

Faculteit Ingenieurswetenschappen

Vakgroep Mechanische Constructie en Productie Voorzitter: prof. dr. ir. J. DEGRIECK

Foutinteractiecriteria voor meerdere fouten in moderne stalen

door Frederiek SCHELSTRAETE

Promotor: prof. dr. ir. W. DE WAELE

Scriptie ingediend tot het behalen van de academische graad van burgerlijk werktuigkundig-elektrotechnisch ingenieur

Academiejaar 2005-2006



Faculteit Ingenieurswetenschappen

Vakgroep Mechanische Constructie en Productie Voorzitter: prof. dr. ir. J. DEGRIECK

Foutinteractiecriteria voor meerdere fouten in moderne stalen

door Frederiek SCHELSTRAETE

Promotor: prof. dr. ir. W. DE WAELE

Scriptie ingediend tot het behalen van de academische graad van burgerlijk werktuigkundig-elektrotechnisch ingenieur

Academiejaar 2005-2006

Dankwoord

Een woord van dank wil ik richten tot alle personen die geholpen hebben om dit afstudeerwerk tot een goed einde te brengen.

Eerst en vooral wil ik mijn promotor prof. dr. ir. W. De Waele van harte bedanken voor de tijd die hij in de loop van het academiejaar voor mij vrijgemaakt heeft. Hij was altijd paraat om me met raad en daad bij te staan. De informatie, de opmerkingen en de tips die hij me bezorgde waren dan ook zeer nuttig en hebben in belangrijke mate bijgedragen tot de realisatie van dit werk.

Ook wil ik mijn ouders, grootouders en broer bedanken die me motiveerden tijdens het verloop van dit afstudeerwerk.

"De auteur geeft de toelating deze scriptie voor consultatie beschikbaar te stellen en delen van de scriptie te kopiëren voor persoonlijk gebruik. Elk ander gebruik valt onder de beperkingen van het auteursrecht, in het bijzonder met betrekking tot de verplichting de bron uitdrukkelijk te vermelden bij het aanhalen van resultaten uit deze scriptie."

Juni 2006

Frederick SCHELSTRAETE

Foutinteractiecriteria voor meerdere fouten in moderne stalen door Frederiek SCHELSTRAETE

Scriptie ingediend tot het behalen van de academische graad van burgerlijk werktuigkundig-elektrotechnisch ingenieur

Academiejaar 2005-2006

Promotor: prof. dr. ir. W. DE WAELE Faculteit Ingenieurswetenschappen Universiteit Gent

Vakgroep Mechanische Constructie en Productie Voorzitter: prof. dr. ir. J. DEGRIECK

Overzicht

Het aanleggen van pijpleidingen vereist het steeds maar weer verleggen van technologische grenzen. Pijpleidingen voor het vervoer van gas of olie door zeer onherbergzame gebieden komen alsmaar meer voor. De transportcapaciteit moet de hoogte in en bovendien moet alles zo goedkoop en zo veilig mogelijk gebouwd worden. Lekken of breuken mogen in geen geval voorkomen.

Wereldwijd wordt onderzoek verricht naar het veilig toepassen van nieuwe hoge-sterkte staalsoorten, het gebruik van verbeterde niet-destructieve onderzoeksmethoden voor het detecteren van lasfouten en het formuleren van nieuwe foutbeoordelingscriteria.

In dit werk gaat de aandacht uit naar interactie (wederzijdse beïnvloeding) van fouten in de lasnaden van aan elkaar gelaste pijpen.

In *hoofdstuk 1* wordt de geschiedenis en de aanleg van pijpleidingen kort besproken en worden een aantal technologische vernieuwingen aangekaart. Verder wordt het probleem van de foutinteractie gesitueerd.

De bestaande foutinteractiecriteria worden in dit werk getoetst aan beschikbare experimentele gegevens. Deze gegevens zijn afkomstig van grootschalige trekproeven, de zogenaamde '*wide plate testen*', uitgevoerd in het Laboratorium Soete. Daarom wordt in *hoofdstuk 2* het verloop van zo'n test besproken.

In *hoofdstuk 3* worden de drie meest toegepaste en genormeerde foutinteractiecriteria voor twee oppervlaktefouten besproken. Daaruit blijkt dat er grote verschillen zijn tussen deze criteria.

Hoofdstuk 4 is volledig gewijd aan het Failure Assessment Diagram (FAD). Dit is een methode die tracht te voorspellen bij welke spanning een structuur zal falen en dus kijkt of bepaalde fouten toelaatbaar zijn of niet. Uit de studie van deze methode (rekening houdend met foutinteractie) blijkt dat de theorie (het FAD) en de praktijk (de beschikbare experimentele gegevens) niet echt overeenkomen. In de praktijk ligt de faalspanning meestal hoger. De theorie is dus te conservatief, wat vooral te wijten is aan het feit dat deze theorie gebaseerd is op elastische en elastisch-plastische breukmechanica, terwijl pijpleidingen in de praktijk sterk plastisch kunnen vervormen.

In *hoofdstuk 5* wordt een aanvang gemaakt met eindige-elementen simulaties van de grootschalige trekproef om meer inzicht te verwerven in de spanningen, rekken en verplaatsingen die optreden in de zone tussen twee oppervlaktefouten.

In *hoofdstuk* 6 ten slotte zijn de conclusies van dit werk te vinden.

Trefwoorden: foutinteractiecriteria, grootschalige trekproef, Failure Assessment Diagram (FAD)

Interaction Criteria for Multiple Defects in Modern Steels

F. Schelstraete

Abstract — The construction of pipelines requires more and more technological ingeniousness. Pipelines that transport oil or gas through inhospitable regions occur frequently. The transport capacity must increase and the whole installation must be built as cheap and safe as possible. Leakages and defects are not allowed.

In this paper, we study the interaction of defects in the girth weld joining pipes. First of all, we discuss and compare the three most applied interaction criteria. Further the concept of a Failure Assessment Diagram (FAD) is presented, a method that tries to find the defect tolerance of a structure and determines if a known defect is acceptable. Finally the results of some finite element simulations are mentioned.

Keywords — interaction criteria, wide plate test, Failure Assessment Diagram (FAD)

Pipelines

A pipeline is an essential link in the energy transport (oil or gas). The frequent application of high-strength steels and new welding techniques may not endanger the integrity of the installation. So it is very important to determine the allowable dimensions of welding defects.

Now, assessment methods assume welds with one single defect. This assumption is not always fulfilled; welds may contain many small defects. These defects, when considered individually and without interaction, are generally innocuous. However, this may be a false conclusion as to the true strength or deformation capacity of the weld because neighbouring defects may interact and may be more severe than each individual defect.

The existing interaction criteria are based on linear elastic fracture mechanics. So it is expected that the existing rules are not necessarily applicable for elastic-plastic or plastic material behaviours. In this study, interaction criteria are evaluated using available experimental data of wide plate tensile tests executed in the Laboratory Soete (UGent). The majority of these plates is plastic deformed.

Wide plate test

Wide plate tensile testing is one possibility for assessing mechanical behaviour using medium-scale tests. The curved wide plates are extracted from welded pipes by flame cutting and subsequently machined to their final geometry. Usually wide plates have an overall length of nominally 900 mm with the weld at mid-length. The nominal width of the prismatic section varies from 450 mm (thin wall pipe) to 280 mm (thick wall pipe), with the defect (or the cluster of defects) centred at mid-width. In the next step the curved wide plates are welded to a pair of heavy loading lugs.

The assembly is subsequently mounted, by means of heavy steel pins, in the loading elements of the 8000 kN servo-hydraulic test machine. During testing, the applied tensile load and the weld metal elongation are continuously recorded as a function of the overall elongation.

Interaction criteria

Several organizations have developed interaction criteria for girth welds containing two coplanar surface breaking defects. In this study a girth weld is represented by a flat plate containing two surface breaking defects. *Figure 1* shows a cross-section of such a flat plate.



Figure 1: Cross-section of a flat plate containing two surface breaking defects

A first interaction criterion that is frequently used, is found in API RP 579 [1], a standard specially developed for pipelines. This criterion says that interaction occurs if the separation distance, *s*, between adjacent defects of length l_1 and l_2 is less than the average defect length.

A second criterion is described in ASME [2], a standard developed for pressure vessels. Interaction now occurs if the distance, s, between the two defects is less than half the height of the largest defect.

A third criterion (BS 7910 [3]) says that interaction occurs if the distance, *s*, between the adjacent '*shallow*' defects $(2d_i/l_i < 1; i = 1, 2)$ is equal to zero. Otherwise interaction occurs if *s* is less than the length of the smallest defect.

API RP 579	ASME	BS 7910
$s \le \frac{l_1 + l_2}{2}$	$s \leq \frac{d_2}{2} \left(d_1 < d_2 \right)$	$s = 0 \left(\frac{2 \cdot d_i}{l_i} < 1\right)$ $s \le l_1 \text{ (otherwise)}$ $\left(l_1 < l_2\right)$

Table 1: Summary of interaction criteria

There is an enormous difference between these three rules (*Table 1*). An explanation is that these criteria are developed for different purposes. Deep defects are very critical by pressure vessels; long defects are a big problem by pipelines.

Applying these rules to the experimental data of wide plate tests, different results are obtained. This is owing to the simplicity of the rules and the plastic deformation of the plates. Consequently the development of better rules, also applicable for plastic material behaviours is necessary.

Failure Assessment Diagram (FAD)

One of the approaches for determining the integrity of cracked structures uses the concept of a Failure Assessment Diagram (FAD). The basis of this approach is that failure is avoided so long as the structure is not loaded beyond its maximum load bearing capacity defined using both fracture mechanics criteria and plastic limit analysis. So the FAD approach is based on elastic-plastic concepts; on the other hand his application is simplified by the use of elastic parameters.



Figure 2: Failure Assessment Diagram (FAD) [4]

In other words, the FAD is a plot of the failure envelope of the cracked structure, defined in terms of two parameters, K_r and L_r . K_r (the proximity to brittle fracture) is the ratio of the applied linear elastic stress intensity factor, K_I , to the material's fracture toughness, K_{mat} . L_r (the proximity to plastic collapse) is the ratio of the applied stress to the stress to cause plastic yielding of the cracked structure. This failure envelope is called the Failure Assessment Line (*Figure 2*). Region A in the FAD is the safe zone, region C is unsafe.

There are a number of different options of analysis available, each being dependent on the quality and detail of the material's property data available. The standard option of analysis, option 1, is the minimum recommended option. This requires measures of the material's yield strength and its tensile strength, and a value of fracture toughness. The standard option uses correlations, and as such is very conservative. Using an option 2 analysis, mismatch option, can reduce conservatism. This method requires knowledge of the yield and tensile strengths of both the base and weld metals.



Figure 3: An example of a FAD

For all the wide plates tested in the Laboratory Soete, we can calculate K_r and L_r (in various ways). This gives us a set of assessment points. Since all the experiments are executed until

the wide plate failed, all the points must lay on the Failure Assessment Line. When we have a look at the position of the assessment points, we see that a lot of points is far away from the Failure Assessment Line (*Figure 3*). This occurs for all the calculation methods for L_r and K_r and means that the theory is too conservative. In practice the fail stress is higher than the theory predicts. When we calculate L_r with the formula developed on the UGent (based on elliptical defects), the points are closest to the Failure Assessment Line. Using option 2 to evaluate also reduces conservatism.

As a conclusion we can say that this calculation method is not suitable to predict plastic collapse. In addition, the calculation methods for L_r are developed for one single defect. It would be better to develop formulae that take account of the netsection (total section minus all the defects).

Finite Element Method (FEM)

The finite element method gives us the possibility to study the stresses and displacements that occur in a wide plate during a tension test. Through elastic-plastic simulations we can study for instance the Von Mises stress in the surroundings of a defect (*Figure 4*).



Figure 4: Von Mises stress

As a result of such simulations, we can conclude that the grade of interaction depends on the distance between the defects, but also on the length and the depth of the defects. In addition we have noticed that the crack opening displacement (COD) increases if the length or the depth of a defect grows.

Conclusions

This study suggests that the existing assessment methods for girth welds are too conservative. There exist a need for developing assessment methods and interaction criteria which permit plasticity effects to be incorporated.

Varying the distance between the two defects, the depth and the length of the defects in finite element simulations for instance can help us to come to new interaction rules. Consequently, further research is necessary.

REFERENCES

- [1] API RP 579, Recommended practice for fitness-for-service, American Petroleum Institute, 2000
- [2] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section XI: Rules for inservice inspection of nuclear power plant components, American Society of Mechanical Engineers, 2004
- [3] BS 7910, Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures, British Standards Institution, 2005
- [4] FITNET, Final draft (MK7) of FITNET procedure, Section 5: Input & Section 6: Fracture, mei 2006

Inhoudsopgave

Overzicht

Extended abstract

Inhoudsopgave

i

iv

Lijst met symbolen

I P	jpleidingen	1
1.1	Geschiedenis	1
1.2	Gas, de brandstof van vandaag	1
1.3	Aanleg van pijpleidingen	2
1.4 1.4 1.4	Technologische vernieuwingen 4.1 Nieuwe staalsoorten 4.2 Lastechnieken	3 3 4
1.5	Kwaliteitseisen	6
1.6	Problemen bij het keuren van lassen	6
1.7	Doelstellingen thesis	8
2 G	rootschalige trekproef ('wide plate test')	9
2 G 2.1 2. 2. 2. 2. 2.	rootschalige trekproef ('wide plate test')Procedure1.1Voorbereiding1.2Aanbrengen van de belasting1.3Koelprocedure1.4Metingen	9 9 10 11 11
2 G 2.1 2. 2. 2. 2. 3 B	rootschalige trekproef ('wide plate test')Procedure1.1Voorbereiding1.2Aanbrengen van de belasting1.3Koelprocedure1.4Metingenestaande foutinteractiecriteria	9 9 10 11 11 12
2 G 2.1 2. 2. 2. 2. 3 B 3.1	rootschalige trekproef ('wide plate test')Procedure1.1Voorbereiding1.2Aanbrengen van de belasting1.3Koelprocedure1.4Metingenestaande foutinteractiecriteriaWat is foutinteractie?	9 9 10 11 11 12 12
2 G 2.1 2. 2. 2. 2. 3 B 3.1 3.2	rootschalige trekproef ('wide plate test')Procedure1.1Voorbereiding1.2Aanbrengen van de belasting1.3Koelprocedure1.4Metingenestaande foutinteractiecriteriaWat is foutinteractie?Vaak gebruikte criteria	9 9 10 11 11 12 12 12

4	Failur	re Assessment Diagram (FAD)	20			
	4.1 Algemeen					
	4.2 FAD toegepast op plaatgeometrieën					
	4.3 De	e verschillende analyse opties volgens de FITNET procedure	23			
	4.4 Op 4.4.1 4.4.2 4.4.2 4.4.2 4.4.3 4.4.3 4.4.3 4.4.3 4.4.3 4.4.3 4.4.4 4.4	 by the standaard analyse optice vorgens de lift (21) procedure by the standaard analyse optice invoergegevens Procedure voor het bepalen van de 'Failure Assessment Line' Omrekening van YS en UTS Bepaling van f(L_r) Analyseren van de experimentele data Berekening van K_r voor een plaat met gegeven belasting en fouten Berekening van L_r voor een plaat met gegeven belasting en fouten 3.2.1 FITNET 4.3.2.2 Sattari 4.3.2.4 UGent 4.3.2.5 Kastner 4.3.2.6 Vergelijking van de verschillende berekeningsmethodes voor L_r 	24 24 25 25 25 25 26 26 26 34 35 35 37 39 41 41			
	4.5 Or 4.5.1 4.5.2 4.5.2 4.5.2 4.5.2 4.5.2 4.5.3 4.5.3 4.5.3 4.6 Re 4.6.1 4.6.1 4.6.1 4.6.1 4.6.2	 billion vergenjulig van de verseninende oreideningsmethodes voor E_r bile 2: de 'mismatch' analyse optie Invoergegevens Procedure voor het bepalen van de 'Failure Assessment Line' Omrekening van YS en UTS Bepaling van f(L_r) Berekening van de 'plastische bezwijklasten' (yield limit loads) Analyseren van de experimentele data Berekening van K_r voor een plaat met gegeven belasting en fouten Berekening van L_r voor een plaat met gegeven belasting en fouten Berekening van L_r voor een plaat met gegeven belasting en fouten Platen waarbij de drie interactiecriteria hetzelfde resultaat geven Platen waarbij de drie interactiecriteria niet hetzelfde resultaat geven Resultaten op basis van optie 2 	46 46 47 47 47 48 50 50 51 51 53 53 63 67			
	4.6.3	Conclusies	68			
5	Eindig	ge-elementenmethode (EEM)	70			
	5.1 M 5.1.1 5.1.1 5.1.1 5.1.1 5.1.1	 odel voor een plaat met twee oppervlaktefouten Opbouw van het model .1 Geometrie .2 Toewijzen materiaaleigenschappen .3 Opleggen randvoorwaarden en aanbrengen belasting .4 Vermazen (meshing) van de geometrie 	70 72 72 72 72 72 73			
	5.2 El 5.2.1 5.2.2	astische modellering Bepaling van de spanningsintensiteitsfactoren K _I Resultaten	74 74 74			
	5.5 Pl	astische modellering	/9			

	5.3.1	Ramberg-Osgood model	79
	5.3.2	Resultaten	81
	5.3.2.1	Platen met twee fouten met lengte 25 mm en diepte 3 mm	81
	5.3.2.2	Platen met twee fouten met lengte 25 of 50 mm en diepte 3 of 6 mm	86
6	Conclus	sies	90
AP	PENDIX	A: Interactieregels	92
AP	PENDIX	B: Bepaling van de 'Failure Assessment Line'	93
AP	PENDIX	C: MATLAB-programma	95
AP	PENDIX	D: Gebruikte elementen in ABAQUS	103
Re	ferenties		105

Lijst met symbolen

α	compensatiefactor voor het vloeien van een materiaal
γ	interactiefactor
Е	rek
\mathcal{E}_m	maximaal bereikte rek tijdens een proef
v	coëfficiënt van Poisson
σ	spanning
σ_m	maximaal aangelegde trekspanning
σ_{ref}	referentiespanning
arphi	hoek
b	breedte van een lasnaad
d	diepte van een oppervlaktefout
d_I	diepte van oppervlaktefout 1
d_2	diepte van oppervlaktefout 2
l	lengte van een oppervlaktefout
l_I	lengte van oppervlaktefout 1
l_2	lengte van oppervlaktefout 2
n	verstevigingsexponent
S	afstand tussen twee oppervlaktefouten
t	dikte van een plaat
CTOD	Crack Tip Opening Displacement
CVN	Charpy V-Notch
D	buitendiameter van een pijp
Ε	elasticiteitsmodulus
E^B	elasticiteitsmodulus van het basismateriaal
E^W	elasticiteitsmodulus van het lasmateriaal
F_y^B	plastische bezwijklast (yield limit load) gegeven bij de
	trekeigenschappen van het basismateriaal
F_y^M	plastische bezwijklast (yield limit load) voor de 'mismatch' condities
K_I	lineair elastische spanningsintensiteitsfactor
K _{mat}	breuktaaiheid
K_r	een maat voor de 'nabijheid' van brosse breuk

L_r	een maat voor de 'nabijheid' tot plastisch bezwijken
Μ	mismatch ratio
T _{room}	kamertemperatuur
T _{test}	temperatuur waarbij een proef is uitgevoerd
UTS	gemiddelde waarde van de treksterkte
UTS^B	gemiddelde waarde van de treksterkte van het basismateriaal
UTS^{W}	gemiddelde waarde van de treksterkte van het lasmateriaal
W	breedte van een plaat
YS	gemiddelde waarde van de vloeispanning
YS^B	gemiddelde waarde van de vloeispanning van het basismateriaal
YS^M	mismatch vloeispanning
YS^W	gemiddelde waarde van de vloeispanning van het lasmateriaal

1 Pijpleidingen

Een pijpleiding is een onmisbare schakel in het transport van energie (olie en gas), soms vanuit zeer onherbergzame gebieden, aardbevingsgevoelige regio's, zeer koude streken of moerasgebieden. Het ontwerp, de aanleg en het gebruik van stalen pijpleidingen moet dan ook aan de strengste eisen voldoen. Dit geldt zeker voor landleidingen, maar vormt een nog grotere uitdaging bij offshore toepassingen.

De vraag naar olie en gas neemt bovendien nog steeds toe en er mogen geen storingen optreden om in de dagelijkse energiebehoefte te kunnen voorzien. Bij de bouw van nieuwe pijpleidingen moeten de technologische grenzen dan ook steeds opnieuw verlegd worden.

1.1 Geschiedenis

Pijpleidingen bestaan al meer dan 3000 jaar. In China werden buizen uit bamboe gebruikt om natuurlijk gas te transporteren, terwijl zo'n 1000 jaar geleden Irakese mannen een systeem ontwikkelden om rivierwater via houten pijpen naar de dorpen te vervoeren. Dit laatste onder druk van de vrouwen, die weigerden om nog langer water in potten op hun hoofden te dragen. De eerste stalen pijpleiding bestemd voor het transport van ruwe aardolie werd in 1865 aangelegd in Pennsylvania (VS). Het net van pijpleidingen in de VS is ondertussen trouwens uitgegroeid tot het grootste van de wereld. Pas veel later (na de tweede wereldoorlog) werd het Europese netwerk van grote-diameter pijpleidingen ontwikkeld.

In de meer dan 100 jaar die sinds de ingebruikname van de eerste stalen pijpleiding verstreken zijn, is veel vooruitgang geboekt op het gebied van leidingen voor hoge werkdrukken. Er wordt een onderscheid gemaakt tussen transport- of hoofdleidingen (leidingen onder hoge druk) en distributieleidingen of regionale leidingen (leidingen onder lage druk). De transportleidingen hebben een diameter van 273 mm tot 1,52 m; de wanddikte kan oplopen tot 35 mm. Tegenwoordig worden pijpleidingen ontworpen voor werkdrukken tot 100 bar aan land en tot 200 bar offshore.

1.2 Gas, de brandstof van vandaag

Over de ganse wereld zijn zowat 2 miljoen km transportleidingen in gebruik, waarvan meer dan 80 % aan land. Deze leidingen zijn in hoofdzaak bestemd voor het transport van gas (75 % van het gastransport wereldwijd gebeurt via pijpleidingen). De vraag naar gas neemt bovendien nog steeds toe. Net zoals steenkool de energiebron was in de jaren 1800, en olie in de jaren 1900, wordt verwacht dat gas de belangrijkste brandstof van de jaren 2000 zal worden. Door deze toenemende vraag naar gas als meer milieuvriendelijke energiebron volgt de bouw van nieuwe pijpleidingen dan ook een stijgende trend.

Alle vooruitzichten stellen bovendien dat tegen 2007 de olie- en gasproductie in de Noordzee snel zal dalen, waardoor Europa zich meer en meer zal moeten bevoorraden vanuit andere regio's. Rusland, dat na Saoedi-Arabië de grootste energieproducent ter wereld is, zal in de toekomst dan ook een sleutelrol gaan vervullen.

1.3 Aanleg van pijpleidingen

Ingenieurs worden geconfronteerd met een kluwen van zeer uiteenlopende aspecten bij het ontwerp, de aanleg en de exploitatie van pijpleidingen. Voorafgaand aan de eigenlijke bouw is er een periode van vele jaren onderzoek naar mogelijke ontginningsgebieden (geologie, klimaat), ontwikkeling van technieken voor de exploitatie, en beproeving van de geschiktheid van de aan te wenden materialen. In het ganse project moet de ontwerper bovendien rekening houden met bestaande reglementeringen, milieueisen, politieke gevoeligheden,

Er bestaan dan ook geen standaardoplossingen voor de aanleg van pijpleidingen. De vele combinatiemogelijkheden tussen het reliëf van het terrein, de grondsoort, kruisingen met waterlopen of spoorwegen, ... zijn hiertoe te groot in aantal.



figuur 1: De Baku-Tbilisi-Ceyhan pijpleiding [1]

Een mooi voorbeeld van een recent aangelegde pijpleiding is de Baku-Tbilisi-Ceyhan pijpleiding (*figuur 1*). Ze transporteert ruwe aardolie van de Kaspische Zee naar de

Middellandse Zee en loopt van Baku (in Azerbeidzjan) via Tbilisi (in Georgië) naar de Turkse havenstad Ceyhan. Met 1760 km is het één van de langste pijpleidingen ter wereld. De pijpleiding heeft een doorsnede van 1066,8 mm (42 inch) en kan bij normaal gebruik 1 miljoen vaten olie per dag vervoeren.

1.4 Technologische vernieuwingen

Bij de bouw van nieuwe pijpleidingen worden de grenzen van de technische mogelijkheden stelselmatig verlegd. Een belangrijke drijfveer voor de olie- en gasindustrie is vanzelfsprekend het reduceren van de kosten gepaard gaande met het ontwerp, de aanleg en de exploitatie van nieuwe leidingen.

Bovendien is de toenemende interesse in hogere werkdrukken de aanzet geweest voor de toepassing van nieuwe staalsoorten en moderne lastechnieken die grotendeels in Europa werden ontwikkeld.

1.4.1 Nieuwe staalsoorten

De pijpleidingsector is een voorloper en drijvende kracht in de ontwikkeling en toepassing van staalsoorten met hoge sterkte. Hierdoor kan men een zelfde pijpleiding bouwen met minder materiaal (geringere wanddikte) of bij een gelijke wanddikte een hogere werkdruk (en hierdoor een groter debiet) toelaten (*figuur 2*).

Tot 1960 werden voor de productie van pijpleidingen gewone staalsoorten met een vloeispanning tot X52¹ toegepast. Recente ontwikkelingen beogen de toepassing van zogenaamde X100 en X120 staalsoorten (staal met een minimale vloeispanning van respectievelijk 690 en 825 MPa). Hierdoor worden besparingen op de constructiekost van zo'n 5 tot 15 % behaald.

ExxonMobil en TransCanada hebben reeds met succes een X120 pijpleiding geïnstalleerd in Canada. Het gebruik van dergelijke pijpleidingen biedt namelijk de mogelijkheid om ver afgelegen en moeilijk bereikbare gasbronnen op een meer economische manier te ontginnen. Bovendien blijft het X120 staal compatibel met de standaard constructietechnieken (zelfs bij de extreme winteromstandigheden in Canada). De constructiesnelheid is vergelijkbaar met de

¹ De aanduiding X52 is ontleend aan de API 5LX standaard van het American Petroleum Institute en betekent dat de vloeispanning van het pijpmateriaal 52 ksi of 360 MPa bedraagt (1 ksi = 6,89 MPa).

snelheden die bereikt worden bij een winterinstallatie en het aantal lasdefecten is lager dan bij andere grote pijpleidingprojecten.



figuur 2: Vergelijking van een aantal nieuwe staalsoorten [2]

1.4.2 Lastechnieken

Economische aspecten, snelheid, productiviteit, precisie en een goede lasafwerking zijn factoren die de drijfveer vormen om bestaande lastechnieken te optimaliseren en nieuwe technieken te ontwikkelen. Tot voor enkele jaren gebeurde het aan elkaar lassen van pijpen uitsluitend met de hand; nu worden meer en meer half- en volautomatische lasapparaten gebruikt.

De kwaliteit van manueel gelaste stukken wordt mede bepaald door de vaardigheid van de lasser. Doordat de kwaliteitseisen steeds strenger worden is een constante hoge kwaliteit waarborgen bijna onmogelijk. Bij geautomatiseerd lassen vervult de lasser de rol van operator van de lasmachine. De kwaliteit van de las is dan afhankelijk van de éénmalige instelling van de lasmachine. In de industrie werden reeds een aantal automatische lasprocédés ontwikkeld. Eén voorbeeld van deze technieken is het volautomatisch wrijvingslassen.

Wrijvingslassen is een mechanisch lasproces waarbij de nodige warmte voor het lassen verkregen wordt door het tegen elkaar wrijven of roteren van de te verbinden stukken, onder een axiale druk. De traditionele wrijvingslastechniek is ongeschikt voor het lassen van lange stukken, zoals pijpleidingen. Om praktische redenen kunnen deze namelijk niet geroteerd

worden. Om pijpleidingen toch te kunnen lassen met de wrijvingslastechniek, werd een nieuwe variant van het wrijvingslasproces ontwikkeld: het Friex-lasproces (*figuur 3*).



figuur 3: Het Friex-lasproces [3]

In tegenstelling tot het klassieke wrijvingslasproces wordt er bij deze nieuwe variant gebruik gemaakt van een tussenschijf (de lasring) die fungeert als toevoegmateriaal. Dit plaatvormig toevoegmateriaal wordt tussen de twee dwarsdoorsneden van de te verbinden pijpen geplaatst. De nodige laswarmte wordt verkregen door de lasring wrijvend te laten roteren tussen de pijpen, onder een axiale druk. Deze warmte verhoogt de temperatuur van de scheidingsvlakken zonder de smelttemperatuur te bereiken. Eens de las voldoende is opgewarmd wordt de finale smeeddruk axiaal aangebracht door een explosie, na het stoppen van de roterende lasring.

Op dit ogenblik werken het Laboratorium Soete (UGent), de Vlaamse bouwondernemer Denys NV en het Belgisch Instituut voor Lastechniek met subsidies van het IWT-Vlaanderen² aan de ontwikkeling van een volledig automatisch lassysteem voor het lassen van lange pijpen door middel van wrijving en explosie.

Ook aan de Cranfield Universiteit (VK) wordt momenteel onderzoek verricht naar de ontwikkeling van een innovatief nieuw lasproces, het zogenaamde '*dual tandem*' lassen (*figuur 4*). Dit onderzoek wordt gesubsidieerd door BP met als doel de lassnelheid op te drijven om op die manier de kosten te kunnen drukken.

Bij tandemlassen voeden twee elektrisch geïsoleerde lasdraden door dezelfde lastoorts het smeltbad. '*Dual tandem*' lassen betekent dan dat we te maken hebben met twee lastoortsen

² Instituut voor de aanmoediging van Innovatie door Wetenschap en Technologie in Vlaanderen

(met elk twee lasdraden), op een afstand van 50 tot 100 mm van elkaar geplaatst, die telkens twee lagen lasmateriaal neersmelten.



figuur 4: Het 'dual tandem' lassen [4]

1.5 Kwaliteitseisen

Door de toepassing van hoge-sterkte staalsoorten en nieuwe lastechnieken mag natuurlijk de integriteit en dus de veiligheid van de installatie niet in gevaar komen. Daarom zijn de laatste jaren strengere kwaliteitseisen ontwikkeld waaraan zowel het pijpmateriaal als de lasnaden moeten voldoen.

Het blijft dus nodig om de toelaatbare afmetingen van lasfouten te bepalen. De perfecte las bestaat immers niet, fouten zijn er altijd. Te grote lasfouten brengen de veiligheid van de constructie en de omgeving in het gedrang. Een te strenge houding in het afkeuren van lassen leidt dan weer tot tijdverlies en aanzienlijke meerkosten voor het project [5].

1.6 Problemen bij het keuren van lassen

Het keuren van lassen gebeurt nu op basis van berekenings- en beoordelingsmethodes die gebaseerd zijn op één fout. In werkelijkheid zijn er in de lasnaad natuurlijk meerdere fouten aanwezig (*figuur 5* en *figuur 6*).

Bij de beoordeling van gedetecteerde fouten in constructies of lasverbindingen, eisen de codes nu dat naast of boven elkaar gelegen fouten getoetst worden op mogelijke interactie. De toepassing van de bestaande interactieregels geeft vaak aanleiding tot het *'recategoriseren'* van twee of meerdere aaneengrenzende fouten tot één enkele fout met grotere afmetingen. Die grotere fout blijkt in veel gevallen niet toelaatbaar zodat ze moet worden weggenomen. Ervaring (op basis van testen uitgevoerd in het Laboratorium Soete) leert nochtans dat een situatie met meerdere fouten veelal minder kritisch is dan een situatie met slechts één fout van gelijke grootte.



figuur 5: Ingebedde fouten in een lasnaad



figuur 6: Oppervlaktefouten in een lasnaad

De bestaande interactiecriteria zijn gebaseerd op elastisch materiaalgedrag; er wordt aangenomen dat het materiaal geen plastische vervormingscapaciteit bezit. Dit betekent dat de bestaande regels eigenlijk niet geschikt zijn om de invloed van meerdere fouten op het breukgedrag van taaie materialen te beoordelen en al zeker niet voor '*rekgebaseerd*' ontwerp. Deze regels zijn conservatief zodat nieuwe criteria moeten ontwikkeld worden, wil men onnodige reparaties vermijden.

Het Laboratorium Soete is op dit ogenblik verantwoordelijk voor het formuleren van foutinteractiecriteria binnen een Europees Netwerk (FITNET). Deze criteria zullen deel uitmaken van een zogenaamde '*Fitness for Purpose*'-procedure welke toelaat aanwezige fouten te evalueren op een wetenschappelijke basis. Finaal doel is te komen tot een erkende Europese standaard. Ook buiten Europa werd het Laboratorium Soete aangezocht om de know-how betreffende foutinteractie om te zetten in criteria (Canadese en Australische normen, bedrijfsspecifieke standaarden).

1.7 Doelstellingen thesis

Het is de bedoeling om op basis van ruim beschikbare gegevens van grootschalige trekproeven; de zogenaamde '*wide plate testen*' (zie *hoofdstuk 2*), het foutinteractiegedrag te evalueren, bestaande interactiecriteria af te wegen en mogelijks nieuwe criteria te ontwikkelen. Hiertoe zal in dit afstudeerwerk een literatuurstudie naar foutinteractie uitgevoerd worden en zullen bestaande criteria getoetst worden aan beschikbare experimentele gegevens. De berekeningsmethodes die in de huidige normen zijn voorgeschreven, zullen kritisch aan de experimentele resultaten getoetst worden. Verder zal een aanvang gemaakt worden met eindige-elementen simulaties van de grootschalige trekproef, waarbij de invloed van verschillende parameters wordt nagegaan.

2 Grootschalige trekproef ('wide plate test')

De kernactiviteit van het Laboratorium Soete bestaat uit de ontwikkeling van aanvaardingsen inspectiecriteria voor lasfouten. Hiermee heeft het een wereldwijde reputatie opgebouwd. De toelaatbare grootte van lasfouten wordt afgeleid uit de resultaten van grootschalige trekproeven.

2.1 Procedure

2.1.1 Voorbereiding



figuur 7: Een gekromde brede plaat (curved wide plate)

Een gekromde brede plaat (*curved wide plate*) wordt door middel van vlamsnijden uit twee aan elkaar gelaste pijpen gehaald, waarna ze gemachineerd wordt tot haar finale geometrie (*figuur 7*). Een veel toegepaste totale nominale lengte van zulk een plaat is 900 mm. De lasnaad zit hierbij in het midden. De nominale breedte van het middenste prismatische deel varieert typisch van 450 mm voor een dunwandige plaat tot bvb. 280 mm voor een dikwandige plaat. De breedtes worden bepaald op basis van de belastingscapaciteit van de 8000 kN servo-hydraulische trekbank van het Laboratorium Soete. De fouten worden meestal artificieel aangebracht in de lasnaad of in de warmte-beïnvloede zone tussen las- en basismateriaal in het midden van de breedte. Ten slotte wordt de pijpsectie aan haar twee uiteinden aan twee zware '*belastingsoren*' (*loading lugs*) gelast (*figuur 8*).



figuur 8: Een gekromde brede plaat die aan haar twee uiteinden aan twee zware 'belastingsoren' is gelast

2.1.2 Aanbrengen van de belasting

De plaat kan nu door middel van zware stalen pinnen gemonteerd worden in de belastingselementen van de 8000 kN servo-hydraulische trekbank (*figuur 9*). Deze trekbank heeft vier belastingselementen, waarbij elk element 2000 kN kan ontwikkelen en een slaglengte van 750 mm heeft. De aangelegde belasting wordt gemeten met behulp van gekalibreerde krachtcellen (*load cells*), die gemonteerd zijn op de zuigerstang van de individuele servo-hydraulische actuatoren.



figuur 9: De servo-hydraulische trekbank in het Laboratorium Soete

De trekbank is bovendien uitgerust met een servo-hydraulisch controlesysteem. Vroeger werd tijdens de initiële belastingsfase (lineair elastische belasting) de test geleid door de belastingsgestuurde (*load control*) mode. Als twee derden van de vloeispanning bereikt was, werd overgeschakeld naar de verplaatsingsgestuurde (*displacement control*) mode. Deze strategie wordt bijna niet meer toegepast; er wordt tegenwoordig enkel nog verplaatsingsgestuurd gewerkt.

De proefstukken worden gerokken met een snelheid van de grootteorde 1 mm/minuut, waarbij de trekkracht toegepast wordt in de axiale richting (dus loodrecht op de lasnaad).

2.1.3 Koelprocedure

Om initiatie van brosse breuk vanaf de fouten te bekomen en om trage stabiele scheurverlenging te minimaliseren, of gewoon om de ontwerptemperatuur te simuleren, kan de trekproef uitgevoerd worden onder lage temperatuur. De testtemperatuur wordt bereikt en onderhouden door gekoelde methanol te laten circuleren. Deze methanol wordt gekoeld door vier speciaal daarvoor ontworpen '*koelboxen*'. Deze '*koelboxen*' hebben dezelfde kromming als de pijpsectie en zijn stevig geklemd tegen de binnen- en/of buitenoppervlakken van de pijpsectie en dit aan beide zijden van de las.

Als het koelmiddel rechtstreeks in contact is met de oppervlakken van het proefstuk en met grote snelheid circuleert, kan een uniforme temperatuur bereikt worden over de ganse plaat. De testtemperatuur wordt gemeten door middel van chroom-aluminium thermokoppels. Deze thermokoppels zijn gepuntlast op de pijpsectie in de nabijheid van de las.

2.1.4 Metingen

Tijdens de test worden de aangelegde belasting en de verlenging van het lasmateriaal continu opgemeten in functie van de totale verlenging. De totale verlenging wordt gemeten tussen twee punten op 500 mm van elkaar (de lasnaad bevindt zich in het midden) door middel van twee LVDT's. De verlenging van het lasmateriaal wordt gemeten tussen twee punten op 8 mm van elkaar (lasnaad terug in het midden) door middel van een eigen ontwikkeld meetsysteem; het zogenaamde '*clip-on-gauge*' meetsysteem.

3 Bestaande foutinteractiecriteria

Fouten komen meestal in groep voor en kunnen tegenwoordig dankzij steeds betere detectiemethodes vlug opgespoord worden. Het mechanisch gedrag van een plaat met meerdere fouten is zeer complex, vandaar dat de berekeningsmethodes momenteel beperkt zijn tot platen met één fout.

Om platen met meerdere fouten toch te kunnen bestuderen, en dus te kunnen bepalen of de fouten al dan niet toelaatbaar zijn, wordt nu gebruik gemaakt van zogenaamde '*workmanship*' criteria³ of van interactieregels die vaak aanleiding geven tot '*recategorisatie*' van twee of meerdere aaneengrenzende fouten tot één enkele fout met grotere afmetingen.

3.1 Wat is foutinteractie?

Als de afstand tussen fouten '*voldoend*e' groot is, zullen de fouten elkaar niet wederzijds beïnvloeden. Men kan de fouten dan onafhankelijk van elkaar behandelen en de spanningen en vervormingen bepalen.

Als twee fouten zich '*dicht*' bij elkaar bevinden, kan de aanwezigheid van de ene fout het mechanisch gedrag van de plaat in de buurt van de andere fout beïnvloeden, er is sprake van foutinteractie. Men bekomt andere spanningen en vervormingen dan voor twee onafhankelijke fouten. Deze fouten kunnen dan niet meer als afzonderlijke fouten aanzien worden en moeten dus als één grote fout beschouwd worden.

In de literatuur zijn er heel wat foutinteractiecriteria te vinden voor twee oppervlaktefouten in de lasnaad van twee aan elkaar gelaste pijpen. De drie meest toegepaste en genormeerde criteria worden in dit hoofdstuk toegelicht.

3.2 Vaak gebruikte criteria

In *figuur 10* ziet u een algemeen beeld van een dwarse doorsnede van een vlakke plaat waarin zich twee oppervlaktefouten bevinden. Deze figuur kan betrekking hebben op een doorsnede door basismateriaal, maar in dit werk ligt de klemtoon op lasverbindingen. Deze voorstelling

³ 'Workmanship' criteria bepalen dat de som van de foutlengtes kleiner moet zijn dan een bepaalde waarde (deze waarde is afhankelijk van het type fouten dat bestudeerd wordt). De foutlengtes worden dus opgemeten om te bepalen of fouten toelaatbaar zijn of niet.

zal dan ook verder gebruikt worden als een benadering voor een lasverbinding tussen twee pijpen met grote diameter.

Aangezien beide fouten in hetzelfde vlak liggen spreekt men van gealigneerde fouten. De twee fouten hebben een lengte van l_1 respectievelijk l_2 en een maximale diepte van d_1 respectievelijk d_2 . De afstand tussen de twee fouten bedraagt *s* en het is deze afstand die in de normen wordt gebruikt om te beslissen of er interactie optreedt of niet. De vlakke plaat heeft, zoals op *figuur 10* te zien, een dikte *t* en een breedte *W*.



figuur 10: Een algemeen beeld van een dwarse doorsnede van een vlakke plaat waarin zich twee oppervlaktefouten bevinden

Een eerste foutinteractiecriterium dat vaak gebruikt wordt, is voorgeschreven in de API RP 579-norm [6], een American Petroleum Institute norm. De volledige norm is specifiek voor pijpleidingen ontwikkeld. Volgens deze norm treedt er interactie op tussen twee gealigneerde oppervlaktefouten als de afstand tussen de twee fouten kleiner is of gelijk aan de halve som van de lengtes van de twee fouten. Of in formulevorm, interactie als:

$$s \le \frac{l_1 + l_2}{2}$$

De API RP 579-norm houdt dus enkel rekening met de lengte van de fouten en niet met de diepte ervan om te bepalen of er interactie optreedt of niet.

Een tweede – vaak gebruikt – criterium is te vinden in de British Standard, meerbepaald in de BS 7910 [7]. De procedure bestaat uit twee regels. De toepassing van de ene of de andere regel is afhankelijk van de diepte/lengte verhouding van de twee fouten. Als één van de twee

gealigneerde oppervlaktefouten '*diep*' is, treedt er volgens de BS 7910 interactie op tussen de twee fouten als de afstand tussen de fouten kleiner is of gelijk aan de lengte van de kortste fout. Als de twee gealigneerde oppervlaktefouten '*ondiep*' zijn, treedt er pas interactie op als de fouten elkaar raken. Of in formulevorm (rekening houdend met het feit dat l_1 kleiner is dan l_2), interactie als:

$$s \le l_1 \quad voor \quad \frac{2 \cdot d_1}{l_1} > 1 \quad of \quad \frac{2 \cdot d_2}{l_2} > 1$$
$$s = 0 \quad voor \quad \frac{2 \cdot d_1}{l_1} < 1 \quad en \quad \frac{2 \cdot d_2}{l_2} < 1$$

De British Standard houdt, zoals uit bovenstaande formules blijkt, ook enkel rekening met de lengte van de fouten om te bepalen of er interactie is of niet. Wel wordt er een onderscheid gemaakt tussen diepe en ondiepe fouten.

Een derde foutinteractiecriterium ten slotte is voorgeschreven in de ASME-norm (American Society Of Mechanical Engineers) [8]. Het is een speciaal voor drukvaten ontwikkeld criterium. Volgens deze norm treedt er interactie op tussen twee gealigneerde oppervlaktefouten als de afstand tussen de fouten kleiner is of gelijk aan de halve diepte van de diepste fout. Of in formulevorm (rekening houdend met het feit dat d_1 kleiner is dan d_2), interactie als:

$$s \le \frac{d_2}{2}$$

Dit foutinteractiecriterium houdt enkel rekening met de diepte van de fouten en is onafhankelijk van de lengte van de fouten.

Nu de drie meest toegepaste en genormeerde foutinteractiecriteria besproken zijn, is het interessant om ze met elkaar te vergelijken. Dit is gebeurd in *figuur 11* en *figuur 12*.

In *figuur 11* is de afstand tussen de twee fouten *s* uitgezet in functie van l_1 in de veronderstelling dat d_1 6 mm, d_2 9 mm en l_2 25 mm is. Als we ons bevinden in het gebied onder een curve, betekent dit dat volgens het criterium (dat met deze curve overeenkomt) de

twee fouten interactie vertonen. Er is duidelijk te zien dat er volgens de API RP 579-norm interactie optreedt tot vrij hoge *s*-waarden. Volgens de twee andere normen (BS 7910 en ASME) is er enkel interactie bij lage *s*-waarden.



figuur 11: Vergelijking van de 3 meest toegepaste foutinteractiecriteria: *s* uitgezet in functie van l_1 ($d_1 = 6 \text{ mm}, d_2 = 9 \text{ mm}, l_2 = 25 \text{ mm}$)



figuur 12: Vergelijking van de 3 meest toegepaste foutinteractiecriteria: s uitgezet in functie van d_2 $(d_1 = 6 \text{ mm}, l_1 = 50 \text{ mm}, l_2 = 25 \text{ mm})$

In *figuur 12* is de afstand tussen de twee fouten *s* uitgezet in functie van d_2 in de veronderstelling dat d_1 6 mm, l_1 50 mm en l_2 25 mm is. De oppervlakte onder een curve stelt terug het gebied voor waar interactie tussen de twee fouten optreedt. Volgens de ASME-norm

treedt er terug enkel interactie op bij lage *s*-waarden. De grootste *s*-waarden waarbij nog interactie optreedt vinden we opnieuw bij de API RP 579-norm. Ook de BS 7910 voorspelt interactie bij hoge *s*-waarden, maar wel enkel als we te maken hebben met zeer diepe fouten.

Hoe komt het nu dat er zulke grote verschillen zijn tussen de verschillende criteria? Eén van de belangrijkste redenen is het feit dat de drie criteria voor verschillende doeleinden zijn ontwikkeld. Zoals vroeger al vermeld is het criterium, dat voorgeschreven is in de ASMEnorm, speciaal ontwikkeld voor drukvaten. Diepe fouten worden bij drukvaten als zeer kritisch beschouwd; men moet te allen tijde vermijden dat lekken zouden optreden. Vandaar dat het foutinteractiecriterium enkel rekening houdt met de diepte van de fouten. Het criterium dat opgenomen is in de API RP 579-norm is dan weer ontwikkeld voor pijpleidingen. Hier is het uitgangspunt voornamelijk dat men het ontstaan van lange fouten wil vermijden die zich bij breuk verder snel zouden kunnen voortplanten en tot een globale breuk van de constructie zouden leiden. Vandaar dat dit criterium enkel rekening houdt met de lengte van de fouten. Het criterium, voorgeschreven in de BS 7910 (vanaf versie 2000), is een algemeen criterium en probeert met zowel de lengte als de diepte van de fouten rekening te houden.

De ontwikkeling van de drie criteria is gebeurd op basis van toegelaten spanningsintensiteitsfactoren (K_I) rond de fout. Doordat twee '*dicht*' bij elkaar gelegen fouten elkaar beïnvloeden, neemt K_I rond de fouten namelijk toe. De verschillende normen zijn het niet eens over hoeveel K_I mag toenemen om de fouten nog als twee afzonderlijke fouten te kunnen zien en laten een stijging tussen 5 en 20 % toe [9].

Tot slot nog dit. We hebben al terloops vermeld dat de criteria een aantal tekortkomingen hebben, zoals het rekening houden met enkel de diepte of enkel de lengte van de fouten. Een aantal andere '*mogelijke*' beperkingen van de criteria zijn de volgende:

- er wordt geen rekening gehouden met de *l/W*-verhouding
- er wordt geen rekening gehouden met de *d/t*-verhouding
- de materiaaleigenschappen worden niet in rekening gebracht
- de spanningstoestand wordt niet in rekening gebracht

Ook dient nog opgemerkt te worden dat in de normen foutinteractiecriteria te vinden zijn voor andere configuraties, zoals ingebedde fouten (APPENDIX A).

3.3 Interactiecriteria toegepast op experimentele resultaten

We passen nu de drie – net besproken – foutinteractiecriteria toe op een aantal gekromde platen met twee oppervlaktefouten⁴. De enige gegevens die we hiervoor nodig hebben, zijn de lengte en de diepte van de fouten en de afstand tussen de fouten.

In *tabel 1* is een overzicht weergegeven van gekromde platen met twee oppervlaktefouten die voor de drie criteria hetzelfde resultaat geven. Voor de fouten bij de experimenten 1 t.e.m. 4 wordt interactie voorspeld, wat logisch is omdat de afstand tussen de fouten 0 mm is. De fouten bij de experimenten 5 t.e.m. 14 vertonen dan weer – volgens de drie criteria – geen interactie. Dit kan verklaard worden door het feit dat de afstand tussen de fouten '*voldoende*' groot is, waardoor wederzijdse beïnvloeding (of interactie) zoniet onbestaande dan toch heel beperkt is. De afstand tussen de fouten *s* is namelijk telkens groter dan de lengte van één van de fouten.

nr.	l ₁ [mm]	d ₁ [mm]	s [mm]	l ₂ [mm]	d ₂ [mm]	API RP 579	BS 7910	ASME
1	124,0	7,7	0,0	124,0	7,7	INTERACTION	INTERACTION	INTERACTION
2	124,0	7,7	0,0	124,0	7,7	INTERACTION	INTERACTION	INTERACTION
3	120,0	6,0	0,0	120,0	4,5	INTERACTION	INTERACTION	INTERACTION
4	100,0	6,0	0,0	150,0	3,0	INTERACTION	INTERACTION	INTERACTION
5	42,8	6,6	56,6	44,1	5,5	NO INTERACTION	NO INTERACTION	NO INTERACTION
6	49,1	6,8	70,0	49,0	5,6	NO INTERACTION	NO INTERACTION	NO INTERACTION
7	49,4	4,6	54,5	47,0	4,5	NO INTERACTION	NO INTERACTION	NO INTERACTION
8	48,1	8,5	65,7	45,7	7,2	NO INTERACTION	NO INTERACTION	NO INTERACTION
9	50,4	6,5	53,2	52,3	6,0	NO INTERACTION	NO INTERACTION	NO INTERACTION
10	52,5	7,1	66,5	50,0	7,3	NO INTERACTION	NO INTERACTION	NO INTERACTION
11	53,7	9,6	66,5	49,2	6,0	NO INTERACTION	NO INTERACTION	NO INTERACTION
12	45,7	7,3	46,5	44,0	6,1	NO INTERACTION	NO INTERACTION	NO INTERACTION
13	39,5	4,8	57,9	38,6	4,3	NO INTERACTION	NO INTERACTION	NO INTERACTION
14	43.8	7.7	54.4	44.0	6.3	NO INTERACTION	NO INTERACTION	NO INTERACTION

tabel 1: Een overzicht van gekromde platen met 2 oppervlaktefouten die voor de 3 criteria hetzelfde resultaat geven

Dit waren een aantal voorbeelden van experimenten met twee oppervlaktefouten waar de drie criteria hetzelfde resultaat geven. Toch zijn dit eerder uitzonderingen, want in de meeste gevallen geven de criteria niet hetzelfde resultaat. Dit is te zien in *tabel 2*. In deze tabel zijn een aantal voorbeelden opgenomen; dit is maar een fractie van het bestudeerde aantal gevallen, waar de criteria elkaar tegenspreken. Hieruit blijkt dat het criterium dat te vinden is

⁴ Omwille van confidentialiteit kunnen niet alle gegevens van de experimenten in dit werk vrijgegeven worden.

in de API RP 579-norm, altijd interactie voorspelt, terwijl de criteria die voorgeschreven zijn in de BS 7910 en de ASME-norm juist geen interactie voorspellen. Welk criterium heeft het nu bij het rechte eind en welk niet?

Als we *tabel 2* van naderbij bekijken, zien we dat de drie foutinteractiecriteria problemen vertonen. Ondanks de grote afstand tussen de fouten bij experimenten 7 en 10 is er volgens het criterium, voorgeschreven in de API RP 579-norm, toch interactie. Dit betekent dus dat de twee fouten als één grote fout moeten beschouwd worden. Dit lijkt intuïtief gezien niet logisch, want indien de afstand tussen de fouten iets (enkele mm) groter zou zijn, zou er geen interactie optreden volgens dit criterium.

De criteria opgenomen in de BS 7910 en de ASME-norm geven dan weer aan dat er geen interactie optreedt, hoewel de afstand tussen de fouten kleiner is dan 10 mm bij de experimenten 3, 4, 5, 14 en 18. Ook dit lijkt intuïtief gezien niet logisch. Het criterium opgenomen in de BS 7910 voorspelt namelijk pas interactie bij *s* gelijk aan 0 mm en het criterium voorgeschreven in de ASME-norm houdt geen rekening met de lengte van de fouten.

Er blijkt dus een probleem te zijn met de drie foutinteractiecriteria te wijten aan de eenvoud van de regels (zie beperkingen van de criteria). Vandaar ook de noodzaak om nieuwe criteria op te stellen.

nr.	l ₁ [mm]	d1 [mm]	s [mm]	l ₂ [mm]	d ₂ [mm]	API RP 579	BS 7910	ASME
1	60,0	6,3	30,0	50,0	5,2	INTERACTION	NO INTERACTION	NO INTERACTION
2	39,5	3,4	11,0	37,5	3,4	INTERACTION	NO INTERACTION	NO INTERACTION
3	47,3	7,0	3,8	45,5	7,0	INTERACTION	NO INTERACTION	NO INTERACTION
4	100,2	7,6	9,0	101,2	7,1	INTERACTION	NO INTERACTION	NO INTERACTION
5	30,1	5,8	9,8	24,8	3,4	INTERACTION	NO INTERACTION	NO INTERACTION
6	48,5	6,8	30,0	28,3	4,0	INTERACTION	NO INTERACTION	NO INTERACTION
7	51,2	6,4	49,7	51,2	5,0	INTERACTION	NO INTERACTION	NO INTERACTION
8	52,1	8,4	24,9	50,9	7,3	INTERACTION	NO INTERACTION	NO INTERACTION
9	51,8	7,6	30,4	50,0	5,0	INTERACTION	NO INTERACTION	NO INTERACTION
10	53,9	6,7	50,6	48,6	5,7	INTERACTION	NO INTERACTION	NO INTERACTION
11	48,8	8,2	26,5	50,0	7,0	INTERACTION	NO INTERACTION	NO INTERACTION
12	56,2	6,0	44,5	51,2	5,6	INTERACTION	NO INTERACTION	NO INTERACTION
13	61,5	9,3	27,0	58,0	7,9	INTERACTION	NO INTERACTION	NO INTERACTION
14	50,8	7,6	8,7	50,8	7,5	INTERACTION	NO INTERACTION	NO INTERACTION
15	73,0	5,6	30,0	72,8	5,6	INTERACTION	NO INTERACTION	NO INTERACTION
16	120,0	6,0	25,0	120,0	6,0	INTERACTION	NO INTERACTION	NO INTERACTION
17	38,6	4,0	30,6	38,9	3,7	INTERACTION	NO INTERACTION	NO INTERACTION
18	43,5	7,1	6,8	41,2	5,9	INTERACTION	NO INTERACTION	NO INTERACTION

tabel 2: Een overzicht van gekromde platen met 2 oppervlaktefouten die voor de 3 criteria niet hetzelfde resultaat geven

Bovendien dient nog opgemerkt te worden dat bij alle vermelde experimenten in *tabel 1* en *tabel 2* de platen plastisch vervormd zijn (het breukgedrag is dus taai). De vermelde criteria daarentegen zijn ontwikkeld op basis van de elastische breukmechanica, waardoor we bros breukgedrag vooropstellen.

4 Failure Assessment Diagram (FAD)

Het al dan niet aanvaarden van fouten in lasnaden van pijpleidingen kan op een aantal manieren gebeuren. Zogenaamde '*workmanship*' criteria, waarbij de som van de foutlengtes kleiner moet zijn dan een bepaalde waarde (de waarde is afhankelijk van het type fouten dat bestudeerd wordt) kunnen gebruikt worden. De foutlengtes worden dus **opgemeten** om te kijken of de fouten aanvaardbaar zijn of niet. Er kan ook een beroep gedaan worden op de ECA (*Engineering Critical Assessment*) criteria; criteria die deel uitmaken van de zogenaamde '*Fitness for Purpose*'-procedure welke toelaat aanwezige fouten te evalueren. Hier wordt gebruik gemaakt van de breukmechanica om te **berekenen** of de fouten al dan niet toelaatbaar zijn.

Een veelgebruikte methodologie, o.a. opgenomen in de wijdverspreide Britse norm BS 7910 en ook in FITNET, is gebaseerd op het gebruik van een zogenaamd Failure Assessment Diagram (FAD).

De mogelijke objectieven om gebruik te maken van een FAD zijn:

- het vinden van de fouttolerantie van een structuur
- kijken of een gekende fout toelaatbaar is
- de levensduur van een structuur bepalen
- de faaloorzaak bepalen

Zulk een analyse van een component die één of meerdere fouten bevat, is gebaseerd op:

- de breukweerstand van het materiaal (sterkte en taaiheid)
- de geometrie van de component en de fout(en)
- de aangelegde belastingstoestand (met inbegrip van residuele spanningen)

4.1 Algemeen

De FAD-methode is gebaseerd op het feit dat falen vermeden wordt zolang de component niet boven zijn maximale capaciteit (in termen van sterkte en/of taaiheid) belast wordt. De (elastische) breukmechanica en de plastische limiet analyse kunnen die maximale capaciteit bepalen. Bij de breukmechanische analyse wordt de belastingstoestand aan de scheurtip vergeleken met de breuktaaiheid van het materiaal. De spanningsintensiteitsfactor (K_I) aan de scheurtip wordt geëvalueerd op basis van elastische concepten en is afhankelijk van de geometrie van de component, de grootte en vorm van de fout(en) en de belasting.

In de FAD-methode wordt dus enerzijds de belastingstoestand aan de scheurtip met de breuktaaiheid van het materiaal vergeleken (uitgezet op de Y-as), anderzijds wordt de aangelegde belasting met de plastische belastingslimiet vergeleken (uitgezet op de X-as). Deze plastische belastingslimiet (of *limit load*) wordt berekend door als uitgangspunt te nemen dat de dwarsdoorsnede (waarin de fout zich bevindt) volledig of gedeeltelijk vloeit. De spanning is er gelijk aan een referentiespanning die kan variëren van de vloeispanning tot de treksterkte van het materiaal. Hoewel de FAD-methode gebaseerd is op elastisch-plastische concepten, is de toepassing ervan veelal vereenvoudigd door enkel gebruik te maken van volmaakt plastisch materiaalgedrag (plastische belastingslimiet op basis van de vloeispanning zonder versteviging in rekening te brengen).

In *figuur 13* is een voorbeeld van een Failure Assessment Diagram afgebeeld. Langs de X-as is een factor uitgezet die de aangelegde belasting met de plastische belastingslimiet vergelijkt, langs de Y-as vinden we een factor die de belastingstoestand aan de scheurtip vergelijkt met de breuktaaiheid van het materiaal. Het FAD is door middel van een curve (B) in twee delen opgesplitst. Gebied A stelt de veilige zone voor, wat betekent dat de fouten aanvaardbaar zijn, gebied C is de onveilige zone.



figuur 13: Een voorbeeld van een Failure Assessment Diagram (FAD) [10]

De invoergegevens voor het Failure Assessment Diagram worden beperkt door tal van factoren die waarborgen dat de analyse conservatief is. Dit betekent dat de FAD-methode

faalbelastingen voor gegeven foutgroottes en kritische foutgroottes voor gegeven toegepaste belastingscondities onderschat.

4.2 FAD toegepast op plaatgeometrieën

Het 'veilig' gebied van het Failure Assessment Diagram wordt afgebakend door de '*Failure* Assessment Line' (figuur 13). De vorm en de positie van die lijn wordt ofwel volledig bepaald door de materiaaleigenschappen ofwel door de materiaaleigenschappen en de geometrie van de fout(en) in de lasnaad. Dit hangt af van de keuze van analyse optie en wordt verderop in dit hoofdstuk besproken. De '*Failure Assessment Line*' wordt in algemene termen uitgedrukt als een vergelijking van K_r als functie van L_r .

$$K_r = f(L_r)$$

Voor het analyseren van een '*defecte*' structuur worden vervolgens de waarden K_r en L_r (afhankelijk van aangelegde belasting, materiaaleigenschappen en geometrie) uitgezet volgens respectievelijk de Y- en de X-as. Hun ligging ten opzichte van de '*Failure Assessment Line*' bepaalt de toelaatbaarheid van een fout.

 K_r is een maat voor de '*nabijheid*' van brosse breuk (elastisch falen) en is de verhouding van K_I en K_{mat} .

$$K_r = \frac{K_I}{K_{mat}}$$

 K_I is de lineair elastische spanningsintensiteitsfactor en wordt bepaald door de geometrie van de plaat en de fout(en) en de grootte van de aangelegde spanning. K_{mat} karakteriseert dan weer de breuktaaiheid van het materiaal.
L_r is een maat voor de '*nabijheid*' tot plastisch bezwijken en is de verhouding van de aangelegde spanning σ en een referentiespanning σ_{ref} (deze kan bvb. gelijk genomen worden aan de vloeispanning).

$$L_r = \frac{\sigma}{\sigma_{ref}}$$

De limiet voor plastisch bezwijken van de structuur wordt bereikt als:

$$L_r = L_r^{\max}$$

In *figuur 14* is een voorbeeld van een werkelijk Failure Assessment Diagram te zien. In het vervolg van dit hoofdstuk worden de resultaten van een uitgevoerde trekproef uitgezet als punten in het diagram. De berekening van deze punten wordt verderop in dit hoofdstuk besproken. Een punt dat tussen de K_r -as, de L_r -as en de '*Failure Assessment Line*' ligt, betekent dat de fouten in de lasnaad toelaatbaar zijn. Als een punt zich buiten de '*Failure Assessment Line*' bevindt, zijn de fouten (theoretisch) niet aanvaardbaar.



figuur 14: Werkelijk Failure Assessment Diagram (FAD)

4.3 De verschillende analyse opties volgens de FITNET procedure

Om een FAD te bekomen, zijn in de FITNET procedure een aantal analyse opties mogelijk. De kwaliteit en de gedetailleerdheid van de beschikbare data bepalen de keuze voor één van deze opties. Hoe hoger de analyse optie, des te hoger zal de kwaliteit van de data moeten zijn en ook des te hoger zal de complexiteit van de analyse routines zijn. Omgekeerd geldt natuurlijk ook dat hoe lager de analyse optie is, hoe conservatiever het resultaat zal zijn. Maar de laagste analyse optie die een aanvaardbaar resultaat geeft, impliceert bevredigende resultaten voor hogere analyse opties.

De standaard analyse optie, optie 1, is de optie die minimaal wordt aanbevolen. De vereiste invoergegevens zijn hier beperkt tot de vloeispanning en de treksterkte van het basismateriaal en een waarde voor de breuktaaiheid K_{mat} . Voor situaties waar deze data niet voorhanden is, is er een basis analyse optie, optie 0. Deze optie is enkel op de vloeispanning van het basismateriaal en de breuktaaiheid gebaseerd. Optie 0 zal in dit afstudeerwerk niet verder behandeld worden.

Bij gelaste constructies waar het verschil in vloeispanning tussen las- en basismateriaal kleiner is dan 10 % (*'mismatch ratio'* < 10 %), kan de standaard procedure, dus optie 1, gebruikt worden. Voor hogere waarden van deze *'mismatch ratio'* kan beter beroep gedaan worden op optie 2, de zogenaamde *'mismatch'* optie. Op die manier wordt het conservatisme gereduceerd. Deze methode vereist wel de kennis van de vloeispanning en de treksterkte van zowel het basis- als het lasmateriaal.

De vergelijkingen die gebruikt worden om $f(L_r)$ te genereren voor optie 1 en 2 zijn gebaseerd op conservatieve schattingen van de effecten van de trekeigenschappen van materialen voor situaties waar de volledige spanning-rek curve niet gekend is, wat hier het geval is. Als de volledige spanning-rek curve wel gekend zou zijn, kan gebruik gemaakt worden van een speciaal daarvoor ontwikkelde analyse optie die ook opgenomen is in de FITNET procedure.

4.4 Optie 1: de standaard analyse optie

4.4.1 Invoergegevens

Voor optie 1 is maar een beperkte invoer van data nodig. De gekromde plaat wordt in deze optie namelijk aanzien als een homogene plaat gemaakt uit basismateriaal. De materiaaleigenschappen van het lasmateriaal worden dus niet in rekening gebracht.

De invoer bestaat uit vier zaken:

- de gemiddelde waarde van de vloeispanning van het basismateriaal (YS)
- de gemiddelde waarde van de treksterkte van het basismateriaal (UTS)
- de elasticiteitsmodulus van het basismateriaal (E)
- de breuktaaiheid van het basismateriaal (deze moet gebaseerd zijn op data afkomstig van minstens drie testen)

4.4.2 Procedure voor het bepalen van de 'Failure Assessment Line'

4.4.2.1 Omrekening van YS en UTS

De trekeigenschappen van het basismateriaal (*YS* en *UTS*) zijn gekend op kamertemperatuur (T_{room}) en moeten dus omgerekend worden naar de temperatuur waarbij de proef is uitgevoerd (T_{test}). De benodigde omrekeningsformules voor *YS* en *UTS* zijn hieronder weergegeven [10]:

$$YS(T_{test}) = YS(T_{room}) + \frac{10^{5}}{491 + 1.8 \cdot T_{test}} - 189$$
$$UTS(T_{test}) = UTS(T_{room}) + \frac{10^{5}}{491 + 1.8 \cdot T_{test}} - 189$$

YS en *UTS* zijn hierbij uitgedrukt in MPa, T_{test} en T_{room} in °C.

4.4.2.2 Bepaling van $f(L_r)$

De functie $f(L_r)$ wordt berekend op basis van de gemiddelde waarden van *YS*, *UTS* en de breuktaaiheid. Bovendien moet er bij de berekening een onderscheid gemaakt worden tussen materialen met of zonder Lüders plateau. De twee procedures zijn terug te vinden in APPENDIX B.

Als de functie $f(L_r)$ volledig gekend is, kan de '*Failure Assessment Line*' in het Failure Assessment Diagram getekend worden. De positie en vorm van deze lijn wordt dus enkel door de eigenschappen van het basismateriaal bepaald.

4.4.3 Analyseren van de experimentele data

De analyse verloopt volgens het volgende schema:

- plotten van de 'Failure Assessment Line' in het Failure Assessment Diagram
- berekening van K_r voor een plaat met gegeven belasting en fouten
- berekening van L_r voor een plaat met gegeven belasting en fouten
- plotten van het beoordelingspunt (L_r, K_r) in het Failure Assessment Diagram
- positie van het beoordelingspunt bekijken

Zoals vroeger al vermeld, geldt dat als het beoordelingspunt buiten de '*Failure Assessment Line*' ligt, de fouten ontoelaatbaar zijn voor de gegeven belasting. Ligt het beoordelingspunt binnen de '*Failure Assessment Line*' dan zijn de fouten wel toelaatbaar voor de gegeven belasting.

4.4.3.1 Berekening van K_r voor een plaat met gegeven belasting en fouten

Om K_r te kunnen berekenen, moeten we de lineair elastische spanningsintensiteitsfactor (K_I) van de plaat met gegeven fout(en) in de lasnaad, en de breuktaaiheid (K_{mat}) van het basismateriaal kennen. K_r is namelijk de verhouding van K_I en K_{mat} .

De breuktaaiheid van een materiaal is de weerstand van dat materiaal, waarin een fout zit, tegen verder doorscheuren van de fout. Indien de breuktaaiheid K_{mat} niet rechtstreeks is bepaald, kan deze op de volgende twee manieren berekend worden:

- uit de CVN-waarde⁵ (Charpy V-Notch) van het (basis)materiaal
- uit de CTOD-waarde⁶ (Crack Tip Opening Displacement) van het (basis)materiaal

De twee verschillende berekeningsmethodes vindt u hieronder terug [11].

Berekening van K_{mat} uit de CVN-waarde:

$$K_{mat} = \sqrt{0.64 \cdot CVN \cdot E}$$
 in $kPa \cdot \sqrt{m}$

Hierbij is E in kPa en CVN in J uitgedrukt.

⁵ Voor meer informatie over *CVN* wordt verwezen naar de gespecialiseerde literatuur

⁶ Voor meer informatie over *CTOD* wordt verwezen naar de gespecialiseerde literatuur

Berekening van K_{mat} uit de CTOD-waarde:

$$K_{mat} = \sqrt{1, 4 \cdot E \cdot \frac{YS + UTS}{2} \cdot CTOD}$$
 in $MPa \cdot \sqrt{mm}$

Hierbij zijn E, YS en UTS in MPa en is CTOD in mm uitgedrukt.

De waarde voor de breuktaaiheid wordt best verkregen uit een groot aantal testresultaten (minstens drie). De *CVN*- en de *CTOD*-waarde vertonen in de praktijk namelijk heel wat spreiding. De spreiding is het grootst voor de *CVN*-waarde. In dit werk zullen we K_{mat} berekenen op basis van de gemiddelde *CVN*- en *CTOD*-waarde (FITNET procedure).

In *tabel 3* is K_{mat} berekend op basis van de gemiddelde *CVN*- en *CTOD*-waarde, waarbij gebruik gemaakt wordt van de gegevens van een grootschalige trekproef uitgevoerd in het Laboratorium Soete. K_{mat} op basis van de gemiddelde *CVN*-waarde blijkt heel wat kleiner te zijn dan K_{mat} op basis van de gemiddelde *CTOD*-waarde.

E(MPa)	210000
YS (MPa)	471
UTS (MPa)	564
CVN(J)	48
CTOD (mm)	0,280
K_{mat} op basis van $CVN (MPa \cdot \sqrt{m})$	80,3
K_{mat} op basis van $CTOD (MPa \cdot \sqrt{m})$	206,4

tabel 3: Vergelijking van K_{mat} op basis van de gemiddelde CVN- en CTOD-waarde

Aangezien bijna alle in het Laboratorium Soete beproefde platen plastisch bezwijken (waaronder ook de plaat waarvan de gegevens in *tabel 3* vermeld zijn), betekent dit dat de breuktaaiheid van het basismateriaal vrij groot moet zijn. Bovendien blijkt uit proeven (uitgevoerd in andere laboratoria [12]) op gelijkaardige materialen dat de breuktaaiheid altijd hoger is dan 200 $MPa \cdot \sqrt{m}$. K_{mat} berekend op basis van de gemiddelde *CVN*-waarde lijkt dan ook zeer onrealistisch te zijn.

We kunnen dus besluiten dat de breuktaaiheid berekend op basis van de *CTOD*-waarde het best met de werkelijkheid overeenkomt. Deze waarde van de breuktaaiheid zal dan ook verder gebruikt worden.

Nu K_{mat} gekend is, moeten we enkel nog de lineair elastische spanningsintensiteitsfactor K_I berekenen, om K_r te bekomen. In de literatuur zijn heel wat berekeningsmethodes te vinden voor plaatgeometrieën. Twee vaak gebruikte methodes worden hieronder besproken.

1^{ste} methode: Newman en Raju

Newman en Raju [13] hebben een formule voor K_I ontwikkeld waarbij een fout door een halve ellips wordt benaderd. Als er geen interactie is tussen twee fouten, moet volgens de normen de spanningsintensiteitsfactor voor de grootste fout berekend worden (waarbij die fout door een halve ellips is voorgesteld). Aangezien er in de normen geen definitie voor de grootste fout wordt gegeven, voer ik hier zelf een mogelijke definitie in: *de grootste fout is de fout met de grootste oppervlakte*. De kleinste fout wordt dan gewoon verwaarloosd. Deze situatie is voorgesteld in *figuur 15*.



figuur 15: Newman en Raju: enkel de grootste fout (benaderd door een halve ellips) wordt in rekening gebracht als er geen interactie is tussen de twee fouten

Als er tussen twee fouten wel interactie optreedt, moeten de twee fouten als één grote fout aanzien worden. Die ene grote fout wordt dan terug door een halve ellips gekarakteriseerd. Deze situatie is verduidelijkt in *figuur 16*.



figuur 16: Newman en Raju: interactie van twee fouten

De lengte respectievelijk de diepte van de fout is dan (figuur 16):

$$l = l_1 + l_2 + s$$

 $d = \max(d_1; d_2) = d_1$

Aangezien tijdens een grootschalige trekproef de plaat enkel op trek wordt belast, moet in de berekeningen enkel rekening gehouden worden met de maximaal aangelegde trekspanning σ_m . De residuele spanningen die ontstaan door het aan elkaar lassen van de pijpen worden in wat volgt niet in rekening gebracht.

De formule voor K_I die Newman en Raju ontwikkelden luidt als volgt:

$$K_I = \sigma_m \cdot \sqrt{\pi \cdot d} \cdot F_0$$
 in $MPa \cdot \sqrt{mm}$

Hierbij wordt de maximaal aangelegde trekspanning σ_m in MPa en de foutdiepte *d* in mm uitgedrukt. F_0 is dimensieloos en wordt gedefinieerd als:

$$F_{0} = \frac{M_{1} \cdot f_{\varphi} \cdot g}{\sqrt{1 + 1.464 \cdot \beta^{1.65}}}$$

Hierin zijn:

$$M_{1} = 1,13 - 0,1 \cdot \sqrt{\beta \cdot \beta^{*}}$$
$$\beta = \frac{2 \cdot d}{l}$$
$$\beta^{*} = \tanh^{0,02} \beta^{50}$$
$$f_{\varphi} = (\beta^{2} \cdot \cos^{2} \varphi + \sin^{2} \varphi)^{\frac{1}{4}}$$
$$g = 1 + 0,1 \cdot (1 - \sin \varphi)^{2}$$

Dit zijn vijf dimensieloze parameters, waarbij dient opgemerkt te worden dat φ (in *figuur 15* en *figuur 16* zijn drie waarden voor φ aangeduid: 0°, 90° en 180°) in radialen is uitgedrukt.

De formule voor K_I is niet onbeperkt geldig. Men bekomt realistische resultaten tot:

$$\beta = \frac{2 \cdot d}{l} \cong 2,5$$

In dit afstudeerwerk zal β wel beperkt blijven tot 0,75 aangezien bij de uitgevoerde experimenten β geen hogere waarden aanneemt.



grafiek 1: Het maximum voor K_I (met $\beta \le 0.75$) wordt bereikt voor $\varphi = 90^\circ$ (dus in het midden van de fout)

De spanningsintensiteitsfactor K_I varieert langsheen de foutrand. Deze variatie wordt gekarakteriseerd door de factor φ . Uit *grafiek 1* blijkt dat het maximum voor K_I (met $\beta \le 0.75$) bereikt wordt als $\varphi = 90^\circ$, dit is in het midden van de fout (het diepste punt van de benaderende ellips).

In grafiek 2 is K_I uitgezet in functie van β voor verschillende waarden van d (diepte van de fout). De stijging van K_I voor een toenemende d was te verwachten. Verder toont de grafiek aan dat K_I daalt als β stijgt (voor een bepaalde foutdiepte d). Ook deze trend is logisch, want een toenemende β betekent een dalende foutlengte en dus een dalende K_I .



grafiek 2: K_I in functie van β voor verschillende foutdieptes d

In deze grafiek zijn de maximale K_I -waarden uitgezet ($\varphi = 90^\circ$). De cijferwaarden in *grafiek 2* werden bekomen door voor de maximaal aangelegde trekspanning σ_m 426 MPa te nemen.

Ten slotte dient nog opgemerkt te worden dat de methode van Newman en Raju geen rekening houdt met de dikte en de breedte van de plaat, wat als een nadeel kan beschouwd worden.

2^{de} methode: R. Sethuraman

De methode die R. Sethuraman [14] ontwikkeld heeft voor K_I is totaal verschillend van de methode van Newman en Raju. Het belangrijkste verschil is dat de methode van Sethuraman

ontwikkeld is voor twee identieke fouten, terwijl de methode van Newman en Raju ontwikkeld was voor één fout.

Sethuraman maakt in zijn methode gebruik van een interactiefactor γ , die hij bekomen heeft op basis van eindige-elementen simulaties. Deze interactiefactor geeft weer in hoeverre twee even grote fouten met elkaar interageren, waarbij de fouten als halve ellipsen worden gemodelleerd (zie *figuur 17*).



figuur 17: R. Sethuraman: twee identieke fouten gemodelleerd als halve ellipsen

De empirische formule voor de interactiefactor γ luidt als volgt:

$$\gamma = C_1 + C_2 \cdot \left(\frac{t}{d}\right)^{C_3} \cdot \left(\frac{2 \cdot d}{l}\right)^{C_4} \cdot \left(\frac{l}{s+l}\right)^{C_5} \cdot \left(\frac{2 \cdot \varphi}{\pi}\right)^{C_6}$$

De constanten C_1 , C_2 , C_3 , C_4 , C_5 en C_6 hebben de volgende waarden:

$$C_{1} = 1,009163$$

$$C_{2} = 0,211629$$

$$C_{3} = -0,813784$$

$$C_{4} = 0,102877$$

$$C_{5} = 3,647398$$

$$C_{6} = -0,464392$$

Deze formule voor γ is geldig voor:

$$1,25 \le \frac{t}{d} \le 4$$
$$0,3 \le \frac{2 \cdot d}{l} \le 1,2$$
$$0,33 \le \frac{l}{s+l} \le 0,9$$
$$0 < \frac{2 \cdot \varphi}{\pi} \le 2$$

De factor 2d/l zullen we, zoals bij de methode van Newman en Raju, terug beperken tot 0,75.

In grafiek 3 is de interactiefactor γ uitgezet in functie van $2\varphi/\pi$ voor verschillende waarden van *t/d*. Er is bovendien verondersteld dat 2d/l = 0,75 en l/(s+l) = 0,9 (dit is de slechtst mogelijke situatie). Uit deze grafiek blijkt dat bij een grotere *t/d*, dus bij een ondiepere fout (als we *t* constant nemen), de interactiefactor afneemt. Bovendien toont de grafiek aan dat γ stijgt bij een dalende φ . Dit was ook te verwachten want dat betekent dat de interactiefactor groter wordt naarmate men dichter bij de ruimte tussen de twee fouten komt. Het maximum voor γ zou dus bereikt worden voor $\varphi = 0^\circ$. In de berekeningen zullen we voor $\varphi = 0^\circ$.



grafiek 3: γ in functie van $2\varphi/\pi$ voor verschillende t/d-waarden (2d/l = 0,75 en l/(s+l) = 0,9)

Als de interactiefactor gekend is, moet natuurlijk K_I nog bepaald worden. De interactiefactor γ kan nu gedefinieerd worden als:

$$\gamma = \frac{K_{I,2 \text{ fouten}}}{K_{I,1 \text{ fout}}}$$

Daaruit volgt dat:

$$K_{I,2 fouten} = \gamma \cdot K_{I,1 fout}$$

In deze formule stelt $K_{I,2fouten}$ de spannningsintensiteitsfactor voor die optreedt bij twee identieke fouten in de lasnaad. $K_{I,1fout}$ is de spanningsintensiteitsfactor die optreedt als in de lasnaad maar één van de twee fouten aanwezig is. $K_{I,1fout}$ kan dus berekend worden met de methode van Newman en Raju.

Op deze manier kunnen we dus de maximale spanningsintensiteitsfactor $K_{I,max}$ voor een lasnaad met twee identieke fouten berekenen. Er geldt namelijk dat:

$$K_{I,\max} = K_{I,2 fouten,\max}$$

Waar de maximale spanningsintensiteitsfactor optreedt, hangt af van de afmetingen van de fouten, de afstand tussen de fouten en de dikte van de plaat. Wel kunnen we voorspellen dat $K_{I,max}$ ofwel zal optreden bij $\varphi = 90^{\circ}$ (maximale K_I volgens Newman en Raju), ofwel bij $\varphi = 1^{\circ}$ (maximale interactiefactor).

Ten slotte dient nog opgemerkt te worden dat ook deze methode geen rekening houdt met de breedte van de plaat.

4.4.3.2 Berekening van L_r voor een plaat met gegeven belasting en fouten

In deze paragraaf zullen de verschillende berekeningsmethodes voor L_r eerst kort besproken en daarna ook vergeleken worden. De eerste en meest eenvoudige berekeningsmethode voor L_r maakt gebruik van de hiernavolgende formule (ook opgenomen in de FITNET procedure [10]):

$$L_r = \frac{\sigma_m}{YS}$$

 L_r is dus de verhouding van de maximaal aangelegde trekspanning σ_m en de vloeispanning *YS*. De waarde van L_r is hier onafhankelijk van de grootte van de fouten en van de afmetingen van de plaat. Dit strookt natuurlijk niet met de werkelijkheid. Deze formule zal dan ook niet toegepast worden.

4.4.3.2.2 Sattari

Sattari [15] ontwikkelde een lokale oplossing (*local solution*) voor L_r rekening houdend met plaatgeometrie. Met lokale oplossing wordt bedoeld dat plastisch falen gelijkgesteld wordt aan vloeien enkel in de buurt van de fout (het gearceerde deel in *figuur 18*). Sattari heeft namelijk een formule voor L_r opgesteld in de veronderstelling dat we te maken hebben met een oneindig grote plaat met dikte *t*. De fout wordt gemodelleerd door een ellips.

De fout die voorgesteld is in *figuur 18* is:

- ofwel de grootste van de twee aanwezige fouten in de lasnaad van de plaat (indien er geen sprake is van interactie)
- ofwel de samenvoeging van de twee aanwezige fouten als er interactie is tussen de twee



figuur 18: Sattari: lokale oplossing op basis van plaatgeometrie

De formule voor L_r luidt:

$$L_r = \frac{g(\zeta) \cdot \frac{\sigma_b}{3} + \sqrt{g^2(\zeta) \cdot \frac{\sigma_b^2}{9} + (1 - \zeta)^2 \cdot \sigma_m^2}}{(1 - \zeta)^2 \cdot YS}$$

Omdat bij een grootschalige trekproef de plaat in trek belast wordt en niet in buiging, kunnen we σ_b gelijk aan 0 stellen. De formule voor L_r wordt dan:

$$L_r = \frac{\sigma_m}{(1 - \zeta) \cdot YS} \quad met \quad \zeta = \frac{d \cdot l}{t \cdot (l + 2 \cdot t)}$$

De factor 1- ζ is uitgezet in de twee onderstaande grafieken. In *grafiek 4* is 1- ζ in functie van *d/t* weergegeven in de veronderstelling dat *t* gelijk is aan 14 mm. Er is een duidelijk lineair verband tussen 1- ζ en *d/t*, waarbij 1- ζ afneemt naarmate *d/t* stijgt. De daling is des te groter naarmate *l*, de lengte van de fout, groter wordt.



grafiek 4: 1- ζ in functie van d/t (t = 14 mm) voor verschillende foutlengtes l

In *grafiek* 5 is terug 1- ζ uitgezet in functie van *d/t*, maar nu voor *t* = 21 mm. Uit deze grafiek blijkt dat de waarden voor 1- ζ hoger zijn dan in *grafiek* 4, wat dan terug tot gevolg heeft dat *L_r* afneemt. Dit was natuurlijk te verwachten, want dat betekent dat een bepaalde fout in een

dikkere plaat minder snel aanleiding zal geven tot plastisch bezwijken dan diezelfde fout in een dunnere plaat.



grafiek 5: 1- ζ in functie van d/t (t = 21 mm) voor verschillende foutlengtes l

De formule voor L_r is geldig zolang:

$$\frac{d}{t} \le 0.8$$

4.4.3.2.3 Goodall

Goodall [16] heeft in tegenstelling tot Sattari een globale oplossing (*global solution*) op basis van plaatgeometrie ontwikkeld. Hierbij wordt verondersteld dat over de volledige dwarsdoorsnede (waarin de fout zich bevindt) de vloeispanning bereikt wordt. Goodall modelleerde de fout als een rechthoek (*figuur 19*).

De fout die voorgesteld is in *figuur 19* is (zoals bij Sattari) ofwel de grootste van de twee aanwezige fouten in de lasnaad van de plaat (als er geen interactie is) ofwel de samenvoeging van de twee aanwezige fouten (als er wel interactie is).



figuur 19: Goodall: globale oplossing op basis van plaatgeometrie

De formule voor L_r luidt als volgt:

$$L_{r} = \frac{(\sigma_{b} + 3 \cdot \xi \cdot \sigma_{m}) + \left((\sigma_{b} + 3 \cdot \xi \cdot \sigma_{m})^{2} + 9 \cdot \sigma_{m}^{2} \cdot \left((1 - \xi)^{2} + 2 \cdot \xi \cdot \left(\frac{d}{t} - \xi\right)\right)\right)^{\frac{1}{2}}}{3 \cdot \left((1 - \xi)^{2} + 2 \cdot \xi \cdot \left(\frac{d}{t} - \xi\right)\right) \cdot YS}$$

$$met$$

$$\xi = \frac{d \cdot l}{t \cdot W}$$

Aangezien de plaat enkel in trek belast wordt en niet in buiging, kan σ_b terug geschrapt worden. We vinden dan:

$$L_{r} = \frac{\left(3 \cdot \xi \cdot \sigma_{m}\right) + \left(\left(3 \cdot \xi \cdot \sigma_{m}\right)^{2} + 9 \cdot \sigma_{m}^{2} \cdot \left(\left(1 - \xi\right)^{2} + 2 \cdot \xi \cdot \left(\frac{d}{t} - \xi\right)\right)\right)^{\frac{1}{2}}}{3 \cdot \left(\left(1 - \xi\right)^{2} + 2 \cdot \xi \cdot \left(\frac{d}{t} - \xi\right)\right) \cdot YS}$$

Deze formule is geldig voor:

$$\frac{d}{t} \le 0,5$$

4.4.3.2.4 UGent

Ook binnen het Laboratorium Soete (door prof. dr. ir. R. Denys) werden een aantal eenvoudige formules ontwikkeld voor het berekenen van zogenaamde plastische bezwijkspanningen. Op basis hiervan wordt in dit werk een formule voor L_r ontwikkeld. Omwille van de overeenkomst met de overige besproken criteria, werd in dit werk geopteerd om het principe van '*Net Section Yielding*' (NSY) als uitgangspunt te nemen. Hierbij wordt verondersteld dat de volledige netto sectie (waarin zich de fout bevindt) vloeit. Het is net zoals bij Goodall dus een globale oplossing, waarbij een fout door een rechthoek benaderd wordt. De formule is ontwikkeld voor vlakke plaatgeometrieën en hierbij wordt enkel rekening gehouden met trekspanningen.



figuur 20: UGent: globale oplossing (de diepte van de fout *d* is niet aangeduid)

Door uitdrukken van het horizontaal evenwicht, kunnen we schrijven dat:

$$\sigma_{ref} \cdot W \cdot t = YS \cdot (W \cdot t - d \cdot l)$$

$$\downarrow$$

$$\sigma_{ref} = YS \cdot \left(1 - \frac{d \cdot l}{W \cdot t}\right)$$

Daaruit kan een formule voor L_r afgeleid worden:

$$L_r = \frac{\sigma_{ref}}{\left(1 - \frac{d \cdot l}{W \cdot t}\right) \cdot YS}$$

Door de fout als een rechthoek te modelleren wordt de oppervlakte van de fout te groot genomen. Daarom zou het (mogelijks) beter zijn – en dus minder conservatief – de fout als een ellips te modelleren. Dan wordt de vorige vergelijking omgezet tot:

$$\sigma_{ref} \cdot W \cdot t = YS \cdot \left(W \cdot t - \frac{\left(\pi \cdot d \cdot \frac{l}{2}\right)}{2} \right)$$

$$\downarrow$$

$$\sigma_{ref} = YS \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot d \cdot l}{4 \cdot W \cdot t}\right)$$

De formule voor L_r wordt dan:

$$L_r = \frac{\sigma_{ref}}{\left(1 - \frac{\pi \cdot d \cdot l}{4 \cdot W \cdot t}\right) \cdot YS}$$

De parameters d en l zijn respectievelijk de diepte en de lengte van:

- ofwel de grootste van de twee aanwezige fouten in de lasnaad van de plaat (als er geen interactie is)
- ofwel de samenvoeging van de twee aanwezige fouten (als er wel interactie is)

4.4.3.2.5 Kastner

Kastner [17] ontwikkelde ook een formule voor L_r . Het is terug een lokale oplossing, maar nu op basis van pijpgeometrie (en dus niet op basis van plaatgeometrie). Zijn oplossing voor L_r ziet er als volgt uit:

$$L_r = \frac{\left[\pi \cdot \left(1 - \frac{d}{t}\right) + 2 \cdot \frac{d}{t} \cdot \sin\left(\frac{l}{D}\right)\right] \cdot \sigma_m}{\left(1 - \frac{d}{t}\right) \cdot \left(\pi - \frac{d \cdot l}{t \cdot D}\right) \cdot YS}$$

In deze formule stelt *D* de buitendiameter van de pijp voor. De parameters *d* en *l* worden gedefinieerd zoals bij de UGent-methode. Bovendien dient opgemerkt te worden dat de formule niet kan toegepast worden voor doorgaande fouten (d = t).

4.4.3.2.6 Vergelijking van de verschillende berekeningsmethodes voor L_r

In deze paragraaf worden de verschillende berekeningsmethodes voor L_r vergeleken. Dat gebeurt aan de hand van een aantal grafieken waarbij de invloed van de volgende twee zaken wordt bekeken:

- de *d/t*-verhouding
- de *l/W*-verhouding

De eerste grafiek, *grafiek 6*, die we van naderbij bekijken is deze die L_r uitzet in functie van d/t. De volgende zaken worden bijkomend verondersteld:

- l = 100 mm
- W = 300 mm
- t = 20 mm
- $\sigma_m = 426 \text{ MPa}$
- YS = 471 MPa

Uit de grafiek is eerst en vooral te zien dat L_r stijgt als d/t toeneemt. Dit is logisch, want hoe dieper de fout (bij dezelfde *t*), hoe groter de kans op plastisch bezwijken is (belastingdragende

oppervlakte vermindert). Enkel bij de FITNET-methode is die stijgende trend er niet, omdat deze methode geen rekening houdt met de grootte van de fout.



grafiek 6: L_r in functie van d/t (l = 100 mm, W = 300 mm, t = 20 mm, $\sigma_m = 426$ MPa, YS = 471 MPa) berekend volgens 6 verschillende methodes

Als we dan de vijf andere methodes afzonderlijk bekijken, stellen we de volgende zaken vast. Bij de Sattari-methode neemt L_r bij diepe fouten zeer hoge waarden aan, in vergelijking met de andere methodes. Deze methode is ook maar geldig voor d/t-waarden die kleiner zijn dan 0,8. Het is dan ook best om deze methode niet te gebruiken voor diepe fouten. Uit de grafiek is ook te zien dat de UGent-methode op basis van een rechthoekige fout een grotere waarde voor L_r genereert dan de UGent-methode op basis van een ellipsvormige fout. Dit is te verklaren door het feit dat een kleinere fout (een ellipsvormige fout met lengte l en diepte dheeft een kleinere oppervlakte dan een rechthoekige fout met dezelfde lengte l en diepte d) altijd minder aanleiding geeft tot plastisch bezwijken. Verder is ook te zien dat het resultaat voor L_r op basis van de Goodall-methode altijd groter is dan het resultaat op basis van de UGent-methode. De Goodall-methode is wel maar geldig voor d/t-waarden die kleiner zijn dan 0,5. De Kastner-methode (maar uitgezet t.e.m. d/t = 0,9) ten slotte zorgt bij grote d/twaarden voor een sterke stijging van L_r . Deze methode wordt dan ook best niet gebruikt voor diepe fouten.

In *grafiek* 7 is ook L_r in functie van d/t weergegeven, maar bij een grotere foutlengte (l = 200 mm). De andere veronderstellingen die gemaakt zijn voor *grafiek* 6 gelden hier ook.

Uit deze grafiek blijkt dat bij een grotere foutlengte dezelfde trends zich voordoen. Het enige verschil met de voorgaande grafiek is dat L_r sneller hogere waarden aanneemt. Dit is eenvoudigweg te verklaren door het feit dat we te maken hebben met langere fouten.



grafiek 7: L_r in functie van d/t (l = 200 mm, W = 300 mm, t = 20 mm, $\sigma_m = 426$ MPa, YS = 471 MPa) berekend volgens 6 verschillende methodes

In *grafiek* 8 is L_r in functie van l/W te zien. Nu worden de volgende zaken bijkomend verondersteld:

- d = 5 mm
- t = 20 mm
- $\sigma_m = 426 \text{ MPa}$
- YS = 471 MPa

Uit deze grafiek is eerst en vooral te zien dat L_r stijgt als l/W toeneemt. Dit is logisch, want hoe langer de fout (bij dezelfde W), hoe groter de kans op plastisch bezwijken is (belastingdragende oppervlakte vermindert). Enkel bij de FITNET-methode is die stijgende trend er niet, omdat deze methode geen rekening houdt met de grootte van de fout.

De Sattari- en de Goodall-methode vertonen een sterke stijging van L_r bij kleine *l/W*-waarden, terwijl de methode van Kastner en de twee UGent-methodes een meer geleidelijke stijging van L_r in functie van *l/W* vertonen.



grafiek 8: L_r in functie van l/W (d = 5 mm, t = 20 mm, $\sigma_m = 426 \text{ MPa}$, YS = 471 MPa) berekend volgens 6 verschillende methodes

In grafiek 9 is terug L_r in functie van l/W weergegeven, maar wel bij een hogere waarde voor de foutdiepte (d = 10 mm). De andere veronderstellingen die gemaakt zijn voor grafiek 8 gelden hier ook. Uit deze grafiek blijkt dat bij een diepere fout dezelfde trends zich voordoen. Het enige verschil met de voorgaande grafiek is dat L_r iets sneller hogere waarden aanneemt. Dit is eenvoudigweg te verklaren door het feit dat we hier te maken hebben met diepere fouten.



grafiek 9: L_r in functie van l/W (d = 10 mm, t = 20 mm, $\sigma_m = 426$ MPa, YS = 471 MPa) berekend volgens 6 verschillende methodes

In *grafiek 10* ten slotte is terug L_r in functie van l/W te zien, maar nu voor d = 15 mm, dus een nog diepere fout. De andere veronderstellingen die gemaakt zijn voor *grafiek 8* gelden hier opnieuw. De L_r -waarden zijn nu logischerwijze nog hoger.

De waarden voor L_r op basis van de Goodall-methode zijn hier niet uitgezet, omdat deze methode niet meer geldig is. De verhouding d/t bedraagt hier nl. 0,75 en d/t moet kleiner zijn dan 0,5 opdat de Goodall-methode zou gelden. De hoge L_r -waarden die deze methode genereert, zijn dan ook niet realistisch. Aangezien ook de UGent-methode op basis van een rechthoekige fout bij grote l/W-waarden grote L_r -waarden genereert, zal ook deze methode best niet gebruikt worden voor zeer lange fouten. Ook de Sattari-methode genereert vrij hoge waarden voor L_r . Aangezien deze methode ook al bij L_r in functie van d/t veel grotere waarden genereert dan de andere methodes, lijkt het best om deze methode niet te gebruiken om L_r te bepalen.



grafiek 10: L_r in functie van l/W (d = 15 mm, t = 20 mm, $\sigma_m = 426 \text{ MPa}$, YS = 471 MPa) berekend volgens 5 verschillende methodes

We kunnen eigenlijk besluiten dat de berekeningsmethodes voor L_r niet gebruikt kunnen worden voor lange en/of diepe fouten. Dit heeft te maken met het feit dat bij zeer grote fouten het quasi niet meer mogelijk is om plastisch falen te bereiken. Zulke geometrieën zullen eerder falen door brosse breuk.

4.5 Optie 2: de 'mismatch' analyse optie

4.5.1 Invoergegevens

Voor optie 2 zijn meer invoergegevens nodig dan voor optie 1. De plaat wordt in optie 2 niet als een homogene plaat uit basismateriaal aanzien, maar wel als een plaat die uit basis- en lasmateriaal bestaat (er wordt geen rekening gehouden met de materiaaleigenschappen van de warmte-beïnvloede zone (WBZ)). Deze optie sluit dus veel beter aan bij de werkelijkheid. De fouten die bij optie 1 in het basismateriaal aanwezig waren, zitten nu in het lasmateriaal (*figuur 21*). Wel moet opgemerkt worden dat de meeste fouten in werkelijkheid tussen het lasen het basismateriaal, dus in de WBZ, zitten. Deze optie houdt daar dus geen rekening mee en is enkel voorzien voor fouten in het midden van de lasnaad.

De materiaaleigenschappen van het lasmateriaal worden hier dus wel in rekening gebracht. De *'mismatch'* analyse optie voorziet dan ook een methode om het conservatisme te reduceren.



figuur 21: De 'mismatch' analyse optie

De invoer bestaat uit zeven zaken:

- de gemiddelde waarde van de vloeispanning van het basismateriaal (YS^B)
- de gemiddelde waarde van de treksterkte van het basismateriaal (UTS^{B})
- de gemiddelde waarde van de vloeispanning van het lasmateriaal (YS^{W})
- de gemiddelde waarde van de treksterkte van het lasmateriaal (UTS^{W})
- de elasticiteitsmodulus van het basismateriaal (E^{B})

- de elasticiteitsmodulus van het lasmateriaal (E^{W})
- de breuktaaiheid van het basismateriaal

4.5.2 Procedure voor het bepalen van de 'Failure Assessment Line'

4.5.2.1 Omrekening van YS en UTS

De omrekening van YS^B , YS^W , UTS^B en UTS^W van T_{room} naar T_{test} gebeurt op dezelfde manier als bij optie 1.

4.5.2.2 Bepaling van $f(L_r)$

Bij de berekening zal er nu geen onderscheid gemaakt worden tussen materialen met of zonder Lüders plateau. Aangezien (het grootste deel van) de platen, die getest zijn in het Laboratorium Soete, bestaan uit materialen zonder Lüders plateau bekijken we de bepaling van $f(L_r)$ enkel voor een plaat bestaande uit een basis- en een lasmateriaal zonder Lüders plateau.

Voor deze procedure zijn vijf parameters bepalend. De eerste belangrijke parameter is de *'mismatch ratio' M*. Deze duidt het verschil in sterkte (uitgedrukt als vloeispanning) tussen het basis- en het lasmateriaal aan en wordt gedefinieerd als:

$$M = \frac{YS^{W}}{YS^{B}}$$

Het is dus de verhouding van de gemiddelde waarde van de vloeispanning van het lasmateriaal (YS^W) en de gemiddelde waarde van de vloeispanning van het basismateriaal (YS^B) .

Een tweede parameter die nodig is om de analyse te kunnen uitvoeren is de zogenaamde *'mismatch vloeispanning'*. Men kan zich dit voorstellen als zijnde de vloeispanning van een homogeen materiaal waarvan de mechanische eigenschappen een gewogen gemiddelde zijn van de mechanische eigenschappen van het basis- en het lasmateriaal. Deze parameter wordt gedefinieerd als:

$$YS^{M} = YS^{B} \cdot \frac{F_{y}^{M}}{F_{y}^{B}}$$

Hierin is F_y^M de 'plastische bezwijklast' (yield limit load) voor de 'mismatch' condities en F_y^B de 'plastische bezwijklast' gegeven bij de trekeigenschappen van het basismateriaal. De berekening van F_y^M en F_y^B wordt uit de doeken gedaan in een volgende paragraaf.

De drie andere parameters worden hieronder gedefinieerd:

$$\mu^{M} = \frac{M-1}{\frac{F_{y}^{M}}{F_{y}^{B}} - 1} \frac{M - \frac{F_{y}^{M}}{F_{y}^{B}}}{\mu^{W}} + \frac{M - \frac{F_{y}^{M}}{F_{y}^{B}}}{\mu^{B}}}$$
met $\mu^{W} = 0,001 \cdot \frac{E^{W}}{YS^{W}}, \ \mu^{B} = 0,001 \cdot \frac{E^{B}}{YS^{B}}$

$$N^{M} = \frac{M-1}{\frac{F_{y}^{M}}{F_{y}^{B}} - 1} \frac{M - \frac{F_{y}^{M}}{F_{y}^{B}}}{N^{W}} + \frac{M - \frac{F_{y}^{M}}{F_{y}^{B}}}{N^{B}}}$$
met $N^{W} = 0,3 \cdot \left(1 - \frac{YS^{W}}{UTS^{W}}\right), N^{B} = 0,3 \cdot \left(1 - \frac{YS^{B}}{UTS^{B}}\right)$

$$L_r^{\max,M} = \frac{F_y^M}{F_y^B} \cdot FS^M \text{ met } FS^M = \min\left(0,5 \cdot \left(1 + \frac{UTS^W}{YS^W}\right); 0,5 \cdot \left(1 + \frac{UTS^B}{YS^B}\right)\right)$$

4.5.2.3 Berekening van de 'plastische bezwijklasten' (yield limit loads)

In deze paragraaf worden de twee '*plastische bezwijklasten*' F_y^M en F_y^B berekend. Bij deze berekening wordt verondersteld dat er zich één fout in het midden (zowel in breedte- als in langsrichting) van de lasnaad bevindt (*figuur 21*).

In de platen die in dit werk bestudeerd worden daarentegen, zijn altijd twee fouten aangebracht. Dit impliceert dat enkel de grootste fout in rekening moet gebracht worden als er geen interactie optreedt tussen de twee fouten. Als er wel interactie tussen de twee fouten is, moeten die fouten als één grote fout aanzien worden. Voor de breedte van de lasnaad (*b*) wordt 6 mm genomen, wat een realistische waarde is voor (semi-)automatische lassen (*figuur 22*).



figuur 22: Lasnaadvoorbereiding bij (semi-)automatisch lassen [18]

Bij de berekening van de '*plastische bezwijklasten*' beperken we ons tot het geval dat de lasnaad sterker is dan het basismateriaal. De reden hiervoor is dat bij de platen, die in dit werk bestudeerd worden, de lasnaad ook altijd sterker is dan het basismateriaal. Het sterker zijn van de lasnaad dan het basismateriaal wordt '*overmatching*' genoemd. De parameter *M* is dan groter dan 1. Het voordeel van '*overmatching*' is dat op die manier de fout beter afgeschermd wordt. Bovendien schrijft de EPRG⁷ voor dat de vloeispanning van het lasmateriaal groter of minstens gelijk moet zijn aan de vloeispanning van het basismateriaal [19]. Op basis van deze veronderstellingen krijgen we de volgende formule voor de verhouding van F_y^M en F_y^B :

$$\frac{F_{y}^{M}}{F_{y}^{B}} = \min\left(\frac{1}{1-\frac{l}{W}}; \frac{F_{y}^{M}(2)}{F_{y}^{B}}\right)$$

⁷ European Pipeline Research Group, de organisatie die de ECA (Engineering Critical Assessment) criteria heeft ontwikkeld

De verhouding is dus het minimum van twee factoren. De tweede factor hangt af van de factor ψ , die als volgt gedefinieerd wordt:

$$\Psi = \frac{(W-l)}{b}$$

De waarde van ψ bepaalt de waarde van de tweede factor als volgt:

$$\frac{F_{y}^{M}(2)}{F_{y}^{B}} = M \quad als \quad \Psi \le e^{\frac{-(M-1)}{5}}$$
$$\frac{F_{y}^{M}(2)}{F_{y}^{B}} = 0,04 \cdot \left(24 \cdot (M-1) \cdot \frac{e^{\frac{-(M-1)}{5}}}{\Psi} + M + 24\right) \quad als \quad \Psi > e^{\frac{-(M-1)}{5}}$$

Nu kunnen de vijf parameters en de '*Failure Assessment Line*' bepaald worden. Om die lijn te bepalen maken we gebruik van dezelfde formules als bij optie 1 (voor materialen zonder Lüders plateau). In die formules worden de factoren μ , N en L_r^{\max} gewoon vervangen door μ^M , N^M en $L_r^{\max,M}$.

Als de functie $f(L_r)$ volledig gekend is, kan de '*Failure Assessment Line*' in het Failure Assessment Diagram getekend worden. De positie en de vorm van deze lijn wordt nu door zowel de eigenschappen van het basismateriaal als die van het lasmateriaal bepaald; ook de grootte van de fouten en de geometrische eigenschappen van de plaat en de lasnaad zijn bepalende factoren.

4.5.3 Analyseren van de experimentele data

De analyse verloopt op precies dezelfde manier als bij optie 1. Er moeten enkel een aantal kleine aanpassingen gebeuren in de berekening van K_r en L_r .

4.5.3.1 Berekening van K_r voor een plaat met gegeven belasting en fouten

Als we veronderstellen dat de lasfout in het midden van de las zit, moeten in de berekening van K_{mat} op basis van de *CTOD*-waarde *YS* en *UTS* vervangen worden door *YS*^W en *UTS*^W. Verder moet in principe ook de elasticiteitsmodulus *E* veranderd worden in E^{W} . Aangezien in ons geval E^W en E^B (nagenoeg) gelijk zijn, maakt dit natuurlijk geen verschil. Aangezien YS^W en UTS^W hoger zijn dan YS^B en UTS^B , de YS en UTS die gebruikt worden in optie 1, zal de waarde van K_{mat} , voor dezelfde CTOD-waarde, groter zijn. De waarde van K_I wordt niet beïnvloed. Dit impliceert dat K_r , dat de verhouding is van K_I en K_{mat} , lager zal zijn.

4.5.3.2 Berekening van L_r voor een plaat met gegeven belasting en fouten

In de vijf berekeningsmethodes voor L_r moet YS vervangen worden door YS^W. Aangezien YS^W groter is dan YS^B, de YS die gebruikt wordt in optie 1, zullen de waarden voor L_r dus altijd lager zijn dan in optie 1.

4.6 Resultaten FAD

In eerste instantie zijn de resultaten van een aantal grootschalige trekproeven uitgezet in een Failure Assessment Diagram op basis van optie 1, de standaard optie. Daarbij kunnen alle testresultaten van platen met dezelfde gemiddelde *YS* en *UTS* van het basismateriaal in hetzelfde FAD uitgezet worden (de '*Failure Assessment Line*' wordt immers uitsluitend door de materiaaleigenschappen bepaald). Op die manier kan de invloed van de grootte van de fouten bekeken worden bij even sterke materialen.

In tweede instantie worden dan de resultaten van de testen uitgezet in een FAD op basis van optie 2, de '*mismatch*' optie. Bij deze methode kan maar één punt tegelijk in een FAD uitgezet worden, omdat hier de '*Failure Assessment Line*' niet enkel bepaald wordt door de sterkte van de materialen, maar ook door de grootte van de fouten! De vergelijking tussen de verschillende testresultaten is hier moeilijker.

Om de resultaten voor te stellen maken we gebruik van een zelfgeschreven MATLABprogramma⁸. Dit programma biedt de volgende mogelijkheden:

- inlezen van de resultaten van grootschalige trekproeven
- invoeren van de elasticiteitsmodulus E
- omrekenen van YS en UTS naar de testtemperatuur T_{test}
- berekenen van K_{mat} op basis van de *CVN* of de *CTOD*-waarde of rechtstreekse invoer van K_{mat}

⁸ Het volledige MATLAB-programma is op CD-ROM beschikbaar bij de promotor

- uitvoeren van de berekeningen voor de twee fouten of enkel de grootste fout in rekening brengen
- bepalen van K_I volgens twee verschillende berekeningsmethodes (Newman en Raju,
 R. Sethuraman)
- bepalen van L_r volgens zes verschillende berekeningsmethodes (FITNET, Sattari, Goodall, UGent (rechthoekige fout), UGent (ellipsvormige fout), Kastner)
- bepalen van $f(L_r)$ ('Failure Assessment Line') voor materialen met of zonder Lüders plateau
- tekenen van het FAD met de '*Failure Assessment Line*' en de resultaten van de grootschalige trekproeven, die voorgesteld worden door punten (beoordelingspunten genoemd)
- bepalen van de snijpunten van de '*Failure Assessment Line*' met de lijnen door de oorsprong van het FAD en de beoordelingspunten (we veronderstellen dus lineair elastisch materiaalgedrag) (*figuur 23*)
- bepalen van de afstand tussen de snijpunten met de '*Failure Assessment Line*' en de beoordelingspunten
- uitschrijven naar een Excel-bestand van de coördinaten (L_r, K_r) van de snijpunten met de '*Failure Assessment Line*' en van de beoordelingspunten



figuur 23: FAD met een voorbeeld van een lijn door de oorsprong en een beoordelingspunt met aanduiding van het snijpunt van die lijn met de '*Failure Assessment Line*'

Een deel van het zelfgeschreven MATLAB-programma kan u nalezen in APPENDIX C.

4.6.1 Resultaten op basis van optie 1

Aangezien enkel de vloeispanning en de treksterkte (en dus niet de volledige spanning-rek curve) van het basismateriaal gekend zijn, moeten we een aanname doen voor wat betreft de aanwezigheid van een Lüders plateau in het spanning-rek diagram of niet. We nemen aan dat er geen Lüders plateau is. De beproefde platen zijn trouwens gemaakt uit moderne stalen, waardoor de kans op een Lüders plateau in het spanning-rek diagram gering is. Alle Failure Assessment Diagrams kunnen dus getekend worden op basis van de procedure voor materialen zonder Lüders plateau.

Om K_{mat} te berekenen maken we gebruik van de formule op basis van de *CTOD*-waarde (we vullen de gemiddelde *CTOD*-waarde in). De reden voor het gebruik van de *CTOD*-waarde (en dus niet de *CVN*-waarde) is in een vorige paragraaf behandeld. Om K_I te bepalen maken we zowel van de formule van Newman en Raju als van de formule van R. Sethuraman gebruik. Aangezien Newman en Raju een formule ontwikkeld hebben voor één fout, vullen we ofwel de afmetingen van de grootste fout ofwel de afmetingen van de overkoepelende fout (de twee fouten samengenomen) in. De keuze hangt af van het feit of er interactie optreedt tussen de twee fouten en stelt dat er altijd interactie is tussen die twee. Wel moet opgemerkt worden dat de methode van R. Sethuraman enkel geldt voor twee identieke fouten, wat in de uitgevoerde testen slechts zelden voorkomt. Een mogelijke oplossing voor dit probleem wordt besproken in één van de volgende paragrafen. Op die manier hebben we dus twee berekeningswijzen voor K_r . L_r berekenen we op vijf verschillende manieren; op basis van de formules van Sattari, Goodall, UGent (rechthoekige fout), UGent (ellipsvormige fout) en Kastner.

4.6.1.1 Platen waarbij de drie interactiecriteria hetzelfde resultaat geven

In deze paragraaf worden een aantal FAD's bestudeerd voor platen waarbij de drie foutinteractiecriteria hetzelfde resultaat geven (zie *hoofdstuk 3*). We bekijken eerst een aantal platen waarbij volgens de interactiecriteria geen interactie optreedt. In tweede instantie hebben we aandacht voor platen waarbij volgens de criteria wel interactie optreedt.

Bij de acht platen die we eerst bekijken heeft het basismateriaal een gemiddelde *YS* van 471 MPa en een gemiddelde *UTS* van 564 MPa. De andere gegevens zijn opgenomen in

tabel 4. Volgens de drie foutinteractiecriteria treedt er geen interactie op tussen de twee fouten; dit betekent dat we volgens de normen enkel de grootste fout (de fout met de grootste oppervlakte) in rekening moeten brengen. De afmetingen van de grootste fout staan in het vet in *tabel 4*. De kleinste fout wordt verwaarloosd.

nr	D [mm]	t [mm]	W [mm]	l ₁ [mm]	d ₁ [mm]	s [mm]	l ₂ [mm]	d ₂ [mm]	ε _m [%]	$\sigma_m [MPa]$
1	914	22,3	286	49,1	6,8	70,0	49,0	5,6	1,66	543
2	914	21,9	287	49,1	7,2	48,0	30,5	5,3	0,42	529
3	914	21,9	284	49,4	4,6	54,5	47,0	4,5	2,69	580
4	914	22,0	290	48,1	8,5	65,7	45,7	7,2	0,55	511
5	914	22,0	290	50,4	6,5	53,2	52,3	6,0	1,03	490
e	914	22,0	290	52,5	7,1	66,5	50,0	7,3	0,62	513
7	914	22,8	277	53,7	9,6	66,5	49,2	6,0	1,90	558
8	914	22,1	284	45,7	7,3	46,5	44,0	6,1	4,24	557

tabel 4: Gegevens van een aantal beproefde platen (YS = 471 MPa, UTS = 564 MPa) waarbij volgens de 3 interactiecriteria geen interactie optreedt

In deze tabel stelt ε_m de maximaal bereikte rek tijdens de proef voor, σ_m is de maximaal aangelegde spanning (= faalspanning).

In *figuur 24* zijn vijf verschillende FAD's weergegeven met daarin telkens de acht beschouwde platen (*tabel 4*). Het enige verschil tussen deze FAD's is de berekeningswijze van L_r . K_I is telkens berekend op basis van de formule van Newman en Raju. Aangezien β (hier gelijk aan $2d_I/l_I$) kleiner is dan 0,75 is de grootste K_I -waarde te vinden in het midden van de fout (K_I is dus berekend voor $\varphi = 90^\circ$). Op die manier bekijken we het meest kritische punt.

Uit deze FAD's blijkt dat bijna alle punten (elk punt stelt één van de beschouwde platen voor) buiten de curve liggen. Aangezien de maximaal aangelegde spanning tijdens de testen gelijk is aan de faalspanning zouden (in het ideale theoretische geval) alle punten op de '*Failure Assessment Line*' moeten liggen. Dit is dus duidelijk niet het geval.



figuur 24: 5 FAD's (YS = 471 MPa, UTS = 564 MPa) waarbij L_r berekend is op basis van de formule van: (a) Sattari, (b) Goodall, (c) UGent (rechthoekige fout), (d) UGent (ellipsvormige fout), (e) Kastner. K_I is berekend op basis van de formule van Newman en Raju met $\varphi = 90^{\circ}$.

Als we veronderstellen dat de positie van de '*Failure Assessment Line*' correct is, dus overeenkomt met de praktijk, gelden de volgende zaken:

- Een punt dat binnen de curve ligt, betekent dat de spanning theoretisch gezien nog hoger zou mogen worden vooraleer de plaat faalt. De punten binnen de curve, zijn dus onveilige punten. - Een punt dat buiten de curve ligt, betekent dat de theoretische faalspanning lager is. De plaat zal theoretisch gezien dus bij een lagere spanning falen; de berekeningsmethode voor L_r en/of K_r van de plaat is dus conservatief.

De positie van de '*Failure Assessment Line*' is natuurlijk niet correct en verschilt dus van de praktijk. De curve is namelijk op een te conservatieve manier bepaald, aangezien de berekening ervan voornamelijk gebaseerd is op elastische breukmechanica (de platen worden door de trekproeven plastisch vervormd). Bovendien wordt er geen rekening gehouden met de '*mismatch ratio*'. Door het feit dat we altijd te maken hebben met '*overmatching*' zal de faalspanning in de praktijk hoger zijn; wat concreet betekent dat de curve meer '*naar rechts*' moet liggen.

Zoals te zien is op de FAD's levert de berekeningsmethode voor K_r geen problemen op. Dit kan niet gezegd worden van de berekeningsmethodes voor L_r . De berekende L_r -waarden zijn in de meeste gevallen zo groot, dat de punten buiten de curve vallen. Eén van de redenen voor deze grote L_r -waarden is het feit dat de maximaal aangelegde spanning (veel) groter is dan de vloeispanning. Dit kan verklaard worden door het fenomeen van de '*overmatching*'.

We bestuderen de vijf FAD's nu afzonderlijk, om op die manier meer inzicht te verwerven in de problemen die optreden bij de formules voor de bepaling van L_r van een plaat.

Als L_r berekend wordt op basis van de formule van Sattari bevinden alle punten zich 'ver' buiten de curve (*figuur 24 (a)*). Dit kan enerzijds verklaard worden door het feit dat bij de beschouwde platen σ_m (veel) groter is dan de YS, waardoor L_r al zeker groter is dan 1. Anderzijds is de factor $1/(1-\zeta)$ ook altijd groter dan 1, waardoor L_r nog groter wordt. Nu is al eerder vastgesteld dat bij kleine l/W-waarden L_r op basis van de formule van Sattari veel hogere waarden aanneemt dan L_r op basis van de andere methodes. Aangezien de verhouding l_l/W niet groter is dan 0,2 (*tabel 5*) bij de beschouwde platen neemt L_r dus hoge waarden aan. Bovendien is ook gebleken dat als L_r uitgezet wordt in functie van d/t en we te maken hebben met een '*korte*' fout (bij de beschouwde platen is l_l kleiner dan 55 mm (*tabel 4*)), L_r op basis van Sattari altijd de hoogste waarden aanneemt.

nr.	d1/t [-]	l ₁ /W [-]
1	0,305	0,172
2	0,329	0,171
3	0,210	0,174
4	0,386	0,166
5	0,295	0,174
6	0,320	0,181
7	0,421	0,194
8	0,330	0,161

tabel 5: Overzicht van d_1/t en l_1/W voor de beschouwde platen (*YS* = 471 MPa, *UTS* = 564 MPa)

Voor de beschouwde platen kunnen we dus besluiten dat de berekening van L_r op basis van Sattari geen goede keuze is, aangezien de punten '*ver*' buiten de curve liggen. De punten zouden op de curve moeten liggen! De berekeningsmethode voor L_r volgens Sattari is dus te conservatief.

Ook als L_r op basis van de formule van Goodall wordt berekend, vallen alle punten buiten de curve (*figuur 24 (b)*); ze liggen er wel al iets dichter bij. In *tabel 6* is de procentuele afwijking van de punten t.o.v. de curve weergegeven voor de Sattari- en de Goodall-methode. Daaruit blijkt duidelijk dat de procentuele afwijking van de punten t.o.v. de curve kleiner is door gebruik te maken van de Goodall-methode.

nr.	1	2	3	4	5	6	7	8
Sattari	16,44%	15,39%	23,31%	22,13%	10,72%	13,88%	34,75%	24,41%
Goodall	8,20%	6,16%	17,81%	11,07%	2,98%	4,99%	20,88%	14,58%

tabel 6: Procentuele afwijking van de beoordelingspunten t.o.v. de '*Failure Assessment Line*' voor de Sattari- en de Goodall-methode

 L_r volgens de Goodall-methode neemt inderdaad iets lagere waarden aan dan L_r volgens de Sattari-methode. Toch zijn de L_r -waarden nog vrij hoog. Er is namelijk vroeger al vastgesteld dat bij kleine l/W-verhoudingen ($l_1/W < 0,2$) en bij kleine d/t-waarden ($d_1/t < 0,4$) L_r op basis van Goodall in vergelijking met andere methodes nog vrij grote waarden aanneemt. We kunnen dus stellen dat de Goodall-methode minder conservatief is dan de Sattari-methode, maar toch nog te conservatief.

Als we L_r berekenen met de formule die ontwikkeld is aan de UGent (op basis van een rechthoekige fout) valt één punt (nl. plaat nr. 5) net op de curve. Dit is te zien op *figuur 25*.



figuur 25: FAD (*YS* = 471 MPa, *UTS* = 564 MPa) met L_r berekend op basis van de formule ontwikkeld aan de UGent (op basis van een rechthoekige fout), K_I is bepaald volgens Newman en Raju ($\varphi = 90^\circ$)

Dit is vooral te verklaren door het feit dat plaat nr. 5 de kleinste σ_m heeft. De L_r -waarde is voor de acht beschouwde platen duidelijk kleiner dan bij Sattari en Goodall. L_r wordt zelfs nog kleiner als we gebruik maken van de UGent-formule op basis van een ellipsvormige fout (*figuur 26*). Punt 5 valt nu net binnen de curve, wat op een onveilige situatie wijst. Deze berekeningsmethode blijkt dus in sommige gevallen niet conservatief genoeg te zijn. Dit is enerzijds te verklaren door het feit dat we bij de berekeningen enkel de grootste fout in rekening brengen (zoals de bestaande normen het trouwens aanbevelen). De kleinste fout wordt verwaarloosd, maar is er in werkelijkheid wel. Door de kleinste fout toch in rekening te brengen neemt L_r toe⁹. Punt 5 zal dan niet meer binnen de curve liggen. Anderzijds kan de werkelijke fout qua oppervlakte groter zijn dan de gebruikte ellipsvormige fout, waardoor we dus niet conservatief genoeg te werk gaan.

⁹ Op voorstel van het Laboratorium Soete zal in de FITNET procedure trouwens aanbevolen worden om L_r te berekenen rekening houdend met de effectieve netto sectie (dus de totale sectie verminderd met de twee afzonderlijke fouten).


figuur 26: FAD (*YS* = 471 MPa, *UTS* = 564 MPa) met L_r berekend op basis van de formule ontwikkeld aan de UGent (op basis van een ellipsvormige fout), K_I is bepaald volgens Newman en Raju ($\varphi = 90^\circ$)

Als we ten slotte L_r berekenen op basis van de formule van Kastner (*figuur 27*), liggen drie punten binnen de curve. We hebben hier terug een onveilige situatie.



figuur 27: FAD (*YS* = 471 MPa, *UTS* = 564 MPa) met L_r berekend op basis van de formule van Kastner, K_I is bepaald volgens Newman en Raju ($\varphi = 90^\circ$)

Kastner geeft – zoals vroeger reeds vastgesteld – inderdaad de laagste L_r -waarden voor lage d/t- en l/W-verhoudingen. Door de kleinste fout ook in rekening te brengen, zal L_r wel wat toenemen, maar blijft de situatie onveilig. Deze berekeningsmethode passen we dus best niet toe.

De reden dat deze methode onveilig blijkt te zijn, heeft meer dan waarschijnlijk te maken met het feit dat deze methode op basis van pijpgeometrie ontwikkeld is (en niet op basis van plaatgeometrie zoals bij de andere methodes). Bovendien houdt de formule rekening met de volledige pijp, terwijl de trekproeven uitgevoerd zijn op een stuk van de pijp (*wide plate*). De volledige pijp kan inderdaad wat meer spanning opnemen dan de beproefde plaat, waardoor de faalspanning iets hoger wordt.

In de vijf besproken FAD's is K_I telkens berekend op basis van de formule van Newman en Raju. In principe kan K_I ook berekend worden op basis van de formule van R. Sethuraman, maar deze formule impliceert dat er interactie tussen de twee fouten optreedt. Aangezien de drie interactiecriteria stellen dat er geen interactie optreedt, heeft het (volgens de huidige normen) dus ook geen zin om K_I op basis van R. Sethuraman te berekenen. Het enige effect van K_I te berekenen op basis van R. Sethuraman is dat K_r iets hoger wordt.

Uit de FAD's is bovendien gebleken dat bij alle berekeningsmethodes voor L_r een groot aantal punten buiten de curve liggen. De verklaring daarvoor is te vinden in het feit dat het FAD bekomen wordt op basis van elastische parameters. De punten die het verst buiten de curve liggen, zijn namelijk platen die tot ver in het plastisch gebied belast kunnen worden.

In tweede instantie bekijken we twee platen waarbij het basismateriaal een gemiddelde *YS* van 498 MPa en een gemiddelde *UTS* van 608 MPa heeft. De andere gegevens zijn opgenomen in *tabel 7*. Volgens de drie foutinteractiecriteria treedt er interactie op tussen de twee fouten. Dit betekent dus dat de twee fouten als één grote fout moeten beschouwd worden.

nr.	D [mm]	t [mm]	W [mm]	l ₁ [mm]	d1 [mm]	s [mm]	l ₂ [mm]	d ₂ [mm]	ε _m [%]	$\sigma_m \left[MPa \right]$
1	1067	30,5	280	124,0	7,7	0,0	124,0	7,7	0,74	522
2	1067	30,5	280	124,0	7,7	0,0	124,0	7,7	0,83	517

tabel 7: Gegevens van twee beproefde platen (*YS* = 498 MPa, *UTS* = 608 MPa) waarbij volgens de 3 interactiecriteria interactie optreedt

In *figuur* 28 zijn vijf verschillende FAD's weergegeven met daarin telkens de twee beschouwde platen (*tabel 7*).



figuur 28: 5 FAD's (*YS* = 498 MPa, *UTS* = 608 MPa) waarbij L_r berekend is op basis van de formule van: (a) Sattari, (b) Goodall, (c) UGent (rechthoekige fout), (d) UGent (ellipsvormige fout), (e) Kastner. K_I is berekend op basis van de formule van Newman en Raju met $\varphi = 90^\circ$.

Het enige verschil tussen deze FAD's is terug de berekeningswijze van L_r . Aangezien er interactie optreedt tussen de twee fouten worden de twee fouten nu als één grote

overkoepelende fout gemodelleerd bij de berekening van L_r . K_I is telkens berekend op basis van de formule van Newman en Raju, waarbij de twee fouten ook gemodelleerd worden als één grote overkoepelende fout (de lengte en de diepte van die fout is weergegeven in *tabel 8*). K_I is terug berekend voor $\varphi = 90^\circ$, waardoor we de meest kritische situatie bekijken.

nr.	d [mm]	1 [mm]	d/t [-]	1/W [-]
1	7,7	248,0	0,251	0,886
2	7,7	248,0	0,251	0,886

tabel 8: Overzicht van *d* en *l* (diepte en lengte van de overkoepelende fout) en *d/t* en *l/W* voor de beschouwde platen (*YS* = 498 MPa, *UTS* = 608 MPa)

Uit deze FAD's blijkt dat de twee punten buiten de curve liggen als L_r berekend wordt op basis van de formule van Sattari, Goodall en UGent (rechthoekige en ellipsvormige fout). De twee punten liggen binnen de curve als L_r berekend wordt op basis van de formule van Kastner. De methode van Kastner blijkt dus terug een onveilige methode te zijn. Dezelfde opmerkingen die daarnet gemaakt zijn i.v.m. de Kastner-methode zijn ook hier van toepassing. De meest conservatieve methode is nu de Goodall-methode en niet de Sattarimethode (*tabel 9*). Dit is te verklaren door het feit dat bij kleine d/t- en grote l/Wverhoudingen (*tabel 8*) de methode van Goodall de grootste L_r -waarden genereert. De methode ontwikkeld aan de UGent op basis van een ellipsvormige fout is de minst conservatieve methode.

nr.	1	2
Sattari	12,13%	11,54%
Goodall	49,83%	48,39%
UGent (rechthoek)	14,86%	14,26%
UGent (ellips)	8,81%	8,24%

tabel 9: Procentuele afwijking van de beoordelingspunten t.o.v. de '*Failure Assessment Line*' voor de Sattari- en de Goodall-methode en de twee UGent-methodes

Aangezien de twee fouten hier wel interageren, zouden we nu ook de FAD's kunnen bekijken als we K_I berekenen op basis van de formule van R. Sethuraman. We doen dit echter niet omdat aan de voorwaarden om deze formule toe te passen niet voldaan is. De lengte van de fouten is te groot waardoor bvb. de factor 2d/l kleiner is dan 0,3 (om de formule van R. Sethuraman te kunnen toepassen moet $2d/l \ge 0,3$).

4.6.1.2 Platen waarbij de drie interactiecriteria niet hetzelfde resultaat geven

In deze paragraaf bekijken we vijf platen waarvan het basismateriaal een gemiddelde *YS* van 471 MPa en een gemiddelde *UTS* van 564 MPa heeft. De andere gegevens zijn opgenomen in *tabel 10*. De drie foutinteractiecriteria geven voor deze platen een verschillend resultaat. Volgens het criterium dat voorgeschreven is in de API RP 579-norm treedt er interactie op tussen de twee fouten, de criteria die te vinden zijn in de BS 7910 en de ASME-norm zeggen dat er geen interactie is. We zullen daarom de beide mogelijkheden bekijken.

nr.	D [mm]	t [mm]	W [mm]	l ₁ [mm]	d1 [mm]	s [mm]	l ₂ [mm]	d ₂ [mm]	ε _m [%]	$\sigma_m [MPa]$
1	914	22,1	286	39,8	6,1	39,3	39,3	5,6	0,74	511
2	914	22,0	290	47,0	7,7	45,0	45,0	7,2	1,83	561
3	914	22,1	287	51,5	8,6	44,8	51,5	6,9	0,55	497
4	914	22,0	290	54,1	11,3	18,5	41,8	6,4	0,24	426
5	914	21.5	283	50,3	9,1	34.0	46.8	7.7	2.51	544

tabel 10: Gegevens van een aantal beproefde platen (YS = 471 MPa, UTS = 564 MPa)

Laten we eerst veronderstellen dat er interactie optreedt tussen de twee fouten. De twee fouten worden in de berekeningen dan vervangen door één overkoepelende fout (*tabel 11*).

nr.	d [mm]	1 [mm]
1	6,1	118,4
2	7,7	137,0
3	8,6	147,8
4	11,3	114,4
5	9,1	131,1

tabel 11: Overzicht van d en l (diepte en lengte van de overkoepelende fout) voor de beschouwde platen (YS = 471 MPa, UTS = 564 MPa)

In *figuur 29* zijn vijf verschillende FAD's weergegeven met daarin telkens de vijf beschouwde platen (*tabel 10*). Het enige verschil tussen deze FAD's is terug de berekeningswijze van L_r . K_I is telkens berekend op basis van de formule van Newman en Raju en voor $\varphi = 90^\circ$ (het meest kritische punt).

De berekening van L_r op basis van de UGent-methode (ellipsvormige fout) blijkt het minst conservatief te zijn. Als L_r berekend wordt op basis van de formule van Kastner liggen een aantal punten binnen de curve. Deze berekeningsmethode is dus terug onveilig.



figuur 29: 5 FAD's (YS = 471 MPa, UTS = 564 MPa) waarbij L_r berekend is op basis van de formule van: (a) Sattari, (b) Goodall, (c) UGent (rechthoekige fout), (d) UGent (ellipsvormige fout), (e) Kastner. K_I is berekend op basis van de formule van Newman en Raju met $\varphi = 90^\circ$.

In tweede instantie nemen we aan dat er geen interactie optreedt tussen de twee fouten. In de berekeningen wordt nu enkel de grootste fout (de fout met de grootste oppervlakte) in rekening gebracht.



figuur 30: 5 FAD's (YS = 471 MPa, UTS = 564 MPa) waarbij L_r berekend is op basis van de formule van: (a) Sattari, (b) Goodall, (c) UGent (rechthoekige fout), (d) UGent (ellipsvormige fout), (e) Kastner. K_I is berekend op basis van de formule van Newman en Raju met $\varphi = 90^\circ$.

In *figuur 30* zijn vijf verschillende FAD's weergegeven met daarin telkens de vijf beschouwde platen. L_r is terug op vijf verschillende manieren berekend en om K_I te bepalen is gebruik gemaakt van de formule van Newman en Raju. Door $\varphi = 90^\circ$ te kiezen, bekijken we terug de meeste kritische situatie.

In deze FAD's is te zien dat heel wat punten binnen de curve liggen (zelfs als L_r berekend wordt op basis van de Goodall-methode). Dit is vooral te verklaren door het feit dat de kleinste fout niet meegerekend wordt. Mocht deze fout wel opgenomen worden in de formules, zouden de L_r -waarden groter zijn. De formules voor L_r zoals ze nu gedefinieerd zijn, zijn dus onbruikbaar. De kleinste fout moet ook in rekening worden gebracht.

Ten slotte bekijken we ook nog eens de situatie als K_I berekend wordt op basis van de formule van R. Sethuraman. Aangezien deze formule ontwikkeld is voor twee identieke fouten, kan ze hier in principe niet toegepast worden. We passen daar een mouw aan door aan te nemen dat er in de platen wel twee identieke fouten aanwezig zijn, namelijk twee maal de grootste fout. Bij de vijf beschouwde platen is fout 1 de grootste (in het vet aangeduid in *tabel 10*). We veronderstellen dus dat we platen hebben met twee maal fout 1 erin op een afstand *s* van elkaar. De formule van R. Sethuraman kan dan toegepast worden, want er is voldaan aan alle voorwaarden, zoals blijkt uit *tabel 12*.

nr.	1 [mm]	d [mm]	t/d [-]	2d/l [-]	l/(s+l) [-]
1	39,8	6,1	3,623	0,307	0,503
2	47,0	7,7	2,857	0,328	0,511
3	51,5	8,6	2,570	0,334	0,535
4	54,1	11,3	1,947	0,418	0,745
5	50,3	9,1	2,363	0,362	0,597

tabel 12: Afmetingen *l* en *d* van de twee identieke fouten en controle van de voorwaarden om de formule van R. Sethuraman te mogen toepassen $(1,25 \le t/d \le 4; 0,3 \le 2d/l \le 1,2; 0,33 \le l/(s+l) \le 0,9)$

In *figuur 31* zijn de vijf FAD's voorgesteld. Aangezien de berekening van K_I rekening houdt met interactie, is L_r berekend voor één overkoepelende fout. Uit deze FAD's blijkt terug dat de formule van Kastner onveilig is, de formule ontwikkeld aan de UGent (ellipsvormige fout) is het minst conservatief.



figuur 31: 5 FAD's (YS = 471 MPa, UTS = 564 MPa) waarbij L_r berekend is op basis van de formule van: (a) Sattari, (b) Goodall, (c) UGent (rechthoekige fout), (d) UGent (ellipsvormige fout), (e) Kastner. K_I is berekend op basis van de formule van R. Sethuraman.

4.6.2 Resultaten op basis van optie 2

In de vorige paragrafen is al opgemerkt dat de positie van de '*Failure Assessment Line*' niet correct is. De positie van de curve wordt verbeterd door toepassing van optie 2, de '*mismatch*' optie (het conservatisme vermindert namelijk op die manier).

In *figuur 32* wordt een vergelijking gemaakt tussen een FAD op basis van optie 1 en een FAD op basis van optie 2. Het punt dat uitgezet is, is plaat nr. 3 uit *tabel 10. K_I* is berekend op basis van de formule van Newman en Raju, L_r is bekomen door toepassing van de formule ontwikkeld aan de UGent op basis van een ellipsvormige fout. De berekeningen zijn uitgevoerd in de veronderstelling dat er interactie is, dus voor één overkoepelende fout. Uit de twee FAD's blijkt dat de procentuele afwijking van het punt t.o.v. de curve bij optie 2 kleiner is dan bij optie 1 (6,05 % t.o.v. 8,10 %). Het conservatisme is dus verminderd.



figuur 32: Vergelijking van een FAD op basis van optie 1 (a) en optie 2 (b)

4.6.3 Conclusies

Een aantal zaken zijn opgevallen bij het bestuderen van de Failure Assessment Diagrams. We zetten ze nog een keer op een rijtje:

- De berekening van L_r op basis van de formule ontwikkeld aan de UGent op basis van een ellipsvormige fout is het minst conservatief. Toch moet hierbij opgemerkt worden dat deze methode soms niet conservatief genoeg is; namelijk als de werkelijke fout een grotere oppervlakte heeft dan de oppervlakte van een halve ellips.
- De berekening van L_r op basis van de formule van Kastner is vaak onveilig en wordt dus best niet toegepast.
- Als (op basis van de huidige foutinteractiecriteria) verondersteld wordt dat er geen interactie optreedt tussen de twee fouten, wordt in de huidige formules voor L_r enkel de grootste fout in rekening gebracht. Dit is niet conservatief genoeg. De formules voor L_r moeten rekening houden met de twee fouten! Dit betekent concreet dat L_r

moet bepaald worden rekening houdend met de effectieve netto sectie (dus de totale sectie verminderd met de twee afzonderlijke fouten).

Een FAD op basis van optie 2 is minder conservatief dan een FAD op basis van optie
1. Bij optie 2 wordt namelijk met de '*mismatch ratio*' rekening gehouden. Dit is beter omdat de lasnaad altijd sterker is dan het basismateriaal.

Bij een groot aantal bestudeerde FAD's liggen heel wat punten ver buiten de '*Failure* Assessment Line'. Dit wijst op een te groot conservatisme waarmee de formules zijn opgesteld. Er kan rekening gehouden worden met de '*mismatch ratio*' (optie 2 zorgt inderdaad al voor een verbetering), ofwel moeten er aangepaste formules ontwikkeld worden voor de berekening van de '*Failure Assessment Line*' en L_r . De huidige berekeningsmethodes zijn namelijk niet voldoende geschikt om plastisch falen te voorspellen.

Nu wordt in de algemene formule voor L_r de referentiespanning σ_{ref} gelijk genomen aan de *YS*; op die manier wordt met de versteviging van het materiaal geen rekening gehouden. Om dit op te vangen zou het aangewezen zijn om de referentiespanning gelijk te stellen aan een vloeispanning *FS* (*flow stress*) die het verstevigingsgedrag mee in rekening brengt. De *FS* kan dan bvb. gedefinieerd worden als de helft van de som van de *YS* en de *UTS*.

Een andere bedenking die kan worden gemaakt is het feit dat een spanningsgebaseerd FAD (in dit werk bestudeerd) niet echt geschikt is voor de grote plastische vervormingen die kunnen optreden bij pijpleidingen. Een rekgebaseerd FAD is een mogelijke oplossing. Onderzoek daaromtrent is trouwens al aan de gang [20].

Om tot betere formules te kunnen komen, moeten we eerst inzicht verwerven in de spanningen, rekken en verplaatsingen in de buurt van de fouten. Daarvoor maken we gebruik van de eindige-elementenmethode (*hoofdstuk 5*).

5 Eindige-elementenmethode (EEM)

De eindige-elementenmethode is een rekenmethode waarmee bvb. de sterkte-eigenschappen en de vervormingscapaciteit van een complexe constructie kunnen worden berekend. De methode is ontwikkeld omdat in deze gevallen analytische rekenmethoden onvoldoende mogelijkheden bieden of te complexe berekeningen vergen.

De eindige-elementenmethode deelt een constructie op in een beperkt (eindig) aantal elementen, en koppelt deze elementen aan elkaar door middel van knooppunten (*nodes*). Het is wiskundig aan te tonen, dat bij het verkleinen van de elementen, de oplossing die met de eindige-elementenmethode wordt bereikt, nadert tot de analytisch juiste oplossing. Toch kunnen er bij onjuiste modellering fouten worden gemaakt die ernstige gevolgen kunnen hebben.

Om nauwkeurige berekeningen te kunnen doen, moeten de elementen voldoende klein gekozen worden. Daardoor worden de rekenmodellen over het algemeen wel groot. Bovendien is het belangrijk het juiste elementtype (met voldoende vrijheidsgraden) te kiezen.

In dit afstudeerwerk wordt gebruik gemaakt van het rekenpakket ABAQUS om de simulaties uit te voeren.

5.1 Model voor een plaat met twee oppervlaktefouten

Een gekromde brede plaat (*wide plate*) met twee oppervlaktefouten in (het midden van) de lasnaad wordt in ABAQUS als volgt gemodelleerd:

- de gekromde plaat wordt vereenvoudigd tot een vlakke plaat (dit wijkt natuurlijk af van de werkelijkheid, maar zorgt er wel voor dat de rekentijd fel wordt ingekort)
- de vlakke plaat heeft een lengte van 900 mm, een breedte van 400 mm en een dikte van 14 mm
- de volledige plaat is uit hetzelfde materiaal gemaakt (er is dus geen lasnaad)
- de twee oppervlaktefouten bevinden zich in lengterichting in het midden van de plaat en zijn ellipsvormig (hoe de fouten exact gemodelleerd zijn, wordt verderop in dit werk uitgelegd)

- de twee oppervlaktefouten hebben dezelfde lengte en diepte en bevinden zich op een zekere afstand van elkaar
- in breedterichting gezien, liggen de twee oppervlaktefouten symmetrisch t.o.v. het midden van de plaat

In *figuur 33* is de volledige vlakke plaat getekend. Omwille van de symmetrie (de twee symmetrievlakken zijn aangeduid op de figuur) moet in de eigenlijke ABAQUS-simulaties maar een vierde van de vlakke plaat (het gearceerde deel) gemodelleerd worden (*figuur 34*). Het voordeel hiervan is uiteraard dat de berekeningen minder lang duren.



figuur 33: De volledige vlakke plaat



figuur 34: Een vierde van de vlakke plaat met een detail van de fout

5.1.1 Opbouw van het model

De opbouw van het model bestaat uit een aantal stappen. Deze worden hieronder kort behandeld.

5.1.1.1 Geometrie

In eerste instantie wordt een vierde van de vlakke plaat (*figuur 34*), dus een plaat met dikte 14 mm, lengte 450 mm en breedte 200 mm, in ABAQUS getekend. Vervolgens wordt de fout gemodelleerd d.m.v. de speciale ABAQUS-functie '*crack*'. Deze functie laat toe een fout voor te stellen door zijn contour (in dit afstudeerwerk stellen we verder alle fouten voor door een halve ellips). Concreet betekent dit dat we een fout benaderen door een lijn, die we tekenen op het vlak waarin de fout zich bevindt (*figuur 34*). Deze benadering komt vrij goed overeen met een werkelijke fout die een breedte heeft van 0,15 à 0,25 mm.

5.1.1.2 Toewijzen materiaaleigenschappen

In deze stap worden de materiaaleigenschappen aan de plaat toegewezen. De ganse plaat is uit hetzelfde materiaal gemaakt; er moet enkel nog gekozen worden tussen elastisch en elastischplastisch materiaalgedrag (zie verder).

5.1.1.3 Opleggen randvoorwaarden en aanbrengen belasting

Aangezien, omwille van symmetrieredenen, slechts een vierde van de plaat wordt gemodelleerd, moeten twee randvoorwaarden opgelegd worden. Voor symmetrievlak 1 (*figuur 33*), het vlak waarop de fout is getekend, leggen we op dat er geen verplaatsing is volgens richting 3. Voor symmetrievlak 2 (*figuur 33*) leggen we dan weer op dat er geen verplaatsing is volgens richting 1.

Een volgende stap is het aanbrengen van de belasting. Aangezien op de beproefde platen een trekproef wordt uitgevoerd, leggen we een trekspanning op aan het vlak evenwijdig met het vlak waarin de fout zich bevindt (*figuur 35*).



figuur 35: De randvoorwaarden en de aangebrachte belasting

5.1.1.4 Vermazen (meshing) van de geometrie

Als laatste stap wordt de plaat onderverdeeld in een eindig aantal elementen. We zorgen er voor dat in de buurt van de fout het aantal elementen zeer groot is (dus zeer veel kleine elementen); daar willen we namelijk de spanningen, rekken en verplaatsingen bepalen. Verder weg van de fout mogen de elementen groter zijn, aangezien de spanningen, rekken en verplaatsingen ons daar niet echt interesseren. Een voorbeeld van een vermazing in de buurt van de fout is te zien in *figuur 36*.



figuur 36: Vermazing in de buurt van de fout

De driedimensionale elementen die in de EEM-simulaties gebruikt zijn, zijn zesvlakken (*hexahedra*). Het zijn spanning/verplaatsing elementen met de code C3D8R; dit betekent dat het gaat om lineaire balken met acht knopen (dus op elk hoekpunt een knoop), dat er gebruik wordt gemaakt van gereduceerde integratie en dat er controle is op het optreden van energieloze vervormingsmodes. Voor meer gedetailleerde uitleg i.v.m. deze code wordt verwezen naar APPENDIX D (ook het vermazingsalgoritme wordt hierin besproken).

5.2 Elastische modellering

Bij een elastische modellering wordt het materiaal enkel door de elastictiteitsmodulus (E = 210000 MPa) en de coëfficiënt van Poisson (v = 0,3) gekarakteriseerd. Zo veronderstellen we dus dat de plaat enkel elastisch zal vervormen. Dit strookt natuurlijk niet met de werkelijkheid (er treedt dan namelijk ook plastische vervorming op; zeker lokaal rond de kerftippen), maar een elastische modellering laat ons wel toe de spanningsintensiteitsfactoren K_l aan de foutrand te berekenen. De met ABAQUS berekende K_I 's kunnen we dan vergelijken met de theoretische K_I 's volgens Newman en Raju.

5.2.1 Bepaling van de spanningsintensiteitsfactoren K_I

De spanningsintensiteitsfactoren K_I worden in ABAQUS bepaald d.m.v. contour integraal evaluaties langs de foutrand. Zo'n evaluatie kan gezien worden als een virtuele verplaatsing van een blok materiaal dat de foutrand omringt. Elke blok materiaal wordt door contouren gedefinieerd, waarbij elke contour een ring van elementen is die de foutrand volledig omsluit. Deze elementenringen worden recursief gedefinieerd zodat ze de vorige contouren omringen. ABAQUS bepaalt automatisch de elementen die een ring vormen uit de gedefinieerde foutrand. Elke contour zorgt hierbij voor een evaluatie van de contour integraal. Het aantal evaluaties dat mogelijk is, is dus gelijk aan het aantal elementenringen.

We kunnen eigenlijk stellen dat de spanningsintensiteitsfactoren een type van contour integraal zijn.

5.2.2 Resultaten

Om realistische resultaten voor K_I te bekomen moet de vermazing in de omgeving van de foutrand voldoende fijn zijn. Bovendien mag de eerste contour niet in beschouwing worden

genomen omwille van zijn onnauwkeurigheid [21][22][23]. Dit is te verklaren door de grote spanningsgradiënten in dat gebied. Vanaf de tweede contour worden de waarden preciezer om dan te stabiliseren vanaf de derde en de vierde contour. In de simulaties zullen dan ook vier contouren beschouwd worden.

We bekijken het geval van een plaat met twee fouten, die beide een lengte van 25 mm en een diepte van 3 mm hebben. De twee fouten bevinden zich op een afstand *s* van elkaar, waarbij *s* de waarden 25, 10 en 0 mm aanneemt. Bovendien veronderstellen we dat in alle gevallen de maximaal aangelegde spanning 426 MPa bedraagt. Voor deze simulaties is de plaat (een vierde van de volledige plaat) in 40000 à 50000 elementen verdeeld; de elementen zijn het kleinst in de buurt van de fout. Eén dergelijke simulatie neemt ongeveer 15 minuten in beslag. In *grafiek 11* ziet u het verloop van K_I in functie van φ^{10} voor *s* gelijk aan 25 mm. De spanningsintensiteitsfactoren op basis van contour 1 wijken inderdaad sterk af van de theoretische waarde (Newman en Raju). De curve op basis van contour 1 wordt in het vervolg dan ook achterwege gelaten.



grafiek 11: K_I in functie van φ (s = 25 mm), de 4 contouren zijn weergegeven en de theoretische waarde is berekend op basis van de formule van Newman en Raju

Contour 2, 3 en 4 genereren wel K_I 's die in de buurt van de theoretische waarde liggen. Dat is ook te zien in *grafiek 12* waar K_I voor contour 2 vergeleken is met de theoretische K_I (K_{Iref}). De afwijking tussen die twee bedraagt minder dan 3 %.

 $^{^{10} \}varphi = 0^{\circ}$ is het punt van de foutrand dat zich het dichtst bij de andere fout bevindt.



grafiek 12: Vergelijking van K_I (contour 2) en K_{Iref} in functie van φ (s = 25 mm)

In *grafiek 13* bekijken we de situatie als we te maken hebben met een kortere afstand tussen de twee fouten (s = 10 mm). De afwijking van de K_I -waarden op basis van contour 2 t.o.v. de theoretische K_I -waarden (K_{Iref}) bedraagt nu minder dan 5 % (*grafiek 14*), dit is iets meer dan bij een afstand *s* tussen de twee fouten van 25 mm.



grafiek 13: K_I in functie van φ (s = 10 mm), de 4 contouren zijn weergegeven en de theoretische waarde is berekend op basis van de formule van Newman en Raju

De grootste afwijking (tot ± 5 %) vinden we voor φ -waarden tussen 0° en 90°. De afwijking neemt bovendien toe naarmate φ afneemt. De grotere afwijking tussen 0° en 90° is te wijten

aan het feit dat de twee fouten elkaar beïnvloeden (door de kortere afstand tussen beide fouten). Als K_I berekend wordt op basis van de formule van Newman en Raju wordt met deze wederzijdse beïnvloeding geen rekening gehouden, aangezien deze formule ontwikkeld is voor één enkele fout.



grafiek 14: Vergelijking van K_I (contour 2) en K_{Iref} in functie van φ (s = 10 mm)

Het limietgeval waarbij de twee fouten juist naast elkaar liggen (s = 0 mm) is in grafiek 15 weergegeven. Hierin is duidelijk te zien dat voor φ -waarden tussen 30° en 90° de berekende K_I 's heel wat hoger zijn dan de theoretische K_I 's. De afwijking bedraagt hier meer dan 5 % (tot 8 % zoals te zien is in grafiek 16). De reden voor deze grote afwijking is natuurlijk terug het feit dat de twee fouten elkaar beïnvloeden. We kunnen zeggen dat er interactie optreedt tussen de twee aangrenzende fouten. In grafiek 15 en grafiek 16 zijn de berekende K_I -waarden niet aangegeven voor φ -waarden tussen 0° en 30°. In deze omgeving is de simulatie namelijk niet correct door de kunstmatig opgelegde randvoorwaarden, die er in de praktijk niet zijn. We kunnen natuurlijk wel verwachten dat de K_I -waarden tussen 0° en 30° nog meer zullen afwijken van K_{Iref} . K_I bij 0° kan zelfs zo'n hoge waarden aannemen, dat brosse breuk in die omgeving niet uitgesloten is.



grafiek 15: K_I in functie van φ (s = 0 mm), de 4 contouren zijn weergegeven en de theoretische waarde is berekend op basis van de formule van Newman en Raju



grafiek 16: Vergelijking van K_I (contour 2) en K_{Iref} in functie van φ (s = 0 mm)

Het zou ook interessant zijn om de formule van R. Sethuraman te gebruiken om K_I te berekenen, aangezien die wel rekening houdt met interactie. Dit kunnen we hier echter niet doen, omdat niet aan de voorwaarden voldaan is om de formule te mogen toepassen (in de simulaties is t/d > 4 en 2d/l < 0.3).

5.3 Plastische modellering

Om meer realistische waarden van spanningen, rekken en verplaatsingen te kunnen bestuderen, maken we gebruik van elastisch-plastische simulaties van een grootschalige trekproef. Zo'n model sluit veel beter aan bij de werkelijkheid, het materiaal wordt dan namelijk voorgesteld door een vereenvoudigd spanning-rek diagram. In ABAQUS bestaat hiervoor onder andere de optie van het Ramberg-Osgood model (*deformation plasticity model*) om het materiaalgedrag te simuleren. Dit model wordt ook door een aantal geleerden waaronder Yun-Jae Kim [24] gebruikt om dergelijke simulaties uit te voeren.

5.3.1 Ramberg-Osgood model

Het Ramberg-Osgood model in ABAQUS maakt gebruik van de volgende formule:

$$E \cdot \varepsilon = \sigma + \alpha \cdot \left(\frac{|\sigma|}{YS}\right)^{n-1} \cdot \sigma$$

Daarin is *E* de elasticiteitsmodulus, ε de rek, σ de spanning en *YS* de vloeispanning. α is een compensatiefactor voor het vloeien van het materiaal en *n* is de verstevigingsexponent voor de *'plastische'* (niet-lineaire) term (*n* > 1).

Dit model beschrijft een niet-lineair materiaalgedrag voor elk spanningsniveau, maar voor veel voorkomende waarden van n (n > 5) wordt de niet-lineariteit maar significant voor spanningen in de buurt van de vloeispanning of erboven.

Om het model in ABAQUS te kunnen gebruiken, moeten we eerst de factoren α en *n* berekenen. De elasticititeitsmodulus *E* van staal is gekend en bedraagt 210000 MPa, voor de vloeispanning *YS* nemen we 471 MPa. Deze vloeispanning wordt bereikt als $\varepsilon = 0,005$ (0,5%). Als we de spanning σ gelijk stellen aan de vloeispanning *YS* geldt:

$$E \cdot \varepsilon = (1 + \alpha) \cdot YS$$

Daaruit kunnen we dus de compensatiefactor α bepalen:

$$\alpha = \frac{E \cdot \varepsilon}{YS} - 1 = \frac{210000 \cdot 0,005}{471} - 1 = 1,23$$

De treksterkte (*UTS*) van de plaat stellen we gelijk aan 564 MPa. De rek ε is dan als ruwe benadering gelijk aan 0,15 (15 %) gekozen. Uit deze gegevens kunnen we de verstevigingsexponent *n* bepalen. Er geldt dan:

In grafiek 17 ziet u het verloop van de spanning σ in functie van de rek ε .



grafiek 17: Verloop van spanning σ in functie van rek ε voor het materiaal met YS = 471 MPa, UTS = 564 MPa, E = 210000 MPa en v = 0,3

5.3.2 Resultaten

We zullen ons in eerste instantie concentreren op platen met twee identieke ellipsvormige oppervlaktefouten met een lengte van 25 mm en een diepte van 3 mm. Hierbij zullen we de invloed van de afstand *s* tussen de twee fouten bestuderen. In tweede instantie zullen we dan ook aandacht besteden aan platen met diepere en langere fouten.

Voor deze simulaties is de plaat (een vierde van de volledige plaat) terug in 40000 à 50000 elementen verdeeld, waarbij we de kleinste elementen terugvinden in de buurt van de fout. Eén elastisch-plastische simulatie neemt ongeveer 1 uur in beslag.

5.3.2.1 Platen met twee fouten met lengte 25 mm en diepte 3 mm

We bekijken eerst de verplaatsingen van het '*midden*' van de fout (*figuur 37*) in de richtingen 1, 2 en 3 als de twee fouten zich op een afstand van 25 mm van elkaar bevinden. De verplaatsing van het '*midden*' van de fout in de richting 3 (de lengterichting) is een benadering voor de COD (*crack opening displacement*) die tijdens een dergelijke proef zou opgemeten worden.



figuur 37: Het 'midden' van de fout

Deze verplaatsingen, u_1 , u_2 en u_3 genoemd, zijn uitgezet tijdens een gesimuleerde trekproef die in tien tijdstappen is uitgevoerd (*grafiek 18*). De maximaal aangelegde spanning is 426 MPa en is dus lager dan de *YS* (471 MPa). Alle verplaatsingen zijn volgens de negatieve richtingen 1, 2 en 3 en zijn zeer miniem. Verplaatsing u_1 is negatief omwille van het Poissoneffect. Trekken aan een plaat in de ene richting (richting 3) resulteert namelijk in een insnoering in een richting loodrecht daar op (richting 1). De verplaatsingen u_1 en u_3 zijn ongeveer gelijk, terwijl u_2 iets grotere waarden aanneemt. Dezelfde trends vinden we bij alle mogelijke foutgroottes en tussenafstanden terug (zie verder).



grafiek 18: De verplaatsingen u_1 , u_2 en u_3 van het 'midden' van de fout tijdens een gesimuleerde trekproef

Laten we nu eens een vergelijking maken tussen platen met twee fouten (lengte 25 mm en diepte 3 mm) met verschillende afstanden *s* tussen de fouten. We nemen *s* gelijk aan 25 mm, 12,5 mm, 10 mm, 5 mm en 0 mm.



grafiek 19: Verplaatsing u_3 van het '*midden*' van de fout tijdens een gesimuleerde trekproef voor verschillende afstanden s tussen de fouten

In *grafiek 19* is verplaatsing u_3 weergegeven tijdens een gesimuleerde trekproef. De maximaal aangelegde spanning is terug 426 MPa. Verplaatsing u_3 blijkt quasi onafhankelijk te zijn van de afstand *s* tussen de fouten. Dit is intuïtief gezien logisch, want de fouten zelf zijn telkens even groot, het is enkel de afstand tussen de fouten die verandert.

Ook de optredende spanningen rond de fouten kunnen we eens van naderbij bekijken. De meest relevante spanningen zijn de Von Mises spanning en σ_3 (de spanning in de lengterichting).

In *figuur 38* ziet men drie vooraanzichten van een plaat (een vierde van de volledige plaat) met twee identieke fouten (l = 25 mm, d = 3 mm). Het enige verschil tussen de drie is de afstand *s* tussen de fouten ((a): s = 25 mm, (b): s = 12,5 mm, (c): s = 0 mm). In de figuur is het verloop van de Von Mises spanning duidelijk gemaakt. Het spanningsverloop rond de fout is voor de drie gevallen quasi hetzelfde. De hoogste spanningen vinden we natuurlijk in de zone rond de fout en zoals op de figuur is te zien ook in de zone tussen de twee fouten. De maximale spanning die in elk van de drie configuraties optreedt, bedraagt ongeveer 500 MPa. In *figuur 38 (a)* is bovendien duidelijk te zien dat bij een afstand tussen de fouten van 25 mm de twee fouten elkaar al beïnvloeden. Het spanningsverloop is er niet volledig symmetrisch rond de fout, er is een verhoogde spanning in de zone tussen de twee fouten.



figuur 38: Von Mises spanning (vooraanzicht) voor verschillende afstanden s tussen de fouten: (a) s = 25 mm, (b) s = 12,5 mm, (c) s = 0 mm

In *figuur 39* is een vooraanzicht weergegeven van een plaat met twee fouten die 75 mm van elkaar gelegen zijn. Daarop is duidelijk te zien dat de twee fouten elkaar niet beïnvloeden (symmetrisch spanningsverloop rond de fout).



figuur 39: Von Mises spanning (vooraanzicht) voor een afstand tussen de fouten van 75 mm

In *figuur 40* is een onderaanzicht van dezelfde platen als in *figuur 38* te zien, waarbij terug de Von Mises spanning is voorgesteld. Het spanningsverloop rond de fout is terug voor de drie gevallen ongeveer gelijk. We zien dat in de zone tussen de twee fouten (uiterst links op de onderaanzichten) de spanning vrij hoog oploopt (tot \pm 500 MPa). Ook aan de andere kant van de fout (rechts op de onderaanzichten) vinden we in een kleine zone deze hoge spanning. In *figuur 40 (a)* is terug duidelijk te zien dat bij een afstand tussen de fouten van 25 mm de twee fouten elkaar al beïnvloeden (geen symmetrisch spanningsverloop rond de fout).



figuur 40: Von Mises spanning (onderaanzicht) voor verschillende afstanden s tussen de fouten: (a) s = 25 mm, (b) s = 12,5 mm, (c) s = 0 mm

Een andere relevante spanning die we bekijken is σ_3 , de spanning in de lengterichting. Bij de vooraanzichten van de platen (*figuur 41*) is terug te zien dat het spanningsverloop rond de fout quasi gelijk is voor de drie situaties.



figuur 41: σ_3 (vooraanzicht) voor verschillende afstanden *s* tussen de fouten: (a) *s* = 25 mm, (b) *s* = 12,5 mm, (c) *s* = 0 mm

In *figuur 41 (b)* is het spanningsverloop rond de fout wel niet meer volledig symmetrisch, de twee fouten beïnvloeden elkaar. De spanning σ_3 neemt hogere waarden aan dan de Von Mises spanning en bedraagt maximaal ongeveer 770 MPa. Dit maximum wordt bereikt in de zone boven de foutrand.

In *figuur 42* is het onderaanzicht van de verschillende platen getoond waarop de spanning σ_3 is aangeduid. Het spanningsverloop rond de fout is terug quasi gelijk voor de drie situaties.



figuur 42: σ_3 (onderaanzicht) voor verschillende afstanden *s* tussen de fouten: (a) *s* = 25 mm, (b) *s* = 12,5 mm, (c) *s* = 0 mm

5.3.2.2 Platen met twee fouten met lengte 25 of 50 mm en diepte 3 of 6 mm

In deze paragraaf vergelijken we de verplaatsingen u_1 , u_2 en u_3 van het '*midden*' van de fout als zich in de plaat twee fouten bevinden op een afstand van 25 mm van elkaar en als de lengte en de diepte van de fout variëren. De lengte van de fout bedraagt 25 of 50 mm en de diepte is 3 of 6 mm. In *grafiek 20* is u_1 (verplaatsing volgens de negatieve richting 1) uitgezet tijdens een gesimuleerde trekproef. De maximaal aangelegde spanning bedraagt 426 MPa. Verplaatsing u_1 blijkt quasi onafhankelijk te zijn van de diepte van de fout, en dus enkel afhankelijk te zijn van de lengte van de fout. Hoe langer de fout is, hoe groter verplaatsing u_1 is.



grafiek 20: Verplaatsing u1 van het 'midden' van de fout tijdens een gesimuleerde trekproef

De verplaatsing u_3 is uitgezet in *grafiek 21*. Hierin is duidelijk te zien dat u_3 toeneemt als de lengte of de diepte van de fout stijgt. Dit was ook te verwachten.



grafiek 21: Verplaatsing u₃ van het 'midden' van de fout tijdens een gesimuleerde trekproef

Ten slotte bekijken we ook nog eens de spanningen (Von Mises spanning) die optreden in de buurt van deze langere en diepere fouten.



figuur 43: Von Mises spanning (onderaanzicht) voor verschillende fouten (s = 25 mm): (a) d = 3 mm, l = 25 mm, (b) d = 3 mm, l = 50 mm, (c) d = 6 mm, l = 25 mm, (d) d = 6 mm, l = 50 mm

In *figuur 43* zijn de onderaanzichten van vier platen te zien waarop de Von Mises spanning is aangeduid. In elke plaat bevinden zich andere fouten: (a): d = 3 mm, l = 25 mm, (b): d = 3 mm, l = 50 mm, (c): d = 6 mm, l = 25 mm, (d): d = 6 mm, l = 50 mm. Alle fouten bevinden zich bovendien op een afstand van 25 mm van elkaar. Er is duidelijk te zien dat als de diepte of de lengte van de fouten toeneemt het gebied waar hoge spanningen (tot 525 MPa bij de grootste fout) voorkomen groter wordt. Ook het feit dat de twee fouten elkaar beïnvloeden is duidelijk in de figuur te zien (geen symmetrisch spanningsverloop rond de fout).

In *figuur 43* (c) is bvb. ook te zien dat aan weerskanten van de fout twee ongeveer even grote (maar zeer minieme) hoge spanningsgebieden (tot 525 MPa) voorkomen. Als de fout dieper wordt (*figuur 43* (d)) zijn deze hoge spanningsgebieden niet meer even groot, de twee fouten beïnvloeden elkaar duidelijk.

6 Conclusies

Aangezien de moderne stalen, die gebruikt worden voor het vervaardigen van pijpleidingen, een hoge breuktaaiheid hebben, is de kans op brosse breuk zeer klein. Toch gebeurt het keuren van lasnaden van pijpleidingen nog altijd grotendeels op basis van elastische breukmechanica. Men gaat er dus vanuit dat een eventuele breuk bros zal zijn. Dit terwijl uit heel wat grootschalige trekproeven (o.a. uitgevoerd in het Laboratorium Soete) is gebleken dat de huidige pijpleidingen sterk plastisch kunnen vervormen en dus taai zullen breken. Het werken op basis van elastische breukmechanica is natuurlijk niet onveilig, wel integendeel. Men werkt veel te conservatief waardoor lasnaden afgekeurd worden die in feite veilig zijn. Dit brengt wel onnodige kosten (uitsnijden of repareren van '*gezonde*' lasnaden) met zich mee.

Het probleem van de te conservatieve berekeningsmethodes is vooral duidelijk geworden bij de studie van het Failure Assessment Diagram (FAD). Dit diagram, dat bepaalt of een structuur veilig is of niet, is grotendeels op basis van elastische breukmechanica ontwikkeld. Bij het uitzetten van de gegevens van grootschalige trekproeven op pijpsecties is gebleken dat de theoretische faalspanning heel wat lager ligt dan de werkelijke faalspanning (opgemeten tijdens de proef) en dit vooral bij plastisch sterk vervormde pijpsecties. De theorie is dus te conservatief.

Een ander probleem dat duidelijk werd tijdens dit afstudeerwerk, is het feit dat de huidige berekeningsmethodes ontwikkeld zijn voor structuren met één enkele fout. In de praktijk bevinden er zich in bvb. een lasnaad natuurlijk meerdere fouten. De huidige normen stellen dat, indien er geen interactie is tussen twee fouten, enkel de grootste fout in rekening moet worden gebracht. Dit leidt tot onveilige situaties. De huidige formules moeten dus aangepast worden zodat met de effectieve netto sectie (de totale sectie verminderd met de twee afzonderlijke fouten) rekening wordt gehouden.

Ook de drie besproken foutinteractiecriteria zijn gebaseerd op elastisch materiaalgedrag. Ze zijn daarom niet echt geschikt voor pijpleidingen die soms grote plastische vervormingen aankunnen. Bovendien zijn deze criteria totaal verschillend, waardoor het ene criterium voor een bepaalde situatie interactie voorspelt en een ander criterium zegt dat er geen interactie is.

Ten slotte kunnen we ook uit het beperkt aantal eindige-elementen simulaties een aantal zaken concluderen. Ten eerste is duidelijk gebleken dat de spanningsintensiteitsfactor K_I stijgt door interactie tussen twee fouten. Bij twee fouten die aan elkaar raken kan K_I zelfs zo'n hoge waarden aannemen dat brosse breuk niet uit te sluiten is. Het toelaten van fouten die aan elkaar raken kan dus tot gevaarlijke situaties leiden. Ten tweede is gebleken dat de 'graad' van interactie sterk afhankelijk is van zowel de lengte als de diepte van de fouten en natuurlijk ook van de afstand ertussen. Bovendien hebben we ook gemerkt dat de opening van de scheurmond groter wordt als de lengte of de diepte van de fout groter wordt.

Dit beperkt aantal eindige-elementen simulaties laat ons natuurlijk niet toe om nieuwe en betere interactieregels te definiëren. Verder onderzoek aan de hand van uitgebreidere eindigeelementen simulaties voor alle mogelijke foutconfiguraties (verschillende foutlengtes, foutdieptes en afstanden tussen de fouten) is daarvoor nodig. Ook de invloed van een aantal materiaaleigenschappen, o.a. yield-to-tensile (Y/T) ratio en mismatch ratio, moet nog onderzocht worden.

APPENDIX A: Interactieregels

Een overzicht van de bestaande interactieregels voor verschillende foutconfiguraties [25].

Codes and Standards	d_1		$ \begin{bmatrix} 2d_1 & 2d_2 \\ \vdots & \vdots \\ \ell_1 & S & \ell_2 \end{bmatrix} $	$\begin{array}{c} \begin{array}{c} t_1 \\ \hline \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ $				
JSME	$S \leq \max(d_1, d_2)$	S≦max(2d1,2d2)	$S \leq \max(2d_1, 2d_2)$	$S \leq \max(2d_1, d_2)$				
(2002)	Note: S = 0 for SCC and Fatigue Crack Growth							
ASME	$S \leq \max(0.5d_1, 0.5d_2)$	$S \leq \max(d_1, d_2)$	$S \leq \max(d_1, d_2)$	$S \leq \max(d_1, 0.5 d_2)$				
(2003)	Note: S = 0 for SCC and Fatigue Crack Growth							
BS PD6493 (1991)	$S \leq \min(\ell_1, \ell_2)$	$S \leq (d_1 + d_2)$	$S \leq \min(\ell_1, \ell_2)$	$S \leq (d_1 + d_2)$				
BS 7910 (1999)	$S \leq \min(\ell_1, \ell_2)$ for d ₁ /0.5 ℓ_1 or d ₂ /0.5 $\ell_2 > 1$ S = 0 for d ₁ /0.5 ℓ_1 or d ₂ /0.5 $\ell_2 < 1$	$S \leq (d_1 + d_2)$	$S \leq \min(\ell_1, \ell_2)$ for d ₁ /0.5 ℓ_1 or d ₂ /0.5 $\ell_2 > 1$ S = 0 for d ₁ /0.5 ℓ_1 or d ₂ /0.5 $\ell_2 < 1$	S≦(d₁+d₂)				
	Note: 1) If multiple flav neighbors. It i 2) It is not neces	ws exist, each flaw should b is not normally necessary to sary to apply interaction cri	e checked for interaction with e consider further interaction of o teria in a fatigue assessment	each of its effective flaws.				



APPENDIX B: Bepaling van de 'Failure Assessment Line'

Bepaling $van f(L_r)$ voor optie 1, de standaard analyse optie.

De procedure voor materialen zonder Lüders plateau verloopt als volgt:

Voor $L_r \leq 1$:

$$f(L_r) = (1 + 0.5 \cdot L_r^2)^{-1/2} \cdot (0.3 + 0.7 \cdot e^{-\mu \cdot L_r^6})$$

met
$$\mu = \min\left[\frac{0.001 \cdot E}{YS}; 0.6\right]$$

Voor $L_r = 1$:

$$f(1) = (1+0,5)^{-\frac{1}{2}} \cdot (0,3+0,7 \cdot e^{-\mu})$$

Voor $1 \le L_r \le L_r^{\max}$ met $L_r^{\max} = 0.5 \cdot \left(1 + \frac{UTS}{YS}\right)$:

$$f(L_r) = f(1) \cdot L_r^{N-\frac{1}{2} \cdot N}$$

met
$$N = 0.3 \cdot \left(1 - \frac{YS}{UTS}\right)$$

Voor $L_r > L_r^{\max}$:

$$f(L_r) = 0$$

Voor $L_r \leq 1$:

$$f(L_r) = (1 + 0.5 \cdot L_r^2)^{-1/2}$$

Voor $L_r = 1$:

$$f(1) = \left(\lambda + \frac{1}{2 \cdot \lambda}\right)^{-1/2}$$

met
$$\lambda = 1 + \frac{E \cdot \Delta \varepsilon}{YS}$$

met

$$\Delta \varepsilon = 0.0375 \cdot \left(1 - \frac{YS}{1000} \right)$$

Voor
$$1 \le L_r \le L_r^{\max}$$
 met $L_r^{\max} = 0.5 \cdot \left(1 + \frac{UTS}{YS}\right)$:

$$f(L_r) = f(1) \cdot L_r^{N-1/2 \cdot N}$$

met
$$N = 0.3 \cdot \left(1 - \frac{YS}{UTS}\right)$$

Voor $L_r > L_r^{\max}$:

$$f(L_r) = 0$$
APPENDIX C: MATLAB-programma

Hieronder zijn twee deelprogramma's van het zelfgeschreven MATLAB-programma weergegeven. Het volledige programma is beschikbaar op CD-ROM bij de promotor van dit afstudeerwerk.

Het eerste deelprogramma dat is weergegeven (blz. 96-99) rekent de experimentele gegevens (van grootschalige trekproeven uitgevoerd in het Laboratorium Soete) om zodat ze in een FAD (optie 1) kunnen worden uitgezet. Het tweede deelprogramma (blz. 100-102) plot een FAD (optie 1) voor materialen zonder Lüders plateau, zet de experimentele gegevens uit in dit FAD en bepaalt de positie van deze gegevens t.o.v. de '*Failure Assessment Line*'.

	8
Failure Assessment Diagram of FITNET Standard Option 1	option1YSavg471TSavg564temp10;
ő unitendi – eneretell ad Chevera etter Jacob Chever of These Dated Monered Lacort of These Dated	input = 1;
where = questing choose us input reserved, input of test bats); Give the Name of the Input File, Manual Input of Test Dats);	elæif ((sigma_y_pipe == 471) & (sigma_u_pipe = 564) & (tex_bmperature = -40))
s (stremp(button3, Manual Input of Test Data)=1)	% option1Y Sav g471TS av g564 temp40;
% innut = 0	input = 1; %
	else if ((sigma_y_pipe == 484) & (sigma_u_pipe = 547) & (test_tempe rature = -40))
withe (uput = v)	w option1 Y Sav #48 4T Sav #547 ;
$\frac{6}{66}$ Input of material properties of pipe	input = 1;
w prompt1 = {'Mean Yield Strength of Pipe at Room Temperature (MPa)'	w elæif ((sigma_y_pipe == 498) & (sigma_u_pipe == 608) & (test_temperature == -25))
Mean Ultimate Tensile Strength of Pipe at Room Temperature (MPa); Modulus of Elasticity of Pipe (MPa),	%
i test temperature (۲۰۰۲ ;; dig_titlet = "Input of some Material Properties of Pipe and Test Temperature",	option 1 1 Sav gays 1 Sav gous; input = 1;
num_lines1 = 1; defa.cet = research	% alasif (/cioma v nina 550) & /cioma v nina 603) & /taat tamaarahun 100)
strength1 = it ; ; ; ; ; ; ; ; ; ; ; ; ; ; ; ; ; ;	% %
sigma_y_pipe = st2num(strength1(1,1)); sione n pice = st2num(strenoth1(2,1));	option! Y Sav g550TSav g603; inout = 1:
aguarPre = succession.comparenter.com.com	and the second se
test_temperature = su2num(surength1{4,1});	elseif ((sigma_y_pipe == 547) & (sigma_u_pipe = 603) & (test_temperature = -10)) ∞
∞ % Temperature correction of yield strength and ultimate tensile strength	option1 Y Sav g547T Sav g603;
% disease a missionemental — disease a missi 1065/401 +1 04644 Americana 100 M. Denamina - 5 27 /077ND75	input = 1;
sgme_y_ptpe_conceted = signe_y_ptp+10^2(491+1.0**est_emperature)-109 % Formula p.2.47 (FITNET) sigme_u_ptpe_corrected = signe_u_ptp+10^5(491+1.8*test_temperature)-189 % Formula p.5.27 (FITNET)	else 2
% sigma_flow_pipe_corrected= (sigma_y_pipe_corrected+sigma_u_pipe_correctedy2;	³⁶ button4 = questdlg(Give the correct Input, Wrong Input, 'OK, 'OK');
% % Innut of test results	Input = 0; %
50 M	end
if ((sigma_y_pipe == 436) & (sigma_u_pipe == 525) & (test_temperature == -40)) &	50 send:
option1YSavg436TSavg525;	
input=1; c c c c c c c c c c c c c c c c c c c	elseif(strcmp(button3,'Give the Name of the Input File)=1)
else if ((sigma_y_pipe == 443) & (sigma_u_pipe == 524) & (test_temperature == -40))	$prompt2 = \{Name of Input File ending with txt'\}$
% option1YSavg443TSavg524;	$dg_{-} dw z = taput of twane of taput rue;$ num_lines2 = 1;
input= 1;	defAns2 = {*};
% elseif ((sigme_y_pipe == 454) & (sigme_u_pipe == 524) & (est_lemperature == -40))	strength2 = inputdig(prompt2,dig_ttile2,num_lines2,detAns2); name_input_file = strength2(1,1);
% and and VO and SATO and SA	(k) 10. Toront of test months
opeout roavgetet toavgetet,	without on most resource of the second se
% ekstif ((siems v pice == 455) & (siems u pice == 522) & (test termerature == -10))	[lemp_diam_t_W_W300_CT0Dmin_CT0Dave_CVNmin_CVNave_LI_H1_s_L2_H2_meetstrait maxtress YSminweld YSsroweld
	TSav gweld_YSminpipe_YSavgpipe_TSavgpipe_] = textread(name_input_file,
option1YSavg455TSavg522; inout = 1:	'હતે જેતે જેતે જેતે જેતે જેતે જેતે જેતે જ
	(intervention) = transpose (temp_)
elserf ((sigma_y_pipe == 4/1) & (sigma_u_pipe == 564) & (lest_femperature == -10))	$diam = transpose(diam_);$

```
Kmat(n) = sqrt(1.4*E_pipe*sigma_flow_pipe_corrected*CTOD_min(n)); % Kmat in MPa*sqrt(mm)
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             Kmat(n) = sqrt(1.4*E_pipe*sigma_flow_pipe_corrected*CTOD_avg(n)) % Kmat in MPa*sqrt(mm)
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        button7 = questdlg('Choose the Toughness Value', Material Toughness, 'CVNavg', 'CVNmin', 'CVNavg');
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         Kmat(n) = sqrt(0.64*CVN_min(n)*E_pipe*10^3)*10^(-3)*sqrt(1000); % Kmat in MPa*sqrt(mm)
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               % Engineering and design - Inspection, evaluation and repair of hydraulic shel structures
% chapter 7 - Examples and Material Standards, 2001
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        % Engineering and design - Inspection, evaluation and repair of hydraulic steel structures
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         % Engineering and design - Inspection, evaluation and repair of hydraulic steel structures
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            % chapter 7 - Examples and Material Standards, 2001
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             % chapter 7 - Examples and Material Standards, 2001
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               elseif (strcmp(button?,'CTODavg')=1)
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              elseif (strcmp(button7,'CVNavg')=1)
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      % US Army Corps of Engineers
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              % US Army Corps of Engineers
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     % US Army Corps of Engineers
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           if (strenp(button7,'CVNmin')=1)
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          elseif (strcmp(button6, CVN')=1)
                                                    for n = 1 : number_of_inputs
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            for n = 1 : number_of_inputs
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             for n = 1 : number_of_inputs
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 for n = 1 : number_of_inputs
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             % Formula p.4
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          % Formula p.4
                                                                                                                                                                 toughness = 1;
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          toughness = 2;
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                to ughness = 3;
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            % Formula p.2
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         toughness = 4;
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        ø
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           s
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   8
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      end;
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         end:
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     end:
28
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        ъŝ
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              28
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  end:
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                8
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              8
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            8
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               28
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    button5 = questdlg(Input of Toughness (= Calculation of Kmat) or Input of Kmat,Input or Calculation of Kmat,Input of
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                button? = questdlg(Choose the Toughness Value', Material Toughness', CFODavg', CTODmin', CTODavg');
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 sigma,
_ pipe_conceted = YS_avg_pipe(1)+10^5/(491+1.8*emp(1))-189 % Formula p.5-27 (HTNET) sigma,
u_pipe_conceted = TS_avg_pipe(1)+10^5/(491+1.8*emp(1))-189 % Formula p.5-27 (HTNET) sigma,
_ Pipe_conceted = TS_avg_pipe(1)+10^5/(491+1.8*emp(1))-189 % Formula p.5-27 (HTNET) sigma,
_ Pipe_conceted = TS_avg_pipe(1)+10^5/(491+1.8*emp(1))-189 % Formula p.5-27 (HTNET) sigma,
_ Pipe_conceted = TS_avg_pipe(1)+10^5/(491+1.8*emp(1))-189 % Formula p.5-27 (HTNET) sigma,
_ Pipe_conceted = TS_avg_pipe(1)+10^5/(491+1.8*emp(1))-189 % Formula p.5-27 (HTNET) sigma,
_ Pipe_conceted = TS_avg_pipe(1)+10^5/(491+1.8*emp(1))-189 % Formula p.5-27 (HTNET) sigma,
_ Pipe_conceted = TS_avg_pipe(1)+10^5/(491+1.8*emp(1))-189 % Formula p.5-27 (HTNET) sigma,
_ Pipe_conceted = TS_avg_pipe(1)+10^5/(491+1.8*emp(1))-189 % Formula p.5-27 (HTNET) sigma,
_ Pipe_conceted = TS_avg_pipe(1)+10^5/(491+1.8*emp(1))-189 % Formula p.5-27 (HTNET) sigma,
_ Pipe_conceted = TS_avg_pipe(1)+10^5/(491+1.8*emp(1))-189 % Formula p.5-27 (HTNET) sigma,
_ Pipe_conceted = TS_avg_pipe(1)+10^5/(491+1.8*emp(1))-189 % Formula p.5-27 (HTNET) sigma,
_ Pipe_conceted = TS_avg_pipe(1)+10^5/(491+1.8*emp(1))-189 % Formula p.5-27 (HTNET) sigma,
_ Pipe_conceted = TS_avg_pipe(1)+10^5/(491+1.8*emp(1))-189 % Formula p.5-27 (HTNET) sigma,
_ Pipe_conceted = TS_avg_pipe(1)+10^5/(491+1.8*emp(1))-189 % Formula p.5-27 % Formul
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               button6 = questdlg('Choose the Toughness Value','Material Toughness', CTOD', CVN', CTOD');
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        sigma_flow_pipe_corrected = (sigma_y_pipe_corrected+sigma_u_pipe_corrected)/2;
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   % Temperature correction of yield strength and ultimate tensile strength
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            strength3 = inputdlg(prompt3,dlg_title3,num_lines3,defAns3);
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 prompt3 = {'Modulus of Elasticity of Pipe (MPa)'};
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          dlg_title3 = 'Input of Modulus of Elasticity of Pipe';
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         f (stremp(button5, Input of Toughness')=1)
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               YS_min_weld = transpose(YSminweld_);
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   YS_avg_weld = transpose(YSavgweld_);
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 max_test_strain = transpose(max strain_);
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            TS_avg_weld = transpose(TSavgweld_);
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          max_test_stress = transpose(max stress_)
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                YS_min_pipe = transpose(YSminpipe_);
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          YS_avg_pipe = transpose(YSavgpipe_);
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   TS_avg_pipe = transpose(TSavgpipe_);
                                                                                                                                                            CTOD_min = transpose(CTODmin_);
                                                                                                                                                                                                           CTOD_avg = transpose(CTODavg_);
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   if (stremp(button7, 'CTODmin')=1)
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            Input of Kmat', Input of Toughness');
                                                                                                                                                                                                                                                                               CVN_min = transpose(CVNmin_);
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           E_pipe = str2num(strength3{1,1});
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              CVN_avg = transpose(CVNavg_);
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       (stremp(buttons, CTOD)=1)
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                % Input or calculation of Kmat
                                              W = transpose(W_);
W300 = transpose(W300_);
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   number_of_inputs = numel(t);
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           H1 = transpose(H1_);
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          s = transpose(s_);
L2 = transpose(L2_);
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       L1 = transpose(L1_);
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             H2 = transpose(H2_)
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            Kmat_method= 1;
     t = transpose(L);
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    num_lines3 = 1;
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             defArms3 = {'};
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       Foughness',
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              ŝ
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             æ
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       Ś
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               8
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          and:
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     Ś
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       8
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     8
```

```
button12 = questdlg('Limit Load UGent with Rectangular or Elliptical Defect,'Cakulation of Lr,'Rectangular
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            (term_1(n)+(term_1(n)^2+9*max_bst_stress(n)^2*term_2(n))^0.5)(3*sigma_y_pipe_corrected*term_2(n));
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        button11 = questd1g(Choose the Calculation Method for Lr, Calculation of Lr, Goodall, Limit Load
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                \label{eq:linear} \begin{split} Lr(n) = max\_bst\_stress(n)(sigma\_y\_pipe\_corrected^{*}(1-H(n)^{*}total\_bngth(n)(W(n)^{*}t(n)))); \\ & \leqslant \\ & \leqslant \end{split}
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       term_2(n) = (1-gamma(n))^{4}2+2^{4}gamma(n)^{4}(H(n)^{4}(n)-gamma(n));
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    if (strcmp(button11,'Goodalf)=1) % Global solution, plats geometry
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             \begin{array}{l} Kr(n)=Kl(n)Kmat(n);\\ zeta(n)=H(n)^{4}(otal\_bength(n)'((t(n))^{6}(total\_bength(n)+2^{9}((n)));\\ Lr(n)=mac\_tesl\_sues(n)'((1-zeta(n)))^{5}igma\_y\_pipe\_corrected); \end{array}
                                                                                                                                                                                                                                                                                elseif(strcmp(button10;Sattari)=1)% Local solution, plate geometry
                                                                                                                                                        Ln(n) = max_test_stress(n)(sigma_y_pipe_corrected);
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          gamma(n) = (H(n)^{total_length(n)})/(W(n)^{t(n)});
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           term_1(n) = 3*gamma(n)*max_test_stress(n);
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      elseif (strcmp(button11,'Limit Load UGenf)=1)
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     if (stremp(button12,'Rectangular Defect)=1)
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            Defect",...
'Elliptical Defect';Rectangular Defect');
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              elseif (strcmp(button10,'0ther Method)=1)
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  for n = 1 : number_of_inputs;
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 for n = 1 : number_of_inputs
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             Kr(n) = KI(n)/Kmat(n);
                                                             for n = 1: number_of_inputs;
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     for n = 1: number_of_inputs;
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           Kr(n) = KI(n)/Kmat(n);
                                                                                                                    Kr(n) = KI(n)/Kmat(n);
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               UGent, 'Kastner', 'Goodall');
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       Lr_{uethod} = 3;
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   Lr_method = 4;
     Lr_method = 1;
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          Lr_method = 2;
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        =(0)=
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    8
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         8
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    and:
                                                                                                 ŝ
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             ŝ
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     8
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     8
                                                                                                                                                                                                                        end:
Kmat(n) = sqrt(0.64*CVN_avg(n)*E_pipe*10^3)*10^(-3)*sqrt(1000); % Kmat in MPa*sqrt(mm)
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   outtor9 = questdlg('Choose the Calculation Method for KI,'Calculation of KI,'Newman and Raju','Raju
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             button10 = questd1g(Choose the Cakulation Method for Lr', Cakulation of Lr', FITNET', Sattari, Other
Method', FITNET);
                                                                                                                       % Engineering and design - Inspection, evaluation and repair of hydraulic steel structures
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     defArs4 = {*};
strength4 = inputdig(prompt4,dig_title4,num_lines4,defAns4);
                                                                                                                                                   % chapter 7 - Examples and Material Standards, 2001 %
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          Kmat(n) = K_mat; % Kmat in MPa*sqrt(m)
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        sheif (strcmp(button9,'Raju Sethuraman')=1)
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            if (stremp(button9, Newman and Raju')==1)
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     sheif (stremp(button5,'Input of Kmat')==1)
                                                                                        % US Army Corps of Engineers
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            prompt4 = {'Kmat (MPa*sqrt(m))' };
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  K_mat = str2num(strength4{1,1});
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        if (strenp(button10,'FITNET')=1)
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       Sethuraman', Newman and Raju');
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               for n = 1: number_of_inputs
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        dlg_title4 = 'Input of Kmat';
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     % Calculation of Kr and Lr
                                                             % Formula p.2
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            Newman_and_Raju;
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  Kmat_method = 2;
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            Raju_Sethuraman;
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           % Calculation of KI
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         num_lines4 = 1;
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          KLmethod= 1;
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              KLmethod = 2;
                                      Ś
                                                                                                                                                                                                                     end;
                                                                                                                                                                                                                                                    8
                                                                                                                                                                                                                                                                                   end;
                                                                                                                                                                                                                                                                                                              8
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 ß
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        8
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       end;
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             end;
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   8
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          Ś
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            Ś
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                8
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     S
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      8
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            8
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         Ś
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               8
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       ģ
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                j
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        ß
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     хð
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             28
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       8
```

```
%
Kr(n) = KI(n)Kmat(n);
Lr(n) = max_bst_stress(n)'(sigma_y_pipe_corrected*(1-pi*H(n)*totaLlength(n)/(4*W(n)*t(n))));
%
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 button13 = questdlg(Shape of Stress-Strain Curve; Material Behaviour; Continuous Stress-Strain Curve,...
Stress-Strain Curve with Luder's Plateau', Continuous Stress-Strain Curve');
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        \begin{split} term_{-1}(n) &= pi^*(1-H(n)'t(n))+2^*H(n)'t(n)^*sin(total\_kength(n)'diam(n)); \\ term_{-2}(n) &= (1-H(n)'t(n))^*(p+(total\_kength(n)'diam(n))^*(H(n)'t(n))); \\ L_{-1}(n) &= mac\_lest\_stress(n)^*term_{-1}(n)'(sigma\_y\_pipe\_corrected^*term_{-2}(n)); \\ \% \end{split}
                                                                                                                                                                                                                                                                                       elseif (strcmp(button11, Kastner)=1) % Local solution, pipe geometry
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      ekeif (strcmp(button13, 'Stress-Strain Curve with Luder's Plateau')==1)
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       if (stremp(button13,'Continuous Stress-Strain Curve')=1)
                   %
elseif (stremp(button12,Elliptical Defect)==1)
%
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      FADoption1discontinuousyielding;
%
                                                                                          for n = 1 : number_of_inputs;
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        FADoption1continuousyielding;
%
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        for n = 1 : number_of_inputs
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  % Failure Assessment Diagram
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       Kr(n) = KI(n)/Kmat(n);
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           Lr_method = 5;
%
end;
                                                                                                                                                                                                                       end;
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     end;
%
end;
                                                                                                                                                                                                                                             8
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     8
                                                                                                                                                                                                                                                                      end;
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      8
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  8
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    8
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     % end;
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        end;
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               8
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   ĸ
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 8
```

N = 0.3*(1-sigma_y_pipe_corrected/sigma_u_pipe_connected); % Estimation of strain hardening exponent fLr2 = f1, *1-r2^A((N-1)/(2*N)); plot(Lr2, fLr2, fLinestyk/:*, Cohr/, V, LineWidth, 2) Lr_max = 0.5*(1+sigma_u_pipe_corrected/sigma_y_pipe_corrected); % Definition of f(Lr) curve for material with continuous yielding mu = min([0.001*R_pipe/sigma_y_pipe_comected 0.6]); fLr1 = (1+0.5 *Lr1.^2).^{(c1/2)}.*(0.3+0.7.*exp(-mu*Lr1.^6)); plot(Lr1,fLr1,Tinestyle,'-',Cohx',b,T.ineWidth',2) bold on title ('Failure Assessment Diagram', FontWeight', bold') text(Lr(n),Kr(n),[',',num2str(a)],'FontSize',10) Y = [0 fL/2_max]; line(X, Y, LineStyle', -', Color', b', LineWidth', 2) fl = (1+0.5)^(-1/2)*(0.3+0.7*exp(-mu)); % Plot of Kr and Lr value of test results fLr2_max = f1*Lr_max^((N-1)/(2*N)); set(get(gca, ylabel), Rotation(,0.0) xx = zeros(1, number_of_inputs); yy = zeros(1, number_of_inputs); fix = ones(1, number_of_inputs); % for n = 1 : number_of_inputs; Lr2 = 1 : 0.00001 : Lr_mex; X = [Lr_max Lr_max]; Lrl = 0 : 0.00001 : 1; $\begin{array}{l} x = [Lr(n)]; \\ y = [Kr(n)]; \\ plot(x,y,*g) \end{array}$ % Plot of FAD (T)label(ل) ylabel(K_r) a=a+1; hold on % hold on hold on hold on a = 0;8 8 end; 8 8 ĸ 8 8 8 22 2 ź z 8 28 23 23 ŝ

 $fxx(n) = (1+0.5*xx(n)^{4}2)^{6}(-1/2)^{4}(0.3+0.7*exp(-mu*xx(n)^{6}6));$ $f(x(n) = f(1)^{*}(x(n)^{*}((N-1)^{*}(2^{*}N)))$ xx(n) = a/100000 *Lr(n); yy(n) = a/100000 *Kr(n); a = a+1;xx(n) = a/100000 + Lr(n); yy(n) = a/100000 + Kr(n);yy(n) = a/100000*Kr(n); for n= 1 : number_of_inputs for n = 1 : number_of_inputs xx(n) = a/100000*Lr(n);for n = 1 : number_of_inputs while $(xx(n) < Lr_max)$ while (yy(n) < fxx(n))% Intersection with FAD while (yy(n) < fxx(n)) $if(xx(n) > Lr_max)$ xx(n) = 0;yy(n) = 0;f(x(n)) = 1;a = a+1; if (xx(n) > 1) f(x) = 1;xx(n) = 0;yy(n)= 0; a = a+1;a = 1; a = 1; 8 8 8 8 end; ⊗end; a= 1; end; 8 8 8 8 8 8 8 end: end; 8

8 end;

8

8

8

8 end; 8

8

$XX(n) = L_{n-1}nxx_{n}$	text(0.05, max([(Krmaxmax*17/50) 1.1*17/50]),['L_r: ',num2str(button11),': ',num2str(button12),': '
end;	$(1 - L_1 + L_2)$
% ***	26
etta. Re	ello, A
% Print results in MATLAB-window	elseif(space = 1)
% LrLr= transpose(Lr);	% if (Lc metbod == 1)
KrKr = transpose(Kr);	66 teaction 0.5 means (174 means wave \$17,550, 1,1,1317/500), PT == 1, means 2 methods and 10,010.
$\lambda t \lambda t = \text{ususpose}(\lambda y);$ $\gamma y y = \text{transpose}(\gamma y);$	evices)) assumed as the second se
$\begin{array}{llllllllllllllllllllllllllllllllllll$	elseif (Lr_method=2)
disp(result);	xex(0.05,max([(Krmaxmax*17/50) 1.1*17/50]),[1_r. ',num2str(button10),': ',num2str(button8),': 1 = L1 + L2 + s]);
% % Plot of intersection points with FAD	seifi (Lr_method = 3) (Lr_method = 5)
% b=0;	% text(0.05,max([(Krmaxmax+17/50) 1.1+17/50]),[1,∟r: ',num2su(button11),': ',num2su(button8),': 1 = ∟1 + ∟2 + s]);
% forn=1: number of innute	% elseif (1 method — 4)
$\mathbf{x} = [\mathbf{x}\mathbf{x}(\mathbf{n})]$	<pre>text(0.05,max([(Krmaxmax*17/50) 1.1*17/50]),['L_r: ',num2str(button11),': ',num2str(button12),':</pre>
y= (yy(u)).	(1 - 1 - 1)
b = b + 1	
100H 0D %	end, %
end; «	elsetf(space = 2)
bold on	$if(Lr_{\rm method} == 1)$
8°.	
Lrmax = max (Lr); Lrmax max = Lrmax +0.1;	text(0.05, max([(Krmax.max*17/50) 1.1*17/50]),[1r: ',num2str(button10)]); %
Kimax = max(Ki);	elseif (Lr_method $= 2$)
Kımaxınax = Kımaxı+0.1; axis (10 max(IL:maxmax_Lr_max+0.11) 0 max(IK:maxmax_1.11)))	% text/0.05.max/f/Krmax.max+17/50).1.1+17/50).f1. rr .1.nm2strbutton[0).f11.nm2strbutton8)]r
text(0.05, max ([(Kumaxmax #21/50) 1.1#21/50]), [Base Material: Continuous Stress-Strain Curve']); ec.	elseif (Lr_method = 3) (Lr_method = 5) α_{cc}
$ii'_{\infty}(space == 0)$	iext(0.05, max([(Krmaxmax*17/50) 1.1*17/50]), [1_r.r.*, num2stv(button11),::*, num2stv(button8)]);
if $(L_{r} = 1)$	else if (1_r_method = 4)
 ext(0.05, max([(Krmax.max *17/50) 1.1*17/50]);['L_r: ',num2st(button10)]);	text(0.05, max([(Krmax.max*17/50) 1.1*17/50]),[1_r. ; , num2str[button11],; ; , num2str[button12],;
% elseif (L_Lmethod = 2)	, num2str(buttonb)J.; %
% terti0.05 mer/frKrmermar #17/50) 1.1#17/50h.f1. r: ' num%tfvbutton[0,': ' num%tr/button8)': [= 1 1 + 1 2]);	end; e
	end;
elseif (Lr_method = 3) I (Lr_method = 5) $\%$	% if (KLmethod= 1) & (space = 0)
text(0.05 , max([(Kimaxmax*17/50) 1.1*17/50]),[L_r: ',num2su(button11),': ',num2su(button8),': 1 = L1 + L2]); $\frac{1}{100}$	% text/0.05 mars/OV/measures if \$550.1.1.1.84.5550.0 PV_1.1 mars/historial/1.1.1 mars/historial/0.1.1.1.1.1.1.1.01b
$_{\rm Ve}^{\rm Ve}$ else if (Lr method = 4)	EX $(0.05, 0.03, 0.05)$ ((ATTREATERS * 1.2.207) 1.1 * 1.2.207) (A.L.: , 10011-201 (country); ; , 10011-201 (country); ; 1 = L.1 + L.4 I) %
26 July 20 Jul	elseif(KLmethod = 1) & (space = 1)

```
txt(0.05,max([(Krmsxmax*15/50) 1.1*15/50]),[K_E ',num2str(buttor9),: Defect with biggest Length and Depth]);
                           txt(0.05,max([(Krmaxmax*15/50) 1.1*15/50]),[K_b ',num2str(button9),: ',num2str(button8),: 1 = L1 + L2 + s']);
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   text(0.05, max([(Kmnaxmax*7/50), 1.1*7/50)),[UTS_a.v_2__b_a.s_e @ RT=',num2str(TS_av2_pipe(1)),'MPa']);
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     text(0.05, max ([(Kunaxmax *9'50) 1.1 *9/50]),['YS_a_v_g_b_a_s_e @ RT = ',num2str(YS_avg_pipe(1)),' MPa]);
                                                                                                                                                                    text(0.05,max([(Krmaxmax*15/50) 1.1*15/50]),[K_F ',num2str(buttor9),: ',num2str(button8)]);
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 text(0.05, max([(Krmaxmax*3/50) 1.1*3/50]),[Test Temperature = ',num2str('e.mp(1)), "C']);
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             text(0.05, max([(Krmaxmax*5/50) 1.1*5/50]),['E_b_a_s_e = ',num2str(E_pipe),' MPa']);
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                text(0.05,max([(Krmaxmax*13/50) 1.1*13/50]),[K_m_a_t = ',num2str(K_mat)]);
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            text(0.05,max([(Krmsxmax*13/50) 1.1*13/50]),[K_m_a_t: CTOD_m_Lin]);
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 text(0.05,max([(Krmexmex*13/50) 1.1*13/50]),['K_m_a_t: CTOD_a_v_g]);
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         text(0.05,max([(Krmaxmax*13/50) 1.1*13/50]),[K_m_a_t: CVN_m_L_n]);
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           text(0.05,max([(Krmaxmax*13/50) 1.1*13/50]),[K_m_a_t: CVN_a_v_g']);
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         sigma_measured(n) = sqrt(Lr(n)^2+Kr(n)^2);
sigma_predicted(n) = sqrt(xx(n)^2+yy(n)^2);
proportion(n) = sigma_measured(n)'sigma_predicted(n);
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 % Calculation of sigma_predicted and sigma_measured
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             e beif (Kmat_method == 1) & (toughness == 2)
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  e keif (Kmat_method == 1) & (toughness == 3)
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       else if (Kmat_method == 1) & (toughness == 4)
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              if (Kmat_method == 1) & (toughness == 1)
                                                                                               elseif (KI_method == 1) & (space == 2)
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      save result.doc result -ascii -tabs
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           for n = 1 : number_of_inputs
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            elseif (Kmat_method == 2)
                                                                                                                                                                                                                                     elseif (KI_method = 2)
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  hold off;
                                                                                                                                     x
                                                                                                                                                                                                                                                                          8
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        8
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  8
8
                                                                    8
                                                                                                                                                                                                         8
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   8
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    8
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             8
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                8
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        8
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  Ś
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             end;
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             end:
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    ģ
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       8
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             8
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 8
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  8
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      8
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            8
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  8
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            8
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           8
```

```
solution = cat(2, sigma_pred, sigma_meas, prop);
sigma_mess = transpose(sigma_measured);
                                 sigma_pred = transpose(sigma_predicted);
                                                                                                                              disp( predict measure proportion);
disp(solution);
                                                                                                                                                                                                                                 save solution.xls solution -ascii -tabs
                                                                  prop = transpose(proportion);
                                                                                                                                                                                             8
```

8

8

APPENDIX D: Gebruikte elementen in ABAQUS

Een woordje uitleg over C3D8R, de code van het element dat gebruikt wordt in de ABAQUSsimulaties.

In ABAQUS wordt het gedrag van een element gekarakteriseerd d.m.v. vijf zaken:

- de elementfamilie
- het aantal vrijheidsgraden
- het aantal knopen
- de elementformulering
- de integratie

Het element C3D8R behoort tot de elementfamilie C; dit is de familie van de continuümelementen.

De vrijheidsgraden zijn de fundamentele variabelen die berekend worden tijdens de analyse. Voor een spanning/verplaatsing simulatie zijn de vrijheidsgraden de translaties (3); deze vrijheidsgraden worden altijd in de knopen van het element berekend. Voor elk ander punt in het element, worden de verplaatsingen bekomen door te interpoleren tussen de verplaatsingen van de knopen. De interpolatieorde wordt bepaald door het aantal knopen dat het element heeft. Elementen die enkel knopen op de hoekpunten hebben gebruiken lineaire interpolatie in elke richting en worden lineaire of eerste-orde elementen genoemd.

Typisch wordt ook het aantal knopen in een element vermeld in zijn naam. Het balkelement met acht knopen dat in de simulaties gebruikt is, wordt daarom C3D8 genoemd.

Een elementformulering refereert naar de wiskundige theorie die gebruikt wordt om het gedrag van het element te definiëren. Alle spanning/verplaatsing elementen in ABAQUS zijn gebaseerd op de materiaalbeschrijving van het gedrag: het element vervormt dus met het materiaal.

ABAQUS gebruikt numerieke technieken om verschillende zaken over het volume van elk element te integreren. Bij de gekozen continuümelementen is er keuze tussen volledige en gereduceerde integratie. Bij een volledige integratie wordt de stijfheid van het systeem overschat. Het is daarom denkbaar dat door een gereduceerde integratie een betere benadering van de stijfheid zou bekomen worden. Een gereduceerde integratie betekent minder integratiepunten en dus minder rekenwerk en levert in de praktijk vaak betere resultaten op. Gereduceerde integratie heeft evenwel ook nadelen. Onvolledige integratie kan namelijk aanleiding geven tot een stijfheidsmatrix waarvan de rang kleiner is dan wanneer hij exact zou berekend zijn. Dat betekent dat er naast de starre verplaatsingen nog andere verplaatsingsvelden bestaan, we spreken van energieloze vervormingsmodes. De meeste energieloze modes worden door de assemblage met vele andere elementen omgezet in '*lage*'energiemodes. Wanneer hun bijdrage tot de oplossing groot is, springt dat bij het bekijken van de oplossing nog dadelijk in het oog. Wordt de '*lage*'-energiemode nauwelijks geëxciteerd, dan is de oplossing goed bruikbaar. De mogelijkheid bestaat echter dat de '*lage*'-energiemode een zodanige bijdrage heeft dat ze de oplossing ernstig verstoort, maar dat ze anderzijds nog niet dusdanig overheersend wordt dat de gebruiker erdoor gealarmeerd wordt. Een dergelijke situatie moet absoluut vermeden worden. Er zijn verschillende methodes ontwikkeld om het optreden van energieloze modes te vermijden. De methode die in de simulaties gebruikt is, is het bijvoegen van een kunstmatige stijfheid tegenover de energieloze modes.

Een woordje uitleg over het gebruikte vermazingsalgoritme.

Het vermazingsalgoritme dat gebruikt wordt in de simulaties, is het gemiddelde as algoritme (*medial axis algorithm*). Dit algoritme verdeelt eerst het te vermazen gebied in een aantal eenvoudige gebieden. Vervolgens worden gestructureerde vermazingstechnieken gebruikt om elk eenvoudig gebied op te vullen met elementen. Bovendien wordt gebruik gemaakt van de optie die de vermazingsovergang minimaliseert. Deze optie helpt om de vervorming van de vermazing te reduceren en kan zo de kwaliteit van de vermazing verbeteren. Wel zal, als men deze optie gebruikt, de uiteindelijke vermazing wat afwijken van de gespecifieerde vermazing.

Referenties

- [1] http://nl.wikipedia.org/wiki/Bakoe-Tbilisi-Ceyhanpijpleiding, mei 2006
- [2] http://www.transcanada.com, mei 2006
- [3] http://www.denys.be, mei 2006
- [4] http://www.bp.com, mei 2006

[5] W. De Waele & R. Denys, Pijpleidingen, een toenemend high-tech transportmiddel, Het Ingenieursblad, No. 5, 2004, p. 12-18

[6] API RP 579, Recommended practice for fitness-for-service, American Petroleum Institute, 2000

[7] BS 7910, Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures, British Standards Institution, 2005

[8] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section XI: Rules for inservice inspection of nuclear power plant components, American Society of Mechanical Engineers, 2004

[9] R. Denys & T. Lefevre, Interaction of multiple through-thickness defects under plastic collapse conditions (Part 1), PRCI report L51780e, 2000

[10] FITNET, Final draft (MK7) of FITNET procedure, Section 5: Input & Section 6: Fracture, mei 2006

[11] US Army Corps of Engineers, Engineering and design – Inspection, evaluation and repair of hydraulic steel structures, Chapter 7 – Examples and Material Standards, 2001
[12] J. Lee, J. Ju, J. Jang, W. Kim & D. Kwon, Weld crack assessments in API X65 pipeline: failure assessment diagrams with variations in representative mechanical properties, Materials Science and Engineering A, Vol. 373, 2004, p. 122-130

[13] T. Fett, Estimation of stress intensity factors for semi-elliptical surface cracks,

Engineering Fracture Mechanics, Vol. 66, 2000, p. 349-356

[14] R. Sethuraman, G. Siva Sankara Reddy & I. Thanga Ilango, Finite element based evaluation of stress intensity factors for interactive semi-elliptic surface cracks, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 80, 2003, p. 843-859

[15] I. Sattari-Far, Finite element analysis of limit loads for surface cracks in plates, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 57, 1994, p. 237-243

[16] I. Goodall & G. Webster, Theoretical determination of reference stress for partially penetrating flaws in plates, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 78, 2001, p. 687-695 [17] W. Kastner, E. Rohrich, W. Schmitt & R. Steinbuch, Critical crack sizes in ductile piping, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 9, No. 3, 1981, p. 197-219

[18] http://www.ndt.net/article/v06n07/connelly/connelly.htm, mei 2006

[19] http://www.iploca.com/pdf/weld/PartIII.pdf, mei 2006

[20] P. Budden, Failure assessment diagram methods for strain-based fracture, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 73, 2006, p. 537-552

[21] M. Roy, J. Sumpter, C. Timbrell & M. Wiehahn, Stress intensity factors for cracked plates under out-of-plane bending, Proc. ABAQUS Users' Conference, 2005, pp. 15

[22] P. De Matos, P. Moreira & P. De Castro, Stress intensity factor determination using the finite element method, Proc. 8th Portugese Conference on Fracture, 2002, pp. 13

[23] ABAQUS Technology Brief, Fracture mechanics study of a compact tension specimen using ABAQUS/CAE, 2004, pp. 6

[24] Y. Kim, N. Huh, Y. Choi & J. Yang, On relevant Ramberg-Osgood fit to engineering nonlinear fracture mechanics analysis, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 126, No. 3, 2004, p. 277-283

[25] K. Hasegawa, Hitachi Nuclear System Division, Japan, FITNET presentation in Brussels, 2005