

TNO-rapport

BI-86-110

**Technische grondslagen voor de berekening van
ingegraven stalen transportleidingen
TGSL - 1986**

Datum	februari 1987
Auteur(s)	Ir. A.M. Gresnigt
Aantal pagina's	164
Projectnummer	63.4.4140

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, foto-kopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor onderzoeksovereenkomsten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belang-hebbenden is toegestaan.

© 1986 TNO

TNO Rapport

Titel **TECHNISCHE GRONDSLAGEN VOOR DE BEREKENING VAN
INGEGRAVEN STALEN TRANSPORTLEIDINGEN
TGSL - 1986**

Rapportnr. **BI-86-110**

Datum **februari 1987**

Projectnr. **63.4.4140**

Auteur **Ir. A.M. Gresnigt**

Trefwoord **pijpleidingen
transportleidingen
OPL**

Bestemd voor **Deelnemers in de Begeleidingscommissie Pijpleidingen
en andere belanghebbenden en geïnteresseerden**

VOORWOORD

Het onderzoek dat ten grondslag ligt aan de TGSL - 1986 en de daarbij behorende rapporten is in hoofdzaak uitgevoerd door het Instituut TNO voor Bouwmaterialen en Bouwconstructies.

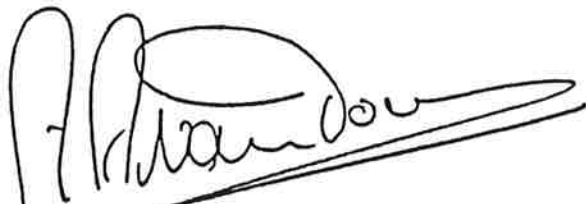
Bij het onderzoek en de opstelling van de TGSL is nauw overleg geweest met Werkgroep 7 "Bouwwerken en leidingen" van de Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW). Dit overleg heeft er toe geleid dat op voorstel van deze werkgroep de TAW de TGSL heeft aanvaard als aanhansel bij de Leidraden voor constructie en beheer van vloeistofleidingen respectievelijk gasleidingen in en nabij waterkeringen.

Voor de Leidraden betekent dit dat voor wat betreft de berekening van stalen leidingen wordt verwezen naar de TGSL - 1986.

De TGSL - 1986 en de bijbehorende rapporten zijn verkrijgbaar bij het IBBC-TNO.

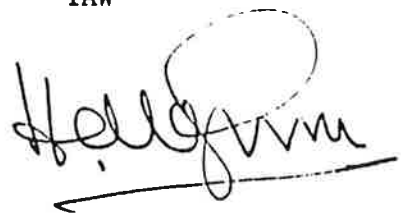
Opmerkingen en voorstellen voor herzieningen kunnen worden toegezonden aan het IBBC-TNO^{*)} en/of aan Werkgroep 7 van de TAW^{**)}.

De voorzitter van de
Begeleidingscommissie
Pijpleidingen



Prof. Ir. A.A. van Douwen

De voorzitter van
Werkgroep 7 van de
TAW



Ir. H. de Groot

's-Gravenhage, juni 1987

^{*)} IBBC-TNO, t.a.v. Ir. A.M. Gresnigt, Postbus 49, 2600 AA Delft.

^{**)} Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde, t.a.v. Ir. L.E.B. Saathof,
Postbus 5044, 2600 GA Delft.

<u>INHOUD</u>	<u>BLZ.</u>
NOTATIES	4
INLEIDING	8
1. ALGEMENE BEPALINGEN	14
1.1. Onderwerp	14
1.2. Aanduiding	14
1.3. Toepassingsgebied	14
1.4. Begrippen en definities	16
1.5. Karakteristieke belastingen en zettingen	20
1.5.1. Ontwerpdruk P_0	20
1.5.2. Gemiddelde bedrijfsdruk P_{gem}	20
1.5.3. Laagste bedrijfsdruk P_{min}	22
1.5.4. Uitwendige belastingen	22
1.6. Gebruikstoestanden	22
1.6.1. Bij berekening volgens de elasticiteitsleer	22
1.6.2. Bij berekening volgens de placticiteitsleer	24
1.7. Grenstoestanden	24
1.7.1. De grenstoestand spanningen	24
1.7.2. De grenstoestand rekken	24
1.7.3. De grenstoestand vervormingen	24
1.7.4. De grenstoestand wisselend vloeien	26
1.7.5. De grenstoestand vermoeiing	26
1.8. Berekeningswijze, rekenbelastingen en rekenzettingen	30
1.9. Rekenfactoren	34
1.10. Constructieve vormgeving	38
1.11. Materiaaleigenschappen	42
1.11.1. Staal	42
1.11.2. Grond	66
1.12. Afwijkingen van de grondslagen	68
1.13. Afwijkingen in de uitvoering	68

2.	BEREKENING VOLGENS DE ELASTICITEITSLEER	70
2.1.	Algemeen	70
2.2.	Nadere bepalingen	70
2.2.1.	Relatieve sterkte	70
2.2.2.	Rekentoestanden	74
2.2.3.	Uit te voeren berekeningen	76
2.3.	Rekenregels	76
3.	BEREKENING VOLGENS DE PLASTICITEITSLEER	78
3.1.	Algemeen	78
3.2.	Nadere bepalingen	78
3.2.1.	Relatieve sterkte	78
3.2.2.	Rekentoestanden	78
3.2.3.	Uit te voeren berekeningen	80
3.3.	Rekenregels	82
4.	GRENSWAARDEN	84
4.1.	Algemeen	84
4.2.	Spanningen	84
4.3.	Rekken	84
4.4.	Vervormingen	86
4.4.1.	Ovalisering	86
4.4.2.	Plooien	86
4.4.3.	Implosie	90
4.4.4.	Knik	90
4.5.	Wisselend vloeien	92
4.6.	Vermoeiing	96
5.	REFERENTIES	97
5.1.	Voorschriften	97
5.2.	Rapporten met rekenregels waaraan in deze TGSL wordt gerefereerd	99
5.3.	Achtergrondrapporten in het kader van het onderzoek pijpleidingen	100
5.4.	Overige publicaties	101
Bijlage 1.	Rekenprocedure	102
Bijlage 2.	Samenvatting rekenregels voor de berekening van ingegraven stalen transportleidingen	107

NOTATIES

Symbool	Omschrijving	Eenheid
A	Oppervlakte van een doorsnede	mm ²
a	Diepte van een kerf die aan de oppervlakte van een plaat uitmondt	mm
2a	Diepte van een ingesloten kerf	mm
$\bar{2a}$	Effectieve scheurlengte (zie art. 1.11)	mm
D _g	Gemiddelde diameter = D _u - t	mm
D _u	Nominale waarde van de uitwendige diameter	mm
D' _u	D _u in de vervormde doorsnede (zie art. 4.4.1.)	mm
D _i	Nominale waarde van de inwendige diameter	mm
D	Dwarskracht	N
E	Elasticiteitsmodulus	Nmm ⁻²
F	Normaalkracht	N
f _o	Onzekerheidsfactor	-
f _{bi} , f _{bu} , f _k	Spanningsfactoren bij bochten bij inwendige druk (zie art. 2.2.1)	-
G	Glijdingsmodulus	Nmm ⁻²
g	Grondmechanische parameter zoals opgegeven door het grondmechanisch adviesbureau	divers
g ^r	Rekenwaarde voor g (zie art. 1.11)	divers
k _l	Laterale beddingsconstante zoals opgegeven door het grondmechanisch adviesbureau	Nmm ⁻³
k _w	Beddingsconstante voor de wrijving zoals opgegeven door het grondmechanisch adviesbureau	Nmm ⁻³
k _l ^r	Rekenwaarde voor k _l (zie art. 1.11)	Nmm ⁻³
k _w ^r	Rekenwaarde voor k _w (zie art. 1.11)	Nmm ⁻³
P	Drukverschil tussen de druk in de leiding P ₁ en de uitwendige druk P _u (zie art. 1.4)	Nmm ⁻²
P _{barst}	Barstdruk (zie art. 1.4)	Nmm ⁻²
P _{gem}	Gemiddeld aanwezige druk P (zie art. 1.4)	Nmm ⁻²
P _{max}	Hoogste druk P die gedurende normaal bedrijf voor kan komen (zie art. 1.4)	Nmm ⁻²

Symbool	Omschrijving	Eenheid
$P_{\min}$	Laagste druk P die voor kan komen (zie art. 1.4)	Nmm^{-2}
P_i	Inwendige druk	Nmm^{-2}
P_o	Ontwerpdruk (zie art. 1.4)	Nmm^{-2}
P_u	Uitwendige druk	Nmm^{-2}
P_t	Beproevingdruk	Nmm^{-2}
P_v	Vloedruk (zie art. 1.4)	Nmm^{-2}
Q, Q_k	Zie art. 1.9	divers
R	Bochtstraal	mm
R^*	Zie art. 1.9	divers
r	Gemiddelde straal = $(D_u - t)/2$	mm
r'	Maatgevende straal (zie art. 4.4.2)	mm
S^*	Zie art. 1.9	divers
sf	Schadefactor	-
t	Nominale wanddikte	mm
w	Verandering van de straal bij buiging en gronddrukken (geldt zowel voor rechte leidingen als voor bochten, zie art. 4.4.2)	mm
w_o	Idem, zonder gronddrukken (zie art. 4.4.2)	mm
w'	Verschil tussen w en w_o	mm
α	Reductiefactor	-
β	Factor in verband met de relatieve sterkte	-
γ	Rekenfactor	-
δ	Zakking, CTOD-waarde	mm
δ_c	Kritische CTOD-waarde	mm
ϵ	Rek, berekende benodigde rekapaciteit	-
ϵ_e	Rek bij het bereiken van σ_e : $\epsilon_e = \sigma_e / E$	-
ϵ_{totaal}	Berekende benodigde rekapaciteit	-
ϵ_{br}	Rek bij breuk, gemeten aan een standaard proefstaaf	-
ϵ_x	Rek in langsrichting	-
ϵ_y	Rek in omtreksrichting	-
ϵ_{cr}	Kritieke stuik in verband met plooiën bij buiging en normaalkracht	-

Symbool	Omschrijving	Eenheid
$\varepsilon_{\text{plooi}}$	Kritieke stuik in verband met plooien bij buiging, normaalkracht en wringing	-
θ_{cr}	Kritieke wringvervorming in verband met plooien bij wringing	rad/mm
θ_{plooi}	Kritieke wringvervorming in verband met plooien bij buiging, normaalkracht en wringing	rad/mm
λ	Slankheid van een staaf (knik)	-
ν	Dwarscontractiecoëfficiënt	-
σ	Normaalspanning	Nmm ⁻²
$\bar{\sigma}$	Toelaatbare spanning	Nmm ⁻²
σ_c	Vergelijkingsspanning	Nmm ⁻²
σ_e	Rekenwaarde voor de vloeispanning. Deze wordt gelijk gesteld aan de gegarandeerde minimum rekgrens. De rekgrens wordt bepaald aan een standaard proefstaaf en wordt gedefinieerd als zijnde de materiaalspanning waarbij na ontlasten een blijvende rek overblijft die gelijk is aan 0,2% van de oorspronkelijke meetlengte ($\sigma_{0,2}$). De rekgrens kan ook de spanning zijn, waarbij onder belasting een totale rek optreedt die gelijk is aan 0,5% van de oorspronkelijke meetlengte ($\sigma_{0,5}$).	Nmm ⁻²
σ'_e	Fictieve σ_e in verband met knik (zie art. 4.4.4)	Nmm ⁻²
σ_{gr}	Grensspanning. Dit is een spanning die niet mag worden overschreden	Nmm ⁻²
σ_k	Knikspanning	Nmm ⁻²
σ_{yp}	Ringspanning ten gevolge van P: $\sigma_{\text{yp}} = P r/t$	Nmm ⁻²
σ_t	Rekenwaarde voor de treksterkte. Deze wordt gelijk gesteld aan de gegarandeerde minimum waarde voor de treksterkte. De treksterkte wordt bepaald aan een standaard proefstaaf en wordt gedefinieerd als zijnde de maximaal gemeten kracht gedeeld door de oorspronkelijke doorsnede van de proefstaaf	Nmm ⁻²

Symbool	Omschrijving	Eenheid
$\left. \begin{array}{l} \sigma_{0,2} \\ \sigma_{0,5} \\ \sigma_{tw} \end{array} \right\}$	De in een bepaald materiaal werkelijk aanwezige waarden van de rekgrens en treksterkte	Nmm ⁻²
σ_x	Spanning in langssrichting van de leiding	Nmm ⁻²
σ_y	Spanning in omtreksrichting van de leiding	Nmm ⁻²
τ	Schuifspanning	Nmm ⁻²
τ_e	Vloeischuifspanning = $\sigma_e / \sqrt{3}$	Nmm ⁻²
ϕ	Dimensieloze CTOD-waarde = $\delta / (2\pi \bar{a} \epsilon_e)$	-

INLEIDING

Aanleiding tot het opstellen van de TGSL

In 1971 werd op advies van de Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW) door de Minister van Verkeer en Waterstaat de Leidraad voor constructie en beheer van vloeistofleidingen in en nabij waterkeringen [1.1]^{*)} gepubliceerd. In 1973 volgde de Leidraad voor constructie en beheer van gasleidingen in en nabij waterkeringen [1.2]. In 1972 werd door de Provinciale Waterstaat in Zuid-Holland de Pijpleidingcode 1972 [1.6] gepubliceerd. Deze vormt een verdere uitwerking van de TAW-Leidraden.

Bij toepassing van de in de Leidraden gehanteerde uitgangspunten ten aanzien van de in rekening te brengen belastingen, zettingsverschillen, veiligheidsfactoren en dergelijke, op bij de publicatie reeds bestaande kruisingen van leidingen met waterkeringen, bleek dat een aantal van deze kruisingen niet aan de gestelde eisen voldeden. De betreffende kruisingsconstructies werden door de dijkbeheerders daarom onvoldoende veilig geacht. Dit vormde voor hen de aanleiding om maatregelen in constructieve zin (aanpassing, dan wel vervanging van bestaande kruisingsconstructies) en/of operationele zin (verlaging van de toelaatbare inwendige druk) te vragen.

Naar aanleiding hiervan werd in 1971 door de Samenwerkende Pijpleidingbeheerders, thans geheten de Vereniging van Leidingeigenaren in Nederland^{**) (VELIN)}, aan Prof.Ir. A.A. van Douwen gevraagd om tussen hen en de waterkeringbeheerders adviserend op te treden.

*) De getallen tussen [] verwijzen naar de lijst met referenties in hoofdstuk 5.

**) De leden van de VELIN die het onderzoek financieel hebben gesteund zijn:

- | | |
|--|-----------------|
| - Defensie Pijpleidingen Organisatie | - Noordwijk |
| - Dow Chemical Nederland N.V. | - Terneuzen |
| - D.S.M. Transport Mij. N.V. | - Beek (L) |
| - Nederlandse Aardolie Mij. N.V. | - Assen |
| - N.V. Nederlandse Gasunie | - Groningen |
| - N.V. Nederlandse Pijpleiding Mij. | - 's-Gravenhage |
| - N.V. Rotterdam-Rijn Pijpleiding Mij. | - 's-Gravenhage |
| - Shell Internationale Petroleum Mij. N.V. | - 's-Gravenhage |

Om een goed inzicht te krijgen in de werkelijke veiligheid, werd al vrij spoedig nader onderzoek naar het werkelijke gedrag van ingegraven stalen transportleidingen noodzakelijk geacht. Gebleken was namelijk dat de bestaande berekeningsmethoden voor stalen pijpleidingen waren gebaseerd op de elasticiteitsleer. Hierbij wordt slechts impliciet gebruik gemaakt van het vermogen van staal om plastische rekken op te nemen. Met behulp van de plasticiteitsleer kan hiervan meer expliciet gebruik worden gemaakt en kunnen de eisen ten aanzien van de taaiheid van het materiaal ook nauwkeuriger worden geformuleerd.

Doordat beter rekening wordt gehouden met het werkelijke materiaalgedrag kan bij toepassing van de plasticiteitsleer een beter inzicht worden verkregen in het werkelijk aanwezige draag- en vervormingsvermogen van stalen leidingen, dan bij toepassing van de elasticiteitsleer.

Bij gegeven constructie- en belastingcondities geeft toepassing van de plasticiteitsleer een beter inzicht in de werkelijk aanwezige veiligheid tegen bezwijken.

Uitgevoerd onderzoek

De voorgaande overwegingen hebben geleid tot een uitgebreid theoretisch experimenteel onderzoek naar het gedrag van ingegraven stalen leidingen in het bijzonder in kruisingen met waterkeringen en wegen. Dit onderzoek pijpleidingen is aangeduid met OPL.

Voor wat betreft vragen ten aanzien van de rekapaciteit van het leidingmateriaal is onderzoek uitgevoerd bij het Laboratorium voor Weerstand van Materialen in Gent, The Welding Institute in Abbingdon in Engeland en bij het Metaalinstituut TNO in Apeldoorn.

Naast het onderzoek naar het gedrag van de stalen leiding, is door Grondmechanica Delft onderzocht of door wijzigingen en/of uitbreidingen van het grondmechanisch onderzoek, de in dit verband van belang zijnde eigenschappen van grond - de grondmechanische parameters - nauwkeuriger kunnen worden bepaald. Hierdoor zouden de zogenaamde onzekerheidsfactoren voor de grondmechanische parameters kunnen worden verlaagd. De resultaten van het onderzoek van Grondmechanica Delft zijn in [3.3] gerapporteerd. Het rapport [3.3] vormt mede de aanleiding tot herziening van de eerder genoemde leidraden uit 1971 [1.1] en 1973 [1.2].

Het onderzoek werd financieel gesteund door de VELIN^{*)}, waarbij zich in een later stadium de VEWIN^{**)} en de VEGIN^{***)} aansloten, alsmede door de overheid via een stimuleringsubsidie.

Voor de begeleiding werd een Begeleidingscommissie ingesteld bestaande uit vertegenwoordigers van de eerder genoemde pijpleidingeigenaren, de Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen en het IBBC-TNO.

In 1977 nam ook de Gemeente Rotterdam zitting in de Begeleidingscommissie, en in 1983 de Dienst voor het Stoomwezen.

Het voorzitterschap werd bekleed door Prof.Ir. A.A. van Douwen van de TH-Delft.

Ten tijde van de publicatie van de TGSL - 1986 hadden in de Begeleidingscommissie zitting:

Prof.Ir. A.A. van Douwen (voorzitter)	- TH-Delft
Ir. A.M. Gresnigt (secretaris)	- IBBC-TNO
Ir. M.J.G. Broekhoven	- Dienst voor het Stoomwezen
Ir. K.C.J. van den Ende	- Rijkswaterstaat (TAW)
Ir. H. de Groot	- Hoogheemraadschap van Rijnland (TAW)
Ir. J. Hieter	- Duinwaterleiding Den Haag (VEWIN)
Ing. C. Menzel	- VEG-Gasinstituut (VEGIN)
Ir. K. Noorlander	- Gemeente Rotterdam
Ir. P.H.A. Rietjens	- N.V. Nederlandse Gasunie (VELIN)
Ir. L.E.B. Saathof	- Centrum voor Onderzoek Waterkeringen (TAW)
Ir. A. De Waal	- SIPM (VELIN)

*) VELIN = Vereniging van Leidingeigenaren in Nederland.

**) VEWIN = Vereniging van Waterleidingbedrijven in Nederland.

***) VEGIN = Vereniging van Gasbedrijven in Nederland.

Voor de bestudering van de eisen die aan het buismateriaal dienen te worden gesteld is een subgroep Materiaaleisen opgericht, waarin behalve leden uit de Begeleidingscommissie ook zitting had P. Bristoll M.Sc. (Kon. Shell Laboratorium Amsterdam). In het eindrapport van deze subgroep [3.2] is het door Drs. H.C. van Elst van het Metaalinstituut TNO en Prof.Dr.Ir. H.G. Geerlings van de TH-Delft als onafhankelijke deskundigen opgestelde commentaar verwerkt.

Voor het onderzoek ten aanzien van de grondmechanische aspecten is een subgroep opgericht waarin leden van de Begeleidingscommissie zitting hadden. Het eindrapport [3.3] van het door Grondmechanica Delft uitgevoerde onderzoek is opgesteld door Ir. W.J. Heijnen van Grondmechanica Delft.

Opzet van de TGSL - 1986

In maart 1975 is in overleg met de TAW besloten de resultaten van het onderzoek in te passen in de TAW-Leidraden.

Op 30 mei 1978 is een voorstel voor inpassing van "Technische Grondslagen voor de berekening van ingegraven Stalen Transportleidingen", aangeduid als TGSL - 1978, gepresenteerd bij gelegenheid van de in Utrecht gehouden Studiedag Stalen Transportleidingen.

Omdat de vorm van de TGSL (een naast de tekst afgedrukte toelichting) en de omvang niet pasten in de opzet van de Leidraden, werd besloten het onderdeel "Berekening van stalen transportleidingen" onder te brengen in een aparte publicatie als aanhangsel van de Leidraden.

Teneinde voor de constructeur de mogelijkheid open te laten de berekening met behulp van de elasticiteitsleer, dan wel met behulp van de plasticiteitsleer uit te voeren, is in dit aanhangsel ook een hoofdstuk "Berekening volgens de elasticiteitsleer" opgenomen. Deze opzet is geheel parallel met die welke is gekozen in NEN 3851: Technische Grondslagen voor de berekening van Bouwconstructies - TGB 1972 - Staal.

Om redenen genoemd in art. 1.8 is in dit aanhangsel gekozen voor de berekeningsmethode die berust op het beschouwen van grenstoestanden, dat wil zeggen toestanden die niet bereikt mogen worden. Bij een berekening volgens de plasticiteitsleer kan deze berekeningsmethode niet worden gemist.

Bij een berekening volgens de elasticiteitsleer is ze, hoewel ze voordelen biedt, niet strikt noodzakelijk. Vanwege deze voordelen (die in het bijzonder van belang zijn bij geometrisch niet lineair gedrag) en ter wille van de uniformiteit is ook bij de berekening volgens de elasticiteitsleer gekozen voor de berekeningsmethode die berust op het beschouwen van grenstoestanden, en is dus afgezien van de oude, op toelaatbare spanningen gebaseerde methode.

Het geven van alle rekenregels met de daarbij behorende toelichtingen die in het kader van het onderzoek zijn afgeleid, zou leiden tot een zeer omvangrijke TGSL. Er is daarom volstaan met het aangeven van de uitgangspunten voor de berekening (hoofdstukken 1, 2 en 3), de grenswaarden (hoofdstuk 4) en een samenvatting van de belangrijkste rekenregels (bijlage 2). De volledige set van rekenregels met de daarbij behorende afleidingen en toelichtingen kan worden ontleend aan de in par. 5.2 genoemde rapporten.

Tenslotte wordt opgemerkt dat de berekeningsmethoden en rekenregels in de TGSL en de in par. 5.2 genoemde rapporten het resultaat zijn van het ten tijde van de publicatie tot stand gekomen onderzoek.

Het ligt voor de hand dat vanwege verdergaande ontwikkelingen in de toekomst wijzigingen en/of aanvullingen in deze grondslagen nodig zullen blijken. Vooruitlopend hierop kan door de instantie die is belast met de beoordeling van de veiligheid toestemming worden verleend van de grondslagen af te wijken, mits wordt aangetoond dat de leiding voldoende veilig is en de hechtheid er van duurzaam verzekerd zal zijn. Zie ook art. 1.12 en 1.13.

Toelichting

1.1. Onderwerp

Onder ingegraven leidingen worden ook verstaan door de grond geperste of geboorde leidingen.

1.3. Toepassingsgebied

De in de hoofdstukken 2 (elasticiteitsleer) en 3 (plasticiteitsleer) gegeven eisen gelden in beginsel voor alle typen van stalen (land-) transportleidingen, dus ook voor op palen gefundeerde leidingen en leidingen waarin appendages, flensverbindingen en/of ringverstijvingen voorkomen.

In het kader van het onderzoek pijpleidingen (OPL) zijn rekenregels opgesteld voor gelaste stalen leidingen (rechte leidingen, gladde bochten, mijterbochten) zonder speciale fundering. Voor leidingen op palen en leidingen of leidinggedeelten waarin appendages, flensverbindingen, broekstukken en/of verstijvingsringen voorkomen, moeten de benodigde berekeningsmethoden aan andere bronnen worden ontleend. Indien bij de betreffende leiding(-gedeelten) de belastingen zodanig zijn dat ze binnen het toepassingsgebied van de elasticiteitsleer

1. ALGEMENE BEPALINGEN

1.1. Onderwerp

Dit aanhangsel op de Leidraden voor constructie en beheer van vloeistofleidingen c.q. gasleidingen in en nabij waterkeringen [1.1] en [1.2], bevat technische grondslagen voor de berekening van ingegraven stalen transportleidingen.

1.2. Aanduiding

Dit aanhangsel wordt verkort aangeduid als: TGSL - 1986.

Waar in de TGSL - 1986 wordt verwezen naar andere technische grondslagen, voorschriften, normen of richtlijnen wordt, tenzij anders vermeld, steeds de laatst verschenen uitgave hiervan bedoeld. Wanneer in andere technische grondslagen, voorschriften, normen of richtlijnen, waarnaar wordt verwezen, bepalingen zijn opgenomen die strijdig zijn met de TGSL - 1986 dan geldt de TGSL - 1986.

1.3. Toepassingsgebied

In de TGSL - 1986 worden technische grondslagen gegeven voor de berekening van ingegraven stalen transportleidingen.

De afzonderlijke pijplengten waaruit de transportleiding is opgebouwd zijn in het algemeen door middel van lassen aan elkaar verbonden. Plaatselijk kunnen appendages, flensverbindingen en ringverstijvingen voorkomen.

De eisen waaraan het toe te passen staal moet voldoen zijn gegeven in art. 1.11.1.

De in bijlage 2 en in de rapporten in par. 5.2 gegeven rekenregels gelden voor ingegraven stalen leidingen, die door middel van lassen aan elkaar zijn verbonden.

Toelichting

vallen kan veelal gebruik worden gemaakt van berekeningsmethoden die in de literatuur zijn gegeven.

Bij berekening volgens de plasticiteitsleer zal dit in veel mindere mate mogelijk zijn, en zal voor uitbreiding van het toepassingsgebied, nieuw c.q. aanvullend onderzoek moeten worden uitgevoerd.

1.4. Begrippen en definities

Voor de vloedruk van rechte leidingen kan, gebruik makend van het vloeicriterium van Von Mises, worden afgeleid:

$$P_v = 1,15 \frac{\sigma_e \cdot 2t}{D_i} \quad \dots\dots (T1-1)$$

Deze betrekking geldt zowel voor buizen die in lengterichting vrij kunnen vervormen, als voor buizen die in lengterichting niet vrij kunnen vervormen [3.1].

Bij uitgevoerde barstproeven [3.10] is gebleken dat de barstdruk globaal genomen varieert tussen:

$$\begin{aligned} P_b &= 0,9 \frac{\sigma_{tw} \cdot 2t}{D_g} \quad \dots\dots (T1-2) \\ \text{en} \\ P_b &= 1,1 \frac{\sigma_{tw} \cdot 2t}{D_g} \quad \dots\dots (T1-3) \end{aligned}$$

In de TGSL - 1986 wordt de barstdruk gelijk gesteld aan:

$$P_b = 1,0 \frac{\sigma_t \cdot 2t}{D_g} \quad \dots\dots (T1-4)$$

Uit onderzoek is gebleken dat naast de geometrie van de leiding en de treksterkte van het materiaal, in het bijzonder de vorm van het spanning-rek-diagram een belangrijke invloed heeft op de barstdruk.

1.4. Begrippen en definities

Een transportleiding is een pijpleiding, niet behorend tot een distributienetwerk, voor het vervoer van gasen en vloeistoffen voorzover dit transport plaatsvindt buiten omsloten terreinen voor winning, verwerking, en/of opslag. De tot de pijpleiding behorende pomp-, verdeel- en andere bedrijfsinrichtingen worden tevens tot de transportleiding gerekend.

Waar in de TGSL 1986 het begrip transportleiding, pijpleiding of leiding wordt gebruikt, wordt steeds bedoeld een pijpleiding, voor het vervoer van gasen en/of vloeistoffen en/of mengsels hiervan voorzover dit transport plaatsvindt buiten omsloten terreinen voor winning, verwerking en/of opslag.

Leidingen behorend tot een distributienetwerk, worden in de TGSL - 1986 dus niet uitgesloten.

De pomp-, verdeel- en andere bedrijfsrichtingen worden in de TGSL - 1986 buiten beschouwing gelaten.

De atmosferische druk wordt in de TGSL - 1986 op 1 bar gesteld.

Bij inwendige overdruk (P_1) is de inwendige druk hoger dan de atmosferische druk.

Bij inwendige onderdruk (P_1) is de inwendige druk lager dan de atmosferische druk. Dit kan voorkomen bij drukstoten. Voldoende en betrouwbare beveiligingsapparatuur kan de maximale grootte van de onderdruk beperken.

Toelichting

De vorm van het spanning-rek-diagram beïnvloedt de diametervergroting waarbij barsten optreedt, en daarmee de barstdruk. De belasting op de buiswand is immers een functie van de druk en de aanwezige diameter. Tenslotte wordt er op gewezen dat het voorgaande geldt voor "gaaf" materiaal. Bij materiaal waarbij onvolkomenheden in zodanige afmetingen voorkomen dat de sterkte in de buiswand negatief wordt beïnvloed, zal de barstdruk lager zijn.

Tekst

Bij uitwendige overdruk (P_u) is de uitwendige druk hoger dan de atmosferische druk.

De druk (P) is het verschil tussen de inwendige overdruk of onderdruk (P_i) en de uitwendige overdruk (P_u).

De maximale bedrijfsdruk ($P_{\max}$) is de grootste druk die gedurende normaal bedrijf, in het beschouwde leidinggedeelte voor kan komen.

De gemiddelde bedrijfsdruk (P_{gem}) is de druk (P) waarbij gedurende 50% van de voorziene gebruiksduur de werkelijke druk (P) hoger is dan P_{gem} . Indien wordt afgezien van een bepaling van P_{gem} volgens deze regel, kan voor P_{gem} de waarde $0,5 P_{\max}$ worden genomen.

De laagste bedrijfsdruk ($P_{\min}$) is de laagste druk (P) die voor kan komen.

De ontwerpdruk (P_o) is de druk (P) waarop het betreffende leidinggedeelte wordt ontworpen.

De ontwerpdruk is gelijk aan de maximale bedrijfsdruk ($P_{\max}$) vermeerderd met drukverhogingen door drukstoten.

Deze drukverhogingen dienen te worden berekend. Hierbij dient niet alleen rekening te worden gehouden met bedrijfsstoringen zoals het uitvallen van één of meer compressoren of pompen, en het verkeerd bedienen van afsluiters, maar ook met het optreden van een breuk elders in de leiding. Voldoende en betrouwbare beveiligingsapparatuur tegen drukverhogingen, kan de maximale grootte er van beperken.

De vloedruk (P_v) is de inwendige druk waarbij tengevolge van uitsluitend inwendige druk juist vloeien van de leidingwand optreedt. Voor de rek- of vloeigrens van het staal wordt hierbij uitgegaan van de gegarandeerde minimum waarde, en voor de diameter en wanddikte van de nominale waarde. Restspanningen en vormafwijkingen en dergelijke worden hierbij buiten beschouwing gelaten.

Toelichting

1.5. Karakteristieke belastingen en zettingen

Met de term "zettingen" wordt in de TGSL - 1986 het geheel van al dan niet gelijkmatige zakkingen en zettingen bedoeld.

In het algemeen zijn alleen de langs de leidingas optredende verschillen in zakkingen en zettingen van belang voor het beoordelen van de veiligheid van de leiding en de waterkering.

Waar "harde punten" langs de leidingas voorkomen, zoals bijvoorbeeld bij damwandschermen, kan ook de absolute grootte van de zakkingen en zettingen van belang zijn.

Tekst

De beproevingdruk (P_t) is de maximale druk (P) tijdens de hydrostatische beproeving.

De barstdruk (P_{barst}) is de inwendige druk waarbij een leiding barst.

De bedrijfstemperatuur is de temperatuur die in de leiding tijdens bedrijf optreedt.

De laagste bedrijfstemperatuur is de laagste temperatuur die na het in gebruik nemen van de leiding, gedurende de gebruiksduur in de leiding voor kan komen.

De hoogste bedrijfstemperatuur is de hoogste temperatuur die na het in gebruik nemen van de leiding, gedurende de gebruiksduur in de leiding voor kan komen.

Uitgezonderd zijn temperatuurverhogingen als gevolg van laswerkzaamheden of dergelijke aan de leiding.

1.5. Karakteristieke belastingen en zettingen

De berekening van de leiding moet worden gebaseerd op de belastingen en zettingen zoals vermeld in de betreffende TAW-Leidraad [1.1], [1.2] c.q. art. 1.4, waarbij de onzekerheidsfactoren in rekening zijn gebracht. Deze belastingen en zettingen worden in dit aanhangsel karakteristieke belastingen en karakteristieke zettingen genoemd. Ze kunnen naar hun aard worden verdeeld in de volgende vier groepen, vermeld in 1.5.1, 1.5.2, 1.5.3 en 1.5.4.

1.5.1. Ontwerpdruk P_o

De ontwerpdruk volgens art. 1.4.

Toelichting

1.5.4. Uitwendige belastingen

Onder uitwendige belastingen worden in de TGSL - 1986 ook de effecten van veranderingen in de temperatuur begrepen.

Tekst

1.5.2. Gemiddelde bedrijfsdruk P_{gem}

De gemiddelde bedrijfsdruk volgens art. 1.4.

1.5.3. Laagste bedrijfsdruk P_{min}

De laagste bedrijfsdruk volgens art. 1.4.

1.5.4. Uitwendige belastingen

- eigen gewicht van de leiding en de inhoud
- belasting door bovenliggende grond, verkeer en waterdrukken
- belastingen ten gevolge van zettingen
- krachten en/of vervormingen ten gevolge van temperatuurveranderingen.
- andere uitwendige belastingen

1.6. Gebruikstoestanden

Gebruikstoestanden zijn toestanden waarin combinaties van de onder 1.5 genoemde karakteristieke belastingen en zettingen op de leiding werken. Deze combinaties zijn:

1.6.1. Bij berekening volgens de elasticiteitsleer

1.6.1.1. Inwendige druk en uitwendige belastingen

Hierbij wordt de ontwerpdruk (P_o) volgens art. 1.5.1 gecombineerd met de uitwendige belastingen volgens art. 1.5.4.

1.6.1.2. Uitwendige belastingen

Hierbij worden de uitwendige belastingen volgens art. 1.5.4 gecombineerd met de laagste bedrijfsdruk (P_{min}) volgens art. 1.5.3.

Toelichting

1.6.2. Bij berekening volgens de plasticiteitsleer

De combinatie volgens 1.6.2.1 is van belang voor de berekening van de sterkte op inwendige druk.

De combinatie volgens 1.6.2.3 is van belang voor de grenstoestanden rekken en vervormingen.

De combinatie volgens 1.6.2.2 is van belang voor de grenstoestanden vermoeiing en wisselend vloeien. In hoofdstuk 3 wordt dit verder toegelicht.

1.7. Grenstoestanden

De twee bezwijkvormen die bij transportleidingen op kunnen treden zijn:

- Het ontstaan van ontoelaatbaar grote vervormingen, zoals een te grote onrondheid en het optreden van plooien en knikken.
- Het ontstaan van lekkage door scheurvorming c.q. barsten.

Op basis hiervan zou kunnen worden volstaan met het definiëren van twee grenstoestanden, namelijk "vervormingen" en "scheurvorming". Rekentechnische overwegingen hebben er echter toe geleid dat in de TGSL - 1986 in plaats van deze twee, de vijf in de tekst vermelde grenstoestanden worden gegeven.

De grenstoestanden spanningen, rekken, wisselend vloeien en vermoeiing kunnen worden beschouwd als "afgeleide" grenstoestanden van de "elementaire" grenstoestand scheurvorming.

Tekst

1.6.2. Bij berekening volgens de plasticiteitsleer

1.6.2.1. Inwendige druk

De ontwerpdruk volgens art. 1.5.1.

1.6.2.2. Inwendige druk en uitwendige belastingen

Hierbij wordt de gemiddelde bedrijfsdruk (P_{gem}) volgens art. 1.5.2, gecombineerd met de uitwendige belastingen volgens art. 1.5.4.

1.6.2.3. Uitwendige belastingen

Hierbij worden de uitwendige belastingen volgens art. 1.5.4 gecombineerd met de laagste bedrijfsdruk (P_{min}) volgens art. 1.5.3.

1.7. Grenstoestanden

Een grenstoestand is een toestand waarin de constructie geacht wordt onbruikbaar te zijn geworden c.q. één of meer onderdelen zijn opgehouden de functie te vervullen waarvoor zij zijn ontworpen.

De volgende grenstoestanden worden onderscheiden:

1.7.1. De grenstoestand spanningen

De grenstoestand van rekenkundige spanningsoverschrijding.

1.7.2. De grenstoestand rekken

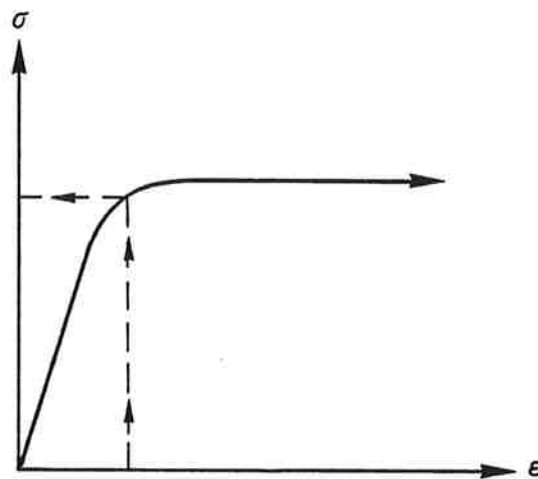
De grenstoestand van rekenkundige rekoverschrijding.

1.7.3. De grenstoestand vervormingen

De grenstoestand van ontoelaatbaar grote vervormingen. Deze kunnen bijvoorbeeld zijn een ontoelaatbaar grote onrondheid, het optreden van plooiën, en indien grote normaalkrachten optreden, het uitknikken van de leiding.

Toelichting

De grenstoestanden spanningen en rekken zijn aan elkaar gekoppeld. Immers, indien het criterium voor de rekken is vastgesteld is daarmee tevens, via de bekend veronderstelde spanning-rek-relatie van het staal, het criterium voor de spanningen vastgelegd. In figuur T1-1 is dit aangegeven.



Figuur T1-1.

Zo beschouwd zou men de grenstoestand spanningen dus kunnen laten vervallen. Praktische overwegingen hebben er echter toe geleid dat deze grenstoestand toch is opgenomen. Bij toepassing van de elasticiteitsleer is het namelijk gebruikelijk de optredende spanning te berekenen en deze te toetsen aan de grenswaarde. Bij toepassing van de plasticiteitsleer dienen de optredende rekken niet groter te zijn dan de rekken die het materiaal (plaatmateriaal met de daarin voorkomende lassen) kan opbrengen (de rekapaciteit).

Bij de veelal gebruikelijke aanname van een lineair verband tussen spanningen en rekken tot het bereiken van σ_e (wet van Hooke), vormt de grenswaarde σ_e bij de grenstoestand spanningen tevens de begrenzing van het toepassingsgebied van de elasticiteitsleer.

Tekst

1.7.4. De grenstoestand wisselend vloeien

De grenstoestand van het optreden van wisselend vloeien (hangt samen met de grenstoestanden rekken en vervormingen).

1.7.5. De grenstoestand vermoeiing

De grenstoestand van het optreden van scheurvorming door vermoeiing.

Toelichting

Mits het staal voldoende taai, en de uitvoering van de constructie voldoende zorgvuldig is, kunnen in werkelijkheid echter aanzienlijk grotere rekken worden opgenomen dan de rek ϵ_e die bij het bereiken van σ_e optreedt. Behalve dat het vervormingsvermogen bij het bereiken van σ_e in het algemeen nog niet is uitgeput, is in het algemeen ook ten aanzien van het draagvermogen nog een zekere reserve aanwezig. De grootte van deze reserve is afhankelijk van de rekapaciteit van het gebruikte staal, van de vorm van de constructie en van de aard van de belastingen. Een en ander kan worden beschreven met behulp van de plasticiteitsleer. De elasticiteitsleer is dan dus niet meer toereikend.

Bij overschrijding van de werkelijk aanwezige rekapaciteit zal in de leiding scheurvorming ontstaan.

De grootte van de werkelijk aanwezige rekapaciteit is onder meer afhankelijk van de taaiheidseigenschappen van het gebruikte staal en de grootte, de plaats en de vorm van de aanwezige inhomogeniteit(en) in de leidingwand, bijvoorbeeld lasonvolkomenheden c.q. lasfouten. In art. 1.11 is aangegeven hoe een bepaalde rekapaciteit kan worden gewaarborgd. Deze gewaarborgde rekapaciteit vormt de grenswaarde bij de grenstoestand rekken.

Het voorgaande houdt in dat ook bij overschrijding van de grenstoestand rekken veelal nog niet direct scheurvorming zal ontstaan. De kans dat juist ter plaatse van de maximale rek, zich een inhomogeniteit bevindt van de grootte en vorm, waarvan bij de beschouwing van art. 1.11 is uitgegaan, en ter plaatse de taaiheid van het staal gelijk is aan de veronderstelde laagste waarde (= gewaarborgde waarde), is in het algemeen zeer klein.

Tekst

Toelichting

Overschrijding van de grenstoestand rekken kan ontstaan doordat de inwendige druk te hoog wordt, alsmede doordat de vervormingen van de leiding, zoals kromming en ovalisering te groot worden, of indien vervormingen zoals plooiën optreden. Hierdoor is de grenstoestand vervormingen niet alleen van belang voor de beheerder van de leiding (belemmering van de normale bedrijfsvoering, zoals moeilijkheden met de doorvoer van schoonmaakapparatuur), maar ook voor de beheerder van de waterkering of een ander waterstaatswerk en voor anderen die bij lekkage schade kunnen ondervinden.

Wisselend vloeien kan, mits het aantal wisselingen en de omvang van de rek per wisseling voldoende groot is, leiden tot scheurvorming. Wisselend vloeien wordt ook wel plastische vermoeiing genoemd.

Bij "gewone" vermoeiing is de variatie in de rek (= het verschil tussen de maximale rek en de minimale rek) ten hoogste gelijk aan twee keer de vloeirek.

In vergelijking met plastische vermoeiing is bij "gewone" vermoeiing het aantal wisselingen dat nodig is voor scheurvorming meestal zeer veel groter.

Voor een verdere toelichting op de hier genoemde grenstoestanen wordt verwezen naar [3.1], en naar de toelichtingen in hoofdstuk 4.

1.8. Berekeningswijze, rekenbelastingen en rekenzettingen

In dit aanhangsel worden berekeningsmethoden gegeven, die berusten op het beschouwen van grenstoestanen, dat wil zeggen toestanden, die niet mogen worden overschreden. Tussen een gebruikstoestand en een grenstoestand is een veiligheidsmarge nodig om de kans op het overschrijden van de grenstoestand aanvaardbaar klein te houden.

Tekst

1.8. Berekeningswijze, rekenbelastingen en rekenzettingen

Bij de berekening wordt uitgegaan van rekenwaarden voor de belastingen en de zettingen. Deze worden rekenbelastingen en rekenzettingen genoemd. Ze worden verkregen door de karakteristieke belastingen en karakteristieke zettingen volgens art. 1.5 te vermenigvuldigen met de bijbehorende rekenfactoren volgens art. 1.9.

Toelichting

De veiligheidsmarge wordt verkregen door de belastingen (waarin zijn begrepen zettingen en zettingsverschillen), die in de gebruikstoestand optreden, te vermenigvuldigen met rekenfactoren, en te eisen dat in deze situatie geen grenstoestand wordt overschreden.

De hier gegeven berekeningswijze is anders dan de tot nu toe in veel berekeningsvoorschriften voor transportleidingen toegepaste "toelaatbare spanningen" methode.

Bij de keuze van de in deze TGSL voorgeschreven berekeningswijze hebben de volgende overwegingen een rol gespeeld.

- a. In die gevallen waarbij geen rechtevenredig verband mag worden aangenomen tussen de belastingen en de daardoor veroorzaakte spanningen c.q. vervormingen, is een beschouwing van grenstoestanden logischer dan een berekening met toelaatbare spanningen, en geeft een beter beeld van de reserve die in de gebruikstoestand aanwezig is. Met name geldt dit voor berekeningen volgens de plasticiteitsleer, en voor berekeningen waarbij het tweede orde effect niet mag worden verwaarloosd.
- b. De onzekerheden zijn niet voor elk soort belasting even groot (vergelijk eigen gewicht en belasting tengevolge van zettingsverschillen), en de overschrijding van niet elke grenstoestand is even desastreus. De berekening met grenstoestanden opent de weg om de veiligheidsmarges te differentiëren. In de TAW-Leidraden [1.1] en [1.2] vormen de daar gehanteerde onzekerheidsfactoren een aanzet tot een dergelijke differentiatie.
- c. Ook in andere, verwante disciplines wordt de berekening met de grenstoestanden steeds meer aanvaard (zie bijvoorbeeld de TGB 1972 [1.12] en de Eurocodes [1.13]).
- d. De berekeningswijze die berust op het beschouwen van grenstoestanden is niet moeilijker of ingewikkelder dan de op toelaatbare spanningen gebaseerde berekeningswijze.

Voor een verdere toelichting wordt verwezen naar [3.1].

Tekst

Door de karakteristieke belastingen in de verschillende gebruikstoestanden volgens art. 1.6, te vermenigvuldigen met de bijbehorende rekenfactoren volgens art. 1.9, ontstaan rekentoestanden.

Bij geen van de rekentoestanden mag een grenstoestand worden bereikt. Om dit aan te kunnen tonen dienen de rekenkrachten c.q. rekenspanningen werkend op de buisdoorsneden, alsmede de rekenrekken en de rekenvervormingen met behulp van de toegepaste mechanica (elasticiteitsleer en/of plasticiteitsleer) uit de rekenbelastingen en rekenzettingen te worden bepaald.

Vervolgens moet worden aangetoond dat de rekenkrachten c.q. rekenspanningen alsmede rekenrekken en rekenvervormingen niet groter zijn dan de grenswaarden voor deze krachten c.q. spanningen, rekken en vervormingen.

Waar in de hoofdstukken 2 en 3 wordt gesproken over belastingen, zettingen, spanningen, rekken en vervormingen wordt, tenzij anders vermeld, steeds de rekenwaarde bedoeld.

Toelichting

1.9. Rekenfactoren

De grootte van de benodigde rekenfactoren (γ) is onder andere afhankelijk van:

- a. De onzekerheden in de grootte van de te verwachten belastingen, zakkings, zettingen en zettingsverschillen.
- b. De onzekerheden in de berekende sterkte van de constructie, de onzekerheden in de materiaaleigenschappen en afmetingen, onnauwkeurigheden in de berekening en de uitvoering van de constructie.
- c. Het gewenste veiligheidsniveau. Dit veiligheidsniveau kan afhankelijk worden gesteld van de ernst van de beschouwde grenstoestand. Hiermee wordt bedoeld de omvang van de schade die bij het overschrijden van de beschouwde grenstoestand op kan treden. Deze schade kan, behalve schade aan de waterkering zelf, ook zijn milieuverontreiniging, en bij waterkeringen, schade aan de waterkering en inundatieschade als gevolg van het niet meer functioneren van de waterkering.

Op basis van de ISO-norm 2394 - 1973 kan het beoordelingscriterium van een constructie als volgt worden uitgedrukt:

$$R^* \geq Q^* \quad \text{..... (T1-6)}$$

waarin:

R^* = de rekensterkte ("de ten minste aanwezige sterkte")
 Q^* = de rekenbelasting

De rekensterkte R^* en de rekenbelasting Q^* kunnen als volgt worden geschreven:

Tekst

1.9. Rekenfactoren

Voor de rekenfactoren voor de karakteristieke belastingen en de karakteristieke zettingen moet, tenzij anders is aangegeven, tenminste 1,5 keer de reciproke waarde van de schadefactor (sf) zoals beschreven in de Leidraden in rekening worden gebracht.

Toelichting

$$R^* = \frac{R}{\gamma_m} \quad \text{..... (T1-7)}$$

$$Q^* = \gamma_s Q_k \quad \text{..... (T1-8)}$$

waarin:

γ_m = veiligheidsfactor op de berekende sterkte (voor staal-constructies veelal 1,0 à 1,1)

γ_s = belastingfactor om onzekerheden in de belastingen op te kunnen vangen (bij gebouwen e.d. veelal 1,3 à 1,5)

R = berekende sterkte

Q_k = karakteristieke belasting (= de belasting die met slechts een geringe kans wordt overschreden)

Het bovenvermelde beoordelingscriterium kan ook als volgt worden uitgeschreven:

$$\gamma_1 Q_1 + \gamma_2 Q_2 + \gamma_3 Q_3 + \text{.....} \leq \frac{R}{\gamma_4 \cdot \gamma_5} \quad \text{..... (T1-9)}$$

waarin:

$Q_1, Q_2, Q_3 \text{}$ = karakteristieke belastingen, zakkingen en zettingen

$\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3 \text{}$ = belastingfactoren voor $Q_1, Q_2, Q_3 \text{}$

R = berekende sterkte

γ_4, γ_5 = veiligheidsfactoren op R

Zoals eerder is gesteld is de grootte van de benodigde rekenfactoren afhankelijk van de onzekerheden en het gewenste veiligheidsniveau. Een hulpmiddel om de rekenfactoren vast te stellen is het uitvoeren van risico-analyses.

Vanwege gebrek aan voldoende gegevens zijn deze risico-analyses echter nog niet, of nog slechts gebrekkig uitvoerbaar.

Tekst

Toelichting

Dit laatste heeft er toe geleid dat vooralsnog besloten is om op enkele uitzonderingen na, één enkele rekenfactor in te voeren. Deze uitzonderingen worden in de betreffende tekst aangegeven. Zie ondermeer art. 3.2.2.2.

De waarde $1,5/sf$ is afgeleid uit de vóór het publiceren van dit aanhangsel gebruikelijke berekeningsmethode, gebaseerd op toelaatbare spanningen. Als voorwaarde hierbij geldt:

$$\sigma < \bar{\sigma} = 0,67 \cdot sf \cdot \sigma_e = \frac{\sigma_e \cdot sf}{1,5} \quad \dots\dots (T1-10)$$

Hierin is σ de maatgevende spanning in de zoëven genoemde berekeningsmethode.

De betrekking (T1-6) kan ook worden geschreven als:

$$\frac{1,5}{sf} \sigma < \sigma_e \quad \dots\dots (T1-11)$$

Hierin is $\frac{1,5}{sf}$ de rekenfactor, en de spanning $\frac{1,5 \cdot \sigma}{sf}$ de reken-spanning.

1.10. Constructieve vormgeving

Voor een veilige leiding is naast een goede berekening en een goede uitvoering, ook de constructieve vormgeving van groot belang.

Hierdoor kan worden bereikt dat de leiding een groot incasseringsvermogen heeft, en de kans dat dit incasseringsvermogen wordt aangesproken, zo klein mogelijk is. Onder incasseringsvermogen wordt verstaan het vermogen om onder onverwachte omstandigheden, zoals een onverwacht grote zetting, niet lek te raken, c.q. niet ontoelaatbaar te vervormen.

Ten aanzien van de vormgeving leidt het voorgaande ondermeer tot de volgende uitgangspunten:

Tekst

1.10. Constructieve vormgeving

De constructieve vormgeving dient zodanig te zijn dat een goede uitvoering mogelijk is, en het risico van het optreden van lekkage en onaanvaardbaar grote vervormingen door onverwachte gebeurtenissen, voldoende klein is.

In verband met het voorgaande dienen in het algemeen discontinuïteiten in de constructie van de leiding te worden vermeden. Indien ze toch worden toegepast dient hieraan speciale aandacht te worden besteed. Voorbeelden van grote discontinuïteiten zijn flensverbindingen, appendages en ringverstijvingen.

Toelichting

- Contacten met starre objecten zoals damwanden e.d. moeten worden vermeden, ook na het optreden van zettingen, en rekening houdend met bouw- en montagefouten.
- Grote discontinuïteiten in de constructie van de leiding moeten worden vermeden, dan wel eisen speciale aandacht indien ze noodzakelijk zijn. Voorbeelden kunnen zijn flensverbindingen, appendages en ringverstijvingen.

Met "speciale aandacht" wordt in deze bedoeld, dat men de invloed van deze constructie-onderdelen op de sterkte-, stijfheids- en vervormingseigenschappen van de leiding moet onderzoeken. Met name is van belang het gedrag bij onvoorzien grote opgedrongen vervormingen van de leiding, bijvoorbeeld in de vorm van grote krommingen en ovalisering en bij onvoorzien grote zettingsverschillen.

Ten aanzien van de materiaalkeuze en de uitvoering geldt:

- Het gebruikte staal en de toegepaste lassen moet voldoende taai zijn.

Daarnaast moet de leiding vrij zijn van fabrikagefouten. Onder fabrikagefouten worden in deze verstaan: onvolkomenheden bij de fabrikage en montage van een zodanige ernst en omvang dat de sterkte en/of de rekapaciteit van de leidingwand hierdoor ontoelaatbaar veel afneemt.

In art. 1.11.1 worden ten aanzien van de volgende aspecten kwantitatieve gegevens vermeld:

- de taaiheid van het staal en het lasmateriaal
- de grootte, de vorm en de hoeveelheid van de onvolkomenheden die mogelijk aanwezig c.q. toelaatbaar worden geacht
- de rekapaciteit als functie van de taaiheid en de mogelijk aanwezig geachte onvolkomenheden.

Tekst

Toelichting

1.11.1.1. Algemeen, σ - ϵ diagram

De voorwaarde dat de werkelijk gemeten rekgrens niet meer mag bedragen dan 85% van de werkelijk gemeten treksterkte is overgenomen uit de API materiaalspecificaties. In de Leidraad voor oliepíjp-leidingen [1.4] wordt naar deze specificaties verwezen. In NEN 1091 [1.3] is een dergelijke verwijzing niet opgenomen.

Indien bij het ontwerp wordt uitgegaan van de vloedruk als criterium, wordt de werkelijke veiligheid tegen barsten mede beïnvloed door de verhouding tussen de rekgrens en de treksterkte. Voorts is deze verhouding ook van belang bij discontinuïteiten en onvolkomenheden in de uitvoering.

1.11. Materiaaleigenschappen

1.11.1. Staal

1.11.1.1. Algemeen, σ - ϵ diagram

Indien bij het ontwerp het σ - ϵ diagram van het toe te passen buis-materiaal bekend is, kan dit in de berekeningen worden ingevoerd. Indien dit niet het geval is, of indien de beschikbare berekeningsmethode het invoeren van een kromlijinig σ - ϵ diagram niet toelaat, mag worden uitgegaan van het bilineaire σ - ϵ diagram van figuur 1-1, met $E_v = 0$. Indien gewenst mag $E_v = E/1000$ worden genomen. Dit laatste kan het geval zijn bij computerberekeningen.

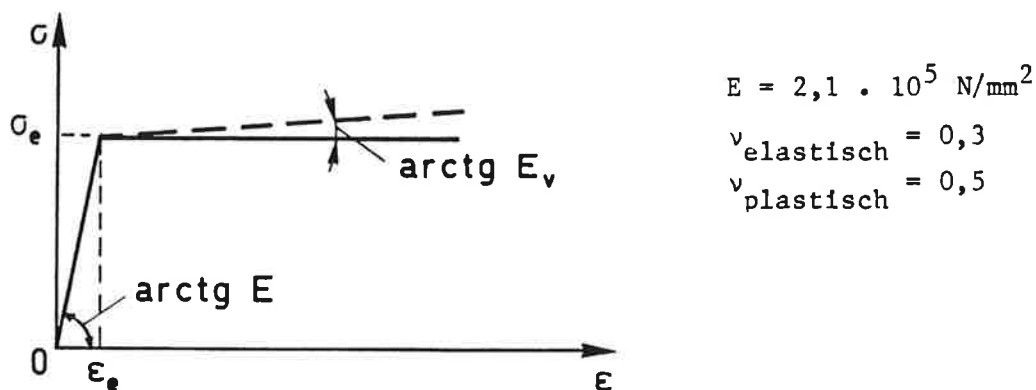


Fig. 1-1: σ - ϵ diagram voor staal.

De werkelijk gemeten rekgrens ($\sigma_{0,2}$ resp. $\sigma_{0,5}$) mag niet meer bedragen dan 85% van de werkelijk gemeten treksterkte σ_{tw} .

De in rekening te brengen σ_e mag niet meer bedragen dan 75% van de gegarandeerde minimum waarde van de treksterkte σ_t .

Eerder genoemde waarden dienen bij kamertemperatuur (20°C) te worden bepaald, en gelden voor leidingen met een bedrijfstemperatuur van ten hoogste 50°C.

Toelichting

1.11.1.2. Toegelaten materialen, materiaalspecificaties, kwaliteit van het laswerk

De ervaring van de afgelopen decennia heeft geleerd dat met de gebruikelijke berekeningsmethoden volgens de elasticiteitsleer, constructievormen, toegepaste materialen en materiaal- en las-specificaties, scheurvorming in ingegraven stalen leidingen vrijwel niet voorkomt. De belangrijkste oorzaken van de in het verleden opgetreden schadegevallen zijn beschadiging door graafmachines en dergelijke, een slechte uitvoering, en corrosie. Slechts in ongeveer 15% van de gevallen kan de oorzaak worden toegeschreven aan fouten met betrekking tot de betreffende berekeningsmethode en/of de toegepaste materialen c.q. materiaal- en/of lasspecificaties.

Bij toepassing van berekeningsmethoden die gebaseerd zijn op de plasticiteitsleer en bij gebruik van andere materialen, lasmethoden en dergelijke dan gebruikelijk, ontbreekt in het algemeen de in het voorgaande vermelde ervaring.

Zoals reeds eerder is gesteld wordt bij toepassing van de plasticiteitsleer beter rekening gehouden met de werkelijke materiaaleigenschappen dan bij toepassing van de elasticiteitsleer. Zo wordt meer bewust rekening gehouden met de rekapaciteit van staal met de daarin mogelijk aanwezig geachte inhomogeniteiten, bijvoorbeeld in de vorm van lasonvolkomenheden^{*)}.

^{*)}In Nederland worden inhomogeniteiten in lassen (bijv. poreusheid, slak, onvoldoende doorlassing e.d.) vaak aangeduid met het begrip "lasfouten", ook als ze aanvaardbaar zijn. In veel andere landen zijn lasfouten per definitie niet aanvaardbaar. In Engelstalige landen bijv. zijn "weld discontinuities" aanvaardbaar en "weld defects" niet.

Tekst

Bij leidingen met een bedrijfstemperatuur hoger dan 50°C moet rekening worden gehouden met het effect van de temperatuur op de materiaaleigenschappen.

1.11.1.2. Toegelaten materialen, materiaalspecificaties, kwaliteit van het laswerk

Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen:

- a. Transportleidingen berekend met de elasticiteitsleer (hoofdstuk 2 van de TGSL), en waarbij materialen en lasmethoden worden gebruikt waarmee voor wat betreft het voorkomen van brosse breuk voldoende ervaring bestaat. Dit laatste wordt het geval geacht als de betreffende materialen, lasmethoden, lastoevoegmaterialen en de daarbij behorende kwaliteitseisen de instemming hebben van de Dienst voor het Stoomwezen.
- b. Transportleidingen berekend met de plasticiteitsleer (hoofdstuk 3 van de TGSL).

Bij de onder b genoemde transportleidingen worden aanvullende waarborgen voor de rekapaciteit gevraagd, zoals vermeld in art.

1.11.1.3.

Bij de onder a genoemde transportleidingen gelden geen aanvullende waarborgen voor de rekapaciteit. Overigens wordt er op gewezen dat indien wel aan de gegeven voorwaarden voor de rekapaciteit zoals gegeven in art. 1.11.1.3 wordt voldaan, het incasseringsvermogen en daarmee de veiligheid in gunstige zijn worden beïnvloed.

Bij gastransportleidingen geldt dat bij kruisingen met waterkeringen moet worden aangetoond dat indien er een doorgaande scheur zou ontstaan (scheurpropagatie), deze scheur met 95% betrouwbaarheid binnen een buislengte stopt.

Voor aardgastransportleidingen kan gebruik worden gemaakt van [1.17] en [2.5].

Toelichting

Hieraan zijn twee belangrijke consequenties verbonden. Ten eerste een berekeningstechnische, namelijk dat met de plasticiteitsleer het ware gedrag van de constructie beter kan worden beschreven, en ten tweede het ontstaan van de behoefte om de rekapaciteit waarmee wordt gerekend, ook te waarborgen.

Het onderzoek van de subgroep materiaaleisen heeft aangetoond dat wanneer is voldaan aan de in art. 1.11.1.2 t/m art. 1.11.1.5 vermelde voorwaarden, gewaarborgd is dat de rekapaciteit waarmee wordt gerekend, ook aanwezig zal zijn.

Of al dan niet scheurpropagatie optreedt, hangt af van de inwendige gasdruk, de aard van het gas, de afmetingen en vormgeving van de leiding en de materiaaleigenschappen.

Voor een verdere toelichting en kwantitatieve gegevens wordt verwezen naar [2.5]. Het rapport [2.5] is mede gebaseerd op het onderzoek van de "European Pipeline Research Groep (EPRG)". Dit is een groep van buizenfabrikanten en gastransportmaatschappijen in West-Europa. Bij het betreffende onderzoek was het Metaalinstituut TNO betrokken als consultant.

De publikatie [2.5] is in overeenstemming met de aanbevelingen van de EPRG in [1.17].

Voor het hoofdtransportleidingnet van de N.V. Nederlandse Gasunie, waarin de bedrijfsdruk maximaal 66,2 bar bedraagt, wordt volgens [2.5] bij een kerfslagwaarde van tenminste 31 Joule (bij 20°C) aan de gestelde eis voldaan, als de wanddikte tenminste gelijk is aan de in de tabel gegeven waarden.

Tekst

Toelichting

D_u [inch]	[mm]	t [mm]	$\sigma_{yp} = \frac{(D_u - t) P}{2 t}$ [N/mm ²]
16	406	3,07	434
18	457	5,98	250
24	610	8,78	227
30	762	11,84	210
36	914	15,08	197
42	1067	18,52	187
48	1219	22,13	179

1.11.1.3. Aanvullende waarborgen voor de rekapaciteit

De voorwaarde (1-1) is afgeleid van de ontwerpkromme van Burdekin en Dawes [4.4], waarin wordt aangegeven welke δ_c ("taaiheid") nodig is om bij een aangenomen vorm en grootte van de inhomogeniteit een bepaalde rek veilig op te kunnen nemen.

Omdat in gelaste constructies tengevolge van het lassen restspanningen en dus ook restrekken aanwezig zijn, is de rek die in de rekentoestand van het staal aanwezig is, de som van de berekende rek (ϵ) en de restrek ϵ_r .

Voor de totale rek (ϵ_{totaal}) volgt dan:

$$\epsilon_{\text{totaal}} = \epsilon + \epsilon_r \quad \dots\dots (T1-12)$$

Burdekin en Dawes zijn bij hun ontwerpkromme uitgegaan van de totale rek ϵ_{totaal} .

Tekst

1.11.1.3. Aanvullende waarborgen voor de rekcapaciteit

Met behulp van de CTOD beschouwing kan worden aangetoond dat is voldaan aan de eis van voldoende rekcapaciteit. De CTOD eis luidt in dat geval:

$$\delta_c > 2 \pi \bar{a} (\epsilon + \epsilon_r - 0,25 \epsilon_e) \quad \dots (1-1)$$

Hierin is:

δ_c = de maatgevende kritische CTOD waarde (zie 1.11.1.4)

$2 \bar{a}$ = de effectieve scheurlengte (zie 1.11.1.5)

ϵ = de in de rektoestand in enig punt van de leidingomtrek berekende positieve rek. Voor negatieve rek (stuik) geldt geen CTOD eis

$$\epsilon_e = \frac{\sigma_e}{E}$$

ϵ_r = de in rekening te brengen restrek:

. $\epsilon_r = 0$ bij spanningsarm gegloeide lassen

Toelichting

Voor $\epsilon_{\text{totaal}} < 0,5 \epsilon_e$ geldt:

$$\phi = \left(\frac{\epsilon_{\text{totaal}}}{\epsilon_e} \right)^2 \quad \dots\dots (T1-13)$$

Voor $\epsilon_{\text{totaal}} > 0,5 \epsilon_e$ geldt:

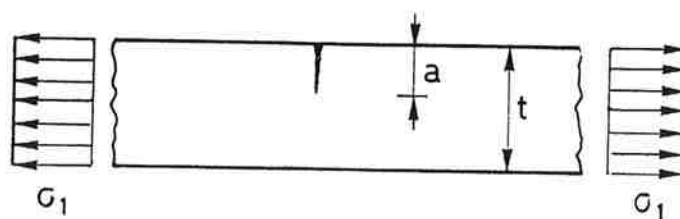
$$\phi = \frac{\epsilon_{\text{totaal}}}{\epsilon_e} - 0,25 \quad \dots\dots (T1-14)$$

De ontwerpkromme van Burdekin en Dawes is in fig. T1-3 getekend.

Bij de proeven die ten grondslag hebben gelegen aan de opzet van de CTOD beschouwing kwamen plaatdikten kleiner dan 5 mm niet voor. Ook stuit het uitvoeren van CTOD proeven bij plaatdikten kleiner dan 5 mm op bezwaren bij de praktische proefuitvoering.

Wanneer de afmetingen van de inhomogeniteit erg groot zijn ten opzichte van de breedte en dikte van de plaat is niet meer voldaan aan de uitgangspunten bij de CTOD beschouwing. In dat geval kan de sterkte worden beoordeeld aan de hand van het zogenoemde "plastic collapse" criterium. Bij zeer grote lengte van een inhomogeniteit met diepte a geldt dan:

$$\sigma_1 < \frac{\sigma_{\text{flow}} \cdot (t - a)}{t} \quad \dots\dots (T1-15)$$



Figuur T1-2.

Hierin wordt σ_{flow} veelal gedefinieerd als de vloeispanning vermeerderd met 50 N/mm².

Voor verdere gegevens wordt verwezen naar [1.8] en [5.5].

Tekst

- $\epsilon_r = 0,5 \epsilon_e$ bij lassen waarbij de richting van de aangenomen inhomogeniteit overeenkomt met de richting van de las
- $\epsilon_r = 1,0 \epsilon_e$ bij lassen waarbij de richting van de aangenomen inhomogeniteit loodrecht staat op de richting van de las

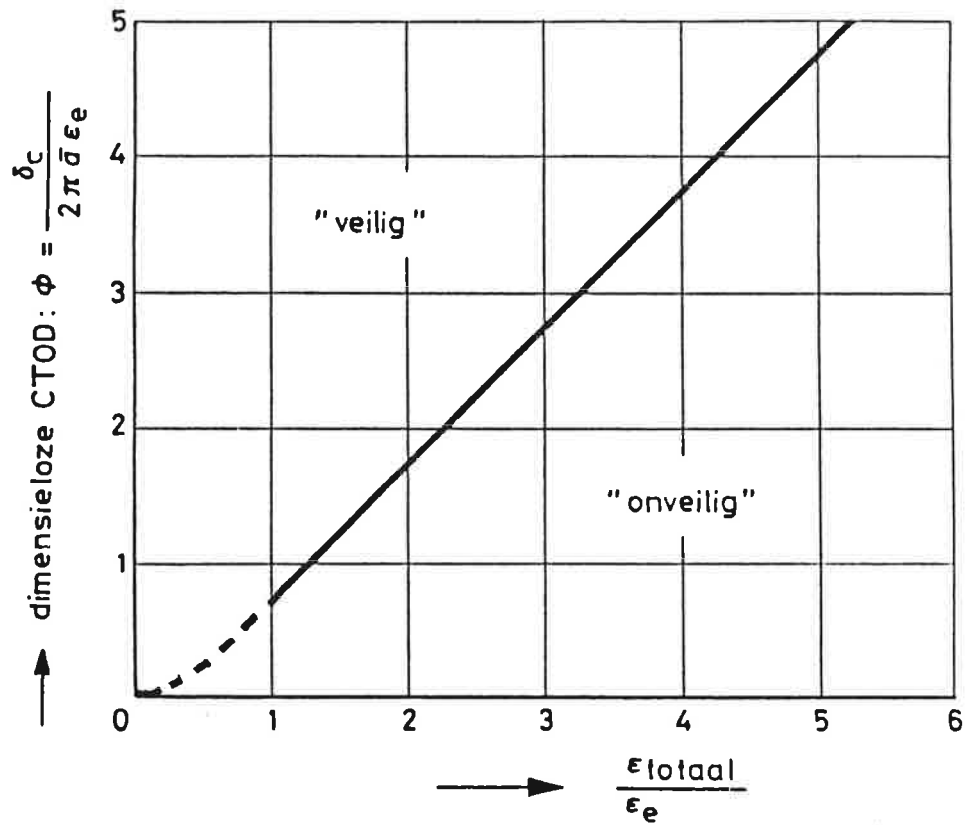
Indien wordt voldaan aan de volgende voorwaarden mag de CTOD beschouwing zoals aangegeven in de TGSL worden toegepast.

- a. De wanddikte is tenminste 5 mm.
- b. De diameter is tenminste 150 mm.
- c. De grootte van de in rekening te brengen inhomogeniteit is niet groter dan toegelaten in de Regels voor toestellen onder druk van de Dienst voor het Stoomwezen [1.5].

Indien niet wordt voldaan aan deze voorwaarden kan het zogenoemde "plastic collapse" criterium maatgevend zijn. Of dat in een bepaalde situatie het geval is, kan worden beoordeeld aan de hand van [1.8].

Als niet wordt voldaan aan de eerder genoemde voorwaarden b en c kan een spannings- en rekverhogende invloed optreden. Voor een beoordeling wordt verwezen naar het rapport MATERIAALEISEN [3.2] en naar [1.8].

Toelichting



Figuur T1-3. De ontwerpkromme van Burdekin en Dawes.

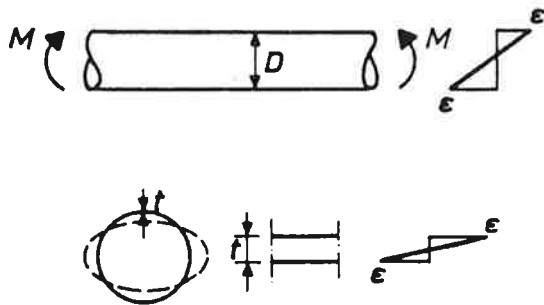
De CTOD beschouwing is van belang voor transportleidingen die met de plasticiteitsleer worden berekend, zodat ϵ_{totaal} tenminste gelijk is aan ϵ_e . Het gestippelde gedeelte in de figuur kan daarom buiten beschouwing worden gelaten.

Als de afmetingen van de aanwezig veronderstelde inhomogeniteiten zeer groot worden ten opzichte van de afmetingen van de leiding, is niet meer voldaan aan het uitgangspunt bij de "wide-plate tests" waaraan de CTOD beschouwing is gerelateerd. Dit uitgangspunt is dat de plaat zo breed moet zijn dat de randen het gedrag nabij de inhomogeniteit slechts in verwaarloosbare mate mogen beïnvloeden.

Tekst

Toelichting

In deze uitgave van de TGSL wordt geen onderscheid gemaakt tussen normaalkrachten in de leidingwand, zoals deze optreden bij buiging van de leiding als ligger, en buigrekken die bijvoorbeeld



Figuur T1-4.

optreden als de leiding ovaal wordt. De subgroep materiaal-eisen verwacht dat bij dezelfde materiaaleigenschappen en grootte van de inhomogeniteit de opneembare buigrekken aanzienlijk groter zijn dan de opneembare normaalkrachten.

De reden hiervoor is dat de tip van de scheur waarvan in deze beschouwing wordt uitge-

gaan, bij verder scheuren bij buigrekken de neutrale lijn nadert en dus minder zwaar wordt belast. Dit is in tegenstelling tot de situatie bij normaalkrachten, waar de "belasting" aan de tip van de scheur bij verder scheuren nagenoeg dezelfde blijft.

Omdat de in het voorgaande vermelde gunstige invloed (nog) niet is gekwantificeerd moeten noodgedwongen buigrekken op dezelfde wijze worden behandeld als normaalkrachten.

Tenslotte wordt opgemerkt dat in de rekentoestand ook bij constructies berekend met de elasticiteitsleer plaatselijk tot zeer plaatselijk grotere rekken optreden dan de vloeirek. Een en ander is onder meer een gevolg van de eerder vermelde inhomogeniteiten, de toegepaste vereenvoudigingen bij de schematisering en de tengevolge van het walsen en het lassen ontstane rekken. Zie het rapport MATERIAALEISEN [3.2].

Tekst

Toelichting

1.11.1.4. Bepaling van de maatgevende δ_c

Voor het ontwerp wordt uitgegaan van een veilige schatting van de gemiddelde δ_c die in een bepaald materiaal aanwezig is ($\bar{\delta}_c$). Hierbij speelt de overweging een rol dat indien aan de tip van een inhomogeniteit de δ_c (taaiheid) lager is dan $\bar{\delta}_c$, bij eventuele scheurvorming of scheuruitbreiding het scheurtje vrij spoedig in een zone met een hogere δ_c (taaiheid) komt, waarbij de scheur stopt. Vanwege de eis dat de laagste δ_c tenminste 0,075 mm moet bedragen zal eventuele scheurvorming of scheuruitbreiding zeker taai verlopen.

Onderstaand is een voorbeeld voor een mogelijke beproevingsprocedure, ontleend aan het rapport MATERIAALEISEN, gegeven:

Fase I

In eerste instantie wordt uitgegaan van een steekproef van drie CTOD proeven aan het betreffende lasmetaal.

Indien hierbij alle gemeten δ_c waarden hoger zijn dan de vereiste waarde, dan wordt de betreffende lasprocedure goedgekeurd.

Fase II

Indien één of meer van de drie gemeten δ_c waarden in de onder fase I genoemde steekproef lager is dan de vereiste waarde, kan de steekproef worden uitgebreid met nog eens drie CTOD proeven. Indien alle proefresultaten voldoen aan de onderstaande betrekkingen (T1-14) en (T1-15) wordt alsnog tot goedkeuring besloten.

Tekst

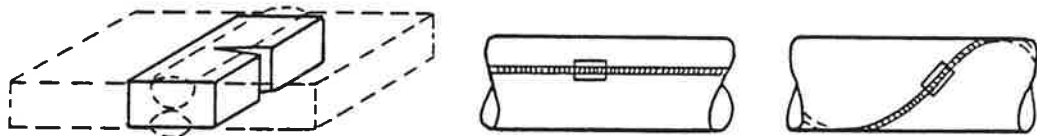
1.11.1.4. Bepaling van de maatgevende δ_c

De CTOD proeven moeten worden uitgevoerd in overeenstemming met British Standard 5762 [1.9].

In figuur 1-1 is aangegeven hoe de positie is van de CTOD proefstukken bij de beoordeling van het lasmetaal van de langslas, c.q. de schroefvormige las bij schroefvormig gelaste buizen, en het lasmetaal van de rondlas.

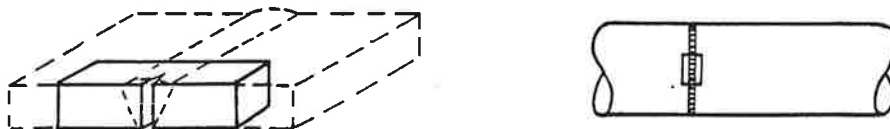
Langslas, c.q. schroefvormige las

Tip van de vermoeiingsscheur midden in de lasnaad.



Rondlas

Tip van de vermoeiingsscheur midden in de lasnaad.



Figuur 1-1. Positie van de CTOD proefstukken

Toelichting

Indien niet aan deze betrekkingen wordt voldaan, kan òf tot verdere uitbreiding worden besloten, waarna opnieuw wordt getoetst of de resultaten voldoen, òf tot afkeuring worden overgegaan.

De bedoelde betrekkingen (T1-16) en (T1-17) luiden:

$$\bar{\delta}_c = (\delta_c)_{\text{gem}} - \frac{P(n)}{\sqrt{n}} S > (\delta_c)_{\text{benodigd}} \quad \text{..... (T1-16)}$$

$$(\delta_c)_{\text{gem}} - P(n) S > 0,075 \text{ mm} \quad \text{..... (T1-17)}$$

Hierin is:

$(\delta_c)_{\text{gem}}$	= het gemiddelde van de δ_c waarden uit de steekproef van n CTOD proeven.
$\bar{\delta}_c$	= de met een betrouwbaarheid van 90% in het betreffende plaatmateriaal c.q. lasmetaal tenminste aanwezige gemiddelde δ_c
n	= het aantal CTOD proeven van de steekproef (in dit geval is n tenminste gelijk aan 6)
S	= de standaardafwijking in de steekproef (normale verdeling)
$(\delta_c)_{\text{benodigd}}$	= de benodigde CTOD-waarde
P(n)	= kritieke waarde uit de "Studentverdeling" bij een ééNZijdige onderschrijdingskans van 10%. voor n = 6 is P(6) = 1,48 voor n = 9 is P(9) = 1,40 voor n = 12 is P(12) = 1,37

Bij buiging van de buis zullen de belangrijkste rekken in langsrichting ontstaan. De CTOD-proefstukken zijn daarom zo gekozen dat de tip van de aangebrachte vermoeiingsscheur zo veel mogelijk haaks is op de richting van de rekken in langsrichting.

Tekst

Bij de beoordeling van het lasmetaal moet de CTOD beproeving worden uitgevoerd aan proefstukken in de "als gelaste" toestand (dat wil zeggen dat de proefstukken na het lassen geen warmtebehandeling hebben gekregen), tenzij een warmtebehandeling van de werkelijke lassen wordt toegepast. Dit kan bijvoorbeeld voorgeschreven zijn bij zeer grote wanddikten. In dat geval dienen ook de lassen waaruit de CTOD proefstukken worden genomen deze behandeling te krijgen. De proefstukken mogen niet worden gevlaakt en moeten ter plaatse van de aangebrachte vermoeiingsscheur een breedte hebben die gelijk is aan de volle wanddikte; de lasoverdikte dient te worden verwijderd. De temperatuur van de proefstukken tijdens de beproeving is de laagste gebruikstemperatuur^{*)}.

Als maatgevende CTOD waarde (δ_c) geldt de CTOD waarde bij het bereiken van de maximale belasting, tenzij voordien een niet te verwaarlozen instabiele scheurgroei ("pop-in") is opgetreden. In dit laatste geval geldt als δ_c de CTOD waarde bij het optreden van deze instabiele scheurgroei. Een instabiele scheurgroei mag worden verwaarloosd als de belasting na het optreden van de "pop-in" stijgt tot boven het niveau waarbij de "pop-in" plaatsvond.

Voor de bepaling van de in de berekening in te voeren CTOD waarde kan een keuze worden gedaan uit een van de volgende mogelijkheden:

- a. Voor een bepaalde toepassing kan men CTOD proeven uitvoeren op proefstukken gewonnen uit een stuk buis afkomstig uit dezelfde partij buizen, gelast met dezelfde lasmethode etc.

^{*)} De laagste gebruikstemperatuur is de laagste temperatuur die kan optreden tijdens het gebruik van de leiding voor het transport van het daarvoor bestemde produkt, danwel de laagste temperatuur die kan optreden tijdens het tijdelijk buiten bedrijf stellen van de leiding. De laagste van beide temperaturen is maatgevend. Als de gronddekking 0,8 m of meer bedraagt is de laagste gebruikstemperatuur 0°C.

Toelichting

Tekst

In verband met de te verwachten spreiding in de proefresultaten dient daarbij een beproevingsprocedure te worden gevolgd waarmee met een betrouwbaarheid van 90% kan worden gewaarborgd dat de uit de CTOD proeven af te leiden en in de berekening in te voeren δ_c tenminste gelijk is aan het werkelijke gemiddelde van δ_c (aangeduid met $\bar{\delta}_c$) in het betreffende lasmetaal.

Voorts dient de beproevingsprocedure zodanig te zijn dat met dezelfde betrouwbaarheid kan worden gewaarborgd dat de in het betreffende lasmetaal aanwezige laagste δ_c tenminste 0,075 mm bedraagt. In de toelichting wordt een voorbeeld van een dergelijke beproevingsprocedure gegeven.

- b. Men kan CTOD proeven uitvoeren op materialen met dezelfde materiaal- en lasspecificatie of equivalente specificatie doch niet komend uit dezelfde partij buizen en met verschillende wanddikten.

Door het nemen van steekproeven uit de beschouwde populatie kan een statistische verdeling worden verkregen van de aanwezige CTOD waarden. Bij elke steekproef die een concrete las uit de beschouwde populatie betreft, wordt een (kleine) CTOD proeven-serie op de betreffende las uitgevoerd. De gemiddelde CTOD waarde van deze (kleine) proevenserie vormt één van de waarden in de eerder genoemde statistische verdeling. Uit deze verdeling kan dan de CTOD waarde worden bepaald die men in het buismateriaal of lasmateriaal van buizen die tot de eerder genoemde populatie behoren, tenminste aanwezig mag veronderstellen. De in acht te nemen betrouwbaarheid is 90%.

Toelichting

1.11.1.5. De effectieve scheurlengte $2 \bar{a}$

Het lassen als zodanig brengt met zich mee dat ook met zeer goed geschoold en ervaren personeel in een lasonvolkomenheden voorkomen. Met opzet is hier het woord "lasonvolkomenheden" gebruikt, in plaats van het gebruikelijke woord "lasfouten". Immers een onvolkomenheid in een door een goed vakman op de juiste wijze uitgevoerde las, welke onvolkomenheid inherent is aan het lassen als zodanig, kan eigenlijk niet als lasfout worden aangemerkt.

Aansluitend bij het gangbare spraakgebruik wordt in de TGSL ook de aanduiding "lasfout" gebruikt. Waar het onvolkomenheden betreft die toelaatbaar zijn wordt echter zoveel mogelijk de aanduiding "lasonvolkomenheid" of "inhomogeniteit" vermeld.

Uit onderzoek en ervaring is gebleken dat sommige lasfouten weinig of geen consequenties hebben voor de sterkte en rekcapaciteit, terwijl andere lasfouten de sterkte en rekcapaciteit wel in belangrijke mate negatief beïnvloeden. Zeer belangrijk in deze is naast de grootte, de vorm van de lasfouten: hebben ze scherpe (ongunstige) dan wel niet scherpe randen (minder ongunstig).

Het voorgaande heeft er toe geleid dat in materiaalspecificaties de eisen ten aanzien van bijvoorbeeld bindingsfouten (scherpe randen) aanzienlijk strenger zijn dan ten aanzien van gas- of slakinsluitingen (minder scherpe randen). In verband hiermee worden bijvoorbeeld in [1.3], [1.4] en [1.5] scheuren in het geheel niet toegestaan.

Om twee redenen is de in de berekening in te voeren fout (de effectieve scheurlengte $2 \bar{a}$) ernstiger dan de ernstigste onvolkomenheden die in het algemeen nog juist worden toegestaan. Ten eerste wordt uitgegaan van een ongunstige vorm (een scheur met afmetingen a en l , terwijl scheuren niet zijn toegestaan) en ten tweede wordt

Tekst

1.11.1.5. De effectieve scheurlengte $2 \bar{a}$

Als basis voor de bepaling van de effectieve scheurlengte dient de materiaal- c.q. lasspecificatie die voor de betreffende leiding van toepassing is.

Van iedere toegestane onvolkomenheid zijn de maximale lengte (ℓ) en maximale diepte (a) de in de verdere beschouwing te hanteren parameters.

Indien volgens de betreffende specificatie de onderlinge afstand van de toegestane onvolkomenheden kleiner is dan de lengte van de grootste van de betrokken onvolkomenheden, bestaat de kans dat zij elkaar beïnvloeden. In dat geval dienen voor de parameters a en ℓ grotere maten te worden genomen dan van de grootste onvolkomenheid. Voor gedetailleerde gegevens wordt verwezen naar [1.8].

Als het vlak van de beschouwde onvolkomenheid niet loodrecht staat op het plaatoppervlak kan een reductie worden aangebracht in de in rekening te brengen afmetingen. Voor nadere bijzonderheden wordt verwezen naar [1.8].

Aan de van toepassing zijnde specificatie dienen voorts nog de volgende eisen te worden gesteld:

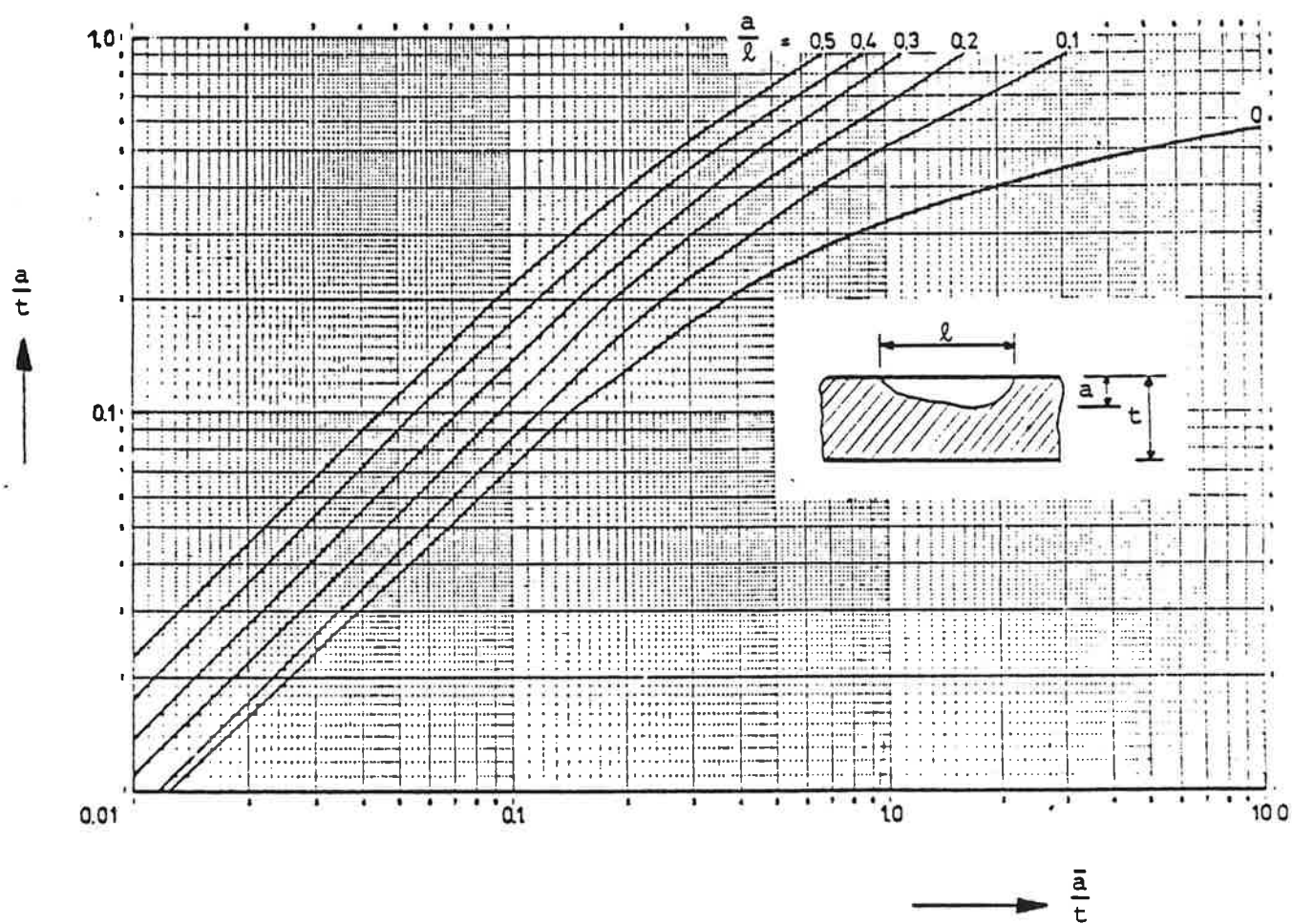
- Scheuren zijn niet toegestaan.
- Er dient te zijn voorzien in een doelmatig niet-destructief onderzoek, teneinde met voldoende betrouwbaarheid te kunnen waarborgen dat de werkelijk aanwezige onvolkomenheden voldoen aan de gestelde eisen.

Toelichting

verondersteld dat de onvolkomenheid uitmondt aan de oppervlakte. Dit laatste is aanzienlijk ongunstiger dan wanneer de onvolkomenheid is ingesloten.

Tekst

Nadat de maten a en l van iedere onvolkomenheid c.q. iedere groep van onvolkomenheden die volgens de betreffende specificatie worden toegelaten zijn vastgesteld, dient voor iedere combinatie van a en l met behulp van figuur 1-3 de maat $\bar{a}$ te worden berekend.



Figuur 1-3. Bepaling van de maat $\bar{a}$.

Toelichting

1.11.2. Grond

Naast de belasting die door de grond op de leiding wordt uitgeoefend, bijvoorbeeld door het gewicht van de gronddekking, kan de grond ook bijdragen leveren aan de stijfheid en sterkte van de leiding.

Zo kunnen bijvoorbeeld de beddingsconstanten worden gezien als materiaaleigenschappen die de stijfheid en sterkte van de ingegraven leiding beïnvloeden; vergelijk de E-modulus en σ_e van staal.

In de toelichting bij art. 1.9 is uiteengezet dat bij de overgang van de oude "toelaatbare spanningen" methode, naar de berekeningswijze van de TGSL, de veiligheidsfactoren vooralsnog dezelfde zijn gebleven. Als gevolg van nieuwe ontwikkelingen en nader onderzoek is het wellicht mogelijk in de toekomst tot een verlaging te komen.

In [3.1] is aangetoond dat de veiligheidsfactoren niet veranderen als de beddingsconstanten k_λ en k_w niet met de rekenfactor γ worden vermenigvuldigd en de overige grondmechanische factoren wel.

Tekst

1.11.2. Grond

De waarden van de beddingsconstanten die in de berekening moeten worden gebruikt volgen door de betreffende grootheden uit de Leidraden [1.1] en [1.2] te vermenigvuldigen of te delen door de onzekerheidsfactor, zoals aangegeven in de Leidraden:

$$k_{\lambda}^r = k_{\lambda} \cdot f_o \quad \text{c.q.} \quad k_{\lambda}/f_o$$

$$k_w^r = k_w \cdot f_o \quad \text{c.q.} \quad k_w/f_o$$

Hierin is:

k_{λ} , k_w = de beddingsconstanten in laterale richting en in
langsrichting (wrijving), zoals opgegeven door het
grondmechanisch adviesbureau

f_o = onzekerheidsfactor, zie [1.1] en [1.2]

k_{λ}^r , k_w^r = rekenwaarden voor k_{λ} en k_w

De waarden van de overige grondmechanische parameters volgen uit:

$$g^r = g \cdot f_o \cdot \gamma$$

Hierin is:

g = grondmechanische parameter zoals opgegeven door het grond-
mechanisch adviesbureau

f_o = onzekerheidsfactor, zie [1.1] en [1.2]

γ = rekenfactor = 1,5/sf

sf = schadefactor

g^r = rekenwaarde voor de betreffende grondmechanische
parameter.

Toelichting

1.12. Afwijkingen van de grondslagen

Het in deze paragraaf gestelde is vooral van belang met het oog op verdergaande ontwikkelingen in de kennis over het gedrag van ingegraven stalen transportleidingen. Zie ook de laatste alinea van de inleiding van deze TGSL.

1.13. Afwijkingen in de uitvoering

Een voorbeeld hiervan vormen ongunstige afwijkingen van de werkelijk aanwezige grondmechanische waarden van de aanvullingsgrond ten opzichte van de in de berekening aangenomen waarden. Deze ongunstige afwijkingen kunnen in sommige gevallen door conditioneren van de aanvullingsgrond (bijvoorbeeld aanstampen, inwateren, aanbrengen van lichte materialen) te niet worden gedaan. Zie de paragraaf over uitvoering in de betreffende Leidraad.

1.12. Afwijkingen van de grondslagen

Door de instantie die is belast met de beoordeling van de veiligheid kan toestemming worden verleend van deze grondslagen af te wijken, mits wordt aangetoond dat de constructie van de leiding voldoende veilig is en de hechtheid er van duurzaam verzekerd zal zijn. De constructeur dient in dit geval op de tekeningen en de berekeningen te vermelden waar, en van welke artikelen van deze grondslagen is afgeweken.

1.13. Afwijkingen in de uitvoering

Indien afwijkingen bij de uitvoering, bijvoorbeeld van een maat of een richting een belangrijk ongunstiger situatie veroorzaken, moet alsnog met die afwijkingen rekening worden gehouden, danwel moeten maatregelen worden getroffen om deze ongunstige afwijkingen te niet te doen. Met belangrijk worden in deze bedoeld overschrijdingen van de grenswaarden van meer dan 5%.

Bij de beoordeling of dit het geval is mag rekening worden gehouden met gunstig werkende invloeden, zoals bijvoorbeeld een $\sigma_{0,2}$ of $\sigma_{0,5}$ die in de werkelijkheid groter is dan de gespecificeerde minimum waarde, en moet rekening worden gehouden met ongunstig werkende invloeden.

Daar waar in de berekening of bij de detaillering van bepaalde uiterste maatafwijkingen is uitgegaan dienen deze op de tekening duidelijk te worden vermeld.

Toelichting

2.2.1. Relatieve sterkte

Indien bij een kruising van een transportleiding met een waterkering, juist in de kruisende leidingstrekkings lekkage optreedt, ontstaat er gevaar dat de waterkering zodanig wordt aangetast dat deze zijn functie niet meer kan vervullen, en er inundaties en eventueel milieuverontreinigingen op zullen treden. Bij lekkage in de terreinstrekking is er geen gevaar voor inundaties. Dit is de reden waarom men in de kruisende leidingstrekkings een hogere rekenfactor hanteert dan in de terreinstrekking.

Daarnaast wordt geëist dat de kans dat door te hoge inwendige druk juist in de kruising barsten optreedt, aanvaardbaar klein is. Voor deze aanvaardbare kans zou men uit kunnen gaan van de in de Deltawet opgenomen aanvaardbare kans op overschrijding van het basispeil, bijvoorbeeld voor zeedijken 1×10^{-4} per jaar.

2. BEREKENING VOLGENS DE ELASTICITEITSLEER

2.1. Algemeen

Aansluitend op de in hoofdstuk 1 gegeven algemene bepalingen, zijn in dit hoofdstuk 2 een aantal nadere bepalingen gegeven die bij een berekening volgens de elasticiteitsleer in beschouwing moeten worden genomen.

Voor rekenregels wordt verwezen naar bijlage 2 bij deze TGSL en naar de in par. 5.2 genoemde rapporten.

Toetsing van de resultaten van de berekeningen dient plaats te vinden aan de grenswaarden van hoofdstuk 4.

2.2. Nadere bepalingen

2.2.1. Relatieve sterkte

De kans dat tengevolge van te hoge inwendige druk juist ter plaatse van de kruising van een transportleiding met een waterkering lekkage c.q. barsten ontstaat, en er daardoor tevens inundaties ontstaan, dient aanvaardbaar klein te zijn.

Dit wordt geacht te zijn bereikt indien is voldaan aan de voorwaarde (2-1):

$$\left(\frac{\sigma_t \cdot 2t}{D_1}\right)_{\text{kruising}} > \beta \left(\frac{\sigma_t \cdot 2t}{D_1}\right)_{\text{veldstrekking}} \quad \dots\dots (2-1)$$

Hierin is $\beta = 1,2$.

Bij verschillen in $\left(\frac{\sigma_t \cdot 2t}{D_1}\right)$ ter weerszijden van de kruisende leidingstrekking mag de aansluitende terreinstrekking in beschouwing worden genomen die de laagste waarde voor $\left(\frac{\sigma_t \cdot 2t}{D_1}\right)$ geeft.

Toelichting

De werkelijk aanwezige kans dat juist ter plaatse van de kruising gedurende de voorziene gebruiksduur van de leiding, lekkage of barsten optreedt, en er tevens inundaties plaats zullen vinden is een functie van ondermeer de volgende factoren:

- a. De kans op het bereiken van de inwendige druk waarbij barsten in de kruising zal plaatsvinden. Deze kans is uiteraard kleiner naarmate de marge tussen de ontwerpdruk en de barstdruk groter is. Voorts zijn onder meer van belang het type, het aantal en de plaatsing van de pompen en afsluiters, en de betrouwbaarheid ten aanzien van het juist functioneren er van, alsmede van de aangebrachte beveiligingsapparatuur.
- b. De kans dat de barstdruk in de kruisende leidingstrekking lager is dan in de aansluitende terreinstrekkingen. Hierbij is van belang dat in het kader van het onderzoek pijpleidingen is aangetoond dat de barstdruk niet nadelig wordt beïnvloed door andere belastingen dan de inwendige overdruk, mits aan bepaalde voorwaarden ten aanzien van de rekcapaciteit en de grootte van ondermeer de opgelegde vervormingen wordt voldaan. Zie de toelichting bij art. 3.1.
Voorts zijn van belang de statistische verdelingen van de grootte van de werkelijk aanwezige wanddikten en de werkelijk aanwezige sterkte-eigenschappen van het toegepaste staal. Uiteraard is ook de grootte van de factor β in de betrekking (2-1) belangrijk.
- c. De kans dat tengevolge van een eventuele lekkage in de kruisende strekking de waterkerende functie van de waterkering te niet wordt gedaan. Hierbij is ondermeer van belang de aard van het getransporteerde medium, de grootte van de leiding, de inwendige druk, de plaats van de lekkage, en de eventuele aanwezigheid van een damwandscherm.

Tekst

Indien voldaan is aan (2-2) mag voor β de waarde 1,0 worden gehanteerd:

$$\left(\frac{\sigma_t \cdot 2t}{D_i}\right)_{\text{kruising}} > 1,5 \gamma P_o \left(\frac{\sigma_t}{\sigma_e}\right)_{\text{strekking}} \quad \dots\dots (2-2)$$

Bij bochten moet rekening worden gehouden met de ongelijkmatige krachtsverdeling over de wand die optreedt bij belasting op inwendige druk.

Bij gladde bochten en mijterbochten (mitred bends) dienen daartoe de in de (2-1) en (2-2) vermelde waarden voor $\left(\frac{\sigma_t \cdot 2t}{D_i}\right)_{\text{kruising}}$ gedeeld te worden door de in (2-3) en (2-4) gegeven factoren.

- aan de binnenzijde de factor f_{bi} :

$$f_{bi} = \frac{R - 1/3 r}{R - r} \quad (f_{bi} > 1) \quad \dots\dots (2-3)$$

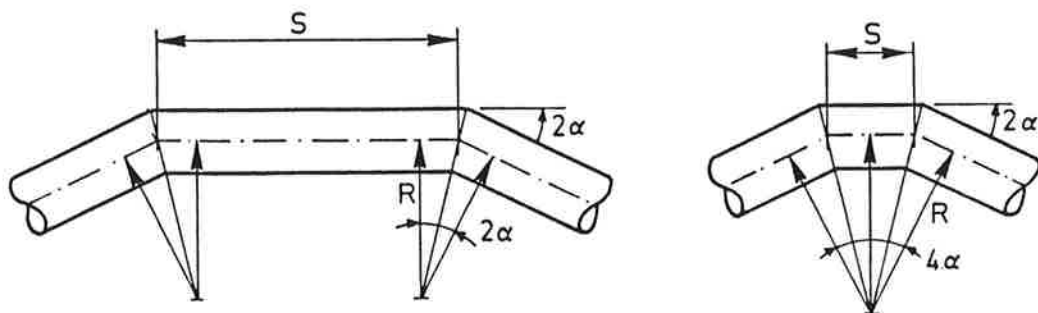
- aan de buitenzijde de factor f_{bu} :

$$f_{bu} = \frac{R + 1/3 r}{R + r} \quad (f_{bu} < 1) \quad \dots\dots (2-4)$$

Hierin is R de bochtstraal. Voor mijterbochten dient de kleinste waarde te worden genomen van (2-5) en (2-6).

$$R = \frac{r}{2} (1 + \cotg \alpha) \quad \dots\dots (2-5)$$

$$R = \frac{S}{2} \cotg \alpha \quad \dots\dots (2-6)$$



Figuur 2-1.

Toelichting

- d. De kans dat ten tijde van het verloren gaan van de waterkerende werking, de waterstand zodanig is dat bij afwezigheid van deze waterkerende werking inundatie optreedt. Hierbij is van belang de aard van de waterkering.

Uit het voorgaande blijkt dat de kans op inundatie tengevolge van te hoge inwendige overdruk afhankelijk is van een groot aantal factoren. Ten aanzien van een aantal van deze factoren zijn nog niet voldoende gegevens bekend om een goede risico-analyse mogelijk te maken, om aldus tezamen met de aanvaardbare kans op inundatie de benodigde grootte van de factor β in betrekking (2-1) nauwkeurig te berekenen.

Op grond van de in het voorgaande gegeven overwegingen is voor β de waarde 1,2 gekozen.

Naarmate in de aansluitende terreinstrekkingen de ringspanning tengevolge van de ontwerpdruk lager is, is de kans op het bereiken van een druk gelijk aan de barstdruk kleiner, en zal de factor β kleiner kunnen zijn. Dit is de achtergrond van formule (2-2). Deze differentiatie is vooral van belang bij bestaande transportleidingen die moeten worden herberekend.

De basis van de in het voorgaande gegeven overwegingen is, dat de barstdruk niet nadelig wordt beïnvloed door andere belastingen dan de inwendige druk [3.1]. Dit betekent dat de in de tekst gegeven bepalingen op de plasticiteitsleer zijn gebaseerd.

Doordat de bepalingen van dit artikel over de relatieve sterkte het karakter van een toets hebben, beïnvloeden ze de berekening die op de elasticiteitsleer is gebaseerd, niet wezenlijk.

Indien in de aansluitende terreinstrekking, bijvoorbeeld vanwege de beschikbaarheid van buizen, buizen met een grotere sterkte worden toegepast dan nodig is, kan aan de eis van de relatieve sterkte ook kan worden voldaan door juist buiten de veiligheidszone een buis-

Tekst

Als het (bijvoorbeeld bij bestaande -1986- leidingen) redelijkerwijze niet mogelijk is dat de kruising voldoet aan de eerder in dit artikel vermelde voorwaarden, kan men door het aanbrengen van betrouwbare drukkbegrenzingsapparatuur bereiken dat de druk in de kruising het uit een drukstootberekening berekende maximum (P_0) niet overschrijdt. Het is dan wel gewenst dat een daartoe aangewezen overheidsinstantie toezicht uitoefent op de goede werking en de juiste afstelling van deze apparatuur en dat overigens ten genoegen van de beheerder van de waterkering wordt aangetoond dat de toelaatbare druk in de kruising niet kan worden overschreden. Dit houdt in dat deze instantie controle blijft uitoefenen zolang de leiding in bedrijf is. Een continue registratie van de druk in de leiding kan hierbij een belangrijk hulpmiddel zijn.

2.2.2. Rekentoestanden

In de berekening moeten de in art. 2.2.2.1, 2.2.2.2 en 2.2.2.3 genoemde combinaties van rekenbelastingen en rekenzettingen in beschouwing worden genomen.

2.2.2.1. Inwendige druk en uitwendige belastingen

Hierbij wordt de rekenwaarde voor de inwendige druk volgens art. 1.5.1 gecombineerd met de rekenwaarden voor de uitwendige belastingen volgens art. 1.5.4.

2.2.2.2. Uitwendige belastingen

Hierbij worden de rekenwaarden voor de uitwendige belastingen volgens art. 1.5.4 gecombineerd met de rekenwaarde voor de laagste bedrijfsdruk ($P_{\min}$) volgens art. 1.5.3.

Toelichting

lengte in te bouwen die 20% minder sterk is dan de strekking in de kruising. Uiteraard moet de in te bouwen buislengte wel voldoen aan de eisen die gelden voor de veldstrekking.

Tekst

2.2.2.3. Vermoeiing

Van een vermoeiingsberekening kan worden afgezien indien voldoende gegevens beschikbaar zijn waaruit blijkt dat vermoeiing niet maatgevend zal zijn.

In het andere geval dient een vermoeiingsberekening te worden uitgevoerd zoals omschreven in [2.4].

2.2.3. Uit te voeren berekeningen

Bij elk van de in art. 2.2.2 genoemde rekentoestanden dienen de optredende spanningen en vervormingen (ovalisering) te worden berekend voor de maatgevende punten van de beschouwde leiding. Voor wat betreft de in te voeren k-waarden geldt dat steeds de ongunstigste combinatie moet worden gekozen, dat wil zeggen de ongunstigste van:

$$\text{I} \quad k_l \cdot f_o \quad \text{en} \quad k_w \cdot f_o$$

$$\text{II} \quad k_l \cdot f_o \quad \text{en} \quad k_w / f_o$$

$$\text{III} \quad k_l / f_o \quad \text{en} \quad k_w \cdot f_o$$

$$\text{IV} \quad k_l / f_o \quad \text{en} \quad k_w / f_o$$

In bijlage 1 bij deze TGSL worden meer details gegeven over de uit te voeren berekeningen.

2.3. Rekenregels

Hiervoor wordt verwezen naar de in par. 5.2 genoemde rapporten.

Naast rekenregels voor berekeningen volgens de plasticiteitsleer bevatten ze ook regels voor berekeningen volgens de elasticiteitsleer.

In bijlage 2 is een samenvatting gegeven van de belangrijkste rekenregels.

Toelichting

3.2.1. Relatieve sterkte

Zie de toelichting bij art. 2.2.1.

3.2.2. Rekentoestanden

De rekentoestand inwendige druk volgens art. 3.2.2.1 is dus nodig om te bezien of de veiligheid tegen barsten voldoende groot is. De barstdruk wordt immers niet beïnvloed door de uitwendige belastingen [3.1].

De rekentoestand inwendige druk en uitwendige belastingen volgens art. 3.2.2.2 volgt uit het feit dat bij verdergaande vervormingen (zettingen) in het plastisch gebied, de krachtsverdeling en de vervormingen (ovalisering) zich optimaal instellen om de opgelegde belastingen te dragen. Bij aanwezigheid van inwendige druk zullen ze zich dus optimaal instellen om de uitwendige belastingen en de inwendige druk te dragen.

Tekst

3. BEREKENING VOLGENS DE PLASTICITEITSLEER

3.1. Algemeen

Aansluitend aan de in hoofdstuk 1 gegeven algemene bepalingen, worden in dit hoofdstuk 3 nadere bepalingen gegeven die bij een berekening volgens de plasticiteitsleer in beschouwing moeten worden genomen.

Voor rekenregels wordt verwezen naar de in par. 5.2 genoemde rapporten. Toetsing van de resultaten van de berekeningen dient plaats te vinden aan de grenswaarden van hoofdstuk 4.

3.2. Nadere bepalingen

3.2.1. Relatieve sterkte

Hier gelden dezelfde voorwaarden als in hoofdstuk 2.

Verwezen wordt naar art. 2.2.1.

3.2.2. Rekentoestanden

In de berekening moeten de in art. 3.2.2.1, 3.2.2.2, 3.2.2.3 en 3.2.2.4 genoemde combinaties van rekenbelastingen en rekenzettingen in beschouwing worden genomen.

3.2.2.1. Inwendige druk

De rekenwaarde voor de ontwerpdruk volgens art. 1.5.1.

3.2.2.2. Inwendige druk en uitwendige belastingen

Hierbij wordt de gemiddelde bedrijfsdruk (P_{gem}) volgens art. 1.5.2, gecombineerd met de rekenwaarde voor de uitwendige belastingen volgens art. 1.5.4.

Na het uitvoeren van deze berekening wordt met de dan berekende

Toelichting

Bij ontlasten op inwendige druk zullen de spanningen in de buiswand in het algemeen afnemen. Ontlasten op inwendige druk gebeurt dus in het algemeen elastisch.

Gedurende de tijd dat de druk lager is dan de daarvóór aanwezige druk, zullen bij verdergaande zettingen de spanningen en vervormingen toenemen, en zich bij het opnieuw bereiken van vloeien instellen op de bij de betreffende druk behorende "plastische" spannings- en vervormingstoestand.

Over de gehele gebruiksduur gezien, zullen de spanningen en vervormingen zich dus gemiddeld op de "gemiddelde" bedrijfsdruk instellen.

De variaties in de spanningen en rekken door variaties in de druk zijn het grootst als de ovalisering en buigvervormingen het grootst zijn, dus aan het eind van de beschouwde gebruiksduur. Door variaties in de druk ontstaan naast variaties in de ringspanning, berekend met de "ketelformule", ook variaties in de spanningen in omtreksrichting door veranderingen van de ovalisering. In en nabij bochten ontstaan daarnaast ook spanningsvariaties in de langsspanningen, doordat bij variëren van de druk de bochtstijfheid en de bochtkrachten veranderen (drukexpansie).

De variaties in de spanningen c.q. rekken mogen niet zodanig groot zijn dat wisselend vloeien optreedt.

Bij wisselend vloeien ontstaat, mits bij de gegeven materiaal-eigenschappen, de optredende rekken en het aantal wisselingen voldoende groot zijn, breuk in de leidingwand.

Omdat de kans op veelvuldig optreden van aanzienlijk hogere inwendige drukken en aanzienlijk hogere temperatuurvariaties dan waarvan in het ontwerp vanuit is gegaan, gering mag worden geacht, mag het verantwoord worden geacht voor de inwendige overdruk hier een kleinere rekenfactor te kiezen dan 1,5/sf.

Voor een verdere toelichting wordt verwezen naar [3.1].

Tekst

spanningen, rekken en vervormingen nagegaan wat de invloed is van variaties van de inwendige druk tussen $P_{\min}$ en $\frac{1,1}{sf} P_0$, en van variaties van de temperatuur tussen de laagste bedrijfstemperatuur en $\frac{1,1}{sf}$ keer de hoogste bedrijfstemperatuur.

Variaties in de druk behoeven niet te worden gecombineerd met variaties in de temperatuur.

3.2.2.3. Uitwendige belastingen

Hierbij worden de rekenwaarden voor de uitwendige belastingen volgens art. 1.5.4 gecombineerd met de rekenwaarde voor de laagste bedrijfsdruk volgens art. 1.5.3.

3.2.2.4. Vermoeiing

Van een vermoeiingsberekening kan worden afgezien indien voldoende gegevens beschikbaar zijn waaruit blijkt dat vermoeiing niet maatgevend zal zijn. In het andere geval dient een vermoeiingsberekening te worden uitgevoerd zoals omschreven in [2.4].

3.2.3. Uit te voeren berekeningen

Bij elk van de in art. 3.2.2 genoemde rekentoestanden dienen de optredende spanningen, rekken en vervormingen te worden berekend voor de maatgevende punten van de beschouwde leiding.

Voor wat betreft de in te voeren k-waarden geldt dat steeds de ongunstigste combinatie moet worden gekozen, dat wil zeggen de ongunstigste van:

$$\text{I} \quad k_l \cdot f_0 \quad \text{en} \quad k_w \cdot f_0$$

$$\text{II} \quad k_l \cdot f_0 \quad \text{en} \quad k_w / f_0$$

$$\text{III} \quad k_l / f_0 \quad \text{en} \quad k_w \cdot f_0$$

$$\text{IV} \quad k_l / f_0 \quad \text{en} \quad k_w / f_0$$

Toelichting

De derde rekentoestand, uitwendige belastingen volgens art. 3.2.2.3 is met name bedoeld om de grenstoestanden rekken, plooiën en knikken te controleren.

Tekst

In bijlage 1 bij deze TGSL worden meer details gegeven over de uit te voeren berekeningen.

3.3. Rekenregels

Hiervoor wordt verwezen naar de in par. 5.2 genoemde rapporten.

In bijlage 2 is een samenvatting gegeven van de belangrijkste rekenregels.

Toelichting

4. GRENSWAARDEN4.1. Algemeen

Er wordt op gewezen dat de hier behandelde grenswaarden betrekking hebben op de rektoestand. In de normaal voorkomende gebruiks-toestand zullen de optredende rekken en vervormingen kleiner zijn.

De gegeven grenswaarden betreffen de veiligheid van de leiding. Door eisen die door de gebruiker aan de leiding kunnen worden gesteld, kunnen in de praktijk afwijkende (lagere) grenswaarden worden toegepast. Een voorbeeld kan zijn de maximale ovalisering in verband met het gebruik van inwendige schoonmaakapparatuur en dergelijke.

4.2. Spanningen

Binnen het toepassingsgebied van de TGSL komen geen appendages en aftakkingen e.d. voor. In verband hiermee is de spanning σ_z loodrecht op het vlak van de leidingwand altijd klein ten opzichte van de spanningen in het vlak van de leidingwand σ_x en σ_y .

4.3. Rekken

Bij toepassing van de elasticiteitsleer is het verband tussen spanningen en rekken eenduidig. Als voldaan wordt aan de eisen ten aanzien van de grenstoestand spanningen, wordt tegelijkertijd voldaan aan de grenstoestand rekken.

4. GRENSWAARDEN

4.1. Algemeen

Aansluitend aan de in art. 1.7 genoemde grenstoestanden zijn in dit hoofdstuk grenswaarden gegeven.

De resultaten van de berekeningen volgens hoofdstuk 2 c.q. 3 dienen te worden getoetst aan deze grenswaarden.

De gegeven grenswaarden gelden zowel voor leidinggedeelten bestaande uit (bij de aanleg) rechte buizen als gladde bochten en geknikte bochten.

4.2. Spanningen

De grenswaarde voor de vergelijkingsspanning volgens Von Mises is σ_e :

$$\sigma_c = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3 \tau^2} \leq \sigma_e \quad \dots\dots (4-1)$$

De spanning loodrecht op het vlak waarin σ_x en σ_y werken (σ_z) mag worden verwaarloosd.

4.3. Rekken

Bij toepassing van de elasticiteitsleer behoeft de grenstoestand rekken niet te worden gecontroleerd.

Bij toepassing van de plasticiteitsleer kan de grenswaarde voor de rekken worden ontleend aan art. 1.11.1.3 en volgende.

Toelichting

4.4.1. Ovalisering

Uit proeven verricht door Spangler [5.2] is gebleken dat bij $D'_u < 0,80 D_u$ er gevaar ontstaat voor doorslag. Ook Schweinheim [5.3] maakt hier melding van.

In dit aanhangsel is voor de maximaal toelaatbare kleinste diameter de in betrekking (4-4) vermelde waarde gegeven. Een en ander houdt in dat tegen het optreden van doorslag een wat grotere veiligheid wordt gehanteerd dan tegen bijvoorbeeld het optreden van plooiën. De reden hiervoor wordt gevormd door de wat groter geachte onzekerheden in de parameters die het optreden van doorslag beïnvloeden, zoals bijvoorbeeld de grootte van de horizontale steundruk. Voorts speelt een rol het totaal onbruikbaar worden van de leiding bij doorslag, en het daarbij optreden van zeer grote plastische rekken, waardoor de grenswaarde voor de rekken kan worden overschreden.

4.4.2. Plooiën

Of al dan niet plooiën op zal treden hangt in belangrijke mate af van de kromtestraal van de buiswand ter plaatse van de gedrukte vezels, c.q. waar de wringvervormingen optreden.

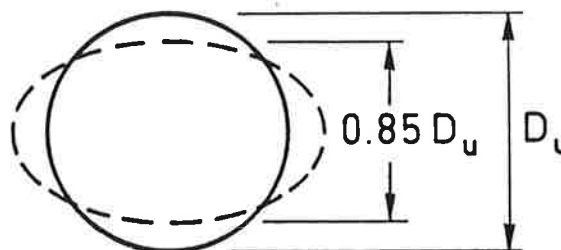
Tekst

4.4. Vervormingen

4.4.1. Ovalisering

De grenswaarde ΔD_g van de in de rekentoestand optredende verandering van de diameter is $0,15 D_u$:

$$\Delta D_g = 0,15 D_u \quad \dots\dots (4-2)$$



Figuur 4-1.

Indien de vervormingscapaciteit van de corrosiebeschermende bekleding bij het optreden van de grenswaarde voor de ovalisering is overschreden, dan wordt de grenswaarde voor de ovalisering bepaald door deze vervormingscapaciteit.

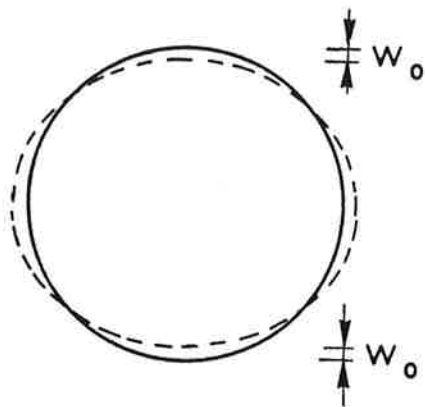
4.4.2. Plooiën

4.4.2.1. Bepaling maatgevende straal

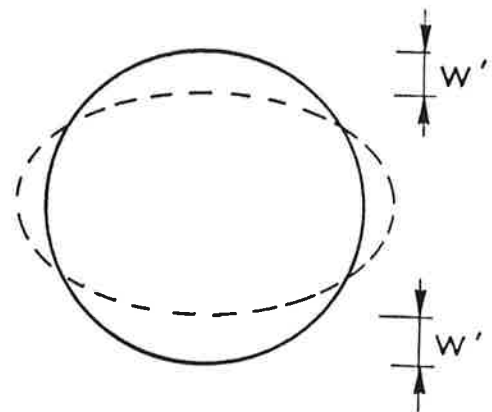
De in de formules voor de grenswaarden in te voeren maatgevende straal r' volgt uit:

Toelichting

Door gronddrukken en door buiging wordt de doorsnede ovaal. In figuur T4-1 is de ovalisering gegeven indien geen gronddrukken aanwezig zijn en in figuur T4-2 indien wel gronddrukken aanwezig zijn. De in figuur T4-1 en T4-2 gegeven waarden w_0 en w zijn positief. Bij invoering daarvan in (4-6) volgt voor w' eveneens een positief teken.



Figuur T4-1.



Figuur T4-2.

Bij vergelijking van de formules voor de grenswaarden met $r' = r$, met proefresultaten van op buiging en normaalkracht belaste buizen blijken deze formules veilige waarden te geven, zie [3.1].

Bij de in het kader van OPL uitgevoerde proeven is gebleken dat indien bij aanwezigheid van gronddrukken r' wordt gebruikt, de invloed van de grotere ovalisering in rekening kan worden gebracht.

Voor een verdere toelichting wordt verwezen naar [2.1] en [3.1].

Tekst

$$r' = \frac{r}{1 - \frac{3 w'}{r}} \quad \dots (4-3)$$

$$w' = w - w_0 \quad \dots (4-4)$$

Hierin is:

r' = de maatgevende straal

w = de verandering van de straal ter plaatse van de optredende stuik, c.q. wringvervorming, bij aanwezigheid van grond-drukken of andere belastingen die de leiding meer ovaliseren dan alleen zuivere buiging

w_0 = de verandering van de straal ter plaatse van de optredende stuik, c.q. wringvervorming, indien geen gronddrukken aanwezig zouden zijn.

Indien de leiding alleen op buiging wordt belast is $w = w_0$ en $r' = r$. De in het voorgaande genoemde grootte w is de maximale verandering van de straal bij zowel rechte leidingen als bochten.

4.4.2.2. De stuik bij buiging en normaalkracht

De grenswaarde ε_{cr} voor de stuik is:

$$\text{- bij } \frac{2 r'}{t} < 120$$

$$\varepsilon_{cr} = 0,25 \frac{t}{r'} - 0,0025 + 3000 \left(\frac{r'}{Et} \right)^2 \cdot P \cdot |P| \quad \dots (4-5)$$

$$\text{- bij } \frac{2 r'}{t} > 120$$

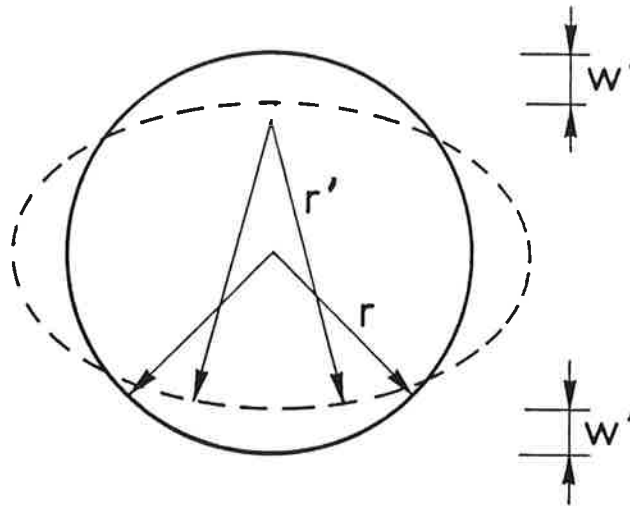
$$\varepsilon_{cr} = 0,10 \frac{t}{r'} + 3000 \left(\frac{r'}{Et} \right)^2 \cdot P \cdot |P| \quad \dots (4-6)$$

4.4.2.3. De wringvervorming bij wringing

De grenswaarde θ_{cr} voor de wringing is:

$$\theta_{cr} = 0,66 \frac{t}{(r')^2} \sqrt{\frac{t}{r'}} + \frac{3000}{r'} \left(\frac{r'}{Et} \right)^2 \cdot P \cdot |P| \quad \dots (4-7)$$

Toelichting



Figuur T4-3.

4.4.3. Implosie

Volgens Euler geldt voor q_{kritiek} voor een ideaal van vorm zijnde zeer lange cilinder:

$$q_{\text{kritiek}} = \frac{3 EI}{r^3} = \frac{E t^3}{4 r^3 (1 - \nu^2)} \quad \dots\dots (T4-1)$$

Bij een niet ideaal van vorm zijnde pijpleiding, met daarin onder meer ook restspanningen is q_{kritiek} lager dan de in (T4-1) gegeven waarde. Een veilige schatting is de in (4-9) gegeven waarde.

4.4.4. Knik

In het elastisch-plastisch gebied bestaat de mogelijkheid dat knik en plooi elkaar beïnvloeden, zodat bezwijken optreedt bij een lagere belasting dan de laagste waarde die uit de plooi- en knikcriteria, indien deze afzonderlijk worden beschouwd, zou volgen.

Tekst

4.4.2.4. De combinatie van stuik en wringvervorming

De grenswaarden voor ϵ_{plooi} en θ_{plooi} volgen uit:

$$\left(\frac{\epsilon_{plooi}}{\epsilon_{cr}}\right)^{1,5} + \left(\frac{\theta_{plooi}}{\theta_{cr}}\right)^2 < 1 \quad \dots (4-8)$$

De waarden voor ϵ_{cr} en θ_{cr} kunnen worden ontleend aan art. 4.4.2.2 en art. 4.4.2.3.

4.4.3. Implosie

De grenswaarde bij situaties waarbij de uitwendige druk groter kan zijn dan de inwendige druk is:

$$P_{cr} = \frac{2 EI}{(r')^3} = \frac{E t^3}{6 (r')^3 (1 - \nu^2)} \quad \dots (4-9)$$

4.4.4. Knik

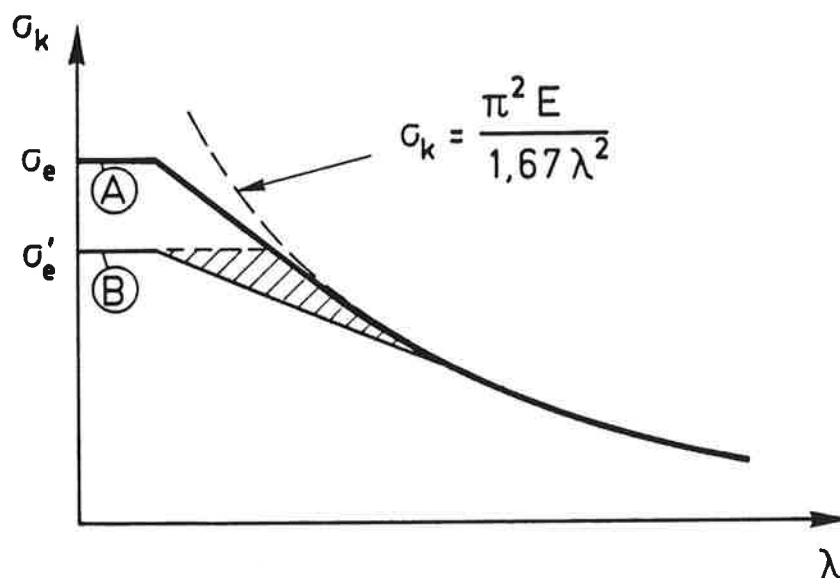
Voor grenswaarden voor de knikstabiliteit wordt verwezen naar de TGB - 1972 Staal [1.12].

Indien ϵ_{cr} volgens art. 4.4.2.2 kleiner is dan $\epsilon_e = \sigma_e / E$, dan moet voor de bepaling van de kritieke knikspanning worden uitgegaan van een materiaal met een fictieve vloeigrens $\sigma'_e = \epsilon_{cr} E$.

Toelichting

Dit effect is in rekening gebracht door, voor het geval σ'_e kleiner is dan σ_e , in plaats van de knikkromme (A) in figuur T4-4 de knikkromme (B) te kiezen, dus van een materiaal met $\sigma_e = \sigma'_e$. Het gearceerd aangegeven gebied in figuur T4-4 geeft het effect van de in rekening gebrachte interactie tussen knikken en plooiën.

De knikkromme die bij $\sigma'_e < \sigma_e$ in rekening moet worden gebracht is gegeven in figuur T4-4.



Figuur T4-4.

4.5. Wisselend vloeien

Vloeien treedt op als een spanningspunt zich op het vloeiooppervlak bevindt, en de vervormingen toenemen.

Het vloeiooppervlak volgens Von Mises is in figuur T4-5 getekend. De punten A en C bevinden zich op het vloeiooppervlak.

4.5. Wisselend vloeien

De grenswaarde voor de grootte van de variatie van de spanningen volgt uit de voorwaarde dat de spanningsvariaties zich binnen het vloeiooppervlak van Von Mises moeten voordoen. De vergelijking van dit vloeiooppervlak is:

Tekst

$$\sigma_c = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2} = \sigma_e \quad \text{..... (4-10)}$$

Vergelijking (4-10) kan ook worden uitgedrukt in de spanningen σ_x , σ_y en τ :

$$\sigma_c = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3 \tau^2} = \sigma_e \quad \text{..... (4-11)}$$

Toelichting

4.6. Vermoeiing

In [2.4] is aangegeven hoe de vermoeiingsberekening bij ingegraven stalen leidingen kan worden uitgevoerd. Er is daarbij uitgegaan van het Duitse voorschrift DIN 2413 [1.7]. Bij de uitwerking is rekening gehouden met enige nieuwe inzichten, het belang van de betreffende waterkering (schadefactor) en het aantal kruisingen door de waterkeringen rond de betreffende polder.

Tekst

4.6. Vermoeftng

Voor de grenswaarden voor vermoeftng wordt verwezen naar [2.4].

5. REFERENTIES

5.1. Voorschriften

- [1.1] Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen
Leidraad voor constructie en beheer van vloeistofleidingen in en nabij waterkeringen.
Staatsuitgeverij, 's-Gravenhage, 1971.
- [1.2] Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen
Leidraad voor constructie en beheer van gasleidingen in en nabij waterkeringen.
Staatsuitgeverij, 's-Gravenhage, 1973.
- [1.3] NEN 1091
Veiligheidseisen voor stalen gasleidingen met een bedrijfsdruk boven 1 bar, 1984.
- [1.4] De Commissie Opslag Gevaarlijke Stoffen (COGS)
Leidraad voor oliepijpleidingen.
Directoraat-Generaal van de Arbeid van het Ministerie van Sociale Zaken, Voorburg, 1973.
- [1.5] Dienst voor het Stoomwezen
Regels voor toestellen onder druk.
Staatsuitgeverij, 's-Gravenhage, 1973 + later verschenen aanvullingen en wijzigingen.
- [1.6] Provinciale Waterstaat in Zuid-Holland
Pijpleidingcode 1972 (+ latere revisies).
's-Gravenhage.
- [1.7] DIN 2413
Stahlrohre, Berechnung der Wanddicke gegen Innendruck.
Juni 1972.

- [1.8] Published Document 6493
Guidance on some methods for the derivation of acceptance levels for defects in fusion welded joints.
British Standards Institution, 1980

- [1.9] BS 5762
Methods for Crack Opening Displacement (COD) testing.
British Standards Institution, 1979.

- [1.10] Diverse American Petroleum Institute (API) Specifications,
onder meer API Std 5L, 5LS, 5LX en 1104.

- [1.11] ANSI/ASME B 31.8 - 1979
Liquid Petroleum Transportation Piping Systems.
The American Society of Mechanical Engineers, New York, 1979.

- [1.12] Technische Grondslagen voor de berekening van Bouwconstructies
TGB 1972 (wordt thans herzien)
NEN 3850 Algemeen gedeelte en belastingen (wordt NEN 6700 en 6702)
NEN 3851 Staal (wordt NEN 6770 en volgende)

- [1.13] Commission of the European Communities
Eurocode no. 1: Common unified rules for different types of construction and material (draft).
Eurocode no. 3: Common unified rules for steel structures (draft).
Brussel, 1984.

- [1.14] Voorschriften Beton 1974 (VB 1974)
NEN 3861 e.v.

- [1.15] N.V. Nederlandse Gasunie
Constructiespecificatie CS-1-N, deel 1.
Groningen, maart 1978.

[1.16] N.V. Nederlandse Gasunie
Materiaalspecificatie MS-1-E.
Groningen, 1975.

[1.17] European Pipeline Research Group
Recommendation for toughness requirements of gas transmission
pipelines, June 1981.
Verkrijgbaar bij de N.V. Nederlandse Gasunie in Groningen.

5.2. Rapporten met rekenregels waaraan in deze TGSL wordt gerefereerd

[2.1] A.M. Gresnigt
Rekenregels voor ingegraven rechte stalen leidingen.
IBBC-TNO rapport BI-86-112, 1986

[2.2] A.M. Gresnigt
Rekenregels voor gladde bochten in ingegraven stalen
leidingen.
IBBC-TNO rapport BI-86-113, 1986

[2.3] A.M. Gresnigt
Rekenregels voor mijterbochten in ingegraven stalen leidingen.
IBBC-TNO rapport BI-86-114, 1986

[2.4] A.M. Gresnigt
Vermoeifingsberekening bij ingegraven stalen transport-
leidingen.
IBBC-TNO rapport BI-82-31, 1982

[2.5] P.H.A. Rietjens
Scheurpropagatie in gastransportleidingen.
N.V. Nederlandse Gasunie, 1981.
Gas, nummer 6, juni 1982

5.3. Achtergrond-rapporten in het kader van het onderzoek pijpleidingen

[3.1] A.M. Gresnigt

Ontwerp en berekening van ingegraven stalen leidingen met de plasticiteitsleer. Samenvattend rapport van het onderzoek pijpleidingen - OPL.

IBBC-TNO rapport BI-86-111, 1986.

[3.2] P. Bristoll, A.M. Gresnigt en P.H.A. Rietjens

Materiaaleisen, eindrapport van de Subgroep Materiaaleisen van de Begeleidingscommissie Pijpleidingen.

IBBC-TNO rapport BI-82-74, 1982.

[3.3] W.J. Heijnen

Grondmechanische leidingparameters voor de berekening van Buisleidingen bij Kruisingen met Waterkeringen, Waterlopen en Wegen.

Grondmechanica Delft, 1983.

[3.4] A.M. Gresnigt

Plastic design of buried steel pipelines in settlement areas. HERON, nr. 4, 1986.

(Heron is een gezamenlijke uitgave van de Afdeling Civiele Techniek van de TU-Delft en van het Instituut TNO voor Bouwmaterialen en Bouwconstructies.)

N.B.: In het samenvattend rapport [3.1] is een lijst opgenomen van de ca. 30 rapporten die in het kader van het onderzoek pijpleidingen zijn verschenen.

5.4. Overige publikaties

- [4.1] B.J.J. Soudijn en R.A.J. de Kock
Compendium Geo-tubo mechanica (2 delen).
Provinciale Waterstaat in Zuid-Holland, 1977

- [4.2] M.G. Spangler
Stresses in pressure pipelines and protective casing pipes.
Proceedings of the American Society of Civil Engineers,
Journal of the Structural Division. Paper 1054, September
1956.

- [4.3] E. Schweinheim
Vereinfachtes Verfahren zur Berechnung erdverlegter,
elastischer Rohre bei Aussenbelastung durch Strassenverkehr.
Rohre, Rohrleitungsbau, Rohrleitungstransport, Oktober 1965.

- [4.4] F.M. Burdekin en M.G. Dawes
Practical use of linear elastic and yielding fracture
mechanics with particular reference to pressure vessels.
Conference on Practical Application of Fracture Mechanics to
Pressure-Vessel Technology, Paper 5, London, May 3 - 5, 1971.

- [4.5] S.J. Garwood en A.A. Willoughby
An analysis of safety factors in ductile fracture and their
bearing on time dependent effects in relation to
circumferential defects in pressurized pipe.
Rapport LD 22734 van september 1981, aangevuld met brief
SJG/jp/285.82 van 24 mei 1982 aan Ir. P.H.A. Rietjens, N.V.
Nederlandse Gasunie.
The Welding Institute Research Laboratory, Abington Cambridge.

Bijlage 1 bij de TGSL - 1986

REKENPROCEDURE

INLEIDING

In deze bijlage is aangegeven welke gegevens nodig zijn en hoe de berekeningen kunnen worden uitgevoerd.

In bijzondere omstandigheden kan de vergunning gevende instantie andere c.q. aanvullende berekeningen vragen.

1. BENODIGDE GEGEVENS

1.1. Algemene gegevens

Deze betreffen in het algemeen:

- De vormgeving en ligging van de leiding met gegevens over de gronddekking, eventuele damwanden en dergelijke.
- Gegevens over de wijze van aanleggen (ontgravingen e.d.), het lassen en de corrosiebescherming.
- De aan te houden schadefactor sf.
- De aan te houden verkeersbelasting.

1.2. Leidinggegevens

Deze betreffen in het algemeen:

- De maximale bedrijfsdruk.
- Het te transporteren produkt.
- De te verwachten temperatuurvariaties in de omringende grond en in het getransporteerde produkt.
- De diameter.
- De wanddikte.

Bijlage

- De straal van de gladde bochten c.q. de afmetingen van de mijterbochten.
- De mechanische eigenschappen van het leidingmateriaal (vloeigrens, breukgrens, rek bij breuk, kerfslagwaarden, aanvaardbare (las-) onvolkomenheden, en bij berekeningen volgens de plasticiteitsleer de CTOD-waarde, c.q. andere gegevens waarmee een beoordeling van de rekapaciteit mogelijk is).

1.3. Gegevens over de grond

Deze worden verkregen uit grondmechanisch onderzoek. Voor de benodigde omvang van dit onderzoek en de te hanteren onzekerheidsfactoren en dergelijke wordt verwezen naar de Leidraden [1.1] en [1.2].

2. BEREKENINGEN VOLGENS DE ELASTICITEITSLEER

2.1. Liggerberekeningen

2.1.1. De rekentoestand uitwendige belastingen (art. 2.2.2.2)

Door het uitvoeren van vier berekeningen met combinaties van hoge en lage laterale beddingsconstante (k_{λ}^r) en hoge en lage wrijvingsconstante (k_w^r), wordt bepaald welke combinatie de hoogste spanningen geeft. Deze is de maatgevende.

2.1.2. Rekentoestand inwendige druk en uitwendige belasting (art. 2.2.2.1)

Er wordt één liggerberekening uitgevoerd bij de maatgevende combinatie van k_{λ}^r en k_w^r die bij de rekentoestand uitwendige belastingen is gevonden.

Bijlage

2.2. Doorsnede berekeningen

Bij elke van de twee rekentoestanden volgens art. 2.2.2.1 en art. 2.2.2.2, worden in een aantal doorsneden doorsnede-berekeningen uitgevoerd. De doorsneden worden zo gekozen dat mag worden verwacht dat daarmee de zwaarst belaste punten in beschouwing worden genomen. In het algemeen zijn dit doorsneden ter plaatse van bochten en doorsneden in rechte buizen waar het in de liggerberekeningen gevonden buigend moment het grootst is.

2.2. Vermoeifingsberekening

Hiervoor wordt verwezen naar "Vermoeifingsberekening bij ingegraven stalen transportleidingen" [2.4].

3. BEREKENINGEN VOLGENS DE PLASTICITEITSLEER3.1. Berekening op inwendige druk (art. 3.2.2.1)

Volstaan kan worden met een berekening volgens de "ketelformule", waarbij voor de diameter veiligheidshalve de uitwendige diameter wordt genomen:

$$\sigma_{yp} = \frac{P D_u}{2t}$$

3.2. Liggerberekeningen3.2.1. De maatgevende combinatie van k_{λ}^r en k_w^r

Deze wordt bepaald aan de hand van vier liggerberekeningen met hoge en lage combinaties van k_{λ}^r en k_w^r . Deze liggerberekeningen mogen worden uitgevoerd in het elastisch gebied.

Bijlage

3.2.2. Rekentoestand inwendige druk en uitwendige belastingen (art. 3.2.2.2)

Bij de maatgevende combinatie van k_{λ}^r en k_w^r van par. 3.2.1 wordt één liggerberekening uitgevoerd. Vervolgens wordt bij de dan berekende spannings- en vervormingstoestand nagegaan welke variaties in de spanningen en vervormingen optreden bij variaties van de inwendige druk en, indien van toepassing, de temperatuur.

Het uitvoeren van deze laatste berekeningen vergt een geavanceerd computerprogramma. Een vereenvoudiging is mogelijk door aansluitend aan de liggerberekening met P_{gem} , liggerberekeningen uit te voeren met P_{min} en $1,1 P_0/sf$, en indien van toepassing variaties in de temperatuur. De verschillen in spanningen en rekken die met deze laatste berekeningen worden berekend zullen aan de veilige kant zijn. Deze verschillen moeten worden berekend in verband met de grenstoestand wisselend vloeien.

3.2.3. Rekentoestand uitwendige belastingen (art. 3.2.2.3)

Bij de maatgevende combinatie van k_{λ}^r en k_w^r wordt één liggerberekening uitgevoerd.

3.3. Doorsnedeberkeningen

Bij elke liggerberekening wordt voor de maatgevende doorsneden een doorsnedeberkening uitgevoerd. Voor de rekentoestand inwendige druk en uitwendige belastingen wordt voor wat betreft de uitgangssituatie bij variërende druk, uitgegaan van de ovalisering zoals bereikt bij de liggerberekening met P_{gem} .

Bijlage

3.4. Vermoeifingsberekeningen

De als gevolg van variaties in de druk optredende spanningsvariaties kunnen op de in par. 3.2.2 en 3.3 beschreven wijze worden berekend. Verder wordt verwezen naar "Vermoeifingsberekening bij ingegraven stalen transportleidingen" [2.4].

4. TOETSINGEN

De berekende spanningen in langsrichting en in omtreksrichting, alsmede de berekende vervormingen worden getoetst aan de in hoofdstuk 4 van de TGSL gegeven grenswaarden.

Uiteraard dient verder te zijn voldaan aan de nadere bepalingen van hoofdstuk 2 c.q. hoofdstuk 3 van de TGSL.

Bijlage 2 bij de TGSL - 1986SAMENVATTING REKENREGELS VOOR DE BEREKENING VAN
INGEGRAVEN STALEN STRANSPORTLEIDINGEN

<u>INHOUD VAN DEZE BIJLAGE</u>	<u>BLZ.</u>
NOTATIES	110
1. INLEIDING	116
2. REKENREGELS VOOR RECHTE LEIDINGEN [2.1]	117
2.1. Elasticiteitsleer	117
2.1.1. Buiging	117
2.1.2. Wringing	117
2.1.3. Doorsnedeberkening	118
2.1.4. Rekenprocedure elasticiteitsleer	121
2.2. Plasticiteitsleer	121
2.2.1. Uitgangspunten, rekenprocedure	121
2.2.2. Eind elastisch gebied	122
2.2.3. Volplastisch gebied	122
2.2.4. Elastisch-plastisch gebied	127
2.3. Berekening van de rekken	129
2.3.1. Langsrichting	129
2.3.2. Onder 45° met de langsas	130
2.3.3. Omtreksrichting	130

3.	REKENREGELS VOOR GLADDE BOCHTEN [2.2]	132
3.1.	Inleiding	132
3.1.1.	Algemeen	132
3.1.2.	Geldigheidsgebied	132
3.1.3.	Tekenafspraken	132
3.2.	Elasticiteitsleer, buiging in het vlak van de bocht	135
3.2.1.	Buigstijfheid	135
3.2.2.	Ovalisering	138
3.2.3.	Rekken en spanningen	139
3.3.	Elasticiteitsleer, buiging uit het vlak van de bocht	141
3.3.1.	Buigstijfheid	141
3.3.2.	Ovalisering	142
3.3.3.	Rekken en spanningen	142
3.4.	Plasticiteitsleer, buiging in het vlak van de bocht	143
3.4.1.	Algemeen	143
3.4.2.	Eind elastisch gebied	144
3.4.3.	$M_{\max}$ bepaald door plastische scharnieren in omtreksrichting	144
3.4.4.	$M_{\max}$ bepaald door vloeien in langsrichting	146
3.4.5.	Elastisch-plastisch gebied	149
3.5.	Plasticiteitsleer, buiging uit het vlak van de bocht	151
3.5.1.	Draagvermogen, ovalisering, rekken	151
3.5.2.	Verhouding buiging en wringing	151
3.6.	Mogelijk gevaarlijke situaties bij grote M_{pbo}	151
3.7.	Variaties in de druk	152
3.7.1.	Algemeen	152
3.7.2.	Berekening ΔM , $\Delta \eta$, Δw	153
3.7.3.	Berekening maximale moment $M_{\max}$ bij (hoge) druk	153

3.8.	Berekening van de rekken	154
3.8.1.	In langsrichting	154
3.8.2.	In omtreksrichting	156
4.	REKENREGELS VOOR MIJTERBOCHTEN [2.3]	157
4.1.	Inleiding	157
4.1.1.	Algemeen	157
4.1.2.	Geldigheidsgebied	157
4.1.3.	Tekenafspraken	158
4.2.	Elasticiteitsleer	160
4.2.1.	Enkelvoudige mijterbochten	160
4.2.2.	Meervoudige mijterbochten met $S \geq 2 \ell_1$	161
4.2.3.	Meervoudige mijterbochten met $S < 2 \ell_1$	163
4.2.4.	Inwendige druk, c.q. uitwendige druk	163
4.2.5.	Gronddruk	164
4.2.6.	Buiging uit het vlak van de bocht	164
4.2.7.	De invloed van de ovalisering en van de verandering van de bochthoek	164
4.3.	Plasticiteitsleer	164
4.4.	Berekening van de rekken	164

NOTATIES*)

A	Oppervlakte van de doorsnede = πr^2	mm ²
A, B	Functie van de gronddrukken en doorsnedegrootheden (par. 3.2)	mm
a, b	Ovalisering bij rechte buizen	mm
a ₂ , a ₄	Coëfficiënten bij buiging in het vlak bij gladde bochten	-
a _g	Ovalisering ten gevolge van gronddruk $\rightarrow a_g = a_{qd} + a_{qi}$	mm
a _k	Ovalisering ten gevolge van (bijkomende) kromming	mm
a _p	Ovalisering ten gevolge van P	mm
a _{qd}	Ovalisering ten gevolge van Q _{di}	mm
a _{qi}	Ovalisering ten gevolge van Q _{in}	mm
b ₂ , b ₄	Coëfficiënten bij buiging uit het vlak bij gladde bochten	-
C _o , C _p	Functie van λ , resp. λ en ψ (par. 3.2)	-
c	Coëfficient (par. 2.2.3.2)	-
c ₁ , c ₂	Coëfficiënten (par. 2.2.3.1)	-
D _u	Uitwendige diameter	mm
D _g , D	D _u - t	mm
D	Dwarskracht (bij een combinatie van verticale en horizontale dwarskracht, de resultante van beide)	N
D _o , D _p	Functie van λ , resp. λ en ψ (par. 3.2)	-
ΔD_v	Verandering van de verticale diameter; de verticale diameter is de diameter in het vlak van buiging	mm
ΔD_h	Verandering van de horizontale diameter; de horizontale diameter is de diameter loodrecht op het vlak van buiging	mm
E	Elasticiteitsmodulus	N/mm ²
EI _{bo}	Buigstijfheid van de bocht	Nmm ²
EI _{rb}	Buigstijfheid van de aan de bocht aansluitende rechte buis	Nmm ²

*) Symbolen die in bijlage 2 voorkomen maar niet in deze lijst zijn vermeld, worden verklaard bij de tekst waar ze worden gebruikt.

F	Normaalkracht in de leiding	N
$f_1, f_2, \dots, f_8$	Coëfficiënten bij de berekening van bochten	-
f_{rr}	Reroundingfactor	-
f_{wm}, f_{wr}	Factor bij de ovalisering bij bochten voor het midden resp. de randen van de bocht	-
G	Glijdingsmodulus	N/mm ²
G_o, G_p	Functie van λ , resp. ψ (par. 3.2)	-
g	Functie van c_1 en c_2 (par. 2.2.3.1)	-
h	Functie van a en r (par. 2.2.3.1)	-
I	Traagheidsmoment	mm ⁴
I_{red}	Gereduceerd traagheidsmoment	mm ⁴
i_{xo}	Spanningsverhogingsfactor voor de langsrichting in de bocht voor $P = 0$	-
i_{xp}	Spanningsverhogingsfactor voor de langsrichting in de bocht bij aanwezigheid van P	-
i_{yo}	Idem voor de omtreksrichting voor $P = 0$	-
i_{yp}	Idem voor de omtreksrichting bij aanwezigheid van P	-
K	Kromming door buiging	mm ⁻¹
δK	Toeneming van de kromming	mm ⁻¹
K_e	Kromming waarbij juist vloeien begint bij zuivere buiging	mm ⁻¹
K'_e	Kromming waarbij vloeien begint bij gecombineerde belasting (par. 2.2.4)	mm ⁻¹
K_{cr}	Kritieke kromming bij zuivere buiging (plooien)	mm ⁻¹
K_{ploop}	Kritieke kromming bij gecombineerde belasting (plooien)	mm ⁻¹
k_b, k_t, k_s, k_y	Coëfficiënten bij de doorsnede-berekening bij Q_{di}	-
k'_b, k'_t, k'_s, k'_y	Idem bij Q_{in}	-
k_o	Buigstijfheidsfactor bij bochten bij $P = 0$	-
k_p	Buigstijfheidsfactor bij bochten bij aanwezigheid van P	-
k'_o, k'_p	Gereduceerde waarde van k_o , resp. k_p in verband met de invloed van de aansluitende rechte buizen, de bij- komende kromming en de ovalisering	-
λ_1	De lengte waarover EI_{bo} van toepassing is (mijterbocht)	mm
M	Buigend moment in de leiding als ligger	Nmm
M_{cr}	Buigend moment bij K_{cr}	Nmm
M_e	Buigend moment waarbij vloeien begint bij zuivere buiging	Nmm

M'_e	Buigend moment M waarbij vloeien begint bij gecombineerde belasting	Nmm
M_m	Maximale waarde van M in een rechte buis, c.q. in een bocht als vloeien in langsrichting maatgevend is	Nmm
M_p	Plastisch buigend moment bij rechte buizen	Nmm
M_{max}	Maximale waarde van het buigend moment in een bocht	Nmm
M_{pbo}	Maximaal buigend moment in een bocht als het optreden van plastische scharnieren in omtreksrichting maatgevend is	Nmm
M_{ploo1}	Buigend moment bij K_{ploo1}	Nmm
M_t	Wringend moment	Nmm
M_{tp}	Plastisch wringend moment bij zuivere wringing	Nmm
M_{tpr}	Gereduceerde waarde van M_{tp} (par. 2.2.3.1)	Nmm
M_{tcr}	Wringend moment bij θ_{cr}	Nmm
M_{tploo1}	Wringend moment bij θ_{ploo1}	Nmm
m	Plaatmoment per eenheid van breedte	Nmm/mm
m_e	Plaatmoment m waarbij juist vloeien wordt bereikt	Nmm/mm
m_p	Plastisch plaatmoment m	Nmm/mm
m_y	Plaatmoment in omtreksrichting	Nmm/mm
m_{yp}	Plaatmoment m_y ten gevolge van P	Nmm/mm
m_{ybqd}, m_{ybi}	Plaatmoment m_y in de bodem ten gevolge van Q_{di} resp. Q_{in}	Nmm/mm
m_{ytqd}, m_{yti}	Plaatmoment m_y in de top ten gevolge van Q_{di} resp. Q_{in}	Nmm/mm
m_{ysqd}, m_{ysi}	Plaatmoment m_y in de zijde ten gevolge van Q_{di} resp. Q_{in}	Nmm/mm
m_{yqd}	Gemiddeld plaatmoment m_y ten gevolge van Q_{di}	Nmm/mm
m_{yqi}	Idem ten gevolge van Q_{in}	Nmm/mm
m_{yq}	Idem ten gevolge van Q_{di} en $Q_{in} \rightarrow m_{yq} = m_{yqd} + m_{yqi}$	Nmm/mm
m_{yk}	Idem ten gevolge van buiging	Nmm/mm
m_{tot}	Totale waarde van m_y in de berekening van M_{pbo}	Nmm/mm
N	Effectieve normaalkracht in de leiding	N
n	Plaatnormaalkracht per eenheid van breedte	N/mm
n_x	Plaatnormaalkracht n in langsrichting	N/mm
n_y	Plaatnormaalkracht n in omtreksrichting	N/mm
P	Drukverschil tussen de binnenzijde en de buitenzijde van de leiding $P = P_i - P_u$	N/mm ²
P_{barst}	Barstdruk	N/mm ²
P_u	Uitwendige druk	N/mm ²
P_i	Inwendige druk	N/mm ²

Q_{di}	Direct overgedragen gronddruk per eenheid van lengte	N/mm
Q_{in}	Indirect overgedragen gronddruk per eenheid van lengte	N/mm
Q_{eq}	Equivalente gronddruk (par. 2.2.3.1 en par. 3.2.1)	N/mm
q, q_1, q_2	Gronddruk per eenheid van oppervlak	N/mm ²
R	Straal van een bocht zonder belasting	mm
R'	Straal van een bocht inclusief bijkomende kromming	mm
R''	Straal van een bocht inclusief de bijkomende kromming en vermeerderd met r bij negatieve buiging en verminderd met r bij positieve buiging	mm
r	Gemiddelde straal $r = D_g/2$	mm
r'	Plaatkromming bij een geovaliseerde leiding	mm
S	Afstand tussen twee knikken in een meervoudige mijterbocht	mm
S_{kd}	Som van de coëfficiënten $k_b + k_t - 2 k_s$	-
S_{ki}	Som van de coëfficiënten $k'_b + k'_t - 2 k'_s$	-
t	Wanddikte	mm
t_r	Wanddikte van de aan de bocht aansluitende rechte buis	mm
t_b	Wanddikte van de bocht	mm
u	Verplaatsing van een deeltje van de buisomtrek langs de omtrek	mm
W	Weerstandsmoment van de buisdoorsnede	mm ³
W_e	Weerstandsmoment volgens de elasticiteitsleer	mm ³
W_p	Weerstandsmoment volgens de plasticiteitsleer	mm ³
W_{ered}, W_{pred}	Gereduceerde waarden van W_e en W_p	mm ³
w	Verplaatsing van een deeltje van de buisomtrek loodrecht op de omtrek, ovalisering bij bochten ($w = 0,5 \Delta D$)	mm
w_m	Ovalisering in het midden van de bocht	mm
w_r	Ovalisering op de overgang van de bocht naar de rechte buis	mm
w_h, w_v	Horizontale ovalisering (loodrecht op het vlak van de bocht), resp. verticale ovalisering (in het vlak van de bocht)	mm
w_∞	Ovalisering zonder de verstijvende invloed van de aansluitende rechte buizen	mm
α, β	Belastinghoek en reactiehoek bij Q_{di} en Q_{eq}	rad
α	Bochthoek van een gladde bocht zonder belasting	rad
2α	Idem voor een mijterbocht	rad

$\Delta\alpha$	Verandering van α door buiging	rad
γ	Belastinghoek bij Q_{fn}	rad
γ	Afschuifhoek bij schuifspanningen	rad
γ	Hulphoek bij bochten	rad
δ	Verplaatsing	mm
ϵ	Rek	-
ϵ_e	Rek bij het bereiken van $\sigma_e \rightarrow \epsilon_e = \sigma_e / E$	-
ϵ_x	Rek in langsrichting	-
ϵ_y	Rek in omtreksrichting	-
ϵ_{cr}	Kritieke rek (stuik) bij buiging en normaalkracht (plooien)	-
ϵ_{ploo1}	Kritieke rek (stuik) bij gecombineerde belasting (plooien)	-
η	Relatieve verandering van $\alpha \rightarrow \eta = \Delta\alpha/\alpha$	-
η_e	Waarde van η aan het eind van het elastisch gebied	-
η_p	Waarde van η in het (elastisch-) plastisch gebied	-
θ	Hoekverdraaiing bij wringing per eenheid van lengte van de buis	rad/mm
$\delta\theta$	Toeneming van θ	rad/mm
θ_{pl}	De waarde van θ waarbij juist vloeien optreedt door alleen M_t	rad/mm
θ_{cr}	Kritieke θ bij zuivere wringing (plooien)	rad/mm
θ_{ploo1}	Kritieke θ bij gecombineerde belasting (plooien)	rad/mm
θ'	Hoekverdraaiing bij een plastisch scharnier	rad
λ	Coëfficiënt: $\lambda = t R/r^2$	-
λ'	Idem: $\lambda' = t R'/r^2$	-
λ''	Idem: $\lambda'' = t R''/r^2$	-
ν	Dwarscontractie-coëfficiënt	-
ρ	Kromtestraal bij buiging uit het vlak van de bocht	mm
σ	Spanning	N/mm ²
σ_e	Vloeispanning	N/mm
σ_m	Maximale spanning	N/mm ²
σ_x	Spanning in langsrichting	N/mm ²
σ_y	Spanning in omtreksrichting	N/mm ²
τ	Schuifspanning	N/mm ²

τ_{cr}	Plooispanning bij zuivere wringing	N/mm^2
τ_{plooif}	Plooispanning bij gecombineerde belasting	N/mm^2
ϕ	Hoek bij de berekening van bochten	-
ψ_m	Helling van het vloeiooppervlak bij variatie van M	-
ψ_t	Helling van het vloeiooppervlak bij variatie van M_t	-
ψ	Factor bij de berekening bochten $\psi = PR^2/E r t$	-
ψ'	Idem: $\psi' = P(R')^2/E r t$	-
ψ''	Idem: $\psi'' = P(R'')^2/E r t$	-

Subschriften voor zover in het voorgaande nog niet aangegeven:

e	Eind elastisch gebied
p	Vloeikracht van de betreffende grootheid
p_r, p_{dtr}	Gereduceerde waarde van de vloeikracht
p_l	Plastisch gedeelte van de betreffende grootheid
cr	Kritieke waarde in verband met plooiën
m, max	Maximale waarde
x	Langsrichting
y	Omtreksrichting
x_m, x_p	In langsrichting ten gevolge van M, P, K, Q
x_k, x_q	
y_m, y_p	In omtreksrichting ten gevolge van M, P, K, Q
y_k, y_q	

1. INLEIDING

In hoofdstuk 2 en 3 van de TGSL 1986 wordt gerefereerd aan de rekenregels die in [2.1], [2.2] en [2.3] zijn afgeleid.

In deze bijlage zijn de belangrijkste rekenregels uit deze rapporten samengevat.

Ten aanzien van het gebruik van deze bijlage zijn de volgende punten van belang.

- De rekenregels betreffen de bepaling van de doorsnede-eigenschappen van leidingen (stijfheid, sterkte, ovalisering).
- In deze bijlage zijn alleen de belangrijkste rekenregels opgenomen die in het kader van het onderzoek pijpleidingen (OPL) zijn afgeleid. Deze rekenregels betreffen in hoofdzaak het gedrag van transportleidingen in het plastisch gebied. Voorzover rekenregels voor het elastisch gebied ontbreken wordt verwezen naar de referenties in hoofdstuk 5 van de TGSL - 1986.
- Voor toelichtingen en achtergronden bij de in deze bijlage gegeven rekenregels wordt verwezen naar [2.1], [2.2], [2.3], [3.1] en [3.4].
- Voor zover niet anders is vermeld, wordt voor de eenheid van kracht, lengte en druk respectievelijk N, mm en N/mm^2 gebruikt.
(N.B.: 1 bar = 0,1 N/mm^2)

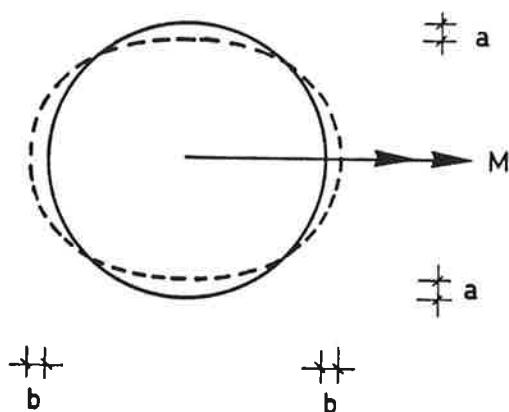
2. REKENREGELS VOOR RECHTE LEIDINGEN [2.1]

2.1. Elasticiteitsleer

2.1.1. Buiging

Door de ovalisering wordt de buigstijfheid verminderd:

$$EI_{\text{red}} = E \pi r^3 t \left(1 - 1,5 \frac{a}{r}\right) \quad \dots\dots (2.1-1)$$



Afb. 2.1-1: Ovalisering in een door gronddrukken en buiging belaste leiding.

Voor de maximale buigspanning in langsrichting geldt:

$$\sigma_m = \frac{M}{W_{\text{ered}}} = \frac{M}{\pi r^2 t \left(1 - 0,5 \frac{a}{r}\right)} \quad \dots\dots (2.1-2)$$

2.1.2. Wringing

De invloed van de ovalisering is bij wringing verwaarloosbaar klein. Voor de wringstijfheid geldt:

$$GI_t = 0,81 \cdot 10^5 \cdot 2 \pi r^3 t \quad \dots\dots (2.1-3)$$

Voor de wringspanning geldt:

$$\tau = \frac{M_t}{2 \pi r^2 t} \quad \dots\dots (2.1-4)$$

2.1.3. Doorsnedeberkening

2.1.3.1. Inwendige of uitwendige druk P:

$$\sigma_{yp} = \frac{P D_u}{2 t} \quad \text{..... (2.1-5)}$$

2.1.3.2. Dwarskracht en normaalkracht:

$$\tau_{\max} = \frac{D}{4 r t} \quad \text{..... (2.1-6)}$$

$$\sigma_x = \frac{N}{2 \pi r t} \quad \text{..... (2.1-7)}$$

2.1.3.3. Gronddrukken

a. Voor direct overgedragen gronddrukken Q_{di} geldt voor de ovalisering:

$$a_{qd} = 0,5 k_y \frac{Q_{di} r^3}{EI_w} \left(1 + \frac{3 a}{r}\right) f_{rr} \quad \text{..... (2.1-8)}$$

Hierin is:

Q_{di} = gronddruk in N/mm

k_y = coëfficiënt die afhankelijk is van de belastinghoek en de opleghoek. In tabel 2.1-1 is k_y voor een aantal gevallen gegeven.

$$EI_w = \frac{E t^3}{12 (1 - \nu^2)} \quad \text{..... (2.1-9)}$$

$$f_{rr} = \frac{P_{cr}}{P_{cr} + P} \quad \text{..... (2.1-10)}$$

$$P_{cr} = \frac{3 EI_w}{r^3} \quad \text{..... (2.1-11)}$$

$$P = P_i - P_u \quad \text{..... (2.1-12)}$$

Voor de buigende momenten in de buiswand geldt:

$$m_{ysqd} = k_s Q_{di} r \left(1 + \frac{a}{r}\right) f_{rr} \quad \dots\dots (2.1-13)$$

$$m_{ytqd} = k_t Q_{di} r \left(1 + \frac{a}{r}\right) f_{rr} \quad \dots\dots (2.1-14)$$

$$m_{ybqd} = k_b Q_{di} r \left(1 + \frac{a}{r}\right) f_{rr} \quad \dots\dots (2.1-15)$$

De coëfficiënten k_s , k_t en k_b kunnen worden ontleend aan tabel 2.1-1.

- b. Voor indirect overgedragen gronddrukken Q_{in} gelden voor de ovalisering en de buigende momenten dezelfde formules als voor de direct overgedragen gronddrukken Q_{di} met dien verstande dat voor de coëfficiënten k_y , k_s , k_t en k_b de waarden k'_y , k'_s , k'_t en k'_b volgens tabel 2.1-2 worden gebruikt.

Coefficients for Bending Moments and Deflections of an Elastic Ring under Uniformly Distributed Vertical Load and Reaction											
α Deg.	β Deg.	K_b bodem	K_t top	K_s zijden	k_y vert.	α Deg.	β Deg.	K_b bodem	K_t top	K_s zijden	k_y vert.
0	0	0.318	0.318	-0.182	0.149	90	0	0.306	0.182	-0.168	0.129
	30	0.259	0.317	-0.180	0.146		30	0.246	0.180	-0.166	0.127
	60	0.213	0.312	-0.175	0.138		60	0.201	0.175	-0.161	0.118
	90	0.182	0.305	-0.168	0.129		90	0.169	0.169	-0.154	0.110
	120	0.162	0.299	-0.161	0.122		120	0.150	0.163	-0.147	0.103
	150	0.153	0.295	-0.156	0.117		150	0.140	0.158	-0.142	0.098
	180	0.150	0.294	-0.153	0.116		180	0.137	0.157	-0.140	0.096
30	0	0.317	0.259	-0.180	0.146	120	0	0.299	0.162	-0.161	0.122
	30	0.257	0.257	-0.178	0.143		30	0.240	0.160	-0.159	0.119
	60	0.211	0.252	-0.173	0.135		60	0.194	0.156	-0.154	0.111
	90	0.180	0.246	-0.166	0.127		90	0.163	0.150	-0.147	0.103
	120	0.160	0.240	-0.159	0.119		120	0.143	0.143	-0.140	0.096
	150	0.151	0.236	-0.154	0.115		150	0.134	0.139	-0.135	0.091
	180	0.148	0.235	-0.152	0.113		180	0.131	0.138	-0.133	0.089
60	0	0.312	0.213	-0.175	0.138	150	0	0.295	0.153	-0.156	0.117
	30	0.252	0.211	-0.173	0.135		30	0.236	0.151	-0.154	0.115
	60	0.207	0.207	-0.168	0.122		60	0.190	0.146	-0.149	0.107
	90	0.175	0.201	-0.161	0.118		90	0.158	0.140	-0.142	0.098
	120	0.156	0.194	-0.154	0.111		120	0.139	0.134	-0.135	0.091
	150	0.146	0.190	-0.149	0.107		150	0.129	0.129	-0.129	0.086
	180	0.143	0.189	-0.147	0.105		180	0.126	0.128	-0.128	0.085
	0					180	0	+0.294	+0.150	-0.153	0.116
	30						30	+0.235	+0.148	-0.152	0.113
	60						60	0.189	0.143	-0.147	0.105
	90						90	0.157	0.137	-0.140	0.096
	120						120	+0.138	+0.131	-0.133	0.089
	150						150	0.128	0.126	-0.127	0.085
	180						180	+0.123	+0.123	-0.123	0.083

Tabel 2.1-1: Momentcoëfficiënten en ovaliseringscoëfficiënten voor direct overgedragen gronddrukken Q_{di} .

Op- leg- hoek	Onder- steunings- hoek	Ondersteund leiding- gedeelte (oplegzone)				Met ondersteund leiding- gedeelte (zettingszone)			
α	β	k'_t	k'_s	k'_b	k'_y	k'_t	k'_s	k'_b	k'_y
-	0°	+0,080	-0,091	+0,239	+0,074	-	-	-	-
-	30°	+0,078	-0,089	+0,179	+0,071	-	-	-	-
-	60°	+0,073	-0,084	+0,134	+0,064	-	-	-	-
-	90°	+0,067	-0,077	+0,102	+0,055	-	-	-	-
-	120°	+0,061	-0,070	+0,083	+0,048	-	-	-	-
-	150°	+0,056	-0,065	+0,073	+0,043	-	-	-	-
-	180°	+0,055	-0,062	+0,070	+0,042	-	-	-	-
180	-	-	-	-	-	+0,070	-0,062	+0,055	+0,042

Tabel 2.1-2: Momentcoëfficiënten en ovaliseringscoëfficiënten bij indirect overgedragen gronddrukken Q_{in} .

Ten aanzien van tabel 2.1-1 en tabel 2.1-2 geldt dat voor tussen-gelegen waarden rechtlijnig mag worden geïnterpoleerd.

2.1.3.4. Ovalisering door buiging

$$a_k = (K)^2 \frac{r^5}{t^2} \left(1 + \frac{3a}{r}\right) f_{rr} \quad \dots\dots (2.1-16)$$

met

$$K = \frac{M}{EI} = \frac{M}{E \pi r^3 t} \quad \dots\dots (2.1-17)$$

2.1.3.5. Totale ovalisering

$$a = a_{qd} + a_{q1} + a_k \quad \dots\dots (2.1-18)$$

2.1.4. Rekenprocedure elasticiteitsleer

Allereerst wordt met behulp van geschatte waarden voor de gronddrukken een doorsnede-berekening uitgevoerd, teneinde de ovalisering te berekenen die in de formule voor de buigstijfheid moet worden gebruikt. Vervolgens kan de liggerberekening worden uitgevoerd.

Na het uitvoeren van de liggerberekening worden in de maatgevende doorsneden de spanningen en vervormingen berekend. Indien de in de liggerberekening aangenomen ovalisering ($\Delta D = 2 a$) meer dan $0,02 D$ afwijkt van de uiteindelijk berekende waarde, dienen de berekeningen opnieuw uitgevoerd te worden met een betere schatting van de ovalisering. Tenslotte dienen de uitkomsten te worden getoetst aan de grenswaarden volgens de TGSL.

2.2. Plasticiteitsleer

2.2.1. Uitgangspunten, rekenprocedure

Alvorens de liggerberekeningen kunnen worden uitgevoerd dient het draagvermogen op buigend moment en wringend moment bekend te zijn. Dit draagvermogen wordt beïnvloed door de overige belastingen zoals gronddrukken, normaalkracht, dwarskracht en inwendige druk.

Daarom wordt eerst een doorsnede-berekening uitgevoerd om voor de relevante leidinggedeelten dit draagvermogen te bepalen. Invoerparameters bij de doorsnede-berekening zijn de eerder vermelde overige belastingen.

Indien na afloop van de liggerberekeningen blijkt dat de uiteindelijk berekende gronddrukken, normaalkracht en dwarskracht te veel afwijken van de aanvankelijk aangenomen waarden, dienen de berekeningen te worden herhaald.

Een verschil van 10% van de respectievelijke vloeikrachten (draagvermogen gronddrukken, N_p , D_p) is aanvaardbaar. Een dergelijk verschil geeft nog maar zeer kleine afwijkingen in de grootte van het draagvermogen op buiging en wringing.

2.2.2. Eind elastisch gebied

Het eind van het elastisch gebied wordt bereikt als ergens in de buiswand de spanningscombinatie voldoet aan het vloeicriterium van Von Mises:

$$\sigma_c = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3 \tau^2} = \sigma_e \quad \dots\dots (2.2-1)$$

Eenvoudshalve kan deze voorwaarde bij goede benadering ook in de volgende vorm worden geschreven:

$$\frac{M}{M_e} + \frac{M_t}{M_{tp}} + \frac{m_y}{m_e} + \frac{n_y}{n_p} + \frac{D}{D_p} + \frac{N}{N_p} = 1 \quad \dots\dots (2.2-2)$$

De waarden voor M_e , M_{tp} , m_e , n_p , D_p en N_p kunnen worden ontleend aan par. 2.2.3.1. De grootheden in de tellers zijn de krachten die op het beschouwde leidingdeel werken.

2.2.3. Volplastisch gebied

In deze paragraaf worden de formules gegeven voor de geheel gevloeide doorsnede. In par. 2.2.4 wordt de overgang tussen het eind van het elastisch gebied en het volplastisch gebied behandeld (elastisch-plastisch gebied).

2.2.3.1. Interactieformules

Voor het draagvermogen op inwendige druk, c.q. uitwendige druk, buigend moment, wringend moment, normaalkracht, dwarskracht en gronddrukken gelden de volgende interactieformules:

$$\frac{M_m}{M_{pdtr}} + \left(\frac{N_m}{N_{pdtr}} \right)^{1,7} = 1 \quad \dots\dots (2.2-3)$$

Hierin is:

M_m = maximaal buigend moment

N_m = maximale effectieve normaalkracht = $F - P \pi r^2$ (2.2-4)

$$M_{pdtr} = M_{pr} \sqrt{1 - \left(\frac{D}{D_{pr}} + \frac{M_t}{M_{tpr}} \right)^2} \quad \dots\dots (2.2-5)$$

$$N_{pdtr} = N_{pr} \sqrt{1 - \left(\frac{D}{D_{pr}} + \frac{M_t}{M_{tpr}} \right)^2} \quad \dots\dots (2.2-6)$$

$$M_{pr} = g \ h \ M_p \quad \dots\dots (2.2-7)$$

$$g = \frac{c_1}{6} + \frac{c_2}{3} \quad \dots\dots (2.2-8)$$

$$h = 1 - \frac{2}{3} \frac{a}{r} \quad \dots\dots (2.2-9)$$

$$N_{pr} = g \ N_p \quad \dots\dots (2.2-10)$$

$$D_{pr} = g \ D_p \quad \dots\dots (2.2-11)$$

$$M_{tpr} = g \ M_{tp} \quad \dots\dots (2.2-12)$$

$$M_p = 4 \ r^2 \ t \ \sigma_e \ (\approx 1,27 \ M_e) \quad \dots\dots (2.2-13)$$

$$N_p = 2 \ \pi \ r \ t \ \sigma_e \quad \dots\dots (2.2-14)$$

$$D_p = 4 \ r \ t \ \sigma_e / \sqrt{3} \quad \dots\dots (2.2-15)$$

$$M_{tp} = 2 \ \pi \ r^2 \ t \ \sigma_e / \sqrt{3} = A \ r \ \tau_e \quad \dots\dots (2.2-16)$$

$$c_1 = \sqrt{4 - 3 \left(\frac{n_y}{n_p} \right)^2 - 2 \sqrt{3} \left| \frac{m_y}{m_p} \right|} \quad \dots\dots (2.2-17)$$

$$c_2 = \sqrt{4 - 3 \left(\frac{n_y}{n_p} \right)^2} \quad \dots\dots (2.2-18)$$

$$n_y = n_{yq} + n_{yk} + n_{yp} \quad \dots\dots (2.2-19)$$

$$n_{yq} = 0,25 \ Q_{dl} + 0,125 \ Q_{in} \quad \dots\dots (2.2-20)$$

$$n_{yk} = 0,20 \ \frac{M_m \ K}{r} \quad \dots\dots (2.2-21)$$

$$n_{yp} = P \ r \quad \dots\dots (2.2-22)$$

$$n_p = t \ \sigma_e \quad \dots\dots (2.2-23)$$

$$m_y = m_{yq} + m_{yk} + m_{yp} \quad \dots\dots (2.2-24)$$

$$m_{yq} = m_{yqd} + m_{yqi} \quad \dots (2.2-25)$$

$$m_{yqd} = 0,25 Q_{di} r \{1 - 0,25 (\sin \frac{\alpha}{2} + \sin \frac{\beta}{2})\} \cdot f_o \quad \dots (2.2-26)$$

$$m_{yqi} = 0,25 Q_{in} r \{0,5 - 0,25 \sin \frac{\gamma}{2}\} \cdot f_o \quad \dots (2.2-27)$$

$$m_{yk} = 0,071 M_m K f_o \quad \dots (2.2-28)$$

$$m_{yp} = - P r a \quad \dots (2.2-29)$$

$$m_p = 0,25 t^2 \sigma_e \quad \dots (2.2-30)$$

$$f_o = 1 + \frac{a}{r} \quad \dots (2.2-31)$$

Er wordt op gewezen dat in praktische gevallen de reductie door normaalkracht en met name dwarskracht vrij gering is.

Andere waarden die van belang zijn:

$$Q_{eq} = Q_{in} \frac{2 - \sin \frac{\gamma}{2}}{4 - \sin \frac{\alpha}{2} - \sin \frac{\beta}{2}} \quad \dots (2.2-32)$$

$$M_e = \pi r^2 t \sigma_e \quad \dots (2.2-33)$$

$$m_e = \frac{1}{6} t^2 \sigma_e \quad \dots (2.2-34)$$

2.2.3.2. Verhouding buigend moment - wringend moment

De verhouding tussen M_m en M_t is afhankelijk van de verhouding tussen de opgelegde buigvervorming δK en de opgelegde wringvervorming $\delta \theta$. Bij N kleiner dan $0,1 N_p$ en D kleiner dan $0,1 D_p$ kan gebruik worden gemaakt van:

$$M_m = \frac{g h M_p \delta K}{\sqrt{(\delta K)^2 + (\delta \theta)^2 / c}} \quad \dots (2.2-35)$$

$$M_t = \frac{g M_{tp} \delta \theta}{\sqrt{(\delta \theta)^2 + (\delta K)^2 \cdot c}} \quad \dots (2.2-36)$$

Hierin is:

$$c = \left(\frac{M_p}{M_{tp}} \right)^2 = 1,22 \quad \dots\dots (2.2-37)$$

Indien niet wordt voldaan aan $N < 0,1 N_p$ en $D < 0,1 D_p$ geldt:

$$M_t = M_{tp} \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad \dots\dots (2.2-38)$$

$$M_m = d h M_p \sqrt{g^2 - \left(\frac{D}{D_p} + \frac{M_t}{M_{tp}} \right)^2} \quad \dots\dots (2.2-39)$$

Hierin is:

$$a = 1,22 \left(\frac{\delta K}{\delta \theta} \right)^2 + d^2 \quad \dots\dots (2.2-40)$$

$$b = 2 d^2 \frac{D}{D_p} \quad \dots\dots (2.2-41)$$

$$c = d^2 \left(\frac{D}{D_p} \right)^2 - d^2 g^2 \quad \dots\dots (2.2-42)$$

$$d = \sqrt{1 - 2 \left(\frac{N_m}{M_{pdtr}} \right)^{1,7} + \left(\frac{N_m}{N_{pdtr}} \right)^{3,4}} \quad \dots\dots (2.2-43)$$

De verhouding tussen δK en $\delta \theta$ kan worden ontleend aan een oriënterende liggeberekening volgens de elasticiteitsleer. Bepalend is in dat geval de verhouding tussen het berekende buigend moment M en wringend moment M_t in de betreffende doorsnede:

$$\frac{\delta K}{\delta \theta} \approx \frac{M}{1,3 M_t} \quad \dots\dots (2.2-44)$$

2.2.3.3. Ovalisering

Bij een toeneming van de kromming met δK en een toeneming van de wringvervorming met $\delta \theta$ ontstaat in het plastisch gebied een toeneming van de ovalisering met δa volgens:

$$\delta a = - \frac{r}{t}^3 (2 \phi_m \delta K + 1,81 \phi_t \delta \theta) \quad \dots\dots (2.2-45)$$

Hierin zijn ϕ_m en ϕ_t de hellingen van het vloeiooppervlak:

$$\phi_m = \frac{dM/M_p}{dm_y/m_p} \quad \dots\dots (2.2-46)$$

$$\phi_t = \frac{dM_t/M_{tp}}{dm_y/m_p} \quad \dots\dots (2.2-47)$$

Door M/M_p en M_t/M_{tp} te berekenen voor m_y volgens (2.2-24) en voor dezelfde m_y vermeerderd met $0,05 m_p$ ontstaan twee waarden voor M , namelijk M' en M'' , en twee waarden voor M_t namelijk M'_t en M''_t . In deze berekeningen wordt uitgegaan van $M = M_m/h$. De factor h is gegeven in (2.2-9).

Voor (2.2-46) en (2.2-47) kan nu worden geschreven:

$$\phi_m = \frac{(M'' - M')/M_p}{0,05} \quad \dots\dots (2.2-48)$$

$$\phi_t = \frac{(M''_t - M'_t)/M_{tp}}{0,05} \quad \dots\dots (2.2-49)$$

Na de berekening van de toeneming van de ovalisering met δa kunnen de ovalisering a en de nieuwe kromming K worden ingevoerd in de interactieformules in par. 2.2.3.1. Met deze formules kan een nieuwe waarde voor m_y worden berekend. Vervolgens kan voor een nieuwe δK en $\delta \theta$, de toeneming δa worden berekend alsmede de grootte van M en M_t , en ook de nieuwe m_y .

Indien de nieuwe m_y groter is dan de oude $m_y + 0,05 m_p$ dan betekent dit dat de voorgaande stap te groot is geweest. De berekening moet dan worden herhaald voor een kleinere δK en $\delta \theta$.

In een bijlage van [2.1] is een rekenvoorbeeld opgenomen.

Bij voldoende grote inwendige druk wordt bij toenemende ovalisering m_y kleiner en nadert tot nul. Als $m_y = 0$ geworden, volgt de bijbehorende ovalisering uit de formules (2.2-24) t/m (2.2-29) met $m_y = 0$. Het plaatmoment m_y mag in dit rekenmodel namelijk niet negatief worden.

De maximale waarde van m_y is m_{ym} .

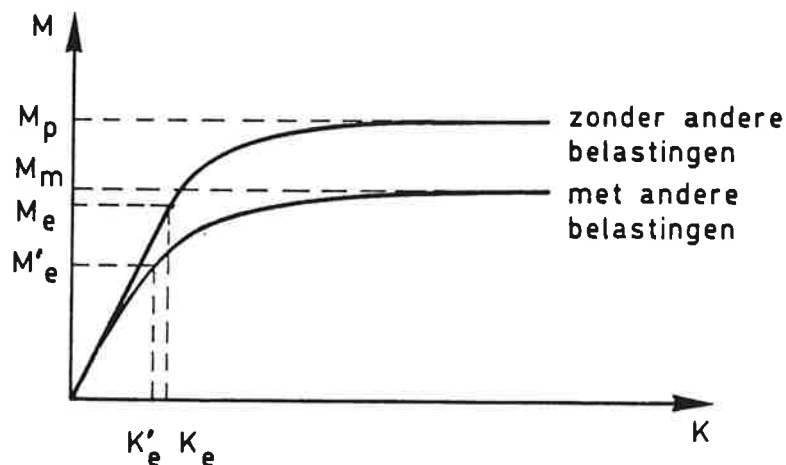
$$m_{ym} = 1,15 m_p \left\{ 1 - 0,75 \left(\frac{n_y}{n_p} \right)^2 \right\} \quad \dots\dots (2.2-50)$$

Bij zeer kleine inwendige druk of afwezigheid daarvan, nemen m_y en a bij toenemende kromming toe. Bij m_y naderend tot m_{ym} volgens (2.2-50) worden ϕ_m en ϕ_t onbepaald groot. Hetzelfde geldt dan voor de ovalisering.

2.2.4. Elastisch-plastisch gebied

2.2.4.1. Moment-krommingsdiagram

In de voorgaande paragrafen in dit hoofdstuk zijn rekenregels gegeven voor het elastisch gebied (par. 2.2.1) en voor het volplastisch gebied (par. 2.2.3).



Afb. 2.2-1: De invloed van gronddrukken en andere belastingen op het moment-krommingsdiagram.

Tot het bereiken van M_e is het gedrag elastisch. Daarna treedt een geleidelijke plastificering op van de doorsnede (elastisch-plastisch gedrag), tot de gehele doorsnede is gevloeid en M_p wordt bereikt. Eenvoudshalve kunnen voor de situatie met gronddrukken en andere belastingen de volgende rekenregels worden gebruikt:

$$M'_e = \frac{M_e}{M_p} M_m \approx \frac{M_m}{1,27} \approx \pi r^2 t \sigma'_e \quad \dots\dots (2.2-51)$$

$$K'_e = \frac{M'_e}{EI_{red}} \approx \frac{\sigma'_e}{E' r} \quad \dots\dots (2.2-52)$$

$$EI_{red} = E \pi r^3 t (1 - 1,5 \frac{a'}{r}) \approx E' \pi r^3 t \quad \dots\dots (2.2-53)$$

Hierin is a' de ovalisering bij het bereiken van K'_e . Er wordt op gewezen dat het eind van het elastisch gebied volgens par. 2.2.2 in werkelijkheid al bij een kleinere kromming dan K'_e kan zijn bereikt. Voor a dient dan de waarde te worden ingevoerd volgens par. 2.2.4.2 die behoort bij K'_e .
Voor een toelichting op de grootheden σ'_e en E' wordt verwezen naar afb. 3.2-2 en [3.1].

Voor het moment-krommingsdiagram voorbij K'_e geldt:

$$M = M_m \cdot 0,5 \left(\frac{\phi}{\sin \phi} + \cos \phi \right) \quad \dots\dots (2.2-54)$$

Hierin is:

$$\phi = \arcsin \frac{K'_e}{K} \quad \dots\dots (2.2-55)$$

2.2.4.2. Krommings-ovaliseringsdiagram

Voor de ovalisering gelden analoge overwegingen als voor het buigend moment:

$$a_2 = a_1 + \delta a \frac{M}{M_m} \quad \dots\dots (2.2-56)$$

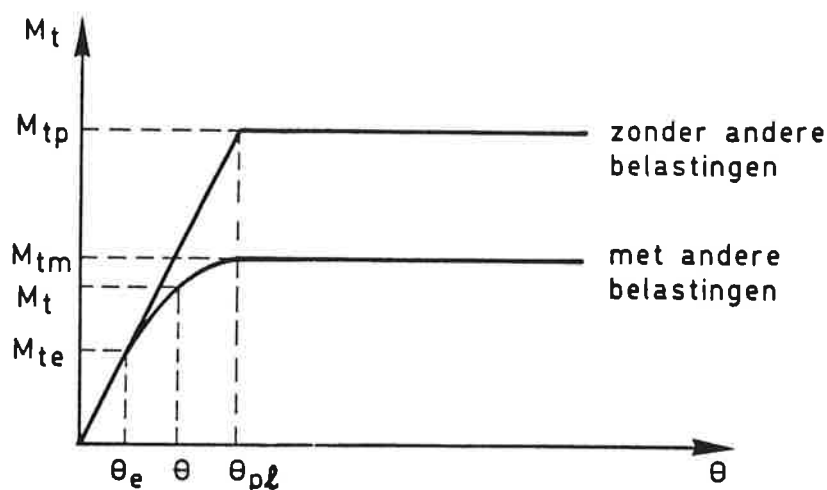
Hierin zijn:

a_1, a_2 = ovalisering aan het eind van de vorige stap, c.q. de nieuwe ovalisering

δa = toeneming van de ovalisering bij toeneming van de kromming met δK en/of de wringing met $\delta \theta$

M = buigend moment volgens (2.2-54)

2.2.4.3. Wringend moment-rotatiediagram



Afb. 2.2-2: De invloed van andere belastingen op het wringend moment-rotatiediagram.

Voor de elastisch-plastische tak tussen θ_e en θ_{pl} geldt:

$$M_t = \theta G I_t \left\{ 1 - \frac{(\theta - \theta_e) (M_{tp} - M_{tm})}{(\theta_{pl} - \theta_e) M_{tp}} \right\} \quad \dots\dots (2.2-57)$$

2.3. Berekening van de rekken

2.3.1. Langsrichting

Ten gevolge van buiging:

$$\epsilon_{xk} = \pm K r \quad \dots\dots (2.3-1)$$

Ten gevolge van normaalkracht:

$$\epsilon_{xn} = \frac{N}{AE} \quad \dots\dots (2.3-2)$$

Totaal:

$$\epsilon_x = \epsilon_{xk} + \epsilon_{xn} \quad \dots\dots (2.3-3)$$

2.3.2. Onder 45° met de langsas

Ten gevolge van wringing:

$$\epsilon_{45w} = 0,5 \gamma = 0,5 \theta r \quad \dots\dots (2.3-4)$$

Ten gevolge van dwarskracht:

$$\epsilon_{45d} = 0,5 \gamma = \frac{D}{G \ 2 \ r \ t} \quad \dots\dots (2.3-5)$$

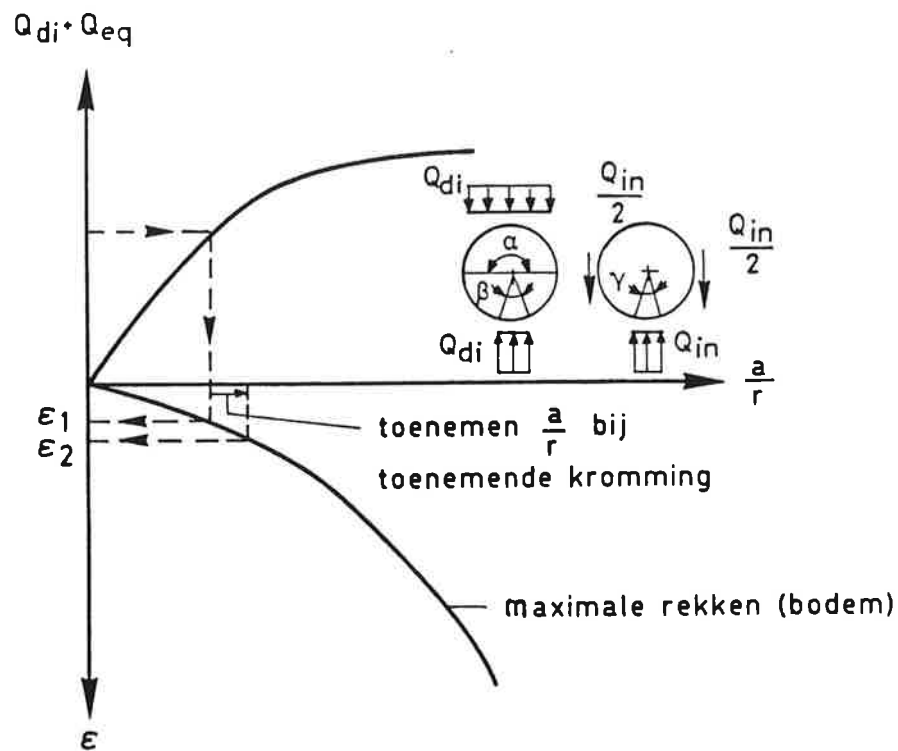
Totaal:

$$\epsilon_{45} = \epsilon_{45w} + \epsilon_{45d} \quad \dots\dots (2.3-6)$$

2.3.3. Omtreksrichting

Voor de omtreksrichting kunnen de rekken worden berekend uit een doorsnede-berekening. In afb. 2.3-1 is het resultaat van een dergelijke berekening geschetst. Vanwege het fysisch niet-lineaire en het geometrisch niet-lineaire karakter is een handberekening niet goed mogelijk. Daarom is in het algemeen een eindige elementen computerprogramma nodig dat beide niet-lineaire verschijnselen kan verwerken.

Een andere mogelijkheid is gebruik te maken van een bij het IBBC voor het berekenen van de rekken in omtreksrichting ontwikkeld computerprogramma REK, dat op de differentiemethode is gebaseerd.



Afb. 2.3-1: Berekening van de rekken in omtreksrichting.

Bij alleen gronddrukken Q_{di} en Q_{in} wordt de rek ϵ_1 gevonden.

Door de kromming neemt de ovalisering toe en wordt als maximale rek ϵ_2 gevonden.

Op de verticale as van afb. 2.3-1 is de som van Q_{di} en Q_{eq} uitgezet.

Q_{eq} is gegeven in (2.2-32).

3. REKENREGELS VOOR GLADDE BOCHTEN [2.2]

3.1. Inleiding

3.1.1. Algemeen

In [2.2] zijn op basis van een energiebeschouwing, aangevuld met experimenteel verkregen gegevens, rekenregels afgeleid voor gladde bochten. Gebleken is dat het gedrag bij buiging behalve door de druk P in belangrijke mate wordt beïnvloed door:

- de gronddrukken Q_{di} en Q_{in}
- de grootte van de bochthoek α ;
- de buigrichting.

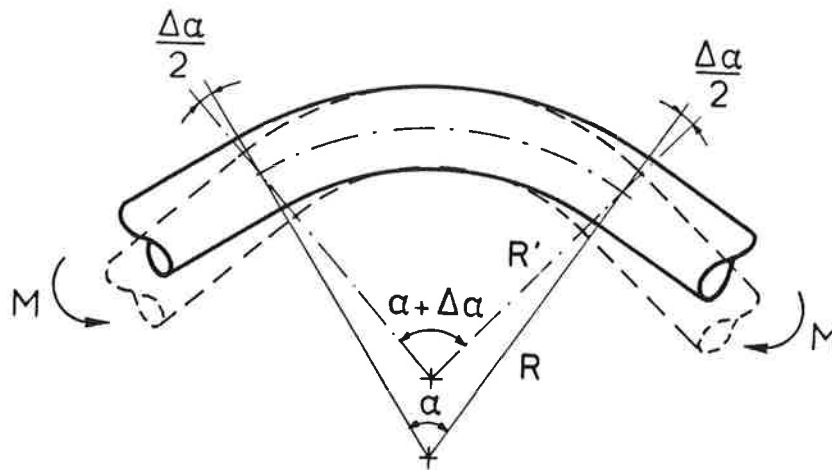
Tot het gereed komen van [2.2] waren voor zover bekend geen voorschriften beschikbaar waarin rekenregels waren opgenomen om de drie laatst genoemde invloeden in rekening te brengen.

3.1.2. Geldigheidsgebied

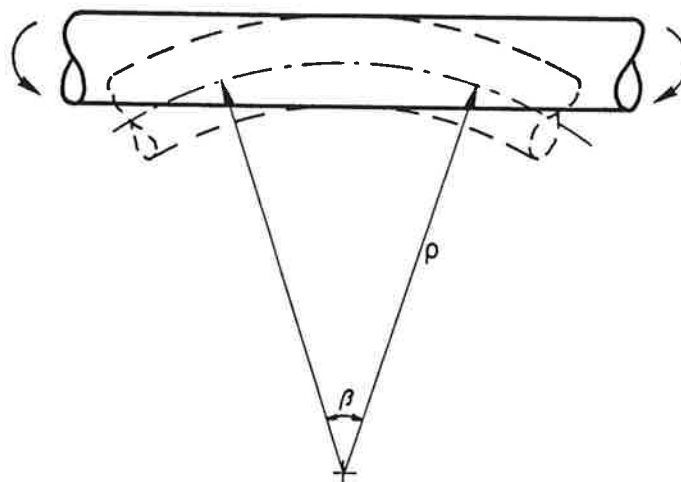
De in deze samenvatting opgenomen betrekkingen gelden voor bochten waarvan de bocht karakteristiek λ groter is dan 0,15. Voor bochten met λ kleiner dan 0,15 wordt verwezen naar [2.2]. Er moeten dan meer termen in de reeksontwikkeling worden meegenomen dan de twee die bij de afleiding van de volgende formules zijn gebruikt. Overigens wordt opgemerkt dat in de praktijk zelden bochten voorkomen met $\lambda < 0,15$.

3.1.3. Tekenafspraken

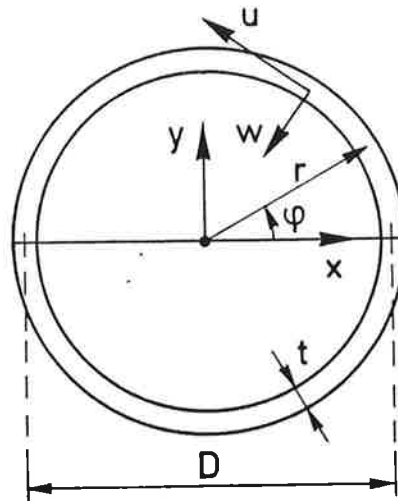
In afb. 3.1-1, 3.1-2, 3.1-3 en 3.1-4 zijn de positieve richtingen van de belangrijkste krachten en vervormingen aangegeven.



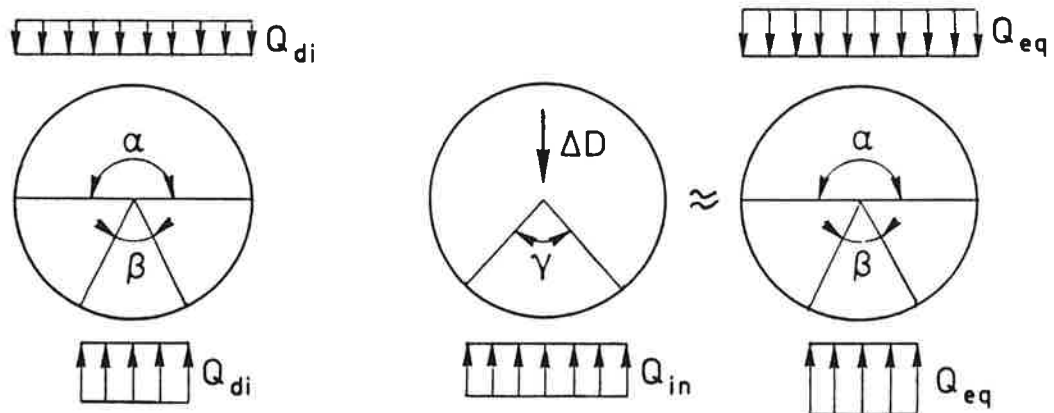
Afb. 3.1-1: Buiging in het vlak. Het vlak van de bocht is het vlak van de tekening.



Afb. 3.1-2: Buiging uit het vlak. Het vlak van de bocht staat loodrecht op het vlak van de tekening. De bochtstraal is ρ .



Afb. 3.1-3: Verplaatsingen u en w en andere grootheden in de doorsnede.



Afb. 3.1-4: Gronddrukken en opleghoeken. De kracht ΔD is een aanduiding van de dwarskrachtbijdrage die door Q_{in} per eenheid van lengte van de buis wordt opgewekt. Q_{in} kan vervangen worden gedacht door Q_{eq} volgens (2.2-32).

3.2. Elasticiteitsleer, buiging in het vlak van de bocht

3.2.1. Buigstijfheid

$$M = \frac{EI}{R'} \left\{ \frac{\eta}{k'_p} - \frac{1,5 G_p}{C_p G_p - 6,25} \left(\frac{A}{r} + \frac{5}{2} \frac{B}{G_p r} \right) \right\} \cdot f_3 \quad \dots\dots (3.2-1)$$

Hierin is:

$$\eta = \Delta\alpha/\alpha \quad \dots\dots (3.2-2)$$

$$EI = E \pi r^3 t \quad \dots\dots (3.2-3)$$

$$R' = \frac{1}{1 + \eta} R \quad \dots\dots (3.2-4)$$

$$k'_p = k_p \cdot \frac{k'_o}{k_o} \quad \dots\dots (3.2-5)$$

$$k'_o = 1 + (k_o - 1) \sqrt{1 - \left(\frac{\gamma - \alpha}{\gamma} \right)^2} \quad \dots\dots (3.2-6)$$

$$k_p = \frac{C_p G_p - 6,25}{D_p G_p - 6,25} \quad \dots\dots (3.2-7)$$

$$k_o = \frac{C_o G_o - 6,25}{D_o G_o - 6,25} \quad \dots\dots (3.2-8)$$

$$C_o = 5 + 6 (\lambda')^2 \quad \dots\dots (3.2-9)$$

$$D_o = 0,5 + 6 (\lambda')^2 \quad \dots\dots (3.2-10)$$

$$G_o = 17 + 600 (\lambda')^2 \quad \dots\dots (3.2-11)$$

$$\lambda' = \frac{t R'}{r^2} \quad \dots\dots (3.2-12)$$

$$C_p = C_o + 24 \psi' \quad \dots\dots (3.2-13)$$

$$D_p = D_o + 24 \psi' \quad \dots\dots (3.2-14)$$

$$G_p = G_o + 480 \psi' \quad \dots\dots (3.2-15)$$

$$\psi' = \frac{P (R')^2}{E r t} \quad \dots\dots (3.2-16)$$

$$\gamma = 1200 \left(\frac{t_r}{t_b} \right)^2 \sqrt{\frac{t_b}{D_u}} \quad \dots\dots (3.2-17)$$

$$A = \frac{Q (R')^2}{4 r t E \pi} \left(\frac{3 \alpha}{\sin \frac{\alpha}{2}} + \frac{3 \beta}{\sin \frac{\beta}{2}} + 8 \cos \frac{\alpha}{2} + 8 \cos \frac{\beta}{2} + \right. \\ \left. + 2 \cos \frac{\alpha}{2} \cos \alpha + 2 \cos \frac{\beta}{2} \cos \beta \right) \quad \dots\dots (3.2-18)$$

$$B = \frac{Q (R')^2}{4 r t E \pi} (32 \cos^5 \frac{\alpha}{2} + 32 \cos^5 \frac{\beta}{2}) \quad \dots\dots (3.2-19)$$

$$Q = Q_{di} + Q_{eq} \quad \dots\dots (3.2-20)$$

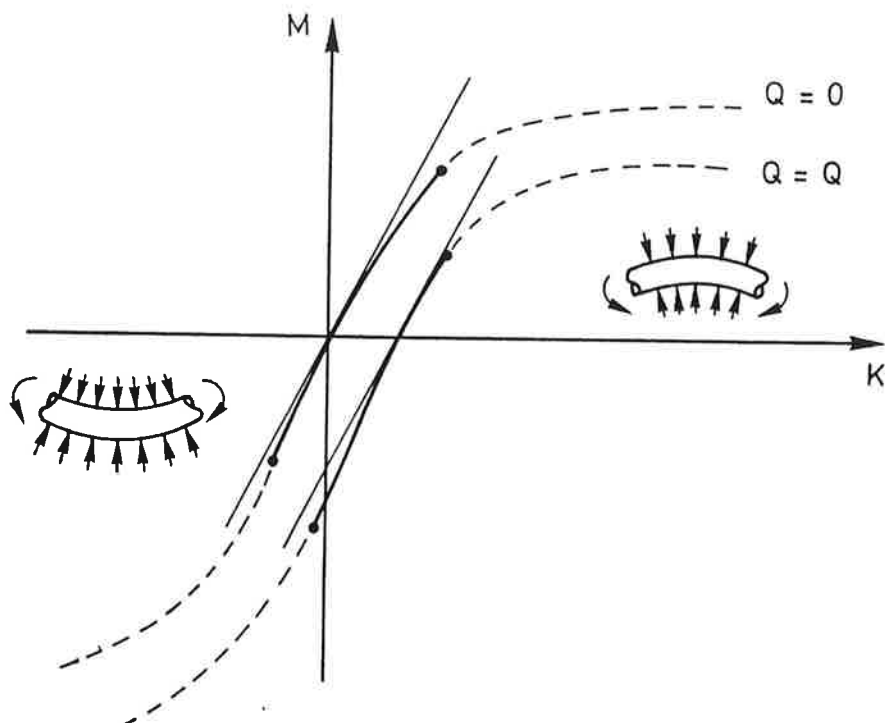
$$Q_{eq} = Q_{in} \frac{2 - \sin \frac{\gamma}{2}}{4 - \sin \frac{\alpha}{2} - \sin \frac{\beta}{2}} \quad \dots\dots (3.2-21)$$

In (3.2-21) zijn α , β en γ de opleghoeken voor de gronddruk volgens afb. 3.1-4.

$$f_3 = \left(\frac{r + w_h}{r} \right)^{4,5} \quad \dots\dots (3.2-22)$$

w_h = maximale ovalisering over de neutrale lijn (par. 3.2.2).

In de bovenstaande formules is de invloed verwerkt van de druk P , de gronddrukken, de buigrichting, de bochthoek en de ovalisering. Het resultaat is een niet-lineair moment-krommingsdiagram dat in afb. 3.2-1 is geschetst. Met een stippellijn is het plastisch gedrag aangegeven (par. 3.4).



Afb. 3.2-1: Moment-krommingsdiagram bij buiging in het vlak van de bocht.

Voor praktische liggerberekeningen mag het moment-krommingsdiagram van afb. 3.2-1 worden geschematiseerd als is aangegeven in afb.

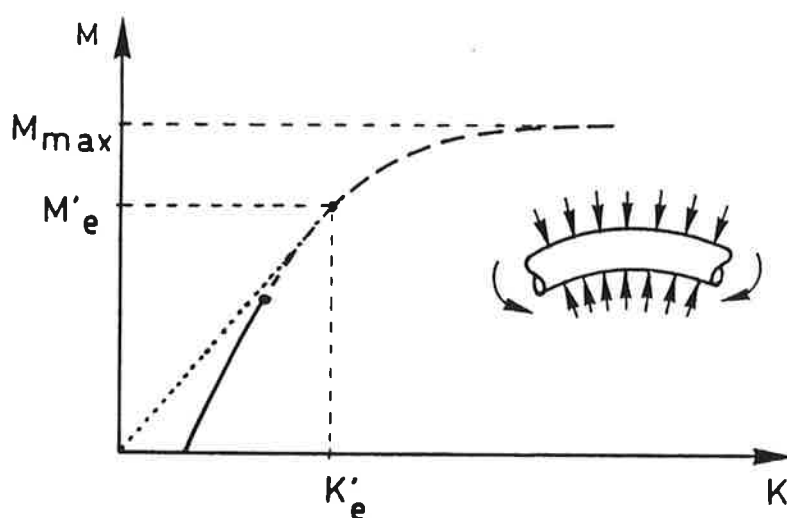
3.2-2. De procedure hierbij is als volgt:

- Bepaal de gronddrukken. Een voorlopige schatting op basis van de neutrale gronddrukken is nauwkeurig genoeg.
- Bereken het moment-krommingsdiagram, rekening houdend met de te verwachten buigrichting. Het plastisch gebied wordt in par. 3.4 behandeld.
- Het eind van het elastisch gebied mag worden gesteld op $M'_e = M_{\max}/1,27$.
- De buigstijfheid van de bocht die in de liggerberekening mag worden ingevoerd, volgt door een lijn te trekken uit de oorsprong naar het eind van het elastisch gebied.

In de liggerberekening kan dan voor de bochten worden uitgegaan van een recht buiselement met een fictieve E-modulus en vloeigrens:

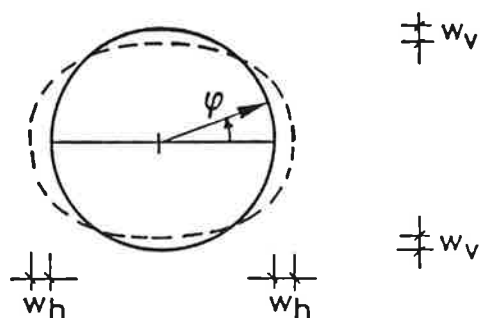
$$E' = \frac{K_e}{K'_e} E = \frac{\sigma_e}{r K'_e} \quad \dots\dots (3.2-23)$$

$$\sigma'_e = \frac{M_{\max}}{M_p} \sigma_e = \frac{M_{\max}}{4 r^2 t} \quad \dots\dots (3.2-24)$$



Afb. 3.2-2: Schematisering moment-krommingsdiagram ten behoeve van praktische (ligger-) berekeningen.
 ----- = elastisch-plastisch gebied.
 = schematisering buigstijfheid.

3.2.2. Ovalisering



Afb. 3.2-3: Ovalisering. w_v is hier positief getekend en w_h negatief.

$$w_\infty = 2 a_2 \cos 2\phi + 4 a_4 \cos 4\phi \quad \dots\dots (3.2-25)$$

$$a_2 = \frac{-3 G_p}{D_p G_p - 6,25} \left\{ \frac{r\eta}{k_p} - \frac{1,5 G_p}{C_p G_p - 6,25} \left(A + \frac{5}{2} \frac{B}{G_p} \right) + \frac{A}{3} + \frac{B}{G_p} \right\} \quad (3.2-26)$$

$$a_4 = \frac{2,5}{G_p} a_2 \quad \dots\dots (3.2-27)$$

Voor de ovalisering in het midden respectievelijk de rand van de bocht geldt:

$$w_m = f_{wm} \cdot w_\infty \quad \dots\dots (3.2-28)$$

$$w_r = f_{wr} \cdot w_\infty \quad \dots\dots (3.2-29)$$

Hierin is:

$$f_{wm} = \left(\frac{k_p}{k_r} \right)^{0,25} \quad \dots\dots (3.2-30)$$

$$f_{wr} = 0,75 \frac{k_p}{k_r} \quad \text{met } f_{wr} > 1,0 \quad \dots\dots (3.2-31)$$

3.2.3. Rekken en spanningen

Voor de langsrichting geldt voor de rekken door buiging en grond-drukken:

$$\epsilon_{xb} = \frac{1}{R'} \{ r\eta \sin\phi + (2 a_2 + 20 a_4) \sin^3\phi - 24 a_4 \sin^5\phi \} \quad (3.2-32)$$

Hierbij komt nog de rek door de druk P:

$$\epsilon_{xp} = 0,2 \frac{P r}{t E} \quad \dots\dots (3.2-33)$$

zodat:

$$\epsilon_x = \epsilon_{xb} + \epsilon_{xp} \quad \dots\dots (3.2-34)$$

Voor de omtreksrichting geldt voor de rekken door buiging en grond-drukken:

$$\epsilon_{yb} = + \frac{3 t}{r^2} (a_2 \cos 2\phi + 10 a_4 \cos 4\phi) \quad \dots\dots (3.2-35)$$

Hierbij komt nog de rek door de druk P. Voor de binnenzijde van de bocht geldt:

$$\epsilon_{yp} = 0,85 \frac{P r}{E t} \cdot \frac{R - r/3}{R - r} \quad \dots\dots (3.2-36)$$

Voor de buitenzijde van de bocht geldt:

$$\epsilon_{yp} = 0,85 \frac{P r}{E t} \cdot \frac{R + r/3}{R + r} \quad \dots\dots (3.2-37)$$

zodat:

$$\epsilon_y = \epsilon_{yb} + \epsilon_{yp} \quad \dots\dots (3.2-38)$$

Voor ϵ_{yb} treden maxima ϵ_{ybm} op bij:

$$\phi_1 = 0 \text{ en } \pi \quad \dots\dots (3.2-39)$$

en bij

$$\phi_2 = \pi/2 \text{ en } 3\pi/2 \quad (\text{voor } \lambda \geq 0,37) \quad \dots\dots (3.2-40)$$

$$\phi_3 = 0,5 \arccos \left(\frac{-G_p}{100} \right) \quad (\text{voor } \lambda < 0,37) \quad \dots\dots (3.2-41)$$

Deze maxima zijn:

$$\epsilon_{ybm} = \pm \frac{3 t}{r^2} \cdot \frac{f_8 f_w}{D_p G_p - 6,25} \left\{ \frac{r \eta}{k_p} - \frac{1,5 G_p}{C_p G_p - 6,25} \left(A + \frac{5}{2} \frac{B}{G_p} \right) + \frac{A}{3} + \frac{B}{G_p} \right\} \quad \dots\dots (3.2-42)$$

met:

$$f_8 = -3 G_p - 75 \quad (\text{voor } \phi_1 = 0 \text{ en } \pi) \quad \dots\dots (3.2-43)$$

$$f_8 = 3 G_p - 75 \quad (\text{voor } \phi_2 = \pi/2 \text{ en } 3\pi/2) \quad \dots\dots (3.2-44)$$

$$f_8 = \frac{3 G_p^2 + 15000}{200} \quad (\text{voor } \phi_3 = 0,5 \arccos(\frac{G_p}{100})) \dots (3.2-45)$$

$f_w = f_{wm}$ volgens (3.2-30) voor het midden van de bocht, en
 f_{wr} volgens (3.2-31) voor de randen van de bocht

De spanningen volgen door de bekende formules:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} (\sigma_x - \nu \sigma_y) \dots (3.2-46)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} (\sigma_y - \nu \sigma_x) \dots (3.2-47)$$

Aanvullend dient nog rekening te worden gehouden met de spanning door dwarskracht:

$$\tau = \frac{D}{4 r t} \dots (3.2-48)$$

3.3. Elasticiteitsleer, buiging uit het vlak van de bocht

3.3.1. Buigstijfheid

$$M = EI \left\{ \frac{1}{k_p' \rho} - \frac{1,5 G_p}{(C_p G_p - 6,25) R r} \left(A + \frac{5 B}{2 G_p} \right) \right\} f_3' \dots (3.3-1)$$

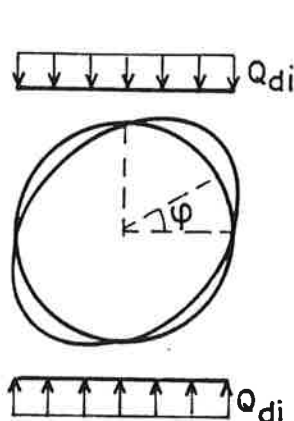
Hierin is:

$$\frac{1}{\rho} = \text{kromming uit het vlak (afb. 3.1-2)}$$

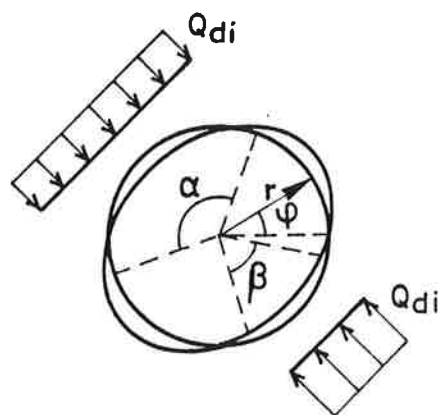
$$f_3' = \left(\frac{r + w_h}{r} \right)^3 \dots (3.3-2)$$

Bij buiging uit het vlak van de bocht treden de ovaliseringen op onder 45° (afb. 3.3-1 en 3.3-2). Indien de gronddrukken werken als is aangegeven in afb. 3.3-1 zijn A en B in de bovenstaande uitdrukking voor M gelijk aan nul. Bij gronddrukken volgens afb. 3.3-2 kunnen A en B worden bepaald met de formules die in het voorgaande bij buiging in het vlak zijn gegeven.

De overige grootheden kunnen eveneens aan de voorgaande paragrafen worden ontleend, waarbij in tegenstelling tot de situatie bij buiging in het vlak R niet wordt vervangen door R'.



Afb. 3.3-1.



Afb. 3.3-2.

3.3.2. Ovalisering

$$w_{\infty} = -2 b_2 \sin 2\phi - 4 b_4 \sin 4\phi \quad \dots\dots (3.3-3)$$

$$b_2 = \frac{-3 G_p}{D_p G_p - 6,25} \left\{ \frac{R r}{k_p \rho} - \frac{1,5 G_p}{C_p G_p - 6,25} \left(A + \frac{5}{2} \frac{B}{G_p} \right) + \frac{A}{3} + \frac{B}{G_p} \right\} \quad \dots\dots (3.3-4)$$

$$b_4 = \frac{2,5}{G_p} b_2 \quad \dots\dots (3.3-5)$$

Voor de ovalisering in het midden respectievelijk de rand van de bocht gelden dezelfde uitdrukkingen als bij buiging in het vlak van de bocht.

3.3.3. Rekken en spanningen

Voor de langsrichting geldt:

$$\epsilon_{xb} = \frac{1}{R} \left\{ \frac{r R}{\rho} \cos \phi + (3 b_2 - 15 b_4) \cos \phi - (2 b_2 - 40 b_4) \cos^3 \phi - 24 b_4 \cos^5 \phi \right\} \quad (3.3-6)$$

Voor de omtreksrichting geldt:

$$\varepsilon_{yb} = \pm \frac{3t}{2r} (b_2 \sin 2\phi + 10 b_4 \sin 4\phi) f_w \quad \dots (3.3-7)$$

Hierin is $f_w = f_{wm}$ volgens (3.2-30) voor het midden van de bocht, en f_{wr} volgens (3.2-31) voor de randen.

Een veilige benadering voor de maxima wordt verkregen door gebruik te maken van de formules van par. 3.2.3 bij buiging in het vlak. In die formules dient $r\eta$ dan te worden vervangen door $R r/\rho$.

Voor de spanningen die uit deze betrekkingen kunnen worden berekend wordt verwezen naar par. 3.2.3.

Er wordt op gewezen dat buiging uit het vlak gepaard gaat met wringing. De daarbij optredende spanningen kunnen worden bepaald met de formules die voor rechte buizen gelden.

3.4. Plasticiteitsleer, buiging in het vlak van de bocht

3.4.1. Algemeen

Er zijn twee mechanismen die bepalend kunnen zijn voor de grootte van het maximale moment. Deze mechanismen zijn:

- a. Het optreden van plastische scharnieren in omtreksrichting. Dit mechanisme zal eerder maatgevend zijn naarmate de bochten sterker gekromd zijn (lage waarde voor λ), de inwendige druk lager is, de gronddrukken groter zijn en daarbij tevens een ovalisering geven die dezelfde richting heeft als de ovalisering door buiging.
- b. Het optreden van vloeien in langsrichting. Dit mechanisme zal eerder maatgevend zijn naarmate de bochten minder sterk gekromd zijn (hoge waarde voor λ), en de inwendige druk groter is, de gronddrukken groter zijn en daarbij tevens een ovalisering geven die een tegengestelde richting heeft als de ovalisering door buiging. Dit mechanisme sluit aan bij het in hoofdstuk 2 behandelde gedrag bij rechte buizen.

Teneinde de juiste waarde voor het maximale moment te vinden dienen beide mechanismen te worden onderzocht. Het mechanisme dat de kleinste waarde geeft is bepalend.

3.4.2. Eind elastisch gebied

Bij goede benadering geldt dat het eind van het elastisch gebied wordt bereikt als een van de rekken ϵ_x of ϵ_y volgens par. 3.2.3 c.q. 3.3.3 de vloeirek ϵ_e bereikt. Voor de bijbehorende waarde van η geldt voor het geval ϵ_{ybm} maatgevend is:

$$\eta_e = \frac{k_p}{r} \left\{ \frac{r^2}{3 t} \cdot \frac{D_p G_p - 6,25}{f_8} \epsilon_{ybm} + \frac{1,5 G_p}{C_p G_p - 6,25} \left(A + \frac{5}{2} \frac{B}{G_p} \right) - \frac{A}{3} - \frac{B}{G_p} \right\}$$

..... (3.4-1)

Hierin kan f_8 worden ontleend aan par. 3.2.3.

3.4.3. M_{max} bepaald door plastische scharnieren in omtreksrichting

3.4.3.1. Het volplastisch moment

Voor het maximale moment geldt:

$$M_{pbo} = f_5 f_6 \frac{EI}{R' r} \left\{ \frac{D_o G_o - 6,25}{3 G_o} \left(\frac{2 m_{tot}}{f_4} \frac{r^2}{E t^3} f_7 \right) - \frac{A}{3} - \frac{B}{G_o} \right\}$$

..... (3.4-2)

Hierin is:

M_{pbo} = het maximale moment op de bocht als de plastische scharnieren zich volledig hebben ontwikkeld. In par. 3.4.5 komt de overgang tussen het eind van het elastisch gebied en het volplastisch gebied aan de orde

$$f_4 = 1 - \frac{w_h}{r} \quad \text{..... (3.4-3)}$$

$$f_5 = 1 - \frac{2 w_v}{3 r} \quad \text{..... (3.4-4)}$$

$$f_6 = \frac{k_p}{k_p^r} \quad \dots\dots (3.4-5)$$

$$f_7 = 1,0 \quad (\text{voor } \lambda \geq 0,37) \quad \dots\dots (3.4-6)$$

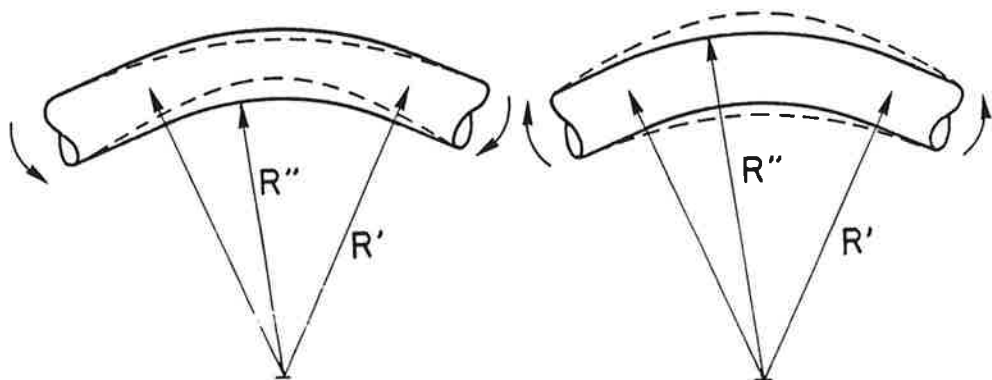
$$f_7 = \frac{400 G_o}{G_o^2 + 200 G_o + 10000} \quad (\text{voor } \lambda < 0,37) \quad \dots\dots (3.4-7)$$

$$m_{\text{tot}} = m_{\text{pr}} + P r \frac{w_h + w_v}{2} \quad \dots\dots (3.4-8)$$

De waarde m_{pr} kan worden ontleend aan (3.4-15):

$$R'' = R' - r = \frac{R}{1 + \eta} - r \quad (\text{positieve buiging}) \quad \dots\dots (3.4-9)$$

$$R'' = R' + r = \frac{R}{1 + \eta} + r \quad (\text{negatieve buiging}) \quad \dots\dots (3.4-10)$$



Afb. 3.4-1: R'' bij positieve buiging (dichtbuigen) en bij negatieve buiging (openbuigen).

De overige grootheden in (3.4-2) kunnen worden ontleend aan de voorgaande paragrafen, waarbij voor de bochtstraal steeds R'' moet worden ingevuld.

3.4.3.2. De ovalisering

Voor de verticale ovalisering geldt:

$$w_v = w_{ve} + w_{vp} \quad (w_v = 0,5 \Delta D_v) \quad \dots (3.4-11)$$

Hierin is:

w_v = de ovalisering in een lange bocht zonder randinvloeden

w_{ve} = de ovalisering aan het eind van het elastisch gebied

w_{vp} = de ovalisering in het plastisch gebied

$$w_{vp} = \frac{\eta - \eta_e}{1 + \eta - \eta_e} r \quad \dots (3.4-12)$$

Voor de horizontale ovalisering geldt:

$$w_h = w_{he} + w_{hp} \quad (w_h = 0,5 \Delta D_h) \quad \dots (3.4-13)$$

Hierin is:

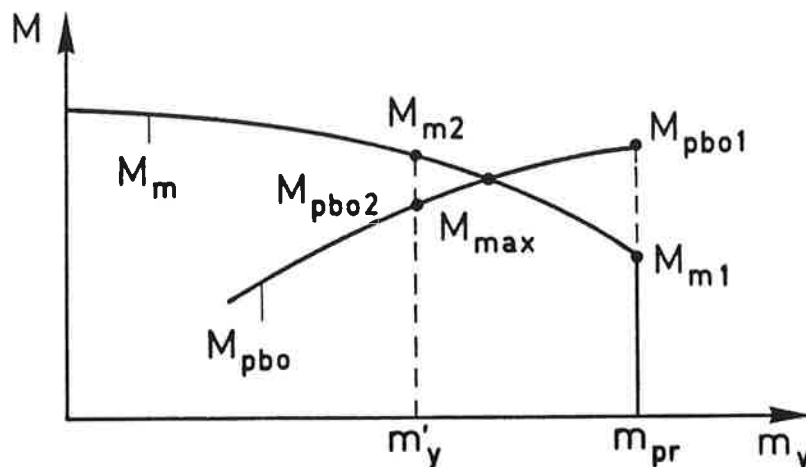
$$w_{hp} = r - \sqrt{r^2 + 2 r w_{vp} - w_{vp}^2} \quad \dots (3.4-14)$$

De ovalisering in het midden van de bocht en aan de randen worden verkregen door de bovenstaande waarden te vermenigvuldigen met f_{wm} en f_{wr} volgens (3.2-30) en (3.2-31).

3.4.4. M_{max} bepaald door vloeien in langsrichting

3.4.4.1. Het plastisch moment

In afb. 3.4-2 is voor een bocht waarbij vloeien in langsrichting maatgevend is, het verband gegeven tussen m_y en het maximale moment M_m berekend met de formules voor rechte leidingen in par. 2.2.3. Tevens is het verband gegeven tussen m_y en M_{pbo} berekend met de formules van par. 3.4.3. Hierbij is in de formules voor m_{tot} (3.4-8) m_{pr} vervangen door m_y . Bij verkleining van m_y neemt ook M_{pbo} af.



Afb. 3.4-2: Bepaling van het maximale moment als vloeien in langsrichting maatgevend is.

De procedure om het juiste moment M te bepalen is nu als volgt:

- a. Bereken met de formules van par. 3.4.3 het moment M_{pbo} (mechanisme plastische scharnieren in omtreksrichting), en noem dit moment M_{pbo1} .
- b. Bereken met $m_y = m_{pr}$

$$m_{pr} = 1,15 m_p \left\{ 1 - 0,75 \left(\frac{p r}{t \sigma_e} \right)^2 \right\} \quad \text{..... (3.4-15)}$$

het moment M_m met de formules voor rechte buizen en noem dit moment M_{m1} .

- c. Als M_{m1} groter is dan M_{pbo1} dan is $M_{max} = M_{pbo1}$. Het mechanisme plastische scharnieren in omtreksrichting is dan maatgevend.
- d. Als M_{m1} kleiner is dan M_{pbo1} dan dient de procedure als volgt te worden voortgezet.

Bereken met een kleinere m_{tot} respectievelijk m_y , bijvoorbeeld

$$m'_{tot} = m_{tot} - 0,4 m_{pr} \quad \text{..... (3.4-16)}$$

$$m'_y = m_{pr} - 0,4 m_{pr} = 0,6 m_{pr} \quad \text{..... (3.4-17)}$$

opnieuw M_{pbo} en M_m , en noem deze M_{pbo2} en M_{m2} .

Het juiste moment M_{max} wordt gevonden zoals in afb. 3.4-2 is aangegeven.

e. Er wordt op gewezen dat bij m_y kleiner dan m_{pr} , bij de berekening van M_{pbo} , de factor f_6 dient te worden vervangen door f'_6 volgens:

$$f'_6 = 1 + (f_6 - 1) \frac{m'_y}{m_{pr}} \quad \dots\dots (3.4-18)$$

3.4.4.2. De ovalisering

Bij M_{max} bepaald door vloeien in langsrichting geldt voor de ovalisering bij een lange bocht zonder randinvloeden:

$$w_v = w_{ve} + \sum \delta w_{vp} \quad (w_v = 0,5 \Delta D_v) \quad \dots\dots (3.4-19)$$

Hierin zijn:

w_v = de verticale ovalisering in een lange bocht zonder randinvloeden

w_{ve} = de verticale ovalisering aan het eind van het elastisch gebied

$$\delta w_{vp} = \delta K_o R'' (r - w_v) \quad \dots\dots (3.4-20)$$

$$\delta K_o = \frac{2 \frac{r^3}{t} \psi_m \delta K_{tot}}{2 \frac{r^3}{t} \psi_m - R'' (r - w_v)} \quad \dots\dots (3.4-21)$$

δK_{tot} = verandering van de kromming in het plastisch gebied

δK_o = verandering van de kromming door ovalisering (bochtgedrag)

δK_v = verandering van de kromming door vloeien in langsrichting (rechte buisgedrag)

$$\delta K_{tot} = \delta K_o + \delta K_v \quad \dots\dots (3.4-22)$$

ψ_m = helling vloeiooppervlak (hoofdstuk 2)

Omdat ψ_m afhankelijk is van m_y , en m_y gedurende het verder buigen verandert, dient de berekening stapsgewijs te worden uitgevoerd.

Bij voldoende grote P zal bij verder buigen en ovaliseren, m_y steeds kleiner worden en tot nul naderen. Immers, m_{tot} volgens (3.4-8) wordt bij grotere ovalisering steeds groter en daardoor M_{pbo} ook steeds groter. Het snijpunt M_{max} in afbeelding 3.4-2 zal daardoor bij steeds kleinere m_y worden bereikt.

Bij $m_y = 0$ wordt de ovalisering bepaald door:

$$w = \frac{E t^3}{2 P r^3} a_2 \quad \dots\dots (3.4-23)$$

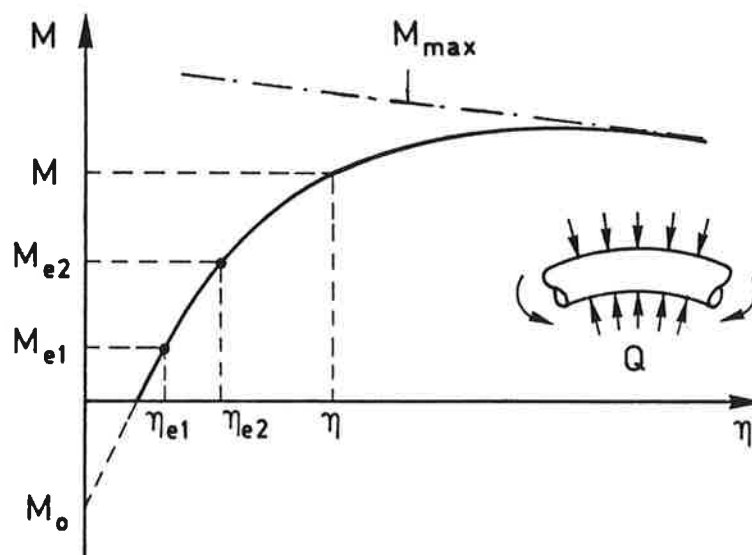
$$a_2 = \frac{3 G_o}{D_o G_o - 6,25} \left(\frac{1}{f_5} \frac{M_m R'' r}{EI} + \frac{A}{3} + \frac{B}{G} \right) f_4 f_w \quad \dots\dots (3.4-24)$$

Een en ander is analoog aan de berekening bij rechte leidingen.

De ovalisering w_v en w_h kunnen, afgezien van het teken aan elkaar gelijk worden gesteld. Voor de vergroting in het midden en de verkleining aan de randen wordt verwezen naar de formules voor f_w in par. 3.2.2.

3.4.5. Elastisch-plastisch gebied

3.4.5.1. Buigend moment



Afb. 3.4-3: Overgang tussen het elastisch gebied en het bereiken van M_{max} .

In afb. 3.4-3 is:

M_o = het moment dat ontstaat als bij het aanbrengen van Q , de hoekverdraaiing nul wordt gehouden

M_{e1} = het moment waarbij in de omtrek van de buiswand voor het eerst ergens m_e ontstaat. In het algemeen is dat bij $\phi = 0$

M_{e2} = het moment waarbij voor de tweede keer m_e ontstaat.

η_{e1} = de bij M_{e1} behorende η

η_{e2} = de bij M_{e2} behorende η

η = de waarde waarvoor M wordt berekend

Voor M geldt in het elastisch-plastisch gebied:

$$M = M_{\max} - 0,5 \frac{M_{e1} - M_o}{c_1} \left(\frac{\eta_{e1}}{\eta}\right)^{c_1} - 0,5 \frac{M_{e2} - M_o}{c_2} \left(\frac{\eta_{e2}}{\eta}\right)^{c_2} \dots (3.4-25)$$

Hierin is:

$$M_o = -\frac{EI}{R} \cdot \frac{1,5 G_p}{C_p G_p - 6,25} \left(\frac{A}{r} + \frac{5}{2} \frac{B}{G_p r}\right) \dots (3.4-26)$$

$M_{e1} = M$ volgens (3.2-1) met $\eta = \eta_{e1}$

$M_{e2} = M$ volgens (3.2-1) met $\eta = \eta_{e2}$

$\eta_{e1} = \eta_e$ volgens (3.4-1) met f_g volgens (3.2-43)

$\eta_{e2} = \eta_e$ volgens (3.4-1) met f_g volgens (3.2-44) c.q. (3.2-45)

$$c_1 = \frac{M_{e1} - M_o}{M_{\max} - M_{e1}} \dots (3.4-27)$$

$$c_2 = \frac{M_{e2} - M_o}{M_{\max} - M_{e2}} \dots (3.4-28)$$

Indien M_{e1} groter is dan $0,9 M_{\max}$ geldt $M_{e1} = 0,9 M_{\max}$.

Indien M_{e2} groter is dan $0,9 M_{\max}$ geldt $M_{e2} = 0,9 M_{\max}$.

3.4.5.2. Ovalisering

Hierbij wordt na het bereiken van M_{e1} en η_{e1} direct overgestapt op de volplastische tak (par. 3.4.3.2 c.q. par. 3.4.4.2).

3.5. Plasticiteitsleer, buiging uit het vlak van de bocht

3.5.1. Draagvermogen, ovalisering, rekken

De formules voor buiging uit het vlak van de bocht zijn analoog aan die voor buiging in het vlak van de bocht. Eenvoudshalve wordt daarnaar verwezen, waarbij voor f_5 geldt:

$$f_5 = 1,0 \qquad \dots\dots (3.5-1)$$

3.5.2. Verhouding buiging en wringing

Indien het maximale moment wordt bepaald door het ontstaan van plastische scharnieren in omtreksrichting, volgen het buigend moment en het wringend moment onafhankelijk van elkaar uit de opgelegde buigvervorming c.q. wringvervorming.

Indien het maximale moment wordt bepaald door vloeien in langsrichting (rechte buisgedrag) hangen het buigend moment en het wringend moment af van de verhouding tussen de opgelegde buigvervorming en de opgelegde wringvervorming. De berekening verloopt op dezelfde wijze als bij rechte leidingen. Eenvoudshalve wordt daarom naar de rekenregels van hoofdstuk 2 verwezen.

3.6. Mogelijke gevaarlijke situaties bij grote M_{pbo}

Uit berekeningen en proeven is gebleken dat bij het open buigen van bochten het maximale moment in de bocht zeer groot kan worden, en kan naderen tot het maximale moment van een rechte buis met dezelfde diameter, wanddikte en materiaaleigenschappen. De belangrijkste reden hiervoor is de vergroting van het weerstandsmoment door ovalisering.

Indien in het ontwerp en/of bij de uitvoering voor de bochten een grotere wanddikte en/of een hogere vloeigrens worden gekozen dan voor de aansluitende rechte buizen, kan de situatie ontstaan dat het maximale moment in de bocht (M_{pbo} , M_{max}) groter is dan het maximale moment in de aansluitende rechte buizen (M_{precht}).

Het gevolg van $M_{pbo}, M_{max} > M_{precht}$ is dat de opgedrongen plastische vervormingen geneigd zijn op te treden in de rechte buizen, waar de vervormingscapaciteit in het algemeen kleiner is dan in de bochten. De mate waarin dit kan optreden is afhankelijk van de vorm van de leiding en de zettingslijn, alsmede van de eigenschappen van de grond (k-waarden).

Gezien het voorgaande wordt aanbevolen bij het ontwerp en de uitvoering er zorg voor te dragen dat een duidelijke situatie ontstaat. In het algemeen zal dit betekenen dat M_{pbo} duidelijk lager wordt gekozen dan M_{precht} .

3.7. Variaties in de druk

3.7.1. Algemeen

Bij een geovaliseerde bocht geven variaties in de druk, variaties in het buigend moment, de kromming en de ovalisering.

Volgens de TGSL geldt als uitgangssituatie het resultaat van een liggerberekening waarbij de inwendige druk gelijk is aan 50% van de maximale bedrijfsdruk. Vanuit deze situatie wordt de druk gevarieerd teneinde twee grenstoestanden te controleren, namelijk:

- wisselend vloeien;
- vermoeïng.

De mate waarin de kromming zal variëren hangt af van de stijfheid van de bocht en de aansluitende rechte buizen, alsmede van de stijfheid van de grond waarin de leiding ligt.

Indien wordt afgezien van een nauwkeurige berekening kan worden volstaan met een berekening van de volgende twee situaties:

- Het buigend moment verandert tijdens het variëren van de druk niet (belastinggestuurde situatie).
- De kromming verandert tijdens het variëren van de druk niet (vervormingsgestuurde situatie).

3.7.2. Berekening ΔM , $\Delta \eta$, Δw door ΔP

Voor de relatie tussen ΔP , ΔM , $\Delta \eta$ en w geldt:

$$\Delta M = \frac{EI}{R'} \left\{ \frac{\Delta \eta}{k_o'} + \frac{1,5 G_o}{C_o G_o - 6,25} \left(\frac{12 (R')^2}{r^2 t E} \Delta P w_p - \frac{\Delta A}{r} - \frac{5}{2} \frac{\Delta B}{G_o r} \right) \right\} f_3$$

..... (3.7-1)

Hierin is w_p de ovalisering die bij de uiteindelijke druk P behoort:

$$w_p = \frac{w_v - w_h}{2}$$

..... (3.7-2)

Bij positieve buiging (dichtbuigen) is w_p positief en bij drukverhoging is ΔP eveneens positief. Bij vergroting van de gronddrukken zijn ook $\Delta A = \Delta B$ positief.

De ovalisering w_p is opgebouwd uit de ovalisering bij de uitgangssituatie vermeerderd met Δw als gevolg van $\Delta \eta$ en ΔP :

$$\Delta w = 2 \Delta a_2 = \frac{6 G_o}{D_o G_o - 6,25} \left\{ \frac{r \Delta \eta}{k_o'} - \frac{1,5 G_o}{C_o G_o - 6,25} \left(\frac{12 (R')^2}{r^2 t E} \Delta P w_p + \Delta A + \frac{5}{2} \frac{\Delta B}{G_o} \right) + \frac{4 (R')^2}{r^2 t E} \Delta P w_p + \frac{\Delta A}{3} + \frac{\Delta B}{G_o} \right\} \dots \dots (3.7-3)$$

Hierin is w_p de ovalisering die bij de hoogste van de beide beschouwde drukken hoort. De verhouding tussen w , w_h en w_v volgt uit de eerder in par. 3.4.3.2 gegeven formules. Voor de invloed van de randen wordt verwezen naar de formules in par. 3.2.2.

3.7.3. Berekening maximale moment $M_{\max}$ en de maximale ovalisering bij (hoge)

druk

Voor de nieuwe m_y na drukverandering geldt:

$$(m_y)_{\text{nieuw}} = (m_y)_{\text{oud}} + \Delta m_y$$

..... (3.7-4)

Hierin is:

m_y = het gemiddelde van de absolute waarden van de beide maxima van m_y bij ϕ_1 en ϕ_2 respectievelijk ϕ_3 volgens par. 3.2.3.

$$\Delta m_y = \frac{E t^3}{4 r^2} \Delta w \quad \text{..... (3.7-5)}$$

Bij verkleining van de ovalisering is Δw negatief.

Als maximum voor $(m_y)_{\text{nieuw}}$ geldt m_{pr} :

$$m_{pr} = 1,15 m_p \left\{ 1 - 0,75 \left(\frac{P r}{t \sigma_e} \right)^2 \right\} \quad \text{..... (3.7-6)}$$

Als $(m_y)_{\text{nieuw}}$ volgens (3.7-4) groter is dan m_{pr} dan dient in de verdere berekening m_{pr} te worden ingevoerd.

Het maximale moment M_{max} volgt nu met de formules van par. 3.4.4.

Als het oorspronkelijke moment vermeerderd met ΔM volgens (3.7-1) meer bedraagt dan M_{max} dan treedt vloeien op en zal ΔM zover worden gereduceerd tot het oorspronkelijke moment vermeerderd met ΔM gelijk is aan M_{max} . Deze reductie wordt tot stand gebracht door w te verkleinen. De nieuwe w is dan de maximale die bij de betreffende druk P en randvoorwaarden mogelijk is.

Voor de invloed van de randen wordt verwezen naar de formules in par. 3.2.2.

3.8. Berekening van de rekken

3.8.1. In langsrichting

3.8.1.1. Buiging

Voor het elastisch gebied volgen de rekken met de formules in par. 3.3.3.

In het plastisch gebied dient onderscheid te worden gemaakt tussen de beide vloeimechanismen van par. 3.4.3 en 3.4.4.

a. Het optreden van plastische scharnieren in omtreksrichting

Bij dit mechanisme worden de bijkomende krommingen mogelijk gemaakt door een verdergaande ovalisering. De rekken in langsrichting veranderen niet of nauwelijks en blijven dus in het elastisch gebied.

In verband hiermee kunnen de rekken in langsrichting worden ontleend aan de "elastische" formules in par. 3.3.3. Voor het moment M op de bocht dient daarbij de in par. 3.4.3 berekende waarde te worden ingevuld.

b. Het optreden van vloeien in langsrichting

Hierbij ontstaan in het plastisch gebied de bijkomende krommingen door vloeien in langsrichting en door het ovaliseren.

De bijkomende kromming door het ovaliseren δK_o kan worden ontleend aan (3.4-20):

$$\delta K_o = \frac{\delta w_{vp}}{R' (r - w_v)} \quad \dots (3.8-1)$$

De bijkomende kromming ten gevolge van het vloeien in langsrichting δK_v volgt door de totale bijkomende kromming in het plastisch gebied (δK_{tot}) te verminderen met δK_o :

$$\delta K_v = \delta K_{tot} - \delta K_o \quad \dots (3.8-2)$$

Eenvoudshalve kan bij dit mechanisme worden uitgegaan van een lineaire verdeling van de rekken over de doorsnede (zoals bij rechte buizen):

$$\epsilon_{xpl} = \delta K_v y \quad \dots (3.8-3)$$

Hierin is ϵ_{xpl} de bijkomende plastische rek en is y de afstand van de beschouwde vezel tot de neutrale lijn.

De totale rek c.q. stuik wordt gevonden door de "elastische" waarden van par. 3.3.3 te vermeerderen met (3.8-3).

3.8.1.2. Andere belastingen

De in par. 3.8.1.1 gegeven rekken door buiging moeten worden vermeerderd met die door druk P en normaalkracht. Hiervoor kan ook voor het plastisch gebied gebruik worden gemaakt van de formules volgens de elasticiteitsleer.

3.8.2. In omtreksrichting

Voor het elastisch gebied volgen de rekken uit de formules in par. 3.3.3. De daarin gegeven rekken door buiging dienen te worden vermeerderd met die door de druk P , de dwarskracht en eventueel de wringing.

Voor het plastisch gebied dient een doorsnedeberekening te worden uitgevoerd, analoog als bij de behandeling van de rechte buizen in par. 2.3.3.

4. REKENREGELS VOOR MIJTERBOCHTEN [2.3]

4.1. Inleiding

4.1.1. Algemeen

In [2.3] zijn rekenregels afgeleid voor mijterbochten. Gebleken is dat voor de berekening in belangrijke mate gebruik kan worden gemaakt van de formules die voor gladde bochten zijn afgeleid. In dit hoofdstuk 4 zijn daarom in hoofdzaak alleen de van gladde bochten afwijkende aspecten behandeld.

4.1.2. Geldigheidsgebied

Bij toepassing van de rekenregels gelden de volgende grenzen aan het geldigheidsgebied:

- knikhoek:

$$2 \alpha \leq 25^{\circ} \quad \text{..... (4.1-1)}$$

- bochtstraal:

$$\frac{R}{r} \geq 2,5 \quad \text{..... (4.1-2)}$$

- ovalisering:

$$\Delta D \leq \Delta D\text{-grens} \quad \text{..... (4.1-3)}$$

Voor ΔD -grens geldt:

- bij positieve buiging (dichtbuigen)

$$\Delta D\text{-grens-pos.} = 0,075 D_u \quad \text{..... (4.1-4)}$$

- bij negatieve buiging (openbuigen)

$$\Delta D\text{-grens-neg.} = 0,060 D_u \quad \text{..... (4.1-5)}$$

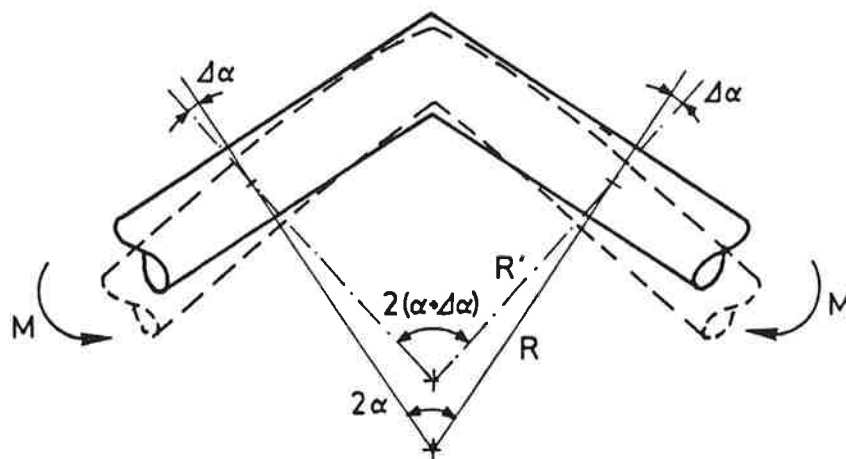
- bij buiging uit het vlak

$$\Delta D\text{-grens-uv} = 0,060 D_u$$

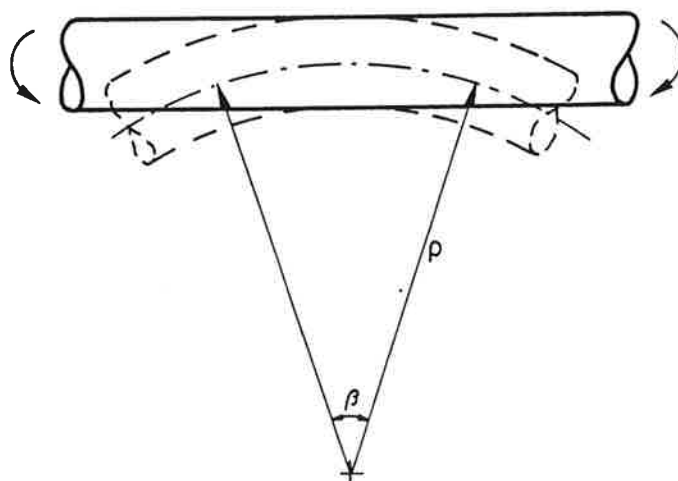
..... (4.1-6)

4.1.3. Tekenafspraken

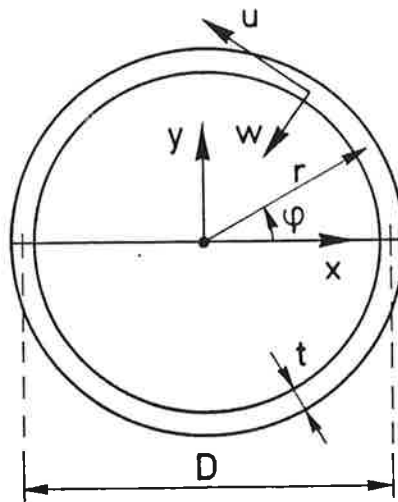
In afb. 4.1-1, 4.1-2, 4.1-3 en 4.1-4 zijn de positieve richtingen van de krachten en vervormingen aangegeven.



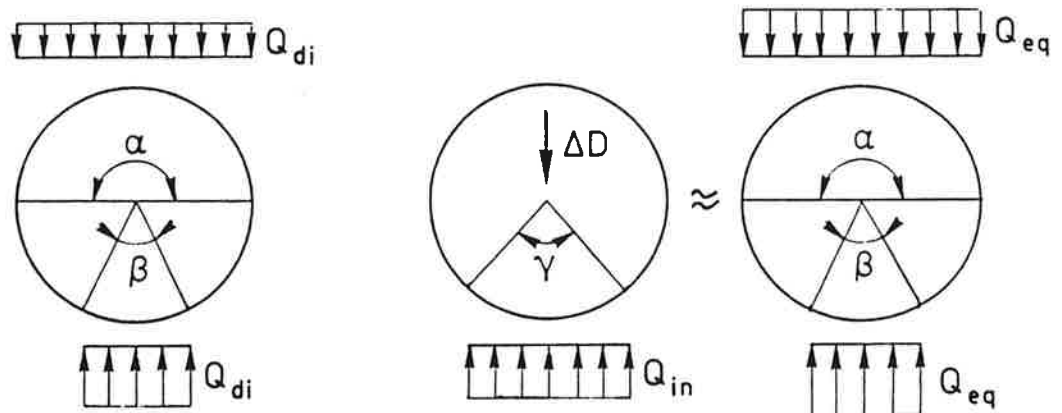
Afb. 4.1-1: Buiging in het vlak. Het vlak van de bocht is het vlak van de tekening.



Afb. 4.1-2: Buiging uit het vlak. Het vlak van de bocht staat loodrecht op het vlak van de tekening.



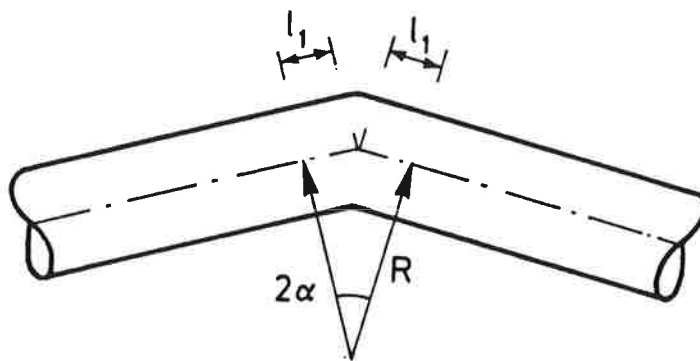
Afb. 4.1.3: Verplaatsingen u en w en andere grootheden in de doorsnede.



Afb. 4.1-4: Gronddrukken en opleghoeken. De kracht ΔD is een aanduiding van de dwarskrachtbijdrage die door Q_{in} per eenheid van lengte van de buis wordt opgewekt. Q_{in} kan vervangen worden gedacht door Q_{eq} volgens (2.2-32).

4.2. Elasticiteitsleer

4.2.1. Enkelvoudige mijterbochten



Afb. 4.2-1: Enkelvoudige mijterbocht.

Deze bochten kunnen worden berekend met de rekenregels voor gladde bochten volgens hoofdstuk 3 met de volgende (voor-)waarden:

$$R = \frac{r}{2} (1 + \cot \alpha) \quad \text{..... (4.2-1)}$$

$$l_1 = \frac{r}{2} (1 + \tan \alpha) \quad \text{..... (4.2-2)}$$

De bij de gladde bochten gegeven formules voor de rek door buigend moment M in langsrichting zijn bij mijterbochten niet van toepassing. Bij mijterbochten wordt deze rek in langsrichting gelijkgesteld aan die door buigend moment M in omtreksrichting.

Indien gewenst kan verder ook van de onderstaande formules gebruik worden gemaakt:

$$\lambda = \frac{t R}{r^2} \quad \text{..... (4.2-3)}$$

$$k_o = \frac{1,65}{\lambda} \quad \text{..... (4.2-4)}$$

$$\gamma = 1200 \sqrt{\frac{t}{D_u}} \quad \text{..... (4.2-5)}$$

$$k'_0 = 1 + (k_0 - 1) \sqrt{1 - \left(\frac{\gamma - 2\alpha}{\gamma}\right)^2} \quad \dots\dots (4.2-6)$$

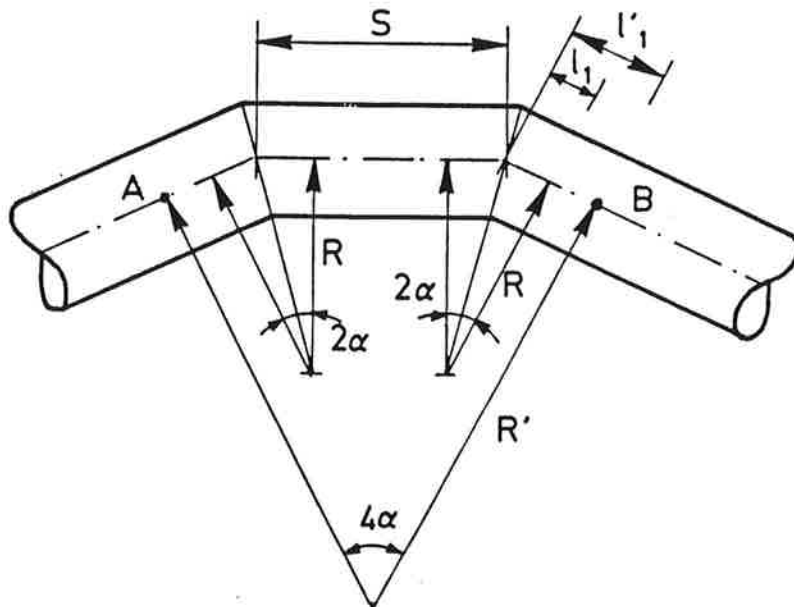
$$i_{xo} = i_{yo} = \frac{1,8}{\lambda^{2/3}} \quad \dots\dots (4.2-7)$$

Bij druk P geldt:

$$k'_p = \frac{k'_0}{1 + 6 \frac{P}{E} \left(\frac{r}{t}\right)^{7/3} \cdot \left(\frac{R}{r}\right)^{2/3}} \quad \dots\dots (4.2-8)$$

$$i_{xp} = \frac{i_{xo} (= i_{yo})}{1 + 3,25 \frac{P}{E} \left(\frac{r}{t}\right)^{5/2} \cdot \left(\frac{R}{r}\right)^{2/3}} \quad \dots\dots (4.2-9)$$

4.2.2. Meervoudige mijterbochten met $S \geq 2 \lambda_1$



Afb. 4.2-2: Meervoudige mijterbocht met $S \geq 2 \lambda_2$.

Indien de beide knikken elkaar niet beïnvloeden kunnen de regels van par. 4.2.1 worden gevolgd.

Of beïnvloeding optreedt, blijkt uit de volgende twee berekeningen:

- a. Bereken de hoekverdraaiing tussen A en B, uitgaande van onafhankelijke knikken:

$$\phi_{AB}^a = \frac{M}{EI} (4 k'_0 \ell_1 + 2 S - 4 \ell_1) \quad \dots (4.2-10)$$

- b. Bereken de hoekverdraaiing tussen A en B door de bocht als één geheel te beschouwen:

$$R' = \frac{S}{2} \cot \alpha \quad \dots (4.2-11)$$

$$\lambda = \frac{t R'}{r^2} \quad \dots (4.2-12)$$

$$k_0 = \frac{1,65}{\lambda} \quad \dots (4.2-13)$$

$$\gamma = 1200 \sqrt{\frac{t}{D_u}} \quad \dots (4.2-14)$$

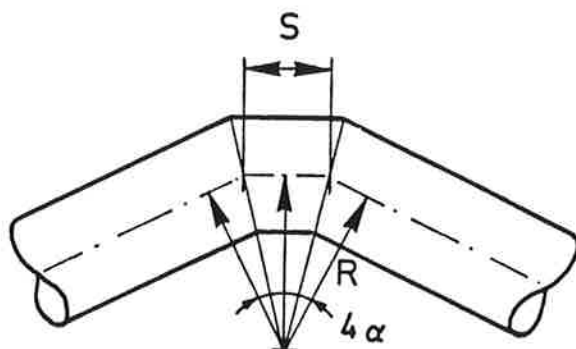
$$k'_0 = 1 + (k_0 - 1) \sqrt{1 - \left(\frac{\gamma - 4 \alpha}{\gamma}\right)^2} \quad \dots (4.2-15)$$

$$\phi_{AB}^b = 2 k' S \frac{M}{EI} \quad \dots (4.2-16)$$

Indien $\phi_{AB}^a > \phi_{AB}^b$ dan wordt aangenomen dat beide knikken elkaar niet beïnvloeden. De rekenregels van par. 4.2.1 zijn dan van toepassing. In het andere geval dient voor de berekening van de buigvervormingen gebruik te worden gemaakt van de hierboven onder b aangegeven rekenregels.

Voor de waarden van i_x en i_y kan gebruik worden gemaakt van de formules voor de enkelvoudige mijterbocht volgens par. 4.2.1.

4.2.3. Meervoudige mijterbochten met $S < 2 \lambda_1$



Afb. 4.2-3: Meervoudige mijterbocht met $S < 2 \lambda_1 = r (1 + \operatorname{tg} \alpha)$.

Deze bochten kunnen worden berekend met de rekenregels voor gladde bochten volgens hoofdstuk 3 met de volgende (voor-)waarden:

$$R = \frac{S}{2} \cot \alpha \quad \dots\dots (4.2-17)$$

De lengte waarover de verminderde buigstijfheid van toepassing is, is aangegeven in afb. 4.2-3.

Ten aanzien van de rekken geldt het gestelde in par. 4.2.1.

Indien gewenst kan ook gebruik worden gemaakt van de formules (4.2-3) t/m (4.2-9).

4.2.4. Inwendige druk, c.q. uitwendige druk

Door de druk P ontstaat ter plaatse van de binnenzijde van de bocht een spanningsverhoging:

$$\sigma_{yp} = \frac{P r}{t} \cdot \frac{R - r/3}{R - r} \quad \dots\dots (4.2-18)$$

Aan de buitenzijde ontstaat een spanningsverlaging:

$$\sigma_{yp} = \frac{P r}{t} \cdot \frac{R + r/3}{R + r} \quad \dots\dots (4.2-19)$$

Hierin is R de straal van de bocht. Hiervoor dient de kleinste waarde te worden genomen van:

$$R = \frac{r}{2} (1 + \cot \alpha) \quad \dots (4.2-20)$$

en

$$R = \frac{s}{2} \cot \alpha \quad \dots (4.2-21)$$

4.2.5. Gronddruk

Gronddrukken kunnen op dezelfde wijze worden behandeld als bij gladde bochten. Eenvoudshalve wordt verwezen naar hoofdstuk 3.

4.2.6. Buiging uit het vlak van de bocht

Hiervoor wordt eveneens verwezen naar hoofdstuk 3.

4.2.7. De invloed van de ovalisering en van de verandering van de bochthoek

Deze invloeden kunnen op dezelfde wijze worden behandeld als bij gladde bochten, zie hoofdstuk 3.

4.3. Plasticiteitsleer

In verband met de analogie met gladde bochten, kunnen bij mijterbochten dezelfde rekenmethoden worden gebruikt.

De in te voeren waarden voor de bochtstraal R en de bochthoek kunnen worden ontleend aan de in par. 4.2 gegeven formules.

4.4. Berekening van de rekken

Voor de omtreksrichting kan dezelfde procedure worden gevolgd als bij de gladde bochten.

Voor de langsrichting geldt in afwijking van de situatie bij de gladde bochten dat indien de berekende rek in langsrichting kleiner is dan die in omtreksrichting, de rek in langsrichting gelijk wordt gesteld aan die in omtreksrichting.

— / / —
Hog

