

SUMMARY

New method for the dimensioning of asbestos cement pressure pipes

As a result of the research on cast-iron pipes, W. J. Schlick developed a empirical formula expressing the mutual dependence between external loads and interval hydraulic pressures, acting at the same time on a cast-iron pipe. Schlick's formula was adapted for asbestos cement after different tests of various combinations of internal pressures and external loads on asbestos cement pressure pipes.

The article describes how the pipes can be calculated with different safety factors.

Nieuwe berekeningsmethode asbestcement persleidingbuizen

Ofschoon reeds vele tienduizenden kilometers asbestcement persleidingbuizen in de Nederlandse bodem dagelijks zorgen voor het transport van drinkwater, gas en afvalwater ten behoeve van een groot deel van de Nederlandse bevolking, is de mechanische berekening van dit leidingnet uiterst summier. In feite berust de hele berekening van de buizen op de ketelformule

$$\sigma_b = \frac{p \cdot d}{2e} \quad (1)$$

waarin

σ_b = trekspanning in kgf/cm^2

p = inwendige druk in kg/cm^2

d = inwendige diameter van de buis in cm

e = wanddikte van de buis in cm

Wanneer men eerst aan de hand van een hydraulische formule of tabel, met de gewenste hoeveelheid water als gegeven, de diameter van de buis en daarna de noodzakelijke waterdruk in de buis bepaald heeft, is het vaststellen van de wanddikte van de buis met formule (1) nog slechts een kleinigheid.

Immers, naast de d en p , die uit de gegevens voortvloeien, is ook σ bekend als de toelaatbare spanning in de buizen. Volgens de nu vigerende keuringseisen no. 17 van het KIWA is de minimaal te bereiken barstdruksterkte voor de buizen 200 kg/cm^2 en de in rekening te brengen veiligheidscoëfficiënt voor buizen met een inwendige diameter t/m 100 mm: 4, voor buizen met een diameter van 125 t/m 200 mm: $3\frac{1}{2}$ en voor buizen met een diameter van 250 mm en groter: 3.

Deze waarden komen overeen met de ISO-Recommendation R-160 Asbestos Cement Pressure Pipes [1]. Op het ISO-congres te Madrid in 1966 is aan deze R-160 een noot toegevoegd luidende:

„Voor buizen met een nominale diameter van 600 tot 1000 mm mag de veiligheidscoëfficiënt van 3 worden verminderd tot $2\frac{1}{2}$, vooropgesteld dat de weerstand tegen schedeldruk in de sleuf geen keuze van een hogere veiligheidscoëfficiënt rechtvaardigt”.

De veiligheidscoëfficiënten in samenhang met de door de fabrikant te garanderen barstdruksterkte resulteren in de bij de berekening van de buizen toegelaten trekspan-

ningen. Deze bedragen dus voor buizen met een diameter

t/m 100 mm minimaal	$\frac{200}{4} = 50 \text{ kgf/cm}^2$
van 125 tot 200 mm minimaal	$\frac{200}{3\frac{1}{2}} = 57 \text{ kgf/cm}^2$
van 250 tot 500 mm minimaal	$\frac{200}{3} = 66 \text{ kgf/cm}^2$
van 600 tot 1000 mm minimaal	$\frac{200}{2\frac{1}{2}} = 80 \text{ kgf/cm}^2$

Inmiddels zijn nu ook een aantal asbestcement persleidingen met buizen met diameters groter dan 1000 mm in bedrijf genomen. De grootste buizen zijn momenteel gebruikt voor een rioolpersleiding te Berlijn nl. buizen van 1400 mm. Voor deze buizen wordt dezelfde toelaatbare spanning aangehouden als bij buizen met een diameter van 600 tot 1000 mm.

De ISO-Recommendation R-160 en de KIWA keuringseisen nr. 17 [2] geven naast de hierboven genoemde toelaatbare spanningen in de ketelformule, geen verdere ontwerpgegevens meer. Wel geven de genoemde keuringseisen een minimale schedeldruksterkte en buigtreksterkte aan bij beproeving in het laboratorium. Over veiligheidscoëfficiënten hierbij wordt niet gesproken. Wij komen hier verder in dit artikel op terug.

In de ISO-Recommendation R-160 heeft men geen wanddikten voorgeschreven. In de KIWA-keuringseisen nr. 17 zijn de wanddikten van de buizen met een inwendige diameter van 300 mm en kleiner vastgelegd. Boven een diameter van 300 mm is de fabrikant vrij in het vaststellen van de wanddikte onder inachtneming van de overige eisen. Bij de vaststelling van de wanddikte van de buizen tot en met een inwendige diameter van 300 mm is men destijds op voorstel van de Studiecommissie Asbestcementbuizen overigens van een nog 20 % hogere veiligheid uitgegaan, zodat bv. de wanddikte van een buis van 300 mm met een werkdruk van $7\frac{1}{2} \text{ kgf/cm}^2$ werd:

$$\sigma_b = \frac{p \cdot d}{2e} \text{ of } e = \frac{p \cdot d}{2 \sigma_b}$$
$$e = \frac{7\frac{1}{2} \times 30}{2 \times 66} \times 1,2 = 2,0 \text{ cm}$$

Hierbij moet nog worden bedacht, dat alleen gesproken wordt over de z.g. afgedraaide einden van de buizen,

die onder de koppeling verdwijnen en daardoor voor een deel zowel een in- als uitwendige waterdruk ondergaan. De buis zelf is altijd nog enige millimeters dikker, omdat bij een kleine ovalisatie bij de fabricage toch nog een zuiver rond buiseind moet kunnen worden verkregen.

In analogie met de R-160 verlangt Keuringseisen nr. 17 van een asbestcementbuis nog een minimale ringbuigtreksterkte van 450 kgf/cm² bij de ringdrukproef en een minimale buigtreksterkte in langsrichting van de buis van 250 kgf/cm² bij de buigproef. Deze laatste proef geschiedt alleen bij buizen met een inwendige diameter van 300 mm en kleiner. De ringdrukproef vindt plaats op buisingen van 20 cm breedte, die in radiale richting tussen twee vlakke stalen drukplaten middels een 1 cm dikke laag celotex tot breuk worden belast.

De ringbuigtreksterkte σ_s wordt berekend met de formule

$$\sigma_s = \frac{M}{W}$$

waarin

$$M = \frac{1}{2\pi} \cdot P(d + e) \text{ en } W = \frac{1}{6} g \cdot e^2$$

waaruit volgt:

$$\sigma_s = 0,955 \frac{P(d + e)}{g \cdot e^2} \quad (2)$$

σ_s = ringbuigtreksterkte in kgf/cm²

P = breukbelasting in kgf

d = inwendige middellijn in cm

e = wanddikte van de ring in cm

g = breedte van de ring in cm

Aan de veiligheidsfactor ten opzichte van de schedeldruk wordt in de Keuringseisen nr. 17, noch in de ISO-R-160, eisen gesteld. In feite is de ringdrukproef dus tot nu toe uitsluitend een controle op de materiaalkwaliteit, die geen relatie heeft tot de werkelijk optredende grond- en verkeerbelastingen.

De theorie van Schlick

De Amerikaan W. J. Schlick [3] heeft een studie gepubliceerd over de berekening van gietijzeren buizen bij gelijktijdig optredende uitwendige belastingen. De proeven zijn gedaan op buizen van 150, 300, 500 en 1200 mm in een grote verscheidenheid van uitwendige belastingen en inwendige drukken. Uitgegaan is hierbij van de principes der toegepaste mechanica voor de sterkte van een dunne elastische ring. Weliswaar voldoet een gietijzeren buis niet geheel aan de eisen voor toepassing van de theorie voor een dunne elastische ring, maar men acht de afwijkingen hiervan zo minimaal, dat de theorie verantwoord kan worden gebruikt. De grootte van het buigend moment in de ring tengevolge van uitwendige belastingen hangt af van de verdeling van deze lasten over het buitenoppervlak van de buising. Wanneer de belasting volgens een lijnlast aangrijpt ontstaat een groter buigend moment dan wanneer een belasting van dezelfde grootte over een deel van de buis wordt verdeeld. Ook kunnen in de praktijk nog horizontale krachten op de buis werken. Als de grootte, richting en verdeling van deze uitwendige belastingen bekend zijn, kunnen de buigende momenten echter volgens bovengenoemde theorie der toegepaste mechanica worden berekend.

Het maximum buigend moment waaraan een ring kan

weerstaan is die, welke een buigspanning oplevert, die gelijk is aan de buigtreksterkte van het materiaal. Er zal breuk optreden wanneer deze waarde wordt overschreden.

De inwendige waterdruk op de ring resulteert in een gelijke trekspanning over de gehele radiale doorsnede van de buiswand. Gietijzer is sterker, wanneer het onder druk wordt gebracht dan wanneer er trek op wordt uitgeoefend, zodat breuken tengevolge van buiging beginnen in de trekzone. Als de ring onderworpen wordt zowel aan inwendige waterdruk als aan uitwendige belasting tengevolge van grondstukken en verkeersbelastingen, ontstaat een trekspanning tengevolge van de inwendige waterdruk en daarnaast een buigtrekspanning tengevolge van de uitwendige druk. De maatgevende spanning treedt op ter plaatse van het maximum buigend moment en is een combinatie van beide trekspanningen.

De beide genoemde trekspanningen mogen niet rekenkundig worden gesusponeerd, omdat de trekspanning tengevolge van de inwendige waterdruk een werkelijke trekspanning weergeeft, terwijl de buigtrekspanning tengevolge van een buigend moment slechts een relatieve berekende waarde van de uiterste vezel aangeeft, die gebaseerd is op de elasticiteitstheorie (afb. 4).

Schlick belast vervolgens de buizen door:

1. de inwendige waterdruk gelijk te houden en de buis door schedeldruk tot breuk te belasten.
2. de uitwendige schedeldruk gelijk te houden en de buis door inwendige waterdruk tot breuk te belasten.

Eén van de proeven is weergegeven in afb. 1. Er ontstaat een wolk van punten, waarlangs een kromme is getekend, die zoveel mogelijk alle uitkomsten net onderschrijft. Bij deze kromme is op empirische wijze een geschikte vergelijking gevonden n.l.

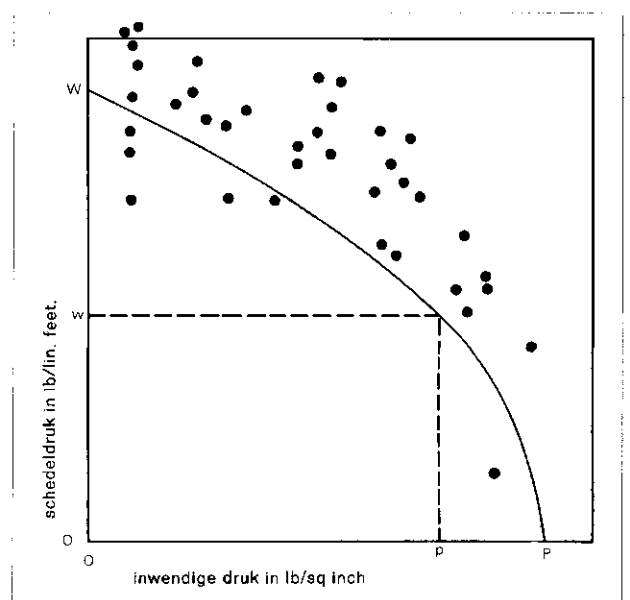
$$P - p = P \cdot \left(\frac{w}{W}\right)^2 \quad (3)$$

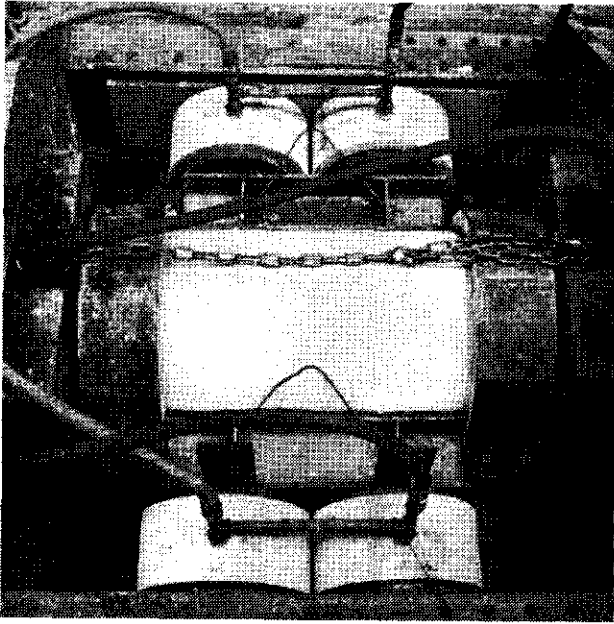
waarin

P = inwendige druk in lb/sq.inch, waarbij de buis breekt zonder schedeldruk.

p = inwendige druk in lb/sq.inch, waarbij de buis breekt bij gelijktijdig optredende schedeldruk w.

Afb. 1 - Beproeving gietijzeren buizen volgens Schlick.





Afb. 2 - Beproeving asbestcementbuis.

W = schedeldruk in lb/lin.ft, waarbij de buis breekt zonder inwendige druk.

w = schedeldruk in lb/lin.ft, waarbij de buis breekt bij gelijktijdig optredende inwendige druk p .

Zoals gezegd, deed Schlick proeven op buizen van verschillende diameters, waarbij de gevonden formule (3) met goed resultaat werd getoetst.

Uit afb. 1 kan worden afgelezen, dat de buis, die een uitwendige last van p lb/sq.inch, en omgekeerd. De bovengenoemde formule kan dus worden benut voor het ontwerpen van gietijzeren buizen door nu de veiligheidsfactoren in relatie te brengen tot de gecombineerde belasting van in- en uitwendige druk en niet meer tot de afzonderlijke belastingen. Hierdoor wordt ten eerste een hogere veiligheid bereikt voor toepassing van de buis in alle mogelijke situaties, terwijl tevens een meer verantwoorde bepaling van de wanddikte plaatsvindt, hetgeen weer economische voordelen biedt.

Proeven op asbestcementbuizen

De door Schlick gevonden experimentele formule (3) blijkt ook voor het gedrag van asbestcementbuizen te gelden. Uitgebreide onderzoeken [4] hebben op asbestcementbuizen plaatsgevonden, waarbij een proefopstelling met buizen van 500 mm en een wanddikte van 32 mm werd gebruikt (afb. 2). De inwendige druk werd door waterdruk veroorzaakt en de uitwendige druk door twee lijnbelastingen middels twee stalen balkprofielen. Van een aanbrengen van de uitwendige druk door een zandkistmethode werd om praktische redenen afgezien. Overigens is de verhouding van de breukkracht bij lijnbelasting tot die bij de zandkistmethode genoegzaam bekend, zodat deze vereenvoudiging voor de hand lag.

Van een serie proefstukken werd allereerst de ringbuigtreksterkte en de treksterkte bepaald van buizen, die alleen op schedeldruk resp. op inwendige druk worden belast. Vervolgens werd de invloed bepaald van de bij de proef gebruikte stoppen aan het einde van de buis. Tenslotte werden twee series proeven genomen, waarbij

de eerste serie telkens uitging van een bepaalde gelijkblijvende inwendige druk, waarna zoveel schedeldruk op de buis werd aangebracht tot breuk optrad, terwijl de tweede serie uitging van een bepaalde gelijkblijvende schedeldruk waarna dan breuk optrad door verhoging van de inwendige druk.

De treksterkte tengevolge van inwendige druk bij de buis 500 x 32 mm was gemiddeld 336 kgf/cm² bij 46 ato barstdruk. De gemiddelde wanddikte ter plaatse van de breuk was 34,6 mm. De gebruikte formule is de ketelformule (1).

De ringbuigtreksterkte tengevolge van schedelbreuk bij deze buis was gemiddeld 586 kgf/cm² bij een schedeldruklast volgens lijnbelasting van 14,81 t/m' en een gemiddelde wanddikte ter plaatse van de breuk van 36,0 mm.

De gebruikte formule is formule (2).

Voor de proeven met gecombineerde belastingen, waarbij telkens de inwendige druk constant bleef, heeft men proeven genomen bij een inwendige druk van 0,5, 5, 10, 15, 20, 25 en 30 ato en daarna de schedeldruk verhoogd tot breuk optrad. In een tweede serie proeven heeft men de schedeldruk telkens een vaste waarde gegeven, n.l. 2, 4, 6, 8, 13 en 16 t/m' buis en vervolgens de inwendige druk verhoogd tot breuk optrad.

Het resultaat van deze proeven is te zien in figuur 3, waarbij de invloed van de bij de proef gebruikte stoppen is geëlimineerd. De formule (3) van Schlick is in deze figuur ingetekend, nadat hij omgewerkt is in de vorm van spanningen, d.w.z.

$$\sigma_d = \sigma_s \cdot \sqrt{\frac{\sigma_b - \sigma_z}{\sigma_b}} \quad (4)$$

waarin

σ_d = ringbuigtrekspanning t.g.v. schedeldruk in kgf/cm² waarbij de buis breekt bij gelijktijdig optredende trekspanning σ_z .

σ_z = trekspanning t.g.v. inwendige druk in kgf/cm² waarbij de buis breekt bij gelijktijdig optredende ringbuigtrekspanning σ_d .

σ_s = ringbuigtreksterkte t.g.v. schedeldruk in kgf/cm² waarbij de buis breekt zonder inwendige druk.

σ_b = treksterkte t.g.v. inwendige druk in kgf/cm² waarbij de buis breekt zonder schedeldruk.

Wanneer wij $\sigma_s = 586$ kgf/cm² en $\sigma_b = 336$ kgf/cm² in formule (4) invullen ontstaat

$$\sigma_d = 586 \cdot \sqrt{\frac{336 - \sigma_z}{336}} \quad (5)$$

De vergelijking (5) is in afb. 3 grafisch uitgezet.

Theoretische benadering

Over de theoretische achtergronden van de experimenteel gevonden formules leert de aangehaalde literatuur [2, 3] ons niets.

Andere auteurs [6] gebruiken voor hun berekeningen de formule voor de maximale randtrekspanning.

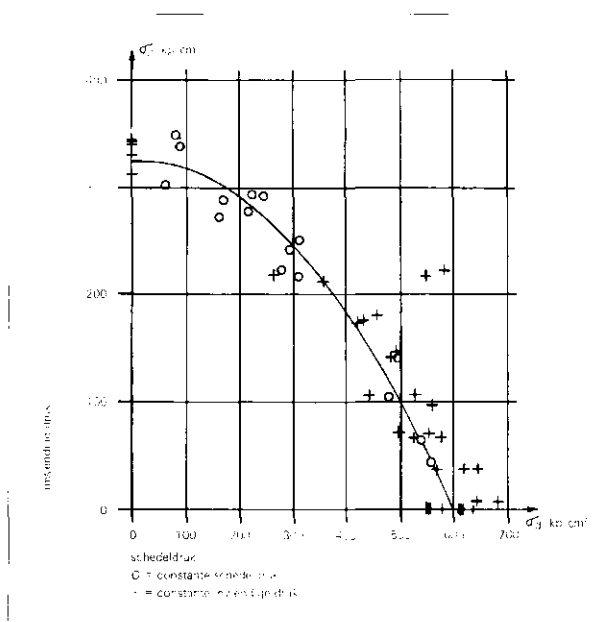
$$\sigma = \frac{N}{F} + \frac{M}{W} \quad (6)$$

waarin

N = trekkracht t.g.v. inwendige druk in kg

F = langsdoorsnede buis in cm²

M = buigend moment t.g.v. schedeldruk, vulling en eigen gewicht in kgcm



Afb. 3 - Beproeving asbestcementbuizen volgens Mosler en Oechsner.

$$W = \text{weerstandsmoment in cm}^3 = \frac{1}{6} e^2$$

e = wanddikte in cm

Deze formule superponeert de trekspanning t.g.v. inwendige druk met de buigtrek- of buigdrukspanning tengevolge van de schedeldruk. Zoals hierboven reeds is uiteengezet is superponeren van een werkelijke trekspanning en een theoretische spanning (de buigtrekspanning) onjuist. Dit valt direct op te maken uit de vraag naar de toelaatbare spanning in de buis, dit is de breukspanning gedeeld door de veiligheidsfactor. Zoals in afb. 3 is te zien kan breuk optreden bij 300 kgf/cm², n.l. bij zuivere inwendige druk zonder schedeldruk, maar ook bij 650 kgf/cm², n.l. bij zuivere schedeldruk zonder inwendige druk. Bij bepaling van de toelaatbare spanning — een essentieel onderdeel van de berekening van buisleidingen — komt men dus met formule (6) niet veel verder, wanneer men althans niet tevreden is met een zeer hoge veiligheidsfactor.

Bij de bepaling van de buigtrek- en buigdrukspanningen wordt bovendien uitgegaan van een rechtlijnig verlopen van de spanningsdiagram (afb. 4) met een neutrale lijn in het midden van de buiswand. Meer waarschijnlijk is het, dat respectievelijk de volgende spanningsstadia in de buiswand optreden [5]:

In afb. 5a is het elastische stadium getekend, waarin een verschil in elasticiteitsmodulus tussen asbestcement onder trek of onder druk tot uitdrukking is gebracht. Afb. 5b correspondeert met de situatie van haarscheurtjes vlak voor de breuk. Wanneer de belasting zeer langzaam en regelmatig op de buis is aangebracht zal de grenswaarde van de spanningen een beeld verkrijgen, zoals in af. 5c is getekend. Het in de berekening betrekken van de plasticiteit van asbestcement hangt mede af van de maximaal opneembare rek van dit materiaal die 10 à 20 keer zo groot is als die van beton.

De Russische onderzoekers Klejn en Kac, die deze gedachten in hun artikel ontwikkelen, werken formule (6) voor verschillende verhoudingen van de optredende schedeldruk en inwendige druk verder uit, waarbij ze

rekening houden met de verschillen in elasticiteitsmodulus in trek- en drukzone en het opschuiven van de neutrale lijn. Bovendien is er van uitgegaan dat de deformaties in de buiswand niet lineair, maar kromlijinig verlopen (afb. 5c). Het resultaat van hun theoretische onderzoeken [5] hebben zij vergeleken met een serie proeven op asbestcementbuizen met een inwendige diameter van 200 mm (afb. 6). Ook deze afb. vertoont een beeld, dat gelijk is op dat van de Amerikaanse en Duitse proeven. De lijn 1 geeft de theoretische waarden aan en de lijn 2 de lijn door de puntenwolk van de proeven. Klejn en Kac verklaren het verschil tussen beide lijnen vooral uit hun voorzichtige aanname van de verhoudingen tussen druk- en trekspanning in de doorsnede van de buiswand, die zij op 2 stellen, dus

$$\frac{\sigma_{\text{druk}}}{\sigma_{\text{trek}}} = 2$$

terwijl deze verhouding volgens andere Russische onderzoekers op 2,8 gesteld zou moeten worden.

Ongetwijfeld zullen de theoretische beschouwingen over de draagkracht van asbestcementbuizen, zeker in het licht van deze plasticiteitstheorie, in de komende jaren nog grote aandacht vragen. Op dit moment lijken de berekeningsmethoden, die gebaseerd zijn op experimenten, voorlopig nog echter de meest veilige weg om asbestcementbuizen te berekenen, vooral ook omdat de proeven een duidelijke lijn in deze methode brengen (afb. 3 en 6).

Veiligheidsfactoren

Aan de hand van de experimenteel gevonden formule (3), die wij met andere symbolen als volgt weergeven:

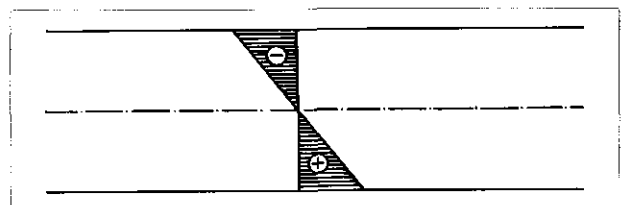
$$A_b - A = A_b \cdot \left(\frac{P}{P_s} \right)^2 \quad \text{of:}$$

$$A = A_b \cdot \left(1 - \frac{P^2}{P_s^2} \right) \quad \text{of:} \quad (7)$$

$$P = P_s \cdot \sqrt{1 - \frac{A}{A_b}} \quad (8)$$

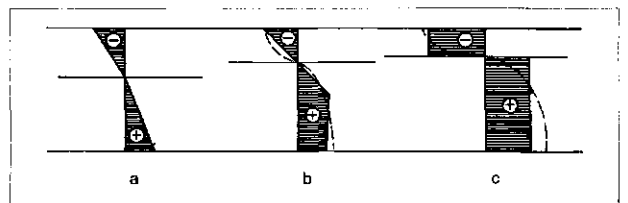
waarin

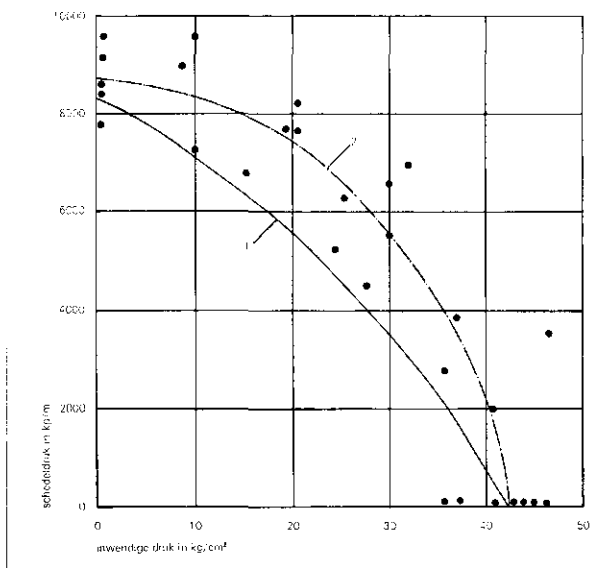
A_b = inwendige druk in kgf/cm² (atm), waarbij de buis breekt zonder schedeldruk



Afb. 4 - Spanningsdiagram volgens elasticiteitstheorie.

Afb. 5 - Spanningsdiagrammen volgens plasticiteitstheorie.





Afb. 6 - Beproeving asbestcementbuizen volgens Klejn en Kac.

A = inwendige druk in kgf/cm^2 (atm), waarbij de buis breekt bij gelijktijdig optredende schedeldruk P .

P_s = schedeldruk in $\text{t/m}'$ waarbij de buis breekt zonder inwendige druk.

P = schedeldruk in $\text{t/m}'$ waarbij de buis breekt bij gelijktijdig optredende inwendige druk A .

Uit formule (7) valt op te maken dat

$\left(1 - \frac{P^2}{P_s^2}\right)$ een factor is, waarmee de barstdruk A_b vermenigvuldigd moet worden om de inwendige druk A te vinden, waarbij de buis breekt onder gecombineerde belasting.

Wij stellen dan $\left(1 - \frac{P^2}{P_s^2}\right) = \eta_z =$ factor kleiner dan 1, die de invloed aangeeft, die de schedeldruk bij gecombineerde belasting uitoefent op de barstdruksterkte.

Op dezelfde wijze is uit formule (8) op te maken, dat

$\sqrt{1 - \frac{A}{A_b}} = \eta_d$ een factor kleiner dan 1 is, die de invloed aangeeft, die de inwendige druk bij gecombineerde belasting uitoefent op de schedeldruksterkte.

De formules (7) en (8) zijn dus nu geworden:

$$A = \eta_z \cdot A_b$$

$$P = \eta_d \cdot P_s$$

De veiligheidsfactoren t.o.v. de inwendige druk en de schedeldruk worden als volgt gedefinieerd:

$$v_z = \eta_z \cdot \frac{A_b}{A} \quad (9)$$

$$v_d = \eta_d \cdot \frac{P_s}{P} \quad (10)$$

v_d = veiligheidsfactor tegen breuk door schedeldruk bij gelijktijdig optredende gelijkblijvende inwendige druk A .

v_z = veiligheidsfactor tegen breuk door barstdruk bij gelijktijdig optredende gelijkblijvende schedeldruk P .

Bij de vaststelling van deze veiligheidsfactoren is aangenomen, dat niet tegelijkertijd door de buis een veelvoud van de schedeldruk en een veelvoud van de inwendige druk moet kunnen worden opgenomen.

In het begin van dit artikel zijn de nu van kracht zijnde veiligheidsfactoren genoemd, zoals deze voor de barstdruk gelden, wanneer de proef volgens Keuringseisen nr. 17 van het KIWA (zonder tegelijkertijd optredende schedeldruk) wordt uitgevoerd.

Het spreekt vanzelf dat de berekening volgens gecombineerde belasting minder onbekenden omvat, zodat de veiligheidsfactoren kunnen worden verlaagd, b.v.:

Voor de diameter tot 200 mm $v_d = 2,5$ en $v_z = 3,0$

Voor de diameter 250 tot 500 mm $v_d = 2,5$ en $v_z = 2,5$

Voor de diameters vanaf 600 mm $v_d = 2$ en $v_z = 2$

De vergelijkingen (9) en (10) kunnen nu als volgt worden geschreven.

$$A = \frac{A_b}{v_z} \cdot \left(1 - \frac{P^2}{P_s^2}\right) \quad (11)$$

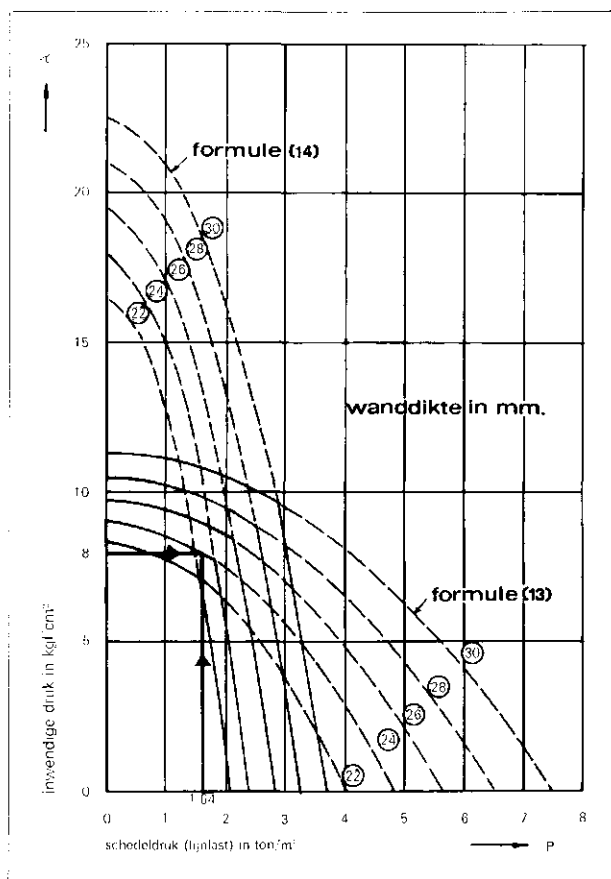
en

$$P = \frac{P_s}{v_d} \cdot \sqrt{1 - \frac{A}{A_b}} \quad (12)$$

De vergelijkingen (11) en (12) kunnen grafisch worden uitgezet voor elke buis voor elke wanddikte. Men krijgt dan een verloop als getekend in afb. 7, wanneer men naast de veiligheidsfactoren v_z en v_d ook de barstdruk A_b en schedeldruk P_s heeft aangenomen.

De afb. is gebaseerd op buizen met een inwendige diameter van 600 mm. In dit voorbeeld wordt gerekend

Afb. 7 - Bepaling van wanddikte van asbestcementbuizen ϕ 600 mm.



met een σ_b van minimaal 225 kg/cm² en een σ_s van minimaal 500 kg/cm².

v_d en v_z stellen wij op 2.

De vergelijking (11) wordt dan, gecombineerd met (1) en (2) als volgt:

$$A = \frac{\sigma_b \cdot 2 \cdot e}{v_z \cdot d} \cdot \left(1 - \frac{P^2}{\left(\frac{\sigma_s \cdot g \cdot e^2}{0,955 (d + e)} \right)^2} \right)$$

of

$$A = \frac{225 \times 2 \times e}{2 \times 60} \cdot \left(1 - \frac{P^2}{\left(\frac{500 \times 100 \times e^2}{0,955 (60 + e)} \right)^2} \right)$$

of

$$A = 3,75 e - 1,5 P^2 \cdot \frac{(57,3 + 0,955 e)^2}{10^9 \times e^3} \quad (13)$$

Vergelijking (12) wordt

$$P = \frac{\sigma_s \cdot g \cdot e^2}{0,955 (d + e) \cdot v_d} \cdot \sqrt{1 - \frac{A \cdot d}{\sigma_b \cdot 2e}}$$

of

$$P = \frac{500 \times 100 \times e^2}{0,955 (60 + e) \times 2} \cdot \sqrt{1 - \frac{A \times 60}{225 \times 2e}}$$

of

$$A = 7,5e - 12 P^2 \cdot \frac{(57,3 + 0,955 e)^2}{10^9 \times e^3} \quad (14)$$

Voor verschillende wanddikten e zijn de vergelijkingen (13) en (14) uitgewerkt en grafisch uitgezet in afb. 7. Voor een bepaalde inwendige werkdruk A en schedeldruk P kan vervolgens op zeer eenvoudige wijze de bijbehorende wanddikte worden gevonden.

Men moet dan binnen het gebied zowel (13) als (14) blijven, dus aflezen op de getrokken lijnen.

In de afb. is als voorbeeld een inwendige werkdruk van 8 kgf/cm² en een schedeldruk van 1,64 t/m' gegeven. De wanddikte e is dus 24 mm.

Op deze wijze is het dus mogelijk voor elke diameter asbestcementbuis een grafiek te maken, waarin de betrokken fabriek de door hem gegarandeerde barstdruksterkte en schedeldruksterkte invult tesamen met de in normen vastgestelde veiligheidsfactoren voor gecombineerde belastingen.

Wenst men andere veiligheidscoëfficiënten en kan men hogere mechanische beproevingsresultaten garanderen, dan kunnen weer een serie nieuwe grafieken worden opgesteld.

Voorbeeld

Wanneer wij een buisleiding met een inwendige diameter van 600 mm nodig hebben met een inwendige waterdruk van 8 ato, die tevens 2 m onder een weg ligt met verkeersbelasting 45 der VOSB, wat moet dan de wanddikte van de buis zijn?

De te garanderen barstdruksterkte is 225 kgf/cm².

De te garanderen schedeldruksterkte is 500 kgf/cm².

De veiligheidscoëfficiënt tegen barstdruk bij gecombineerde belasting is 2, evenals die tegen schedeldruk.

Wanneer de leiding in een sleuf in zandgrond ligt dan vinden wij volgens de theorie van Wetzorke [7]

$$P_g = m \cdot \frac{D}{B} \cdot A \cdot \gamma \cdot B \cdot t$$

waarin

P_g = gronddruk op de buis in t/m'.

m = flexibiliteitsfactor.

D = uitwendige diameter van de buis in m.

B = breedte van de sleuf ter hoogte van de kruin van de buis in m.

γ = soortelijk gewicht van de grond.

A = verminderingsfactor van Wetzorke.

t = dekking boven de kruin van de buis in m.

Volgens de theorie van Wetzorke, waar wij hier nu niet verder op in zullen gaan, is

$$P_g = 0,82 \times \frac{0,624}{1,45} \times 0,69 \times 1,7 \times 1,45 \times 2 = 1,2 \text{ t/m'}$$

De verkeersbelasting op de buis wordt volgens de theorie van Boussinesq [7] berekend:

$$P_v = p_v \cdot D \cdot s$$

waarin

P_v = belasting op de buis t.g.v. verkeer in t/m'.

p_v = druk per m² in t/m².

D = uitwendige diameter van de buis in m.

S = stootcoëfficiënt $1 + \frac{0,3}{t}$

t = dekking boven de kruin van de buis in m.

De uitkomst is

$$P_v = 2,2 \times 0,624 \times 1,15 = 1,58 \text{ t/m'}$$

De totale belasting op de buis is:

$$P_g + P_v = 1,2 + 1,58 = 2,78 \text{ t/m'}$$

Deze belasting van 2,78 t/m' komt in de sleuf op de buis te dragen. Zoals gebruikelijk bij asbestcementbuizen wordt de schedeldruk altijd bepaald volgens een beproeving tussen twee platte vlakken, dus volgens twee lijnlasten.

Voor de beddingsfactor k , die de verhouding aangeeft tussen de breukbelasting in de sleuf en de breukbelasting volgens twee lijnlasten, houden wij 1,7 aan, waarmee wij aan de veilige kant zijn.

$$P = \frac{P_g + P_v}{k} = \frac{2,78}{1,7} = 1,64 \text{ t/m'}$$

P is hier dus de normaliter maximaal aanwezige schedeldruk, omgerekend naar een belasting volgens twee lijnlasten.

De inwendige waterdruk A is volgens het gegeven 8 ato. Wanneer wij A en P uitzetten in grafiek 7 vinden wij een wanddikte van 24 mm.

Volgens de formules (9) en (10) kunnen wij vervolgens nog controleren of de gewenste veiligheidsfactoren zijn gehaald.

$$A_b = \frac{\sigma_b \cdot 2e}{d} = \frac{225 \times 2 \times 2,4}{60} = 18 \text{ ato}$$

$$P_s = \frac{\sigma_s \cdot g \cdot e^2}{0,955 (d + e)} = \frac{500 \times 100 \times 2,4^2}{0,955 \times 62,4} = 4,8 \text{ t/m'}$$

$$\eta_z = 1 - \frac{P^2}{P_s^2} = 1 - \frac{1,64^2}{4,8^2} = 0,88$$

$$\eta_d = \sqrt{1 - \frac{A}{A_b}} = \sqrt{1 - \frac{8}{18}} = 0,74$$

$$v_z = \eta_z \cdot \frac{A_b}{A} = 0,88 \times \frac{18}{8} = 2,0$$

$$v_d = \eta_d \cdot \frac{P_s}{P} = 0,74 \times \frac{4,8}{1,64} = 2,15$$

Dit betekent dus, dat de veiligheidsfactor tegen inwendige druk bij gelijktijdig optredende normale schedeldruk

2,0 bedraagt (de eis was ≥ 2), terwijl de veiligheidsfactor tegen schedeldruk bij tegelijkertijd optredende normale inwendige druk 2,15 bedraagt (de eis was ≥ 2), zodat de gevonden wanddikte voldoet.

Samenvatting

De destijds door Schlick voor gietijzeren buizen gevonden afhankelijkheid van de in de praktijk optredende inwendige waterdruk en uitwendige schedeldruk blijkt volgens recente onderzoeken ook voor asbestcementbuizen te gelden.

Dit betekent, dat beter dan voorheen de breukfase van de buizen kan worden bepaald, waardoor ook de veiligheidscoëfficiënt veel nauwkeuriger kan worden uitgerekend.

Omdat ook de kwaliteit van het materiaal sinds het voorstel van de Studie Commissie Asbestcement Buizen van 1948 aanzienlijk is verbeterd is het gevolg, dat de wanddikten meestal kunnen worden verlaagd, vooral in die gevallen, waarbij persleidingen worden toegepast met geringe uitwendige belastingen. Voor persleidingen echter met grote bovenbelastingen geeft de hierboven omschreven berekeningswijze een veel betere bepaling van de wanddikte dan de simpele toepassing van de ketelformule met een relatief hoge veiligheidscoëfficiënt. In sommige

gevallen zal de berekeningswijze dan ook tot een verzwaring van de wanddikte leiden. In alle gevallen leidt de methode echter tot een meer verantwoord materiaalgebruik.

Literatuur

1. ISO-Recommendation R-160 Asbestos Cement Pressure Pipes, juni 1960.
2. Keuringseisen nr. 17. *Waterleidingbuizen en hulpstukken van asbestcement*, januari 1959.
3. Schlick, W. J., *Supporting Strengths of Cast-Iron Pipe for Water and Gas Service*. Bulletin 146. Iowa State College, Ames Iowa, 1940.
4. Mosler, Josef en Oechsner, Peter, *Asbestzement-Druckrohre, Ihr Verhalten bei gleichzeitiger Wirkung von inneren und äusseren Belastungen*. Rohre-Rohrleitungsbau-Rohrleitungstransport-Heft 5, oktober 1967.
5. Klejn, G. K. en Kac, L. A., *Berekening van asbestcementbuizen onder gelijktijdige werking van inwendige druk en uitwendige belastingen*. Trudy NIIA asbesto cementa, 1964 nr. 18 pag. 28-40. Strojizdat, Moskou.
6. Hünerberg, K., *Das Asbestzement Druckrohr*, 1963 Berlijn.
7. Rioolbuizen, *hydraulische eigenschappen en berekening van gronddrukken en verkeersbelastingen*, uitgave Eternit Amsterdam 1968.