

Vermoeïngseigenschappen van ongeplasteerd PVC, in relatie tot de praktijkomstandigheden in waterleidingbuizen

Intro

Bij het gebruik van metalen als constructie-materiaal wordt de toelaatbare spanning bij statische belasting bepaald door de rekgrens bij lage temperatuur en door de kruipgrens bij hoge temperatuur.

Zodra de belasting niet konstant blijft, maar voortdurend verandert (niet statisch maar dynamisch), treden er andere verschijnselen op, die men onder de naam 'vermoeïing' samenvat. De ervaring heeft geleerd, dat bij schommelende belastingen reeds breuken kunnen ontstaan bij span-



IR. J. J. STAPEL
Research-medewerker
Wavin Ontwikkeling B.V.
Hardenberg

ningen, die ver onder de rekgrens en/of kruipgrens liggen.

Ongeplasteerd PVC wordt tot nu toe nog weinig gebruikt als 'echt' constructie-materiaal. Het gebruik voor drukbuizen, bijv. voor het transport van drinkwater, is in feite één van de weinige toepassingen van PVC als constructie-materiaal. De toelaatbare spanning wordt daarbij bepaald door de lange-duursterkte, waarbij ervan uitgegaan wordt, dat de belastingtoestand statisch zou zijn.

Aangezien dit in de praktijk niet het geval

is, is enerzijds nagegaan, welke belasting-toestand in de praktijk optreedt; anderzijds is literatuur bestudeerd, aangaande de vermoeïngseigenschappen van PVC, in het bijzonder ongeplasteerd PVC-buizen.

1. Inleiding

De toepassing van PVC-buizen voor het transport van drinkwater heeft de laatste jaren een grote vlucht genomen. De voordelen van PVC boven bijv. gietijzer en asbest-cement mogen bekend worden verondersteld.

De voor drukbuizen maatgevende tangentiële wandspanning kan worden berekend met de formule van Barlow (ketelformule).

$$\sigma = \frac{p(d_e - e)}{2e}$$

waarbij:

- σ = tangentiële wandspanning
- p = werkdruk
- d_e = buitendiameter
- e = wanddikte

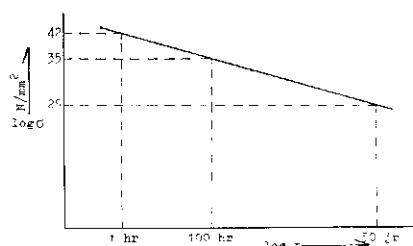
De maximaal toelaatbare wandspanning in een drinkwaterleiding is bij PVC-buizen middels een 'veiligheidsfactor' gerelateerd aan de statische lange-duursterkte (zgn. 50 jaar-sterkte). Deze lange-duursterkte wordt door middel van extrapolatie bepaald uit gegevens van korte-duursterktes (zie afb. 1). De genoemde waarden in deze afbeelding zijn minimale normwaarden bij 20 °C. De juistheid van deze extrapolatie kan gecontroleerd worden met proeven bij verhoogde temperatuur (60 °C).

Voor de 50 jaar-sterkte van ongeplasteerd-PVC wordt algemeen een minimale waarde van 25 N/mm² aangenomen.

Dit wil zeggen, bij een statische spanning van 25 N/mm² mag binnen 50 jaar geen breuk optreden.

Bij een in Nederland voor PVC-buizen geldende veiligheidsfactor 2 wordt dan de toelaatbare wandspanning 12,5 N/mm² (althans voor buizen met een buitendiameter vanaf 63 mm [1]).

Afb. 1 - Extrapolatie curve ongeplasteerd-PVC.



In werkelijkheid heerst in een waterleiding-net niet uitsluitend statische belasting, immers deels door het verbruik, deels door manipulatie met pompen en afsluiters, treden drukschommelingen op. De vraag rijst, in hoeverre deze schommelingen aanleiding kunnen zijn voor het verschijnsel vermoeïing. Door Gotham en Hitch [2] wordt in dit verband zelfs aanbevolen om in gevallen van hoge frequenties en amplitudes van de drukschommelingen de ontwerp-spanning voor PVC te verlagen tot 6 N/mm².

Bij het zoeken naar een antwoord of een dergelijke aanbeveling noodzakelijk is bij toepassing van PVC als buis-materiaal voor het transport van drinkwater, is het nodig meer te weten omtrent de praktijkomstandigheden in waterleidingnetten en tevens kennis te hebben van de vermoeïngseigenschappen van PVC, in het bijzonder PVC-buizen.

2. Praktijkomstandigheden

2.1. Inleiding

Het is bij waterleidingbedrijven gebruikelijk, dat het drukverloop op diverse plaatsen in het waterleidingnet wordt geregistreerd. Uit deze registratie blijkt duidelijk, dat de druk continu varieert. Deze drukvariëaties vallen uiteen in twee groepen:

— drukvariëaties, veroorzaakt door een wijziging in de totale behoefte aan water. Bij toenemend gebruik zal de druk aanvankelijk geleidelijk dalen, waarna bij een bepaalde druk of gebruik, middels pompen de druk kan worden verhoogd enz. en omgekeerd (gewilde drukvariëaties).

— drukvariëaties, veroorzaakt door manipulatie met bepaalde werktuigen, zoals pompen, afsluiters, kranen enz. Deze drukvariëaties of beter drukstoten kan men samenbrengen onder het verschijnsel 'waterslag' (ongewilde drukvariëaties).

De eerste groep drukvariëaties is in principe onafhankelijk van het gekozen buis-materiaal. De grootte van de drukschommelingen zal meestal door het ontwerp van het waterleidingnet zijn vastgelegd, terwijl de frequentie beïnvloed wordt door het waterverbruik.

De tweede groep drukvariëaties, direct veroorzaakt door snelheidsveranderingen van het doorstromende water, is wel afhankelijk van het buis-materiaal of liever van de elasticiteitsmodulus van het buis-materiaal.

Op de invloed van de elasticiteitsmodulus wordt hierna verder ingegaan, terwijl tenslotte een overzicht wordt gegeven van metingen, verricht met behulp van drukregistraties.

Symbolenlijst

c	voortplantingssnelheid	
	drukgolven in een leiding	m/s
d_e	buitendiameter leiding	mm
E	elasticiteitsmodulus leidingmateriaal	N/mm ²
e	wanddikte	mm
g	gravitatieconstante	m/s ²
ΔH	verandering drukhoogte, ten gevolge van waterslag	m
K	kompressiemodulus vloeistof	N/mm ²
L	lengte leiding	m
N	aantal cycli tot breuk	—
p	werkdruk	N/mm ²
td	cyklustijd	s
Ts	statische breuktijd	s
ts	sluittingstijd	s
v	stroomsnelheid doorstromend medium	m/s
μ	looptijd drukgolven	s
ρ	dichtheid vloeistof	kg/m ³
σ	tangentiële wandspanning	N/mm ²
σ_{max}	maximale spanning	N/mm ²
σ_{min}	minimale spanning	N/mm ²
σ_a	amplitude = $(\sigma_{max} - \sigma_{min})/2$	N/mm ²
σ_m	gemiddelde spanning = $(\sigma_{max} + \sigma_{min})/2$	N/mm ²
σ_{a_0}	amplitude bij $\sigma_m = 0$ N/mm ²	N/mm ²
σ_{br}	statische breuksterkte	N/mm ²

2.2. Theoretische achtergronden van drukstoten

Bij een rechte leiding met verwaarloosbaar wrijvingsverlies kan de drukvariatie op een bepaalde plaats, ten gevolge van een snelheidsverandering van het doorstromende medium, berekend worden met de door Joukowsky [3] afgeleide relatie:

$$\Delta H = \frac{c}{g} \cdot \Delta V$$

waarbij:

c = voortplantingssnelheid van drukgolven (m/s)

ΔV = snelheidsverandering (m/s)

g = gravitatieconstante (m/s²)

De relatie van Joukowsky geldt alleen, indien de snelheidsveranderingen plaatsvinden binnen een tijd:

$$\mu = \frac{2L}{c}$$

waarbij L de afstand is tussen het bepaalde punt en de dichtstbijzijnde diskontinuiteit. De voortplantingssnelheid van drukgolven in een met vloeistof gevulde buis wordt gegeven door:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\rho \left\{ \frac{1}{K} + \frac{1}{E} \left(\frac{d_e}{e} - 2 \right) \right\}}}$$

waarbij:

ρ = dichtheid vloeistof

K = kompressiemodulus van de vloeistof

d_e = uitwendige diameter buis

e = wanddikte buis

E = elasticiteitsmodulus van het buismateriaal

Rekening houdend met de d_e/e -verhoudingen, resp. elasticiteitsmoduli van de drie 'gebruikelijke' buismaterialen kunnen wij de voortplantingssnelheden van de drukgolven globaal berekenen:

PVC	300 m/s
gietijzer	1200 m/s
asbest-cement	900 m/s

Uit de vergelijking van de voortplantingssnelheid van drukgolven in drukleidingen bij de verschillende leiding-materialen blijkt, dat bij PVC deze aanmerkelijk lager ligt dan bij de andere materialen. Hieruit kan men konkluderen, dat de amplitudes van drukgolven in PVC-buizen aanmerkelijk lager zijn. Men dient echter te bedenken, dat men de relatie van Joukowsky slechts mag gebruiken bij snelheidsveranderingen, welke plaatsvinden binnen een tijd:

$$\mu = \frac{2L}{c}$$

Een lagere voortplantingssnelheid heeft een grotere μ tot gevolg, hetgeen volgens Kranenburg [4] voor relatief langzaam verloopende verschijnselen (bijv. bij korte leidingstukken) zelfs nadelig zou zijn. Er kan echter worden aangetoond [5], dat voor relatief langzaam en lineair verloopende verschijnselen de drukschommelingen door snelheidsverandering van het doorstromend medium onafhankelijk zijn van het leidingmateriaal. Bij het lineair aanbrengen van een snelheidsverandering, welke in een tijd t_s plaatsvindt, kan men aantonen, dat indien $\mu \leq t_s$ geldt:

$$\Delta H = \frac{\mu}{t_s} \cdot \frac{c \Delta V}{g} \text{ of wel}$$

$$\Delta H = \frac{2L}{t_s g} \cdot \Delta V$$

Deze relatie blijkt onafhankelijk van de voortplantingssnelheden van drukgolven. Bij niet-lineaire snelheidsveranderingen blijken bij lagere voortplantingssnelheden altijd kleinere drukstoten te ontstaan.

In de praktijk zullen grote drukschommelingen door snelheidsveranderingen van doorstromend water ontoelaatbaar zijn. Door middel van een aantal hulpmiddelen kunnen de Joukowsky-stoten worden verminderd.

Voorbeelden van deze hulpmiddelen zijn:

- windketels;
- buffertorens;
- geprogrammeerd sluiten van afsluiters;
- terugslagkleppen;
- geprogrammeerd schakelen van pompen; enz.

Berekeningen aan een praktijknet kunnen hierdoor niet meer eenvoudig worden uitgevoerd. Slechts met behulp van uitgebreide rekenmethodes kunnen uitspraken worden gedaan [6].

Door Menges en Roberg [7] zijn laboratoriumbeproevingen uitgevoerd om na te gaan of de relatie van Joukowsky toepasbaar is voor PVC-buizen. De metingen werden verricht aan buizen met een lengte van ca. 8 meter. Uit de resultaten blijkt een grote overeenkomst tussen de gemeten en berekende waarden. Hucks [8, 9 en 10] verwijst naar een onderzoek, verricht door de Utah State University. Bij dit onderzoek werden eveneens goede overeenstemmingen gevonden met laboratoriumbeproevingen.

Beproevingen, die uitgevoerd zijn aan ingeblazen buis (grondsoort en dergelijke niet bekend), toonden drukvariaties, welke 7% hoger lagen. Oorzaak hiervan zou zijn de, als het ware, hogere elasticiteitsmodulus van het buis-

materiaal, doordat de buis bij het uitzetten hinder zou ondervinden van zijn omgeving. Tot slot volgt een onderlinge vergelijking van de diverse drukklassen PVC-buizen. Gebaseerd op de geldigheid van de relatie van Joukowsky en de volgende waarden van de parameters:

$$\begin{aligned} \rho &= 10^3 && \text{kg/m}^3 \\ E &= 3 \times 10^9 && \text{N/m}^2 \\ K &= 2 \times 10^9 && \text{N/m}^2 \\ \Delta V &= 1 && \text{m/s} \end{aligned}$$

zijn achtereenvolgens berekend:

- voortplantingssnelheid;
- drukvariatie;
- verandering tangentiële wandspanning.

drukklasse bar	d_e/e	c m/s	ΔH bar	$\Delta \sigma$ N/mm ²
10	26	340	3,4	4,2
7,5	34 ^{1/3}	300	2,9	4,9
6,3	41	270	2,7	5,3
5	51	240	2,4	6,0

De drukklasse is gebaseerd op een toelaatbare tangentiële wandspanning van 12,5 N/mm².

2.3. Metingen

Getallen voor het aantal en de grootte van optredende drukvariaties in alle waterleidingbuizen zijn uiteraard onmogelijk te geven. Een indruk zou men kunnen verkrijgen door eerder genoemde drukregistratie te gebruiken.

Men zou bijvoorbeeld alle drukvariaties boven een bepaalde minimumwaarde kunnen opmeten en tellen. Met behulp van deze gegevens kan men dan een ruwe schatting maken van de praktijkomstandigheden in het waterleidingnet, waarvan men de drukregistratie heeft gebruikt. Aangezien er grote verschillen bestaan tussen de diverse leidingnetten, zal men telkens andere schattingen van de praktijkomstandigheden vinden. Een gevonden schatting, gebaseerd op de drukregistratie in één der waterleidingnetten zal men niet zonder meer als algemeen geldend mogen aannemen, doch mede gebaseerd op de ervaringen bij waterleidingbedrijven, kan men wel een globale indruk verkrijgen. Onder andere werd gebruik gemaakt van de drukregistratie van het waterleidingnet in het gebied rondom 't Harde-Elburg (Waterleiding Maatschappij Gelderland). Dit waterleidingnet bestaat voornamelijk uit PVC-buizen met een d_e/e -verhouding 34. Opgemeten werden alle drukvariaties met een minimale amplitude van 1 N/mm² (tangentiële wandspanning). De amplitude was daarbij gedefinieerd als de helft van het verschil tussen minimale en maximale spanning, zodat een amplitude van

1 N/mm² overeenkwam met een totale drukverandering van 1,2 bar.

In een periode van één week bleek het aantal drukvariaties boven het gestelde minimum 17 te bedragen, waarbij de grootste amplitude 2,3 N/mm² bedroeg.

Het maximum op 1 dag bleek 4 drukvariaties te zijn. Bij twee waterleidingnetten in Overijssel werden vrijwel overeenkomstige resultaten gevonden.

Aangezien er ongetwijfeld waterleidingnetten zullen bestaan, waarbij het aantal variaties hoger zal zijn dan de gevonden waarden, dienen wij met dit hogere aantal rekening te houden. Mede op grond van ervaringen van enkele waterleidingbedrijven zouden wij kunnen stellen, dat het aantal drukvariaties, waarbij de amplitude boven een waarde van 1 N/mm² komt, behoudens extreme uitzonderingsgevallen, beneden 50 per dag zal liggen. Gebaseerd op een levensduur van 50 jaar komt men dan op globaal 10⁶ wisselingen.

Naast het vastleggen van het maximaal te verwachten aantal schommelingen dient de maximaal te verwachten grootte van de amplitude bepaald te worden.

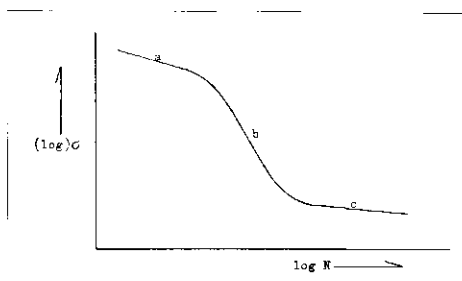
Bij de metingen werd een maximum waarde van ca. 2,5 N/mm² gevonden. Veel hogere waarden zal men in de praktijk waarschijnlijk niet aantreffen, daar de kans dan groot is, dat men beneden de atmosferische druk komt, hetgeen in het algemeen vermeden zal worden. Door het aanbrengen van reeds eerder genoemde hulpmiddelen zullen extreme waarden van de amplitude niet kunnen optreden.

Resumerend kunnen als praktijkomstandigheden worden gesteld:

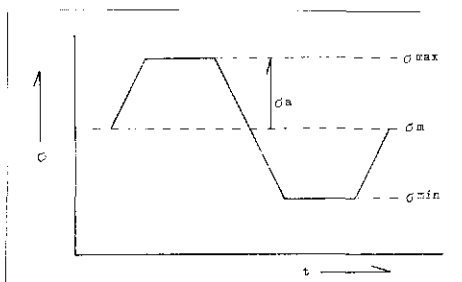
In een waterleidingnet zal het aantal drukvariaties, waarvan de amplitude meer dan 1 N/mm² (tangentiële wandspanning) bedraagt, beneden 10⁶ in 50 jaar zijn, terwijl de amplitude niet groter dan (maximaal geschat) 3 N/mm² zal bedragen. Opgemerkt zou kunnen worden, dat het bovenstaande zeker zal gelden voor transportleidingen, doch dat bij de dienstleidingen c.q. huisaansluitingen hogere waarden kunnen voorkomen, doordat naast de invloed van in- en uitschakelen van pompen het openen en sluiten van kranen een rol gaat spelen.

Door de hogere watersnelheden zou men grotere drukstoten kunnen verwachten. Hier kan tegenin gebracht worden, dat:

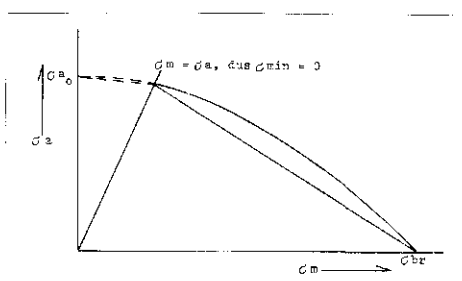
- door de kortere leidingen de relatie van Joukowsky meestal niet geldt (de drukstoten zijn dan lager);
- de kleinere buismaten niet gebaseerd zijn op een toelaatbare wandspanning van 12,5 N/mm², maar slechts op 10 N/mm²;
- over het algemeen bij de huisaansluitin-



Afb. 2 - Wöhlercurve (schematisch).



Afb. 3 - Definities drukschommelingen.



Afb. 4 - Goodmandiagram (schematisch).

gen een hogere drukklasse gebruikt wordt (10, ook wel 16 bar).

3. Vermoeïngseigenschappen ongeplasteerd PVC-buizen

3.1. Inleiding

Vermoeïngseigenschappen van materialen worden veelal weergegeven in zogeheten Wöhlerkurven. Een dergelijke curve geeft het verband tussen de aangelegde wisselende spanning en het aantal wisselingen tot breuk. Vrijwel altijd wordt daarbij het aantal wisselingen op logaritmische schaal uitgezet, terwijl het uitzetten van de spanning zowel lineair als logaritmisch gebeurt. Een Wöhlercurve voor kruipgevoelige materialen kan in het algemeen verdeeld worden in drie gebieden (zie afb. 2). Het gedeelte a (bij hoge spanningen) beschrijft de interactie tussen kruip en vermoeïng. Dit gedeelte is sterk afhankelijk van de opgelegde frequentie, met dien verstande, dat bij lagere frequentie het aantal wisselingen tot breuk kleiner wordt. Het gedeelte b toont een veel sterkere helling dan het gedeelte a; kruip wordt in dit gedeelte bij afnemende spanning steeds

minder van invloed. De invloed van de frequentie wordt bij lagere spanningen steeds geringer.

Het gedeelte c, in Engelse literatuur vaak 'endurance limit' genoemd, is:

— of horizontaal, dat wil zeggen bij verlaging van de spanning tot onder de 'endurance limit' kan een oneindig aantal wisselingen worden weerstaan;

— of het gedeelte heeft een dermate flauwe helling, dat het aantal wisselingen tot breuk sterk stijgt bij een kleine afname van de spanning.

Vooruitlopend op hetgeen hierna bij de invloed van de frequentie wordt behandeld, kan men aannemen, dat het gedeelte c praktisch onafhankelijk van de frequentie zal zijn.

De overgang van het gedeelte a naar b zal globaal liggen bij

$$N = \frac{T_s}{t_d}$$

waarbij T_s de zogenaamde statische breuk-tijd en t_d het belaste tijdsgedeelte van een cyclus voorstelt.

De overgang van b naar c ligt voor de meeste materialen tussen 10⁵ en 2.10⁶ wisselingen.

Teneinde verschillende onderzoeken met elkaar te kunnen vergelijken, zal men gelijke definities dienen te gebruiken.

De minste problemen zullen liggen bij de definitie van één wisseling, namelijk:

de periode, waarbij het materiaal éénmaal belast en éénmaal ontlast zal worden.

Bij de spanning ligt het anders. In de literatuur wordt vaak uitgezet de maximale spanning, vooral als de minimale spanning nul, of algemener, konstant bedraagt (sprongbelasting). Bij onderzoeken, waarbij men de spanning heeft gevarieerd, doch

steeds een gelijke gemiddelde spanning heeft aangehouden, wordt vaak de amplitude (heeft tussen minimale en maximale spanning) uitgezet tegen het aantal wisselingen tot breuk (wisselbelasting).

Gaan we uit van deze laatste definitie (weergegeven in afb. 3), dan kunnen wij verschillende onderzoeken onderling vergelijken in een zogeheten Goodman-diagram. Een Goodman-diagram geeft bij een bepaald aantal wisselingen het verband weer tussen de aangelegde gemiddelde spanning en amplitude, waarbij bij dat bepaald aantal wisselingen breuk optreedt. Een schatting van een Goodman-diagram (zie afb. 4) kan men maken door het verbinden van de volgende punten:

- σ_a bij $\sigma_m = 0$ (zuivere wisselbelasting);
- σ_a bij $\sigma_m = \sigma_a$ (zuivere sprongbelasting);
- σ_{br} , gedefinieerd als de statische breuksterkte, of wel σ_m bij $\sigma_a = 0$.

Veelal is bij metalen gebleken, dat een dergelijke schatting aan de veilige kant is. Een betere schatting bleek mogelijk door het verband te beschrijven met een parabolische functie, ook wel Gerber-functie genoemd:

$$\sigma_a = \sigma_{ao} \left\{ 1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{br}} \right)^2 \right\}$$

σ_{ao} is hierbij de amplitude bij een zuivere wisselbelasting. Diverse onderzoeken aan PVC-buizen zijn op deze manier met elkaar vergeleken. Bij deze onderzoeken werden meestal handelsbuizen beproefd. Een poging om resultaten aan proefstaven onderling te vergelijken leverde minder bruikbare resultaten op door de veel grotere spreiding. Meestal gebruikte men dan monsters, welke speciaal voor een onderzoek waren vervaardigd, waardoor grote verschillen kunnen ontstaan.

3.2. *Vergelijking diverse onderzoeken*

Onderling zijn vergeleken de onderzoeken van: Hucks [8, 9 en 10], Crombrugge [11], Kirstein [12], Gonze en Rodeyns [13] en Onishi e.a. [14].

Verder zijn vermoeiingsonderzoeken aan PVC-buizen bekend van Kruppa [15] en Vlasov [16], doch om redenen, welke later genoemd zullen worden, zijn deze onderzoeken bij de vergelijking buiten beschouwing gebleven.

Van de eerstgenoemde vijf onderzoeken zijn bij 10⁴, 10⁵, 10⁶ en 10⁷ wisselingen de gemiddelde spanning en amplitude bepaald. Deze waarnemingen zijn bijeengebracht in Goodman-diagrammen. Door deze punten is een lijn getrokken, welke voldoet aan de Gerber-functie en de punten zo dicht mogelijk benadert.

In de vergelijking van deze functie is voor σ_{br} , de statische breuksterkte, 50 N/mm² ingevuld.

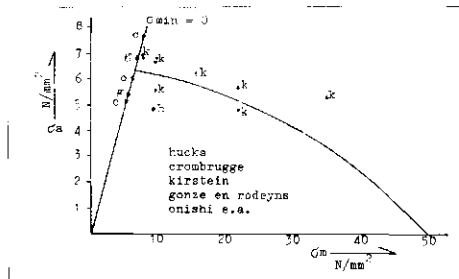
Afb. 5 toont één en ander voor het geval dat breuk optrad na gemiddeld 10⁶ wisselingen. Ondanks de verschillen bij de onderzoeken, bijv. temperatuur, frequentie en kwaliteit, valt onmiddellijk de redelijke overeenkomst tussen de verschillende waarden op.

In afb. 6 zijn alleen de Gerber-lijnen getrokken, welke behoren bij 10⁴, 10⁵, 10⁶ en 10⁷ wisselingen.

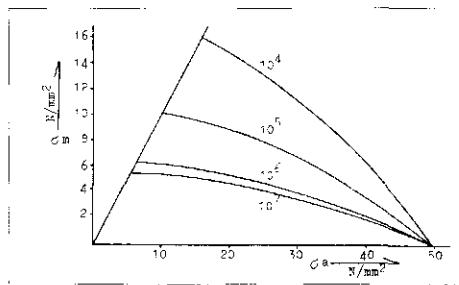
Uit deze lijnen, welke de gemiddelde resultaten van de onderzoeken weergeven, kunnen wij 'standaard Wöhlerkurven' konstrueren.

Afb. 7 geeft dergelijke kurven voor $\sigma_{min} = 0$ en $\sigma_m = 25$ N/mm².

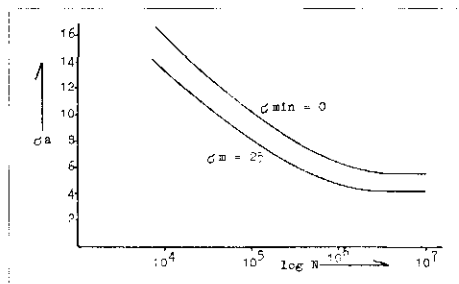
Bij nadere beschouwing van afb. 5 kunnen wij konkluderen, dat bij verhoging van de gemiddelde spanning σ_m , de toelaatbare amplitude σ_a niet noemenswaardig ver-



Afb. 5 - Goodman diagram PVC bij 10⁶ wisselingen.

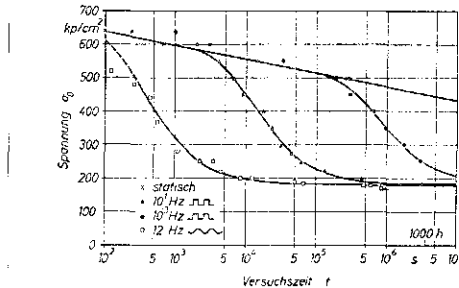


Afb. 6 - Goodman diagram bij 10⁴, 10⁵, 10⁶ en 10⁷ wisselingen.

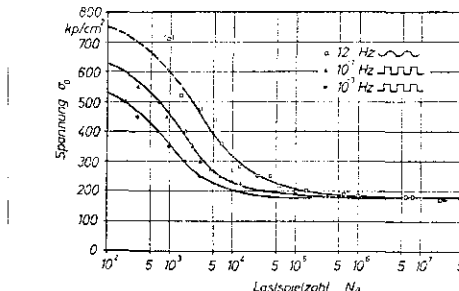


Afb. 7 - 'Standaard' Wöhlercurve PVC.

Afb. 8 - Invloed frekwentie bij SAN en ABS.



a. spanning-tijd diagram SAN



b. wöhlercurve SAN

andert bij de lagere waarden van σ_m . Pas na $\sigma_m = 17,5$ N/mm² worden de verschillen significant groter. Ter illustratie: om tot breuk te komen na gemiddeld 10⁶ wisselingen is voor een zuivere srongbelasting een σ_a van 6,3 N/mm² nodig.

Bij een gemiddelde spanning van 12,5 N/mm² is deze amplitude slechts gedaald tot 6 N/mm². Uiteraard betreft het hier gemiddelde waarden.

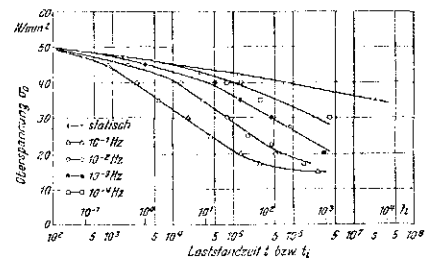
3.3. *Invloed frequentie*

De bovengenoemde onderzoeken zijn verricht met frequenties, welke uiteen liepen van 23 tot 350 c.p.m. (cykli per minuut). Dergelijke hoge frequenties komen in de praktijk niet voor, doch vanwege te lange beproevingstijden is men genoodzaakt de frequentie zo hoog mogelijk te kiezen.

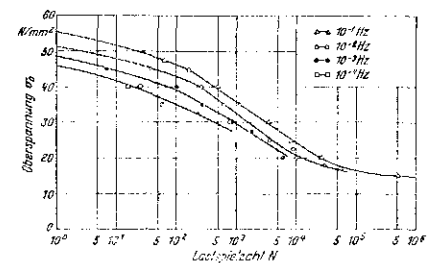
Met uitzondering van Hucks is door de genoemde onderzoekers geen onderzoek verricht naar de invloed van de frequentie. Hucks deed oriënterende proeven tussen 0,1 en 23 c.p.m. en vond bij deze frequenties geen verschillen. Omtrent de hoogte van de hierbij aangelegde spanningen worden door hem geen gegevens verstrekt.

Bij onderzoek aan PVC-strips door Benham en Hutchinson [17] en Gotham en Hitch [2] is wel aandacht besteed aan de invloed van de frequentie. Beiden komen tot dezelfde konklusie, welke ook bij andere kunststoffen dan PVC als algemeen geldend wordt aangenomen, namelijk:

Bij lagere frequentie daalt het aantal cykli



c. spanning-tijd diagram ABS



d. wöhlercurve ABS

tot breuk, doch de beproevingsduur (aantal cykli \times cyklostijd) neemt toe.

Deze algemene regel wordt zeer goed geïllustreerd door afb. 8, waarin voor de materialen SAN en ABS de vermoeiingseigenschappen zijn weergegeven, zowel in Wöhlerkurven (spanning-cykli) als in spanning-tijd kurven. Deze grafieken zijn afkomstig van Mayer e.a. [18; SAN] en Schlagenhauf [19; ABS].

Uit deze grafieken is echter zeer duidelijk af te leiden, dat bij lagere spanningen de invloed van de frequentie gaat afnemen. Aangezien in een Wöhler-diagram een lijn, behorend bij een hogere frequentie altijd boven een lijn van lagere frequentie ligt en bij een spanning-tijd diagram juist omgekeerd, zullen de lijnen uiteindelijk gelijk moeten lopen, mits een 'endurance limit' aanwezig is.

Toont een Wöhlerkurve van een materiaal geen echte 'endurance limit', doch een zeer flauw verloopende lijn dan zullen de lijnen toch praktisch gelijk gaan lopen.

Hieruit kunnen wij konkluderen dat bij hoge spanningen de frequentie een grote invloed heeft, doch dat deze invloed bij de lage spanningen vrijwel nihil zal zijn.

3.4. Overige invloeden

— **Temperatuur.**

Beproevingen door Kirstein uitgevoerd bij zowel 1 °C als bij 20 °C toonden verschillen aan bij de hoge spanningen. Bij lagere spanningen was het verschil niet meer significant.

— **Kwaliteit.**

Ongetwijfeld zal de kwaliteit van de buis een belangrijke invloed hebben op de vermoeiingseigenschappen. Van Crombrugge deed zijn beproevingen aan buizen van 3 leveranciers en vond significante verschillen, zonder deze verder te verklaren. Een onderzoek naar de invloed van de kwaliteit zal noodzakelijk zijn om nadere uitspraken te doen.

— **Buisafmetingen.**

Bij twee onderzoeken zijn enige aanwijzingen te vinden over de invloed van de buisafmetingen, namelijk:

- Van Crombrugge: Testen aan buizen met twee verschillende diameter/wanddikte-verhoudingen, waarbij de dunwandige buizen in verhouding iets beter schijnen te zijn.

- Kirstein: Testen aan buizen van twee verschillende diameters. Bij deze beproevingen vielen de grotere diameters iets slechter uit.

Beide resultaten zijn waarschijnlijk te verklaren door een mindere geleringsgraad van de dikwandige buizen.

— **Belastingvorm.**

Bij geen van de buisonderzoeken is de invloed van de belastingvorm onderzocht. Uit de literatuur, bijv. Oberbach en Heese [20] blijkt echter in het algemeen, dat een blokvormspanning eerder kans op breuk geeft dan een sinus- of driehoeksvorm. Deze verschillen blijken vooral op te treden bij hoge spanningen. Bij lagere spanningen is meestal geen significant verschil meer aanwezig. De verklaring voor dit verschijnsel is voornamelijk terug te voeren op het mechanisme kruip.

— **Veroudering.**

Gonze en Rodeyns voerden hun beproevingen tevens uit aan buis-materiaal, dat gedurende 1000 uur op 60 °C kunstmatig was verouderd. Uit de resultaten blijkt een lichte verbetering van de vermoeiingseigenschappen, doch het verschil is zeer miniem. Tijdens het 4e Stuttgarter Kunststoffkolloquium meldde Kirstein, dat na een temperatuurbehandeling van 2 uur op 70 °C de vermoeiingseigenschappen achteruit zouden gaan. Deze achteruitgang zou volgens hem te verklaren zijn door een verandering van de moleculaire toestand.

— **Statische belasting.**

Hucks verrichtte enige oriënterende proeven, waarbij onder andere een buis dynamisch werd belast tot ongeveer 90 % van het te verwachten aantal cykli tot breuk, waarna de buis statisch verder werd beproefd. Bij deze statische beproeving trad geen reductie van de barstdruktijd op, ten opzichte van buizen zonder dynamische voorbelasting.

Een omgekeerde proef leidde tot een gelijksoortig resultaat (geen afname vermoeiingseigenschappen na statische voorbelasting).

— **Spanningsconcentraties.**

Spanningsconcentraties hebben in het algemeen een nadelige invloed op de vermoeiingseigenschappen van een bepaald materiaal. Bij buizen kunnen dergelijke spanningsconcentraties ontstaan door krassen of insluitsels in het materiaal.

Door Kirstein is steeds de breukinitiatie onderzocht. Het bleek, dat de breuk meestal was begonnen bij krassen aan de binnenzijde van de buis of bij verontreinigingen. Krassen aan buitenzijde of luchtinluitsels geven geen aanleiding tot breuk.

— **Verbindingen.**

De invloed van verbindingen op de eigenschappen van een buisleiding is vrijwel niet onderzocht. Alleen door Onishi en Kruppa zijn metingen verricht aan gelaste PVC-buizen. Deze verbindingstechniek wordt in Nederland vrijwel niet toegepast. Onishi vindt een reductie van ± 30 % van de eigenschappen, terwijl bij Kruppa geen verschillen optreden. Het onderzoek van

Kruppa is echter buiten beschouwing gelaten om redenen, welke hieronder zijn vermeld.

— **Medium.**

Door zowel Kruppa als Vlasov zijn de beproevingen uitgevoerd met als medium machine-olie, in plaats van water. Hun resultaten zijn beduidend lager dan van de andere onderzoeken.

Het is echter algemeen bekend, dat de eigenschappen van PVC sterk beïnvloed kunnen worden door de aanwezigheid van machine-olie (weekmaker). Beide onderzoeken zijn daarom in de onderlinge literatuurvergelijking buiten beschouwing gebleven.

4. Combinatie vermoeiings- en statische eigenschappen

4.1. Inleiding

Bij een uitsluitend statische belasting bedraagt de zogeheten 50 jaar-sterkte, dat wil zeggen de toelaatbare statische belasting waarbij binnen 50 jaar geen breuk ontstaat, voor PVC minimaal 25 N/mm². Voor het berekenen van de toelaatbare spanning in de praktijk (tangentiële wandspanning in een buis) maakt men in Nederland gebruik van een veiligheidsfactor 2. Op deze manier bedraagt de toelaatbare spanning 12,5 N/mm².

Tot op heden zijn geen ontwerpregels opgesteld voor de aanwezigheid van een dynamische belasting in een PVC-buis. Aangezien deze in de praktijk aanwezig is, zal men in feite hiervoor eveneens een veiligheidsfactor moeten inbouwen. Door het afzonderlijk vaststellen van een veiligheidsfactor voor dynamische belasting zou men de veiligheidsfactor voor de statische belasting kunnen verlagen, daar de invloed van een dynamische belasting verdisconteerd is in de huidige statische factor. Aangezien het moeilijk is vast te stellen, welk deel van de factor beïnvloed wordt door de dynamische belasting, lijkt het vooralsnog verstandiger de statische factor te handhaven op 2.

Veiligheidsfactoren voor dynamische belasting worden bij hoge spanningen (met andere woorden bij laag aantal cykli) toegepast op het aantal toelaatbare cykli, doch bij lage spanningen (orde-grootte van de 'endurance limit') wordt de factor aangepast op de toelaatbare spanning. In het geval van PVC dienen wij de factor toe te passen op de toelaatbare spanning. De grootte van de factor is in dit artikel voor een eerste benadering gesteld op 2. In deze factor zijn dan verwerkt de eventuele invloeden op de vermoeiingseigenschappen van kerfwerking, kwaliteit enz.

4.2. No-failure area - safety area

De dynamische en statische eigenschappen zijn bijeengebracht in een Goodman-diagram. Voor de dynamische eigenschappen is er daarbij van uitgegaan, dat in 50 jaar het aantal cycli beneden 10^6 zal blijven, hetgeen zoals eerder is vermeld, overeenkomt met de praktijkomstandigheden. Dit diagram is afgebeeld in afb. 9. In het diagram kunnen wij een gebied onderscheiden, genoemd 'no-failure area', waarbinnen geen breuk zal optreden in een tijdsperiode van 50 jaar.

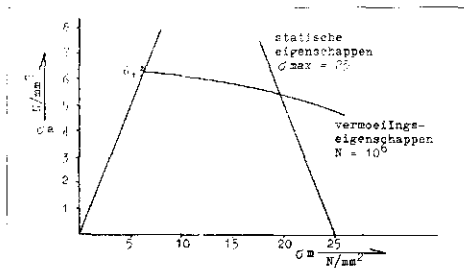
Dit gebied wordt begrensd door 3 lijnen:

- $\sigma_{\min} = 0 \text{ N/mm}^2$, de spanning mag niet beneden de atmosferische druk dalen;
- $\sigma_{\max} = 25 \text{ N/mm}^2$, bepaald door de statische 50 jaar-sterkte;
- Gerberfunctie, welke de dynamische eigenschappen weergeeft bij 10^6 wisselingen.

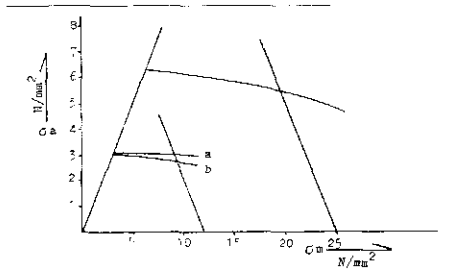
Op dit gebied kunnen wij nu veiligheidsfactoren toepassen. De toepassing van de faktor op de dynamische eigenschappen kan gebeuren op twee manieren, welke beide in afb. 10 zijn weergegeven. Bij lijn a is alleen de amplitude gehalveerd; bij lijn b zijn zowel de gemiddelde spanning als de amplitude gehalveerd. Gebaseerd op de eerder genoemde proeven, verricht door Hucks [8, 9, 10] kan men konkluderen, dat de dynamische eigenschappen onafhankelijk zijn van de statische eigenschappen, zodat toepassing van lijn a gerechtvaardigd schijnt. Uit het aldus gevormde veiligheidsgebied (safety area) kunnen wij konkluderen: bij een maximum van 10^6 wisselingen in 50 jaar zal met inachtneming van veiligheidsfactoren geen breuk optreden, mits de maximale spanning beneden $12,5 \text{ N/mm}^2$ en de amplitude van de wisselingen beneden 3 N/mm^2 blijven.

5. Konklusies

In een waterleidingnet zullen deels door wijzigingen van het gebruik, deels door manipulatie van pompen, kranen en dergelijke drukschommelingen voorkomen. Het aantal en de grootte van deze schommelingen zullen voor elk waterleidingnet verschillen. In het algemeen kan men echter konkluderen, dat gebaseerd op een tijdsperiode van 50 jaar, het aantal schommelingen beneden 10^6 zal blijven, terwijl de amplitude (helft van het spanningsverschil), gebaseerd op de tangentiële wandspanning, beneden 3 N/mm^2 blijft. Vermoeitigseigenschappen worden veelal weergegeven in Wöhlerkurven. Deze kurven kunnen bijeengebracht worden in een zogeheten Goodman-diagram, waarin voor een bepaald aantal cycli de amplitude is weergegeven tegen de gemiddelde spanning. Het Goodman-diagram voor PVC bij 10^6



Afb. 9 - 'No failure area'.



Afb. 10 - 'Safety area'.

cykli toont in het gebied van 0 tot $17,5 \text{ N/mm}^2$ een vrijwel horizontaal gedeelte, met andere woorden, de amplitude neemt bij stijgende gemiddelde spanning niet significant af.

De amplitude, waarbij na ongeveer 10^6 wisselingen breuk optreedt, bedraagt in het genoemde gebied 6 N/mm^2 .

De invloed van de frequentie zou bij deze spanningen verwaarloosd kunnen worden. Na toepassing van genoemde veiligheidsfactoren en rekening houdend met de statische eigenschappen, zijn de volgende ontwerpregels voor PVC op te stellen:

- De minimale druk mag niet beneden de atmosferische druk komen.
- De maximale tangentiële wandspanning mag niet stijgen boven $12,5 \text{ N/mm}^2$.
- De drukwisselingen mogen geen grotere amplitudes in de tangentiële wandspanning opleveren dan 3 N/mm^2 .

De veiligheidsfactoren, waarop de ontwerpregels zijn gebaseerd, zijn opgebouwd uit enerzijds de statische faktor, welke door 'verwijdering' van de dynamische eigenschappen relatief gezien groter is geworden (de toelaatbare statische wandspanning zou mogen worden verhoogd), anderzijds de dynamische faktor, waarin onder meer zijn verwerkt de invloeden van kerfwerking en kwaliteit.

Beschouwen wij de praktijkomstandigheden in waterleidingnetten en de vermoeitigseigenschappen van PVC tezamen, dan kan gekonkludeerd worden, dat zich geen schade aan een waterleidingnet zal voordoen, hetwelk zijn oorzaak vindt in vermoeitig.

Behalve de veiligheidsfactoren, ingebouwd in

genoemde ontwerpregels, blijken de praktijkomstandigheden meestal gunstiger dan de gestelde maxima van het aantal wisselingen (10^6) en amplitude (3 N/mm^2). Gesteld kan worden, dat de aanbeveling van Gotham en Hitch [2] om in bijzondere gevallen, waarbij sprake zou zijn van hoge frequenties, in combinatie met hoge amplitudes, de ontwerpspanning van PVC te verlagen tot 6 N/mm^2 , overbodig is bij toepassing van PVC-buizen voor het transport van drinkwater.

Literatuur

- Waterleidingbuizen van ongeplasteerd polyvinylchloride, Kwaliteitsreizen nr. 49, KIWA, Rijswijk (ZH), 1972.
- Gotham, K. V. and Hitch, M. J. *Design Consideration for Fatigue in uPVC Pressure Pipe*, Pipes and Pipelines International, 1975, 20, p. 10.
- Joukowsky, N. *Ueber den hydraulischen Stoss in Wasserleitungen*, Mémoires de l'Académie Impériale des Sciences de St. Pétersbourg, 1900, Bd IX, no. 5.
- Kranenburg, C. *Waterslagverschijnselen in buisleidingen*, H₂O, 1969, 23, p. 568.
- Handboek voor het waterleidingvak, deel I, 4e druk, Rijswijk (ZH), 1970, p. 73 en verder.
- Manuel, A. R., Vreugdenhil, C. B. en Wydieks, J. *Waterslag*, De Ingenieur, 1968, 80, p. O93.
- Menges, G. en Roberg, P. *Untersuchungen an Rohren aus PVC und PE hart bei dynamischen Innendruckbelastung*, Plastverarbeiter, 1968, 19, p. 936.
- Hucks, R. T. *Pressure Surges and PVC-pipe*, World Construction, September 1972, p. 47.
- Hucks, R. T. *Performance of PVC-pipe in Water-Distribution Systems*, Modern Plastics, September 1972, p. 112.
- Hucks, R. T. *Designing PVC-pipe for Water-Distribution Systems*, Water Technology/Distribution Journal AWWA 1972, p. 443.
- Crombrugge, R. van. *Fatigue Properties of PVC-pipes*, RILEM, Symposium on Research and Reception Tests on Synthetic Materials for Construction, Liege, June 1964, Final Report, p. 448.
- Kirstein, C. E. *Untersuchung der Innendruck-Schwellfestigkeit von Rohren aus PVC-hart*, Interne publikatie van het 'Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde Universität Stuttgart', 1972.
- Gonze, A. en Rodeyans, C. *Essais de tubes en PVC*, ibid 11, p. 478.
- Onishi, I., Kimuza, H. en Uematu, M. *A Study on Dynamic Strength of Welded Specimens of Plastics*. Journal of the Japan Welding Society, 35, 1966, p. 50.
- Kruppa, M. *Einfluss einer Heizelement-scheissung auf die Tragfähigkeit von PVC-hart-Rohren*. Zis-Mitteilungen, 9, 1973, p. 1063.
- Vlasov, *Resistance of Hard-PVC-tubes to the action of Alternating Internal Pressure*. Mekhanika Polimerov, 3, 1967, p. 747.
- Benham, P. P. en Hutchinson, S. J. *Cyclic Creep and Fracture of PVC*, Plastics and Polymers, August 1970, p. 259.
- Mayer, W., Schlagenhauf, M. en Wintergerst, S. *Zeitfestigkeit von SAN-Copolymerisat bei statischen, schwingenden und intermittierenden Beanspruchung*, Kunststoffe, 1974, Bd. 64, p. 197.
- Schlagenhauf, M. *Zeitfestigkeit von ABS bei intermittierenden Zug-Beanspruchung*, Kunststoffe, 1975, Bd 65, p. 469.
- Oberbach en Heese, *Der Einfluss von Beanspruchungsfrequenz und Ablauf auf das Schwingverhalten von Kunststoffen*. Materialprüfung, 1972, Bd 14, p. 173.