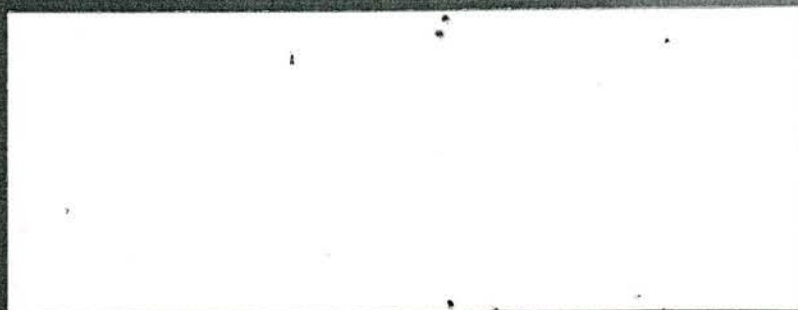


DI 250402

TNO-rapport / TNO report



Nederlandse Organisatie
voor toegepast-
natuurwetenschappelijk
onderzoek / Netherlands
Organisation for Applied
Scientific Research

C9967



Bouwconstructies
Schoemakerstraat 97
Postbus 49
2600 AA Delft

www.tno.nl

T 015 276 30 00
F 015 276 30 16

TNO-rapport

2002-BC-R0009

Vermoeiing stalen rijdekken

Restlevensduur

Fase 1 Algemene oriëntatie en haalbaarheid

Datum 30 mei 2002
Auteur(s) O. D. Dijkstra
J. Maljaars
Exemplaarnummer
Oplage
Aantal pagina's 56
Aantal bijlagen 5
Opdrachtgever Bouwdienst RWS
Projectnaam RWS Restlevensduur
Projectnummer 006.24110

BIBLIOTHEEK BOUWDIENST RIJKSWATERSTAAT

NR. C 9967 BDM

Alle rechten voorbehouden.

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

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

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

Samenvatting

In studies naar de vermoeiingssterkte van stalen rijdekken is voor de bepaling van de levensduur met behulp van de breukmechanica tot nu toe uitgegaan van een eindscheur gelijk aan de dekplaatdikte. Het is bekend dat het brugdek dan nog wel zijn functie vervult en dus nog een zekere restlevensduur heeft. Het bestaande breukmechanica model voorziet echter niet in scheurgroei van door-de-wand scheuren. Ondanks het feit dat de levensduur na doorscheuren waarschijnlijk beperkt is en er dus toch gerepareerd moet worden is kennis omtrent deze fase in de totale levensduur van belang.

Het huidige onderzoek voorziet in de opbouw van kennis ten behoeve van het bepalen van de restlevensduur na doorscheuren. Hiervoor worden 3D eindige elementen analyses uitgevoerd, waarmee de spanningsintensiteitsfactoren voor een geometrie met door-de-wand scheuren kan worden bepaald. Deze resultaten worden vervolgens geschikt gemaakt voor scheurgroeianalyses. De eindige elementen analyses zullen worden gevalideerd met behulp van proeven.

In de oriënterende fase (fase 1) is een algemene oriëntatie uitgevoerd met betrekking tot de restlevensduur van stalen rijdekken. In deze oriëntatie is een overzicht van het totaal project en de fasering gegeven. Verder is een korte algemene inleiding in de breukmechanica gepresenteerd.

Ook zijn oriënterende FEM analyses ter bepaling van spanningsintensiteits-factoren uitgevoerd. Uit deze analyses bleek dat het met het eindige-elementenpakket DIANA goed mogelijk is om de SIF te bepalen van zowel een 2D als een 3D geometrie. De FEM analyses voor rechte scheurfronten en semi-ellipsvormige scheuren geven resultaten die overeenkomen met eerdere studies en literatuur.

De resultaten van de FEM analyses van een door-de-wand scheur in een dunne plaat zien er betrouwbaar uit. Bij het belastingsgeval van buiging ontstaat er aan de drukzijde een negatieve SIF.

Voor een goede bepaling van de SIFs dient rond de scheurtip een goede elementenverdeling te worden aangehouden. In gebieden verder van de scheurtip verwijderd is een optimale elementenverdeling minder belangrijk

Met de uit de literatuur verkregen algebraïsche uitdrukkingen zijn correctiefactoren voor semi-ellipsvormige scheuren bepaald en vergeleken met de resultaten van de FEM analyses.

Oriënterende scheurgroei-analyses van plaat en dekgeometrieën zijn uitgevoerd. Op grond van deze analyses worden voor het belastinggeval van buiging vrij brede scheuren verwacht. De scheurbreedte in een dekgeometrie is afhankelijk van de fictieve diepte die wordt toegepast voor de berekening van de invloed van de lasten voor de scheurgroei in de breedte.

Voor fase 2 zijn op basis van deze oriënterende studie de volgende aanbevelingen geformuleerd:

De FEM modellering van de gescheurde geometrieën dient, in verband met de benodigde tijd, zoveel mogelijk te worden geparametriseerd. Hierbij zullen voor gebieden verder van de scheurtip verwijderd concessies aan de mesh verdeling moeten worden geaccepteerd.

In de 3D FEM analyses is in veel gevallen aan de vrije rand sprake van een randeffect. Dit effect uit zich door een piek in de SIF direct onder het oppervlak en een sterke daling van de SIF aan het vrije oppervlak. Voorgesteld wordt om in deze studie in voorkomende gevallen vanuit een zekere diepte te extrapoleren naar het oppervlak. Op basis van de oriënterende scheurgroeianalyses wordt voorgesteld om voor de semi-ellipsvormige scheuren uit te gaan van de volgende relatieve scheurdieptes: 0.75 , 0.875 en 0.99 en voor elke scheurdiepte de volgende c/a verhoudingen 4 , 15 en 26. Voor de door-de-wand scheuren zal de scheurgeometrie als een semi-ellips worden gedefinieerd met scheurdiepte a en halve scheurbreedte c , waarbij een fictieve waarde van a , groter dan de plaatdikte, zal worden gebruikt.

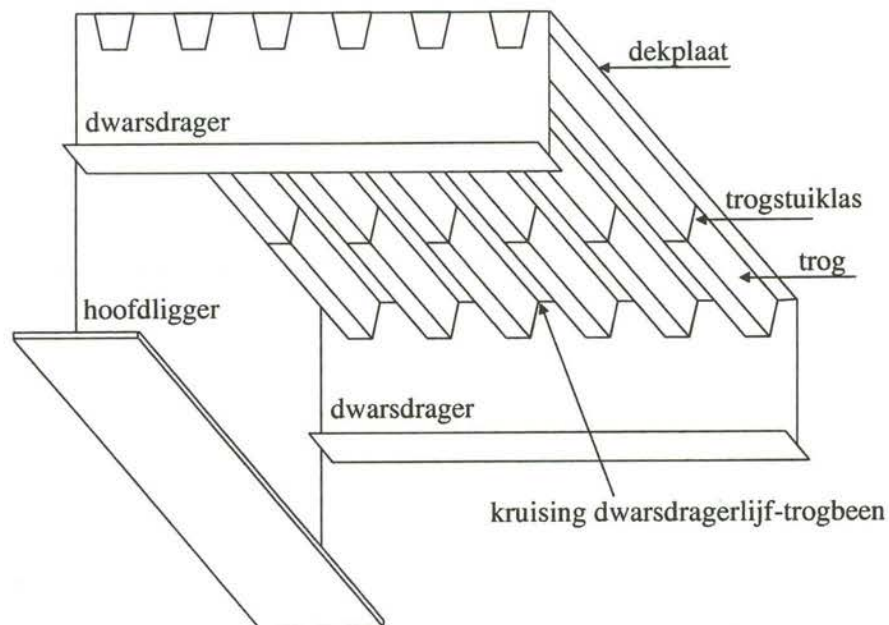
Inhoudsopgave

1	Inleiding — 6
2	Overzicht totaal project en fasering — 8
2.1	Totaal project en motivering — 8
2.1.1	Algemeen — 8
2.1.2	Probleemstelling — 8
2.1.3	Doelstellingen — 9
2.1.4	Werkzaamheden — 9
2.1.5	Resultaat — 11
2.2	Fasering — 12
3	Breukmechanicamodel (algemeen) — 13
3.1	Algemeen — 13
3.2	Spanningsintensiteitsfactor — 14
3.3	Scheurgroei-kromme — 15
3.4	Berekeningsprocedure voor scheurgroeianalyses — 16
4	Oriënterende FEM analyses — 19
4.1	Algemeen — 19
4.2	Recht scheurfront — 20
4.2.1	2-D geometrie strip — 20
4.2.2	3-D geometrie balkje — 25
4.2.3	2-D geometrie dek plus trogwand — 28
4.3	Semi-ellipsvormige scheur — 30
4.3.1	SMOZ blokje — 30
4.3.2	Dunne plaat met brede scheur ($T = 12 \text{ mm}$, $a/T = 1/2$, $a/c = 1/15$) — 37
4.4	Door-de-wand scheur — 41
5	Correctiefactoren voor oppervlakte-scheuren in een plaat — 47
5.1	Algemeen — 47
5.2	SIF voor SMOZ blokje volgens Newman en Raju — 47
5.3	SIF voor een brede scheur in een dunne plaat volgens Newman en Raju — 48
6	Oriënterende scheurgroeianalyses plaat- en dekgeometrie — 49
6.1	Algemeen — 49
6.2	Plaatgeometrie — 49
6.3	Dekgeometrie — 50
6.4	Vergelijking plaat- en dekgeometrie en aspect ratios — 51
7	Conclusies — 53
8	Aanbevelingen voor fase 2 — 55
9	Referenties — 56
	Bijlage(n)
	A Correctiefactoren voor een semi-ellipsvormige scheur in een vlakke plaat volgens Newman en Raju ([2] [3]).
	B Scheurgroei-analyse vlakke plaat

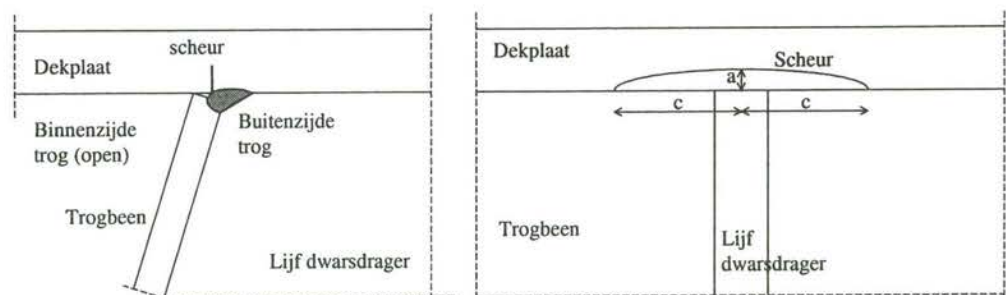
- C Scheurgroei-analyse dekgeometrie met $c/T = 0.001$
- D Scheurgroei-analyse dekgeometrie met $c/T = 0.15/T$
- E Getallen voor de berekende SIFs in de FEM analyses

1 Inleiding

In een TNO studie [1] met betrekking tot de vermoeiingssterkte van stalen rijdeken (zie Figuur 1.1) is voor de bepaling van de levensduur ter plaatse van de kruising dwarsdragerlijf-trogwand (zie Figuur 1.2) met behulp van de breukmechanica tot nu toe uitgegaan van een eindscheur gelijk aan de dekplaatdikte. Het is bekend dat het brugdek dan nog wel zijn functie vervult en dus nog een zekere restlevensduur heeft. Het bestaande breukmechanica model voorziet echter niet in scheurgroei van door-de-wand scheuren.



Figuur 1.1 Onderaanzicht brugdek met verschillende onderdelen en lassen



Figuur 1.2 Detail scheur in de dekplaat ter plaatse van de kruising dwarsdragerlijf-trogbeen.

Ondanks het feit dat de levensduur na doorscheuren waarschijnlijk beperkt is en er dus toch gerepareerd moet worden is kennis omtrent deze fase in de totale levensduur van belang. Deze kennis kan worden ingezet in de totale veiligheidsfilosofie van een orthotroop brugdek, ongeacht het resultaat van deze studie.

Het voorliggend onderzoeksvoorstel voorziet in de opbouw van kennis ten behoeve van het bepalen van de restlevensduur na doorscheuren. Hiervoor dienen 3D eindige elementen analyses te worden uitgevoerd, waarmee de spanningsintensiteitsfactoren

voor een geometrie met door-de-wand kan worden bepaald. Deze resultaten dienen vervolgens geschikt gemaakt te worden voor scheurgroeianalyses. De eindige elementen analyses zullen worden gevalideerd met behulp van proeven. Deze experimentele validatie wordt gezien als een voorwaarde voor de toepassing van de resultaten van de scherugroeianalyses.

In dit rapport wordt eerst nog de algemene opzet van het totale project en de fasering aangegeven. Vervolgens wordt een algemene beschrijving van de toegepaste breukmechanische benadering gegeven.

In deze oriënterende fase (fase 1) wordt een aantal FEM analyses uitgevoerd, nadere informatie omtrent de gebruikte correctiefactoren bij een vlakke plaat wordt gegeven en een aantal oriënterende scheurgroei-analyses wordt uitgevoerd.

Tot slot worden de conclusies van deze fase geformuleerd en worden aanbevelingen voor fase 2 gegeven.

2 Overzicht totaal project en fasering

2.1 Totaal project en motivering

2.1.1 Algemeen

Zoals in de inleiding vermeld blijven de breukmechanica analyses tot nu toe beperkt tot analyses met een scheur tot door-de-wand.

In de volgende paragrafen wordt aangegeven waarom dat zo is (2.1.2), welke doelstellingen er zijn in dit project (2.1.3) en welke werkzaamheden uitgevoerd moeten worden (2.1.4).

Het te verkrijgen resultaat is ook aangegeven (2.1.5).

2.1.2 Probleemstelling

Bij het uitvoeren van een scheurgroeianalyse met behulp van de breukmechanica is de belastingparameter die de ernst van een scheur beschrijft, de spanningsintensiteitsfactor (SIF), van cruciaal belang. Deze parameter is afhankelijk van de scheurgrootte, de nominale spanning en de lokale geometrie (spanningsconcentraties).

Het huidige breukmechanica model tot door-de-wand scheuren is gebaseerd op een geometrie van een half-ellipsvormige oppervlakte scheur aan een lasteen. Hierbij wordt de SIF van een half-ellipsvormige scheur in een vlakke plaat (Newman-Raju oplossing [2] en [3]) gecombineerd met een Mk factor voor de invloed van de lasgeometrie. Deze Mk factor is gebaseerd op 2D eindige elementen analyses (zie b.v. [4]). Uit een studie uitgevoerd van een 3D geometrie bij TNO Bouw [5] is gebleken dat deze benadering redelijk goed tot conservatief is. Dit model voorziet niet in een situatie met een door-de-wand scheur.

Het bovenstaande model is op basis van totale levensduur geverifieerd aan de hand van experimentele resultaten van relatief eenvoudige gelaste proefstukken [6].

Voor het specifieke geval van de kruising van het dwarsdragerliff met de trogwand is nog een extra factor (f_{SCF}) voor de spanningsconcentratie langs de las, ten gevolge van de aanwezigheid van het dwarsdragerliff, geïntroduceerd. Deze correctiefactor is gebaseerd op het spanningsbeeld in een ongescheurde constructie en reduceert de nominale spanning bij bredere en diepere scheuren. Deze correctiefactor is tot nu toe noch theoretisch noch experimenteel direct gevalideerd. De resultaten van dit model kwamen wel redelijk overeen met een analyse van de levensduur van de vervangen klap van de brug Brienenoord [1].

Op basis van de nu beschikbare informatie wordt verwacht dat het huidige model voor de kruising voor relatief ondiepe scheuren goed is. Voor diepere scheuren is de verificatie echter beperkt. Aangezien het leeuwendeel van de levensduur tot door-de-wand scheuren zich afspeelt in de periode met een kleine scheur, wordt het verantwoord geacht om dit model voor de bepaling van de totale levensduur voor een praktijksituatie tot door-de-wand scheuren toch toe te passen. Verder is het waarschijnlijk dat het model conservatief is voor diepere scheuren, zodat een analyse een veilig resultaat oplevert.

Indien we nu echter willen overgaan tot het berekenen van de restlevensduur na het doorscheuren, dan is een nauwkeurig model voor diepe scheuren wel van belang.

Hiervoor is op dit moment geen berekeningsmodel voor de SIF van voorhanden. Uitbreiding op dit punt is noodzakelijk. De tot nu toe gebruikte SIFs, gebaseerd op de formules van Newman en Raju, dienen hiervoor te worden uitgebreid met formules voor brede, diepe scheuren en door-de-wand scheuren

2.1.3 Doelstellingen

De doelstellingen van het project zijn:

- ❑ het bepalen van de spanningsintensiteitsfactor (SIF) voor de geometrie van de kruising van het dwarsdragerlijf met de trogwand in een orthotroop dek met een scheur door de dekplaat
- ❑ het geschikt maken van scheurgroeianalyses voor geometrieën met door-de-wand scheuren
- ❑ het experimenteel verifiëren van het opgestelde scheurgroeimodel
- ❑ het mogelijk maken dat de levensduur na doorscheuren gebruikt kan worden in de veiligheidsfilosofie voor orthotrope brugdekken.

2.1.4 Werkzaamheden

2.1.4.1 Eindige-elementenanalyses voor SIF berekeningen.

Met behulp van het eindige-elementenpakket DIANA zullen eindige-elementenanalyses worden uitgevoerd voor de berekening van de SIF in een orthotroop dek ter plaatse van de kruising van het dwarsdragerlijf met de trogwand. Soortgelijke analyses zijn in het verleden uitgevoerd aan 2D en 3D lasgeometrieën ([4] en [5]).

Ten einde de berekeningen efficiënt te laten verlopen wordt voorgesteld de opbouw van het eindige elementen model gefaseerd te laten verlopen. Eerst zal alleen een plaat worden gemodelleerd. Daarna een plaat met een lasteen (bevestiging trogwand). Tenslotte een plaat met een lasteen (bevestiging trogwand) en een dwarsdragerlijf (de invloed van de spanningsconcentratiefactor).

Eerst zal de spanningsverdeling in een ongescheurde geometrie worden bepaald. De resultaten van deze berekening dienen tevens als basis voor de berekening van de SIF met behulp van algebraïsche uitdrukkingen (zie 2.1.4.2). Daarna zal, teneinde aansluiting te verkrijgen aan de bestaande breukmechanica modellen, worden begonnen met een diepe half-ellipsvormige scheur. Tenslotte zullen door-de-wand scheuren worden geanalyseerd.

Voorlopig wordt uitgegaan van de meest toegepaste afmetingen van dekplaat (12 mm), trogwand (6 mm) en dwarsdragerlijf (10 mm). Eventueel zal de invloed van andere afmetingen later (aanvullend op dit project) moeten worden onderzocht.

Onderzocht dient te worden of de spanningsconcentratie bij het lijf van de dwarsdrager door de geometrie zelf kan worden opgewekt of dat dit extern moet worden aangebracht.

De modelopbouw zal zodanig zijn dat er met één model zowel berekeningen zonder scheur, als met half-ellipsvormige oppervlakte scheuren en met door-de-wand scheuren kunnen worden uitgevoerd. Verder zal het model zodanig zijn dat de scheurafmeting eenvoudig kan worden aangepast.

De afmetingen van half ellipsvormige scheuren worden in het algemeen aangegeven met een a/T en een a/c verhouding, waarbij a = scheurdiepte, c = halve scheurbreedte en T = plaatdikte. Voorgesteld wordt om voor alle modellen met een relatieve scheurdiepte van $a/T = 0.75$ te starten. De scheurlengte zal in eerste instantie gelijk worden genomen aan de scheurlengte die volgt uit het bestaande model. Onderzocht zal worden of deze waarde goed is. Daarna zal de scheurdiepte tot de plaatdikte moeten worden opgevoerd, teneinde op de grens van doorscheuren uit te komen. Vervolgens worden berekeningen gemaakt met door-de-wand scheuren.

Een overzicht van mogelijk uit te voeren analyses is gegeven in Tabel 1. Het definitieve aantal zal tijdens het uitvoeren moeten worden bepaald en is afhankelijk van de resultaten. De a/T verhoudingen van 0.99 en 1.01 zijn bedoeld om de overgang van half-ellipsvormige scheur naar door-de-wand scheur te maken.

Tabel 1 Overzicht uit te voeren analyses

Modelopbouw	Aard van de scheur		
	Geen scheur	Half-ellipsvormige diepe scheur	Door-de-wand scheur
Alleen plaat	-	3x met $a/T = 0.75$ 3x met $a/T = 0.85$ 3x met $a/T = 0.99$ (per a/T drie a/c verhoudingen)	3x met $a/T = 1.01$ plus 12x met bredere scheuren (totaal 15x)
Plaat + trogwand	-	3x met $a/T = 0.75$ 3x met $a/T = 0.85$ 3x met $a/T = 0.99$ (per a/T drie a/c verhoudingen)	3x met $a/T = 1.01$ plus 12x met bredere scheuren (totaal 15x)
Plaat + trogwand + dwarsdragerlrijf	1x	3x met $a/T = 0.75$ 3x met $a/T = 0.85$ 3x met $a/T = 0.99$ (per a/T drie a/c verhoudingen)	3x met $a/T = 1.01$ plus 12x met bredere scheuren (totaal 15x)

Door de gefaseerde opbouw kan het bestaande model met correctiefactoren voor de lasteen (M_k) en de spanningsconcentratiefactor (f_{scf}) op de Newman-Raju oplossing van de vlakke plaat worden gevalideerd voor deze diepe scheuren. Tevens zal door deze gefaseerde opbouw het maken van een algebraïsche uitdrukking voor de SIF voor door-de-wand scheuren analoog kunnen verlopen aan de huidige opzet, waarbij de M_k en F_{scf} ook afzonderlijk in rekening worden gebracht (zie 2.1.4.2).

Onderzocht dient te worden of bij langere door-de-wand scheuren ook tweede orde effecten (b.v. membraanwerking in de dekplaat) moeten worden meegenomen.

2.1.4.2 Ontwikkelen algebraïsche uitdrukking voor de SIF

In 2.1.4.1 wordt voor een aantal concrete parametersets waarden voor de SIF verkregen. Door de gefaseerde aanpak worden ook waarden verkregen voor de M_k en f_{scf} .

Voor een scheurgroeianalyse is een continue functie voor deze grootheden noodzakelijk. Daarom zullen, gebruikmakend van de resultaten, door middel van een curve fit procedure algebraïsche uitdrukkingen voor deze grootheden moeten worden opgesteld. Getracht zal worden het format van deze uitdrukkingen zoveel mogelijk gelijk te houden aan bestaande uitdrukkingen.

2.1.4.3 *Inbouw in scheurgroeimodellen en uitvoeren testanalyses*

De ontwikkelde uitdrukkingen voor de SIF in een door-de-wand situatie zullen worden ingebouwd in de bestaande scheurgroeisoftware (FAFRAM). Speciale aandacht zal moeten worden besteed aan de overgang van een half-ellipsvormige scheur naar een door-de-wand scheur.

Na inbouw zal door middel van het uitvoeren van testanalyses de consistentie van het scheurgroeimodel met een door-de-wand scheur worden geëvalueerd.

2.1.4.4 *Experimentele verificatie*

Door middel van experimenten zullen de ontwikkelde scheurgroeimodellen en uitgevoerde testanalyses worden geverifieerd. Speciale aandacht zal moeten worden besteed aan de randvoorwaarden gebruikt in het FEM model en bij de experimenten, zodat de resultaten niet verstoord zullen worden door verschil in opleggingen, e.d.

2.1.4.5 *Studie met betrekking tot de veiligheid na doorscheuren*

Een algemene veiligheidsbeschouwing met betrekking tot het toepassen van de ontwikkelde modellen op orthotrope platen zal worden uitgevoerd.

2.1.5 *Resultaat*

Na uitvoering van dit onderzoek is een scheurgroeimodel beschikbaar waarmee de restlevensduur van een orthotrope dekplaat na het doorscheuren van de dekplaat ter plaatse van de kruising van de trogwand en het dwarsdragerlijf kan worden bepaald.

Deze analyses kunnen tevens ingezet worden bij een totale veiligheidsfilosofie van een orthotrope dekplaat en bij het opstellen van inspectiestrategieën.

2.2 Fasering

De werkzaamheden zullen gefaseerd worden uitgevoerd. De fasering bij de start van het project is als aangegeven in Tabel 2.

Elke fase wordt afgesloten met een rapport, met de resultaten van de voltooide fase en een aanbeveling voor de nadere invulling van de volgende fase.

Tabel 2 Overzicht fasering werkzaamheden

Fase nummer en omschrijving	Werkzaamheden		
Fase 1 Algemene oriëntatie – haalbaarheid	Oriëntatie op geometrie ellipsvormige en door-de-wand scheuren, met nadruk op mogelijkheden om snel een goede mesh te maken. Enkele oriënterende analyses.		
Fase 2a Alleen plaat Analyses	Half-ellipsvormige diepe scheur 3x met $a/T = 0.75$ 3x met $a/T = 0.85$ 3x met $a/T = 0.99$ (per a/T drie a/c verhoudingen)		Door-de-wand scheur 3x met $a/T = 1.01$ plus 12x met bredere scheuren (totaal 15x)
	Algebraïsche SIF en scheurgroei-analyses voor plaatgeometrie		
Fase 2b Alleen plaat Experiment	Experimentele verificatie door middel van drie experimenten op plaatgeometrie belast op buiging		
Fase 3 Plaat + trogwand	Half-ellipsvormige diepe scheur 3x met $a/T = 0.75$ 3x met $a/T = 0.85$ 3x met $a/T = 0.99$ (per a/T drie a/c verhoudingen)		Door-de-wand scheur 3x met $a/T = 1.01$ plus 12x met bredere scheuren (totaal 15x)
	Algebraïsche SIF en scheurgroei-analyses voor plaat+trogwand-geometrie Experimentele verificatie door middel van drie experimenten op plaat+trogwand-geometrie belast op buiging		
Fase 4 Plaat + trogwand + dwarsdragerlijf	Spannings-verdeling zonder scheur	Half-ellipsvormige diepe scheur 3x met $a/T = 0.75$ 3x met $a/T = 0.85$ 3x met $a/T = 0.99$ (per a/T drie a/c verhoudingen)	Door-de-wand scheur 3x met $a/T = 1.01$ plus 12x met bredere scheuren (totaal 15x)
	Algebraïsche SIF en scheurgroei-analyses voor plaat+trogwand+dwarsdragerlijf-geometrie Experimentele verificatie door middel van drie experimenten op plaat+trogwand+dwarsdragerlijf-geometrie belast met bandenprent		
Fase 5 Veiligheids-filosofie	Een algemene veiligheidsbeschouwing met betrekking tot het toepassen van de ontwikkelde modellen op orthotrope platen zal worden uitgevoerd.		

3 Breukmechanicamodel (algemeen)

3.1 Algemeen

Met behulp van de breukmechanica kan de scheuruitbreiding per belastingswisseling worden berekend. Door de berekening voort te zetten tot een kritieke scheur kan hiermee dus ook de levensduur worden berekend.

De levensduur kan worden berekend als men over de volgende informatie en procedures beschikt:

- Afmetingen van **begindefecten**. Voor de berekening van de totale levensduur van een gelaste verbinding wordt veelal uitgegaan van een min of meer fictieve beginscheur. Uit controle berekeningen aan proefstukken is gebleken dat voor een scheur aan een lasteen een fictieve beginscheur van 0,15 mm diep en 0,3 mm lang voor een uiteenlopende reeks van geometrieën goede resultaten voor de levensduur worden verkregen. Bij een bestaande constructie kunnen dit door inspectie vastgestelde defecten zijn. Ook kan men, indien bij een inspectie geen defecten gevonden worden, uitgaan van defectgrootten die net niet gevonden kunnen worden.
- **Geometrie** van de verbinding.
- **Spanningswisselingen** in de verbinding.
- De grootte van de **spanningsintensiteitsfactor** (K) als functie van de scheurgrootte, geometrie van de verbinding en spanning op de verbinding.
- Een **scheurgroei-kromme** (da/dN - ΔK kromme) voor het materiaal.
- Een **rekenprocedure** voor het maken van scheurgroeianalyses.

Bij de breukmechanica-benadering wordt gebruik gemaakt van een scheurgroeimodel. Het model gaat uit van de aanwezigheid van een scherp defect (of een scheur). De initiatie periode wordt daarbij dus verwaarloosd. Voor veel gelaste constructies is de initiatieperiode relatief kort en kan de breukmechanica dus succesvol worden toegepast.

In de rest van dit hoofdstuk volgt een beknopte beschrijving van de breukmechanica-benadering. Meer informatie omtrent de toepassing van breukmechanica en verdere referenties kunnen worden gevonden in [7].

Als maat voor de ernst van de scheur wordt de spanningsintensiteitsfactor (SIF, K) gebruikt. De SIF is een maat voor de spanning in de buurt van de scheurtip en kan worden gezien als de belastingparameter. De SIF is afhankelijk van de geometrie van de verbinding, de scheurdiepte (a) en het spanningsniveau (σ).

$$K = f(\text{geometrie, scheurdiepte (a), spanning } (\sigma)) \quad (3.1)$$

Meer informatie omtrent de SIF is gegeven in 3.2.

De weerstand van het materiaal tegen scheuruitbreiding ten gevolge van vermoeiing wordt bepaald met behulp van scheurgroeiproeven op kleine standaard proefstukken. De scheuruitbreiding per wisseling (da/dN) wordt, in een z.g. scheurgroei-kromme, uitgezet tegen het interval van de SIF ($\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$). De constanten in de relatie tussen da/dN en ΔK worden materiaalparameters genoemd.

$$da/dN = f(\Delta K, \text{materiaalparameters}) \quad (3.2)$$

In 3.3 wordt een aantal scheurgroeirelaties met hun parameters weergegeven.

Door integratie van (3.2) kan het aantal wisselingen van een initieel defect (a_i) tot een eind defect (a_f) worden berekend.

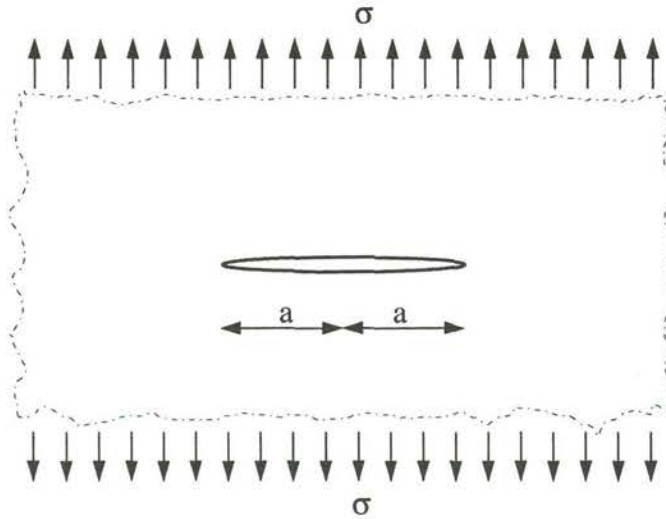
$$N = \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{f(\Delta K, \text{material parameters})} \quad (3.3)$$

3.2 Spanningsintensiteitsfactor

Voor de meest eenvoudige geometrie, een oneindig grote plaat met een centrale door de dikte scheur (zie Figuur 3.1), is de SIF als volgt:

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (3.4)$$

Met: σ = spanning op de plaat
 a = halve scheurlengte



Figuur 3.1 Centraal gescheurde plaat

Voor ingewikkelder geometriën moet een geometrische correctiefactor (Y) worden toegepast:

$$K = Y\sigma \sqrt{\pi a} \quad (3.5)$$

De geometrische correctiefactor (Y) is afhankelijk van de geometrie (inclusief de scheurdiepte) en de belastingswijze (membraanspanning of buiging). Veelal wordt Y ontbonden in een component voor een vlakke plaat of strip (M) en een component voor de invloed van de las (M_k).

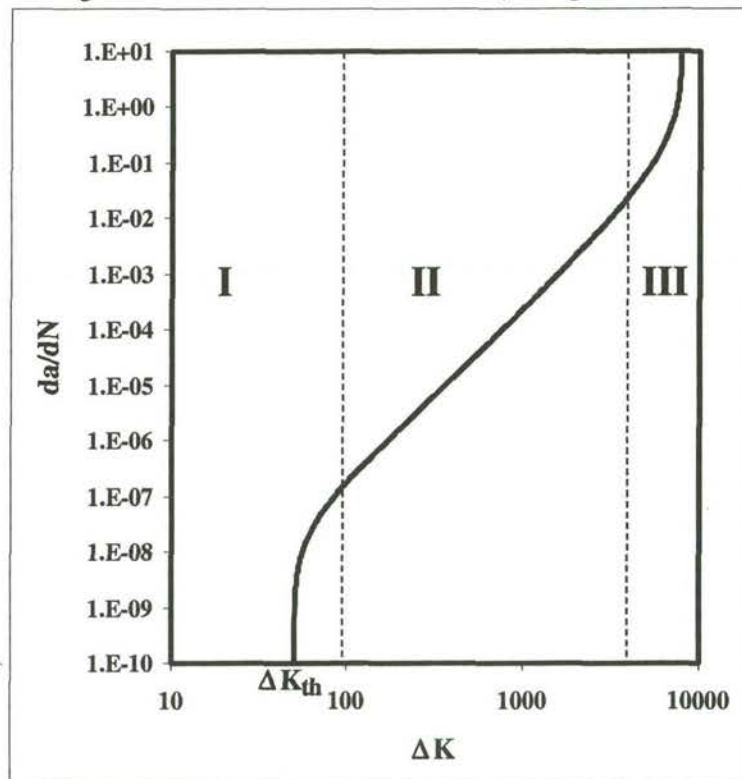
$$Y = M M_k \quad (3.6)$$

Verder wordt voor de correctiefactoren ook onderscheid gemaakt voor een membraanspanning (σ_m) en een buigspanning (σ_b) en moet voor een half ellipsvormige

scheur de scheurgroei in diepte (a) richting en in breedte (c) richting worden beschouwd. (N.B. Voor door de dikte scheuren wordt a gebruikt voor de halve scheurlengte en bij half-ellipsvormige oppervlakte scheuren wordt a gebruikt voor de scheurdiepte). Een algemeen format voor scheuren aan lastenen in een driedimensionale geometrie is gegeven in [7].

3.3 Scheurgroekromme

De scheurgroekromme geeft de relatie tussen de scheurgroeisnelheid (da/dN) en het interval van de SIF (ΔK). In het algemeen kunnen drie stukken in de scheurgroekromme worden onderscheiden (zie Figuur 3.2).



Figuur 3.2 Scheurgroekromme

De eenvoudigste scheurgroei relatie, de wet van Paris-Erdogan, beschrijft het lineaire gedeelte van de kromme (lineair op log-schaal) (**gebied II**):

$$\frac{da}{dN} = C_{II} \cdot (\Delta K)^m \quad (3.7)$$

met: C_{II} = materiaal parameter voor het niveau van de kromme
 m = exponent voor de helling van de kromme

In het deel met lage scheurgroeisnelheden (**gebied I**) is de invloed van de drempelwaarde van ΔK (ΔK_{th}), waar beneden geen scheurgroei plaatsvindt, van belang (N.B. Voor relatief grote waarden van ΔK wordt met deze relatie de wet van Paris weer goed benaderd.):

$$\frac{da}{dN} = 0 \quad \text{indien } \Delta K < \Delta K_{th} \quad (3.8a)$$

$$\frac{da}{dN} = C_I \cdot (\Delta K^m - \Delta K_{th}^m) \quad \text{indien } \Delta K > \Delta K_{th} \quad (3.8b)$$

In het deel met de hoge scheurgroei snelheden (**gebied III**) is de invloed van de kritieke waarde van de SIF (K_c) van belang, evenals de R waarde ($R = K_{min} / K_{max} = \sigma_{min} / \sigma_{max}$). Indien de maximale waarde van de K in een spanningswisseling K_c benadert, dan neemt de scheurgroei door instabiele scheurgroei zeer snel toe:

$$\frac{da}{dN} = \frac{C_{III} \cdot \Delta K^m}{(1-R) \cdot K_c - \Delta K} \quad \text{indien } K_{max} < K_c \quad (3.9a)$$

$$\frac{da}{dN} = \infty \quad \text{indien } K_{max} > K_c \quad (3.9b)$$

Een benadering, waarbij zowel de invloed van ΔK_{th} als K_c kan worden meegenomen is:

$$\frac{da}{dN} = \frac{C \cdot (\Delta K^m - \Delta K_{th}^m)}{(1-R) \cdot K_c - \Delta K} \quad (3.10)$$

Aanbevolen waarden voor C en m in de Paris relatie zijn volgens PD 6493 [8]:

In niet agressieve omstandigheden:

$$\text{gemiddelde waarden} \quad m = 3 \text{ and } C = 1,832 \cdot 10^{-13} \quad (N, mm) \quad (3.11)$$

$$\text{bovengrens (ontwerp)} \quad m = 3 \text{ and } C = 3,0 \cdot 10^{-13} \quad (N, mm) \quad (3.12)$$

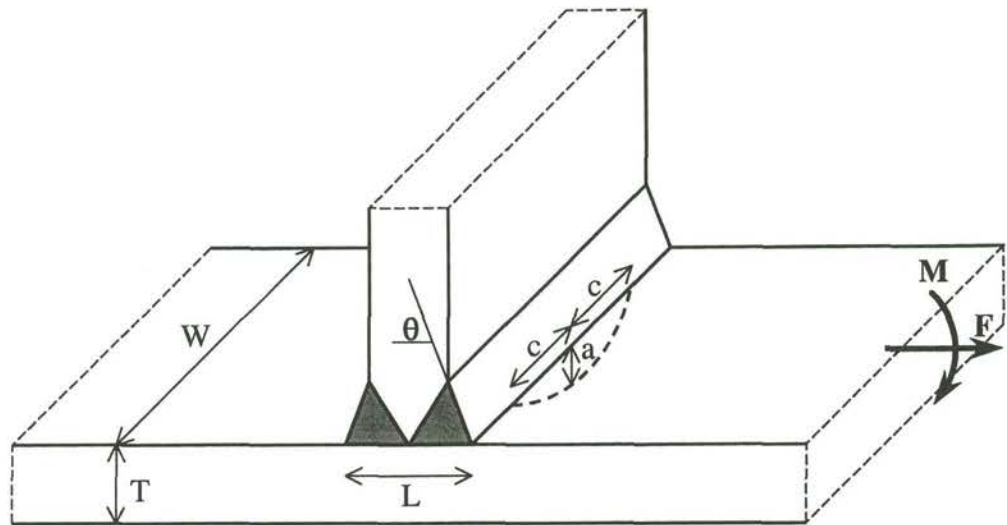
Als ontwerpwaarde voor de drempelwaarde voor de SIF wordt aanbevolen:

$$\Delta K_{th} = 63 \text{ N/mm}^{3/2} \quad (3.13)$$

Voor levensduurberekeningen wordt in het algemeen gebruik gemaakt van de scheurgroei wetten van gebied I en II. De lineaire scheurgroei wet van Paris (gebied II) wordt veelal gebruikt voor het bepalen van de klasse van de verbinding, waarbij men een constante amplitude belasting gebruikt. De scheurgroei wet met de drempelwaarde (gebied I (en ook II)) wordt gebruikt voor levensduur- en betrouwbaarheidsanalyses, waarbij men te maken heeft met een spectrum belasting.

3.4 Berekeningsprocedure voor scheurgroeianalyses

Voor 3-D geometriën met een half-ellipsvormige scheur aan een lasteen (zie Figuur 3.3) zal de integratie van de scheurgroei wet numeriek moeten gebeuren.



Figuur 3.3 Half-ellipsvormige scheur aan lasteen

Een efficiënte procedure hiervoor is als volgt (Onderstaand is uitgegaan van de wet van Paris en de scheurgroeiwet met de drempelwaarde (aangegeven met ...a). Voor de andere relaties verloopt de procedure analoog.):

- 1 Bepaal met de actuele scheurafmetingen (a_i en c_i) de geometrische correctiefactoren (M en M_K).
- 2 Met behulp van het spanningsinterval ($\Delta\sigma$) kan het interval van de SIF voor diepte richting (ΔK_a) en voor breedte richting (ΔK_c) worden bepaald.
- 3 Uitgaande van een scheuruitbreiding in diepte richting (Δa) kan het aantal wisselingen worden bepaald met de scheurgroeirelatie in diepte richting:

$$\Delta N = \frac{\Delta a}{f(\Delta K_a)} = \frac{\Delta a}{C(\Delta K_a)^m} \quad (3.14)$$

$$\Delta N = \frac{\Delta a}{f(\Delta K_a, \Delta K_{tha})} = \frac{\Delta a}{C(\Delta K_a^m - \Delta K_{tha}^m)} \quad (3.14a)$$

(Eventueel kan ook de scheuruitbreiding in breedte richting (Δc) of de toename van het aantal wisselingen (ΔN) als stuurparameter worden gebruikt.)

- 4 De scheuruitbreiding in breedte richting kan worden bepaald met de scheurgroeirelatie in breedte richting:

$$\Delta c = f(\Delta K_c) \cdot \Delta N = C(\Delta K_c)^m \cdot \Delta N \quad (3.15)$$

$$\Delta c = f(\Delta K_c, \Delta K_{thc}) \cdot \Delta N = C(\Delta K_c^m - \Delta K_{thc}^m) \cdot \Delta N \quad (3.15a)$$

- 5 Het aantal wisselingen moet worden verhoogd met ΔN :

$$N_{i+1} = N_i + \Delta N \quad (3.16)$$

- 6 De scheurafmetingen moeten worden vergroot met de scheuruitbreidingen:

$$a_{i+1} = a_i + \Delta a \quad \text{en} \quad c_{i+1} = c_i + \Delta c \quad (3.17)$$

De scheurbreedte kan eventueel worden bepaald met een z.g. “forcing function”. Hierbij wordt op basis van experimenten een bepaalde relatie tussen de scheurbreedte en scheurdiepte verondersteld.

$$c_{i+1} = f(a_{i+1}) \quad (3.18)$$

- 7 Met de nieuwe scheurafmetingen (a_{i+1} en c_{i+1}) kan de volgende stap worden bepaald, beginnend met punt 1.

De berekening moet worden voortgezet tot een eindscheur (a_f) of tot het vereist aantal wisselingen (N).

Tot nu toe is de belasting gepresenteerd als een constante amplitude belasting. In een echte constructie, zoals een brug, is meestal een variabele amplitude belasting aanwezig. Een dergelijke belasting kan worden geschematiseerd in een aantal blokken met een aantal wisselingen (n_j) en van een bepaalde grootte ($\Delta\sigma_j$). In die gevallen dient het interval van de SIF (ΔK_j) en de corresponderende scheurgroeisnelheid ($(\Delta a/\Delta N)_j$) voor elk blok te worden bepaald. Met behulp van het relatieve aantal wisselingen van elk blok kan een gemiddelde scheurgroeisnelheid worden bepaald volgens vergelijking (3.19).

$$(\Delta a/\Delta N)_{\text{average}} = \sum \left(\frac{n_j}{\sum n_j} (\Delta a/\Delta N)_j \right) \quad (3.19)$$

Deze gemiddelde scheurgroeisnelheid moet dan worden gebruikt in (3.15) voor de bepaling van het aantal wisselingen. Hiermee wordt een gelijkmatige verdeling van de verschillende blokken over de levensduur verondersteld en volgorde-effecten worden niet in beschouwing betrokken. Deze methode kan worden gebruikt voor elke scheurgroei-kromme.

4 Oriënterende FEM analyses

4.1 Algemeen

De SIF van een bepaalde geometrie met bepaalde scheurafmetingen wordt berekend met behulp van een FEM analyse. De berekende SIF wordt gebruikt in de scheurgroeiberekening.

In de voorstudie zijn van een aantal geometrieën FEM analyses uitgevoerd met behulp van het eindige elementenpakket DIANA (release 7). Een twee-dimensionale (2D) en een drie-dimensionale (3D) analyse van een recht scheurfront in een vlakke plaat en een 2D analyse van een plaat met aangelaste trogwand zijn uitgevoerd. Tevens zijn 3D analyses uitgevoerd van semi-ellipsvormige scheuren. Het betreft het narekenen van een eerder uitgevoerde analyse en het analyseren van een zeer brede scheur ($c/a = 15$). Ook is een door-de-wand scheur berekend. In de 2D analyses is gebruik gemaakt van 8-knoops plane strain elements type CQ16E met integratieschema 2×2 . In de 3D analyses is gebruik gemaakt van 20 knoops solid elements type CHX60 met integratieschema $2 \times 2 \times 2$. Voor meer informatie betreffende de elementen wordt verwezen naar [11].

Het doel van deze analyses is driedelig. Ten eerste is onderzocht of de fracture-module die in DIANA gebruikt is op juiste wijze werkt. Hiernaast is onderzocht of de SIF van modellen opgesteld in voorgaande onderzoeken [2, 3] overeenkomen met de SIF bepaald met modellen waarbij de elementverdeling opgebouwd is met huidige gebruikte technieken. Als laatste is onderzocht of de scheurgeometrie gemakkelijk gewijzigd kan worden, door het veranderen van enkele parameters. Resultaten van deze analyses zijn gegeven in dit hoofdstuk. Getallen voor de berekende SIF zijn gegeven in bijlage 0.

De modellen zijn zodanig opgesteld dat de x-as langs de scheur evenwijdig aan het oppervlak van de plaat loopt (in de richting van c). De y-as is gekozen in dieptherichting van de scheur (in de richting van a). De z-as staat loodrecht op de scheur. De oorsprong van het assenstelsel valt samen met het initiatiepunt van de scheur.

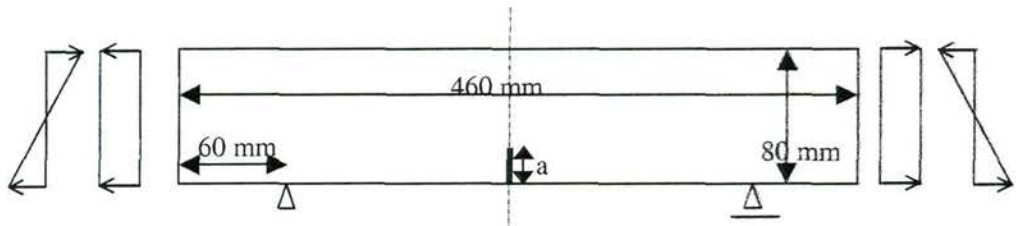
In de figuren van de modellen in dit hoofdstuk zijn de geometrie en de elementenverdeling weergegeven. De geometrie geeft hierbij de lijnen, oppervlakten en volumes weer die opgegeven worden in de preprocessor van DIANA: Femgvx. Deze preprocessor genereert de elementenverdeling aan de hand van deze opgegeven geometrie.

De rode T-pijltjes (\perp) geven aan dat de knoop waar het T-pijltje aangrijpt verhinderd wordt in de aangegeven richting te verplaatsen (\perp staat voor: geen verplaatsing mogelijk in verticale richting). Dubbele T-pijltjes (\pm) geven aan dat de knoop waar het T-pijltje aangrijpt verhinderd wordt om de aangegeven as te roteren. (\pm staat voor: geen rotatie mogelijk om de verticale as). Een paars pijltje (\rightarrow) geeft een belasting aan.

4.2 Recht scheurfront

4.2.1 2-D geometrie strip

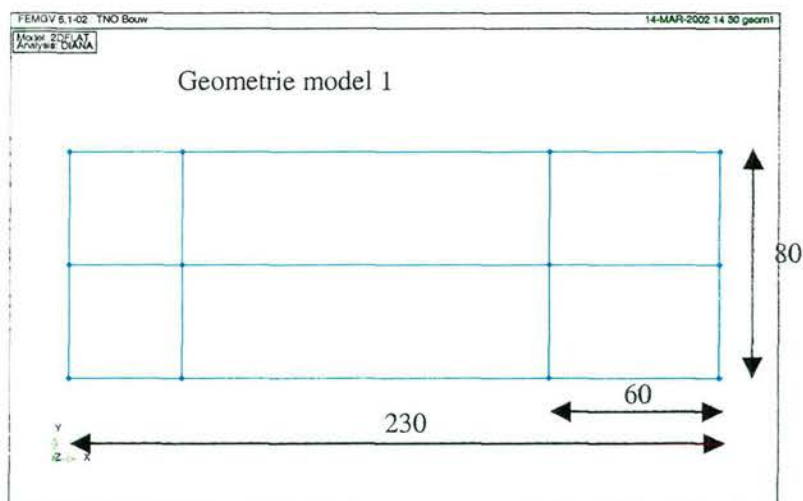
Rechte scheuren met variërende afmeting zijn aangebracht in een strip met afmetingen volgens Figuur 4.1. De aangebrachte belasting bestaat uit een trekspanning aan het uiteinde ter grootte van $1,0 \text{ N/mm}^2$ of een buigend moment waarvan de grootste spanning gelijk is aan $1,0 \text{ N/mm}^2$. Dezelfde strip is gemodelleerd in [4]. In het model is gebruik gemaakt van symmetrie, zodat enkel een halve strip gemodelleerd is.



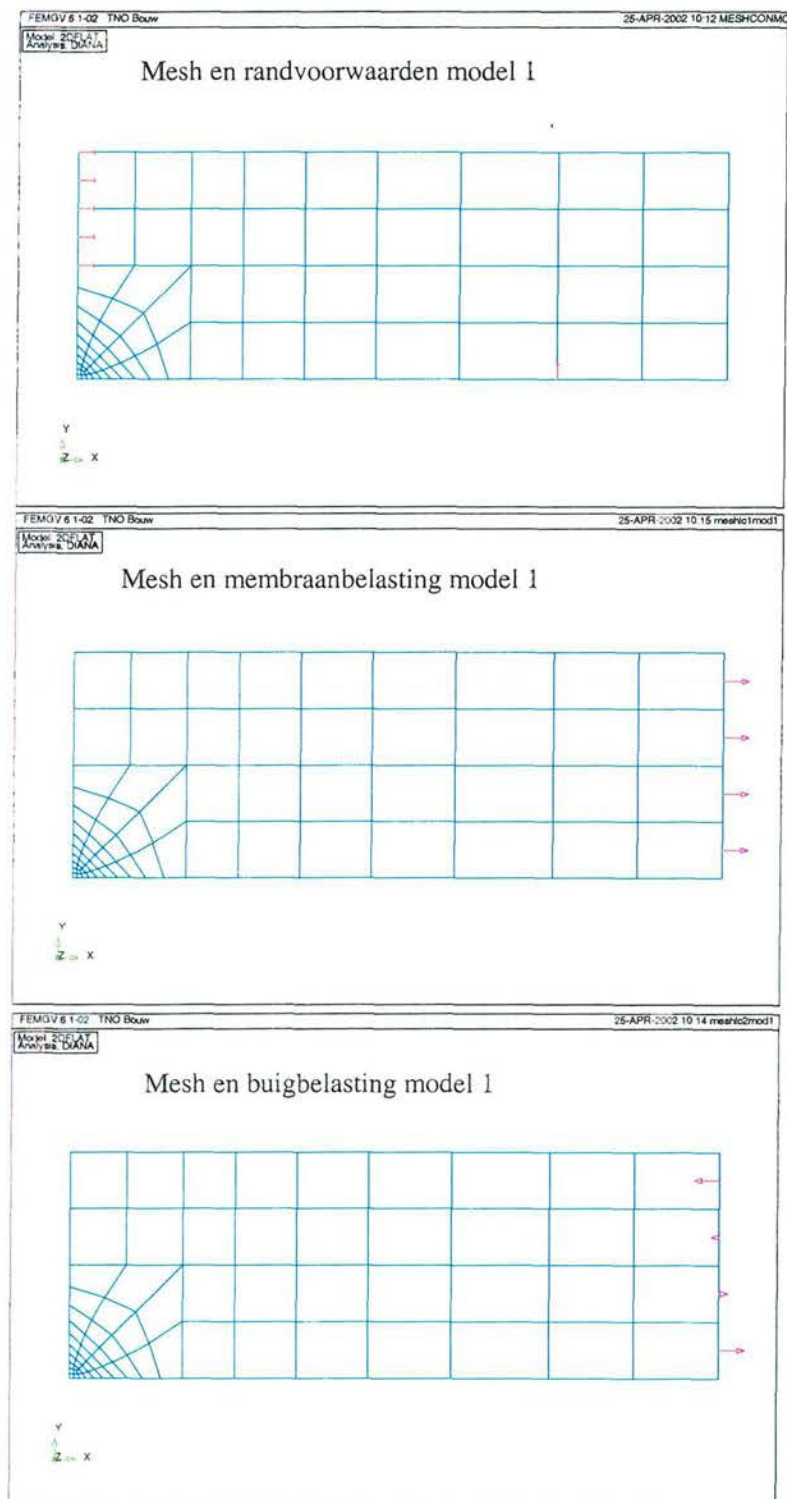
Figuur 4.1 Geometrie vlakke scheur 2D

Voor de modellering van de halve strip zijn twee modellen met een verschillende elementverdeling gebruikt. In Figuur 4.2 is de geometrie, zoals deze opgegeven is in de preprocessor, gegeven voor model 1. De elementenverdeling met randvoorwaarden en belastingen is gegeven in Figuur 4.3. De geometrie van model 2 is gegeven in Figuur 4.4. De elementenverdeling, randvoorwaarden en belastingen zijn gegeven in Figuur 4.5.

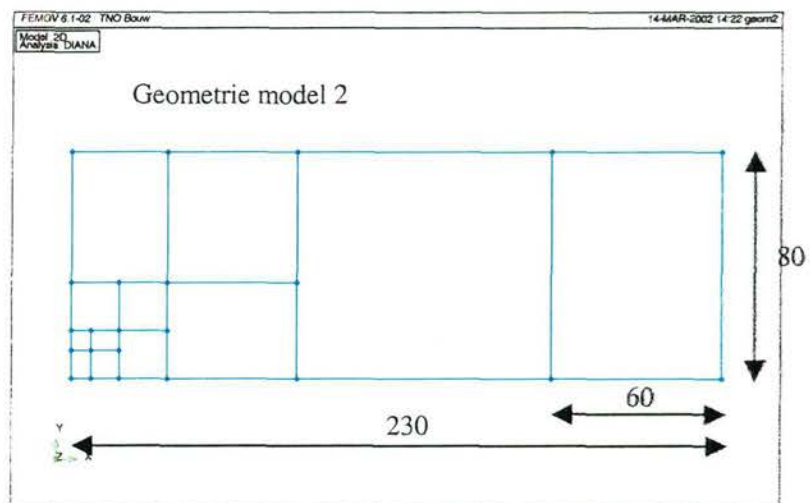
In [3] is genoemd dat de SIF nauwkeurig bepaald wordt als de lengte van de elementen kleiner of gelijk is aan de helft van de scheurdiepte ($0.5 a$). Deze stelling is gecontroleerd en toegepast in de huidige modellering.



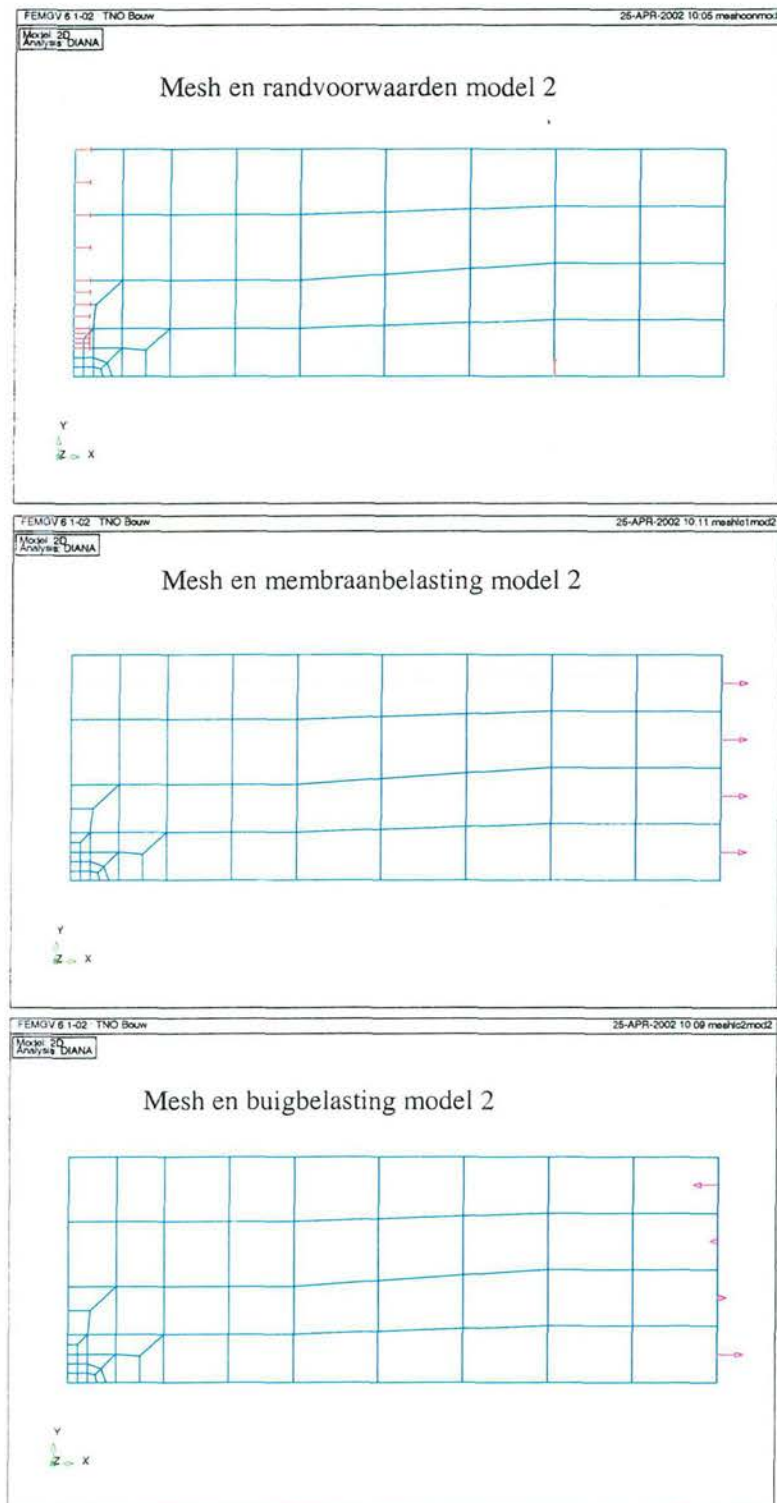
Figuur 4.2 Geometrie van model 1



Figuur 4.3 Elementenverdeling van model 1



Figuur 4.4 Geometrie van model 2



Figuur 4.5 Elementenverdeling van model 2

De algemene vergelijking voor de SIF is gegeven in vergelijking (4.1).

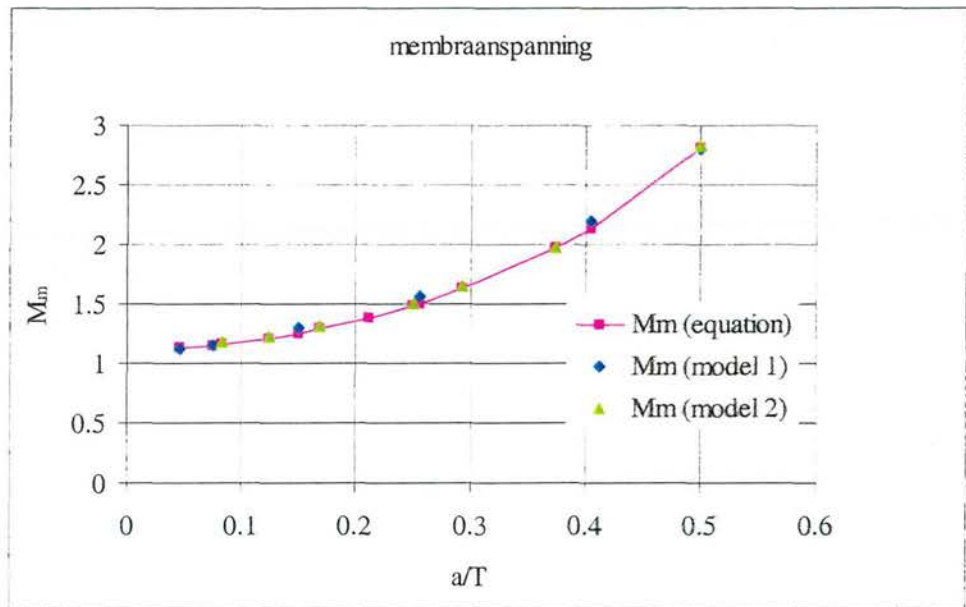
$$K = M\sigma\sqrt{\pi a} \quad (4.1)$$

Waarin σ = normaalspanning loodrecht op het scheurfront, a = scheurdiepte, K = SIF en M = een spanningsintensiteitscorrectiefactor voor geometrie en belasting.

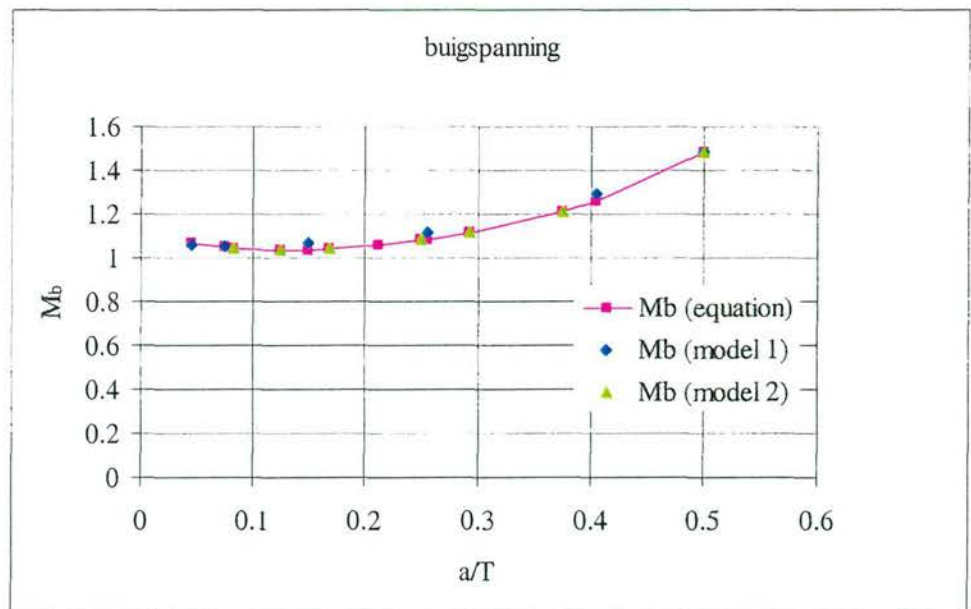
In [9] zijn vergelijkingen voor M gepubliceerd voor belasting door membraanspanning of door buigspanning, zie vergelijking 4.2 en 4.3 respectievelijk. T is hierbij de dikte (80 mm). De resulterende M voor trek en buiging van beide modellen zijn in Figuur 4.6 en Figuur 4.7 vergeleken met de vergelijkingen zoals deze gegeven zijn in [9].

$$M_m = 1,12 - 0,23\left(\frac{a}{T}\right) + 10,6\left(\frac{a}{T}\right)^2 - 21,7\left(\frac{a}{T}\right)^3 + 30,4\left(\frac{a}{T}\right)^4 \quad (4.2)$$

$$M_b = 1,12 - 1,39\left(\frac{a}{T}\right) + 7,32\left(\frac{a}{T}\right)^2 - 13,1\left(\frac{a}{T}\right)^3 + 14,0\left(\frac{a}{T}\right)^4 \quad (4.3)$$



Figuur 4.6 Vergelijking M voor membraanspanning met [9]



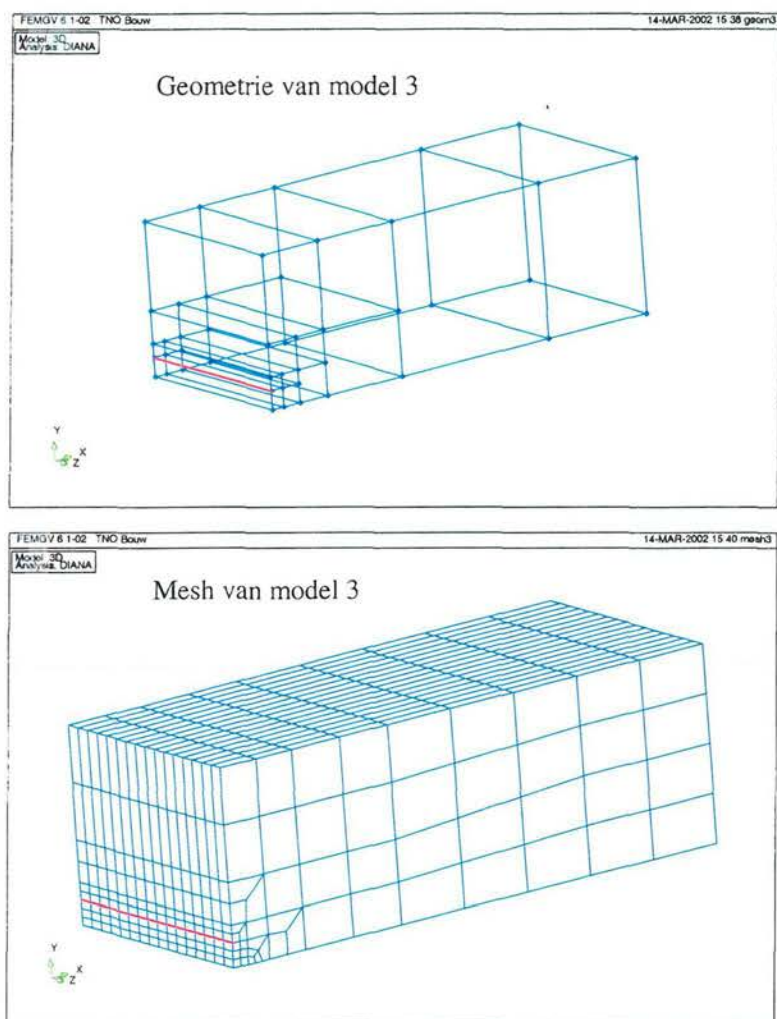
Figuur 4.7 Vergelijking M voor buigspanning met [9]

Het verschil tussen de M bepaald met model 1 en die uit de vergelijking is maximaal 4%. Dit verschil is redelijk groot. Uit berekeningen met verschillende modellen is gebleken dat de oorzaak van dit verschil ligt in de vorm van de elementen op de scheurtip; voor een nauwkeurige bepaling van de SIF moeten deze elementen zoveel mogelijk vierkant zijn. Het verschil tussen de M bepaald met model 2, waarbij vierkante elementen aan de scheurtip aangebracht zijn, en die uit de vergelijking is maximaal 1%.

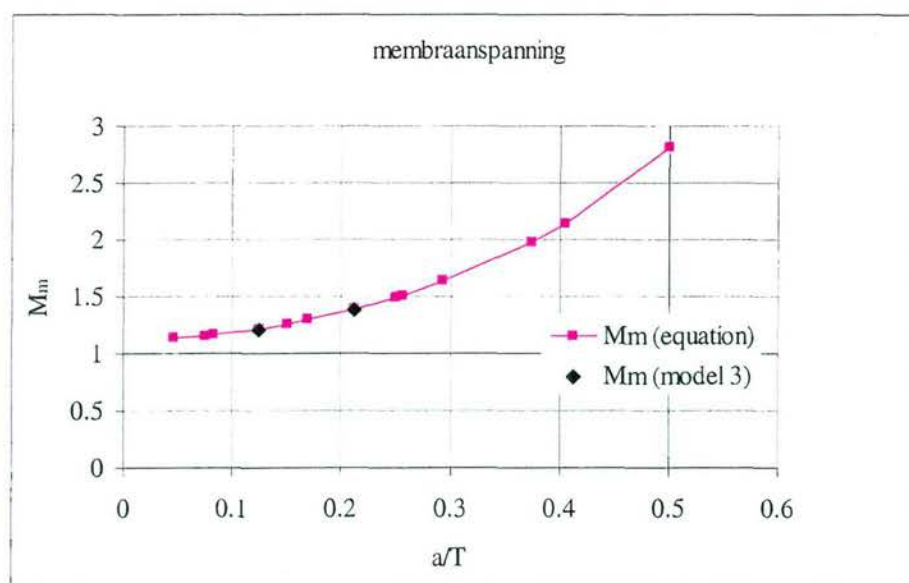
De modellen zijn zodanig opgebouwd dat afmetingen van de strip en van de scheur gemakkelijk gewijzigd kunnen worden. De resultaten van de modellering komen goed overeen met [4] en [9]. De procedure voor fracture mechanics in DIANA werkt correct voor 2D geometrie.

4.2.2 3-D geometrie balkje

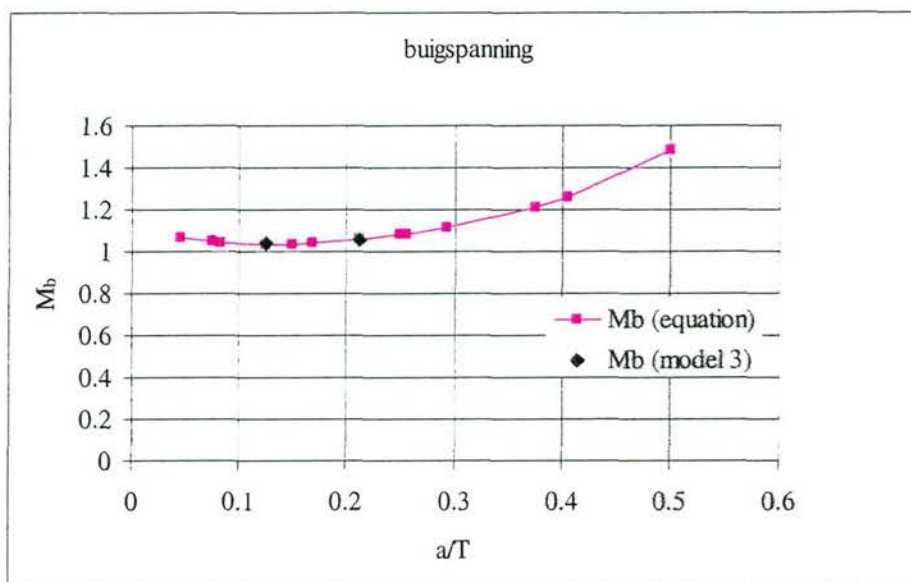
De strip uit Figuur 4.1 is ook gemodelleerd met volume-elementen. Dit model wordt model 3 genoemd. De breedteafmeting bedraagt 100 mm. Deze afmeting is zodanig groot gekozen, dat de situatie in de middendoorsnede bijna een plain strain situatie is, zodat de berekende SIF in de middendoorsnede overeen zou moeten komen met de berekende SIF uit de 2D analyse van model 2 (paragraaf 4.2.1). In Figuur 4.8 zijn de geometrie en de elementenverdeling gegeven, met in het rood het scheurfront. De vergelijking van de berekende M met de vergelijkingen 4.1 en 4.2 is gegeven in Figuur 4.9 en Figuur 4.10. Het verschil in M in het midden van de scheur tussen de berekende waarden met een 3D model en de vergelijking is minder dan 0,1%. Er is geen reden om aan te nemen dat geen overeenstemming bestaat bij diepere scheuren.



Figuur 4.8 Geometrie en mesh van model 3

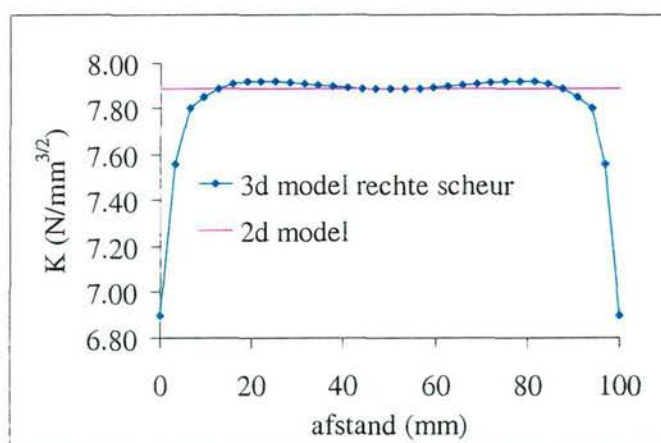


Figuur 4.9 Vergelijking M voor membraanspanning van model 3 met [9]



Figuur 4.10 Vergelijking M voor buigspanning van model 3 met [9]

De SIF langs het scheurfront voor membraanbelasting bij een scheurdiepte van 6 mm is gegeven in Figuur 4.11.



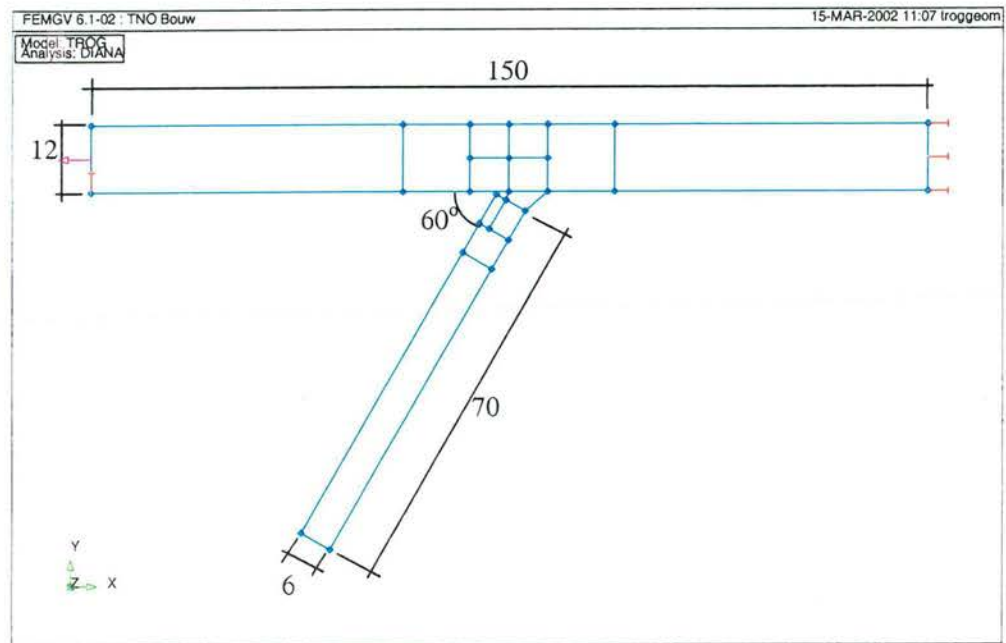
Figuur 4.11 SIF langs het scheurfront

De wijziging van de SIF aan de randen van de scheur wordt veroorzaakt door het randeffect. Dit randeffect ontstaat door de overgang van een vlakke rektoestand (plane strain) naar een vlakke spanningstoestand (plane stress). Uit de literatuur blijkt dat de SIF resultaten in de grenslaag sterk beïnvloed worden door de fijnheid van de elementenverdeling.

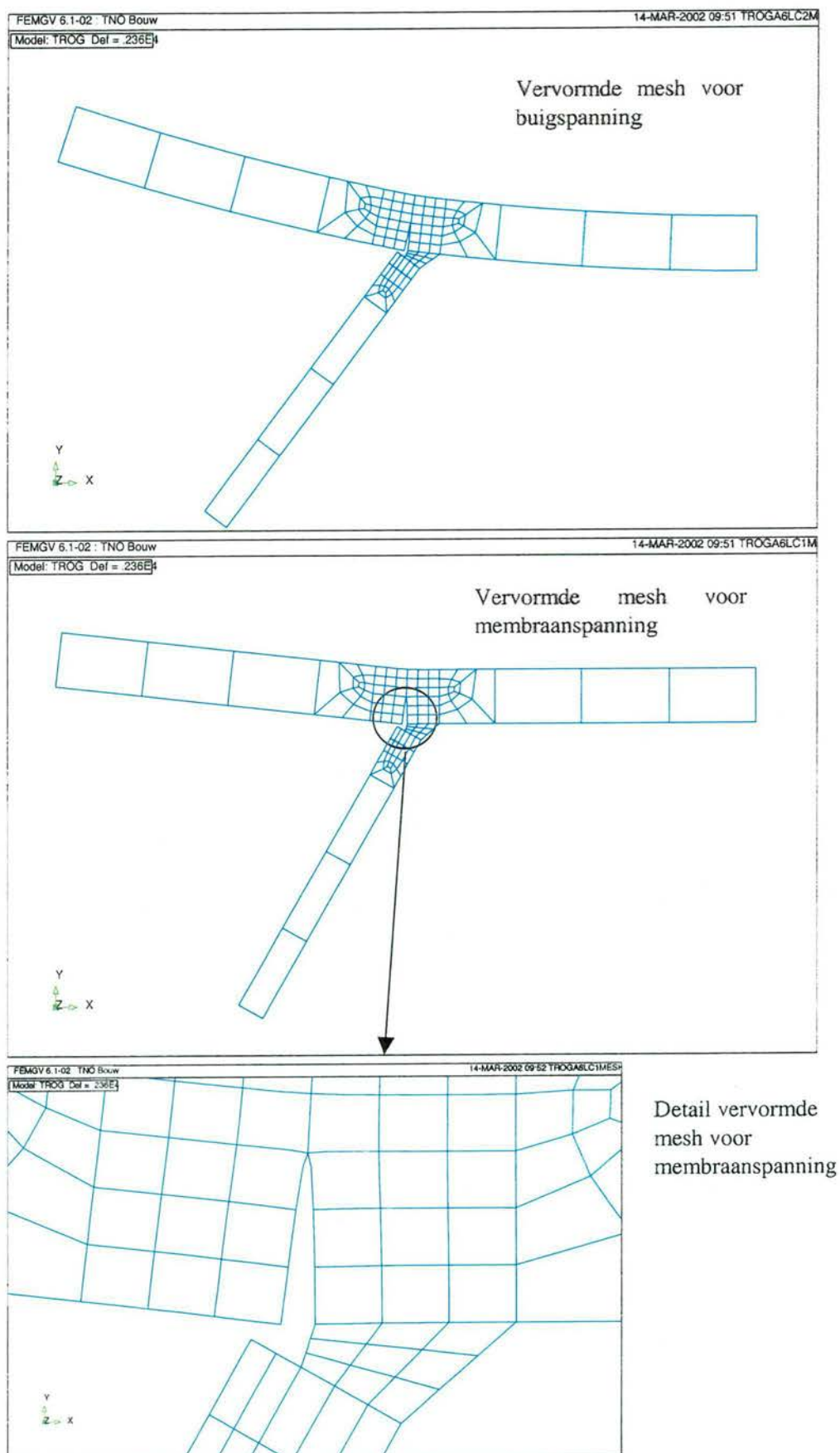
De modellen zijn zodanig opgebouwd dat afmetingen van de strip en van de scheur gemakkelijk gewijzigd kunnen worden. De resultaten van de modellering komen goed overeen met gepubliceerd werk. De procedure voor fracture mechanics in DIANA werkt ook correct voor 3D analyses.

4.2.3 2-D geometrie dek plus trogwand

Een scheur in een dek met aangelaste trogwand is gemodelleerd. Twee belastinggevallen zijn aangebracht. Het eerste belastinggeval is een trekspanning aan het uiteinde ter grootte van $1,0 \text{ N/mm}^2$ en het tweede belastinggeval bestaat uit een buigend moment waarvan de grootste spanning gelijk is aan $1,0 \text{ N/mm}^2$. Aangezien de geometrie niet symmetrisch is, moet in dit geval de gehele 2D constructie gemodelleerd worden. De constructie is doorgerekend met twee verschillende scheurdieptes $a = 4 \text{ mm}$ en $a = 6 \text{ mm}$ ($a/T = 1/3$ en $a/T = 1/2$). In Figuur 4.12 en Figuur 4.13 zijn de geometrie en de vervormde mesh gegeven voor het model met scheurdiepte 6 mm .



Figuur 4.12 Geometrie dek met trogwand



Figuur 4.13 Vervormde mesh voor dek plus trogwand

In navolging van [4] is de SIF voor een geometrie van een strip met lasdetail te schrijven volgens vergelijking 4.4.

$$K = M_k M_{\text{strip}} \sigma \sqrt{\pi a} \quad (4.4)$$

Hierin is M_{strip} de correctiefactor voor geometrie van de strip, gegeven in vergelijkingen 4.1 en 4.2. M_k is de correctiefactor voor de lasgeometrie. Deze M_k is volgens [4] gelijk aan of juist iets groter dan 1.0 voor de berekende relatieve scheurdieptes. Tabel I geeft de uit de eindige elementen berekening volgende SIF, de M_{strip} 's volgens vergelijkingen 4.1 en 4.2 en de M_k 's berekend met vergelijking 4.3. In de vergelijkingen 4.1 en 4.2 wordt in dit geval M vervangen door M_{strip} . Te zien is dat de bepaalde M_k 's inderdaad juist iets groter dan 1.0 zijn.

Tabel I SIF en correctiefactoren voor dek plus trogwand

	K (FEM-berekening)	M_{strip} (vgl. 4.1 / 4.2)	M_k (vgl 4.3)
a = 4, membraan	6,360 [N/mm ^{3/2}]	1,780 [-]	1,008 [-]
a = 6, membraan	12,27 [N/mm ^{3/2}]	2,815 [-]	1,004 [-]
a = 4, buiging	4,135 [N/mm ^{3/2}]	1,155 [-]	1,010 [-]
a = 6, buiging	6,495 [N/mm ^{3/2}]	1,481 [-]	1,010 [-]

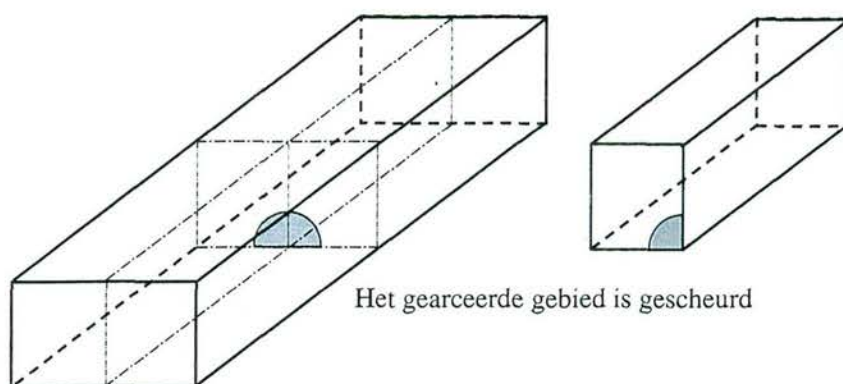
De modellen zijn zodanig opgebouwd dat afmetingen van de strip en van de scheur gemakkelijk gewijzigd kunnen worden. De resultaten van de modellering komen goed overeen met gepubliceerd werk. De procedure voor fracture mechanics in DIANA werkt ook correct voor analyses met een asymmetrische geometrie.

4.3 Semi-ellipsvormige scheur

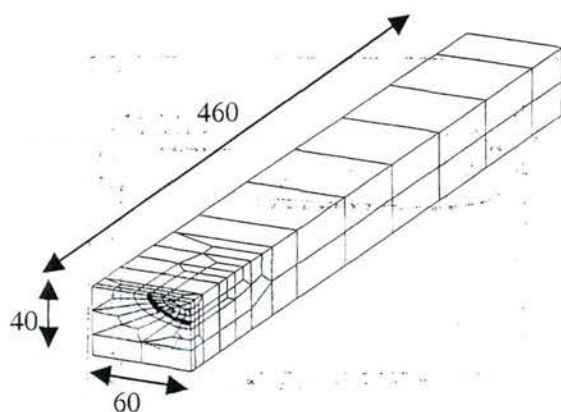
4.3.1 SMOZ blokje

In [10] zijn resultaten van een FEM berekening gepubliceerd voor de SIF van een semi-ellipsvormige scheur. De afmetingen van dit zogenaamde SMOZ blokje en de scheur volgden uit een proef.

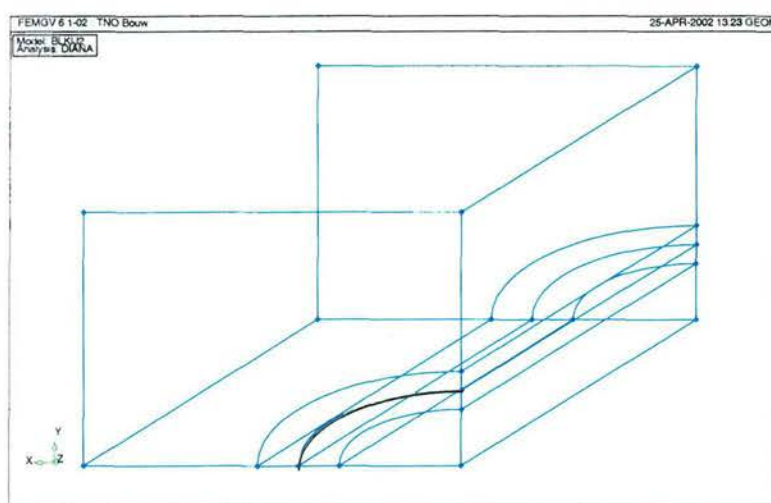
In de huidige studie is dezelfde semi-ellipsvormige scheur gemodelleerd. Er is gebruik gemaakt van symmetrie, zodat slechts een kwart van het blokje gemodelleerd is, zie Figuur 4.14. In Figuur 4.15 is het model gegeven dat gebruikt is in [10]. In de figuur zijn ook afmetingen van het gemodelleerde blok gegeven. De scheurafmetingen zijn $a = 11,85$ mm en $c = 25,9$ mm. De geometrie van het huidige model is gegeven in Figuur 4.16. De opleggingen (rood) en belastingen (roze) zijn gegeven in respectievelijk Figuur 4.17 en Figuur 4.18. Figuur 4.19 geeft de elementenverdeling van het model. Het scheurfront is in het zwart aangegeven.



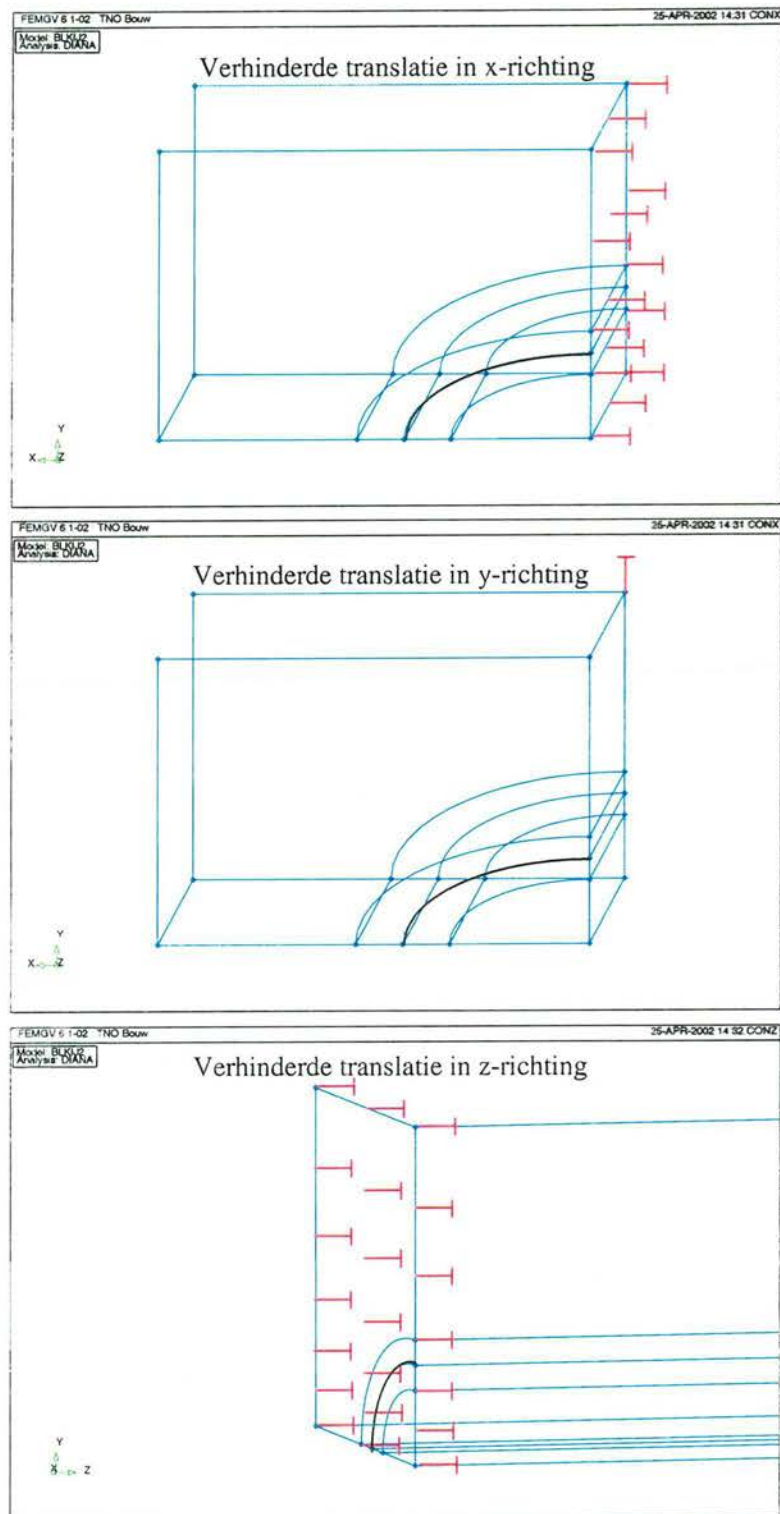
Figuur 4.14 Gehele SMOZ blokje en gemodelleerde kwart van het blokje.



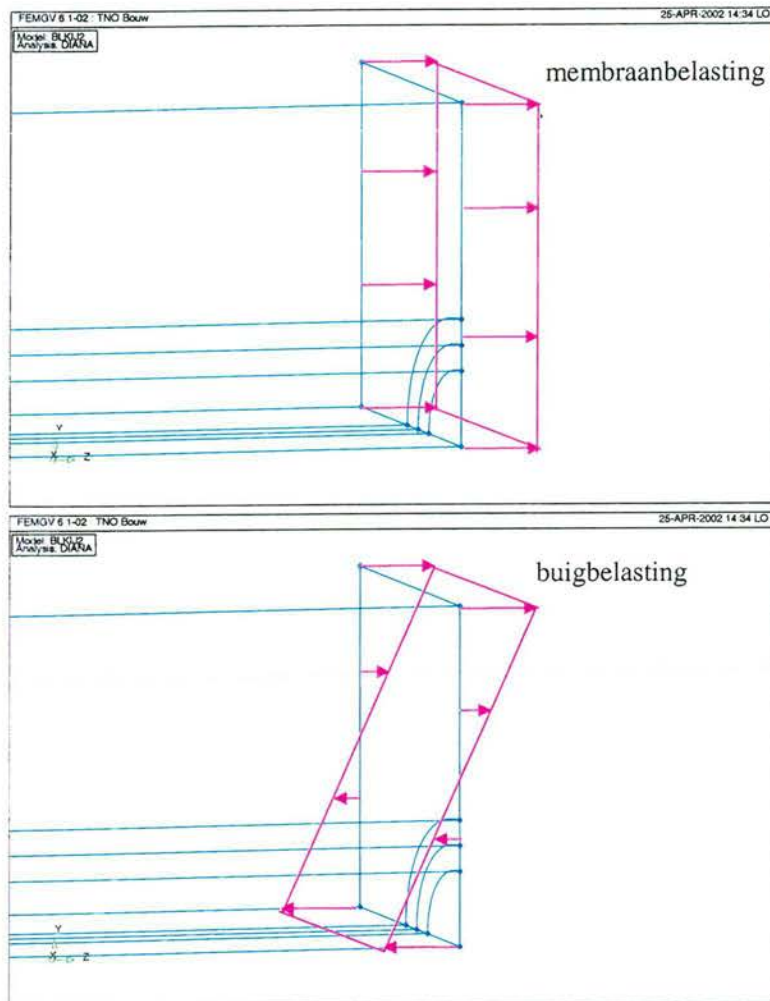
Figuur 4.15 Model zoals gebruikt in [10]



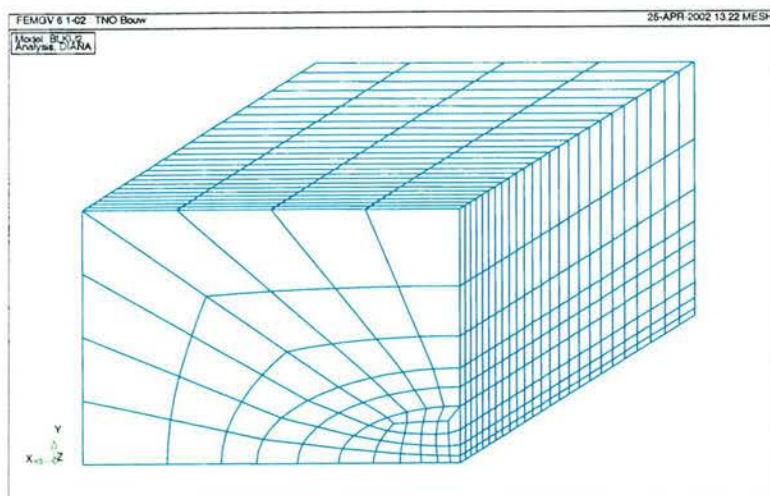
Figuur 4.16 Geometrie van het SMOZ blokje



Figuur 4.17 Randvoorwaarden van het SMOZ blokje



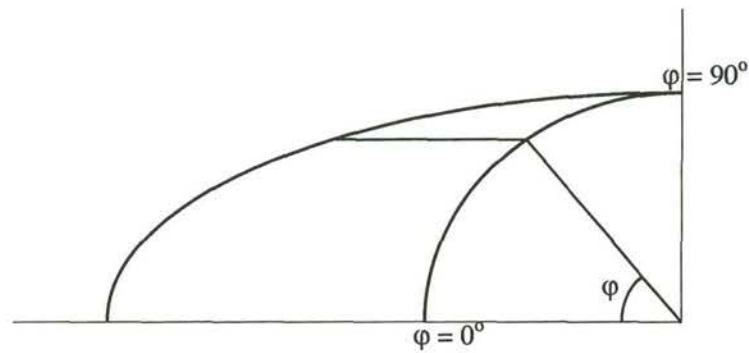
Figuur 4.18 Belastinggevallen van het SMOZ blokje



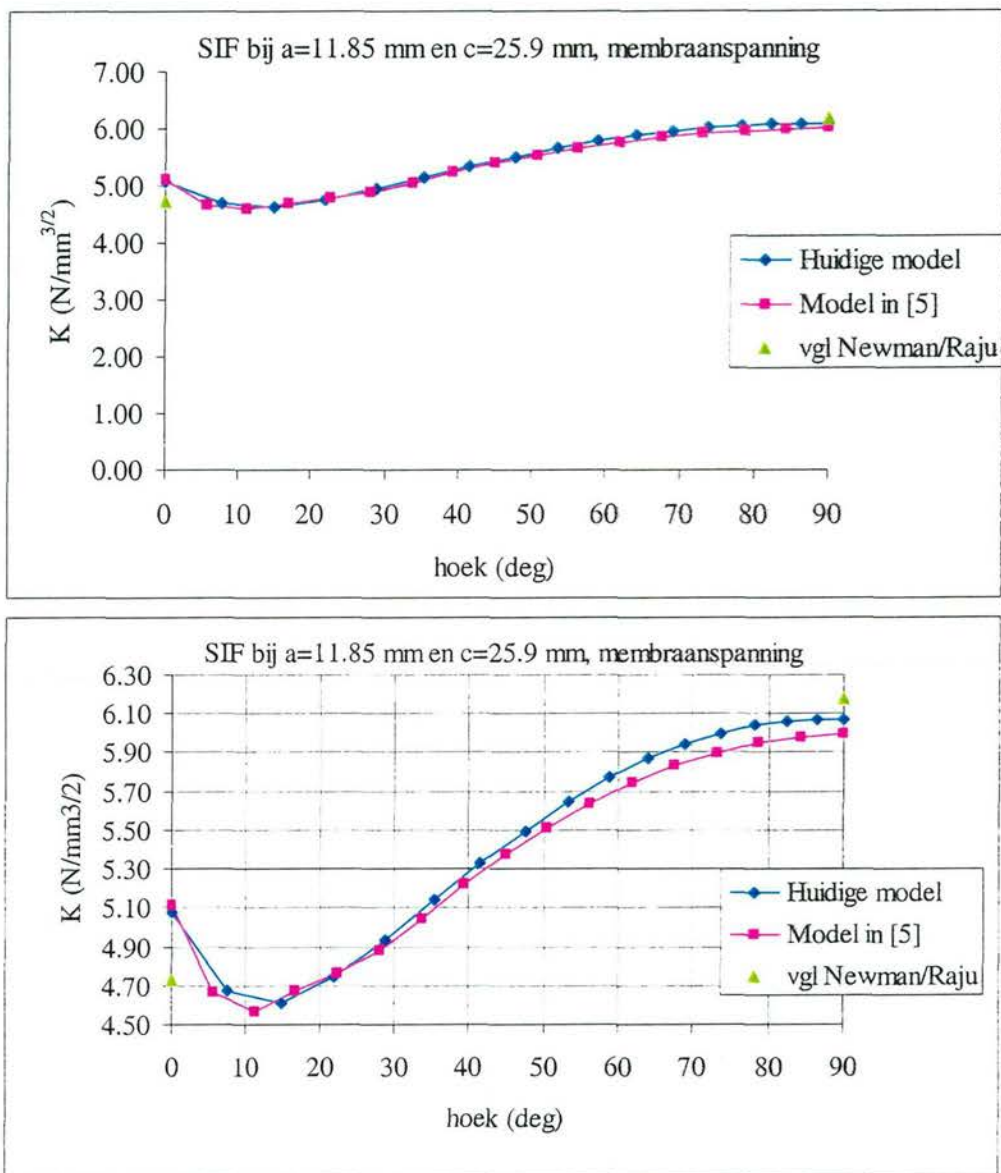
Figuur 4.19 Elementenverdeling van het SMOZ blokje

In Figuur 4.21 en Figuur 4.22 zijn de SIF langs het scheurfront voor het huidige model vergeleken met het model gebruikt in [10] voor trek en buiging. Op de horizontale as is hierbij een hoek uitgezet. De definitie van deze hoek voor een ellips is gegeven in Figuur 4.20.

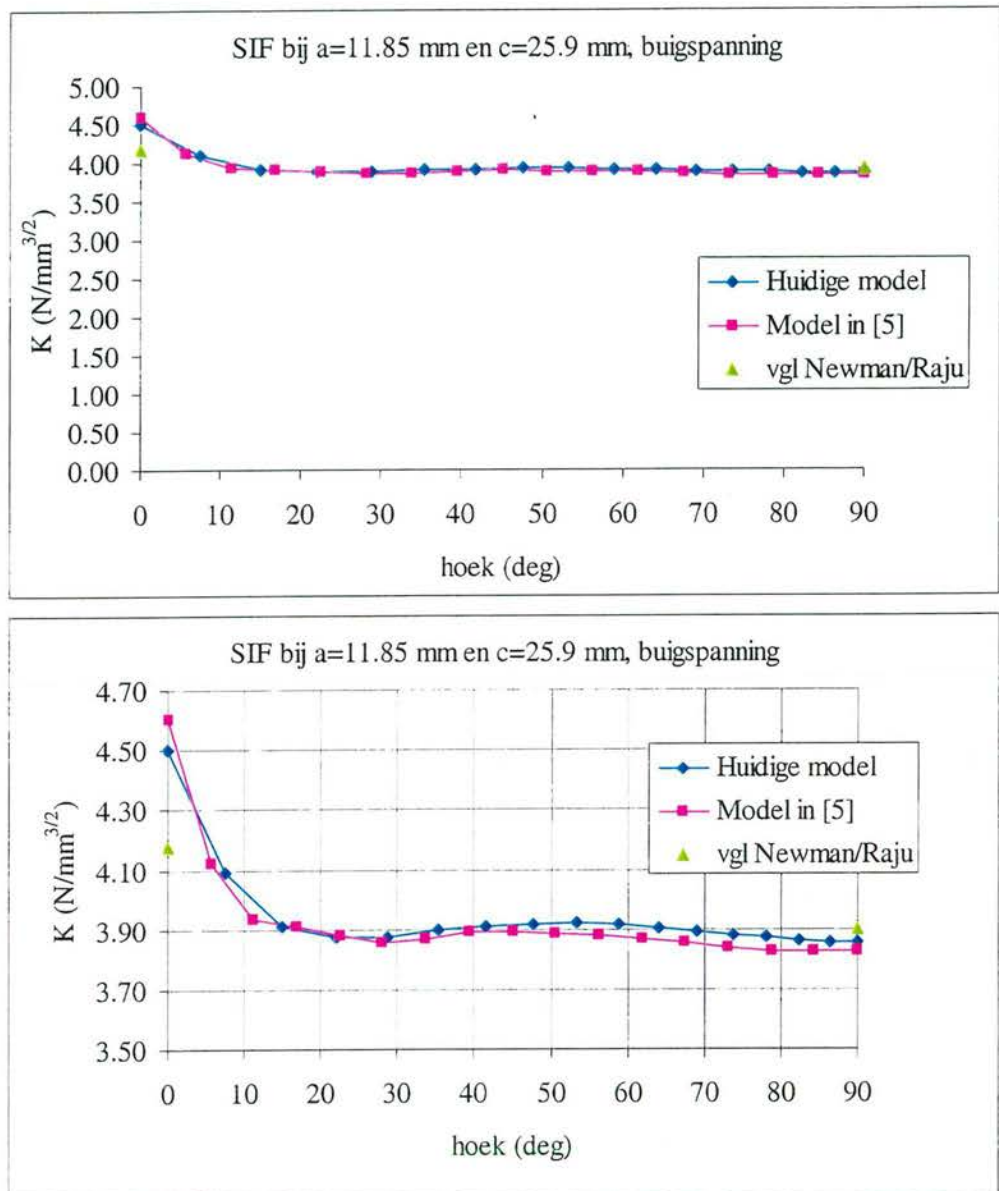
Het verschil in de SIF tussen de twee modellen voor trekbelasting is maximaal 1% en voor buigbelasting maximaal 2%. Bij de buigbelasting treedt het verschil op aan de rand van de scheur (langs het oppervlak). De gradiënt van de SIF is hier groot. Het verschil van 2% wordt veroorzaakt door een klein verschil in elementgrootte bij het scheurfront. In volgende analyses in het project zal daarom iets meer elementen langs het scheurfront aangebracht worden. De berekende waarden voor K_a en K_c komen goed overeen met een vergelijking opgesteld door Newman en Raju (zie hoofdstuk 5).



Figuur 4.20 Definitie van hoek φ bij ellipsvormige scheuren

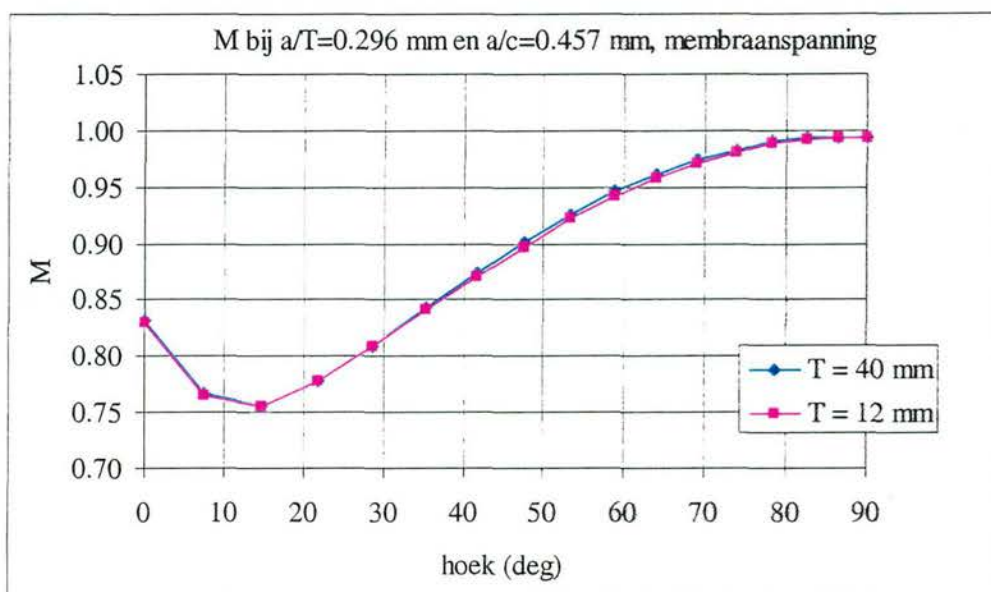


Figuur 4.21 SIF voor een half ellipsvormige scheur belast door trek

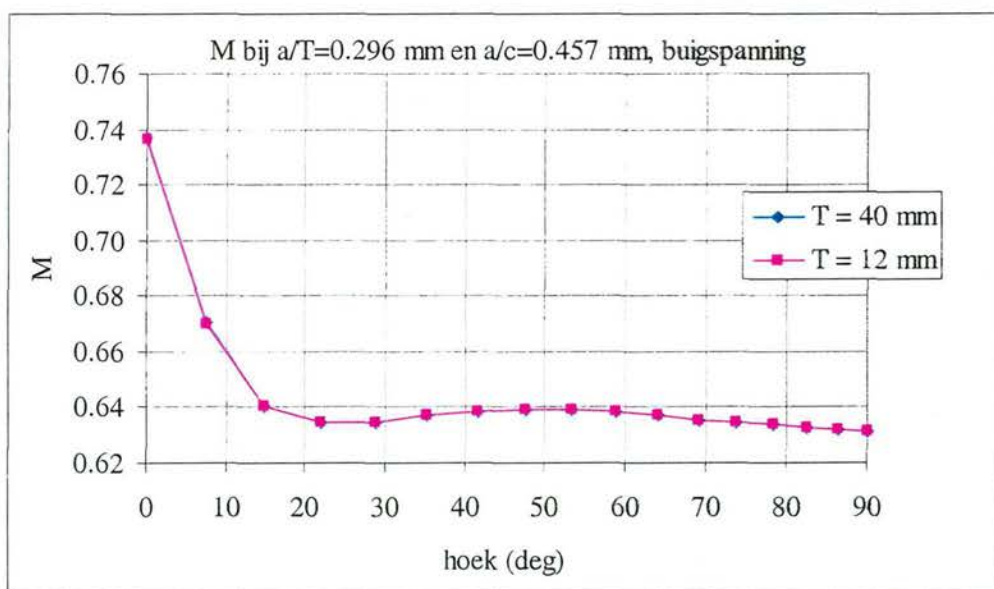


Figuur 4.22 SIF voor een half ellipsvormige scheur belast door buiging

Volgens de theorie mag de correctiefactor voor de geometrie, M , niet wijzigen bij wijziging van afmetingen. Om resultaten te kunnen controleren is hetzelfde SMOZ blokje gemodelleerd met een dikte van 12 mm in plaats van 40 mm. Alle afmetingen (lengte, breedte, scheurdiepte en -breedte) zijn met een zelfde factor geschaald. De berekende correctiefactoren voor het model met een dikte van 40 mm zijn in Figuur 4.23 en Figuur 4.24 vergeleken met de correctiefactoren voor het model met een dikte van 12 mm. De berekende correctiefactoren komen overeen.



Figuur 4.23 M voor half ellipsvormige scheuren belast door trek



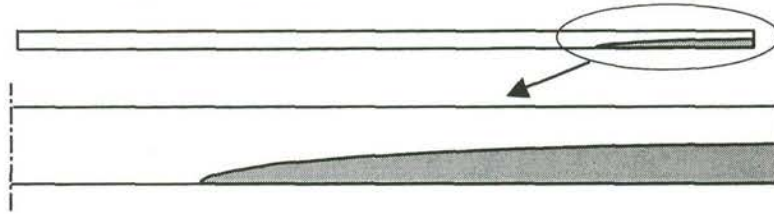
Figuur 4.24 M voor half ellipsvormige scheuren belast door buiging

De modellen zijn zodanig opgebouwd dat afmetingen van de strip en van de scheur gemakkelijk gewijzigd kunnen worden. De resultaten van de modellering komen goed overeen met [10]. De procedure voor fracture mechanics in DIANA werkt correct voor een semi-ellipsvormige scheur.

4.3.2 Dunne plaat met brede scheur ($T = 12 \text{ mm}$, $a/T = 1/2$, $a/c = 1/15$)

Voor het onderzoek naar de restlevensduur is de scheuruitbreiding van een zeer brede scheur van belang. In de voorstudie is een semi-ellipsvormige brede scheur gemodelleerd. Uit het verleden zijn geen SIF berekeningen bekend met modellen van dergelijke scheuren. Het verifiëren van de SIF volgens uit berekeningen met het hier gebruikte model is hierdoor minder goed mogelijk. Voor het model is gebruik gemaakt van symmetrie. In Figuur 4.25 is een vooraanzicht van de constructie gegeven. Het

gescheurde gedeelte is in grijs weergegeven. De breedte van de halve plaat is 1000 mm, de lengte is 150 mm, de dikte is 12 mm en scheurafmetingen zijn $a = 6$ mm en $c = 90$ mm ($a/T = 1/2$ en $a/c = 1/15$).

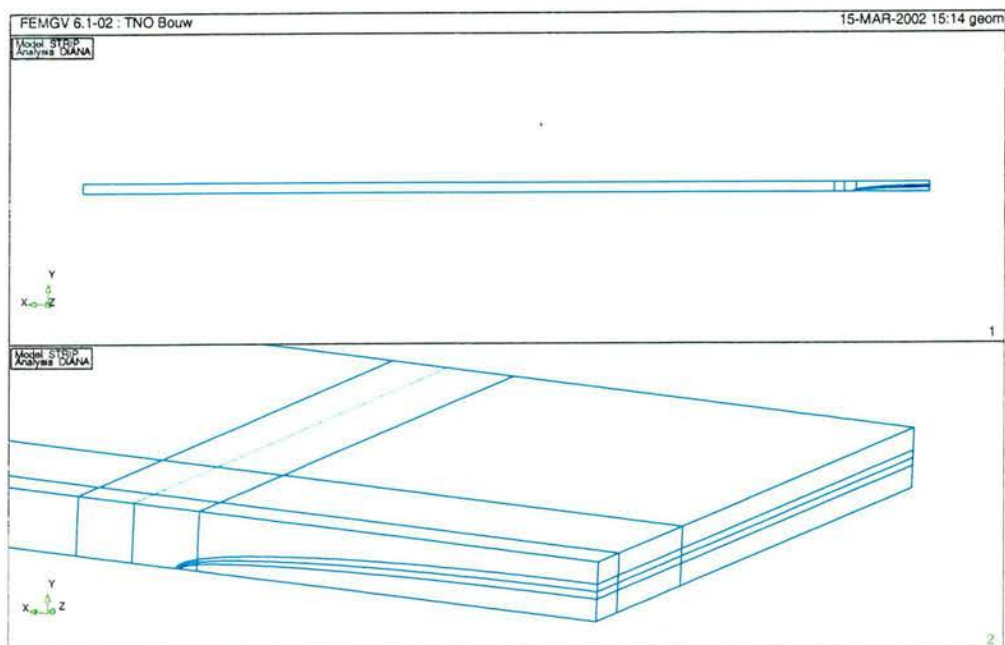


Figuur 4.25 Geometrie brede ellipsvormige scheur

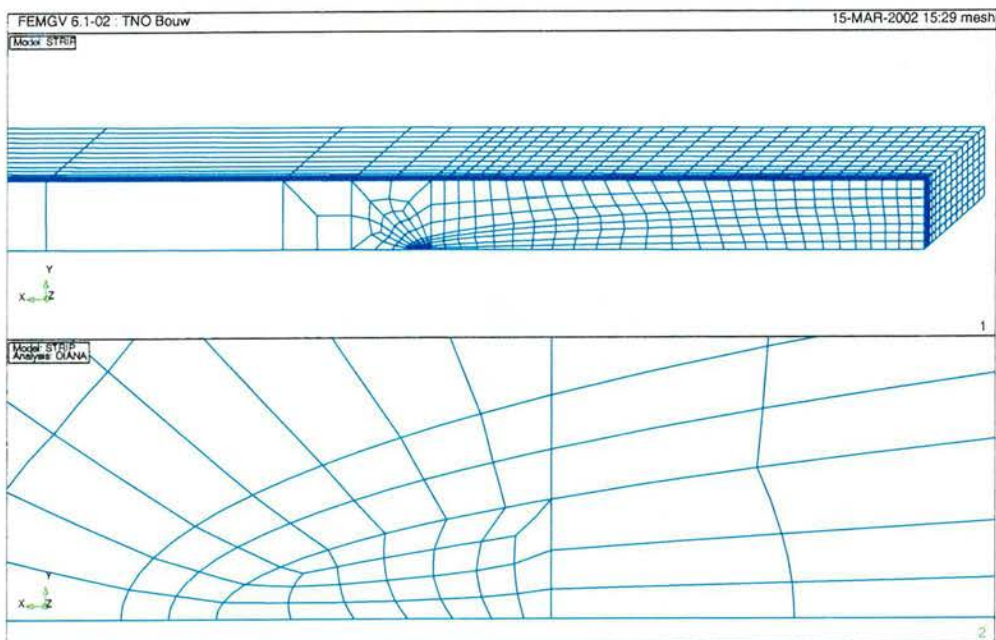
Voor deze geometrie zijn twee modellen met verschillende elementenverdelingen gemaakt. Geometrie en elementenverdeling van het eerste model zijn gegeven in respectievelijk Figuur 4.26 en Figuur 4.27. Bij dit model hebben vrijwel alle elementen een optimale vorm, gelet op de hoeken tussen de zijden en de verhoudingen van de afmetingen van de zijden van de elementen. De opbouw van het model is zodanig dat de elementenverdeling met de hand aangepast moet worden bij verandering in afmetingen; volledig parametriseren van dit model bleek niet goed mogelijk. Dit model wordt verder “handgemaakt model” genoemd.

Uit het vooronderzoek en uit eerder uitgevoerde studies is gebleken, dat de elementvorm van de elementen langs het scheurfront goed gevormd moeten zijn, maar dat de elementen hierbuiten kunnen volstaan met een minder geoptimaliseerde vorm. Figuur 4.28 en Figuur 4.29 geven de geometrie en de elementenverdeling van het tweede model. Hierin hebben de elementen buiten het scheurfront een minder optimale vorm, gelet op de hoeken tussen de zijden en de verhoudingen van de afmetingen van de zijden van de elementen. Dit model is geparametriseerd, zodat bij verandering in afmetingen enkel de veranderde parameters opgegeven dienen te worden. Dit model wordt verder “geparametriseerd model” genoemd.

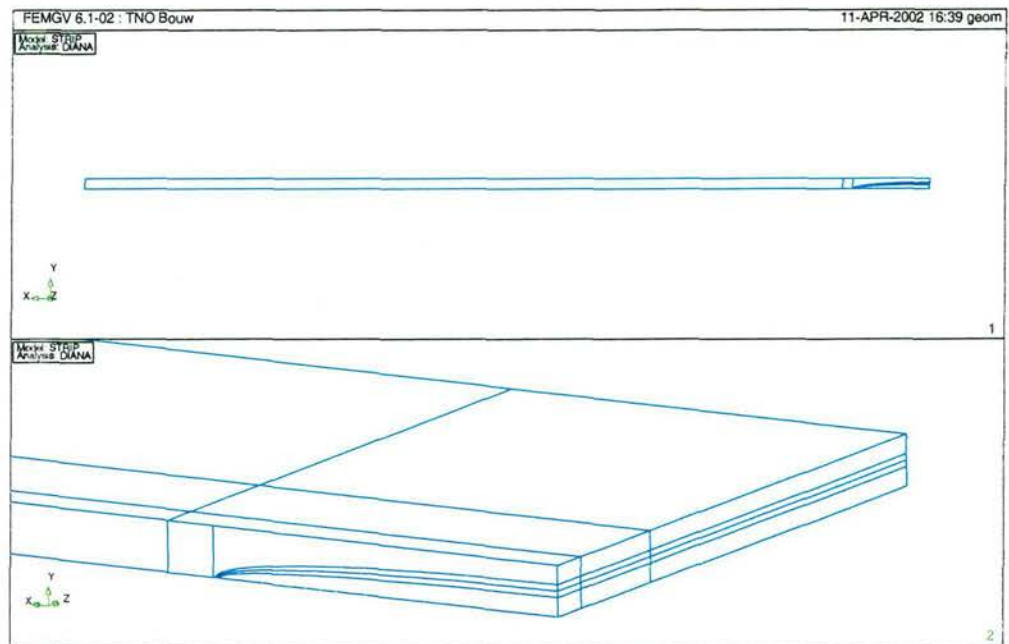
Randvoorwaarden en belastingen van beide modellen komen overeen met het model in Figuur 4.17 en Figuur 4.18.



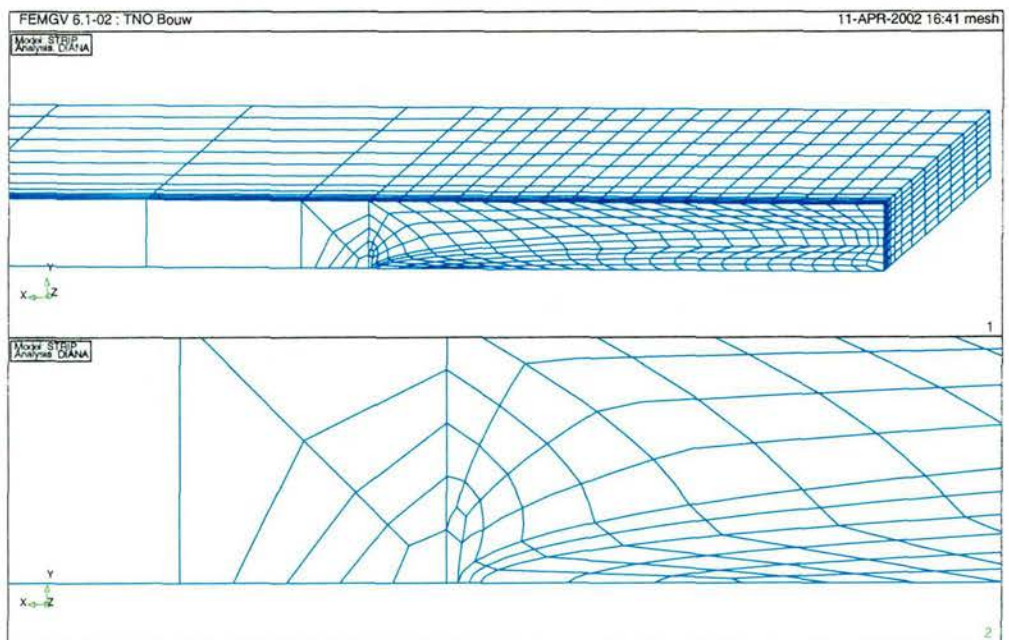
Figuur 4.26 Geometrie van het handgemaakt model



Figuur 4.27 Details elementverdeling van het handgemaakte model



Figuur 4.28 Geometrie van het geparametriseerde model van een brede scheur

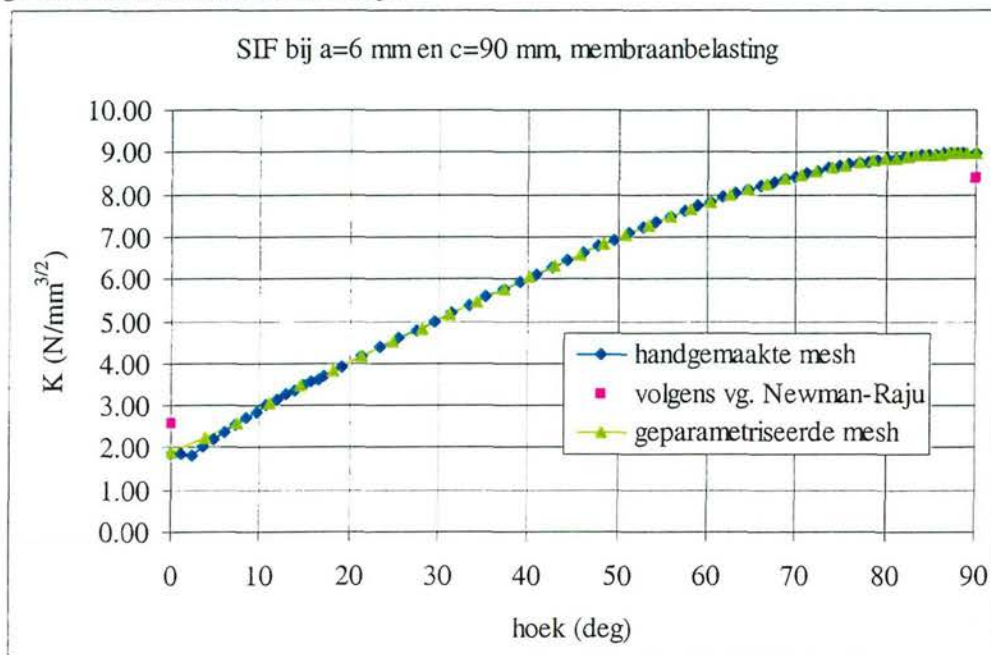


Figuur 4.29 Details mesh van het geparametriseerde model van een brede scheur

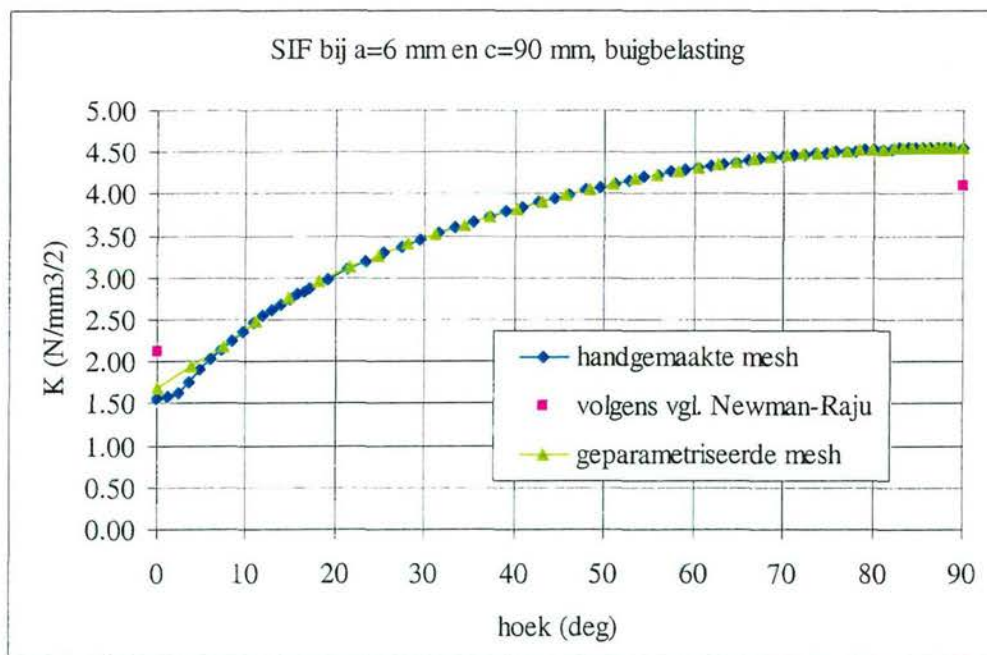
De SIF volgend uit de FEM analyses van beide modellen zijn vergeleken in Figuur 4.30 en Figuur 4.31 voor trek en buiging. Beide modellen resulteren in vrijwel dezelfde waarden voor de SIF. Enig verschil treedt op bij de rand van het model. Dit verschil wordt veroorzaakt door het randeffect en heeft te maken met de grootte van de elementen (zie ook [3]). Voor de bepaling van de SIF aan de rand van het model zal vanuit een zekere diepte geëxtrapoleerd moeten worden.

Om zonder veel aanpassingen een andere geometrie te kunnen modelleren wordt de voorkeur gegeven aan het geparametriseerde model bij het uitvoeren van SIF-berekeningen voor brede scheuren.

De berekende waarden voor K_a en K_c komen redelijk overeen met een vergelijking opgesteld door Newman en Raju (roze punten in de figuren, zie hoofdstuk 5). Het aanwezige verschil wordt geweten aan het ontbreken van sommen met overeenkomstige geometrieën door Newman en Raju.



Figuur 4.30 SIF bij trekspanning voor een brede half-ellipsvormige scheur

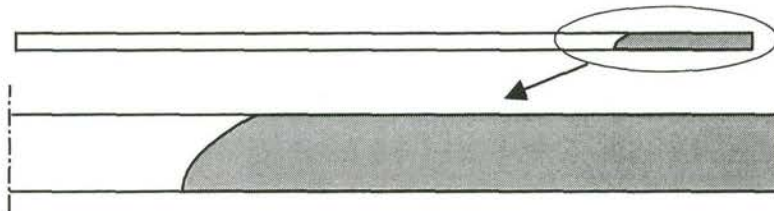


Figuur 4.31 SIF bij buigspanning voor een brede half-ellipsvormige scheur

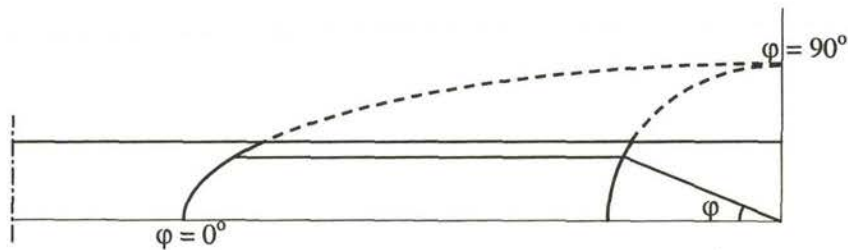
4.4 Door-de-wand scheur

Voor het onderzoek naar de restlevensduur is de scheuruitbreiding van een door-de-wand scheur van belang. In de voorstudie is een door-de-wand scheur met een semi-ellipsvormig scheurfront gemodelleerd. Uit het verleden zijn geen SIF berekeningen

bekend met modellen van dergelijke scheuren. Het verifiëren van de SIF volgend uit berekeningen met het hier gebruikte model is hierdoor minder goed mogelijk. Voor het model is gebruik gemaakt van symmetrie. In Figuur 4.32 is een vooraanzicht van de constructie gegeven. Het gescheurde gedeelte is in grijs weergegeven. De breedte van de halve plaat is 1000 mm, de lengte is 150 mm en de dikte is 12 mm en scheurafmetingen zijn $a = 24$ mm en $c = 90$ mm ($a/T = 2$ en $a/c = 4/15$), waarbij a de fictieve scheurdiepte is. De definitie van de hoek langs het scheurfront voor door-de-wand scheuren is gegeven in Figuur 4.33.



Figuur 4.32 Geometrie door-de-wand scheur



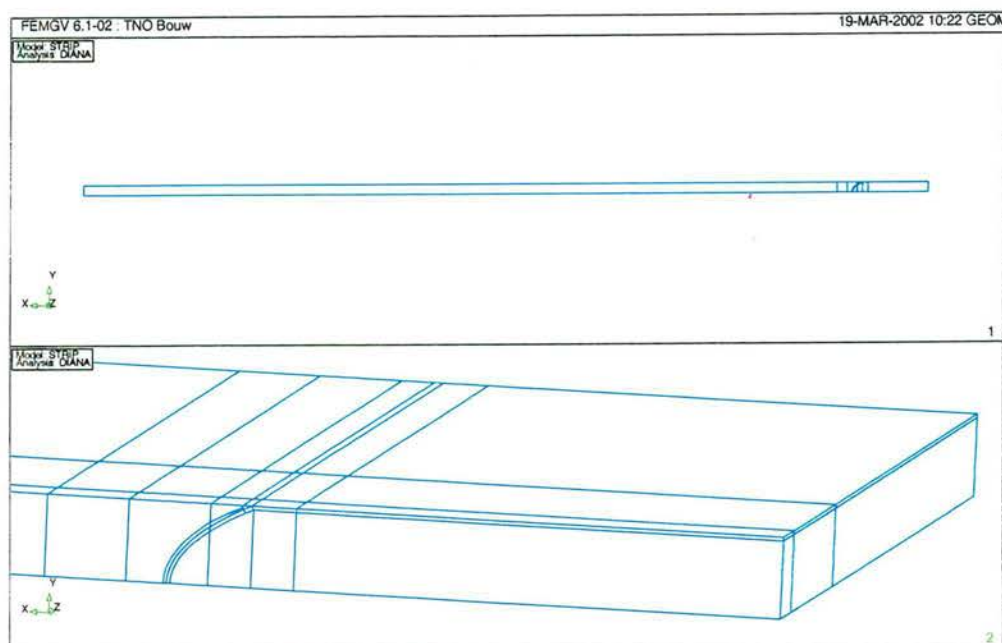
Figuur 4.33 Definitie van hoek φ bij door-de-wand scheuren

Voor deze geometrie zijn drie modellen met verschillende elementenverdelingen gemaakt. Geometrie en elementenverdeling van het eerste model zijn gegeven in respectievelijk Figuur 4.34 en Figuur 4.35. Dit is een handgemaakt model waarbij vrijwel alle elementen een optimale vorm hebben, gelet op de hoeken tussen de zijden en de verhoudingen van de afmetingen van de zijden van de elementen. Volledig parametriseren van dit model bleek niet goed mogelijk.

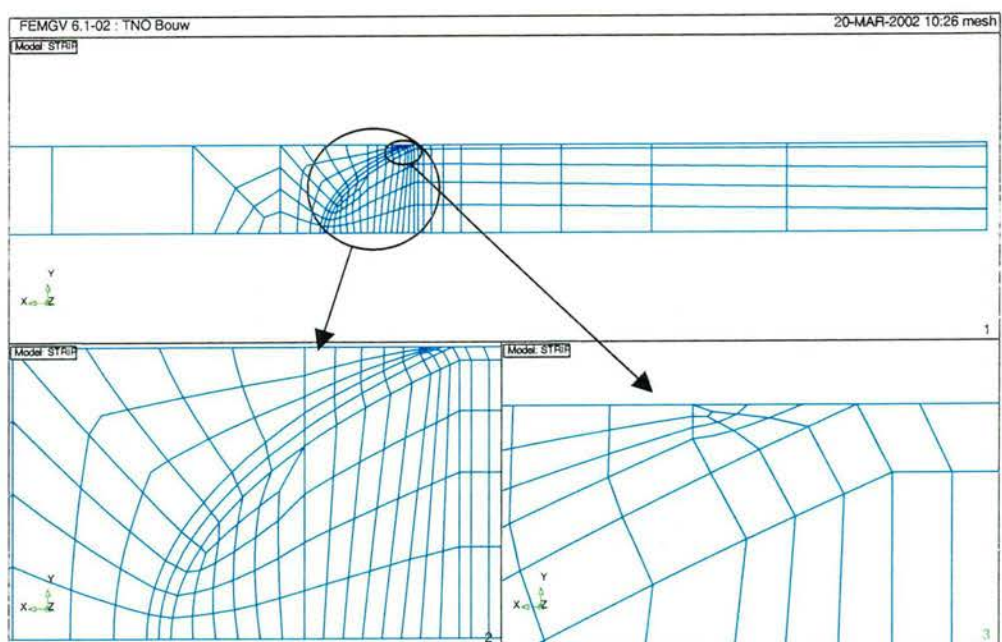
Om te onderzoeken of de gebruikte elementverdeling fijn genoeg is, is van dezelfde geometrie een model gemaakt met een fijnere elementverdeling, zie Figuur 4.36.

Figuur 4.37 en Figuur 4.38 geven de geometrie en de elementenverdeling van het derde model. Hierin hebben de elementen buiten het scheurfront een minder optimale vorm, gelet op de hoeken tussen de zijden en de verhoudingen van de afmetingen van de zijden van de elementen. Dit model is geparametriseerd, zodat bij verandering in afmetingen enkel de veranderde parameters opgegeven dienen te worden.

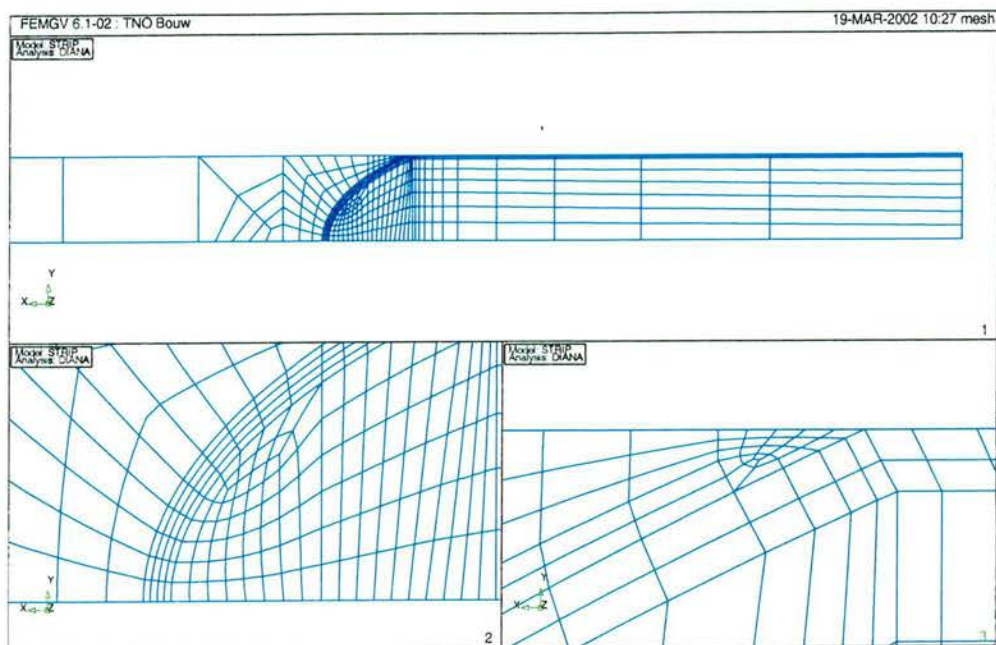
Randvoorwaarden en belastingen van de drie modellen komen overeen met het model in Figuur 4.17 en Figuur 4.18.



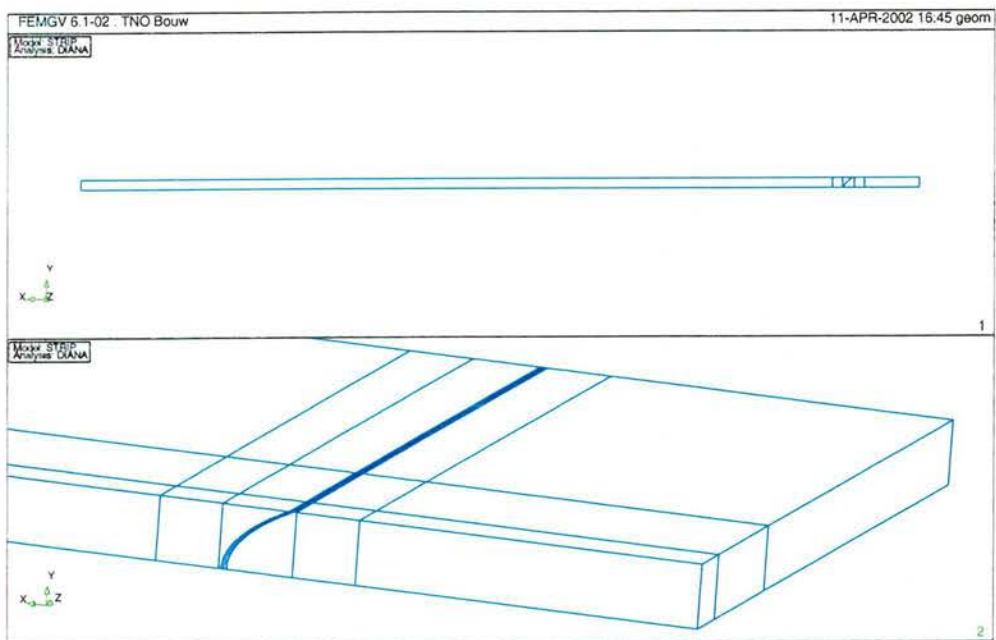
Figuur 4.34 Geometrie van de handgemaakte door-de-wand scheur



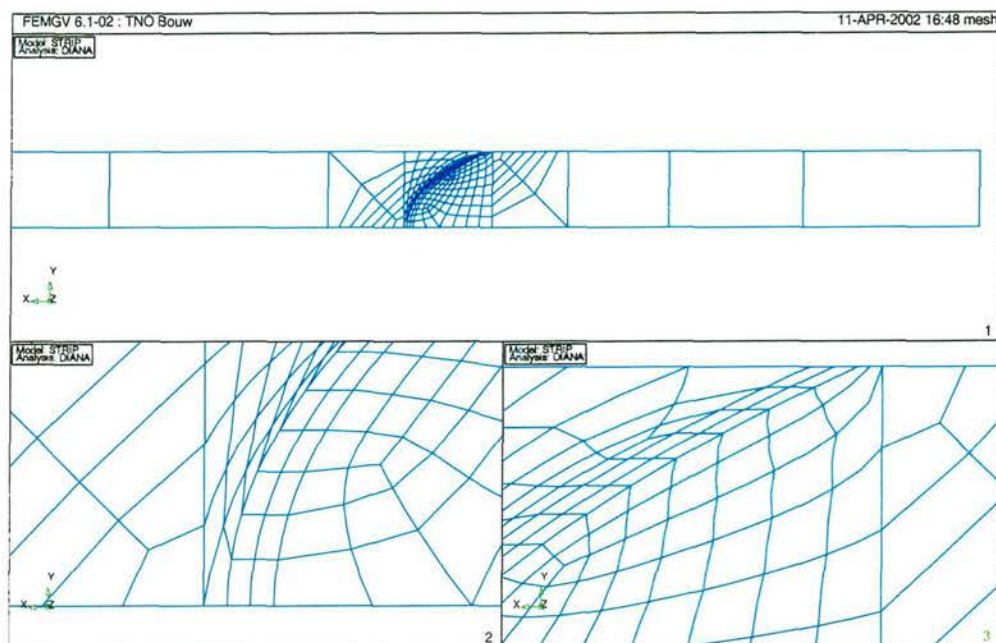
Figuur 4.35 Details van de mesh van de handgemaakte door-de-wand scheur



Figuur 4.36 Details van de zeer fijne mesh van de handgemaakte door-de-wand scheur



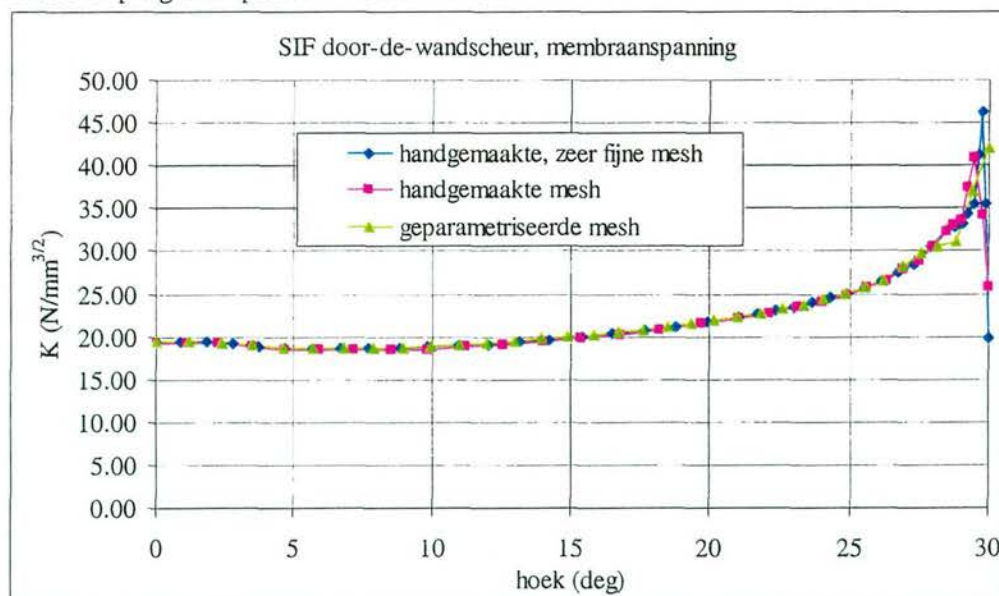
Figuur 4.37 Geometrie van de geparametriseerde door-de-wand scheur



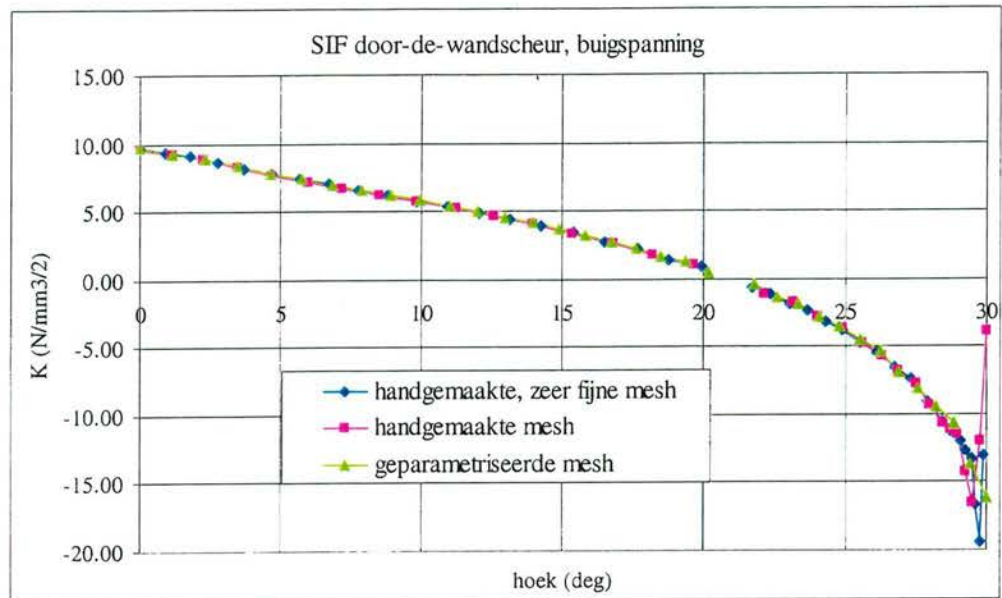
Figuur 4.38 Details van de mesh van de geparametriseerde door-de-wand scheur

De SIF volgend uit de FEM analyses zijn vergeleken in Figuur 4.39 en Figuur 4.40 voor respectievelijk trek en buiging. De modellen resulteren in vrijwel dezelfde waarden voor de SIF. Hieruit blijkt dat voor het handgemaakte model met wat grotere elementen en voor het geparametriseerde model een voldoende fijne elementenverdeling gebruikt is. Om zonder veel aanpassingen een andere geometrie te kunnen modelleren wordt de voorkeur gegeven aan het geparametriseerde model bij het uitvoeren van SIF-berekeningen voor brede scheuren.

Het randeffect zorgt bij alle modellen voor een verstoring van de SIF aan het oppervlak van de plaat. Voor de bepaling van de SIF aan de rand van het model zal vanuit een zekere diepte geëxtrapoleerd moeten worden.

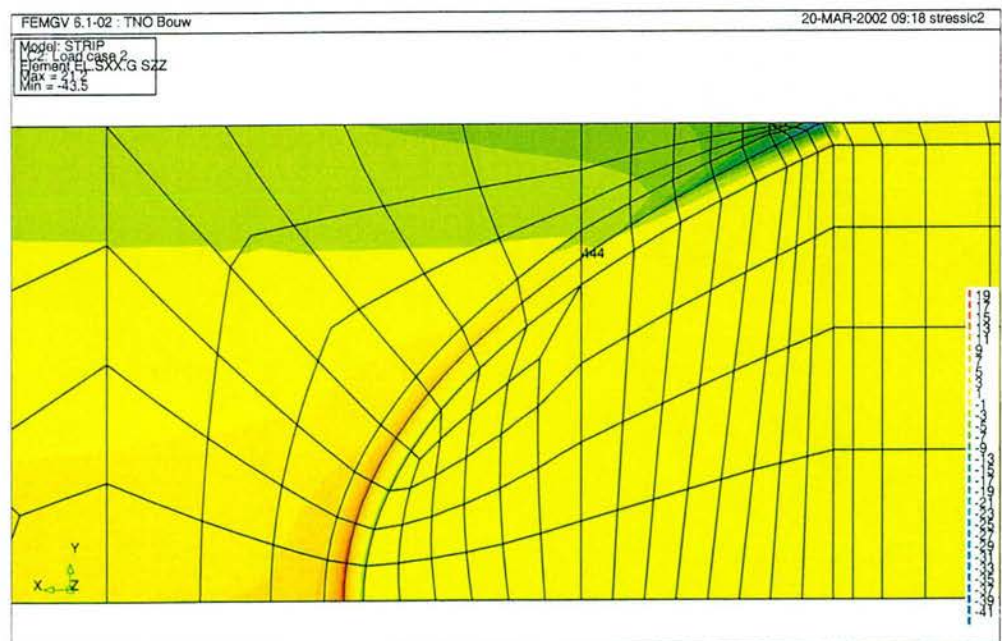


Figuur 4.39 SIF van een door-de-wand scheur, trekbelasting



Figuur 4.40 SIF van een door-de-wand scheur, buigging

In Figuur 4.40 wordt geen waarde voor de SIF berekend in knoop 444 (bij een hoek van ongeveer 22°). Dit wordt veroorzaakt doordat de spanningen en de rekken bij deze knoop juist van teken wisselen, zie Figuur 4.41 voor de spanningen. Hierdoor kan het voorkomen dat een negatieve energie berekend wordt voor deze knoop. Aangezien de energy release rate recht evenredig is met het kwadraat van de SIF kan voor een negatieve energy release rate geen waarde voor de SIF bepaald worden.



Figuur 4.41 Spanningen loodrecht op het scheurfront

Getallen voor de SIF van alle modellen zijn gegeven in bijlage E.

5 Correctiefactoren voor oppervlakte-scheuren in een plaat

5.1 Algemeen

Een semi-ellipsvormige oppervlakte scheur in een plaat belast op een combinatie van membraan- en buigspanning groeit zowel in diepte (a) richting als in breedte (c) richting. De algemene formules voor de SIF in diepte en breedte richting zijn:

$$\Delta K_a = (M_{ma} \cdot \Delta \sigma_m + M_{ba} \cdot \Delta \sigma_b) \frac{\sqrt{\pi a}}{\Phi} \quad (5.1)$$

$$\Delta K_c = (M_{mc} \cdot \Delta \sigma_m + M_{bc} \cdot \Delta \sigma_b) \frac{\sqrt{\pi a}}{\Phi} \quad (5.2)$$

Met:

- ΔK = interval van de spanningsintensiteitsfactor (SIF)
- M = geometrische correctiefactor voor een semi-ellipsvormige scheur in een plaat
- $\Delta \sigma$ = spanningsinterval
- Φ = elliptische integraal
- a = scheurdiepte
- index voor scheurdiepterichting
- c = index voor scheurbreedterichting
- m = index voor membraanspanning
- b = index voor buigspanning

Voor de formules voor Φ en M wordt verwezen naar de literatuur ([2] en [3]). De formules zijn afgeleid uit FEM analyses. In de publicaties staat dat de formules binnen 5% nauwkeurig zijn voor $a/T < 0.8$ met betrekking tot de uitgevoerde FEM analyses.

De waarde van Φ is afhankelijk van de scheurdiepte-breedte verhouding (z.g. aspect ratio ; a/c). In bijlage A is Φ als functie van a/c grafisch weergegeven.

De waarden van M zijn afhankelijk van de aspect ratio (a/c) en de relatieve scheurdiepte (a/T). In bijlage A zijn voor een aantal a/c verhoudingen de waarden van M als functie van a/T weergegeven.

Voor grote waarden van a/T vertonen de waarden voor M voor de breedte richting een wat merkwaardig verloop.

5.2 SIF voor SMOZ blokje volgens Newman en Raju

Voor de afmetingen van het SMOZ blokje (zie 4.3.1) zijn de SIF voor de diepte- en breedterichting voor zowel een membraanspanning als de buigspanning van 1 N/mm² bepaald. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 3. De resultaten passen goed in de resultaten van de FEM analyses in 4.3.1.

Tabel 3 SIF volgens Newman en Raju voor het SMOZ blokje

	SIF in diepte richting K_a	SIF in breedte richting K_c
$\Delta\sigma_m = 1 \text{ N/mm}^2$	$6.172 \text{ N/mm}^{3/2}$	$4.721 \text{ N/mm}^{3/2}$
$\Delta\sigma_b = 1 \text{ N/mm}^2$	$3.901 \text{ N/mm}^{3/2}$	$4.175 \text{ N/mm}^{3/2}$

5.3 SIF voor een brede scheur in een dunne plaat volgens Newman en Raju

Op eenzelfde wijze als hierboven beschreven voor het SMOZ blokje zijn de SIF voor de diepte- en breedterichting voor zowel een membraanspanning als de buigspanning van 1 N/mm² bepaald voor de brede ellipsvormige scheur, beschreven in 4.3.2. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 5.2. De resultaten komen redelijk overeen met de FEM analyses.

Tabel 5.2 SIF volgens Newman en Raju voor de brede ellipsvormige scheur

	SIF in diepte richting K_a	SIF in breedte richting K_c
$\Delta\sigma_m = 1 \text{ N/mm}^2$	$8.350 \text{ N/mm}^{3/2}$	$2.560 \text{ N/mm}^{3/2}$
$\Delta\sigma_b = 1 \text{ N/mm}^2$	$4.101 \text{ N/mm}^{3/2}$	$2.116 \text{ N/mm}^{3/2}$

6 Oriënterende scheurgroeianalyses plaat- en dekgeometrie

6.1 Algemeen

Bij TNO Bouw is software ontwikkeld voor het uitvoeren van scheurgroei-analyses met behulp van de breukmechanica. Deze programmatuur is bekend onder de naam FAFRAM (FATigue FRacture Mechanics).

Deze programmatuur is speciaal ontwikkeld voor scheuren in gelaste verbindingen en is al voor diverse projecten gebruikt.

Als demonstratie van de mogelijkheden en vooruitlopend op fase 2, 3 en 4 van dit project is een aantal analyses uitgevoerd. Het voornaamste doel van deze analyses is inzicht te verkrijgen in de aspect ratio die gebruikt moet worden bij de uit te voeren FEM analyses.

Scheurgroei-analyses zijn uitgevoerd voor een plaatgeometrie en voor een dekgeometrie.

6.2 Plaatgeometrie

Een scheurgroei-analyse is uitgevoerd voor een plaatgeometrie. Deze geometrie is vergelijkbaar met de geometrie van de plaat van fase 2.

De volledige analyse en de resultaten zijn weergegeven in bijlage B. De belangrijkste uitgangspunten zijn:

plaatdikte	$T = 12 \text{ mm}$
initiële scheurdiepte	$a_i = 0.15 \text{ mm}$
initiële halve scheurbreedte	$c_i = 0.15 \text{ mm}$
eindscheur diepte	$a_f = T$
spanningsinterval	$\Delta\sigma_b = 100 \text{ N/mm}^2$
SIF plaat	volgens Newman en Raju
scheurgroeikromme	Paris relatie met $m = 3$ en $C = 1.832 \text{ (N, mm)}$

De resultaten zijn:

levensduur	$N = 22.28 \cdot 10^6$ wisselingen
halve scheurbreedte bij doorscheuren	$c_n = 94.5 \text{ mm}$

In bijlage B is ook een grafische weergave van de scheurgrootte en de scheurgroeisnelheid als functie van het aantal wisselingen te zien.

6.3 Dekgeometrie

Een scheurgroei-analyse is uitgevoerd. Deze geometrie is vergelijkbaar met de geometrie van de het dek van fase 4. De modellering is gelijk aan die toegepast in eerdere studies voor RWS (o.a. [1]).

De volledige analyse en de resultaten zijn weergegeven in bijlage C. Een groot aantal uitgangspunten is gelijk aan die van de plaatgeometrie. In aanvulling daarop zijn twee modificaties van belang.

Ten eerste is er de invloed van de lasten van de lasverbinding tussen de dekplaat en de trogwand. Hiervoor wordt een spanningsintensiteitsconcentratiefactor (Mk factor) gebruikt. De waarde hier van is afhankelijk van de lasgeometrie en de relatieve plaatdikte. Voor dit geval is een uitdrukking gebruikt die is ontwikkeld bij TWI in de UK (en ook gebruikt wordt in PD6493 [8]), aangevuld met een uitdrukking voor de lashoek opgesteld door TNO [6]. Voor de berekening van de Mk in de diepte richting wordt als relatieve diepte a/T gebruikt, terwijl voor de breedte richting een fictieve relatieve diepte van $c/T = 0.001$ gebruikt wordt.

Verder is de invloed van de spanningsconcentratiefactor ten gevolge van de aanwezigheid van de dwarsdrager in rekening gebracht door een reductiefactor op de spanning in te voeren als de scheur breder wordt en dus uit het gebied met de hoogste spanning loopt.

De resultaten voor deze dekgeometrie zijn:

levensduur $N = 7.62 \cdot 10^6$ wisselingen
 halve scheurbreedte bij doorscheuren $c_n = 305$ mm

In bijlage C is ook een grafische weergave van de scheurgrootte en de scheurgroei-snelheid als functie van het aantal wisselingen te zien.

Een variant op de bovengenoemde analyse is te vinden in bijlage D. Hierbij is voor de fictieve relatieve diepte voor de berekening van de Mk in breedte richting een c/T waarde van $= 0.15/T$ gebruikt.

De resultaten voor deze variant voor de analyse van de dekgeometrie zijn:

levensduur $N = 14.35 \cdot 10^6$ wisselingen
 halve scheurbreedte bij doorscheuren $c_n = 142$ mm

Voor een nadere vergelijking wordt verwezen naar paragraaf 6.4.

6.4 Vergelijking plaat- en dekgeometrie en aspect ratios

De resultaten van de plaat- en dekgeometrie zijn in Tabel 4 samengevat.

Tabel 4 Samenvatting resultaten scheurgroeianalyses

Geometrie	aantal wisselingen, N	halve scheurbreedte, c_n
Plaat	$22.28 \cdot 10^6$	94.5 mm
Dek met $cT = 0.001$	$7.62 \cdot 10^6$	305 mm
Dek met $cT = 0.15/T = 0.0125$	$14.35 \cdot 10^6$	142 mm

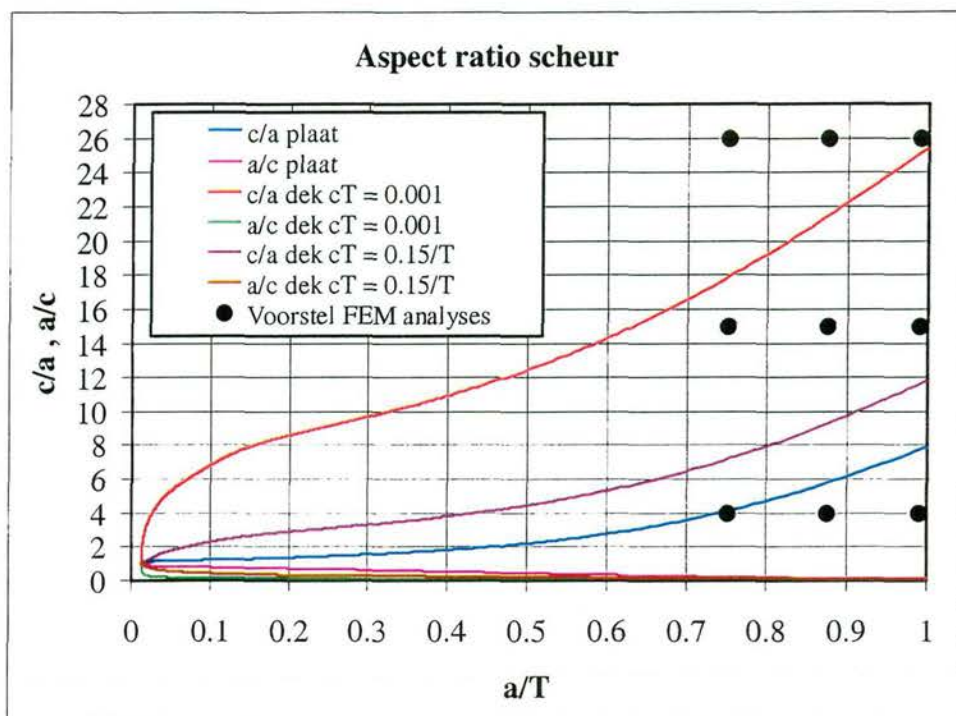
De plaatgeometrie heeft de langste levensduur en de kleinste scheurbreedte. Dit is verklaarbaar in verband met de afwezigheid van de lasgeometrie zal de scheur minder snel groeien. Bij diepere scheuren zal de scheurgroei aan het oppervlak in de situatie van een dek met een lasteen sneller gaan en zal de scheur dus relatief breder worden.

Het verschil tussen de twee dekanalyses is ook verklaarbaar. Bij ondiepe relatieve fictieve scheurdiepte voor de bepaling van Mk in breedte richting ($cT = 0.001$) is de Mk factor groter. Hierdoor wordt de scheur dus breder en de levensduur korter.

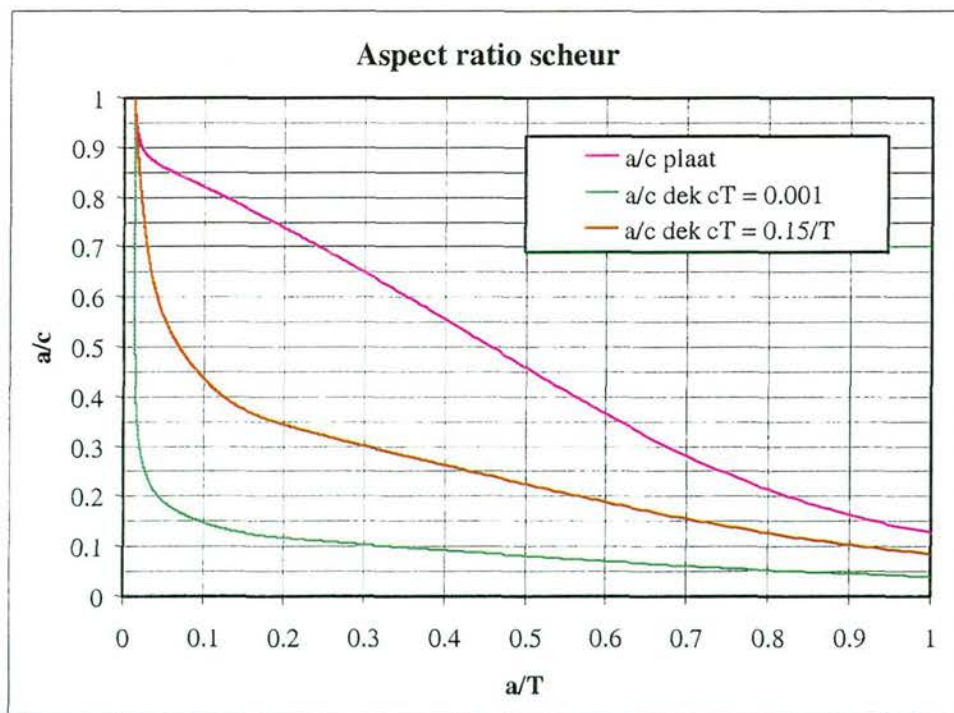
Welke waarde gebruikt moet worden voor cT is discutabel. Bij de analyses voor RWS is tot nu toe steeds voor de conservatieve waarde voor relatief dunne platen van 0.001 gekozen. Een vaste waarde voor de fictieve scheurdiepte van 0.15 mm lijkt beter aan te sluiten bij de fysieke werkelijkheid van een lasteen met kleine initiële defecten, die onafhankelijk van de plaatdikte zijn.

De aspect ratios van de scheuren gedurende de levensduur zijn weergegeven in Figuur 6.1 en Figuur 6.2. Uit deze figuren blijkt dat gedurende de gehele levensduur de scheur van het dek met $cT = 0.001$ het breedst is en de scheur in de plaat het smalst.

Voor de volgende fasen moet een aantal semi-ellipsvormig scheuren worden doorgerekend met verschillende aspect ratios (zie Tabel 1). Teneinde de te verwachten aspect ratios van de plaat en het dek volledig te omvatten wordt voorgesteld om analyses te maken met c/a waarden van 4, 15 en 26. Voor de relatieve scheurdiepte wordt voorgesteld om 0.75, 0.875 (ipv 0.85) en 0.99 te nemen.



Figuur 6.1 Aspect ratios en voorstel voor FEM analyses



Figuur 6.2 Aspect ratios met nadruk op a/c waarden

7 Conclusies

Er is een algemene oriëntatie uitgevoerd met betrekking tot de restlevensduur van stalen rijdekken. In deze oriëntatie is een overzicht van het totaal project en de fasering gegeven.

Verder is een korte algemene inleiding in de breukmechanica gepresenteerd.

Daarnaast zijn oriënterende FEM analyses ter bepaling van spanningsintensiteitsfactoren uitgevoerd.

Met de uit de literatuur verkregen algebraïsche uitdrukkingen zijn correctiefactoren voor semi-ellipsvormige scheuren bepaald en vergeleken met de resultaten van de FEM analyses.

Oriënterende scheurgroei-analyses van plaat en dekgeometrieën zijn uitgevoerd.

Uit de oriënterende FEM analyses zijn de volgende conclusies te trekken:

- a) De FEM analyses voor rechte scheurfronten (2D en 3D geometrieën) geven resultaten die overeenkomen met eerdere studies van TNO Bouw en literatuurgegevens.
- b) De FEM analyses voor semi-ellipsvormige scheuren uitgevoerd aan eerder door TNO Bouw geanalyseerde geometrieën geven resultaten die overeenkomen met de eerdere studies. De resultaten komen ook goed overeen met de formules van Newman en Raju.
- c) De FEM analyses aan een brede scheur in een dunne plaat geven resultaten die redelijk overeenkomen met de formules van Newman en Raju. Opgemerkt moet worden dat de aspect ratio (a/c) van deze scheur geringer is dan die van de analyses waarop de formules zijn gebaseerd.
- d) De resultaten van de FEM analyses van een door-de-wand scheur in een dunne plaat zien er goed uit. Bij het belastingsgeval van buiging ontstaat er aan de drukzijde een negatieve SIF. Bij de overgang van trek naar druk ontstaat een punt met een negatieve waarde voor G , waardoor daar ter plaatse geen SIF kan worden bepaald. Dit punt valt nagenoeg samen met het nulpunt voor de SIF. Hoe in een scheurgroeianalyse met deze negatieve waarde van de SIF moet worden omgegaan is op dit moment nog niet geheel duidelijk.
- e) In de 3D resultaten is in veel gevallen aan de vrije rand sprake van een randeffect. Dit effect uit zich door een piek in de SIF direct onder het oppervlak en een sterke daling van de SIF aan het vrije oppervlak. Door Newman en Raju is ook op dit effect gewezen. Zij hebben dit "opgelost" door een vrij grove mesh te kiezen, waardoor het effect wordt onderdrukt. Voorgesteld wordt om in deze studie in voorkomende gevallen vanuit een zekere diepte te extrapoleren naar het oppervlak.
- f) Een optimale, geautomatiseerde modellering van de FEM geometrieën is in een aantal gevallen niet eenvoudig gebleken. In voorkomende gevallen zijn daarom van de geometrie twee modellen gemaakt; één met een handmatig opgestelde elementverdeling, waarbij alle elementen een optimale vorm hebben en één met een geautomatiseerde (geparametriseerde) elementverdeling, waarbij niet alle elementen een optimale vorm hebben. Uit de vergelijking van de SIFs van beide modellen is gebleken, dat rond de scheurtip een goede mesh verdeling aangehouden dient te worden voor een juiste berekening van de SIFs. In gebieden verder van de scheurtip verwijderd is een optimale mesh minder van belang; de berekende SIFs komen dan nog goed overeen met het handmatig opgestelde model. Door te werken met geparametriseerde modellen kan de benodigde tijd voor het maken van de mesh beperkt blijven.

- g) Resumerend kan worden geconcludeerd dat het met DIANA goed mogelijk is om SIF te bepalen in een 3D geometrie.

Uit de oriënterende scheurgroeianalyses zijn de volgende conclusies te trekken:

- a) Voor het geval van buiging worden bij een plaatgeometrie en een dekgeometrie vrij brede scheuren verwacht.
- b) De scheurbreedte in een dekgeometrie is afhankelijk van de fictieve diepte die wordt toegepast voor de berekening van de invloed van de lasten voor de scheurgroei in de breedte.

8 Aanbevelingen voor fase 2

Voor fase 2 kunnen op basis van deze oriënterende studie de volgende aanbevelingen worden geformuleerd:

- a) De modellering van de gescheurde geometrieën dient, in verband met de benodigde tijd, zoveel mogelijk te worden geparametriseerd. Hierbij zullen voor gebieden verder van de scheurtip verwijderd concessies aan de mesh verdeling moeten worden geaccepteerd.
- b) Bij het ontstaan van het z.g. randeffect zal de SIF aan het oppervlak door extrapolatie moeten worden vastgesteld.
- c) Speciale aandacht zal moeten worden besteed aan de toepassing van negatieve SIF in de scheurgroeianalyses. Hierbij zal pragmatisch te werk moeten worden gegaan.
- d) Op basis van de oriënterende scheurgroeianalyses wordt voorgesteld om voor de semi-ellipsvormige scheuren uit te gaan van de volgende relatieve scheurdieptes: 0.75 , 0.875 en 0.99 en voor elke scheurdiepte de volgende c/a verhoudingen 4 , 15 en 26.
- e) Voor de door-de-wand scheuren zal de scheurgeometrie als een semi-ellips worden gedefinieerd met scheurdiepte a en halve scheurbreedte c, waarbij een fictieve waarde van a, groter dan de plaatdikte, zal worden gebruikt.

9 Referenties

- [1] Vrouwenvelder, A.C.W.M., Dijkstra, O.D. and Foeken, R.J. van, "Basisfilosofie voor het ontwerpen van verkeersbruggen – Onderdeel Vermoeing Stalen Rijdekken – Probabilistische Ontwerpfilosofie", TNO rapport 1999-CON-DYN-R0108, 25 oktober 2000.
- [2] Newman, J.C. and Raju, I.S., "An empirical stress-intensity factor equation for the surface crack" Engineering fracture mechanics, 15, pp 185-192, 1981.
- [3] Newman, J.C. and Raju, I.S., "Stress intensity factor equations for cracks in three-dimensional finite bodies subjected to tension and bending loads", NASA Technical Memorandum 85793, April 1984.
- [4] Dijkstra, O.D., Snijder, H.H., Overbeeke, J. and Wildschut, H., "Prediction of fatigue crack growth for welded joints using stress intensity factors determined by FEM calculations", SIMS '87, Delft, 1987
- [5] Straalen, I.J.J.van, Dijkstra, O.D. and Snijder, H.H., "Stress intensity factors and fatigue crack growth of semi-elliptical surface cracks at weld toes", Weldtech '88, London, 1988.
- [6] Dijkstra, O.D., Snijder, H.H. and Straalen, I.J.J.van, "Fatigue crack calculations using stress intensity factors for weld toe geometries", OMAE '89, The Hague, 1989.
- [7] Dijkstra, O.D., Straalen, I.J.J.van, "Fracture mechanics and fatigue of welded structures", International conference on Performance of Dynamically Loaded Welded Structures – IIW 50th Annual Assembly Conference, San Francisco, CA, USA, July 14-15, 1997.
- [8] Guidance on methods for assessing the acceptability of flaws in fusion welded structures. PD 6493: 1991. British Standard institution.
- [9] Rooke, D.P., Cartwright, D.J., "Compendium of Stress Intensity Factors", London, 1976.
- [10] Dijkstra, O.D., Snijder, H.H., Overbeeke, J., Wildschut, H., Scholte, H.G., "Fatigue behaviour of welded joints in offshore steel structures", Delft, 1988.
- [11] DIANA user's manual Release 7, volume Element Library, 2000 (first edition August 1998).

A Correctiefactoren voor een semi-ellipsvormige scheur in een vlakke plaat volgens Newman en Raju ([2] [3]).

Spanningsintensiteitsfactor voor een semi-ellipsvormige scheur in een vlakke plaat

Correctiefactoren volgens Newman en Raju

Algemeen: alle eenheden in N en mm

ORIGIN := 1

$$\text{MPa} := \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Plaatdikte

$T := 12 \cdot \text{mm}$ $\text{nac} := 1 \dots 10$

$W := 1000000000 \cdot \text{mm}$

Scheurdiepte a

$\text{na} := 20$

$\text{naT} := 1 \dots \text{na} + 1$

$$a_{\text{naT}} := \frac{\text{naT} - 0.9}{\text{na}} \cdot T$$

Aspect ratio a/c

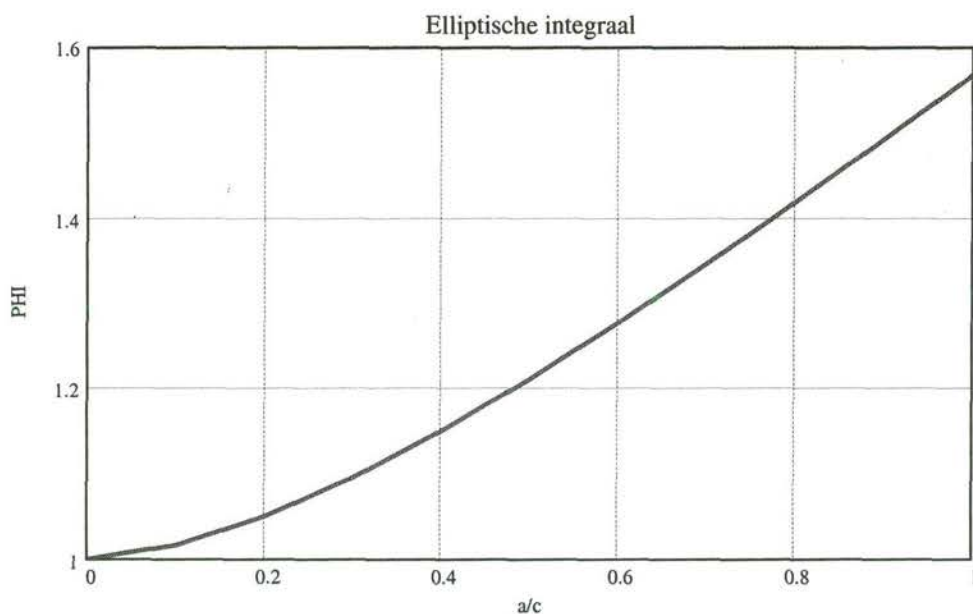
$\text{nac} := 10$

$\text{nacr} := 1 \dots \text{nac} + 1$

$$\text{acr}_{\text{nacr}} := \frac{\text{nacr} - 0.99}{\text{nac}}$$

Elliptische integraal (Φ)

➔ Reference: \\Srv-filer\dao\AAPRO_F\mc_ffrm\SIF_3D\el_in_001.mcd(R)



Correctiefactoren voor eindige plaatafmetingen M_{ma} , M_{ba} , M_{mc} and M_{bc}

➔ Reference: \\Srv-filer\dao\AAPRO_F\mc_ffrm\SIF_3D\New_Ra_002.mcd(R)

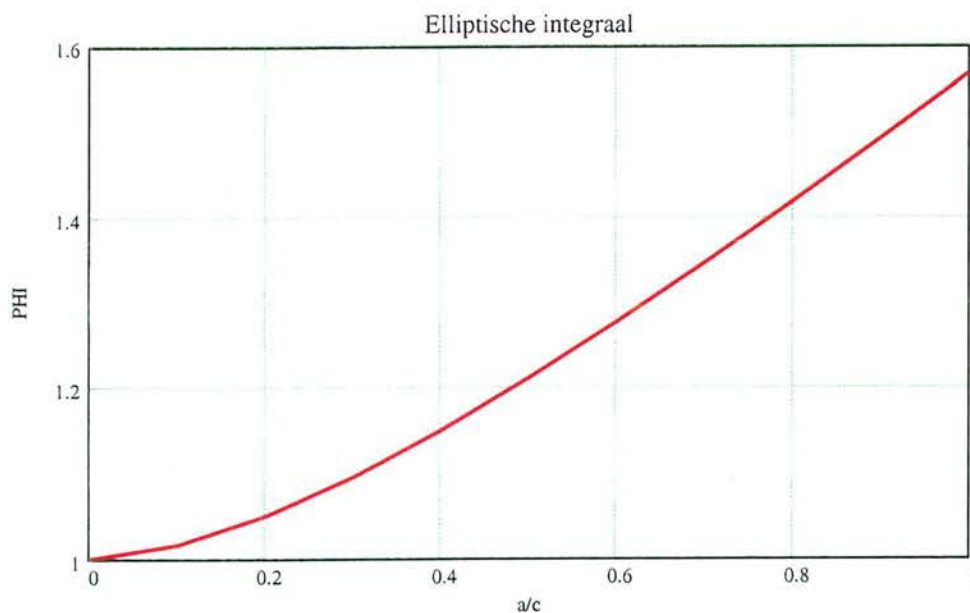
Spanningsintensiteitsfactor voor een semi-ellipsvormige scheur in een vlakke plaat

Correctiefactoren volgens Newman en Raju

Algemeen: alle eenheden in N en mm		ORIGIN := 1	$\text{MPa} := \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
Plaatdikte	T := 12·mm	na := 1 .. 10	W := 1000000000·mm
Scheurdiepte a	na := 20	naT := 1 .. na + 1	$a_{naT} := \frac{naT - 0.9}{na} \cdot T$
Aspect ratio a/c	nac := 10	nacr := 1 .. nac + 1	$acr_{nacr} := \frac{nacr - 0.99}{nac}$

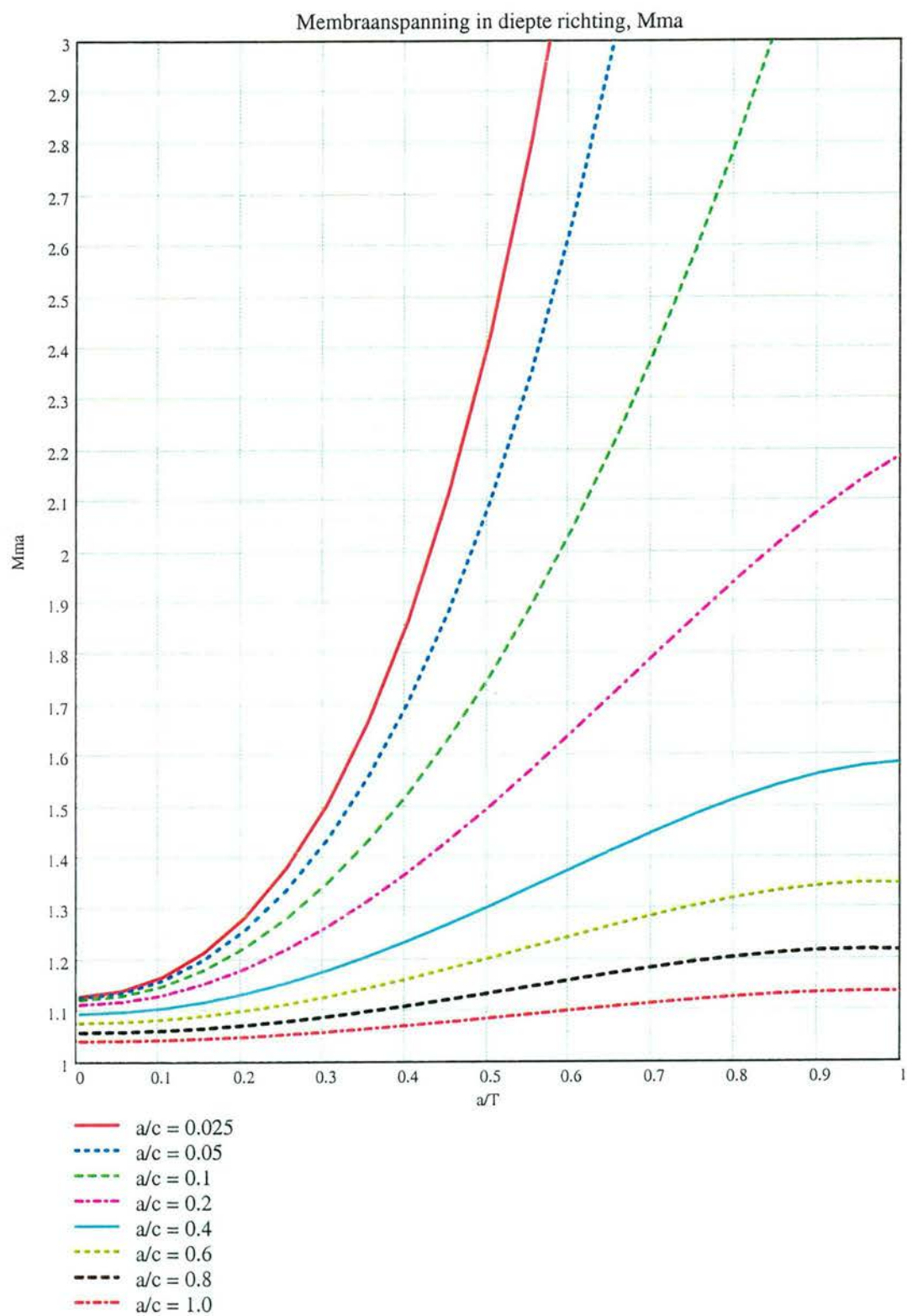
Elliptische integraal (Φ)

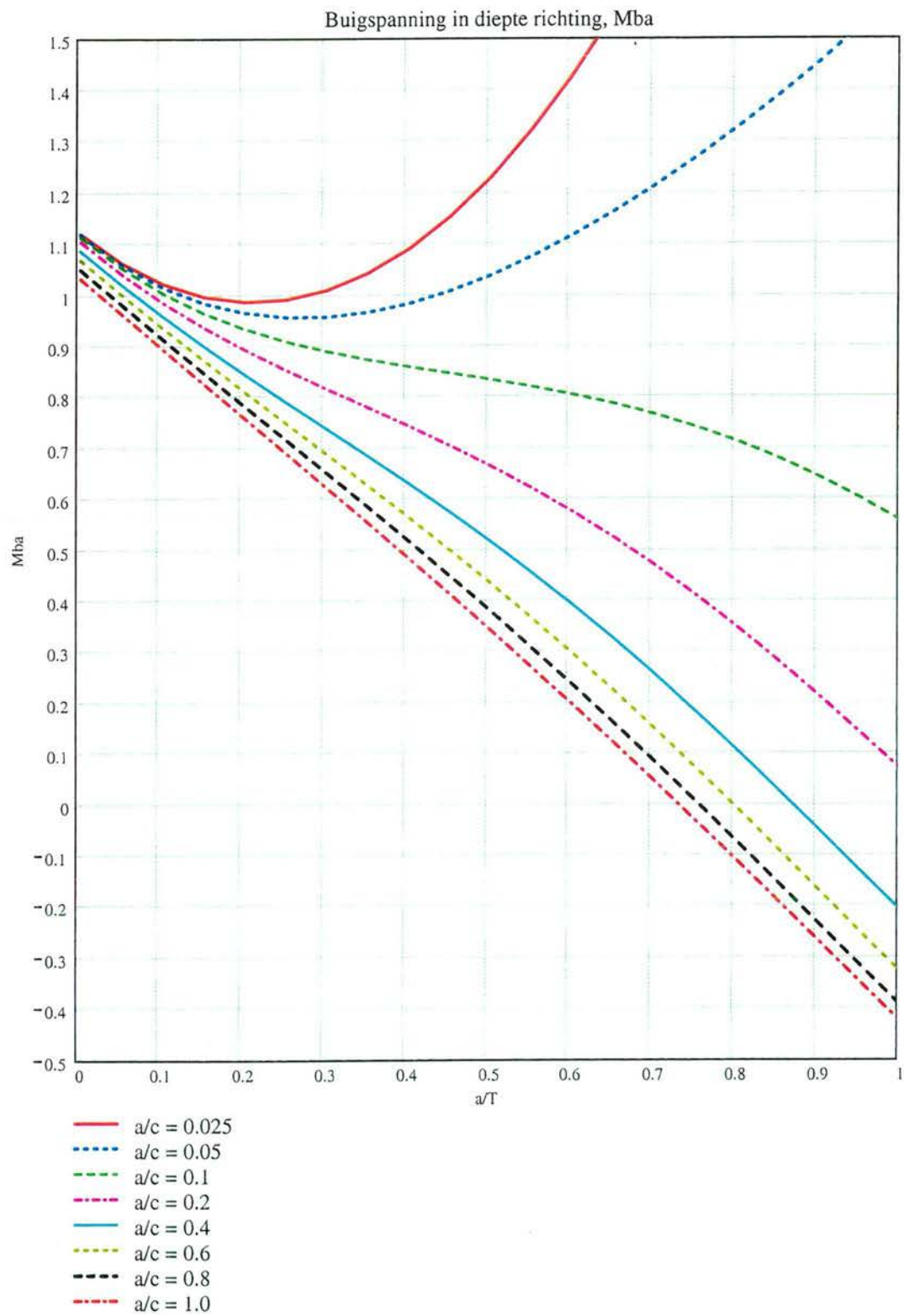
➔ Reference: \\Srv-filer\dao\AAPRO_F\mc_ffrm\SIF_3D\el_in_001.mcd(R)

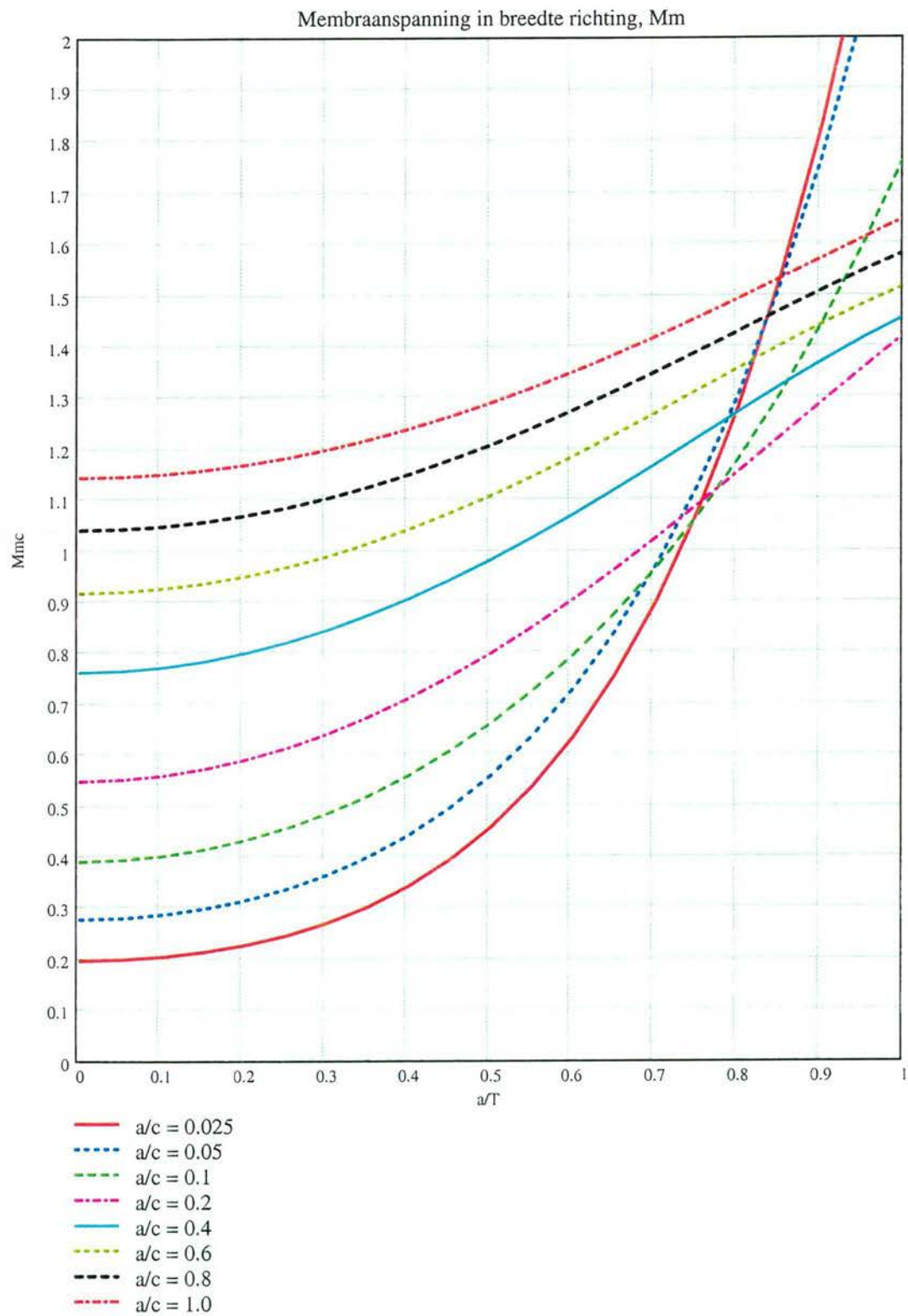


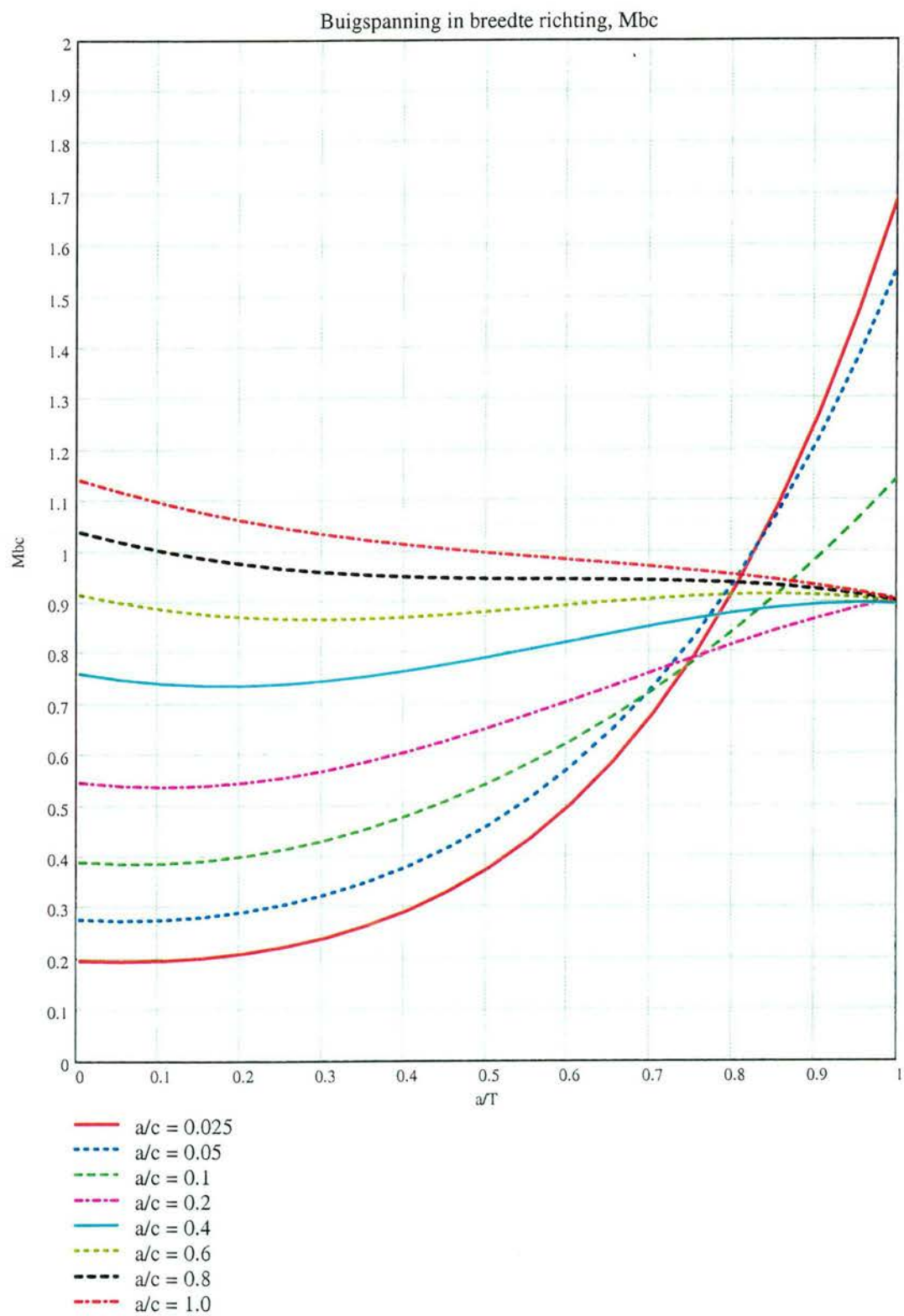
Correctiefactoren voor eindige plaatafmetingen M_{ma} , M_{ba} , M_{mc} and M_{bc}

➔ Reference: \\Srv-filer\dao\AAPRO_F\mc_ffrm\SIF_3D\New_Ra_002.mcd(R)









Totale spanningsintensiteitsfactor voor diepte (a) en breedte (c) richting

Voorbeeld voorstudie SMOZ blokje

$$T := 40 \cdot \text{mm}$$

$$W := 120 \cdot \text{mm}$$

$$a := 11.85 \cdot \text{mm}$$

$$c := 25.9 \cdot \text{mm}$$

$$\frac{a}{T} = 0.296$$

$$\frac{c}{W} = 0.216$$

$$\frac{a}{c} = 0.458$$

Reference: \\Srv-filer\dao\AAPRO_F\mc_ffrm\SIF_3D\New_Ra_002.mcd(R)

Correctie factoren

$$\Phi(a, c) = 1.184$$

$$fw(a, c) = 1.035$$

$$Mma(a, c) = 1.198$$

$$Mmc(a, c) = 0.916$$

$$Mba(a, c) = 0.757$$

$$Mbc(a, c) = 0.810$$

Spanningsintensiteitsfactor

$$\Delta K_a(a, c, \Delta \sigma_m, \Delta \sigma_b) := (Mma(a, c) \cdot \Delta \sigma_m + Mba(a, c) \cdot \Delta \sigma_b) \cdot \frac{\sqrt{\pi \cdot a}}{\Phi(a, c)}$$

$$\Delta K_c(a, c, \Delta \sigma_m, \Delta \sigma_b) := (Mmc(a, c) \cdot \Delta \sigma_m + Mbc(a, c) \cdot \Delta \sigma_b) \cdot \frac{\sqrt{\pi \cdot a}}{\Phi(a, c)}$$

Membraanspanning $\Delta \sigma_m := 1 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ $\Delta \sigma_b := 0 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

$$\Delta K_a(a, c, \Delta \sigma_m, \Delta \sigma_b) = 6.172 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-\frac{3}{2}}$$

$$\Delta K_c(a, c, \Delta \sigma_m, \Delta \sigma_b) = 4.721 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-\frac{3}{2}}$$

$$\Delta K_a(a, c, \Delta \sigma_m, \Delta \sigma_b) = 0.195 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$$

$$\Delta K_c(a, c, \Delta \sigma_m, \Delta \sigma_b) = 0.149 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$$

Buigspanning $\Delta \sigma_m := 0 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ $\Delta \sigma_b := 1 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

$$\Delta K_a(a, c, \Delta \sigma_m, \Delta \sigma_b) = 3.901 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-\frac{3}{2}}$$

$$\Delta K_c(a, c, \Delta \sigma_m, \Delta \sigma_b) = 4.175 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-\frac{3}{2}}$$

$$\Delta K_a(a, c, \Delta \sigma_m, \Delta \sigma_b) = 0.123 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$$

$$\Delta K_c(a, c, \Delta \sigma_m, \Delta \sigma_b) = 0.132 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$$

N.B. Voor de SIF wordt als eenheid zowel $[\text{N mm}^{-3/2}]$ als $[\text{MPa m}^{1/2}]$ gebruikt.

Tussen beide eenheden zit een factor $1000^{1/2}$.

Voorbeeld brede scheur in plaat

$$T := 12 \cdot \text{mm}$$

$$W := 2000 \cdot \text{mm}$$

$$a := 6 \cdot \text{mm}$$

$$c := 90 \cdot \text{mm}$$

$$\frac{a}{T} = 0.500$$

$$\frac{c}{W} = 0.045$$

$$\frac{a}{c} = 0.067$$

☞ Reference: \\Srv-filer\dao\AAPRO_F\mc_ffrm\SIF_3D\New_Ra_002.mcd(R)

Correctie factoren

$$\Phi(a, c) = 1.008$$

$$fw(a, c) = 1.003$$

$$Mma(a, c) = 1.939$$

$$Mmc(a, c) = 0.595$$

$$Mba(a, c) = 0.952$$

$$Mbc(a, c) = 0.491$$

Spanningsintensiteitsfactor

$$\Delta K_a(a, c, \Delta\sigma_m, \Delta\sigma_b) := (Mma(a, c) \cdot \Delta\sigma_m + Mba(a, c) \cdot \Delta\sigma_b) \cdot \frac{\sqrt{\pi \cdot a}}{\Phi(a, c)}$$

$$\Delta K_c(a, c, \Delta\sigma_m, \Delta\sigma_b) := (Mmc(a, c) \cdot \Delta\sigma_m + Mbc(a, c) \cdot \Delta\sigma_b) \cdot \frac{\sqrt{\pi \cdot a}}{\Phi(a, c)}$$

Membraanspanning

$$\Delta\sigma_m := 1 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\Delta\sigma_b := 0 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\Delta K_a(a, c, \Delta\sigma_m, \Delta\sigma_b) = 8.350 \text{ N} \cdot \text{mm}^{\frac{-3}{2}}$$

$$\Delta K_c(a, c, \Delta\sigma_m, \Delta\sigma_b) = 2.560 \text{ N} \cdot \text{mm}^{\frac{-3}{2}}$$

$$\Delta K_a(a, c, \Delta\sigma_m, \Delta\sigma_b) = 0.264 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$$

$$\Delta K_c(a, c, \Delta\sigma_m, \Delta\sigma_b) = 0.081 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$$

Buigspanning

$$\Delta\sigma_m := 0 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\Delta\sigma_b := 1 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\Delta K_a(a, c, \Delta\sigma_m, \Delta\sigma_b) = 4.101 \text{ N} \cdot \text{mm}^{\frac{-3}{2}}$$

$$\Delta K_c(a, c, \Delta\sigma_m, \Delta\sigma_b) = 2.116 \text{ N} \cdot \text{mm}^{\frac{-3}{2}}$$

$$\Delta K_a(a, c, \Delta\sigma_m, \Delta\sigma_b) = 0.130 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$$

$$\Delta K_c(a, c, \Delta\sigma_m, \Delta\sigma_b) = 0.067 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$$

B Scheurgroei-analyse vlakke plaat

Fatigue fracture mechanics analysis (FAFRAM)

Plate with semi elliptical crack

SIF-plate	Newman Raju
da/dN- ΔK	Paris relation
Load	Constant amplitude
Integration	$\Delta a = \alpha a$ with starting parameter s

General: all units in Newton (N) and millimeters (mm)

ORIGIN := 1

1 Input parameters

1.1 Geometry

Plate thickness	T := 12
Plate width	W := 10000
Initial defect depth	a_i := 0.15
Initial half defect width	c_i := 0.15
Final crack depth	a_f := 1.0 · T

1.2 Loading per year

Closed format
with filling parameter

Total number of cycles	n _{tot} := 10 ⁶
Maximum membrane stress range	$\Delta \sigma_{m_{\max}}$:= 0
Maximum bending stress range	$\Delta \sigma_{b_{\max}}$:= 100
Filling parameter	β := 1.0
Number of stress blocks	q := 5
Initial number of cycles	N_i := 0

1.3 Crack growth law (da / dN - ΔK curve)

Depth direction	ma := 3	Ca := 1.832 · 10 ⁻¹³
Width direction	mc := ma	Cc := Ca

 Reference: \\Srv-filer\dao\AAPRO_F\mc_ffrm\Crack_G_L\Laws_002.mcd(R)

da_dN(ΔK_a) := da_dN_P(Ca, ΔK_a , ma) dc_dN(ΔK_c) := da_dN_P(Cc, ΔK_c , mc)

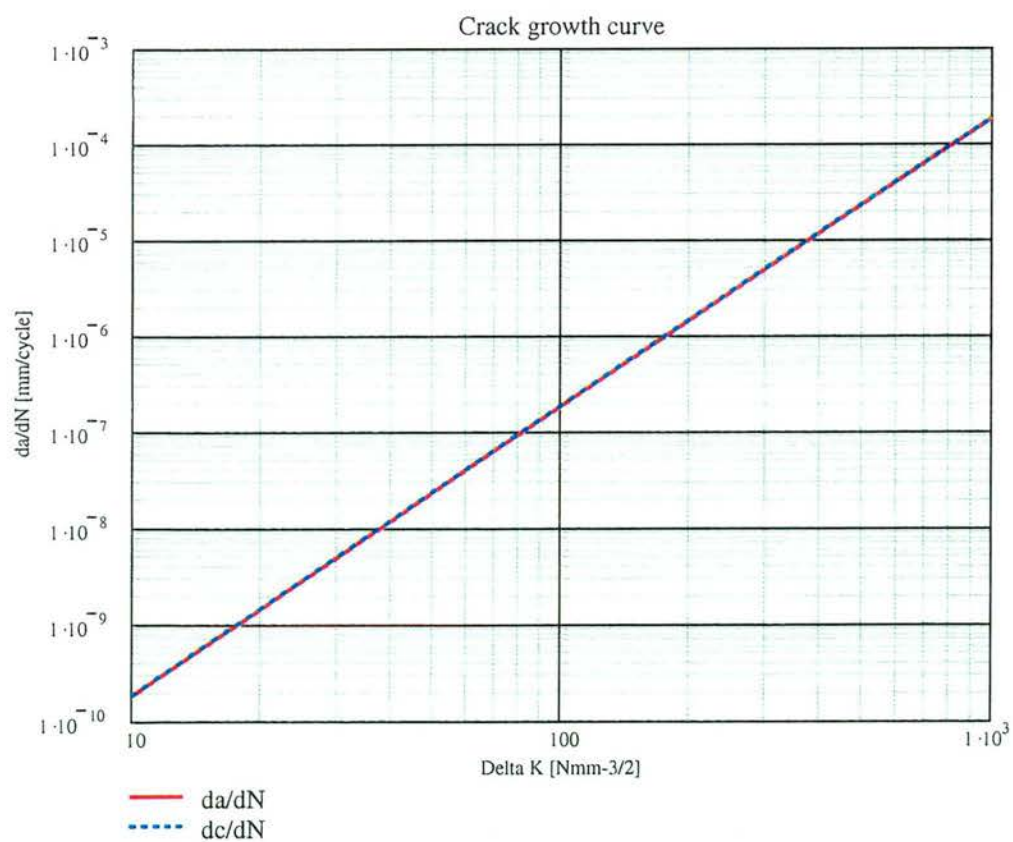
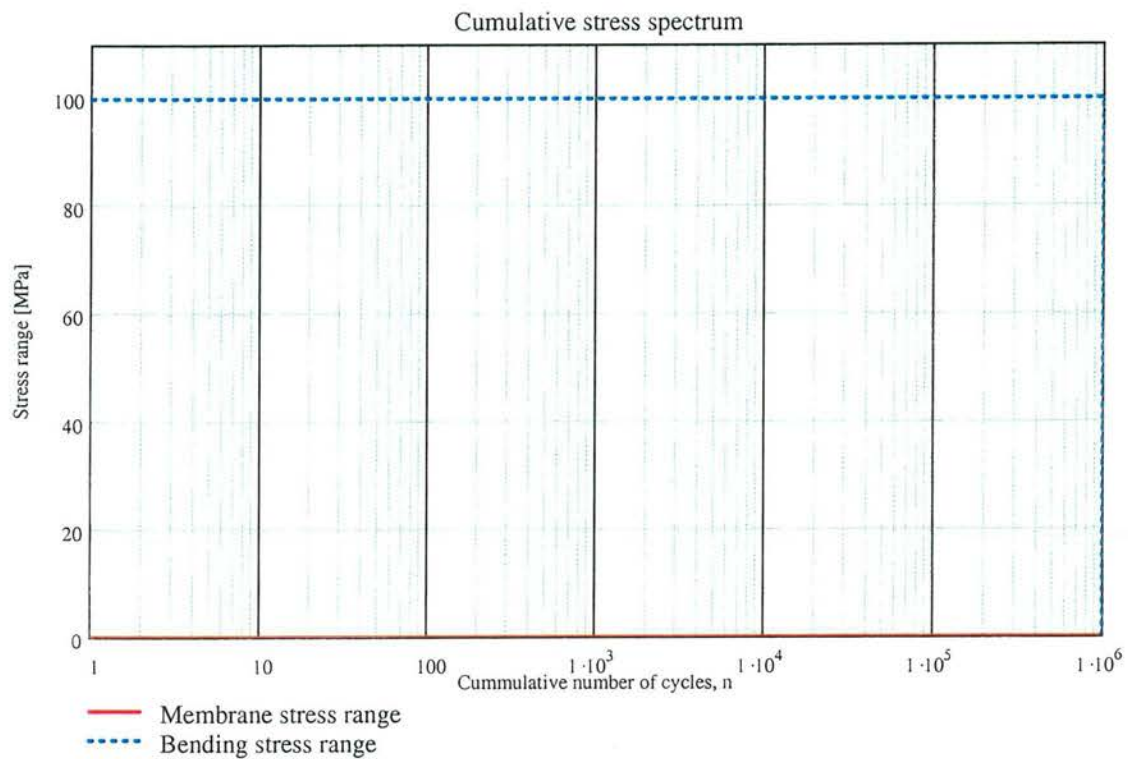
1.4 Integration control ($\Delta a = \alpha a$)

αs := 0.01

s := 500

Graphical presentation of input

☞ Reference: \\Srv-filer\dao\AAPRO_F\mc_ffrm\Var_ampl\Spect_020.mcd(R)



2 Correction factors for finite plate dimensions (SIF)

Elliptical integral (Φ)

➔ Reference:\\Srv-filer\dao\AAPRO_F\mc_ffrm\SIF_3D\el_in_001.mcd(R)

Mma, Mba, Mmc and Mbc

➔ Reference:\\Srv-filer\dao\AAPRO_F\mc_ffrm\SIF_3D\New_Ra_002.mcd(R)

3 Total stress intensity factors for depth (a) and width direction (c)

$$\Delta K_a(a, c, \Delta\sigma_m, \Delta\sigma_b, \alpha) := (Mma(a, c) \cdot \Delta\sigma_m + Mba(a, c) \cdot \Delta\sigma_b) \cdot \frac{\sqrt{\pi \cdot a \cdot (1 + \alpha)}}{\Phi(a, c)}$$

$$\Delta K_c(a, c, \Delta\sigma_m, \Delta\sigma_b, \alpha) := (Mmc(a, c) \cdot \Delta\sigma_m + Mbc(a, c) \cdot \Delta\sigma_b) \cdot \frac{\sqrt{\pi \cdot a \cdot (1 + \alpha)}}{\Phi(a, c)}$$

4 Integration procedure crack growth law

Integration Multi Linear relation for semi-elliptical crack with control on final depth and plate width and variable amplitude loading

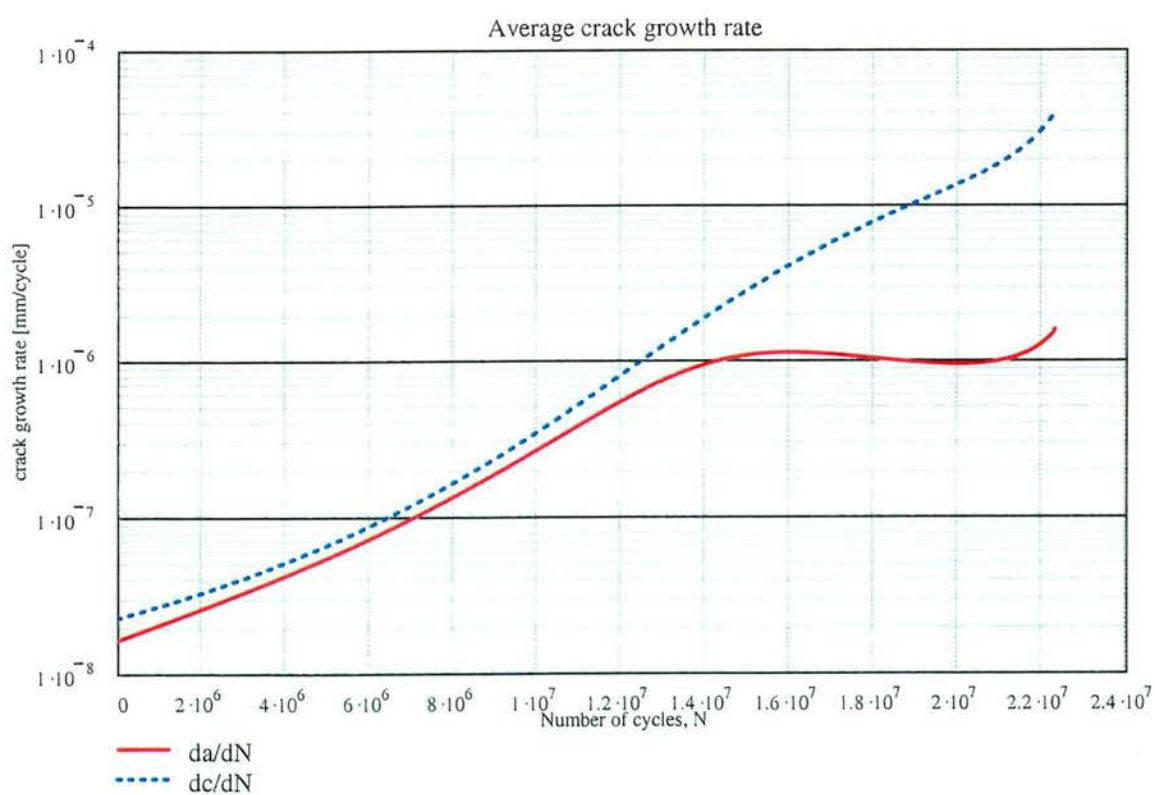
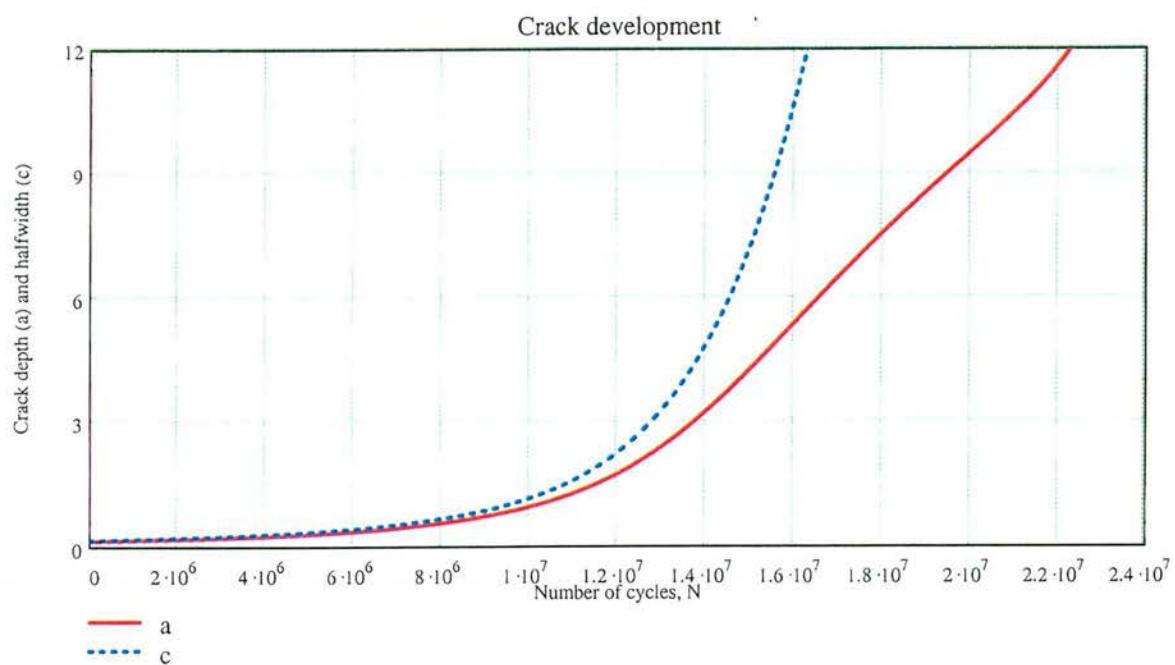
➔ Reference:\\Srv-filer\dao\AAPRO_F\mc_ffrm\Integration\int_as_Mul_VA_001.mcd(R)

5 Summary of results

Number of integration steps	$nr := \text{rows}(M)$	$nr = 690$
Final crack depth	$a_n := M_{nr,4}$	$a_n = 12$
Final half crack width	$c_n := M_{nr,5}$	$c_n = 94.473$
Final number of cycles	$N_n := M_{nr,6}$	$N_n = 22279219$
		$N_n = 2.228 \times 10^7$

6 Graphical presentation results

i := 1..nr

Export of main parameters per integration step (da/dN, dc/dN, ΔN , a, c, N)

WRITEPRN("tabel.prn") := M



C Scheurgroei-analyse dekgeometrie met $c/T = 0.001$

Fatigue fracture mechanics analysis (FAFRAM)

Plate with weld geometry and semi elliptical crack at weld toe

SIF-plate Newman Raju
 Mk-weld toe PD 6493 / Maddox et al (1986) ($cT = 0.001$)
 $da/dN-\Delta K$ Paris relation
 Load Constant amplitude
 Integration $\Delta a = \alpha a$ with starting parameter s

General: all units in Newton (N) and millimeters (mm)

ORIGIN := 1

1 Input parameters

1.1 Geometry

Plate thickness $T := 12$
 Plate width $W := 10000$
 Attachment length
 (weld toe distance) $L := 12$
 Weld angle $\theta := 65$
 Initial defect depth $a_i := 0.15$
 Initial half defect width $c_i := 0.15$
 Final crack depth $a_f := 1.0 \cdot T$

1.2 Loading per year

Closed format
 with filling parameter

Total number of cycles $n_{tot} := 10^6$
 Maximum membrane stress range $\Delta \sigma_{max} := 0$
 Maximum bending stress range $\Delta \sigma b_{max} := 100$
 Filling parameter $\beta := 1.0$
 Number of stress blocks $q := 5$
 Initial number of cycles $N_i := 0$

1.3 Reduction due tot stress concentration factor (ϕ_{scf})

SCF at hot spot $SCF_p := 2.5$
 Influence length $l_{scf} := 80$

1.4 Crack growth law ($da / dN - \Delta K$ curve)

Depth direction $ma := 3$ $Ca := 1.832 \cdot 10^{-13}$
 Width direction $mc := ma$ $Cc := Ca$

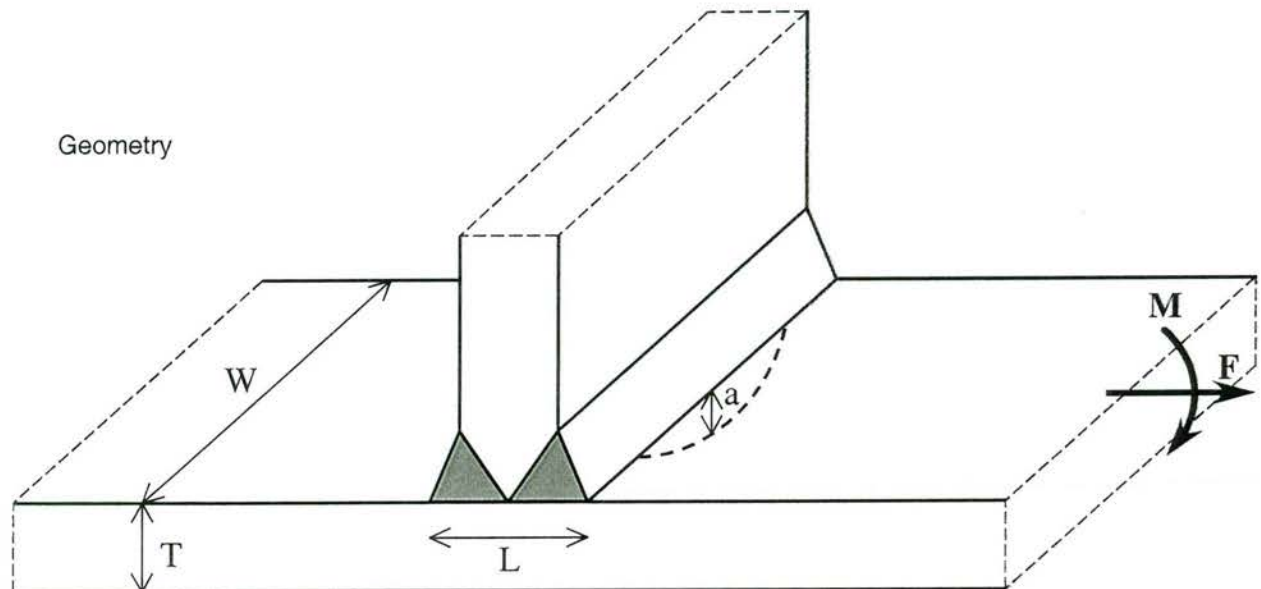
 Reference: \\Srv-filer\dao\AAPRO_F\mc_ffrm\Crack_G_LLaws_002.mcd(R)

$da_{dN}(\Delta Ka) := da_{dN_P}(Ca, \Delta Ka, ma)$ $dc_{dN}(\Delta Kc) := da_{dN_P}(Cc, \Delta Kc, mc)$

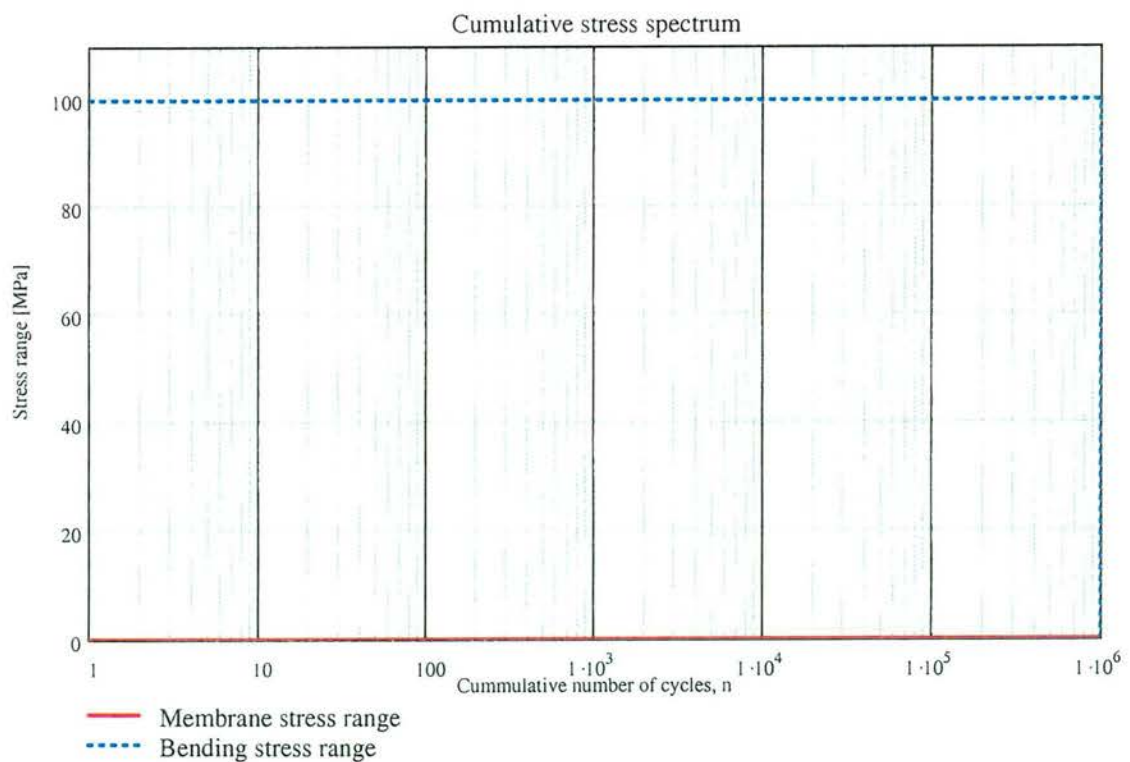
1.5 Integration control ($\Delta a = \alpha a$) $\alpha s := 0.01$ $s := 500$

☐ Lock

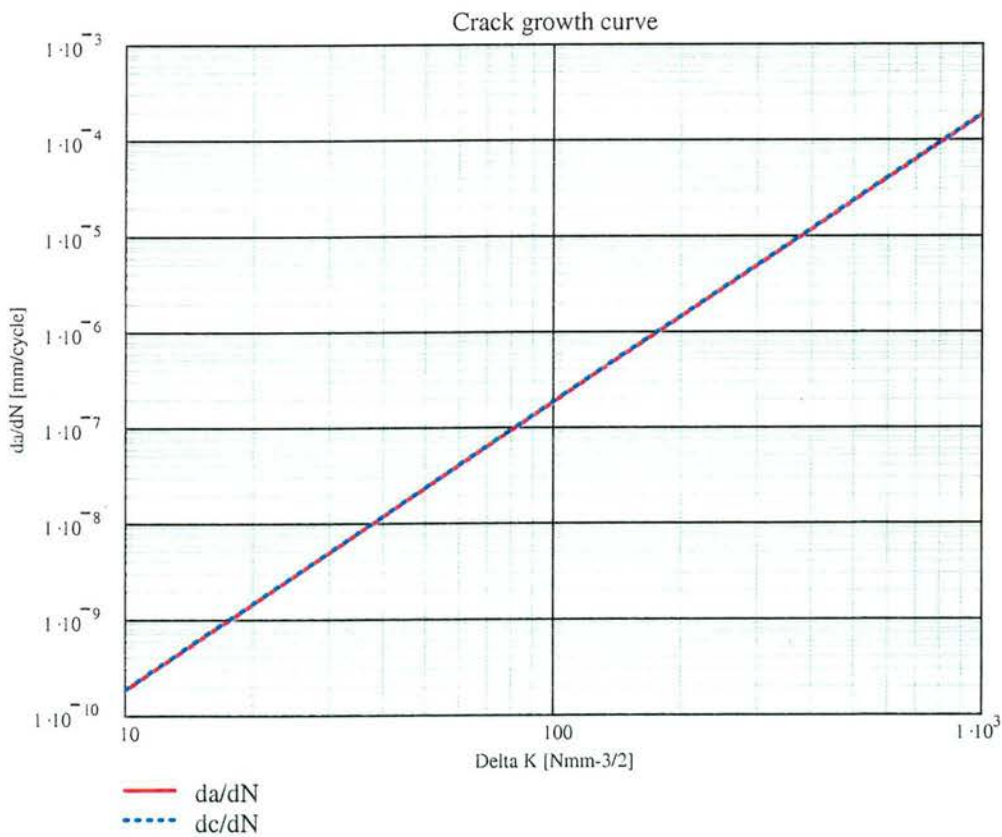
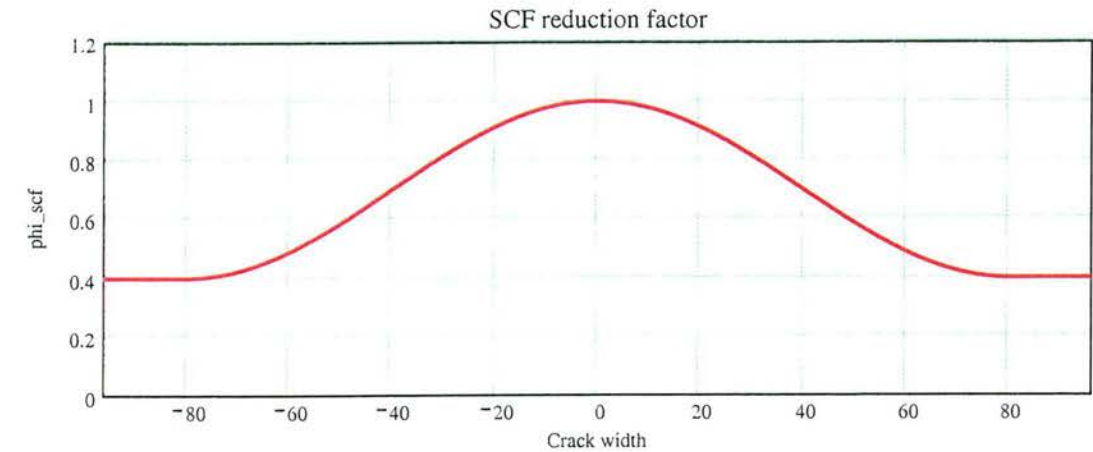
Graphical presentation of input



Reference: \\Srv-filer\dao\AAPRO_F\mc_ffrm\Var_ampl\Spect_020.mcd(R)



➔ Reference: \\Srv-filer\dao\AAPRO_F\mc_ffrm\Var_amp\SCFred_004.mcd(R)



2 Correction factors for finite plate dimensions (SIF)

Elliptical integral (Φ)

➔ Reference: \\Srv-filer\dao\AAPRO_F\mc_ffrm\SIF_3D\el_in_001.mcd(R)

Mma, Mba, Mmc and Mbc

➔ Reference: \\Srv-filer\dao\AAPRO_F\mc_ffrm\SIF_3D\New_Ra_002.mcd(R)

3 Stress intensity concentration factors for weld geometry (Mk)

General input parameters for Mk $LT := \frac{L}{T}$ $LT = 1.000$ $cT := 0.001$

Mkm and Mkb for sharp weld toe (no radius)

➔ Reference: \\Srv-filer\dao\AAPRO_F\mc_ffrm\Mk_weld\Mk_006.mcd(R)

4 Total stress intensity factors for depth (a) and width direction (c)

$$\Delta K_a(a, c, \Delta\sigma_m, \Delta\sigma_b, \alpha) := \phi_{scf}(c) \cdot \left(Mkm\left(\frac{a}{T}\right) \cdot Mma(a, c) \cdot \Delta\sigma_m + Mkb\left(\frac{a}{T}\right) \cdot Mba(a, c) \cdot \Delta\sigma_b \right) \cdot \frac{\sqrt{\pi \cdot a \cdot (1 + \alpha)}}{\Phi(a, c)}$$

$$\Delta K_c(a, c, \Delta\sigma_m, \Delta\sigma_b, \alpha) := \phi_{scf}(c) \cdot \left(Mkm(cT) \cdot Mmc(a, c) \cdot \Delta\sigma_m + Mkb(cT) \cdot Mbc(a, c) \cdot \Delta\sigma_b \right) \cdot \frac{\sqrt{\pi \cdot a \cdot (1 + \alpha)}}{\Phi(a, c)}$$

5 Integration procedure crack growth law

Integration Multi Linear relation for semi-elliptical crack with control on final depth and plate width and variable amplitude loading

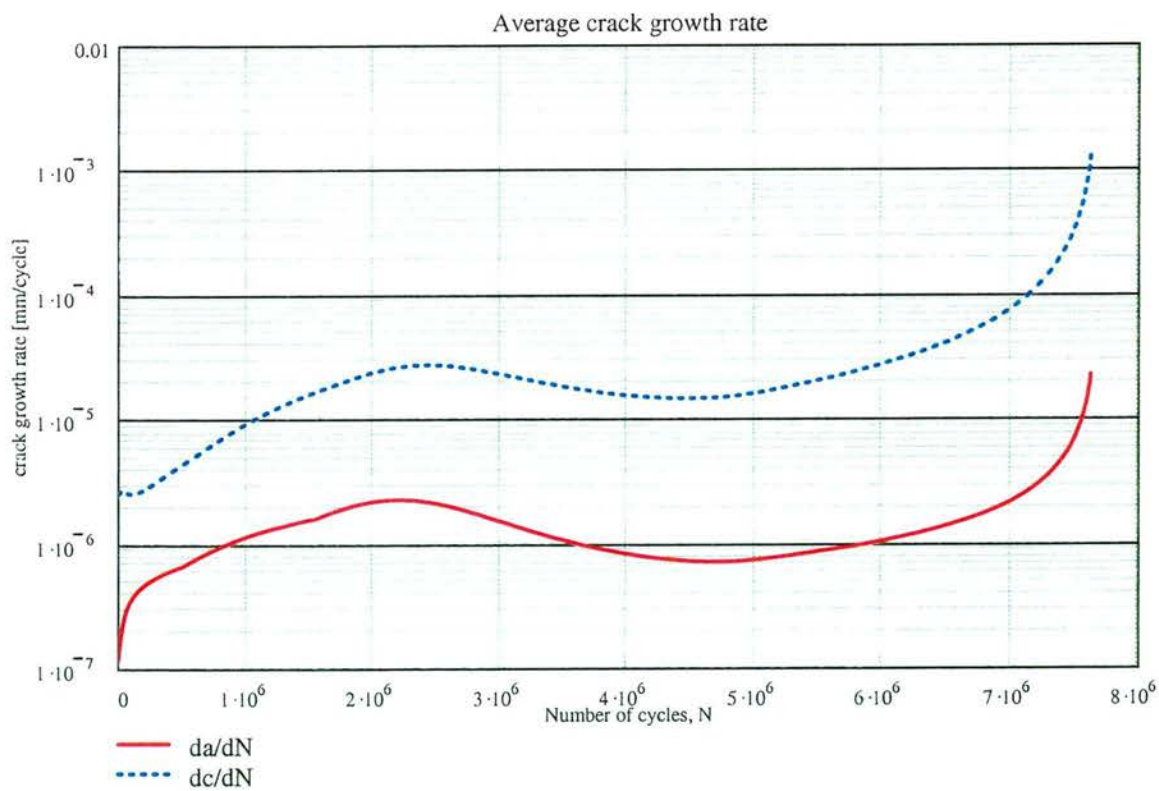
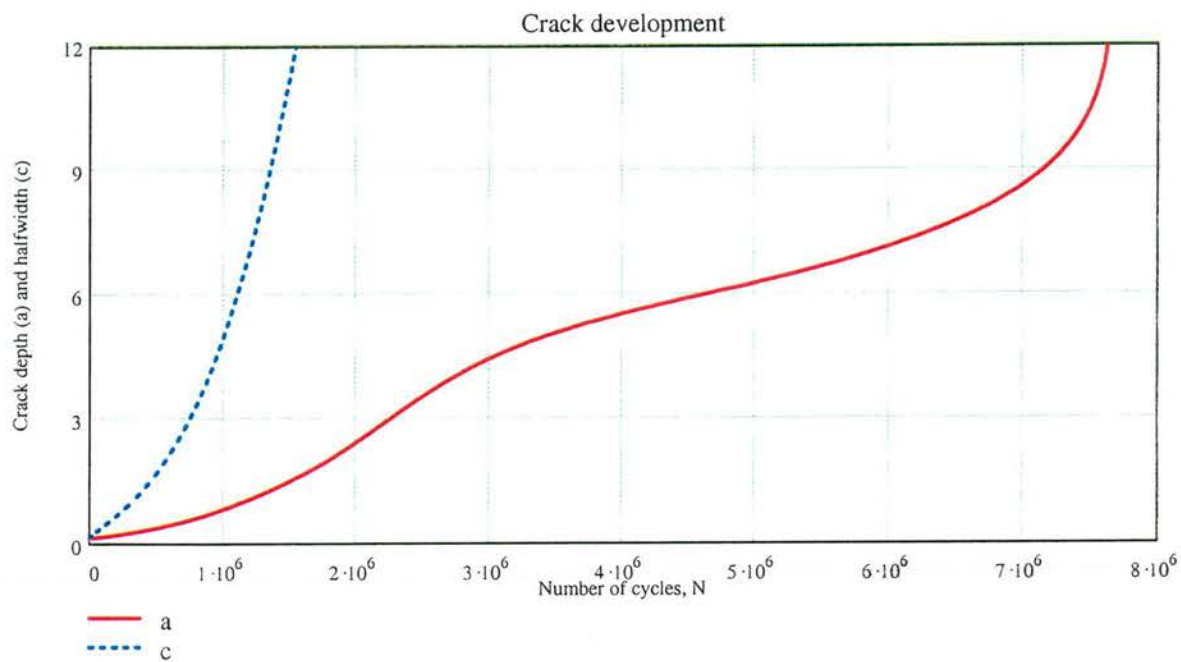
➔ Reference: \\Srv-filer\dao\AAPRO_F\mc_ffrm\Integration\int_as_Mul_VA_001.mcd(R)

6 Summary of results

Number of integration steps	$nr := \text{rows}(M)$	$nr = 690$
Final crack depth	$a_n := M_{nr,4}$	$a_n = 12$
Final half crack width	$c_n := M_{nr,5}$	$c_n = 304.646$
Final number of cycles	$N_n := M_{nr,6}$	$N_n = 7621256$
		$N_n = 7.621 \times 10^6$

7 Graphical presentation results

i := 1..nr



Export of main parameters per integration step (da/dN, dc/dN, ΔN, a, c, N) WRITEPRN("tabel.prn") := M



D Scheurgroei-analyse dekgeometrie met $c/T = 0.15/T$

Fatigue fracture mechanics analysis (FAFRAM)

Plate with weld geometry and semi elliptical crack at weld toe

SIF-plate Newman Raju
 Mk-weld toe PD 6493 / Maddox et al (1986) ($cT = 0.15/T$)
 $da/dN-\Delta K$ Paris relation
 Load Variable amplitude (closed spectrum)
 Integration $\Delta a = \alpha a$ with starting parameter s

General: all units in Newton (N) and millimeters (mm)

ORIGIN := 1

1 Input parameters

1.1 Geometry

Plate thickness $T := 12$
 Plate width $W := 10000$
 Attachment length (weld toe distance) $L := 12$
 Weld angle $\theta := 65$
 Initial defect depth $a_i := 0.15$
 Initial half defect width $c_i := 0.15$
 Final crack depth $a_f := 1.0 \cdot T$

1.2 Loading per year

Closed format
 with filling parameter

Total number of cycles $n_{tot} := 10^6$
 Maximum membrane stress range $\Delta \sigma_{m_{max}} := 0$
 Maximum bending stress range $\Delta \sigma_{b_{max}} := 100$
 Filling parameter $\beta := 1.0$
 Number of stress blocks $q := 5$
 Initial number of cycles $N_i := 0$

1.3 Reduction due tot stress concentration factor (ϕ_{scf})

SCF at hot spot $SCF_p := 2.5$
 Influence length $l_{scf} := 80$

1.4 Crack growth law ($da / dN - \Delta K$ curve)

Depth direction $ma := 3$ $Ca := 1.832 \cdot 10^{-13}$
 Width direction $mc := ma$ $Cc := Ca$

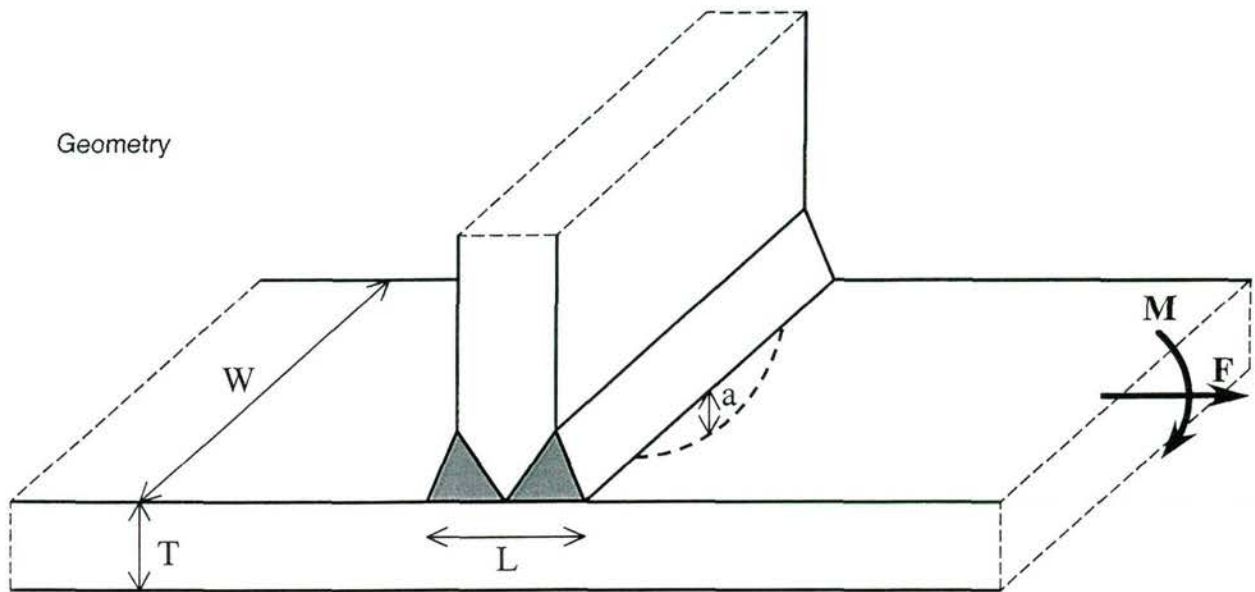
☒ Reference: \\Srv-filer\dao\AAPRO_F\mc_ffrm\Crack_G_L\Lawes_002.mcd(R)

$da_{dN}(\Delta Ka) := da_{dN_P}(Ca, \Delta Ka, ma)$ $dc_{dN}(\Delta Kc) := da_{dN_P}(Cc, \Delta Kc, mc)$

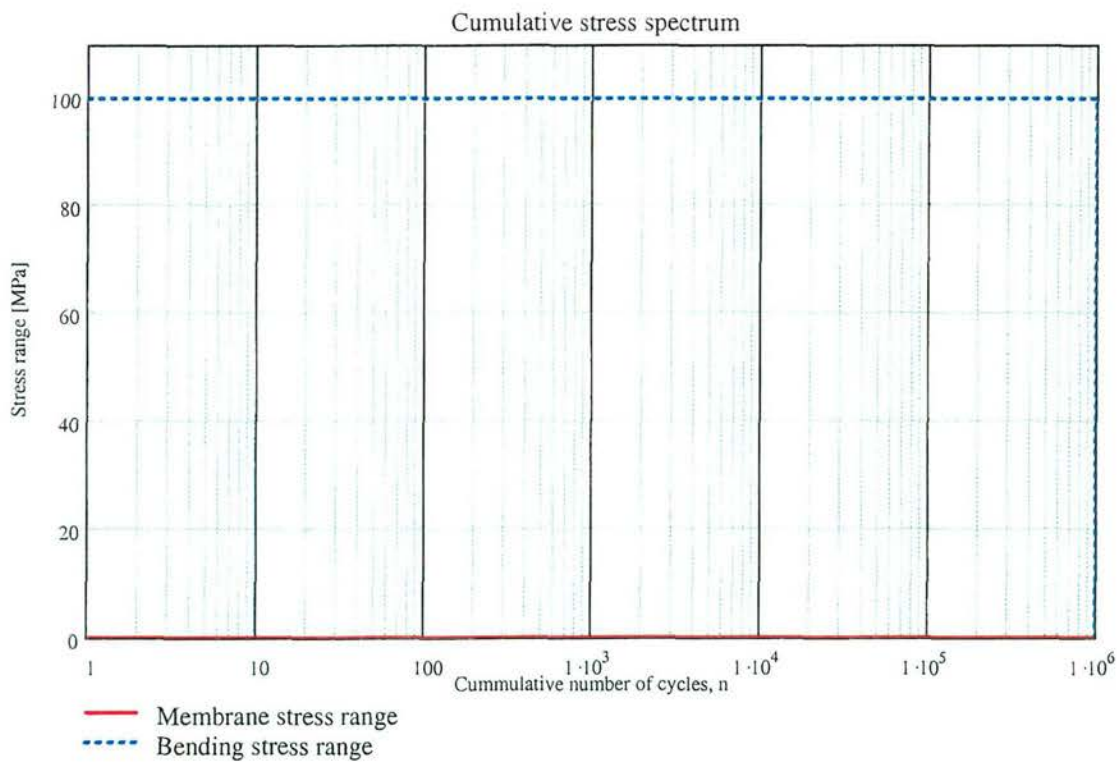
1.5 Integration control ($\Delta a = \alpha a$) $\alpha_s := 0.01$ $s := 500$

☒ Lock

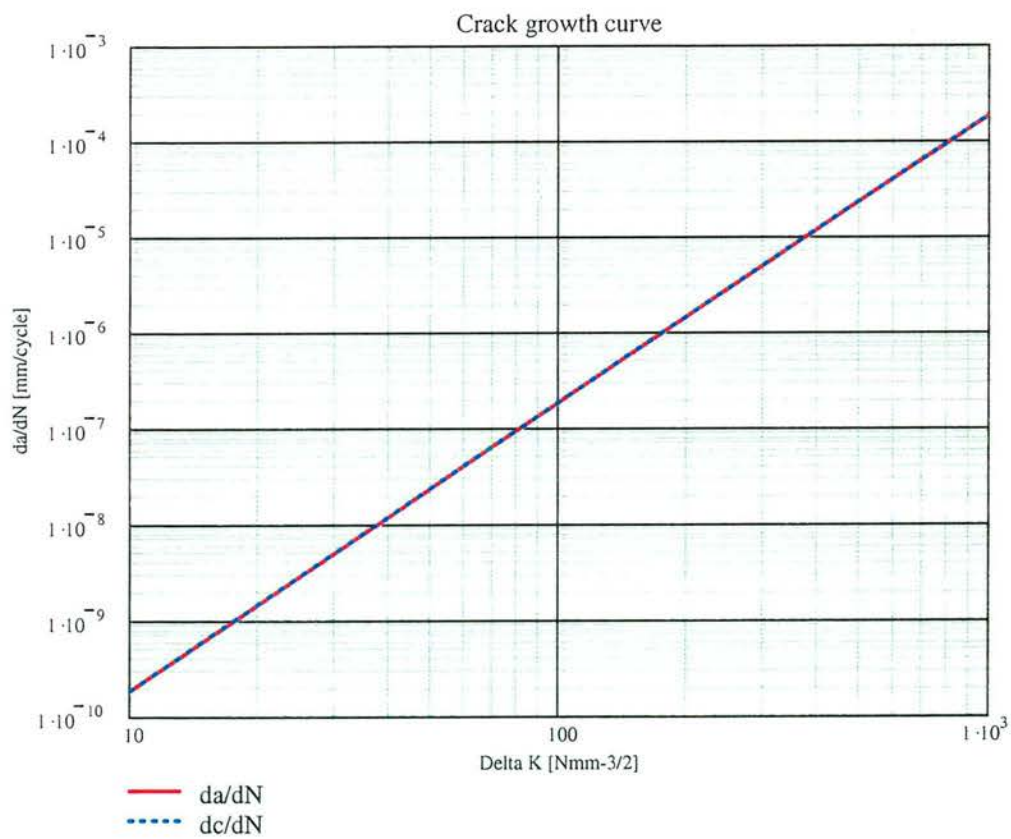
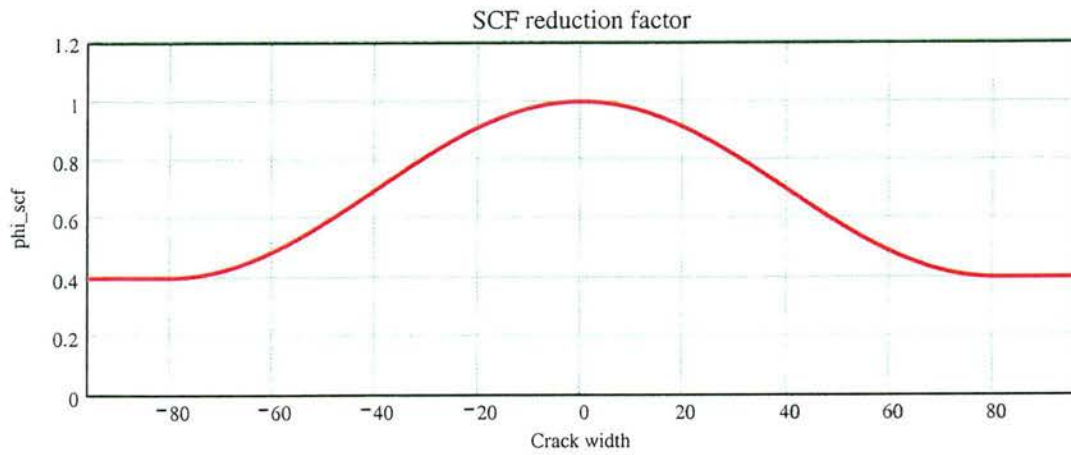
Graphical presentation of input



☒ Reference: \\Srv-filer\dao\AAPRO_F\mc_ffrm\Var_ampl\Spect_020.mcd(R)



➔ Reference: \\Srv-filer\dao\AAPRO_F\mc_ffrm\Var_ampl\SCFred_004.mcd(R)



2 Correction factors for finite plate dimensions (SIF)

Elliptical integral (Φ)

➤ Reference: \\Srv-filer\dao\AAPRO_F\mc_ffrm\SIF_3D\el_in_001.mcd(R)

Mma, Mba, Mmc and Mbc

➤ Reference: \\Srv-filer\dao\AAPRO_F\mc_ffrm\SIF_3D\New_Ra_002.mcd(R)

3 Stress intensity concentration factors for weld geometry (Mk)

General input parameters for Mk $LT := \frac{L}{T}$ $LT = 1.000$ $cT := \frac{0.15}{T}$

Mkm and Mkb for sharp weld toe (no radius)

➤ Reference: \\Srv-filer\dao\AAPRO_F\mc_ffrm\Mk_weld\Mk_006.mcd(R)

4 Total stress intensity factors for depth (a) and width direction (c)

$$\Delta K_a(a, c, \Delta\sigma_m, \Delta\sigma_b, \alpha) := \phi_{scf}(c) \cdot \left(M_{km} \left(\frac{a}{T} \right) \cdot M_{ma}(a, c) \cdot \Delta\sigma_m + M_{kb} \left(\frac{a}{T} \right) \cdot M_{ba}(a, c) \cdot \Delta\sigma_b \right) \cdot \frac{\sqrt{\pi \cdot a \cdot (1 + \alpha)}}{\Phi(a, c)}$$

$$\Delta K_c(a, c, \Delta\sigma_m, \Delta\sigma_b, \alpha) := \phi_{scf}(c) \cdot (M_{km}(cT) \cdot M_{mc}(a, c) \cdot \Delta\sigma_m + M_{kb}(cT) \cdot M_{bc}(a, c) \cdot \Delta\sigma_b) \cdot \frac{\sqrt{\pi \cdot a \cdot (1 + \alpha)}}{\Phi(a, c)}$$

5 Integration procedure crack growth law

Integration Multi Linear relation for semi-elliptical crack with control on final depth and plate width and variable amplitude loading

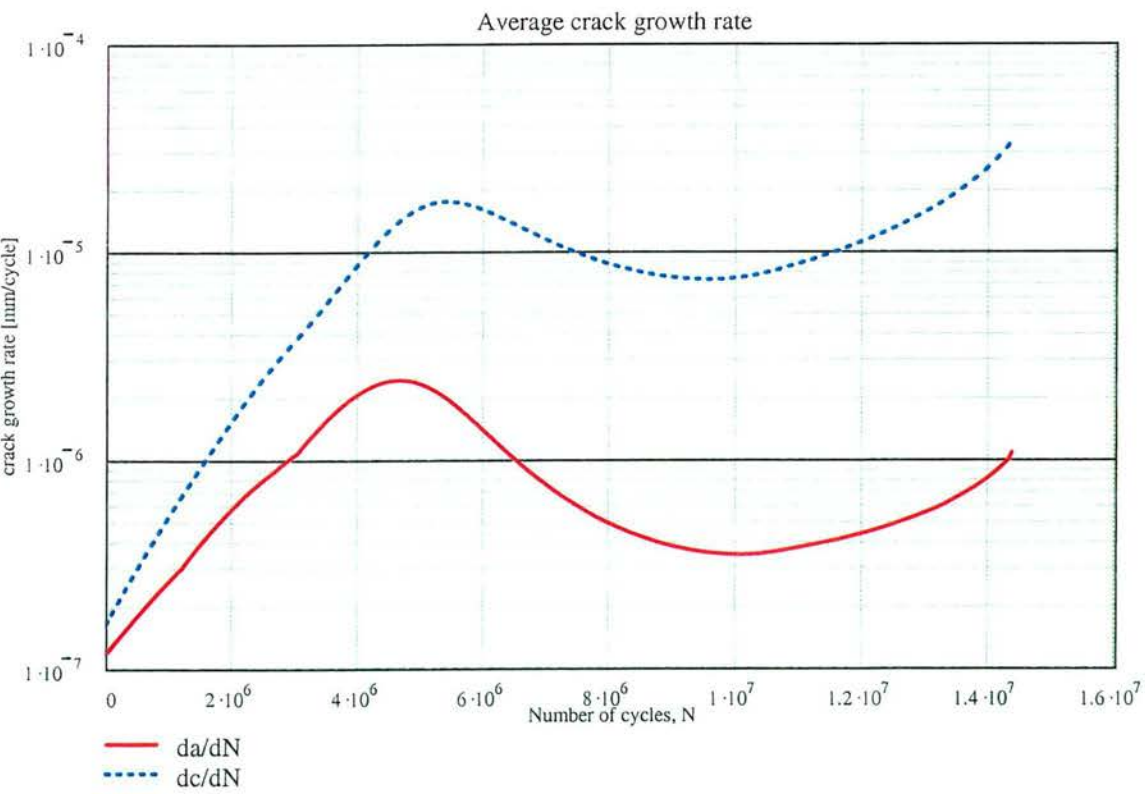
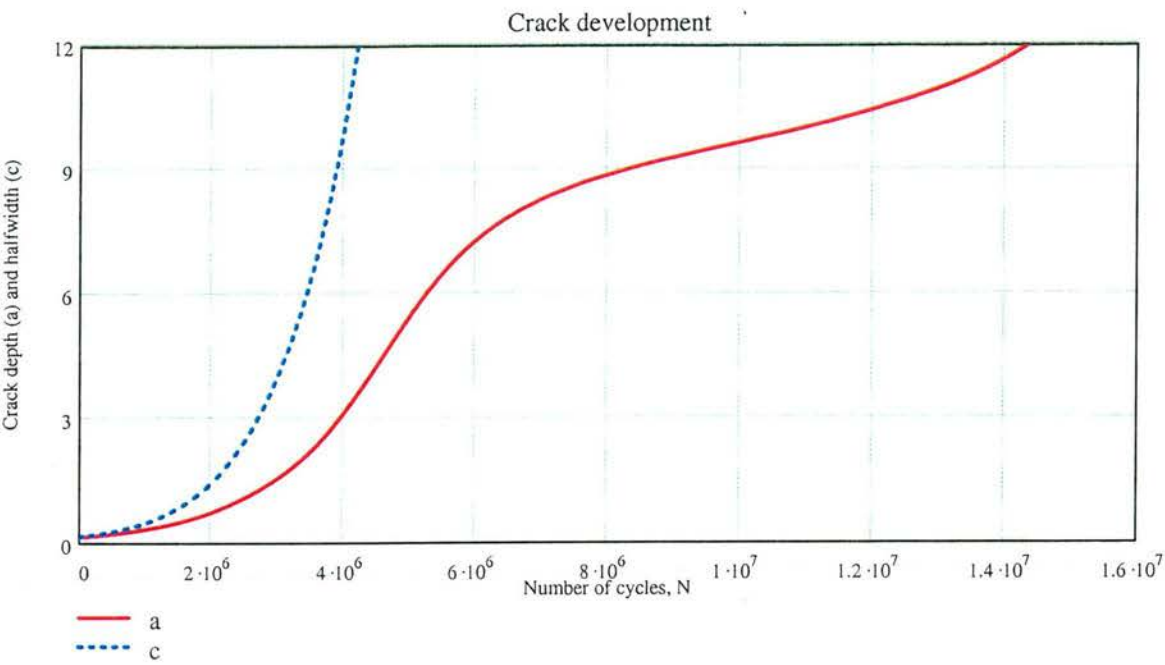
➤ Reference: \\Srv-filer\dao\AAPRO_F\mc_ffrm\Integration\int_as_Mul_VA_001.mcd(R)

6 Summary of results

Number of integration steps	$nr := \text{rows}(M)$	$nr = 690$
Final crack depth	$a_n := M_{nr,4}$	$a_n = 12$
Final half crack width	$c_n := M_{nr,5}$	$c_n = 141.447$
Final number of cycles	$N_n := M_{nr,6}$	$N_n = 14345313$
		$N_n = 1.435 \times 10^7$

7 Graphical presentation results

i := 1..nr



Export of main parameters per integration step (da/dN, dc/dN, ΔN , a, c, N) WRITEPRN("tabel.prn") := M



E Getallen voor de berekende SIFs in de FEM analyses

E.1 2-D geometrie strip

De hier gegeven SIF horen bij het model beschreven in paragraaf 4.2.1.

Trekspanning model 1

a	a/T	K	M
40	0.5	31.27	2.789478
32.363	0.404538	22.04	2.185809
20.474	0.255925	12.56	1.566078
12.002	0.150025	7.945	1.293875
5.965	0.074563	4.993	1.153404
3.632	0.0454	3.775	1.117555

Buiging model 1

a	a/T	K	M
40	0.5	16.59	1.479931
32.363	0.404538	12.99	1.288279
20.474	0.255925	8.937	1.114334
12.002	0.150025	6.528	1.06311
5.965	0.074563	4.547	1.050376
3.632	0.0454	3.57	1.056867

Trekspanning model 2

a	a/T	K	M
6.667	0.083338	5.365	1.172275
10	0.125	6.875	1.226585
13.5	0.16875	8.523	1.308732
20	0.25	11.86	1.496218
23.5	0.29375	14.15	1.646825
30	0.375	19.2	1.977724
40	0.5	31.61	2.819808

Buiging Model 2

a	a/T	K	M
6.667	0.083338	4.83	1.055375
10	0.125	5.861	1.045675
13.5	0.16875	6.84	1.050302
20	0.25	8.58	1.082424
23.5	0.29375	9.643	1.122285
30	0.375	11.83	1.218566
40	0.5	16.76	1.495096

E.2 3-D geometrie balkje

De hier gegeven SIFs horen bij het model beschreven in paragraaf 4.2.2.

Trekspanning

a	a/T	K	M
10	0.125	6.801	1.213383
17	0.2125	10.07	1.377939

Buiging

a	a/T	K	M
10	0.125	5.83	1.040144
17	0.2125	7.703	1.054048

E.3 SMOZ blokje

De hier gegeven SIFs horen bij het model beschreven in paragraaf 4.3.1.

Trekbelasting

Node	G	SIF	X	Y	Z	hoek
162	1.59E-04	6.07	0	11.85	0	90
161	1.59E-04	6.06	1.654	11.826	0	86.35282
159	1.59E-04	6.06	3.419	11.746	0	82.4035
157	1.58E-04	6.04	5.284	11.601	0	78.23366
156	1.56E-04	6.00	7.234	11.378	0	73.77437
155	1.53E-04	5.94	9.252	11.068	0	69.06854
152	1.49E-04	5.87	11.313	10.66	0	64.10266
149	1.44E-04	5.77	13.39	10.143	0	58.86478
142	1.38E-04	5.65	15.452	9.51	0	53.37254
133	1.31E-04	5.49	17.458	8.753	0	47.61652
125	1.23E-04	5.33	19.368	7.868	0	41.60307
115	1.14E-04	5.14	21.132	6.851	0	35.32007
100	1.06E-04	4.94	22.701	5.705	0	28.77914
77	9.76E-05	4.75	24.018	4.435	0	21.97868
62	9.20E-05	4.61	25.028	3.05	0	14.91489
40	9.47E-05	4.67	25.673	1.565	0	7.589082
15	1.12E-04	5.07	25.9	0	0	0

buiging

Node	G	SIF	X	Y	Z	hoek
162	6.43E-05	3.85	0	11.85	0	90
161	6.44E-05	3.86	1.654	11.826	0	86.35282
159	6.47E-05	3.86	3.419	11.746	0	82.4035
157	6.50E-05	3.87	5.284	11.601	0	78.23366
156	6.53E-05	3.88	7.234	11.378	0	73.77437
155	6.56E-05	3.89	9.252	11.068	0	69.06854
152	6.61E-05	3.90	11.313	10.66	0	64.10266
149	6.64E-05	3.92	13.39	10.143	0	58.86478
142	6.66E-05	3.92	15.452	9.51	0	53.37254
133	6.65E-05	3.92	17.458	8.753	0	47.61652
125	6.62E-05	3.91	19.368	7.868	0	41.60307
115	6.58E-05	3.90	21.132	6.851	0	35.32007
100	6.51E-05	3.88	22.701	5.705	0	28.77914
77	6.50E-05	3.87	24.018	4.435	0	21.97868
62	6.62E-05	3.91	25.028	3.05	0	14.91489
40	7.25E-05	4.09	25.673	1.565	0	7.589082
15	8.78E-05	4.50	25.9	0	0	0

E.4 Dunne plaat met brede scheur

De hier gegeven SIFs horen bij het model beschreven in paragraaf 4.3.2.

Handgemaakte model: trekbelasting

Node	G	SIF	X	Y	Z	hoek xi
659	3.49E-04	8.97E+00	0	6	0	90
658	3.48E-04	8.97E+00	1.043	6	0	90
657	3.48E-04	8.97E+00	2.13	5.998	0	88.52059
656	3.48E-04	8.96E+00	3.263	5.996	0	87.90774
655	3.48E-04	8.96E+00	4.441	5.993	0	87.23208
654	3.47E-04	8.95E+00	5.664	5.988	0	86.37569
652	3.46E-04	8.94E+00	6.93	5.982	0	85.56078
650	3.46E-04	8.93E+00	8.241	5.975	0	84.76782
649	3.45E-04	8.92E+00	9.594	5.966	0	83.89751
648	3.43E-04	8.90E+00	10.991	5.955	0	82.97834
647	3.42E-04	8.88E+00	12.43	5.942	0	82.02691
646	3.40E-04	8.86E+00	13.911	5.928	0	81.11488
645	3.38E-04	8.84E+00	15.432	5.911	0	80.11913
644	3.36E-04	8.81E+00	16.994	5.892	0	79.11252
642	3.34E-04	8.78E+00	18.595	5.871	0	78.0975
640	3.31E-04	8.74E+00	20.234	5.846	0	76.99065
638	3.28E-04	8.70E+00	21.91	5.819	0	75.89091
634	3.25E-04	8.65E+00	23.621	5.79	0	74.7964
632	3.21E-04	8.61E+00	25.368	5.757	0	73.63779
630	3.17E-04	8.55E+00	27.147	5.721	0	72.45871
628	3.13E-04	8.50E+00	28.957	5.681	0	71.23275
626	3.08E-04	8.43E+00	30.798	5.638	0	69.99565
625	3.03E-04	8.36E+00	32.666	5.591	0	68.72243
623	2.98E-04	8.29E+00	34.56	5.54	0	67.41836
620	2.92E-04	8.21E+00	36.477	5.485	0	66.08766
617	2.86E-04	8.12E+00	38.417	5.426	0	64.73364
616	2.80E-04	8.03E+00	40.375	5.362	0	63.33768
613	2.73E-04	7.93E+00	42.349	5.294	0	61.92513
605	2.66E-04	7.83E+00	44.338	5.221	0	60.47801
598	2.58E-04	7.72E+00	46.337	5.144	0	59.01848
591	2.51E-04	7.61E+00	48.344	5.061	0	57.51158
588	2.43E-04	7.48E+00	50.355	4.973	0	55.97908
581	2.34E-04	7.36E+00	52.367	4.88	0	54.4229
577	2.26E-04	7.22E+00	54.376	4.781	0	52.82876
572	2.17E-04	7.08E+00	56.38	4.677	0	51.21482
569	2.08E-04	6.93E+00	58.372	4.567	0	49.56716
557	1.99E-04	6.78E+00	60.351	4.451	0	47.88782
542	1.90E-04	6.62E+00	62.31	4.329	0	46.17846
536	1.81E-04	6.46E+00	64.246	4.202	0	44.45375
527	1.71E-04	6.29E+00	66.154	4.068	0	42.68755
519	1.62E-04	6.11E+00	68.029	3.928	0	40.89438
513	1.53E-04	5.94E+00	69.867	3.782	0	39.07472
497	1.43E-04	5.75E+00	71.661	3.63	0	37.22884
487	1.34E-04	5.57E+00	73.407	3.471	0	35.34511

477	1.25E-04	5.37E+00	75.099	3.307	0	33.44709
471	1.16E-04	5.18E+00	76.732	3.136	0	31.5113
454	1.08E-04	4.98E+00	78.299	2.958	0	29.53795
433	9.91E-05	4.78E+00	79.796	2.775	0	27.54855
418	9.07E-05	4.57E+00	81.215	2.586	0	25.53104
406	8.26E-05	4.37E+00	82.551	2.39	0	23.47403
390	7.45E-05	4.15E+00	83.799	2.189	0	21.39733
371	6.67E-05	3.92E+00	84.95	1.982	0	19.28901
355	5.90E-05	3.69E+00	86	1.769	0	17.14754
350	5.70E-05	3.63E+00	86.274	1.708	0	16.53892
343	5.50E-05	3.56E+00	86.606	1.632	0	15.78331
338	5.20E-05	3.46E+00	86.95	1.549	0	14.96131
324	4.89E-05	3.36E+00	87.326	1.452	0	14.00461
305	4.56E-05	3.24E+00	87.688	1.351	0	13.01268
293	4.23E-05	3.12E+00	88.059	1.239	0	11.91732
279	3.87E-05	2.99E+00	88.397	1.127	0	10.82637
266	3.52E-05	2.85E+00	88.727	1.006	0	9.652182
253	3.15E-05	2.70E+00	89.013	0.886	0	8.491731
235	2.79E-05	2.54E+00	89.277	0.759	0	7.267387
205	2.45E-05	2.38E+00	89.494	0.636	0	6.084784
182	2.10E-05	2.20E+00	89.68	0.505	0	4.828107
160	1.76E-05	2.01E+00	89.818	0.381	0	3.640732
137	1.42E-05	1.81E+00	89.921	0.251	0	2.397573
118	1.46E-05	1.83E+00	89.98	0.128	0	1.222403
70	1.50E-05	1.86E+00	90	0	0	0

Geparametriseerd model: trekbelasting

Node	G	SIF	X	Y	Z	hoek xi
51	1.56E-05	1.90E+00	90	0	0	0
101	2.20E-05	2.25E+00	89.803	0.397	0	3.793842
139	2.84E-05	2.56E+00	89.228	0.784	0	7.508118
184	4.02E-05	3.05E+00	88.304	1.159	0	11.13765
204	5.20E-05	3.46E+00	87.058	1.522	0	14.69459
231	6.37E-05	3.83E+00	85.517	1.87	0	18.1597
259	7.53E-05	4.17E+00	83.71	2.204	0	21.55125
284	8.81E-05	4.51E+00	81.665	2.522	0	24.85563
305	1.01E-04	4.83E+00	79.407	2.824	0	28.07758
322	1.15E-04	5.15E+00	76.965	3.11	0	31.22052
348	1.29E-04	5.45E+00	74.362	3.38	0	34.28663
362	1.43E-04	5.75E+00	71.625	3.633	0	37.26483
376	1.58E-04	6.04E+00	68.777	3.87	0	40.16568
389	1.73E-04	6.31E+00	65.839	4.091	0	42.98707
397	1.87E-04	6.57E+00	62.834	4.296	0	45.72521
413	2.01E-04	6.82E+00	59.781	4.485	0	48.37428
426	2.16E-04	7.05E+00	56.699	4.66	0	50.95638
432	2.29E-04	7.27E+00	53.606	4.82	0	53.4496
435	2.42E-04	7.47E+00	50.516	4.966	0	55.85979
440	2.54E-04	7.65E+00	47.446	5.099	0	58.19355
445	2.66E-04	7.83E+00	44.408	5.219	0	60.43928
455	2.76E-04	7.98E+00	41.416	5.327	0	62.60223
457	2.86E-04	8.12E+00	38.48	5.424	0	64.68893
458	2.94E-04	8.24E+00	35.61	5.51	0	66.68363
463	3.03E-04	8.36E+00	32.816	5.587	0	68.61741
466	3.10E-04	8.45E+00	30.105	5.654	0	70.44718
467	3.16E-04	8.54E+00	27.485	5.713	0	72.20699
469	3.22E-04	8.62E+00	24.962	5.765	0	73.9112
471	3.27E-04	8.69E+00	22.54	5.809	0	75.50435
472	3.31E-04	8.74E+00	20.226	5.847	0	77.03314
474	3.35E-04	8.79E+00	18.023	5.878	0	78.42608
475	3.38E-04	8.83E+00	15.935	5.905	0	79.79064
476	3.40E-04	8.86E+00	13.964	5.927	0	81.05326
477	3.42E-04	8.89E+00	12.112	5.945	0	82.23618
478	3.44E-04	8.91E+00	10.383	5.96	0	83.38037
479	3.45E-04	8.92E+00	8.776	5.971	0	84.36445
481	3.46E-04	8.94E+00	7.294	5.98	0	85.32052
482	3.47E-04	8.95E+00	5.938	5.987	0	86.22765
483	3.48E-04	8.96E+00	4.708	5.992	0	87.04093
484	3.48E-04	8.96E+00	3.605	5.995	0	87.66075
485	3.48E-04	8.96E+00	2.628	5.997	0	88.18807
486	3.48E-04	8.97E+00	1.78	5.999	0	88.95391
487	3.48E-04	8.97E+00	1.059	6	0	90
488	3.49E-04	8.97E+00	0.466	6	0	90
489	3.49E-04	8.97E+00	0	6	0	90

Handgemaakte model: buiging

Node	G	SIF	X	Y	Z	hoek
659	8.97E-05	4.55E+00	0	6	0	90
658	8.97E-05	4.55E+00	1.043	6	0	90
657	8.97E-05	4.55E+00	2.13	5.998	0	88.52059
656	8.97E-05	4.55E+00	3.263	5.996	0	87.90774
655	8.97E-05	4.55E+00	4.441	5.993	0	87.23208
654	8.96E-05	4.55E+00	5.664	5.988	0	86.37569
652	8.95E-05	4.55E+00	6.93	5.982	0	85.56078
650	8.95E-05	4.54E+00	8.241	5.975	0	84.76782
649	8.94E-05	4.54E+00	9.594	5.966	0	83.89751
648	8.92E-05	4.54E+00	10.991	5.955	0	82.97834
647	8.91E-05	4.54E+00	12.43	5.942	0	82.02691
646	8.89E-05	4.53E+00	13.911	5.928	0	81.11488
645	8.88E-05	4.53E+00	15.432	5.911	0	80.11913
644	8.86E-05	4.52E+00	16.994	5.892	0	79.11252
642	8.83E-05	4.52E+00	18.595	5.871	0	78.0975
640	8.80E-05	4.51E+00	20.234	5.846	0	76.99065
638	8.78E-05	4.50E+00	21.91	5.819	0	75.89091
634	8.74E-05	4.49E+00	23.621	5.79	0	74.7964
632	8.71E-05	4.48E+00	25.368	5.757	0	73.63779
630	8.66E-05	4.47E+00	27.147	5.721	0	72.45871
628	8.62E-05	4.46E+00	28.957	5.681	0	71.23275
626	8.57E-05	4.45E+00	30.798	5.638	0	69.99565
625	8.51E-05	4.43E+00	32.666	5.591	0	68.72243
623	8.45E-05	4.42E+00	34.56	5.54	0	67.41836
620	8.39E-05	4.40E+00	36.477	5.485	0	66.08766
617	8.31E-05	4.38E+00	38.417	5.426	0	64.73364
616	8.24E-05	4.36E+00	40.375	5.362	0	63.33768
613	8.15E-05	4.34E+00	42.349	5.294	0	61.92513
605	8.07E-05	4.31E+00	44.338	5.221	0	60.47801
598	7.97E-05	4.29E+00	46.337	5.144	0	59.01848
591	7.86E-05	4.26E+00	48.344	5.061	0	57.51158
588	7.75E-05	4.23E+00	50.355	4.973	0	55.97908
581	7.63E-05	4.20E+00	52.367	4.88	0	54.4229
577	7.50E-05	4.16E+00	54.376	4.781	0	52.82876
572	7.37E-05	4.13E+00	56.38	4.677	0	51.21482
569	7.23E-05	4.08E+00	58.372	4.567	0	49.56716
557	7.08E-05	4.04E+00	60.351	4.451	0	47.88782
542	6.92E-05	4.00E+00	62.31	4.329	0	46.17846
536	6.76E-05	3.95E+00	64.246	4.202	0	44.45375
527	6.58E-05	3.90E+00	66.154	4.068	0	42.68755
519	6.41E-05	3.85E+00	68.029	3.928	0	40.89438
513	6.22E-05	3.79E+00	69.867	3.782	0	39.07472
497	6.02E-05	3.73E+00	71.661	3.63	0	37.22884
487	5.82E-05	3.66E+00	73.407	3.471	0	35.34511
477	5.61E-05	3.60E+00	75.099	3.307	0	33.44709
471	5.39E-05	3.53E+00	76.732	3.136	0	31.5113
454	5.17E-05	3.45E+00	78.299	2.958	0	29.53795

433	4.92E-05	3.37E+00	79.796	2.775	0	27.54855
418	4.68E-05	3.29E+00	81.215	2.586	0	25.53104
406	4.42E-05	3.19E+00	82.551	2.39	0	23.47403
390	4.15E-05	3.10E+00	83.799	2.189	0	21.39733
371	3.85E-05	2.98E+00	84.95	1.982	0	19.28901
355	3.55E-05	2.86E+00	86	1.769	0	17.14754
350	3.47E-05	2.83E+00	86.274	1.708	0	16.53892
343	3.38E-05	2.79E+00	86.606	1.632	0	15.78331
338	3.25E-05	2.74E+00	86.95	1.549	0	14.96131
324	3.11E-05	2.68E+00	87.326	1.452	0	14.00461
305	2.95E-05	2.61E+00	87.688	1.351	0	13.01268
293	2.79E-05	2.54E+00	88.059	1.239	0	11.91732
279	2.60E-05	2.45E+00	88.397	1.127	0	10.82637
266	2.41E-05	2.36E+00	88.727	1.006	0	9.652182
253	2.20E-05	2.25E+00	89.013	0.886	0	8.491731
235	1.99E-05	2.14E+00	89.277	0.759	0	7.267387
205	1.77E-05	2.02E+00	89.494	0.636	0	6.084784
182	1.55E-05	1.89E+00	89.68	0.505	0	4.828107
160	1.34E-05	1.76E+00	89.818	0.381	0	3.640732
137	1.13E-05	1.61E+00	89.921	0.251	0	2.397573
118	1.08E-05	1.58E+00	89.98	0.128	0	1.222403
70	1.04E-05	1.55E+00	90	0	0	0

Geparametriseerd model: buiging

Node	G	SIF	X	Y	Z	hoek
51	1.22E-05	1.68E+00	90	0	0	0
101	1.63E-05	1.94E+00	89.803	0.397	0	3.793842
139	2.04E-05	2.17E+00	89.228	0.784	0	7.508118
184	2.67E-05	2.48E+00	88.304	1.159	0	11.13765
204	3.30E-05	2.76E+00	87.058	1.522	0	14.69459
231	3.75E-05	2.94E+00	85.517	1.87	0	18.1597
259	4.21E-05	3.12E+00	83.71	2.204	0	21.55125
284	4.60E-05	3.26E+00	81.665	2.522	0	24.85563
305	5.00E-05	3.40E+00	79.407	2.824	0	28.07758
322	5.35E-05	3.51E+00	76.965	3.11	0	31.22052
348	5.70E-05	3.63E+00	74.362	3.38	0	34.28663
362	6.01E-05	3.73E+00	71.625	3.633	0	37.26483
376	6.33E-05	3.82E+00	68.777	3.87	0	40.16568
389	6.61E-05	3.90E+00	65.839	4.091	0	42.98707
397	6.88E-05	3.99E+00	62.834	4.296	0	45.72521
413	7.12E-05	4.05E+00	59.781	4.485	0	48.37428
426	7.36E-05	4.12E+00	56.699	4.66	0	50.95638
432	7.55E-05	4.18E+00	53.606	4.82	0	53.4496
435	7.75E-05	4.23E+00	50.516	4.966	0	55.85979
440	7.91E-05	4.27E+00	47.446	5.099	0	58.19355
445	8.07E-05	4.32E+00	44.408	5.219	0	60.43928
455	8.20E-05	4.35E+00	41.416	5.327	0	62.60223
457	8.33E-05	4.38E+00	38.48	5.424	0	64.68893
458	8.42E-05	4.41E+00	35.61	5.51	0	66.68363
463	8.52E-05	4.44E+00	32.816	5.587	0	68.61741
466	8.60E-05	4.45E+00	30.105	5.654	0	70.44718
467	8.67E-05	4.47E+00	27.485	5.713	0	72.20699
469	8.73E-05	4.49E+00	24.962	5.765	0	73.9112
471	8.78E-05	4.50E+00	22.54	5.809	0	75.50435
472	8.82E-05	4.51E+00	20.226	5.847	0	77.03314
474	8.86E-05	4.52E+00	18.023	5.878	0	78.42608
475	8.89E-05	4.53E+00	15.935	5.905	0	79.79064
476	8.91E-05	4.54E+00	13.964	5.927	0	81.05326
477	8.93E-05	4.54E+00	12.112	5.945	0	82.23618
478	8.95E-05	4.54E+00	10.383	5.96	0	83.38037
479	8.96E-05	4.55E+00	8.776	5.971	0	84.36445
481	8.97E-05	4.55E+00	7.294	5.98	0	85.32052
482	8.97E-05	4.55E+00	5.938	5.987	0	86.22765
483	8.98E-05	4.55E+00	4.708	5.992	0	87.04093
484	8.98E-05	4.55E+00	3.605	5.995	0	87.66075
485	8.99E-05	4.55E+00	2.628	5.997	0	88.18807
486	8.99E-05	4.56E+00	1.78	5.999	0	88.95391
487	8.99E-05	4.56E+00	1.059	6	0	90
488	9.00E-05	4.56E+00	0.466	6	0	90
489	9.00E-05	4.56E+00	0	6	0	90

E.5 Door-de-wand scheur

De hier gegeven SIFs horen bij het model beschreven in paragraaf 4.4.

Handgemaakte model: trekbelasting

Node	G	SIF	X	Y	Z	hoek
673	2.86E-03	2.57E+01	77.942	12	0	30
644	5.04E-03	3.41E+01	78.14	11.908	0	29.74671
627	7.22E-03	4.08E+01	78.337	11.816	0	29.49406
619	6.06E-03	3.74E+01	78.535	11.722	0	29.23657
602	4.89E-03	3.36E+01	78.731	11.628	0	28.97972
595	4.70E-03	3.29E+01	78.928	11.533	0	28.72079
590	4.50E-03	3.22E+01	79.123	11.437	0	28.45978
562	4.04E-03	3.05E+01	79.483	11.258	0	27.97481
551	3.58E-03	2.87E+01	79.843	11.076	0	27.48394
542	3.32E-03	2.77E+01	80.261	10.859	0	26.90152
533	3.05E-03	2.65E+01	80.679	10.636	0	26.3061
519	2.86E-03	2.57E+01	81.163	10.371	0	25.60249
505	2.66E-03	2.48E+01	81.645	10.099	0	24.88458
496	2.50E-03	2.40E+01	82.201	9.772	0	24.02697
486	2.35E-03	2.33E+01	82.751	9.436	0	23.15168
458	2.23E-03	2.27E+01	83.382	9.033	0	22.10932
444	2.10E-03	2.20E+01	84	8.616	0	21.0388
426	1.97E-03	2.14E+01	84.756	8.073	0	19.65617
407	1.85E-03	2.07E+01	85.498	7.496	0	18.1999
394	1.76E-03	2.02E+01	86.155	6.94	0	16.80807
365	1.68E-03	1.97E+01	86.786	6.356	0	15.35705
327	1.61E-03	1.93E+01	87.333	5.799	0	13.98247
303	1.55E-03	1.89E+01	87.848	5.218	0	12.55735
281	1.51E-03	1.87E+01	88.282	4.667	0	11.21308
264	1.47E-03	1.84E+01	88.679	4.096	0	9.826583
230	1.46E-03	1.84E+01	89.005	3.559	0	8.527939
203	1.45E-03	1.83E+01	89.292	3.005	0	7.192787
180	1.46E-03	1.83E+01	89.516	2.486	0	5.945552
163	1.46E-03	1.84E+01	89.701	1.955	0	4.672396
135	1.52E-03	1.87E+01	89.834	1.458	0	3.482863
115	1.58E-03	1.91E+01	89.929	0.951	0	2.27094
104	1.59E-03	1.91E+01	89.982	0.48	0	1.145992
53	1.59E-03	1.92E+01	90	0	0	0

Handgemaakte model, zeer fijne mesh: trekbelasting

Node	G	SIF	X	Y	Z	hoek
1161	1.70E-03	1.98E+01	77.942	12	0	30
1134	5.46E-03	3.55E+01	78.029	11.96	0	29.8898
1124	9.23E-03	4.62E+01	78.117	11.919	0	29.77696
1116	7.35E-03	4.12E+01	78.236	11.863	0	29.62305
1088	5.47E-03	3.55E+01	78.355	11.807	0	29.46938
1071	5.12E-03	3.44E+01	78.518	11.73	0	29.25846
1030	4.77E-03	3.32E+01	78.68	11.653	0	29.04797
1008	4.65E-03	3.28E+01	78.902	11.545	0	28.75346
996	4.53E-03	3.23E+01	79.123	11.437	0	28.45978
954	4.00E-03	3.04E+01	79.541	11.229	0	27.89645
940	3.47E-03	2.83E+01	79.958	11.016	0	27.3226
925	3.26E-03	2.74E+01	80.375	10.799	0	26.74101
900	3.05E-03	2.65E+01	80.79	10.576	0	26.14642
886	2.88E-03	2.58E+01	81.203	10.349	0	25.54427
872	2.71E-03	2.50E+01	81.614	10.116	0	24.92933
840	2.59E-03	2.45E+01	82.022	9.879	0	24.30696
824	2.48E-03	2.39E+01	82.426	9.637	0	23.67459
811	2.38E-03	2.34E+01	82.827	9.389	0	23.02971
786	2.29E-03	2.30E+01	83.223	9.137	0	22.37757
776	2.21E-03	2.26E+01	83.614	8.879	0	21.71305
764	2.14E-03	2.22E+01	84	8.616	0	21.0388
722	2.04E-03	2.17E+01	84.609	8.182	0	19.93273
699	1.93E-03	2.11E+01	85.209	7.726	0	18.77888
673	1.86E-03	2.07E+01	85.757	7.282	0	17.66293
651	1.78E-03	2.03E+01	86.29	6.82	0	16.50904
610	1.72E-03	1.99E+01	86.77	6.372	0	15.39666
567	1.66E-03	1.96E+01	87.23	5.908	0	14.25079
533	1.62E-03	1.93E+01	87.638	5.462	0	13.15483
502	1.57E-03	1.91E+01	88.024	5.002	0	12.02958
458	1.54E-03	1.89E+01	88.36	4.56	0	10.95278
421	1.52E-03	1.87E+01	88.673	4.107	0	9.853235
383	1.50E-03	1.86E+01	88.939	3.674	0	8.805653
347	1.49E-03	1.85E+01	89.181	3.231	0	7.736936
318	1.49E-03	1.86E+01	89.381	2.809	0	6.721399
274	1.49E-03	1.86E+01	89.557	2.378	0	5.686387
235	1.51E-03	1.86E+01	89.696	1.97	0	4.708326
209	1.52E-03	1.87E+01	89.811	1.554	0	3.712499
173	1.58E-03	1.91E+01	89.895	1.16	0	2.770375
143	1.64E-03	1.94E+01	89.955	0.76	0	1.81467
123	1.63E-03	1.94E+01	89.989	0.383	0	0.914384
64	1.62E-03	1.93E+01	90	0	0	0

Geparametriseerd model: trekbelasting

Node	G	SIF	X	Y	Z	hoek
25	1.62E-03	1.94E+01	90	0	0	0
59	1.61E-03	1.93E+01	89.981	0.494	0	1.179421
73	1.60E-03	1.92E+01	89.925	0.981	0	2.342618
85	1.55E-03	1.89E+01	89.833	1.459	0	3.485255
103	1.49E-03	1.86E+01	89.709	1.93	0	4.612516
120	1.49E-03	1.85E+01	89.552	2.392	0	5.719976
138	1.49E-03	1.85E+01	89.365	2.846	0	6.81035
153	1.50E-03	1.86E+01	89.15	3.291	0	7.881516
184	1.51E-03	1.87E+01	88.908	3.727	0	8.933712
200	1.53E-03	1.88E+01	88.641	4.155	0	9.969563
219	1.56E-03	1.90E+01	88.35	4.575	0	10.98926
241	1.59E-03	1.92E+01	88.037	4.985	0	11.98809
265	1.63E-03	1.94E+01	87.704	5.386	0	12.96858
284	1.67E-03	1.96E+01	87.352	5.779	0	13.93327
325	1.71E-03	1.99E+01	86.983	6.162	0	14.87731
347	1.76E-03	2.02E+01	86.597	6.537	0	15.80564
376	1.81E-03	2.05E+01	86.197	6.903	0	16.71582
395	1.87E-03	2.08E+01	85.784	7.26	0	17.60782
421	1.93E-03	2.11E+01	85.359	7.607	0	18.47908
443	2.00E-03	2.15E+01	84.924	7.946	0	19.33454
468	2.06E-03	2.18E+01	84.479	8.276	0	20.17162
488	2.14E-03	2.22E+01	84.027	8.598	0	20.99276
511	2.22E-03	2.27E+01	83.568	8.91	0	21.79273
525	2.32E-03	2.31E+01	83.103	9.214	0	22.5765
547	2.42E-03	2.36E+01	82.635	9.509	0	23.34136
564	2.55E-03	2.43E+01	82.163	9.795	0	24.0871
577	2.69E-03	2.49E+01	81.689	10.073	0	24.81617
595	2.86E-03	2.57E+01	81.214	10.343	0	25.52839
611	3.04E-03	2.65E+01	80.739	10.604	0	26.22091
626	3.44E-03	2.82E+01	80.265	10.857	0	26.89616
635	3.84E-03	2.98E+01	79.793	11.102	0	27.55393
646	4.02E-03	3.04E+01	79.323	11.338	0	28.19128
655	4.20E-03	3.11E+01	78.858	11.567	0	28.81338
661	5.90E-03	3.69E+01	78.397	11.787	0	29.41455
687	7.61E-03	4.19E+01	77.942	12	0	30

Handgemaakte model: buiging

Node	G	SIF	X	Y Z	hoek
673	6.39E-05	3.84E+00	77.942	12 0	30
644	6.18E-04	1.20E+01	78.14	11.908 0	29.74671
627	1.17E-03	1.65E+01	78.337	11.816 0	29.49406
619	8.75E-04	1.42E+01	78.535	11.722 0	29.23657
602	5.77E-04	1.15E+01	78.731	11.628 0	28.97972
595	5.30E-04	1.11E+01	78.928	11.533 0	28.72079
590	4.84E-04	1.06E+01	79.123	11.437 0	28.45978
562	3.71E-04	9.26E+00	79.483	11.258 0	27.97481
551	2.59E-04	7.73E+00	79.843	11.076 0	27.48394
542	1.98E-04	6.76E+00	80.261	10.859 0	26.90152
533	1.37E-04	5.63E+00	80.679	10.636 0	26.3061
519	9.71E-05	4.73E+00	81.163	10.371 0	25.60249
505	5.68E-05	3.62E+00	81.645	10.099 0	24.88458
496	3.47E-05	2.83E+00	82.201	9.772 0	24.02697
486	1.26E-05	1.71E+00	82.751	9.436 0	23.15168
458	4.99E-06	1.07E+00	83.382	9.033 0	22.10932
444	-2.67E-06		84	8.616 0	21.0388
426	5.07E-06	1.08E+00	84.756	8.073 0	19.65617
407	1.28E-05	1.72E+00	85.498	7.496 0	18.1999
394	3.05E-05	2.65E+00	86.155	6.94 0	16.80807
365	4.82E-05	3.34E+00	86.786	6.356 0	15.35705
327	7.02E-05	4.03E+00	87.333	5.799 0	13.98247
303	9.22E-05	4.61E+00	87.848	5.218 0	12.55735
281	1.17E-04	5.20E+00	88.282	4.667 0	11.21308
264	1.42E-04	5.72E+00	88.679	4.096 0	9.826583
230	1.69E-04	6.25E+00	89.005	3.559 0	8.527939
203	1.97E-04	6.74E+00	89.292	3.005 0	7.192787
180	2.26E-04	7.23E+00	89.516	2.486 0	5.945552
163	2.55E-04	7.68E+00	89.701	1.955 0	4.672396
135	2.96E-04	8.27E+00	89.834	1.458 0	3.482863
115	3.38E-04	8.83E+00	89.929	0.951 0	2.27094
104	3.68E-04	9.21E+00	89.982	0.48 0	1.145992
53	3.98E-04	9.58E+00	90	0 0	0

Handgemaakte model, zeer fijne mesh: buiging

Node	G	SIF	X	Y	Z	hoek
1161	-1.56E-04		77.942	12	0	30
1134	7.36E-04	1.30E+01	78.029	11.96	0	29.8898
1124	1.63E-03	1.94E+01	78.117	11.919	0	29.77696
1116	1.19E-03	1.66E+01	78.236	11.863	0	29.62305
1088	7.60E-04	1.32E+01	78.355	11.807	0	29.46938
1071	6.92E-04	1.26E+01	78.518	11.73	0	29.25846
1030	6.23E-04	1.20E+01	78.68	11.653	0	29.04797
1008	5.51E-04	1.13E+01	78.902	11.545	0	28.75346
996	4.79E-04	1.05E+01	79.123	11.437	0	28.45978
954	3.57E-04	9.08E+00	79.541	11.229	0	27.89645
940	2.36E-04	7.37E+00	79.958	11.016	0	27.3226
925	1.82E-04	6.48E+00	80.375	10.799	0	26.74101
900	1.28E-04	5.44E+00	80.79	10.576	0	26.14642
886	9.44E-05	4.67E+00	81.203	10.349	0	25.54427
872	6.06E-05	3.74E+00	81.614	10.116	0	24.92933
840	4.21E-05	3.12E+00	82.022	9.879	0	24.30696
824	2.37E-05	2.34E+00	82.426	9.637	0	23.67459
811	1.44E-05	1.82E+00	82.827	9.389	0	23.02971
786	5.11E-06	1.09E+00	83.223	9.137	0	22.37757
776	1.82E-06	6.48E-01	83.614	8.879	0	21.71305
764	-1.47E-06		84	8.616	0	21.0388
722	3.41E-06	8.87E-01	84.609	8.182	0	19.93273
699	8.29E-06	1.38E+00	85.209	7.726	0	18.77888
673	2.09E-05	2.20E+00	85.757	7.282	0	17.66293
651	3.36E-05	2.78E+00	86.29	6.82	0	16.50904
610	5.02E-05	3.40E+00	86.77	6.372	0	15.39666
567	6.68E-05	3.93E+00	87.23	5.908	0	14.25079
533	8.57E-05	4.45E+00	87.638	5.462	0	13.15483
502	1.05E-04	4.91E+00	88.024	5.002	0	12.02958
458	1.25E-04	5.37E+00	88.36	4.56	0	10.95278
421	1.46E-04	5.80E+00	88.673	4.107	0	9.853235
383	1.68E-04	6.22E+00	88.939	3.674	0	8.805653
347	1.90E-04	6.62E+00	89.181	3.231	0	7.736936
318	2.14E-04	7.02E+00	89.381	2.809	0	6.721399
274	2.38E-04	7.41E+00	89.557	2.378	0	5.686387
235	2.63E-04	7.80E+00	89.696	1.97	0	4.708326
209	2.89E-04	8.16E+00	89.811	1.554	0	3.712499
173	3.25E-04	8.66E+00	89.895	1.16	0	2.770375
143	3.61E-04	9.12E+00	89.955	0.76	0	1.81467
123	3.83E-04	9.40E+00	89.989	0.383	0	0.914384
64	4.05E-04	9.66E+00	90	0	0	0

Geparametriseerde model: buiging

Node	G	SIF	X	Y	Z	hoek
25	4.04E-04	9.66E+00	90	0	0	0
59	3.72E-04	9.27E+00	89.981	0.494	0	1.179421
73	3.40E-04	8.86E+00	89.925	0.981	0	2.342618
85	3.02E-04	8.34E+00	89.833	1.459	0	3.485255
103	2.63E-04	7.79E+00	89.709	1.93	0	4.612516
120	2.37E-04	7.40E+00	89.552	2.392	0	5.719976
138	2.12E-04	6.99E+00	89.365	2.846	0	6.81035
153	1.89E-04	6.60E+00	89.15	3.291	0	7.881516
184	1.66E-04	6.19E+00	88.908	3.727	0	8.933712
200	1.46E-04	5.81E+00	88.641	4.155	0	9.969563
219	1.26E-04	5.40E+00	88.35	4.575	0	10.98926
241	1.08E-04	5.00E+00	88.037	4.985	0	11.98809
265	9.06E-05	4.57E+00	87.704	5.386	0	12.96858
284	7.48E-05	4.16E+00	87.352	5.779	0	13.93327
325	5.91E-05	3.69E+00	86.983	6.162	0	14.87731
347	4.59E-05	3.25E+00	86.597	6.537	0	15.80564
376	3.27E-05	2.75E+00	86.197	6.903	0	16.71582
395	2.26E-05	2.29E+00	85.784	7.26	0	17.60782
421	1.26E-05	1.71E+00	85.359	7.607	0	18.47908
443	6.80E-06	1.25E+00	84.924	7.946	0	19.33454
468	9.75E-07	4.74E-01	84.479	8.276	0	20.17162
488	8.74E-07		84.027	8.598	0	20.99276
511	7.73E-07	-4.22E-01	83.568	8.91	0	21.79273
525	8.16E-06	-1.37E+00	83.103	9.214	0	22.5765
547	1.56E-05	-1.90E+00	82.635	9.509	0	23.34136
564	3.49E-05	-2.84E+00	82.163	9.795	0	24.0871
577	5.42E-05	-3.54E+00	81.689	10.073	0	24.81617
595	8.90E-05	-4.53E+00	81.214	10.343	0	25.52839
611	1.24E-04	-5.34E+00	80.739	10.604	0	26.22091
626	2.04E-04	-6.85E+00	80.265	10.857	0	26.89616
635	2.83E-04	-8.09E+00	79.793	11.102	0	27.55393
646	3.87E-04	-9.45E+00	79.323	11.338	0	28.19128
655	4.90E-04	-1.06E+01	78.858	11.567	0	28.81338
661	8.10E-04	-1.37E+01	78.397	11.787	0	29.41455
687	1.13E-03	-1.62E+01	77.942	12	0	30

