en (7a) of (7b), door op grond van dimensieanalyse te stellen:

$$\frac{d\zeta}{dt} = \sqrt{(g \zeta)} \quad [m/s] \quad (9)$$

waaruit volgt, analoog [5]

$$\zeta = \left\{ \frac{P}{\rho g^{3/2} \mu} \frac{d}{\eta} \right\}^{2/3} \quad \text{of} \quad [m] \quad (10a)$$

$$= \left\{ \frac{I}{\rho g \mu} \frac{1}{\eta^{2/3}} \right\}^{3/2} \quad [m] \quad (10b)$$

In dimensieloze vorm geschreven:

$$\frac{\zeta}{d} = \left\{ \frac{P}{\rho g^{3/2} \mu} \frac{d}{\eta} \right\}^{2/3} \quad \text{of} \quad [-] \quad (11a)$$

$$= \left\{ \frac{I}{\rho g \mu} \left(\frac{d}{\eta} \right)^{2/3} \right\}^{3/2} \quad [-] \quad (11b)$$

Hierin herkennen we de eerder uit een dimensieanalyse afgeleide grootheden, waaraan toegevoegd zijn de afvoercoëfficiënt μ en de kuildiepte/gatdiameter verhouding η/d .

In M1007 is gebruikt gemaakt van de niet-dimensieloze relatie:

$$\zeta = \left\{ \frac{I}{\rho g} \right\}^{1/3} \quad [m] \quad (12)$$

8. Herinterpretatie M1007

De proefgegevens van M1007 zijn opnieuw geanalyseerd uitgaande van de gearchiveerde meetgegevens van de figuren 47 t/m 54 van M1007, ζ/D , λ/D , d/D , δ/D , D , μ en v_{uit} . Deze gegevens zijn opgenomen in tabel 1. Hieruit kunnen we alle overige benodigde grootheden zoals Q_{uit} , H , I , P , ζ/d , λ/d berekenen.

Uit een recente inventarisatie van meetgegevens van praktijkgevallen door Rijkswaterstaat (zie Bijlage I) konden een tweetal meetgegevens gedestilleerd worden, betreffende leidingbreuken bij DWL Rotterdam. Ook deze gegevens zijn in de tabel opgenomen.

Tenslotte is het extreme praktijkgeval van een hoge-druk olieleiding (50 bar) meegenomen, hiervan zijn echter geen kuilafmetingen bij breuk bekend.

Bij het doorwerken van het rapport M1007 en de archiefstukken kwam een aantal punten naar voren. De waarden van v_{uit} op de horizontale as van figuur 47 van M1007 zijn een factor 10 te groot uitgezet. De grootheid d/B in de kaders van de figuren 47 en 48 moet zijn d/D . In figuur 52 moet de grootheid v in de kuil Swifterbant c zijn en is de dekking 1,0 en niet 1,2 m. De tweede waarde van de kuilafmeting d bij Nijkerk moet zijn 15 m in plaats van 1,5 m. De kuilafmetingen van Swifterbant en Nijkerk en de uitstroomsnelheid bij Nijkerk zijn in de figuren 51, 53 en 54 niet correct ingetekend. Daarnaast zijn de uitstroomsnelheden bij de proeven met een kleiner gat, waaronder ook Nijkerk, waarbij de afvoercoëfficiënt μ kleiner dan 1 is, niet correct berekend uit het ingestelde, dus gegeven debiet, zie formule (1). De gebruikte debieten staan niet vermeld in het rapport, maar konden uit de archiefstukken achterhaald worden. Bij gegeven debiet neemt de uitstroomsnelheid toe bij afname van de afvoercoëfficiënt en dus de effectieve gatdiameter. De afvoercoëfficiënt kon bepaald worden door een drukverschilmeting. In tabel 1 en in de figuren zijn de waarden van v_{uit} gecorrigeerd, uitgaande van het ingestelde debiet en de gegeven afvoercoëfficiënt voor de verschillende proevenseries. De meetresultaten blijken na deze correctie aanzienlijk beter te correleren.

In de figuren 1 en 2 zijn ter vergelijking dezelfde grootheden uitgezet als in de figuren 47 t/m 54 van M1007, maar steeds gebruikmakend van alle meetgegevens. Ingetekend zijn de in M1007 voorgestelde formules voor de ontgrondingskuilafmetingen:

$$\zeta = 7 \left\{ \frac{I}{\rho g} \right\}^{1/3} \text{ en} \quad [m] \quad (13a)$$

$$\lambda = 12 \left\{ \frac{I}{\rho g} \right\}^{1/3} \quad [m] \quad (13b)$$

Deze lijnen geven geen gemiddelde regressiewaarde, maar liggen wat boven de meeste meetpunten en geven dus in het algemeen een veilige schatting. Te zien is dat de marge voor de ontgrondingslengte veel groter is dan die voor de ontgrondingsbreedte. De praktijkmetingen Nijkerk2 en DWL2 liggen wel boven de lijnen voor ζ respectievelijk λ ! Bij de benadering van M1007 is verondersteld dat de lengte/breedteverhoudingen van de kuil ongeveer constant zijn en wel $12/7 = 1,7$.

Laten we nu een lineaire regressieanalyse los op alle beschikbare meetpunten, inclusief de praktijkgevallen, dan vinden we voor de ontgrondingsbreedte en -lengte:

$$\zeta = (6,03 \pm 1,14) \left\{ \frac{I}{\rho g} \right\}^{1/3} (1,042 \pm 0,040) \quad [m] \quad (14a)$$

$$\lambda = (5,91 \pm 1,59) \left\{ \frac{I}{\rho g} \right\}^{1/3} (0,988 \pm 0,076) \quad [m] \quad (14b)$$

waarin de waarden achter het $\pm$ teken de standaardafwijking geven. De macht $1/3$ blijkt het gedrag volgens deze formule dus vrij redelijk te beschrijven. De gebruikte factoren 7 resp. 12 komen blijkbaar overeen met de gemiddelde waarde plus 0,85 resp. 3,83 maal de standaardafwijking. Uitgaande van een normale verdeling betekent dit een overschrijdingskans van 19,8% resp. minder dan 0,002% !. Deze verdeling lijkt vrij onevenwichtig. De betrouwbaarheids-waarde (R^2) van de regressie bedraagt 0,932 resp. 0,770. Dat de betrouwbaarheidswaarde voor λ aanzienlijk minder is, komt waarschijnlijk doordat de bij de proef- en praktijkgevallen waargenomen verschillende geometriën (figuur 5) niet zijn onderscheiden. Dit komt in de volgende paragraaf nog aan de orde. Deze regressieanalyse is ook uitgevoerd met het hydraulisch vermogen als maatgevende straalparameter, hetgeen soortgelijke resultaten oplevert.

9. Afleiding nieuwe formules

Afgezien van de vraag of de impulsflux de maatgevende grootte is voor de ontgrondingskuilafmetingen, is een belangrijk nadeel van de formules

van M1007 dat ze niet dimensieloos zijn, zodat we model- en praktijkgevallen feitelijk niet goed met elkaar kunnen vergelijken. In de figuren is dan ook te zien dat de praktijkgevallen in een heel andere range liggen dan de modelproeven.

We kunnen dit ondervangen door uit te gaan van de dimensieloze geometrieparameters ζ/d en λ/d , gebruikmakend van de lengtemaat d . De gatdiameter en niet de buisdiameter, D is een relevante grootte voor het proces. Volgens de eerder afgeleide formules zouden we dan een goede correlatie moeten vinden tussen de volgende dimensieloze grootheden, uitgaande van het hydraulisch vermogen P bij uitstroming:

$$\frac{\zeta}{d}, \quad \frac{\lambda}{d} \quad \text{en} \quad \left\{ \frac{P}{\rho g^{3/2} \mu d^{7/2}} \frac{d}{\eta} \right\}^{2/7} \quad [-] \quad (15a)$$

of gebruikmakend van de impulsflux bij uitstroming:

$$\frac{\zeta}{d}, \quad \frac{\lambda}{d} \quad \text{en} \quad \left\{ \frac{I}{\rho g \mu d^3} \left(\frac{d}{\eta} \right)^{2/3} \right\}^{3/7} \quad [-] \quad (15b)$$

In deze relaties spelen dus, in aanvulling op de formules van M1007, ook de afvoercoëfficiënt μ en de gatdiameter d een rol. De afvoercoëfficiënt μ , die mede het uitstromend debiet bepaalt, was bij de model- en praktijkproeven geen constante, maar bleek afhankelijk van positie en grootte van het gat. Niet de impulsflux of het vermogen als zodanig zijn van belang, maar alleen in relatie met de gatdiameter d , die zelf uiteraard ook invloed heeft op deze grootheden.

Daarnaast speelt, althans volgens deze afleiding, de kuildiepte η nog een rol. Uit de proefresultaten is echter gebleken dat de kuildiepte voornamelijk wordt bepaald door de ligging van de buis, de kuildiepte bedraagt iets meer dan buisdiameter plus dekking en is vrijwel onafhankelijk van de stromingscondities. Een alternatieve, meer eenvoudige formulering zonder invloed van de kuildiepte is:

$$\frac{\zeta}{d}, \quad \frac{\lambda}{d} \quad \text{en} \quad \left\{ \frac{P}{\rho g^{3/2} \mu d^{7/2}} \right\}^{2/7} \quad \text{of} \quad [-] \quad (16a)$$

$$\frac{\zeta}{d}, \quad \frac{\lambda}{d} \quad \text{en} \quad \left\{ \frac{I}{\rho g \mu d^3} \right\}^{3/7} \quad [-] \quad (16b)$$

Met de lineaire regressieanalyse van de logaritmisch uitgezette proefresultaten hebben we een middel om kwantitatief een afweging te kunnen maken, welke van de mogelijke dimensieloze relaties, die, in

tegenstelling tot die van M1007, theoretisch alle bruikbaar zijn, het best voldoet.

Kijken we eerst naar de verhouding ontgrondingskuillengte en -breedte, λ/ζ , dan blijkt deze te variëren tussen 0,5 en 2,5, de waarde 1,7 van M1007 is slechts een heel globaal gemiddelde. Dit is te zien in *figuur 3a*. In het algemeen blijkt de ontgrondingsbreedte, gedefiniëerd in de richting loodrecht op de buisas, beter gecorreleerd te zijn met de uitstroomparameters dan de ontgrondingslengte, zoals ook al te zien was in M1007 en in de *figuren 1 en 2*. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de verschillende proefomstandigheden ofwel de verschillende geometriën van gat en buis. De experimenten blijken in drie groepen uiteen te vallen, afhankelijk van deze geometrie (zie schetsen fig. 5):

Serie 1. Proeven met een klein gat, $d/D = 0,25-0,50$.

Dit zijn de proevenseries B, F en Nijkerk. Hierbij geldt $\mu = 0,65$. Bij deze serie staat de stroomrichting loodrecht op de buisas, dus in de richting van ζ . Het is daarom niet verwonderlijk dat geldt $\zeta > \lambda$, we vinden gemiddeld $\lambda/\zeta = 0,5$.

Serie 2. Proeven met een groot gat, $d/D = 1,00$.

De proevenseries E en C met $\mu = 0,80$. Hier kan het water alle richtingen uit spuiten, we vinden $\lambda/\zeta = 1,0$.

Serie 3. Proeven met een afgeschoven buis, $d/D = 1,00$.

De proevenseries A, D, Swifterbant en DWL met $\mu = 1,00$. Bij deze serie tenslotte ligt de stroomrichting in het verlengde van de buisas, het water spuit in feite rechtdoor naar buiten en er geldt $\lambda > \zeta$, we vinden gemiddeld $\lambda/\zeta = 2,0$.

Bij het beoordelen van een praktijkgeval kunnen we nu rekening houden met de geometrie van het gat en, zonodig, de meest ongunstige situatie beschouwen.

Verder blijkt dat de ontgrondingsdiepte vrijwel niet afhankelijk is van de uitstroomsnelheid (en dus evenmin van impuls en vermogen), zie *figuur 4b*, maar steeds iets meer bedraagt dan de pijpdiameter D plus de dekking. Met een regressieanalyse door de oorsprong, vinden we gemiddeld een factor 1,12. Een veilige (minder dan 5% overschrijding) bovenwaarde is:

$$\frac{\eta}{D + \delta} = 1,2$$

$$[-] \quad (17)$$

Beschouwen we nu verder alleen het verband tussen de ontgrondingsbreedte en de uitstroomparameters. Uit een lineaire regressieanalyse volgt ten eerste dat de correlatie met gebruikmaking van dimensieloze grootheden niet alleen theoretisch maar ook statistisch gezien beter is. De betrouwbaarheidswaarde (R^2) van deze regressie bedraagt 0,941. We vinden dan de volgende correlatie (zie figuur 4a):

$$\frac{\zeta}{d} = (5,74 \pm 1,23) \left\{ \frac{P}{\rho g^{3/2} \mu d^{7/2}} \right\}^{2/7} (0,821 \pm 0,029) \quad [-] \quad (18a)$$

De regressie met medenemen van de verhouding η/d levert een iets slechtere correlatie op. Een regressie zonder medenemen van de afvoercoëfficiënt μ geeft een aanzienlijk slechtere correlatie.

Opvallend is dat een analoge regressie gebruikmakend van de straalimpulsflux dezelfde waarden oplevert. Klaarblijkelijk zijn de ontgrondingskuilafmetingen direct een functie van de dimensieloze grootheid $v_{uit}/\sqrt{(g d)}$, een soort Froudegetal, en zijn zowel vermogen als impulsflux van belang. Het is mogelijk dat de impuls vooral in het beginstadium van het proces van belang is, we zouden dan een macht $2/3 = 0,67$ voor v_{uit} vinden, terwijl in de stationaire eindsituatie van het ontgrondingsproces vooral het vermogen van belang is, dan zouden we een macht 1 vinden. Nu vinden we een macht 0,704, dus daartussenin.

Op grond van enige statistiek kunnen we nu een norm met een zekere veiligheidsmarge vaststellen. Veronderstellen we dat de proefresultaten zich volgens een normale verdeling gedragen, dan kunnen we met de gemiddelde regressielijn en de standaardafwijking een zekere betrouwbaarheidsmarge inbouwen. De overschrijdingskans in vergelijking (18a) is kleiner dan 5% voor een bovengrens van 1,65 maal de standaardafwijking van de constante, deze wordt dan $5,74 + 1,65 \cdot 1,23 = 7,77$. De invloed van de standaardafwijking van de macht in (18a) is gering. Als norm stellen we daarom voor:

$$\frac{\zeta}{d} = 7,8 \left\{ \frac{P}{\rho g^{3/2} \mu d^{7/2}} \right\}^{2/7} 0,82 \quad [-] \quad (18b)$$

met voor λ/ζ een waarde, afhankelijk van de geometrie, van:

$$\frac{\lambda}{d} = 0,5, 1 \text{ of } 2 \frac{\zeta}{d} \quad [-] \quad (18c)$$

(zie fig. 5). De lijnen met 50% overschrijding (18a) of 5% (18b en c) zijn geplot in de figuren 4a en b. De berekende 5% overschrijdingswaarden van de ontgrondingskuilafmetingen zullen in het algemeen dus boven de gemeten waarden liggen, dit is te zien in de figuren. In vergelijking met figuur 2a en b, waarin de lijnen voor de oude formules zijn geplot, is te zien dat de oude formule voor de breedte minder veilig is. Zo liggen de meetpunten van Nijkerk duidelijk boven de lijn. De oude formule voor de lengte, figuur 2b, geeft meestal te hoge waarden en is dan (veel te) veilig, maar in enkele gevallen niet, zoals DWL2.

10. Maximaal hydraulisch vermogen bij leidingbreuk

In M1007 is een hydrodynamische berekeningsmethode gegeven om de stromingstoestand in het leidingsysteem na breuk in de tijd door te rekenen en de waarden van debiet en uitstroomsnelheid voor de toestand van permanentie te berekenen. Thans is daarvoor bij WL overigens ook het computerprogramma WILMA beschikbaar (zie Bijlage II). De toestand direct na breuk en de toestand van permanentie kunnen we dus bepalen in termen van Q_{uit} en v_{uit} als functies van de tijd. Daaruit kunnen we vervolgens het vermogen of de impuls en, in theorie, door integratie van de differentiaalvergelijking de ontgrondingskuilafmetingen als functie van de tijd berekenen.

In het algemeen is de toestand van permanentie maatgevend. Uit de waarden van Q_{uit} en v_{uit} bij permanentie kunnen we vervolgens de impulsflux of het vermogen ter plaatse berekenen. Met deze waarden kunnen de maximale ontgrondingskuilafmetingen berekend worden met de in de vorige paragraaf afgeleide formules.

Om het maximaal mogelijke door de uitstromende straal te leveren hydraulisch vermogen te bepalen is echter ook een simpele bovengrensmethode bruikbaar, waarbij de verliezen in de leiding worden verwaarloosd.

De meest ongunstige plaats voor een dijkdoorkruising is nabij een pompstation of een reservoir. Het maximale vrijkomende hydraulische vermogen bedraagt voor de pomp:

$$P_{\text{pomp}} = \rho g Q_0 H_0 = \eta P_m \quad [W] \quad (19)$$

waarin η de maximale rendementsfactor is, bijvoorbeeld 70%, Q_0 en H_0 de bijbehorende debiet en drukhoogte en P_m het motorvermogen van de pompaandrijving.

Het maximale hydraulisch vermogen dat vrijkomt uit een reservoir bedraagt:

$$P_{\text{res}} = \rho (2 g H_c)^{3/2} \mu \frac{\pi}{8} d^2 \quad [W] \quad (20)$$

waarin H_c de reservoirhoogte ten opzichte van het gat is. Een bovengrens van dit vermogen vinden we tenslotte voor $\mu = 1$ en $d = D$.

Afhankelijk van de geometrie van het leidingsysteem en de dijkdoorkruising kunnen zowel de pomp als het reservoir een bijdrage leveren aan het vrijkomende vermogen en daarmee de mogelijk ontgronding van het dijklichaam, bijvoorbeeld bij een pompstation dat hoger ligt dan de leiding en dus tevens als reservoir dienst doet. Het is dan eenvoudig de meest ongunstige situatie door te rekenen.

In het algemeen is de afstand van het gat tot pompstation of reservoir echter zo groot, dat de wrijvingsverliezen zeker niet te verwaarlozen en de op basis van het maximale vermogen berekende ontgrondingskuilen zeker te groot zijn. Het is dan lonend het leidingsysteem door te rekenen.

11. Rekenvoorbeelden

In het algemeen mag verwacht worden dat de berekeningen iets te hoge waarden geven, vanwege de in acht genomen veiligheid. Gezien de spreiding van vooral prototype-meetresultaten mag geen grotere nauwkeurigheid verwacht worden dan enkele tientallen procenten. Te lage waarden zijn echter ernstiger. Zie ook figuren 2a, b en 4 a, b.

Geval DWL 2

Gegeven:

pijpdiameter $D = 1,20$ m met perswater, $\rho = 1000$ kg/m³
 afgeschoven leiding $d/D = 1$ dus $d = 1,20$ m, $\mu = 1$ en $\lambda/\zeta = 2$
 $Q_{\text{uit}} = 3\,000$ m³/uur = $0,83$ m³/s
 Gemeten $\zeta = 2,5$ m, $\lambda = 5,5$ m.

Berekend:

$v_{\text{uit}} = Q_{\text{uit}} / \mu \frac{\pi}{4} d^2 = 0,73$ m/s
 Vermogen $P = \frac{1}{2} \rho Q_{\text{uit}} v_{\text{uit}}^2 = 221$ W, dus $\left\{ \frac{P}{\rho g^{3/2} \mu d^{7/2}} \right\}^{2/7} = 0,20$
 $\frac{\zeta}{d} = 7,8 \cdot 0,20^{0,85} = 2$ dus $\zeta = 2,4$ m. Komt overeen met meting.
 $\lambda = 2 \zeta = 4,8$ m. Komt overeen.

Volgens 'oude' methode:

Impulsflux $I = \rho Q_{\text{uit}} v_{\text{uit}} = 614$ N, dus $\left\{ \frac{I}{\rho g} \right\}^{1/3} = 0,40$ m
 $\zeta = 7 \cdot 0,40 = 2,8$ m. Komt overeen met meting. $\lambda = 12 \cdot 0,40 = 4,8$ m. Komt overeen.

Geval Nijkerk 2

Gegeven:

pijpdiameter $D = 0,60$ m met perswater, $\rho = 1000$ kg/m³
 klein gat in zijkant pijp $d/D = 0,5$, dekking $\delta = 1,2$ m
 dus $d = 0,30$ m, $\mu = 0,65$ en $\lambda/\zeta = 0,5$
 Lokale leidingdruk na breuk $H = 25$ mwk
 Gemeten $\zeta = 15$ m, $\lambda = 7,5$ m, $\eta = 2$ m.

Berekend:

$$v_{uit} = \sqrt{2 g H} = 22 \text{ m/s}$$

$$Q_{uit} = \mu \frac{\pi}{4} d^2 v_{uit} = 1,01 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Vermogen } P = \frac{1}{2} \rho Q_{uit} v_{uit}^2 = 248 \text{ kW, dus } \left\{ \frac{P}{\rho g^{3/2} \mu d^{7/2}} \right\}^{2/7} = 6,85$$

Kuilibreedte $\frac{\zeta}{d} = 7,8 \cdot 6,85^{0,85} = 40$ dus $\zeta = 12 \text{ m}$. Iets te lage waarde, afwijking 20%. Lengte $\lambda = 0,5 \zeta = 6 \text{ m}$. Iets te lage waarde, afwijking 20%. Diepte $\eta = 1,2 \cdot (D + \delta) = 2,2 \text{ m}$. Komt overeen.

Volgens 'oude' methode:

$$\text{Impulsflux } I = \rho Q_{uit} v_{uit} = 22,3 \text{ kN, dus } \left\{ \frac{I}{\rho g} \right\}^{1/3} = 1,31 \text{ m}$$

$\zeta = 7 \cdot 1,31 = 9 \text{ m}$. Ruim te lage waarde, dus onveilig! Afwijking 40%.

$\lambda = 12 \cdot 1,31 = 16 \text{ m}$. Te hoge waarde, afwijking 110%!

Geval Swifterbant 2

Gegeven:

pijpdiameter $D = 0,60 \text{ m}$ met perswater, $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$

afgeschoven leiding $d/D = 1$ dus $d = 0,60 \text{ m}$, $\mu = 1$ en $\lambda/\zeta = 2$

$$v_{uit} = 5 \text{ m/s}$$

Gemeten $\zeta = 4,25 \text{ m}$, $\lambda = 8,2 \text{ m}$.

Berekend:

$$Q_{uit} = v_{uit} \mu \frac{\pi}{4} d^2 = 1,4 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Vermogen } P = \frac{1}{2} \rho Q_{uit} v_{uit}^2 = 17,7 \text{ kW, dus } \left\{ \frac{P}{\rho g^{3/2} \mu d^{7/2}} \right\}^{2/7} = 1,42$$

$$\frac{\zeta}{d} = 7,8 \cdot 1,42^{0,85} = 10,5 \text{ dus } \zeta = 6 \text{ m. Te hoog, afwijking 40\%.$$

$$\lambda = 2 \zeta = 12 \text{ m. Ook te hoog, afwijking 50\%.$$

Volgens 'oude' methode:

$$\text{Impulsflux } I = \rho Q_{uit} v_{uit} = 7 \text{ kN, dus } \left\{ \frac{I}{\rho g} \right\}^{1/3} = 0,89 \text{ m}$$

$$\zeta = 7 \cdot 0,89 = 6,25 \text{ m. Iets te hoog, afwijking 50\%. } \lambda = 12 \cdot 0,89 = 11 \text{ m.}$$

Ook iets te hoge waarde, afwijking 30%.

Geval Hoge-druk olieleiding*Gegeven:*

pijpdiameter $D = 0,91$ m met olie, $\rho = 800$ kg/m³

klein gat in zijkant pijp $d/D = 0,25$

dus $d = 0,23$ m, $\mu = 0,65$ en $\zeta/\lambda = 0,5$

Leidingdruk $p = 50$ bar!

Berekend:

$$v_{\text{uit}} = \sqrt{2 p / \rho} = 100 \text{ m/s !}$$

$$Q_{\text{uit}} = \mu \frac{\pi}{4} d^2 v_{\text{uit}} = 2,64 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Vermogen } P = \frac{1}{2} \rho Q_{\text{uit}} v_{\text{uit}}^2 = 10\,260 \text{ kW!}, \text{ dus } \left\{ \frac{P}{\rho g^{3/2} \mu d^{7/2}} \right\}^{2/7} = 23$$

$$\frac{\zeta}{d} = 8,6 \cdot 23^{0,44} = 120 \text{ dus } \zeta = 27 \text{ m. } \lambda = 0,5 \zeta = 14 \text{ m.}$$

Overigens kan bij dit geval een vraagteken worden gezet bij de leidingdruk, die zal waarschijnlijk snel wegvallen, net als bij gasleidingen, zie [5]. Daardoor zullen de kuilafmetingen kleiner blijven.

Volgens 'oude' methode:

$$\text{Impulsflux } I = \rho Q_{\text{uit}} v_{\text{uit}} = 211 \text{ kN!}, \text{ dus } \left\{ \frac{I}{\rho g} \right\}^{1/3} = 3,0 \text{ m}$$

$\zeta = 7 \cdot 3,0 = 21$ m. $\lambda = 12 \cdot 3,0 = 36$ m. Geeft dus voor de ontgrondingsbreedte een lagere en voor de lengte een veel hogere waarde dan de nieuwe methode!

12. Conclusies

1. Om proefresultaten en praktijkgevallen goed met elkaar te kunnen vergelijken en om te onderzoeken welke grootheden, bijvoorbeeld impuls of vermogen, van belang zijn voor de ontgrondingskuilafmetingen, is het noodzakelijk een dimensieanalyse uit te voeren en alleen dimensieloze grootheden te correleren. In dit rapport zijn de proefresultaten van M1007, alsmede enkele nieuwe praktijkgevallen, op deze wijze opnieuw geïnterpreteerd. De verwerking van de originele meetgegevens moest daartoe op een aantal punten gecorrigeerd worden.
2. De nieuw afgeleide dimensieloze grootheden zijn met behulp van een regressieanalyse gecorreleerd, wat betere resultaten blijkt op te leveren in vergelijking met de oude methode. De macht van de uitstroomsnelheid in de gevonden correlatieformule (18a) ligt in tussen de waarden welke we zouden verwachten indien het ontgrondingsproces uitsluitend door de impulsflux danwel het hydraulisch vermogen zou worden bepaald. Dit lijkt erop te wijzen dat de kuilafmetingen vlak na breuk door de impulsflux en in de stationaire eindsituatie door het hydraulisch vermogen worden bepaald.
3. De ontgrondingslengte is evenredig met de ontgrondingsbreedte, maar blijkt ook afhankelijk van de geometrie van het gat ten opzichte van de buis. Er zijn drie gevallen onderscheiden (figuur 5), waarvoor verschillende waarden gelden voor de lengte/breedteverhouding, uiteenlopend van 0,5 tot 2. Bij de oude methode werd voor deze waarde steeds 1,7 aangehouden.
4. De oude formule voor de ontgrondingsbreedte heeft een statistische overschrijdingskans van 20% en is daarmee wat aan de onveilige kant in vergelijking met de nieuw voorgestelde formule (18b), waarin deze kans op 5% is gesteld. De ontgrondingslengte wordt met de oude formule daarentegen meestal overschat en is dan aan de (te) veilige kant. In een aantal specifieke gevallen echter, bijvoorbeeld bij afschuiving van de buis, blijkt de lengte-breedteverhouding van de kuil groter dan de in de oude formule gehanteerde waarde van 1,7, zodat de met de oude formule berekende lengte dan toch aan de onveilige kant is.

5. De kuildiepte is vrijwel onafhankelijk van de straalparameters en kan berekend worden uit buisdiameter en dekking volgens (17).
6. Een bovengrens voor het maximale hydraulische vermogen bij breuk is eenvoudig te bepalen uit de pompkromme en de reservoirdruk van een leidingsysteem. In werkelijkheid zal het optredend vermogen ter plaatse van de breuk echter kleiner zijn en daarmee dus ook de bijbehorende ontgrondingskuilafmetingen. Het verdient daarom aanbeveling een leidingberekening uit te voeren.

13. Referenties

1. G. Abraham, 1963
Jet diffusion in stagnant ambient fluid
Delft Hydraulics publication no. 29
2. R.A. Bagnold, 1966
An approach to the sediment transport problem from general physics
U.S. Geol. Survey, Prof. Paper 422-I
3. H.N.C. Breusers, J. Wijdieks, 1969
Veiligheid persleidingen bij dijken
Verslag modelonderzoek
Waterloopkundig Laboratorium, M1007

tevens:

H.N.C. Breusers, J. Wijdieks, 1971
Veiligheid persleidingen bij dijken
Uitbreiding
Waterloopkundig Laboratorium, M1007
4. A.G. van Os, P.R.H. Verbeek, 1972
Ontgronding door gasleidingbreuk
Verslag modelonderzoek
Waterloopkundig Laboratorium, M1136
5. D.R. Mastbergen, 1991
Ontgronding door gasleidingbreuk
Herinterpretatie M1136
Waterloopkundig Laboratorium, J617

Tabel 1 Proefgegevens M1007 en praktijkgevallen

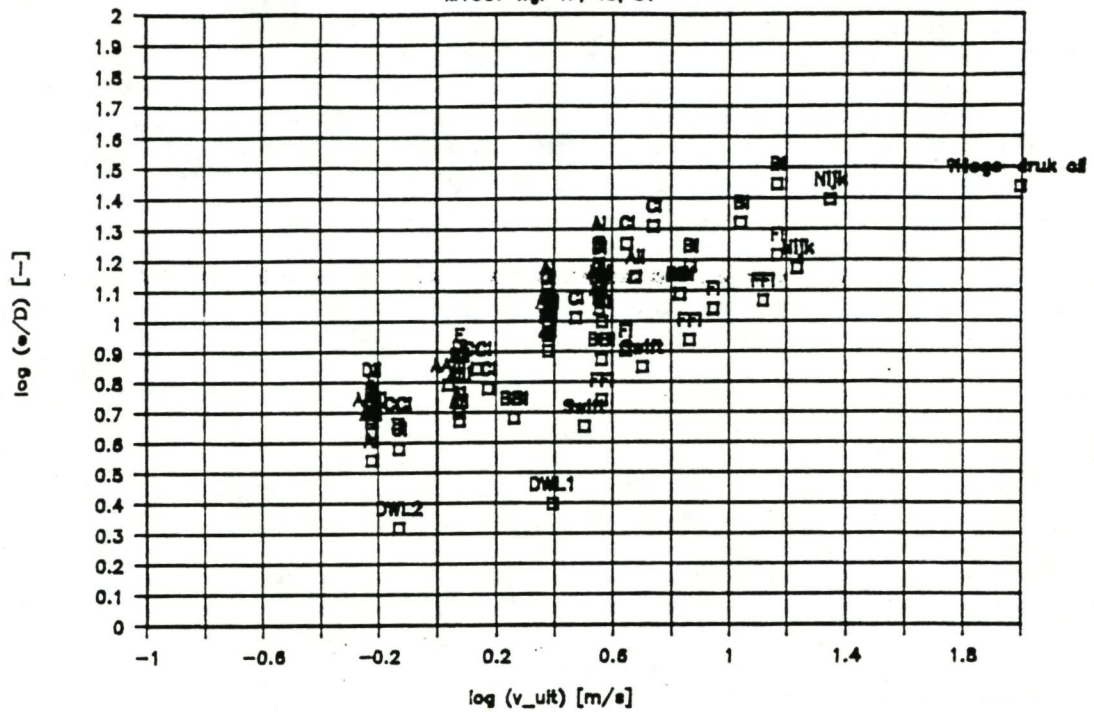
Proef No.	Buis diameter D	Gat grootte d/D	Afvoer coëff. μ	Dekking buis δ/D	Breedte kuil ζ/D	Lengte kuil λ/D	Diepte kuil η/D	Debiet Q_{uit} [m ³ /s]
	[m]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	
AI	0.0464	1	1	1	3.5	5.6	1.8	0.001
AIII	0.0464	1	1	2	4.3	6	3.2	0.001
AII	0.0464	1	1	5	4.3	7.1	5.4	0.001
DI	0.0464	1	1	2	5	6.9	3	0.001
DII	0.0464	1	1	5	6	8.2	6.1	0.001
E	0.0464	1	1	2	5.5	4.3	4	0.001
CI	0.0464	1	0.8	2	3.8	4.3	3	0.001
AI	0.0464	1	1	1	5	13.5	2.7	0.002
AII	0.0464	1	1	2	4.7	13	6.3	0.002
DII	0.0464	1	1	5	6.7	12.2	6.7	0.002
DI	0.0464	1	1	2	7.1	12.5	3.5	0.002
E	0.0464	1	1	2	7.8	5.8	5	0.002
AIII	0.0464	1	1	2	5.8	12	3.3	0.002
CI	0.0464	1	0.8	2	6	6.9	4.2	0.002
AI	0.0464	1	1	1	13	23	3.2	0.004
DI	0.0464	1	1	2	12	23.5	4	0.004
AIII	0.0464	1	1	2	10	22.5	4	0.004
AII	0.0464	1	1	5	8	18.3	6.6	0.004
DII	0.0464	1	1	5	9	18.1	7.1	0.004
CI	0.0464	1	0.8	2	10.3	11.4	4.7	0.004
E	0.0464	1	1	2	10.5	9	6.5	0.004
AI	0.0464	1	1	1	18	32	3.3	0.006
DI	0.0464	1	1	2	15	30	4.5	0.006
AIII	0.0464	1	1	2	12.5	28.5	4.3	0.006
DII	0.0464	1	1	5	12	24.5	7.6	0.006
AII	0.0464	1	1	5	11	23	7	0.006
CI	0.0464	1	0.8	2	18	12.5	5.5	0.006
E	0.0464	1	1	2	15.5	12	7.5	0.006
AII	0.0464	1	1	5	14	28	7.1	0.008
CI	0.0464	1	0.8	2	20.5	16	6.2	0.0074
BBI	0.093	0.5	0.65	2	4.8	3.2	3.2	0.002
BBI	0.093	0.5	0.65	2	7.5	4.7	3.5	0.004
BI	0.0464	0.5	0.65	2	10	5	4	0.001
FFI	0.093	0.25	0.65	2	5.5	2.7	3.1	0.001
BI	0.0464	0.5	0.65	2	15.2	7.7	5.9	0.002
BBI	0.093	0.5	0.65	2	12.3	8	3.9	0.0074

Tabel 1 (vervolg)

Proef No.	Buis diameter D	Gat grootte d/D	Afvoer coëff. μ	Dekking buis δ/D	Breedte kuil ζ/D	Lengte kuil λ/D	Diepte kuil η/D	Debiet Q_{uit} [m ³ /s]
	[m]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	
FI	0.0464	0.25	0.65	2	8	3.5	3.4	0.0003
FFI	0.093	0.25	0.65	2	8.7	3.5	3.5	0.002
BI	0.0464	0.5	0.65	2	21	11	6.2	0.003
BI	0.0464	0.5	0.65	2	28	11	6.7	0.004
FI	0.0464	0.25	0.65	2	11	5	4	0.0006
FFI	0.093	0.25	0.65	2	11.7	5.9	3.7	0.0036
FI	0.0464	0.25	0.65	2	16.5	7.5	4.4	0.001
AAIII	0.093	1	1	2	4.8	5.4	3.6	0.004
CCI	0.093	1	0.8	2	4.6	4.6	3.3	0.004
CCI	0.093	1	0.8	2	7	7	4	0.0074
AAIII	0.093	1	1	2	6.2	8.1	4	0.0074
Swift1	0.6	1	1	1.67	4.5	6	2.67	0.890641
Swift2	0.6	1	1	1.67	7.1	13.6	2.75	1.413716
Nijk1	0.6	0.5	0.65	2	15	7.5	3.33	0.788208
Nijk2	0.6	0.5	0.65	2	25	12.5	3.33	1.017572
DWL1	1.2	1	1	0.83	2.5	6.25	2.125	2.777777
DWL2	1.2	1	1	0.83	2.08	4.58	2.125	0.833333

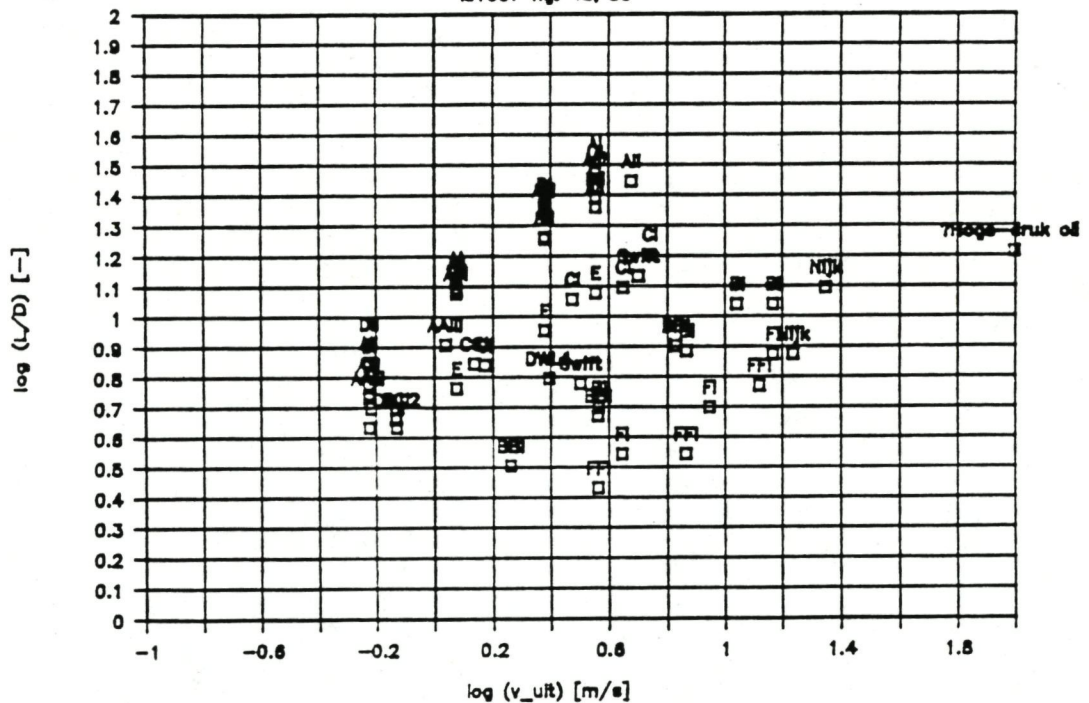
Ontgrondingsbreedte

M1007 fig. 47, 49, 51



Ontgrondingslengte

M1007 fig. 48, 50



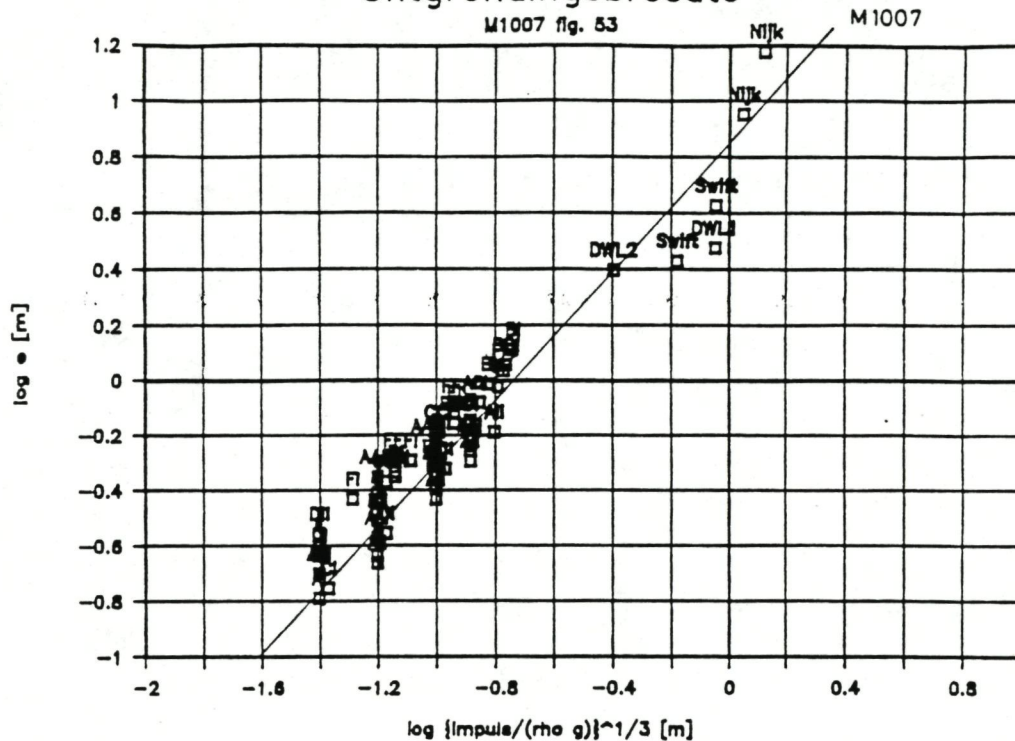
Ontgrondingskuilafmetingen
Resultaten M1007

J 640

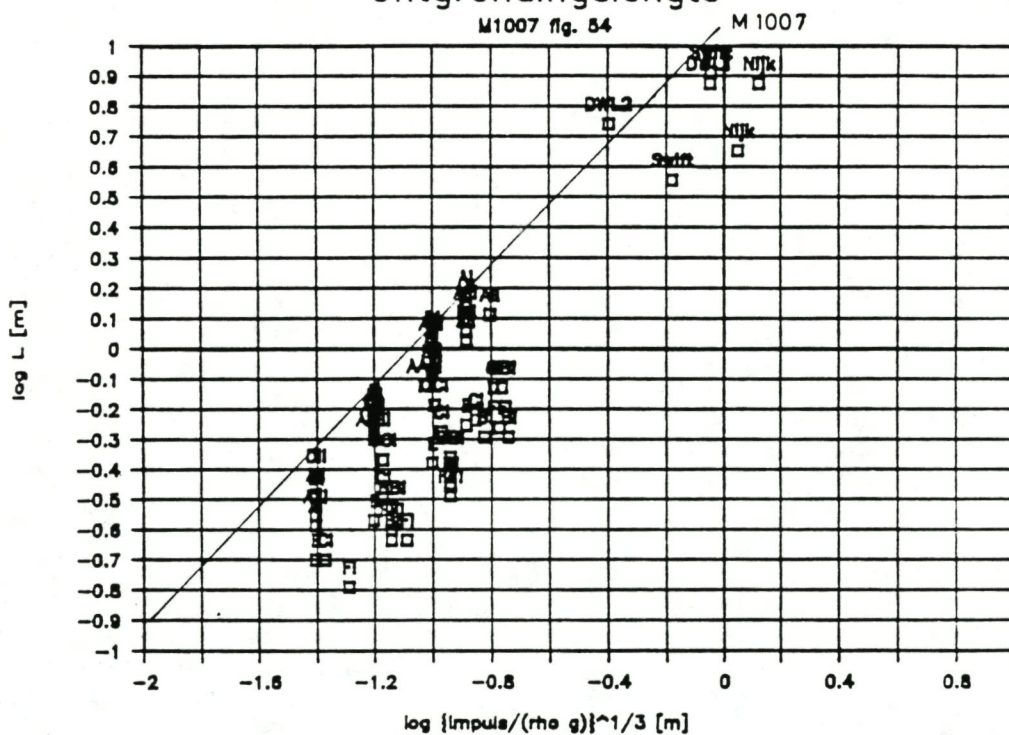
waterloopkundig laboratorium | WL

FIG. 1 a, b

Ontgrondingsbreedte



Ontgrondingslengte

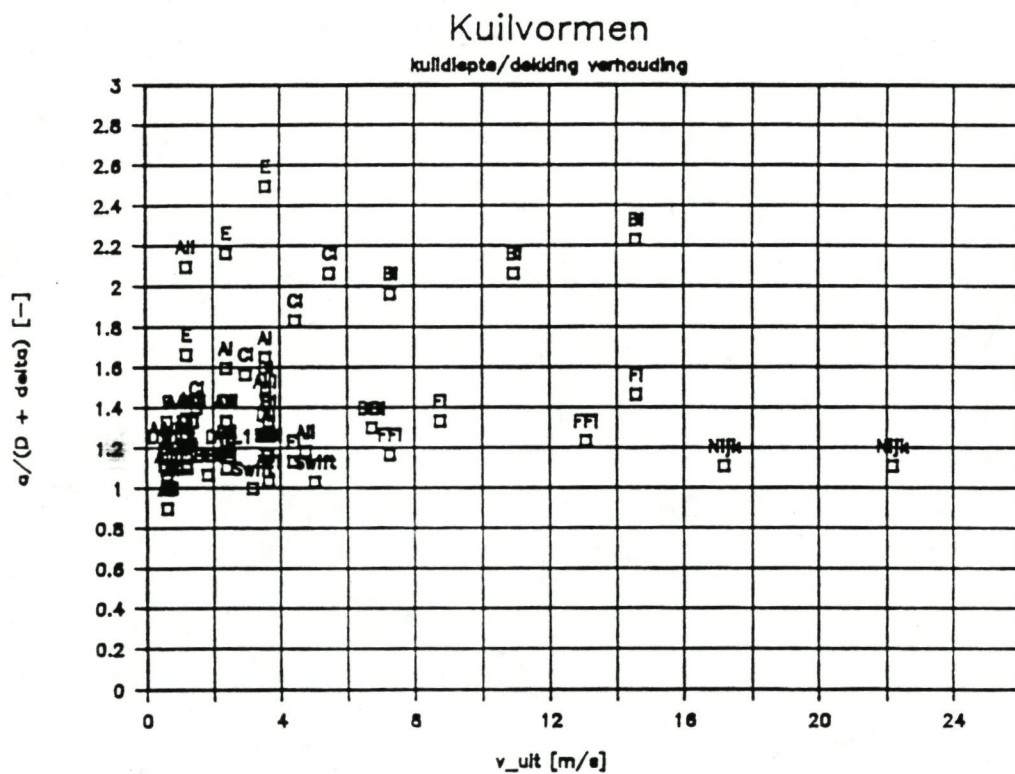
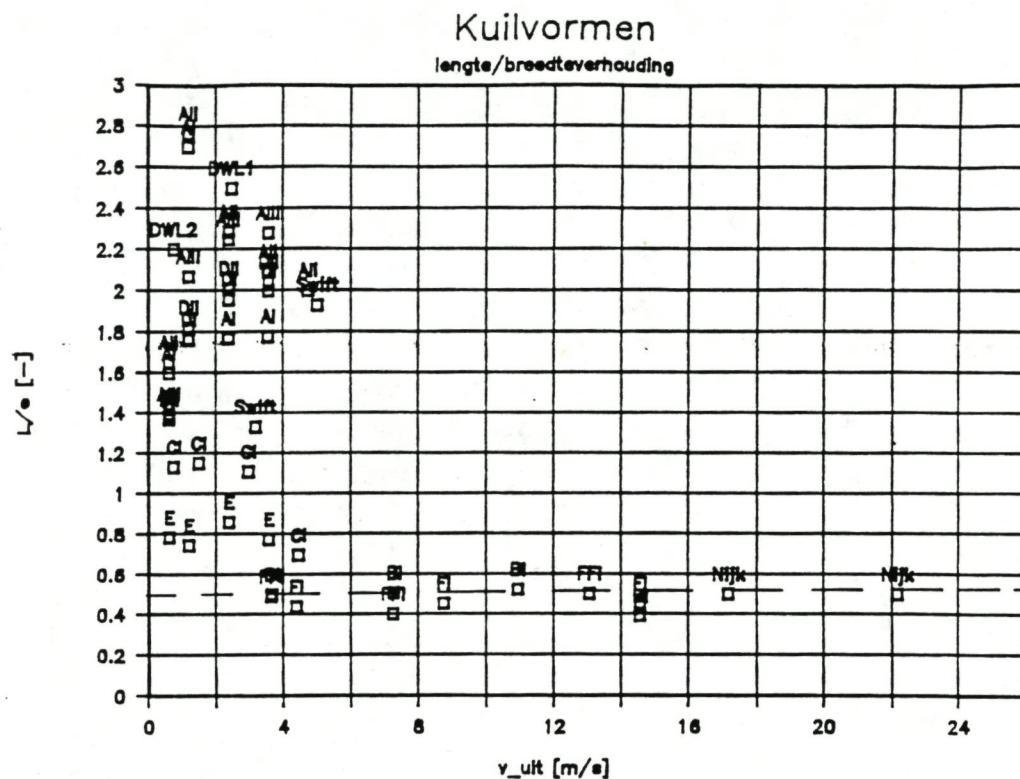


Ontgrondingskuilafmetingen
Resultaten M1007

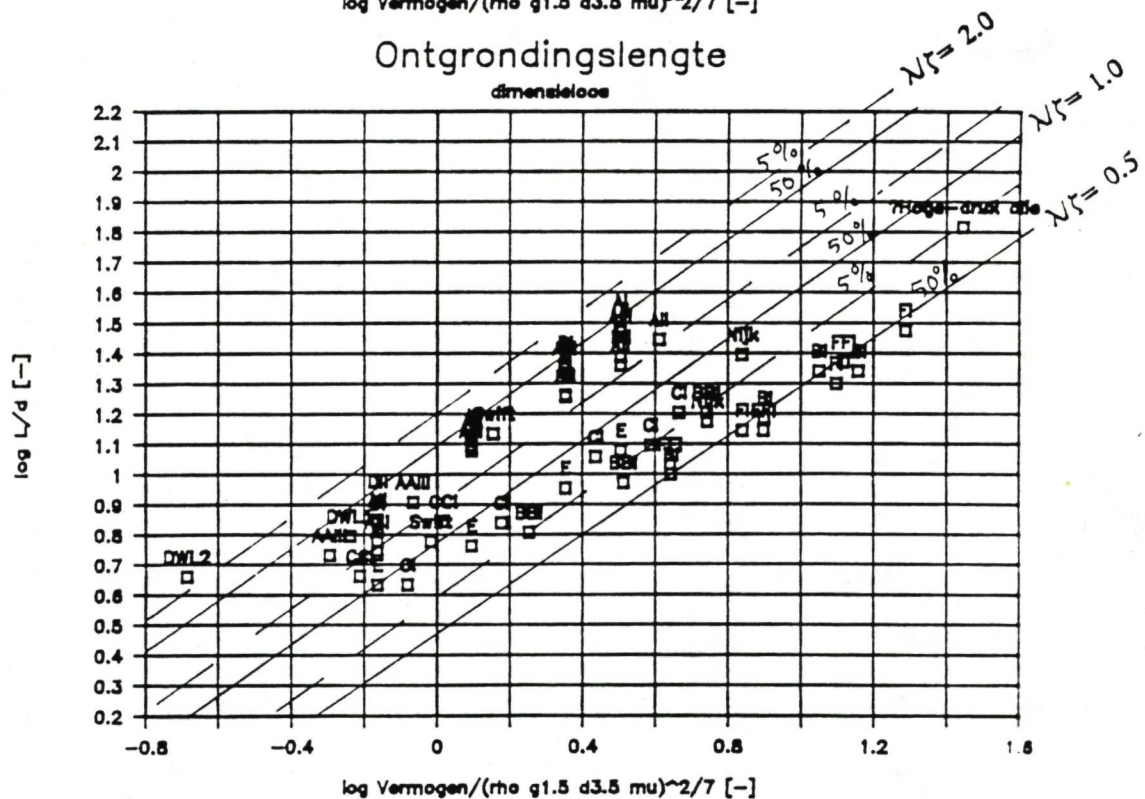
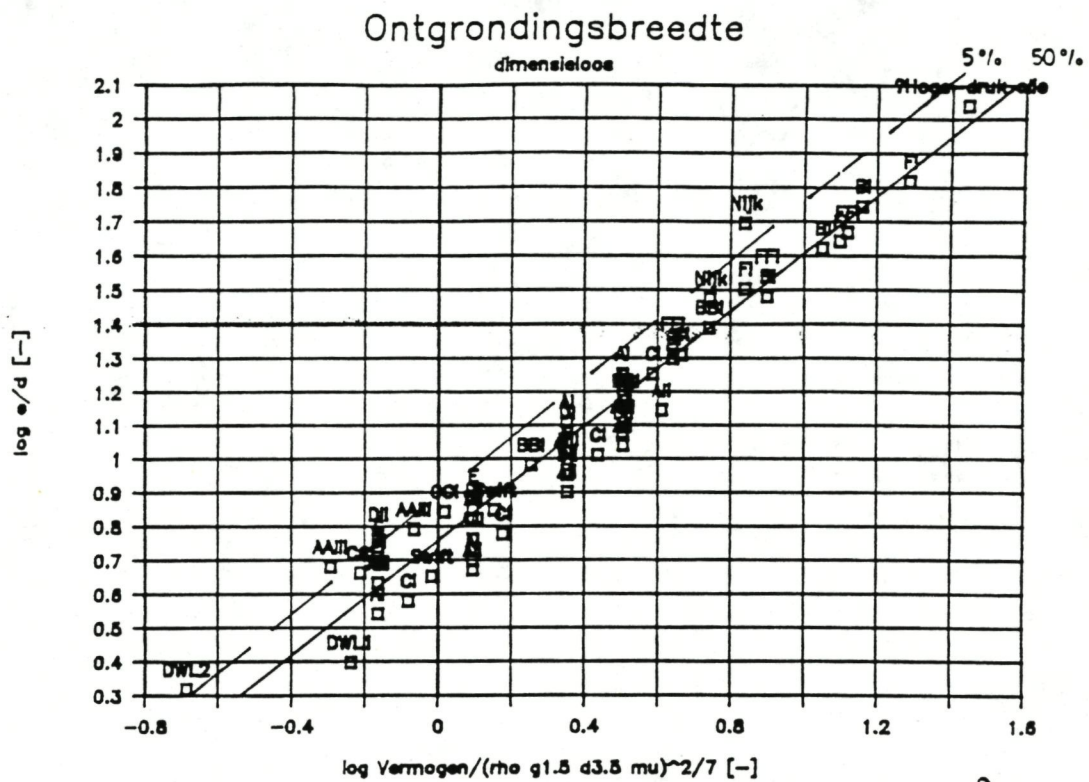
J. 640

waterloopkundig laboratorium | WL

FIG. 2 a, b



Kuilvermen

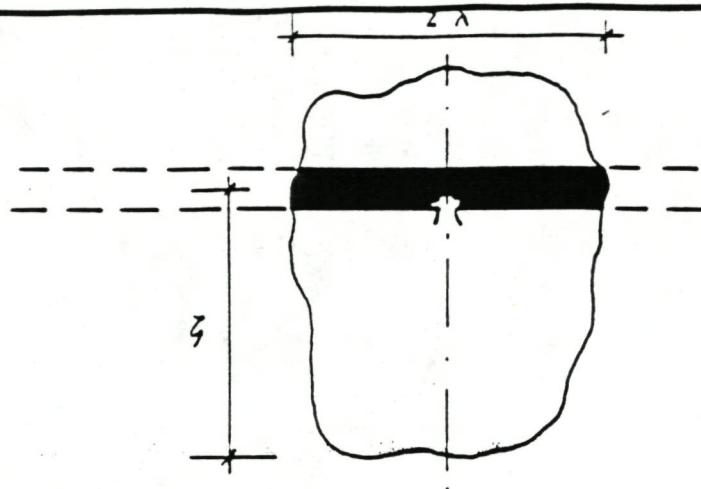


Ontgrondingskuilafmetingen als
functie van het hydraulisch vermogen
dimensieloos

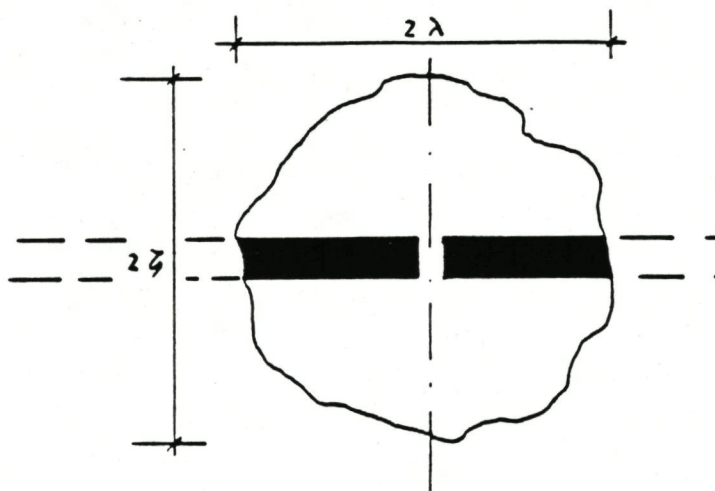
J 640

waterloopkundig laboratorium | WL

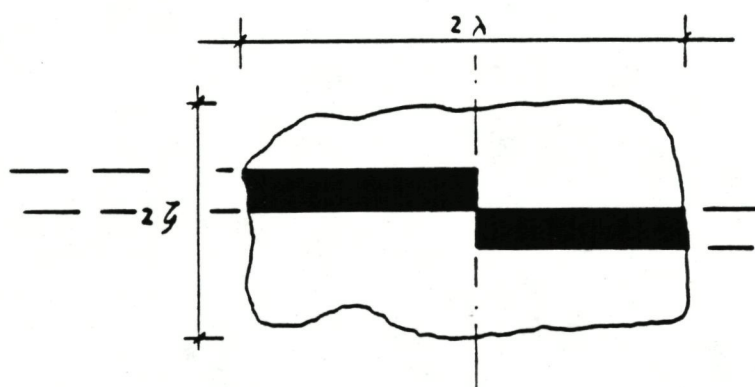
FIG. 4 a, b



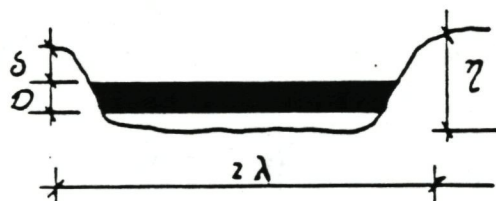
Klein gat
Serie B, F, Nijkerk
 $\mu = 0.65$
 $d/D = 0.25-0.50$
 $\lambda/\zeta = 0.5$



Groot gat
Serie E, C
 $\mu = 0.8$
 $d/D = 1.0$
 $\lambda/\zeta = 1.0$



Afschuiving
Serie A, D, Swifterbant, DWL
 $\mu = 1.0$
 $d/D = 1.0$
 $\lambda/\zeta = 2.0$



Kuildoorsnede
 $\eta/D + \delta = 1.2$

Schets verschillende optredende
kuilvormen en bijbehorende lengte-
breedteverhoudingen

J 640

waterloopkundig laboratorium | WL

FIG. 5

PRAKTIJKERVARINGEN DWL ROTTERDAM MET ONTGRONDINGSSTRALEN BIJ LEKKAGES

Bedrijfsgegevens:

werkdruk: circa 30 mwk

toegepaste leidingmaterialen: asbest cement, gietijzer, PVC, HPE, voorgespannen beton, staal

diameters: DN 100 t/m DN 1400 mm

duur lekkage: i.v.m. tijdbeslag melding en bediening afsluiters minimaal 2 uur

grondslag: over het algemeen "ophoogzand", in leidingstraten klapzand

Bij de DWL Rotterdam worden de lekkagegegevens in een geautomatiseerd bestand vastgelegd. Van transportleidinglekages (nominale diameter groter of gelijk 400 mm) wordt een rapport opgesteld, eventueel met foto's.

De meest spectaculaire lekages zijn "klappers" van voorgespannen betonbuizen waarbij stukken beton tot 40 à 50 m worden weggeslingerd en volledige afschuiving ontstaat. In 1990 hebben twee van dergelijke lekages plaatsgevonden. Hieronder de technische gegevens waarbij men in het oog dient te houden dat de maten in het veld zo goed mogelijk zijn ingeschat.

1. materiaal en diameter: voorgespannen betonbuis, inwendig ϕ 1200 mm
ligging: in leidingstraat, dekking 1,00 m
bodemgesteldheid: klapzand (ingezaaid met Europoort-graszaadmengsel)
grondwaterstand: 0,50 m onder maaiveld
debiet: gedurende enkele uren 10.000 m³/h
ontgronding: diepte: circa 2,55 m - mv. (= onderkant buis)
ontgrondingsdiameters: circa 6 x 15 m
2. materiaal en diameter: voorgespannen betonbuis, inwendig ϕ 1200 mm
ligging: in leidingstraat, dekking 1,00 m
bodemgesteldheid: klapzand (ingezaaid met Europoort-graszaadmengsel)
grondwaterstand: 0,50 m onder maaiveld
debiet: gedurende 2,5 uur 3.000 m³/h
ontgronding: diepte: circa 2,55 m - mv. (= onderkant buis)
ontgrondingsdiameters: circa 5 x 11 m

In beide gevallen blijven de afmetingen binnen de (dubbele) waarde van R_1 en R_2 volgens de formules op pagina 46 van de Pijpleidingcode, revisie 1990.

Ook heeft in 1990 een grote lekkage van een PVC-leiding plaatsgevonden:

2. materiaal en diameter: PVC, inwendig ϕ 600 mm
ligging: in berm weg, dekking 1,00 m
bodemgesteldheid: zand/klei
grondwaterstand: 0,50 m onder maaiveld
debiet: onbekend
ontgronding: diepte: circa 1,70 m - mv. (= onderkant buis)
ontgrondingsdiameters: circa 3 x 5 m

Aangezien hier geen debiet bekend is, kunnen er geen conclusies aan verbonden worden.

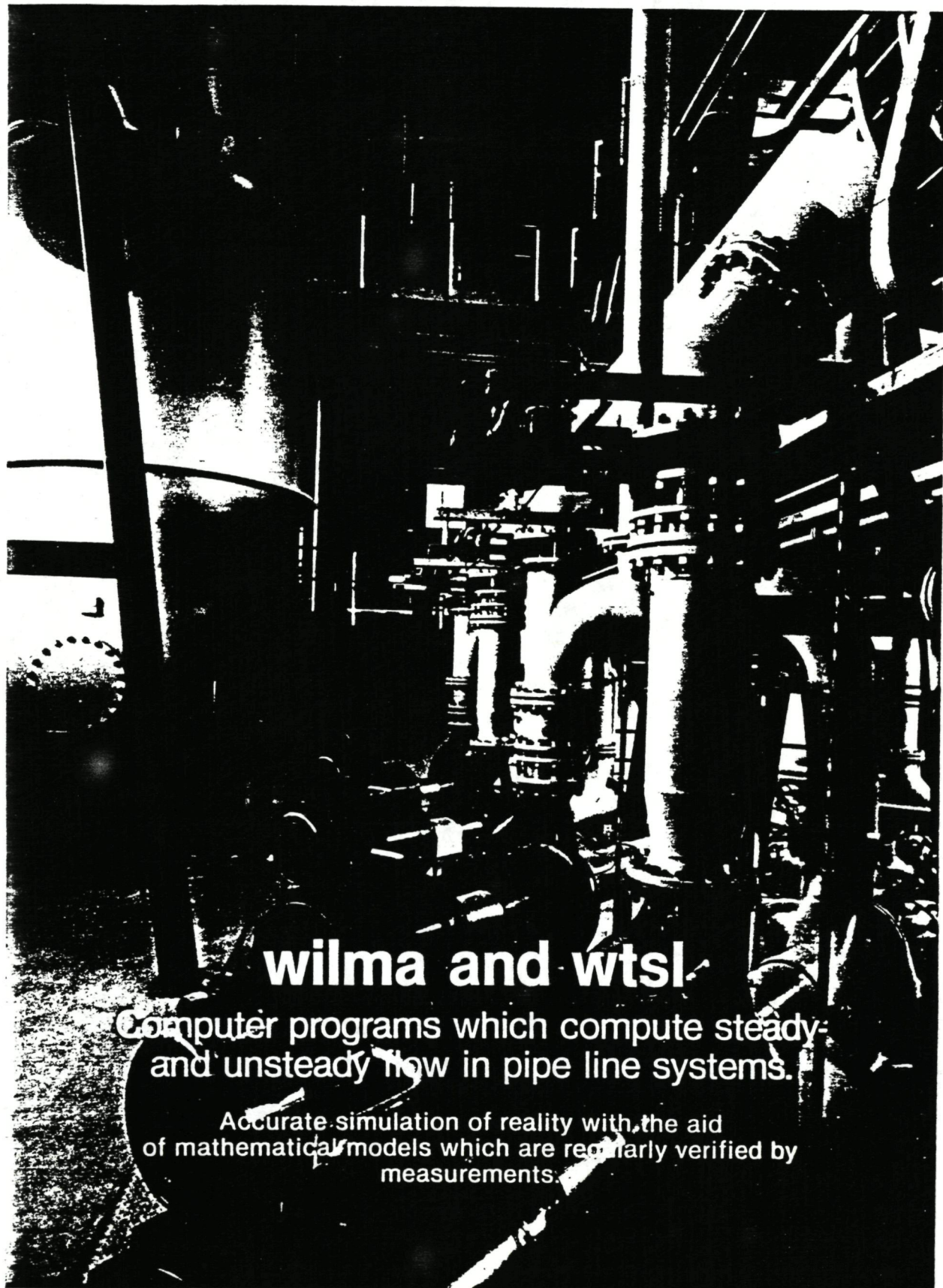
in het algemeen kan worden gesteld dat lekkages in stalen leidingen weinig voorkomen. Een lekkage beperkt zich meestal tot een corrosiegaatje waarbij een ontgrondingskuil ontstaat met een diameter van circa 2 m ongeacht de diameter van de leiding of de bodemgesteldheid. De werkput die moet worden gemaakt om de lekkage te verhelpen is meestal groter dan de ontgrondingskuil.

Daarnaast hebben een aantal lekkages in het distributienet plaatsgevonden (diameters t/m 300 mm). Uit de gegevens is het niet mogelijk een relatie met diameter, bodemgesteldheid, soort lekkage en dergelijke te leggen met de ontgrondingsstraal. Opvallend is wel dat van bijna alle lekkages de ontgrondingsdiameter dwars op de leidingrichting niet groter werd dan 2 m terwijl de ontgrondingsdiameter in de lengterichting wel varieert van 2 tot 6 m.

Waterschap IJsselmonde
Barendrecht
4 maart 1991



waterloopkundig laboratorium
delft hydraulics laboratory



wilma and wtsl

Computer programs which compute steady and unsteady flow in pipe line systems.

Accurate simulation of reality with the aid of mathematical models which are regularly verified by measurements.

What are unsteady flow phenomena?

Unsteady flow phenomena or water hammer can be defined as pressure waves caused by changes in the velocity of liquid flowing in a pipeline. In general these changes are caused by manipulating valves, starting and stopping pumps, etc. Changes in the velocity can cause an increase or decrease in pressure in the pipeline. In certain cases this pressure can fall to such an extent that the vapour pressure of the liquid is reached, a phenomenon known as cavitation. Because of lack of knowledge about cavitation, in the past, pipeline systems were always protected against the phenomena. For example by including air vessels or surge tanks in the systems.

Why water hammer calculations by the Delft Hydraulics Laboratory (DHL)?

— To increase the safety of pipeline systems

There are known cases of accidents which have resulted from unexpected water hammer phenomena and have cost lives. In the past it was not fully appreciated what the results of water hammer could be and the forces acting on the pipeline as a consequence. Figures 1, 2, 3, 4 illustrate cases of pipeline system failure. Figures 1 and 2 show a simple pump failure and the effects on a joint which had insufficient tensile strength. This calamity could have been prevented in a very simple way if the forces acting on the pipeline had been predicted using a water hammer computer program.

Figures 4 and 5 show a sewer pressure line. Hydraulic forces, occurring after pump failure, exerted a large moment on the pipeline structure and, after the failure of only one pump, caused both pressure lines of two pumps set up in parallel to tear loose from their flanges.

— To find out how cavitation develops and decays

DHL is able to calculate the growth and decay of cavitation using special calculation methods in the WILMA computerprogram. This makes it possible, in certain cases, to accept cavitation and, in some cases, expensive water hammer provisions are not, in fact, needed.

— To optimize pipeline systems

The water hammer computer program gives very accurate results, making it possible to optimize pipeline systems.

Figure 1 Drinking water pipeline fracture. General view.



Figure 2 Drinking water pipeline fracture. Detail showing joint with insufficient tensile strength.

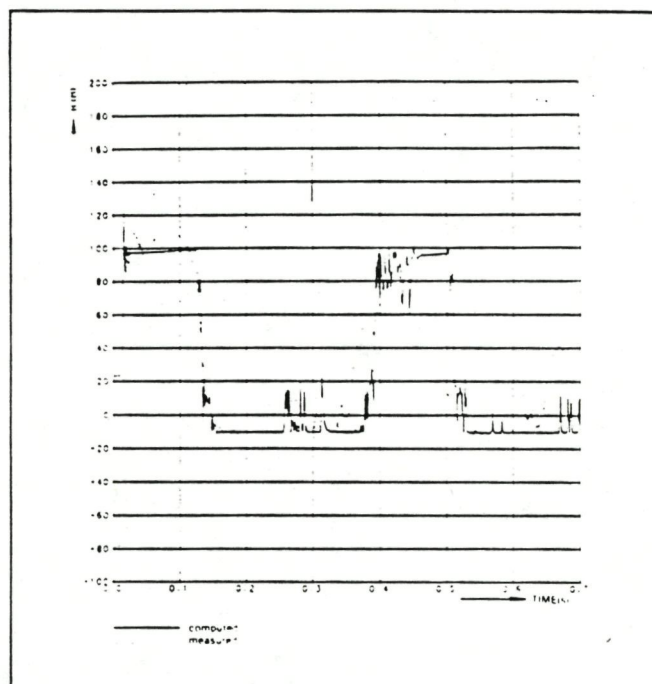


Figure 3 Comparison between measured and calculated pressures.

This accuracy is illustrated in Figure 3 which compares measured and calculated pressure values. Because extreme pressure and pump delivery values can be predicted with such accuracy pipelines can be used with a (cheaper) lower pressure classification and higher discharges can be pumped through existing pipelines without affecting the safety of the system.

— To find out the operational limits of pumps and pipeline systems

DHL can build mathematical models with the help of computer programs and it is possible, in a relatively short time, to find out the limits within which pumps, valves and pipelines can be operated.

For example: A fast emergency closure of a valve. This operation has, in the past, caused calamities and it is important to know how the shortest possible closure time during which the pressure waves generated will remain within allowable limits. Another example is restarting a pump, after a cut-out due, for example, to electrical current failure. In most cases pumps are restarted as quickly as possible. Mathematical simulation with a water hammer program, can give the answer to the question of what is feasible.

- Because DHL already has many year experience in examining water hammer

DHL is an independent organization and clients can expect fast, accurate and unbiased answers.

- An accurate water hammer analysis is essential for an optimum design and performance of a hydraulic system (pipelines, valves, pumps, air vessels, pipeline anchoring systems, etc.) and quickly pays for itself.

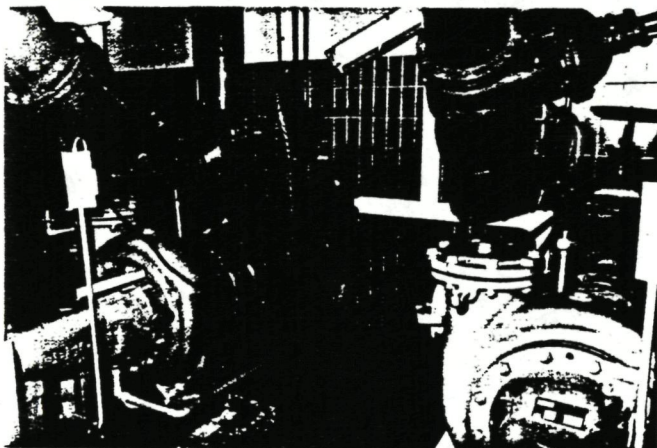


Figure 4 Sewer pipeline fracture.
General view of torn pressure line.

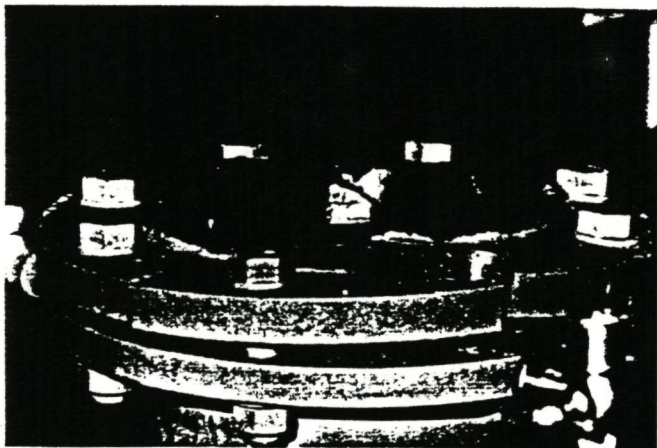


Figure 5 Sewer pipeline fracture.
Detail showing fractured flange.

Mathematical description of the computer programs

A pipeline system is composed of pipelines and nodes, nodes being various pieces of equipment: pumps, valves, resistances, etc. in series. For the calculations each pipeline has its own length L , diameter D , friction factor f , and velocity of propagation of pressure waves c . A steady state situation is assumed at the beginning of the calculation. The mathematical description is written in terms of total pressure head, H . In order to calculate H at absolute pressure in the pipeline p , the level of the pipeline z , the density of the fluid ϱ , the atmospheric pressure p_a , and the acceleration due to gravity g , must be taken into account in the relationship:

$$p = \varrho \cdot g(H - z) + p_a \quad (1)$$

The motion of the fluid in the pipe, without cavitation, is described by differential equations in the x - t domain (x being the coordinate along the axis of the pipe, t the time coordinate), based on Newton's Second Law of Motion and the Law of Conservation of Mass [1].

- The equation of Motion follows from considering the forces acting on an element of fluid along the axis of the pipe and the changes in fluid velocity v , with time.

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f}{2gD} v |v| = 0 \quad (2)$$

- The Law of Conservation of Mass applies in that the difference between the quantities of liquid flowing into and out of a pipeline element must be compensated by storage which is possible because of the elasticity of the fluid and the pipeline:

$$\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{g}{c^2} \cdot \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

Equations (2) and (3) are solved for known boundary conditions in order to determine the total pressure head H , and the velocity v , as functions of time and place. The Method of Characteristics is used for this calculation [4]. If the pressure, however, reaches the vapour pressure of the fluid further expansion of the fluid will lead to the development and growth of vapour bubbles, a phenomenon referred to as cavitation [2]. Equations (2) and (3) are then no longer valid because the changing density of the liquid with time, is not taken into account and because the Law of Conservation of Mass assumes that the fluid obeys Hooke's Law. This form of two-phase flow requires a different mathematical description. The cavitation phenomenon is described by dividing the pipeline into a large number of computational sections at the end of which it is assumed that cavitation develops. This 'concentrated cavitation model' predicts very accurately the growth of cavitation, the time over which it develops and the size of the pressure wave which develops after the cavity has imploded [3]. A comparison between measurements and calculations is given in Figure 3.

Some applications of the WILMA computer program series

Some of the most frequently occurring pieces of equipment in a pipeline system, which can be simulated in the WILMA program, are:

- Constant level
- pumps
- check valves
- valves
- air vessels (aeration/de-aeration)
- surge tanks
- condensers
- hydraulic resistances
- weirs
- pipeline anchors
- pipelines

Mathematical models can, in practice, effectively reproduce the performance of such pieces of equipment.

The WILMA computer program is compiled in such a way that it is relatively easy to incorporate new pieces of equipment very quickly.

This means that, in most cases, DHL can tackle clients' queries about new equipment very quickly. Consider, for example, a new pressure regulator or a new type of valve. By studying these in a mathematical model their performance can very quickly be predicted. Any unknown parameters or characteristic properties can be observed in the hydraulic machinery laboratory where there are test sections in which characteristics can be determined for equipment up to a very large diameter.

For questions raised by industry DHL has specific research programs to provide up to date information in the area of unsteady flow, etc.

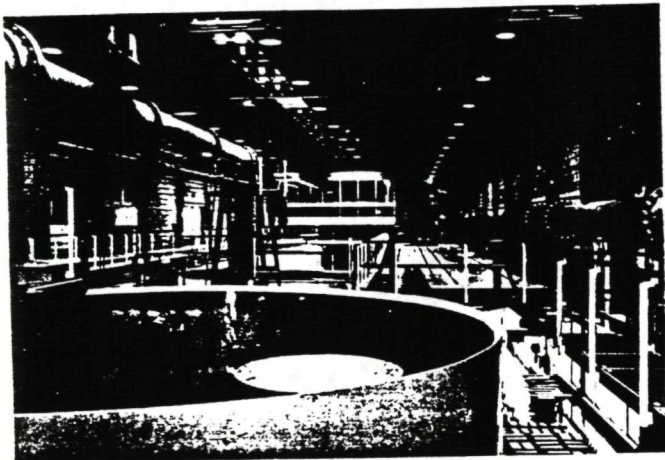


Figure 6 Test sections hydraulic machinery laboratory

WTSL

DHL has developed the WTSL water hammer program which can be used in personal computers.

The advantage of this is that a client, after purchasing the program, can make his own calculations without incurring external costs. The plot routines, linked with the program, ensure that the computed results can very quickly be presented graphically. In this way the client can determine in a very short time if water hammer provisions have to be installed and what, for example, the dimensions of the air vessel should be.

The program, in principle, is suitable for simple pipeline systems which means that for more complex systems the answer should be treated carefully. Although cavitation can be predicted the effects cannot be calculated precisely. It is, however, eminently suitable for relatively simple pipeline systems with a limited number of boundary conditions (pieces of equipment) and for gaining insight into water hammer systems in more complex systems.

A big advantage of the WTSL program is that it is very 'user friendly' and is easy to apply even with very little experience.

Field measurements

DHL is in a position to observe phenomena in the field if it is necessary to confirm the results of the computer program. The laboratory has very accurate equipment available for measuring phenomena very quickly. An example of a comparison between measured and computed anchor forces, as a function of the time, is given in Figure 7.

DHL has had, over the years, many opportunities to compare measured and calculated values, and as a result, gathered together a lot of experience in translating practical problems into mathematical model terms. With this experience the computer programs have become more and more refined.

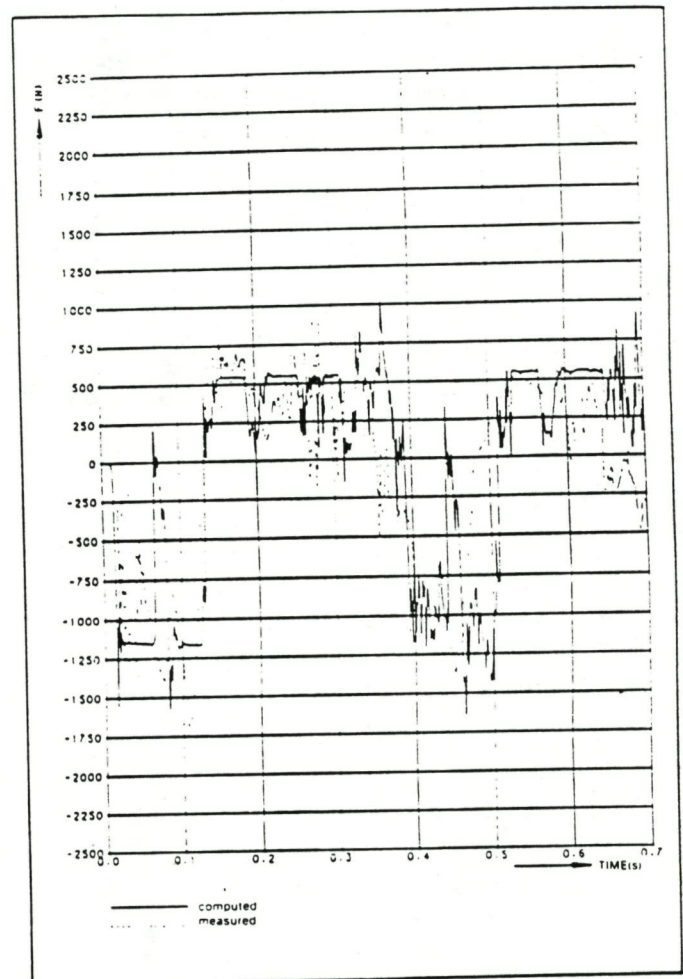


Figure 7 Comparison between measured and calculated anchor forces.

Areas of application

DHL carries out hydraulic analysis, aided by water hammer computer programs for almost all fluid pipeline systems. Commissions in this sphere have varied from the hydraulic analysis of water cannons and a 'rainfall' irrigation system for greenhouses to the analysis of power station cooling systems.

Commissions have included:

- drinking water pipeline systems
- power station cooling systems
- irrigation systems
- oil and liquid chemical transport installations
- sewer systems
- blast furnaces
- fire extinguisher systems

• locatie 'De Voorst'

• hoofdkantoor

hoofdkantoor
Rotterdamseweg 185
postbus 177
2600 MH Delft
telefoon (015) 56 93 53
telefax (015) 61 96 74
telex 38176 hydel-nl

locatie 'De Voorst'
Voorsterweg 28, Marknesse
postbus 152
8300 AD Emmeloord
telefoon (05274) 29 22
telefax (05274) 35 73
telex 42290 hylvo-nl

Noordzee

• Amsterdam

• Londen

Brussel •