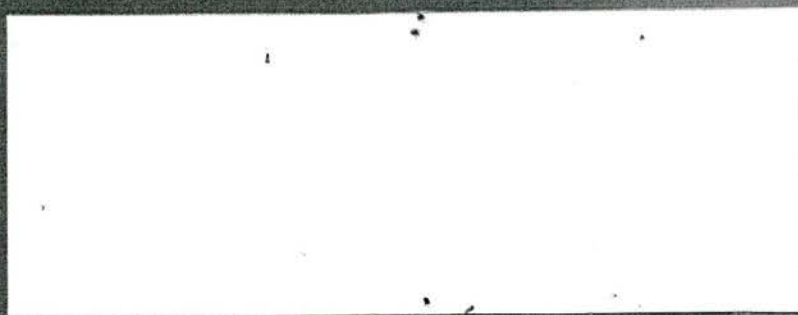


DI 250421

TNO-rapport / TNO report



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

C9968



TNO Bouw

BIBLIOTHEEK BOUWDIENST RIJKSWATERSTAAT

NR.

C9968 BDU

TNO-rapport

2002-BC-R0028/2

Vermoeiing stalen rijdekken
Restlevensduur Fase 2a
Spanningsintensiteitsfactoren half-ellipsvormige
en door-de-wand scheuren in een plaat

Bouwconstructies
Van Mourik Broekmanweg 6
Postbus 49
2600 AA

www.tno.nl

T 015 276 30 00
F 015 276 30 16

Datum 15 januari 2003

Auteur(s) ir. J. Maljaars
ir.O. D. Dijkstra

Exemplaarnummer

Oplage

Aantal pagina's 63

Aantal bijlagen

Opdrachtgever Bouwdienst RWS

Projectnaam RWS Restlevensduur

Projectnummer 006.24110

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.

© 2003 TNO

Samenvatting

In deze fase van het RWS project Restlevensduur zijn door middel van FEM analyses SIFs bepaald voor diepe brede ellipsvormige scheuren en door-de-wand scheuren. De verkregen resultaten zijn door middel van curve fitting omgezet in analytische uitdrukkingen, waarmee scheurgroei-analyses gemaakt kunnen worden.

De volgende conclusies kunnen uit de studie met betrekking tot de brede diepe half-ellipsvormige scheuren worden getrokken:

- a) De negen FEM analyses van de SIFs geven consistente resultaten.
- b) Voor de brede diepe ellipsvormige scheuren is een aanzienlijke correctie noodzakelijk op de formules van Newman en Raju. Dit geldt met name voor de correctiefactoren voor de breedterichting.
- c) In verband met de aard van de correctie bleek een, door middel van curve fitting bepaalde, analytische uitdrukking voor het verschil tussen de Newman en Raju formules en de FEM resultaten het meest voor de hand te liggen..
- d) In verband met parameters waarvoor FEM-analyses zijn uitgevoerd, zijn de gecorrigeerde formules voor de SIF voor half ellipsvormige scheuren geldig voor het gehele a/T gebied van 0 tot 1 en voor c/a verhoudingen tussen 4 en 26.
- e) Een levensduuranalyse voor een plaat belast op buiging geeft met de gecorrigeerde formules een ca 20% langere levensduur dan met de niet gecorrigeerde formules. De langere levensduur ontstaat vooral door een tragere scheurgroei voor diepe scheuren.

De volgende conclusies kunnen uit de studie met betrekking tot de door-de-wand scheuren worden getrokken:

- a) De vijftien FEM analyses van de SIFs geven consistente resultaten.
- b) Aan de "diepe" zijde van de scheur, waar het scheurfront onder een flauwe hoek staat met het oppervlak ontstaat vaak een slingering in de resultaten.
- c) Uit een vergelijking tussen scheur net niet en net wel door de wand blijkt dat de SIF aan het oppervlak, langs de c -as, nagenoeg gelijk is.
- d) Het SIF-verloop uit de FEM analyses is sterk niet lineair.
- e) Ten einde de aan de ene kant rekening te houden met het totale verloop en aan de andere kant de scheurgroei-analyses niet te gecompliceerd te moeten maken is het FEM-verloop benaderd door een lineair verloop met hetzelfde oppervlak en met hetzelfde ligging voor het zwaartepunt. Vervolgens zijn de zodanig verkregen SIFs aan de uiteinden gebruikt voor verdere bewerking.
- f) Door middel van curve fitting zijn deze resultaten omgezet in een analytische uitdrukking voor SIFs voor door de wand scheuren met een a/T verhouding van 1 tot 5 en een c/a verhouding van 4 tot 26.
- g) Uit een aanvullende scheurgroei-analyse voor de door de wand scheur in een plaat belast op buiging blijkt dat er slechts 2.2% aan de levensduur wordt toegevoegd. Bij deze analyse loopt wel de c/a verhouding na a/T van 1.5 op tot boven het geldigheidsgebied van 26. Er is dus twijfel aan de betrouwbaarheid van de toegepaste SIF boven a/T waarden van 1.5.

Resumerend kan worden geconcludeerd dat voor de half ellipsvormige scheuren alles min of meer naar verwachting is verlopen.

Bij de door de wand scheuren zijn een tweetal onverwachte problemen gerezen. Ten eerste het sterk niet-lineair verloop van de SIF. Dit is opgelost door een lineaire benadering. Ten tweede het uit het geldigheidsgebied lopen van de c/a verhouding tijdens een scheurgroei-analyse, gecombineerd met een onverwacht geringe toename in de levensduur.

Uitgaande van de oorspronkelijke fasering en de resultaten van de werkzaamheden in fase 2a worden de volgende werkzaamheden aanbevolen voor een volgende fase:

- a) Het nader onderzoeken van de wijze waarop omgegaan moet worden met het sterke niet-lineaire verloop van de SIF bij door de wand scheuren. Met name zou moeten worden bekeken of de nu gebruikte methode wel optimaal is.
- b) Het uitvoeren van aanvullende SIF analyses, zodat ook het gebied met c/a groter dan 26 kan worden afgedekt.
- c) Het uitvoeren van de voorgestelde experimentele verificatie door middel van een proef op een plaat belast op buiging. Hierbij moet het experiment en de wijze waarop de FEM analyses zijn uitgevoerd goed op elkaar aansluiten. Dit geldt met name voor de opleggingen en de wijze van belasten. De FEM analyses zijn uitgevoerd met een zuivere buigbelasting op de randen. Het is de vraag of dit in een experiment op dezelfde wijze aangebracht kan worden.

Inhoudsopgave

Symbolenlijst — 5

1	Inleiding — 6
2	Overzicht afmetingen van gemodelleerde scheuren — 7
3	FEM modellen en SIF van brede diepe scheuren — 10
3.1	Modellering scheuren — 10
3.2	SIFs van de gemodelleerde scheuren — 18
4	Analytische uitdrukking voor de SIF van brede diepe scheuren — 22
4.1	Vergelijking FEM resultaten met Newman-Raju — 22
4.2	Correctie voor a/T richting — 26
4.3	Correctie voor c/a richting — 27
4.4	Resulterende uitdrukking voor de M factoren — 30
4.5	Scheurgroeianalyses — 31
4.6	Slotopmerkingen — 34
5	FEM modellen en SIF van door-de-wand scheuren — 35
5.1	Modellering scheuren — 35
5.2	SIFs langs het scheurfront voor door-de-wand scheuren — 38
5.3	SIFs van de gemodelleerde scheuren: net wel of net niet door de wand — 45
6	Analytische uitdrukking voor door de wand scheuren — 50
6.1	Modificatie SIF verloop tot lineair verloop op basis van scheurfrontlengte — 50
6.2	Curve fitting resultaten — 50
6.3	Scheurgroei-analyse — 57
6.4	Slotopmerkingen — 58
7	Conclusies — 59
8	Aanbevelingen — 61
9	Referenties — 62
10	Bijlagen — 63

Symbolenlijst

ν	= de dwarscontractiecoëfficiënt
a	= de diepte van de ellipsvormige scheur of de fictieve diepte van de door-de-wand scheur
a'	= $a' \cos \phi$ = de scheurafmeting (halve breedte) aan de bovenzijde van een circelvormige door-de-wand scheur met straal a
B	= de breedte van de plaat (de afmeting van de plaat evenwijdig aan de scheur)
c	= de scheurafmeting (halve breedte bij de vrije rand) van de ellipsvormige of door-de-wand scheur
c'	= $a' \cdot (c/a)$ = de scheurafmeting (halve breedte) aan de bovenzijde van een door-de-wand scheur met afmetingen a en c
Cor	= correctie op de formules van Newman en Raju voor brede diepe scheuren
E	= de elasticiteitsmodulus
E^*	= de gemodificeerde elasticiteitsmodulus
G	= een maat voor de energie, berekend met de Eindige Elementenmethode, waaruit de SIF bepaald wordt
K	= SIF = de spanningsintensiteitsfactor
K_a	= SIF in het midden van de scheur (SIF bij $\phi = 90^\circ$)
K_c	= SIF bij de vrije rand (SIF bij $\phi = 0^\circ$)
L	= de lengte van de plaat (de afmeting van de plaat loodrecht op de scheur)
M	= geometrische correctiefactor in de vergelijking tussen de spanning, de scheurafmeting en de SIF
M_{ba}	= correctiefactor in het midden van de scheur ($\phi = 90^\circ$) voor buiging
M_{bc}	= correctiefactor aan de rand van de scheur ($\phi = 0^\circ$) voor buiging
$M\text{-cor}$	= correctiefactor voor brede diepe scheuren
M_{ma}	= correctiefactor in het midden van de scheur ($\phi = 90^\circ$) voor membraanspanning
M_{mc}	= correctiefactor aan de rand van de scheur ($\phi = 0^\circ$) voor membraanspanning
M_{NR}	= correctiefactor voor ellipsvormige scheuren volgens Newman en Raju
ϕ	= de geprojecteerde hoek van de ellipsvormige of door-de-wand scheur
$\phi = 0^\circ$	de vrije rand van de plaat (bij c)
$\phi = 90^\circ$	in het midden van de scheur (bij a)
SIF	= K = de spanningsintensiteitsfactor
T	= de dikte van de plaat
Φ	= elliptische integraal van de tweede soort

1 Inleiding

In het bestaand breukmechanica model voor dekplaatscheuren in orthotrope brugdekken wordt uitgegaan van een eindscheur gelijk aan de dekplaatdikte. Dit model is slechts gevalideerd voor scheuren tot ca. de halve plaatdikte en voorziet in het geheel niet in scheurgroei van door de wand scheuren.

In deze studie wordt kennis opgebouwd over het nauwkeurig bepalen van de levensduur voor scheuren groter dan de halve plaatdikte en van de restlevensduur na doorscheuren.

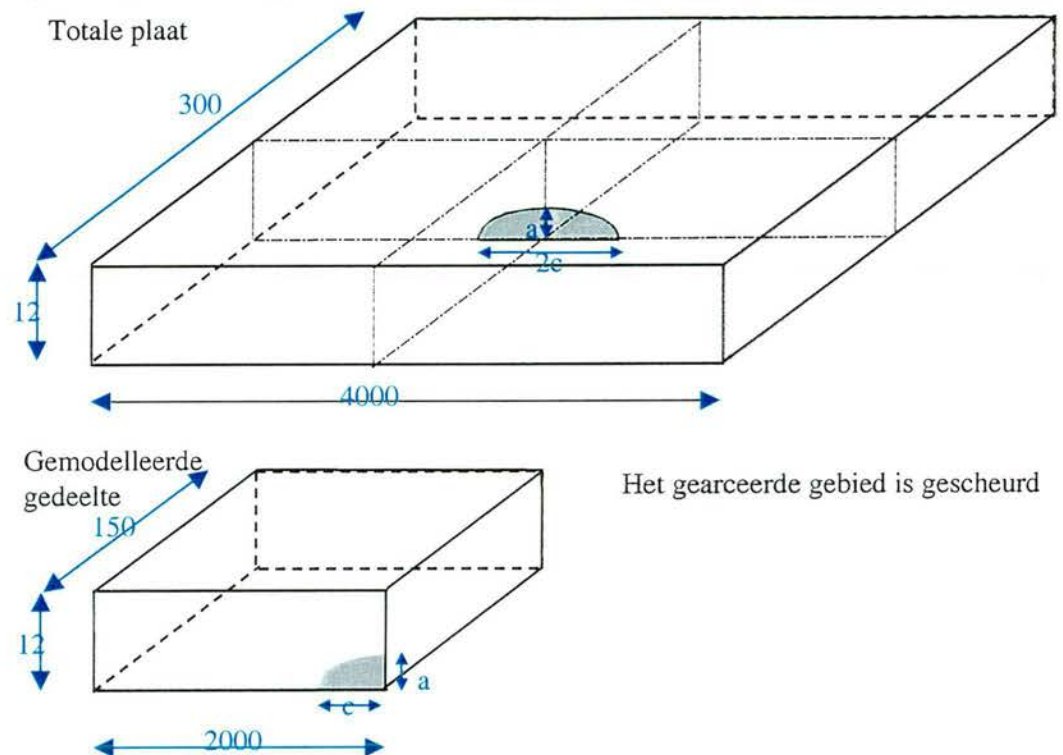
In een eerste fase [1] is een algemene oriëntatie en haalbaarheid bekeken en zijn enkele oriënterende analyses gemaakt. Voor algemene informatie over de wijze waarop in dit rapport de FEM analyses zijn uitgevoerd wordt verwezen naar paragraaf 4.1 van [1].

Het voorliggende rapport bevat de resultaten van de tweede fase van het project "Vermoeiing stalen rijdekken - Restlevensduur". Deze tweede fase bestaat uit het bepalen van de Spanningsintensiteitsfactor (SIF) van brede diepe scheuren en door-de-wand scheuren van een dekplaat met behulp van de Eindige Elementenmethode. In totaal zijn 3x3 brede diepe en 5x3 door-de-wand scheuren gemodelleerd en de SIF bepaald. In dit rapport zijn de SIFs van deze modellen gerapporteerd.

Hoofdstuk 2 geeft de afmetingen van de scheuren die gemodelleerd zijn. Hoofdstuk 3 geeft de resultaten van de SIF sommen van de zeer brede scheuren. In hoofdstuk 4 wordt een analytische uitdrukking gegeven voor de afwijking van de SIFs van zeer brede, diepe scheuren t.o.v. de formules van Newman-Raju. Hoofdstuk 5 geeft de resultaten van de SIF analyses van de door-de-wand scheuren. De analytische uitdrukking voor de SIFs van door-de-wand scheuren is gegeven in hoofdstuk 6. Tenslotte zijn conclusies en aanbevelingen vermeld in hoofdstuk 7.

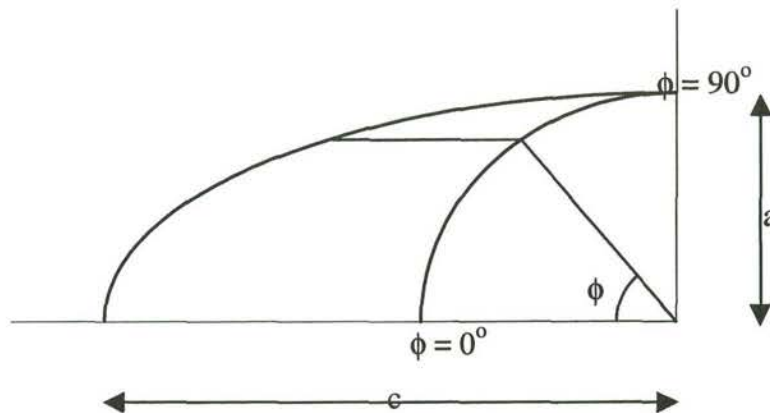
2 Overzicht afmetingen van gemodelleerde scheuren

De scheuren zijn aangebracht in een plaat met een dikte van 12 mm. De breedte van de plaat is 4000 mm (afmeting van de plaat evenwijdig aan de scheur). De lengte van de plaat is 300 mm (afmeting van de plaat loodrecht op de scheur). Omdat de plaat dubbelsymmetrisch is, kan worden volstaan met het modelleren van een kwart deel van de plaat ($L \times B \times T = 150 \times 2000 \times 12$), zie Figuur 2.1. Deze figuur is niet op schaal. Symmetrierand-voorwaarden zijn aangebracht op de symmetrievlakken. Hierbij zijn verplaatsingen van knooppunten loodrecht op de symmetrievlakken verhinderd.

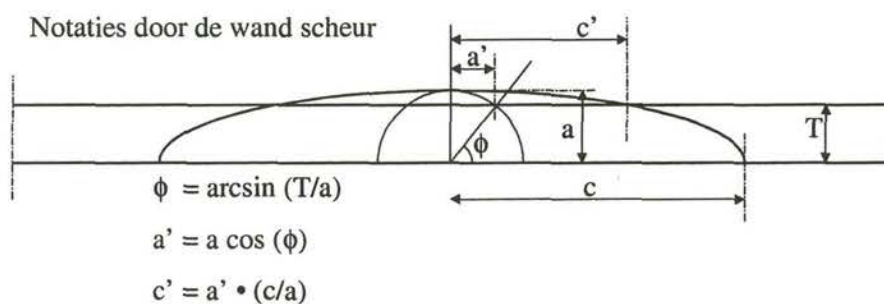


Figuur 2.1 Afmetingen van de gemodelleerde plaat

In dit hoofdstuk zijn de afmetingen gegeven van de ellipsvormige scheur. De diepte van de scheur is gelijk aan parameter a . Voor de door de wand scheur moet a worden gezien als een fictieve scheurdiepte, waarmee de vorm van de scheur wordt vastgelegd. De breedte van het gemodelleerde gedeelte van de scheur is c , zodat de totale scheurbreedte $2c$ bedraagt. De SIFs worden in dit rapport gepresenteerd als functie van een hoek. Hierdoor kunnen de resultaten van verschillende scheurafmetingen eenvoudiger in een figuur worden vergeleken. Deze hoek is gegeven in Figuur 2.2 voor een semi-ellipsvormige scheur en in Figuur 2.3 voor een door-de-wand scheur.



Figuur 2.2 Definitie van a, c en de hoek van de semi ellipsvormige scheur



Figuur 2.3 Definitie van a, c en de hoek van de door-de-wand scheur

De afmetingen van de gemodelleerde brede diepe scheuren zijn gegeven in Tabel 2.1. De keuze voor de a/T en c/a verhoudingen zijn gegeven en toegelicht in het rapport van fase 1. De afmetingen van de gemodelleerde door-de-wand scheuren zijn gegeven in Tabel 2.2. Voor de c/a verhoudingen van de door-de-wand scheuren zijn dezelfde waarden aangehouden als voor brede diepe scheuren.

Tabel 2.1 Afmetingen van de gemodelleerde brede scheuren

Scheur nr.	a/T	c/a	a [mm]	c [mm]
1	0.750	4.0	9.00	36.00
2		15.0	9.00	135.00
3		26.0	9.00	234.00
4	0.875	4.0	10.50	42.00
5		15.0	10.50	157.50
6		26.0	10.50	273.00
7	0.990	4.0	11.88	47.52
8		15.0	11.88	178.20
9		26.0	11.88	308.88

Tabel 2.2 Afmetingen van de gemodelleerde door-de-wand scheuren

Scheur nr.	a/T	c/a	a [mm]	c [mm]
10	1.010	4.0	12.12	48.48
11		15.0	12.12	181.80
12		26.0	12.12	315.12
13	2.000	4.0	24.00	96.00
14		15.0	24.00	360.00
15		26.0	24.00	624.00
16	3.000	4.0	36.00	144.00
17		15.0	36.00	540.00
18		26.0	36.00	936.00
19	4.000	4.0	48.00	192.00
20		15.0	48.00	720.00
21		26.0	48.00	1248.00
22	5.000	4.0	60.00	240.00
23		15.0	60.00	900.00
24		26.0	60.00	1560.00

De modellen worden onderworpen aan een buig en aan een trekbelasting met een spanning van 1 MPa.

Als materiaalgrootheden zijn de volgende grootheden van staal gebruikt:

ν = de dwarscontractiecoëfficiënt = 0.3

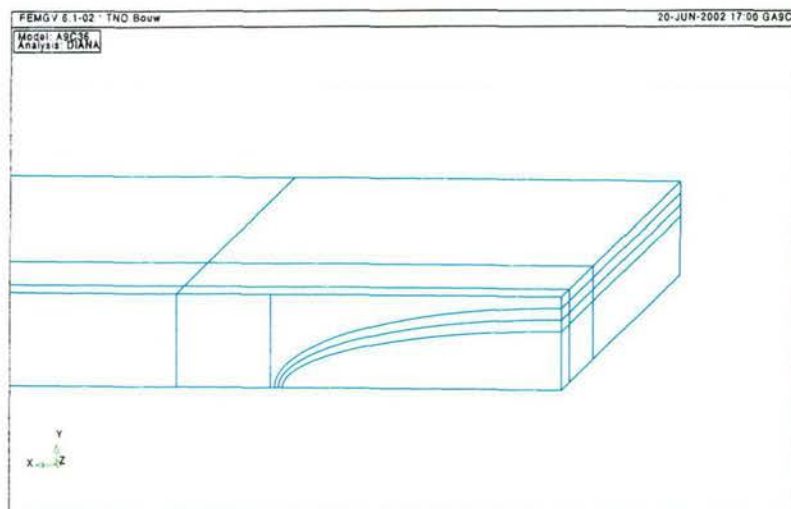
E = de elasticiteitsmodulus = 210000 MPa

3 FEM modellen en SIF van brede diepe scheuren

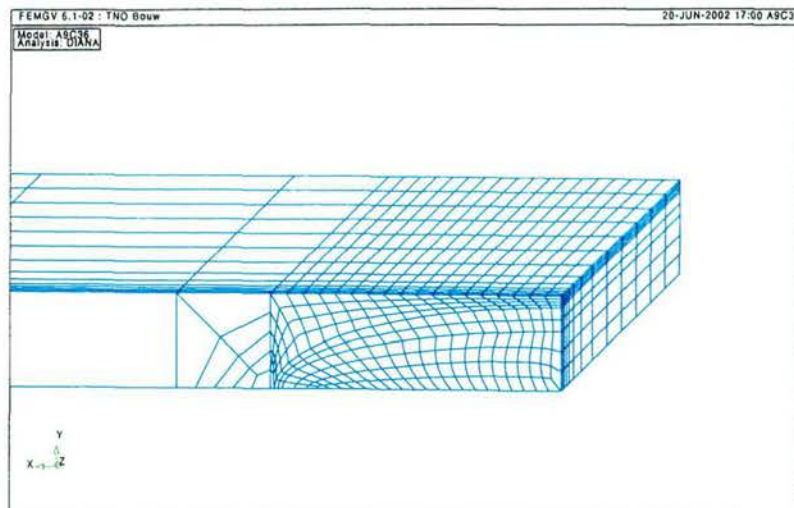
3.1 Modelling scheuren

In het rapport 2002-BC-R0009 [1], waarin de resultaten van fase 1, de algemene voorstudie, zijn vermeld, zijn de geometrische opbouw en de elementenverdeling voor de modellen van fase 2 gegeven. Uit de voorstudie bleek dat het voldoende is als de elementen direct langs het scheurfront een optimale, zo rechthoekig mogelijke, vorm hebben en dat elementen daarbuiten ook voldoen met een minder optimale vorm. Met dergelijke meshes worden de SIFs voldoende nauwkeurig bepaald.

In Figuur 3.1 is de voorgestelde geometrische opbouw te zien. Figuur 3.2 geeft de elementenverdeling voor dit model.

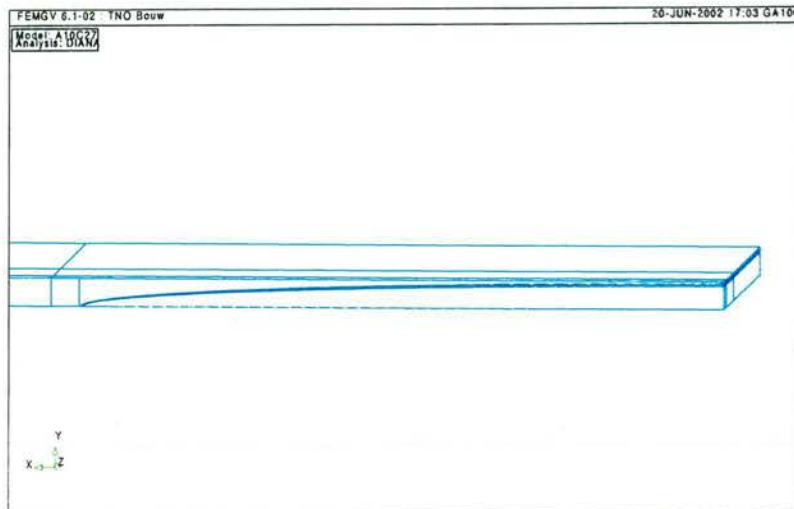


Figuur 3.1 Geometrische opbouw model 1 voor brede scheuren, $a=9$, $c=36$

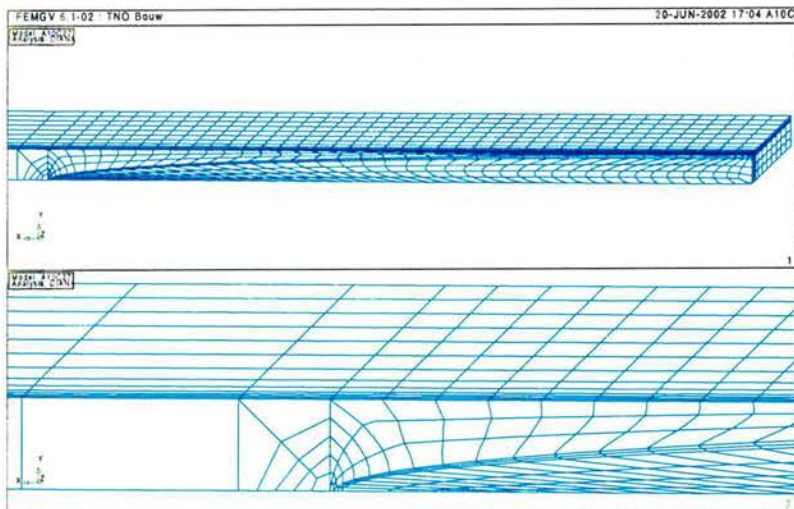


Figuur 3.2 Elementenverdeling model 1 voor brede scheuren, $a=9$, $c=36$

In Figuur 3.2 is te zien dat de elementen langs het scheurfront een optimaal (zo rechthoekig mogelijk) vorm hebben. Echter, indien de gemodelleerde scheur breder wordt, worden de vormen van de elementen langs het scheurfront minder optimaal. Dit is te zien in Figuur 3.3 en Figuur 3.4 voor scheurafmetingen $a=10.5$ en $c=273$.

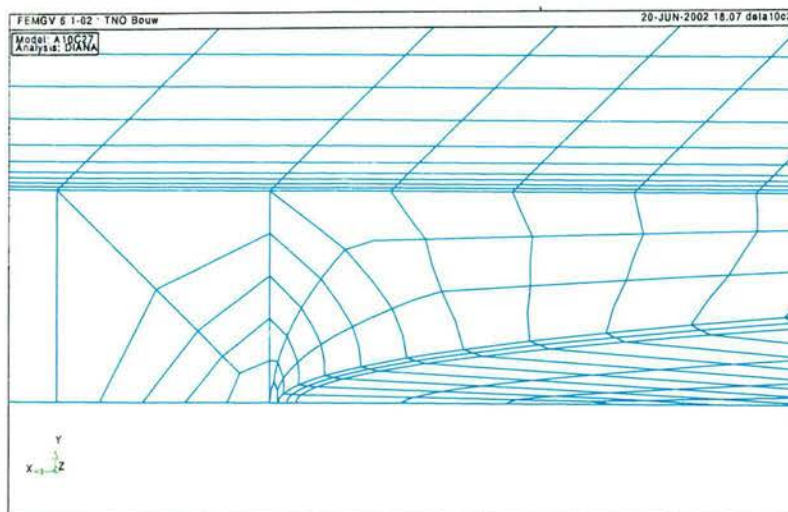


Figuur 3.3 Geometrische opbouw model 1 voor brede scheuren, $a=10.5$, $c=273$



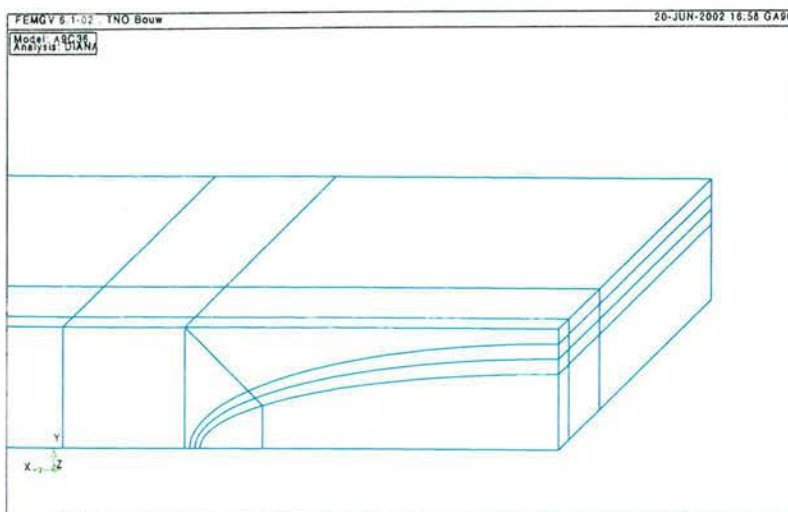
Figuur 3.4 Elementenverdeling model 1 voor brede scheuren, $a=10.5$, $c=273$

In Figuur 3.5 is het aangegeven gedeelte van Figuur 3.4 nog eens uitvergroot. Hier is te zien dat de elementen een minder optimale vorm hebben.

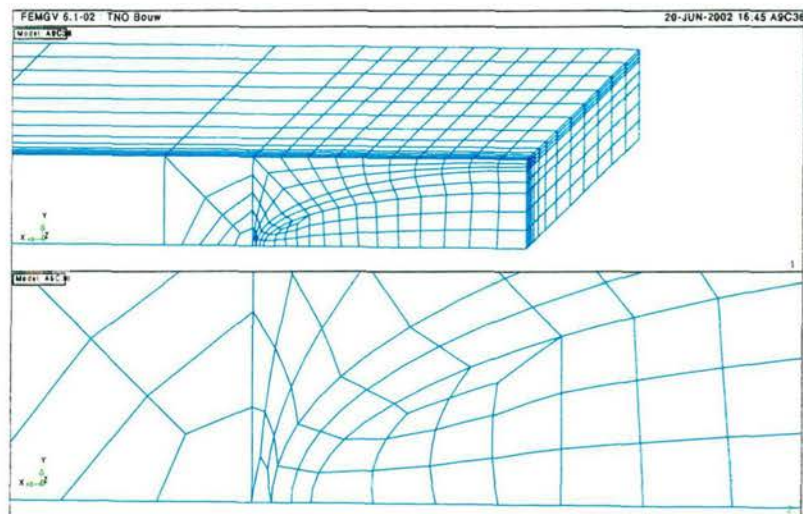


Figuur 3.5 Detail elementenverdeling model 1 voor brede scheuren, $a=10.5$, $c=273$

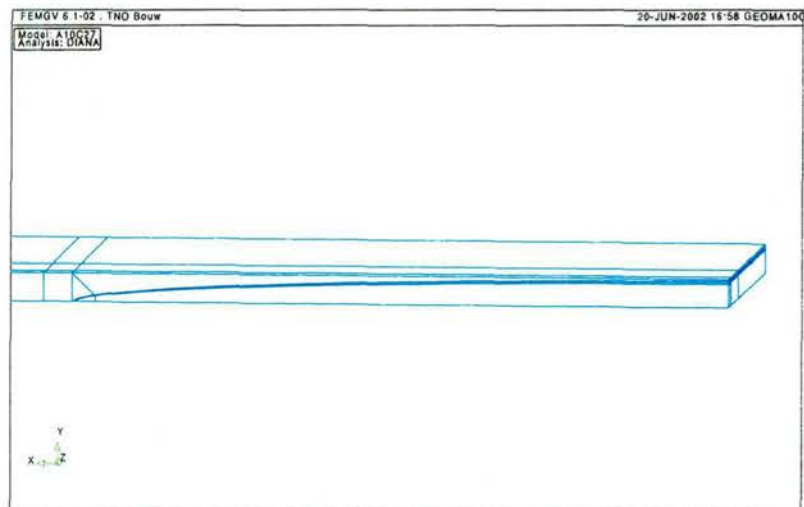
Om deze reden is een nieuw model ontwikkeld met een iets afwijkende geometrische opbouw. In deze opbouw is een diagonaal toegevoegd. De geometrie en elementenverdeling van dit tweede model voor een scheur met $a=9$ en $c=36$ is gegeven in respectievelijk Figuur 3.6 en Figuur 3.7. De geometrie en elementenverdeling van dit tweede model voor een scheur met $a=10.5$ en $c=273$ is gegeven in respectievelijk Figuur 3.8 en Figuur 3.9.



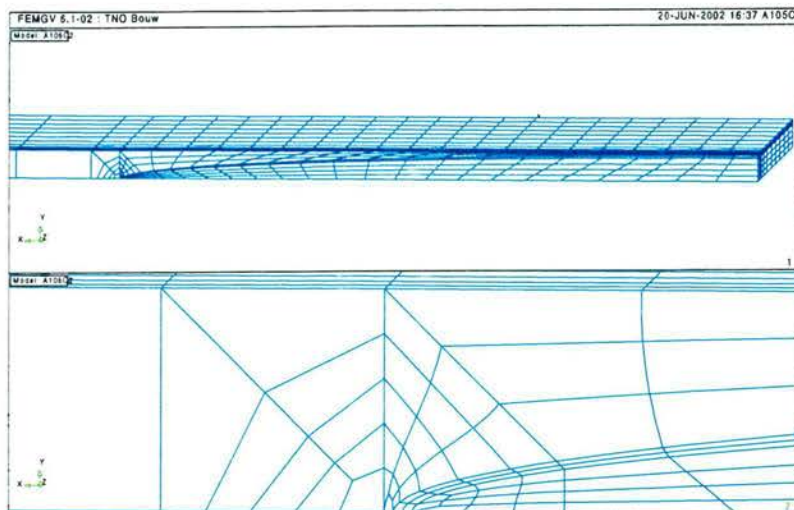
Figuur 3.6 Geometrische opbouw model 2 voor brede scheuren, $a=9$, $c=36$



Figuur 3.7 Elementenverdeling model 2 voor brede scheuren, $a=9$, $c=36$



Figuur 3.8 Geometrische opbouw model 2 voor brede scheuren, $a=10.5$, $c=273$



Figuur 3.9 Elementenverdeling model 2 voor brede scheuren, $a=10.5$, $c=273$
(figuur boven: overzicht; figuur onder: detail ter plaatse van scheurfront
aan oppervlak)

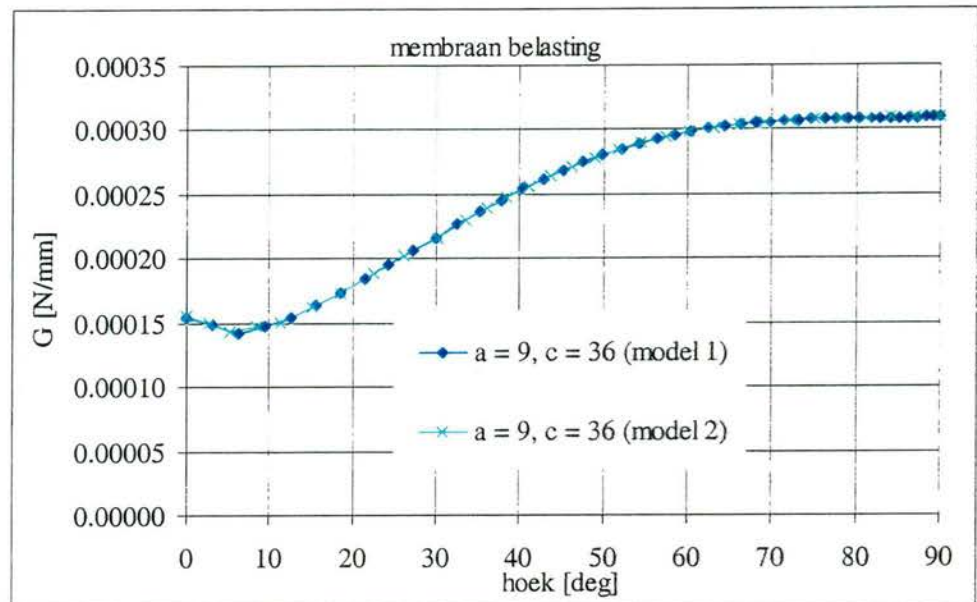
De elementen langs het scheurfront hebben in het tweede model een optimale vorm voor zowel normale als zeer brede scheuren. Opgemerkt wordt dat de elementen die niet langs het scheurfront liggen niet altijd een goede vorm hebben. Spanningen zullen hierdoor niet goed bepaald worden over deze elementen. Voor de bepaling van de SIFs wordt echter niet gebruik gemaakt van spanningen, maar van een energiemethode. Voor deze energiemethode zijn de (vormen van de) elementen niet direct langs het scheurfront niet van significant belang. De relaties tussen de energie en de SIF is gegeven in vergelijking 3.1 en 3.2 (zie [2] voor meer detail informatie).

$$G = K^2/E^* \quad (3.1)$$

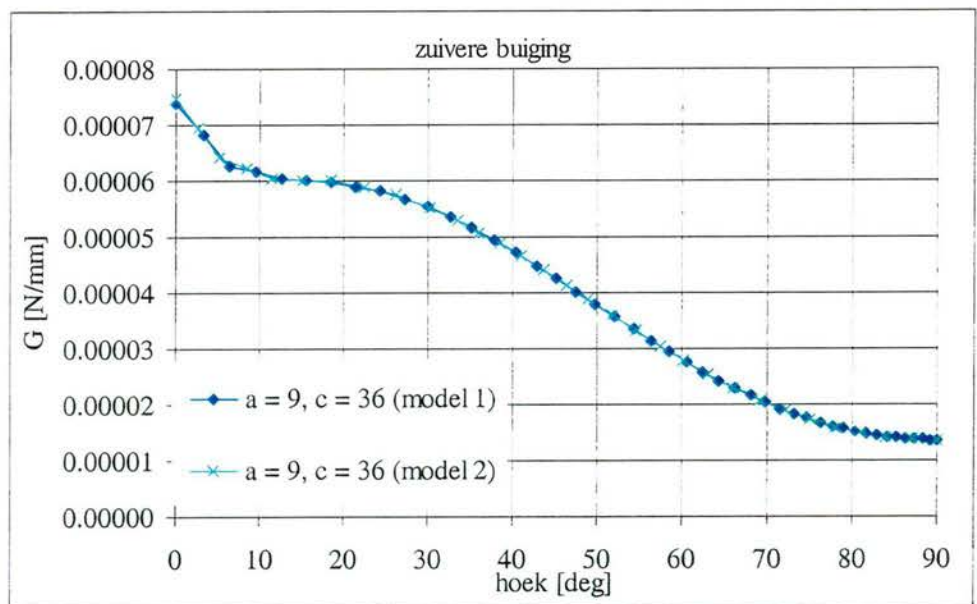
$$\begin{aligned} E^* &= E && \text{voor plane stress} \\ E^* &= E/(1-\nu^2) && \text{voor plane strain} \end{aligned} \quad (3.2)$$

De waarden voor G en K langs het scheurfront zijn bepaald met behulp van de FEM analyses voor scheuren met model 1 en met model 2 voor membraanbelasting en buiging voor scheuren met afmeting $a = 9$ en $c = 36$ en met $a = 9$ en $c = 135$.

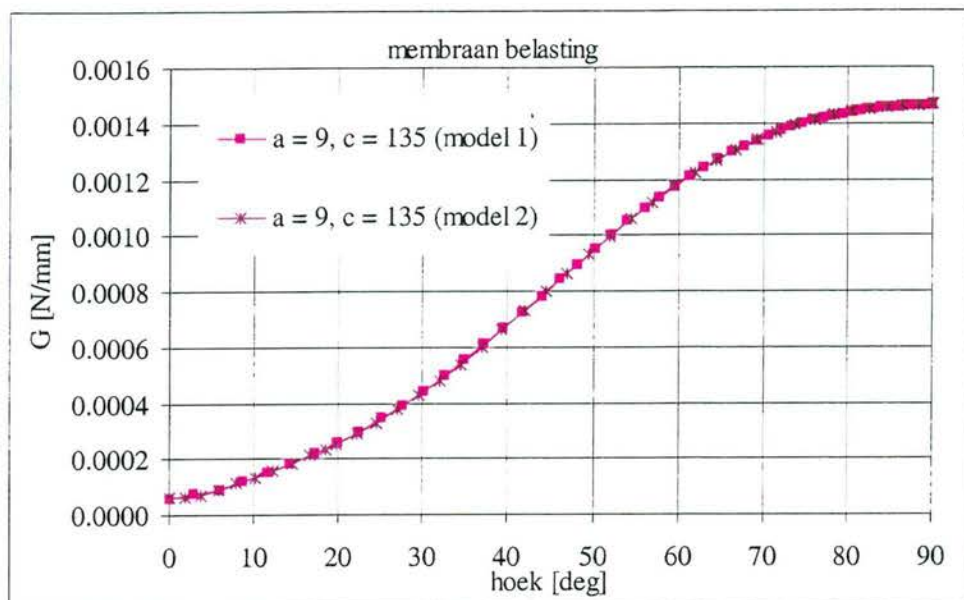
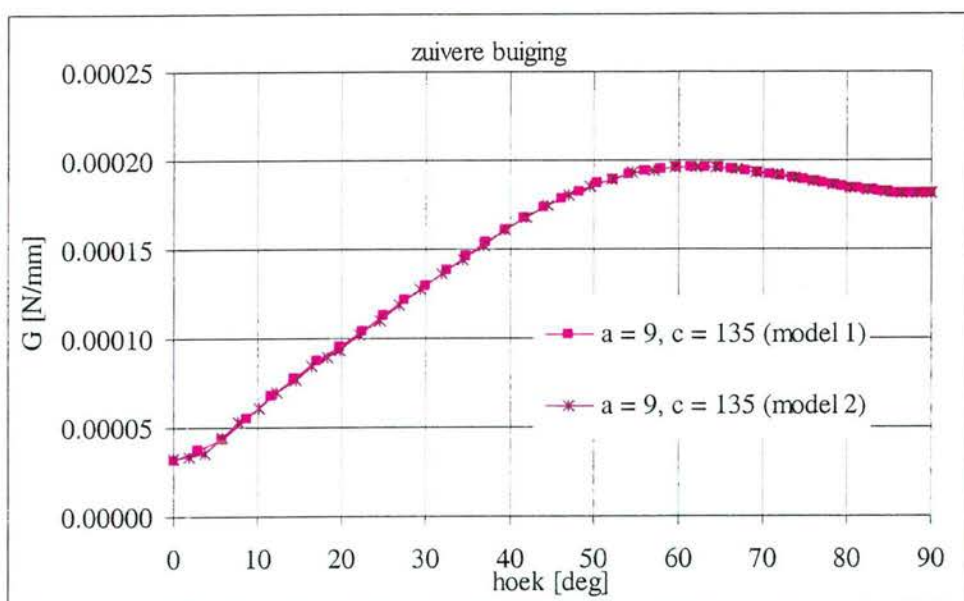
Voor de vergelijking van de resultaten van het eerste model en het tweede model is de maat voor de energie waaruit de SIF bepaald wordt langs het scheurfront weergegeven in Figuur 3.10 t/m Figuur 3.13. De verticale as geeft de energie weer, op de horizontale as is de hoek ϕ weergegeven die in Figuur 2.2 gedefinieerd is. De SIFs voor deze scheuren zijn gegeven in Figuur 3.14 t/m Figuur 3.15.

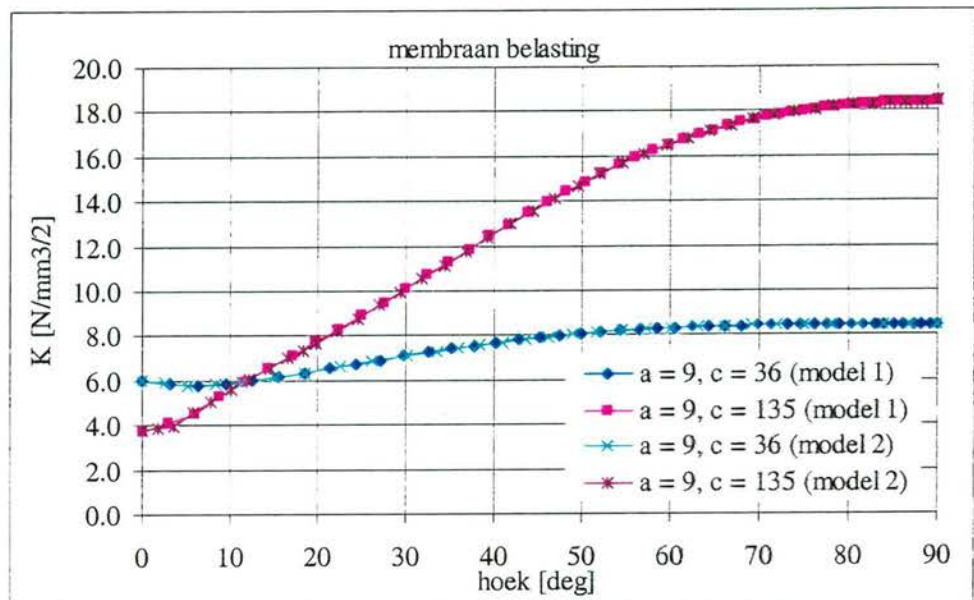


Figuur 3.10 Membraanbelasting: energie voor een scheur met a = 9 en c = 36



Figuur 3.11 Buiging: energie voor een scheur met a = 9 en c = 36

Figuur 3.12 Membraanbelasting: energie voor een scheur met $a = 9$ en $c = 135$ Figuur 3.13 Buiging: energie voor een scheur met $a = 9$ en $c = 135$



Figuur 3.14 Vergelijking SIFs van model 1 en 2, membraanbelasting



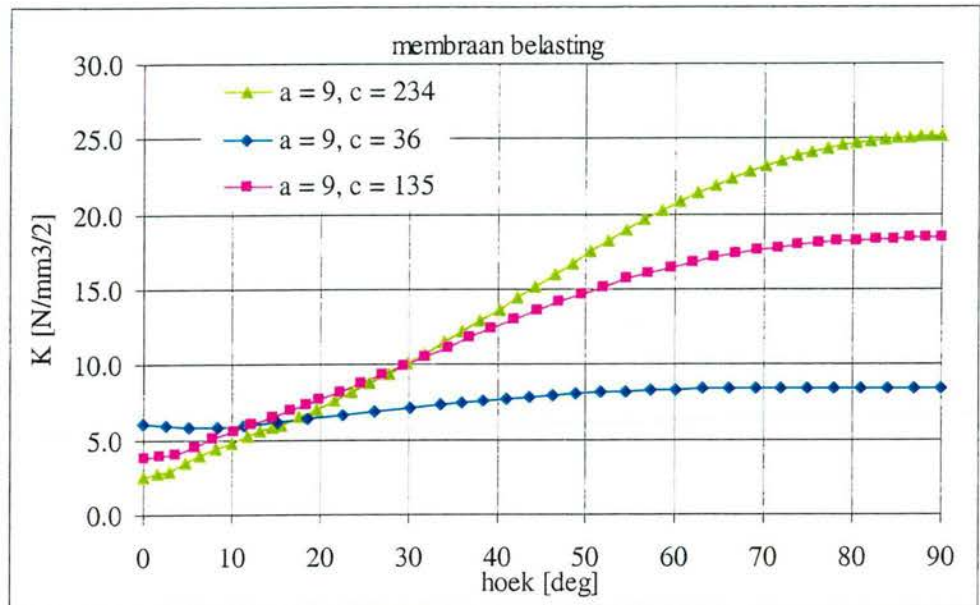
Figuur 3.15 Vergelijking SIFs van model 1 en 2, buiging

In de figuren is te zien dat modellering met het optimalere model (model 2) tot nagenoeg dezelfde antwoorden leidt als de modellering met het minder optimale model 1. Voor bredere scheuren is de SIF bij buiging nabij de vrije rand van de scheur (nabij c) iets lager voor model 2.

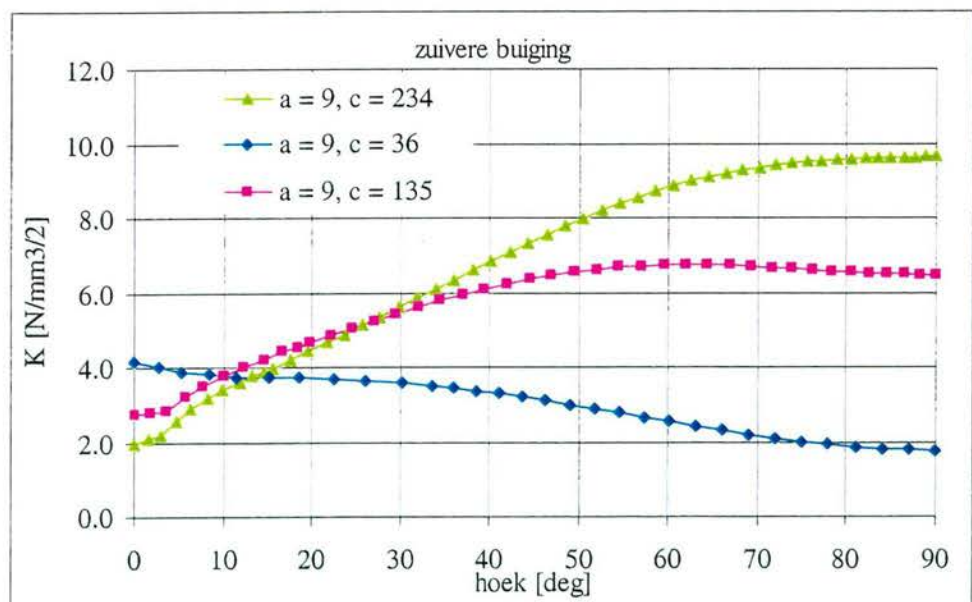
In het vervolgtraject zijn de SIFs bepaald volgens model 2.

3.2 SIFs van de gemodelleerde scheuren

In Figuur 3.16 en Figuur 3.17 zijn de SIFs langs het scheurfront gegeven voor membraanbelasting en buiging voor scheuren met een diepte $a = 9$ mm en $c/a = 4, 15$ en 26 .

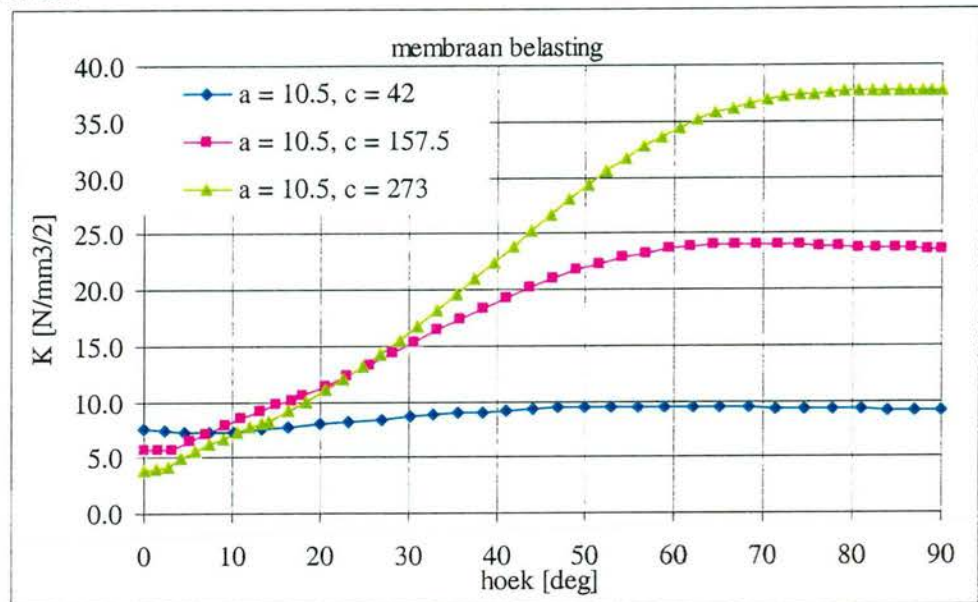


Figuur 3.16 SIFs langs het scheurfront voor membraanbelasting, $a = 9$

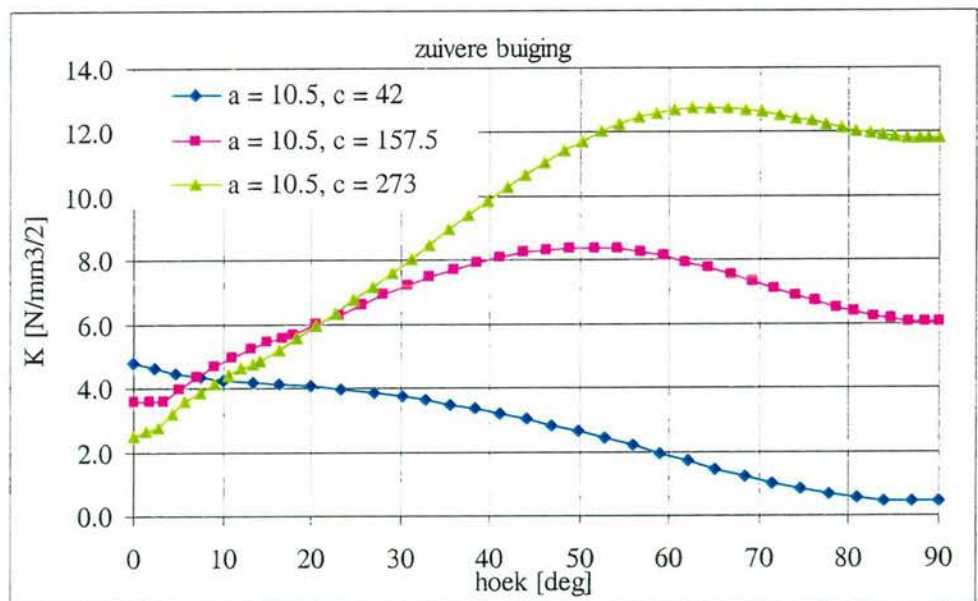


Figuur 3.17 SIFs langs het scheurfront voor buiging, $a = 9$

In Figuur 3.18 en Figuur 3.19 zijn de SIFs langs het scheurfront gegeven voor membraanbelasting en buiging voor scheuren met een diepte $a = 10.5$ mm en $c/a = 4, 15$ en 26 .

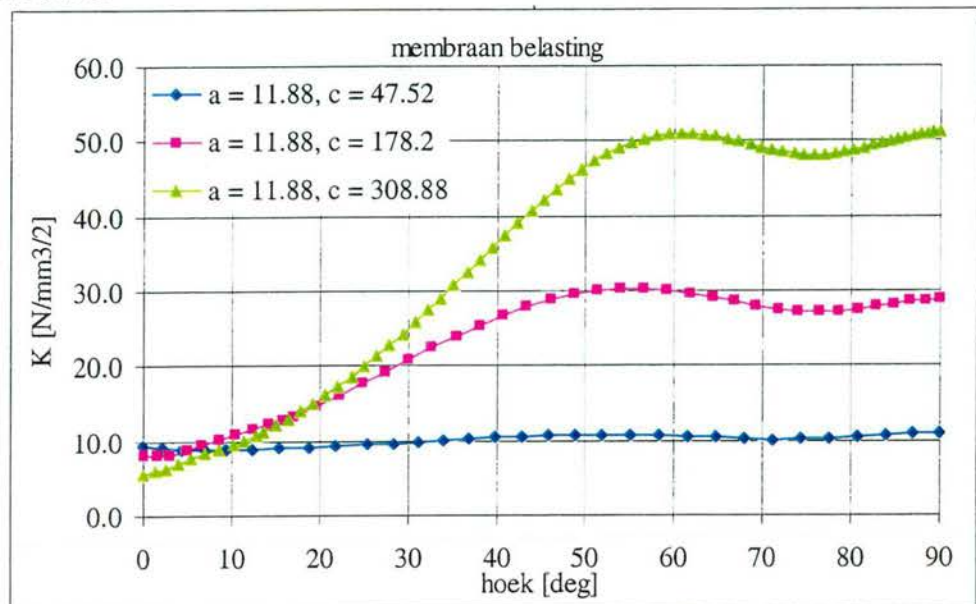


Figuur 3.18 SIFs langs het scheurfront voor membraanbelasting, $a = 10.5$

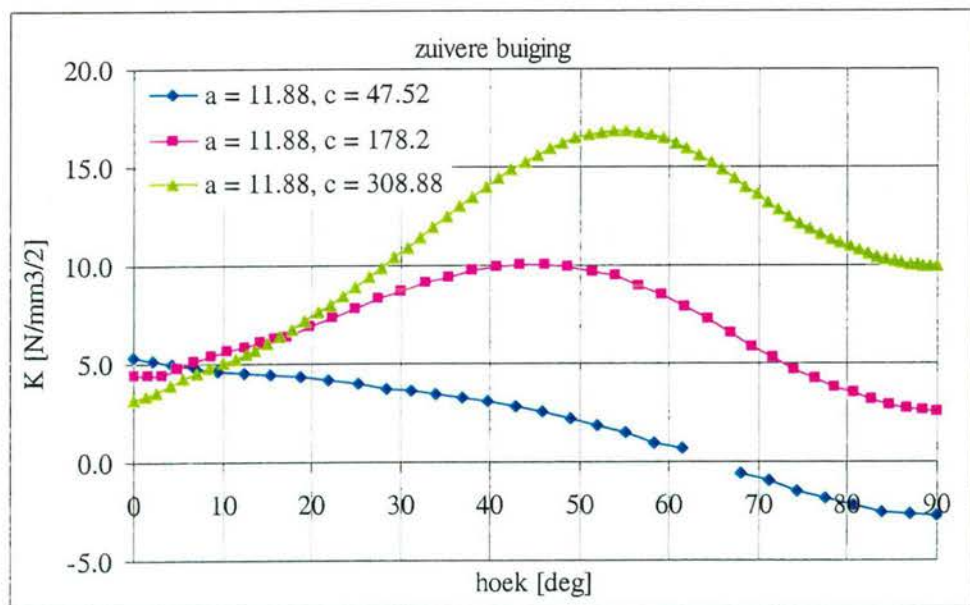


Figuur 3.19 SIFs langs het scheurfront voor buiging, $a = 10.5$

In Figuur 3.20 en Figuur 3.21 zijn de SIFs langs het scheurfront gegeven voor membraanbelasting en buiging voor scheuren met een diepte $a = 11.88$ mm en $c/a = 4$, 15 en 26.

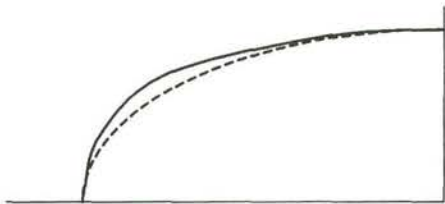


Figuur 3.20 SIFs langs het scheurfront voor membraanbelasting, $a = 11.88$



Figuur 3.21 SIFs langs het scheurfront voor buiging, $a = 11.88$

Naarmate de gemodelleerde scheuren dieper worden ontstaat er een maximum in het verloop van de SIF langs het scheurfront bij ca 60° . Dit betekent dat de meest optimale vorm van de scheur niet een zuivere ellipsvorm is, maar dat de scheur in werkelijkheid een vorm heeft conform Figuur 3.22. In deze figuur is de gemodelleerde, ellipsvormige scheur gestippeld en is een meer optimale vorm van de scheur met een doorgetrokken lijn weergegeven.



Figuur 3.22 SIFs langs het scheurfront voor buiging, a = 11.88

De berekende waarden voor de SIFs uit de FEM analyses aan de rand van de scheur, bij een hoek ϕ van 0^0 (K_c) en in het midden van de scheur, bij een hoek ϕ van 90^0 (K_a) zijn gegeven in Tabel 3.1. Deze waarden zijn de werkelijke waarden van de SIFs zoals deze uit de FEM analyses volgen. De vermelde SIFs zijn dus niet vanuit een zekere afstand vanuit de rand geëxtrapoleerd.

Met behulp van de uitdrukking 4.1 zijn in Tabel 3.1 de waarden voor Φ en M bepaald, zoals deze uit de met de FEM analyses bepaalde SIFs volgen. Voor de ellipsvormige scheur zijn er per geometrie vier waarden voor M (index m is voor membraanbelasting, b voor buiging; a voor de diepte (a) richting en c voor de breedte (c) richting). In hoofdstuk 4 worden deze correctiefactoren vergeleken met de tot nu toe gebruikte correctiefactoren van Newman en Raju.

Tabel 3.1 SIFs voor brede scheuren

Belasting	a/T	c/a	a	c	Φ	$K_a (\phi = 0^0)$	Mma	$K_c (\phi = 90^0)$	Mmc
	-	-	[mm]	[mm]	-	[Nmm-3/2]	-	[Nmm-3/2]	-
Membraan $\sigma m = \frac{1}{2}$ N/mm	0.750	4	9.00	36.00	1.072	8.440	1.701	6.000	1.209
	0.750	15	9.00	135.00	1.008	18.400	3.489	3.760	0.713
	0.750	26	9.00	234.00	1.003	25.100	4.736	2.470	0.466
	0.875	4	10.50	42.00	1.072	9.170	1.711	7.630	1.424
	0.875	15	10.50	157.50	1.008	23.500	4.126	5.630	0.988
	0.875	26	10.50	273.00	1.003	37.700	6.586	3.740	0.653
	0.990	4	11.88	47.52	1.072	10.900	1.912	9.200	1.614
	0.990	15	11.88	178.20	1.008	28.800	4.754	7.940	1.311
	0.990	26	11.88	308.88	1.003	51.000	8.376	5.500	0.903
Belasting	a/T	c/a	a	c	Φ	$K_a (\phi = 0^0)$	Mba	$K_c (\phi = 90^0)$	Mbc
	-	-	[mm]	[mm]	-	[Nmm-3/2]	-	[Nmm-3/2]	-
Buiging $\sigma b = \frac{1}{2}$ N/mm	0.750	4	9.00	36.00	1.072	1.760	0.355	4.150	0.836
	0.750	15	9.00	135.00	1.008	6.460	1.225	2.740	0.520
	0.750	26	9.00	234.00	1.003	9.630	1.817	1.910	0.360
	0.875	4	10.50	42.00	1.072	0.418	0.078	4.780	0.892
	0.875	15	10.50	157.50	1.008	6.010	1.055	3.550	0.623
	0.875	26	10.50	273.00	1.003	11.800	2.061	2.490	0.435
	0.990	4	11.88	47.52	1.072	-2.793	-0.490	5.310	0.932
	0.990	15	11.88	178.20	1.008	2.520	0.416	4.380	0.723
	0.990	26	11.88	308.88	1.003	9.930	1.631	3.130	0.514

4 Analytische uitdrukking voor de SIF van brede diepe scheuren

Voor een oneindig grote plaat met een centrale, rechte door-de-wand scheur is relatie tussen de SIF, de halve scheurbreedte en de nominale spanning als volgt:

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

Voor ingewikkelder geometrieën, zoals een half ellipsvormige scheur, worden de geometrische correctiefactor M en Φ toegepast:

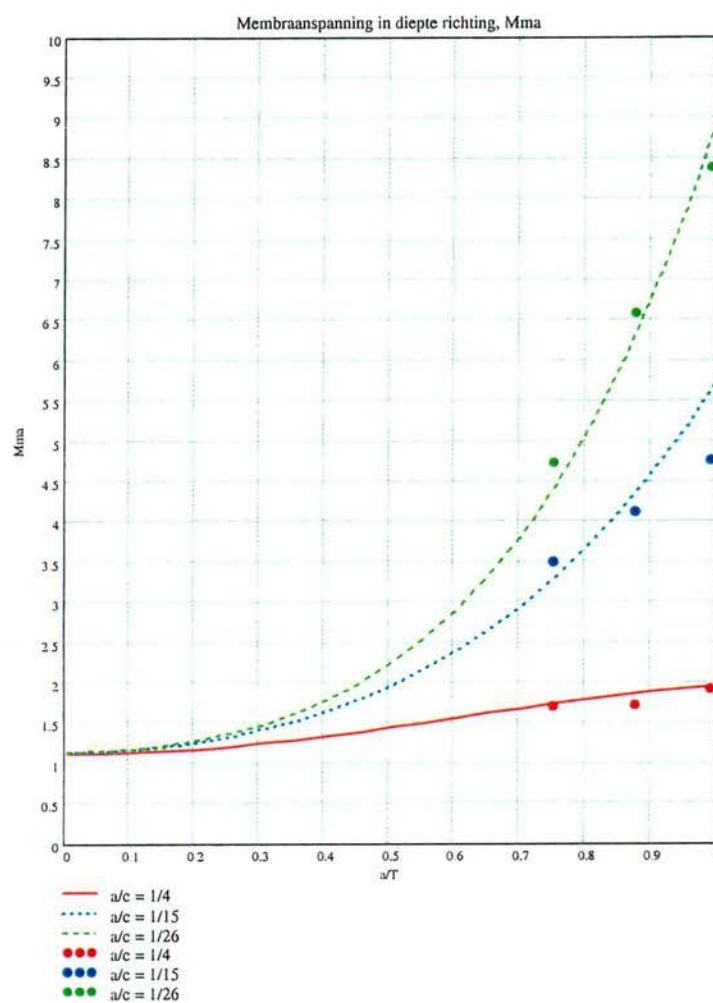
$$K = M \sigma \frac{\sqrt{\pi a}}{\Phi} \quad (4.2)$$

De correctiefactoren M en Φ voor de berekende scheuren zijn in Tabel 3.1 in hoofdstuk 3 weergegeven.

Voor scheuren met meer gangbare afmetingen worden deze factoren veelal berekend met de algebraïsche uitdrukkingen van Newman en Raju (NR) (zie bijlage C). Deze zijn echter niet meer geldig voor brede diepe scheuren. Daarom is een correctie afgeleid voor deze scheurafmetingen, zodat wederom een algebraïsche uitdrukking voor deze diepe scheuren wordt verkregen, waarmee een scheurgroeianalyse gemaakt kan worden.

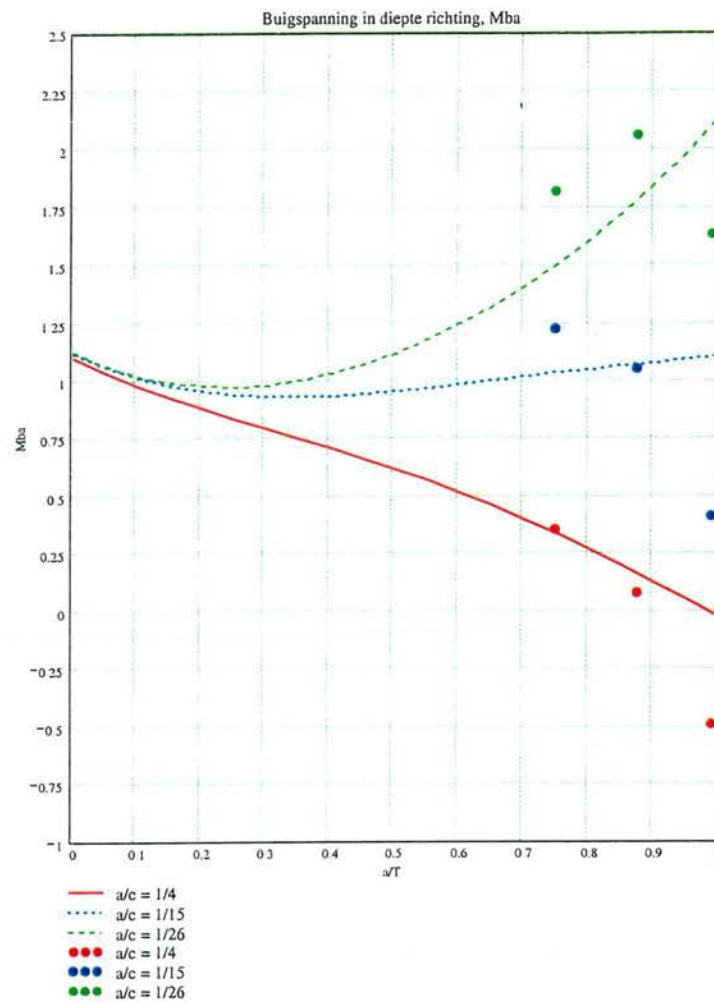
4.1 Vergelijking FEM resultaten met Newman-Raju

Teneinde een indruk te krijgen in welke mate de NR formules afwijken van de FEM resultaten zijn de resultaten uitgezet in één grafiek (zie Figuur 4.1 t/m Figuur 4.4). In hoeverre de beperkte lengte van het FEM model (300mm) afwijkingen geeft ten opzichte van de NR formules (gebaseerd op analyses met een grotere lengte) is onbekend. Voor de voortgang van het RWS project is dit geen bezwaar, want uiteindelijk zullen er een analyses gemaakt moeten worden van een grotere dekconstructie. Hierbij moeten de afmetingen zodanig gekozen worden dat de beperkte afmetingen geen invloed meer hebben op het resultaat.



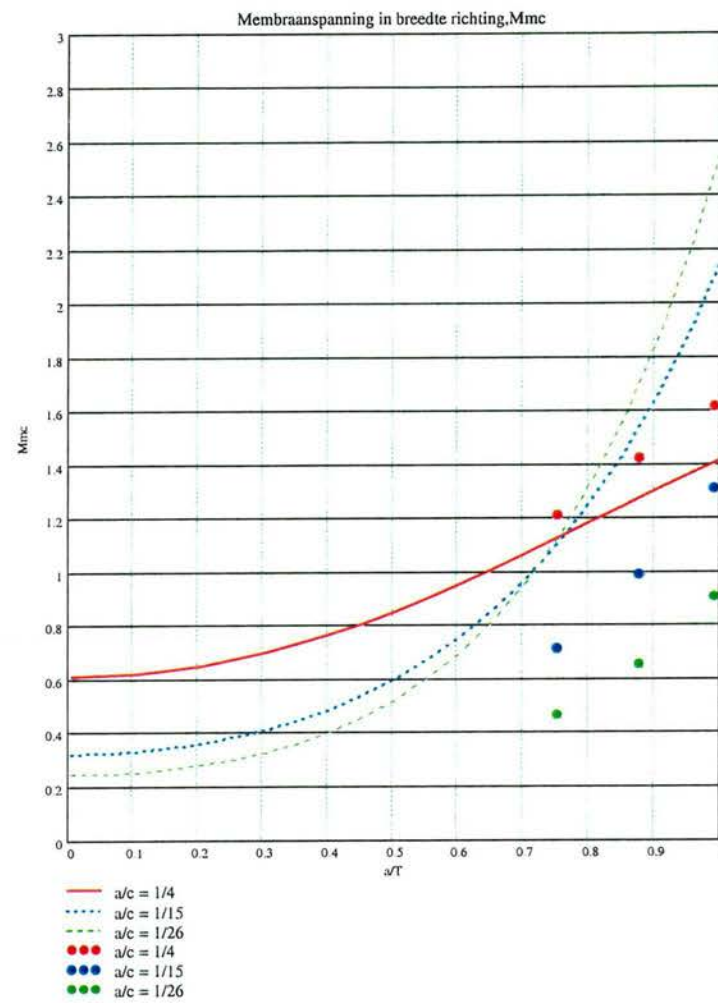
Figuur 4.1 Grafieken voor M_{ma}

De FEM resultaten voor M_{ma} passen nog redelijk goed bij de NR resultaten en behoeven dus slechts een kleine correctie.



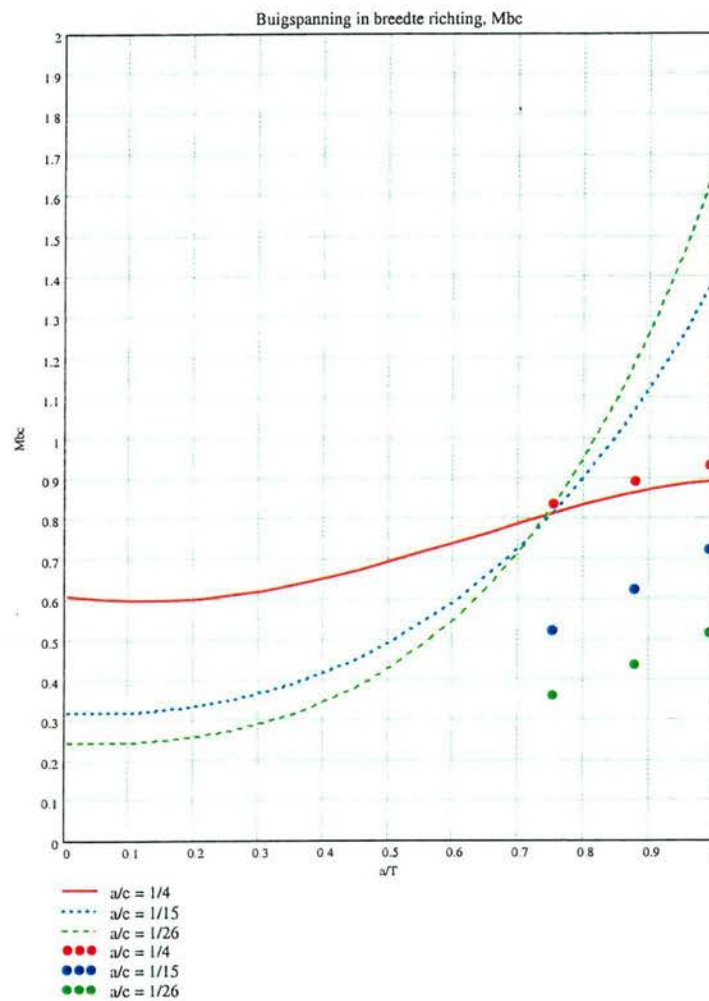
Figuur 4.2 Grafieken voor M_{ba}

De FEM resultaten voor M_{ba} voor de bredere scheuren vertonen een behoorlijke afwijking. Bij a/T van 0.75 zijn de FEM resultaten hoger en voor a/T van 0.99 juist weer lager dan die van NR.



Figuur 4.3 Grafieken voor M_{mc}

De FEM resultaten voor M_{mc} wijken zeer veel af van die van NR en behoeven dus een grote correctie. Uit het feit dat de NR resultaten voor de verschillende aspect ratio's elkaar kruisen bij groter scheurdieptes blijkt al dat NR hier niet meer goed is.



Figuur 4.4 Grafieken voor M_{bc}

De FEM resultaten voor M_{bc} wijken eveneens zeer veel af van die van NR en behoeven dus ook een grote correctie. Ook hier kruisen de NR resultaten voor de verschillende aspect ratio's elkaar kruisen bij groter scheurdieptes.

4.2 Correctie voor a/T richting

In eerste instantie is er een correctie aangebracht in alleen de a/T richting. Daarmee zijn de NR lijnen in bovenstaande grafieken zo goed mogelijk bij de FEM punten gebracht.

Deze correctie kan op verschillende manieren worden aangebracht. Veelal wordt een vermenigvuldigingsfactor toegepast. In eerste instantie is dit hier ook bekeken. Voor de M_{ba} factor, die door nul gaat, wordt dit echter problematisch. Daarom is gekozen voor een correctie door het optellen van een correctieterm.

Voor lage a/T waarden zijn de NR formules goed (geldigheidsgebied volgens Newman-Raju tot $a/T = 0.5$) en hoeft dus geen correctie te worden toegepast. Vrij arbitrair, op basis van een visuele inschatting van het gewenste verloop, is gekozen voor het laten

beginnen van de correctie bij a/T van 0.25. Hiervoor is gebruik gemaakt van een polynoom. Door alleen een kwadratische en derde macht te gebruiken ontstaat er geen discontinuïteit bij $a/T = 0.25$.

Hiermee krijgt de gecorrigeerde formule dus de volgende gedaante:

$$M\text{-Cor-}a/T = M_{NR} + \text{Cor}(a/T)$$

$$\begin{aligned} \text{met } \text{Cor}(a/T) &= 0 && \text{voor } a/T < 0.25 \\ &= r (a/T - 0.25)^2 + s (a/T - 0.25)^3 && \text{voor } a/T > 0.25 \end{aligned}$$

Door middel van curve fitting zijn de waarden voor r en s voor de verschillende waarden van c/a bepaald (zie Tabel 4.1).

Tabel 4.1 Waarden voor r en s

Aspect ratio c/a	Mma		Mba		Mmc		Mbc	
	r	s	r	s	r	s	r	s
4	-0.741	0.861	2.401	-4.388	0.325	0.087	0.134	-0.085
15	5.738	-9.870	5.431	-8.974	-1.587	0.249	-1.029	-0.196
26	6.480	-9.501	6.762	-10.172	-1.877	-1.302	-1.423	-0.809

Met behulp van deze waarden voor r en s wordt een goede benadering van de FEM resultaten verkregen (zie figuren in paragraaf 4.3).

4.3 Correctie voor c/a richting

Teneinde een algemene correctie op de NR formules te kunnen geven (voor alle waarden van a/T en c/a binnen het onderzochte gebied) moet er nog een correctie als functie van c/a worden gegenereerd. Dit kan door de waarden voor r en s in bovenstaande tabel afhankelijk te maken van c/a .

Door de drie waarden voor r en s bij c/a van 4, 15 en 26 dient dus een functie afhankelijk van c/a te worden gelegd. Gekozen is voor combinatie van een parabool met zijn extreem bij $c/a = 15$ en een rechte lijn. Hiermee kan een kromme precies door de drie verkregen punten worden gegenereerd. Dus de algemene uitdrukking voor r en s wordt:

$$r_s(c/a) = x + y(c/a - 15) + z(c/a - 15)^2$$

Voor $c/a = 15$ wordt $r_s(c/a)$ gelijk aan x . Dit betekent dus dat x gelijk is aan de waarde van r of s bij $c/a = 15$. De waarden van y en z dienen dan nog te worden bepaald. De door curve fitting bepaalde waarden zijn gegeven in Tabel 4.2.

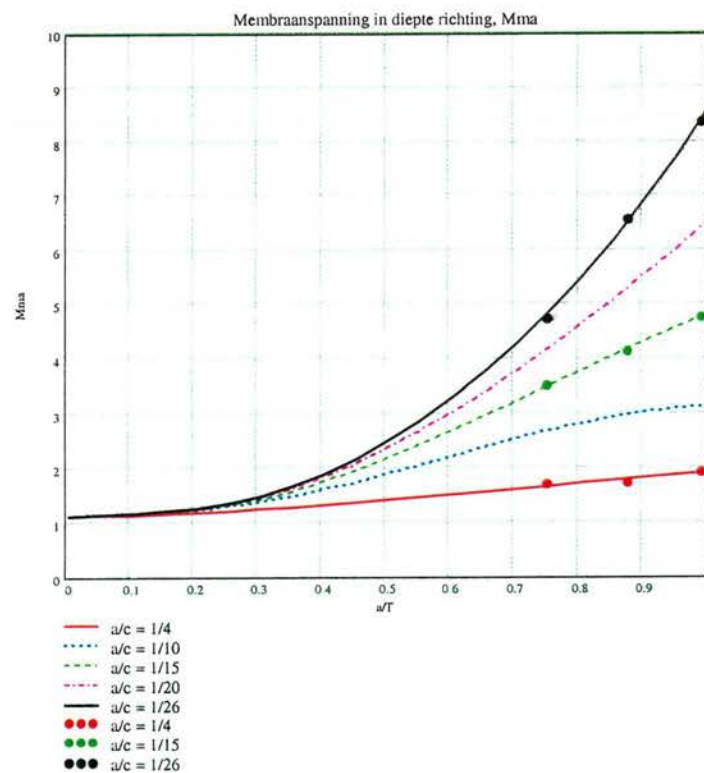
Tabel 4.2 Waarden voor x , y en z

	Mma		Mba		Mmc		Mbc	
	r	s	r	s	r	s	r	s
x	5.738	-9.870	5.431	-8.974	-1.587	0.249	-1.029	-0.196
y	0.3282	-0.4710	0.1982	-0.2629	-0.1001	-0.06314	-0.07077	-0.03291
z	-0.02371	0.04587	-0.007021	0.01400	0.006702	-0.007079	0.003178	-0.002074

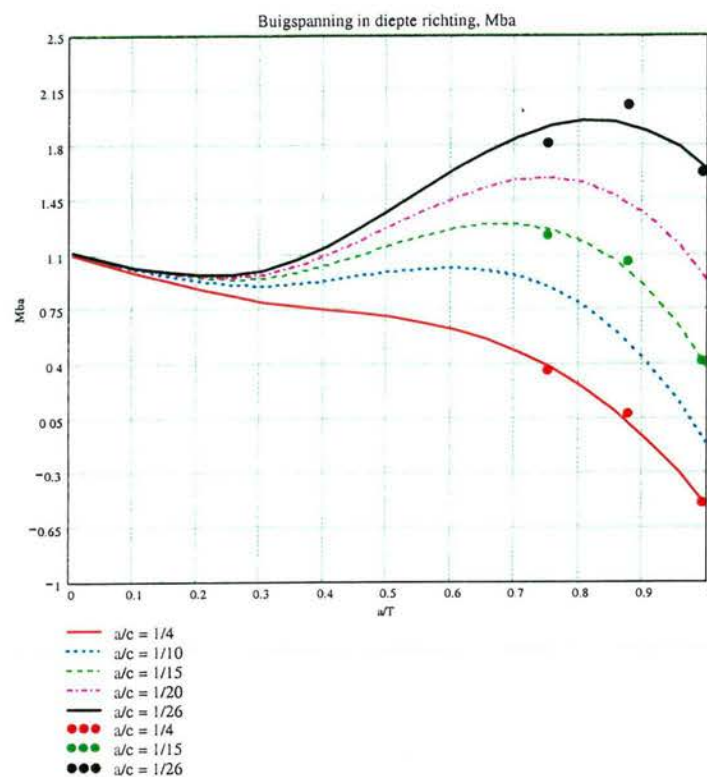
De met deze coëfficiënten verkregen lijnen en de FEM punten zijn in Figuur 4.5 t/m Figuur 4.8 weergegeven. De lijnen voor c/a van 10 en 20 lijnen ook gegeven. Hiermee kan de consistentie voor tussengelegen waarden worden beoordeeld. Opgemerkt moet worden dat voor c/a van 4, 15 en 26 de lijnen overeenkomen met die volgens de correctie van het vorige hoofdstuk, want de kromme door r en s gaat precies door de eerder berekende punten.

De gecorrigeerde lijnen lopen over het algemeen goed door de FEM punten. De grootste afwijkingen zijn te vinden bij M_{ba} . Verder lijkt het er op dat de lijnen voor M_{mc} en M_{bc} in het gebied van $a/T = 0.25$ tot 0.6 voor de brede scheur ($c/a = 26$) iets te veel omhoog loopt.

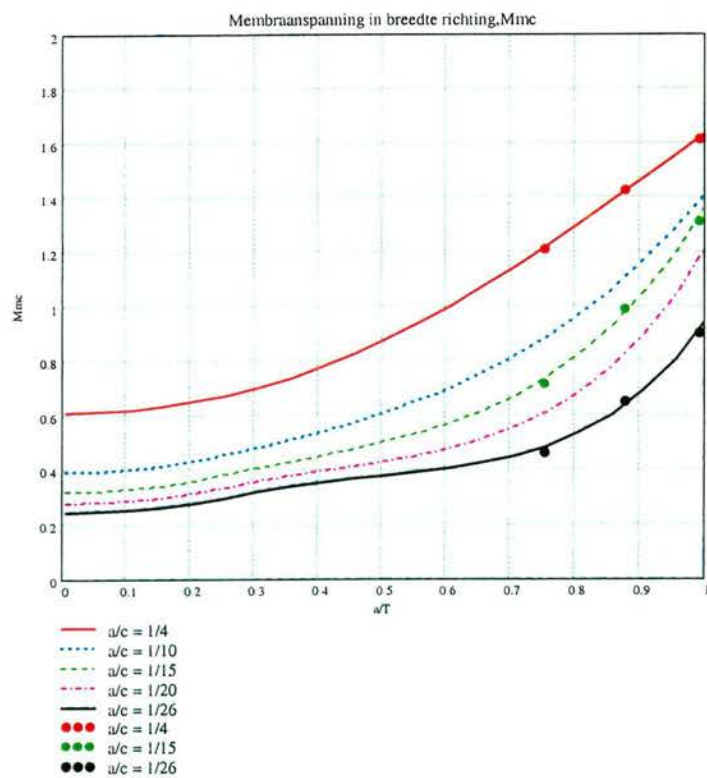
De lijnen voor c/a van 10 en 20 passen goed in het overall beeld.



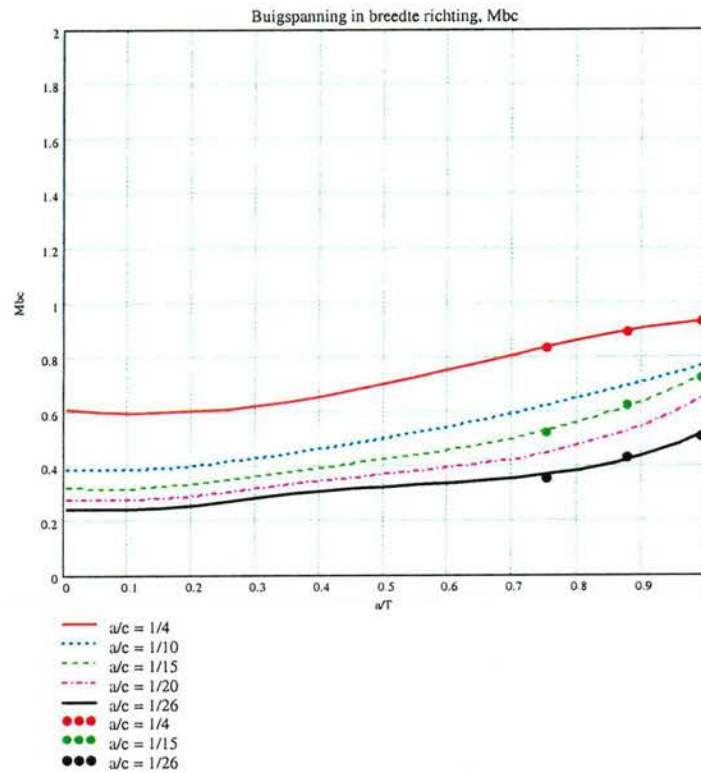
Figuur 4.5 Grafieken voor M_{ma} , aangepaste formules



Figuur 4.6 Grafieken voor Mba, aangepaste formules



Figuur 4.7 Grafieken voor Mmc, aangepaste formules



Figuur 4.8 Grafieken voor Mbc, aangepaste formules

4.4 Resulterende uitdrukking voor de M factoren

De resulterende uitdrukking voor de SIF wordt

$$M\text{-Cor} = M_{NR} + \text{Cor}(a/T, c/a)$$

$$\begin{aligned} \text{met } \text{Cor}(a/T, c/a) &= 0 && \text{voor } a/T < 0.25 \\ &= r_{c/a} (a/T - 0.25)^2 + s_{c/a} (a/T - 0.25)^3 && \text{voor } a/T > 0.25 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{met } r_{c/a} (c/a) &= x_r + y_r (c/a - 15) + z_r (c/a - 15)^2 \\ s_{c/a} (c/a) &= x_s + y_s (c/a - 15) + z_s (c/a - 15)^2 \end{aligned}$$

Waarbij de waarden voor x, y en z afhankelijk zijn van de belastingswijze en de scheurgroeirichting en volgen uit Tabel 4.2.

De bovenstaande formules zijn gebaseerd op negen FEM analyses van een plaat met $T = 12$ mm, $L = 300$ mm en $B = 4000$ mm en de volgende begrenzingen voor de scheur:

$$\begin{aligned} 0.75 &\leq a/T \leq 0.99 \\ 4 &\leq c/a \leq 26 \end{aligned}$$

Verder is voor lage a/T waarden aangesloten op de formules van Newman en Raju.

Verwacht mag worden dat de formules het gehele a/T traject van 0 tot 1 goed weergeven. Voor de c/a verhouding wordt echter aanbevolen om voor diepe scheuren niet buiten het gebied tussen 4 en 26 te gaan.

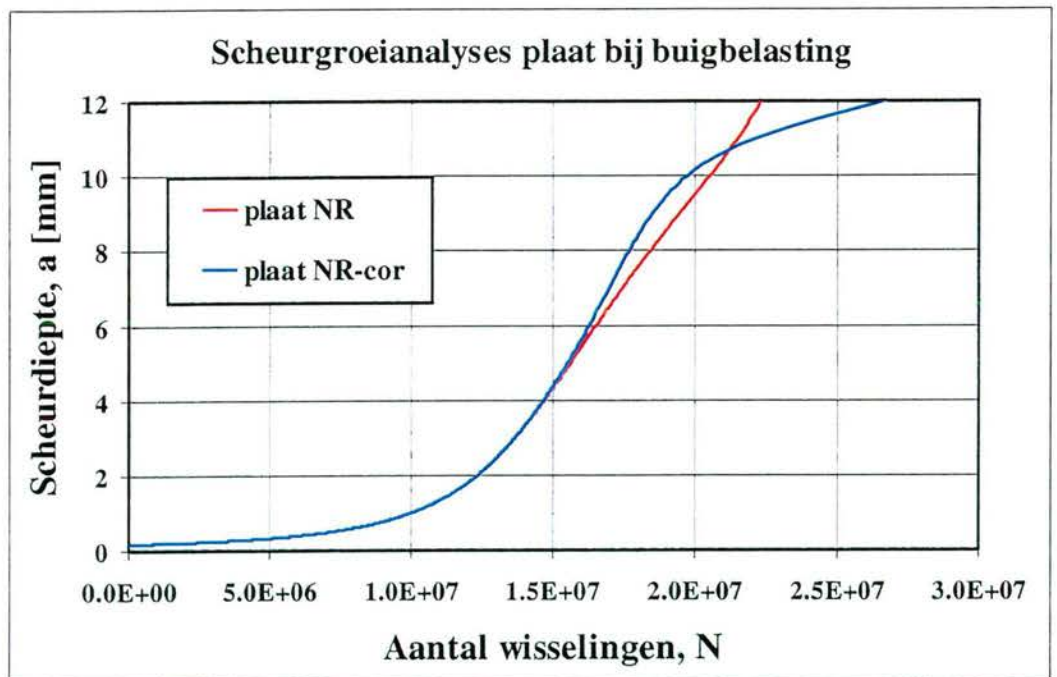
4.5 Scheurgroeianalyses

Met de gecorrigeerde M factoren is een scheurgroeianalyses uitgevoerd met dezelfde invoerparameters als in bijlage B van het fase 1 rapport.

Naast de destijds gemaakte analyse voor de buigbelasting ($\Delta\sigma_b = 100$ MPa) is ook een analyse gemaakt voor een membraanbelasting ($\Delta\sigma_m = 100$ MPa).

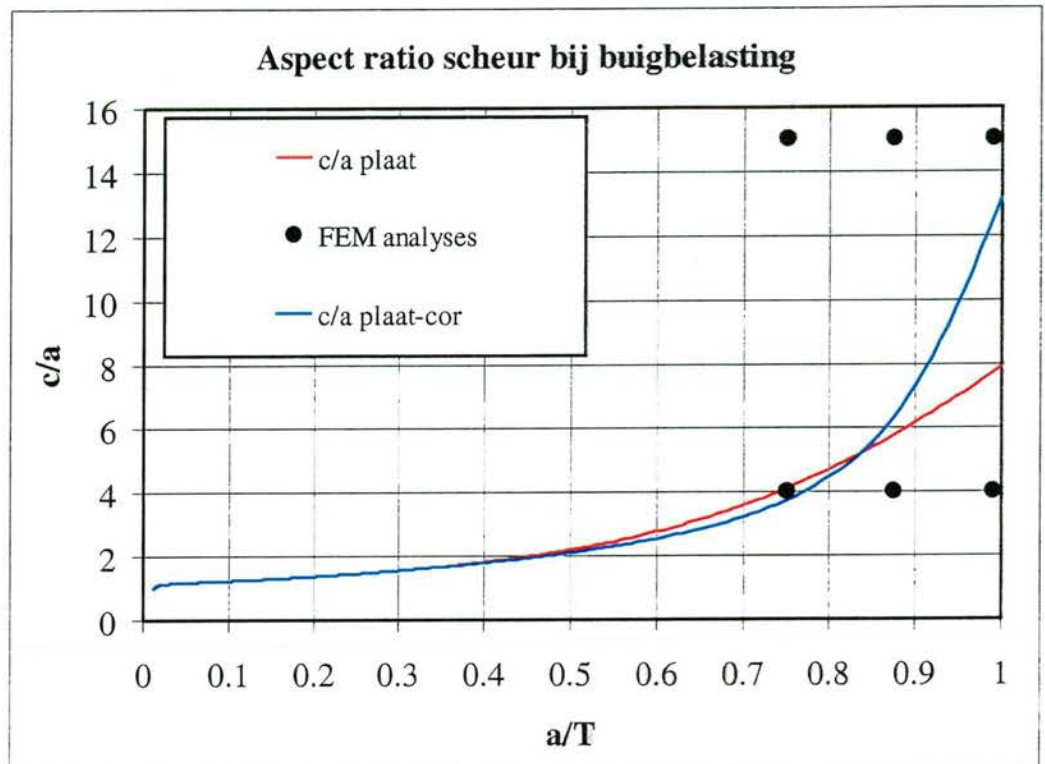
Voor de **buigbelasting** bleek de levensduur met de gecorrigeerde formules ca 20 % langer te zijn dan met de niet gecorrigeerde formules (27 miljoen wisselingen i.p.v. 22 miljoen).

Het verloop van de scheurdiepte tijdens de levensduur is voor beide analyses weergegeven in Figuur 4.9. Tot ca de halve plaatdikte is er nauwelijks verschil. Daarna versneld de gecorrigeerde analyse enigszins, om op het eind sterk te vertragen. Met behulp van de verschillen in de M waarden is dit resultaat goed te verklaren, want de gecorrigeerde M_{ba} is voor een c/a van ca 4 eerst (voor $a/T = 0.75$) een beetje hoger, maar daarna veel lager dan de niet gecorrigeerde M_{ba} .



Figuur 4.9 a-N relatie voor plaat bij buigbelasting

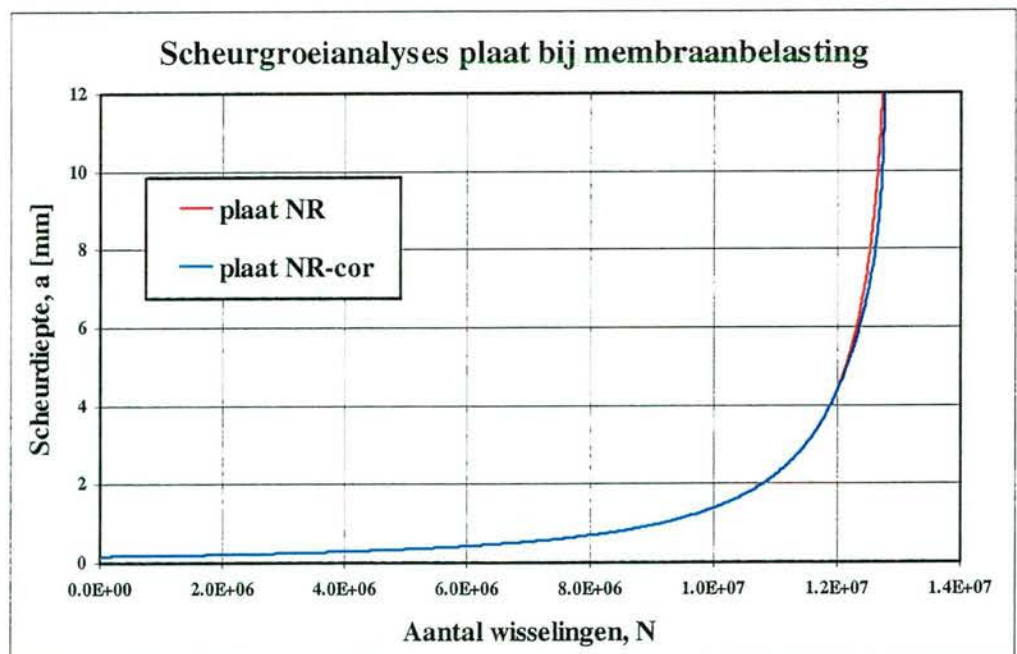
De aspect ratio van de gecorrigeerde analyse is geplot in een vergelijkbare figuur als bij de analyses van [1] (zie Figuur 4.10). Op het eind wordt de scheur in de gecorrigeerde analyse breder dan in de niet gecorrigeerde analyse.



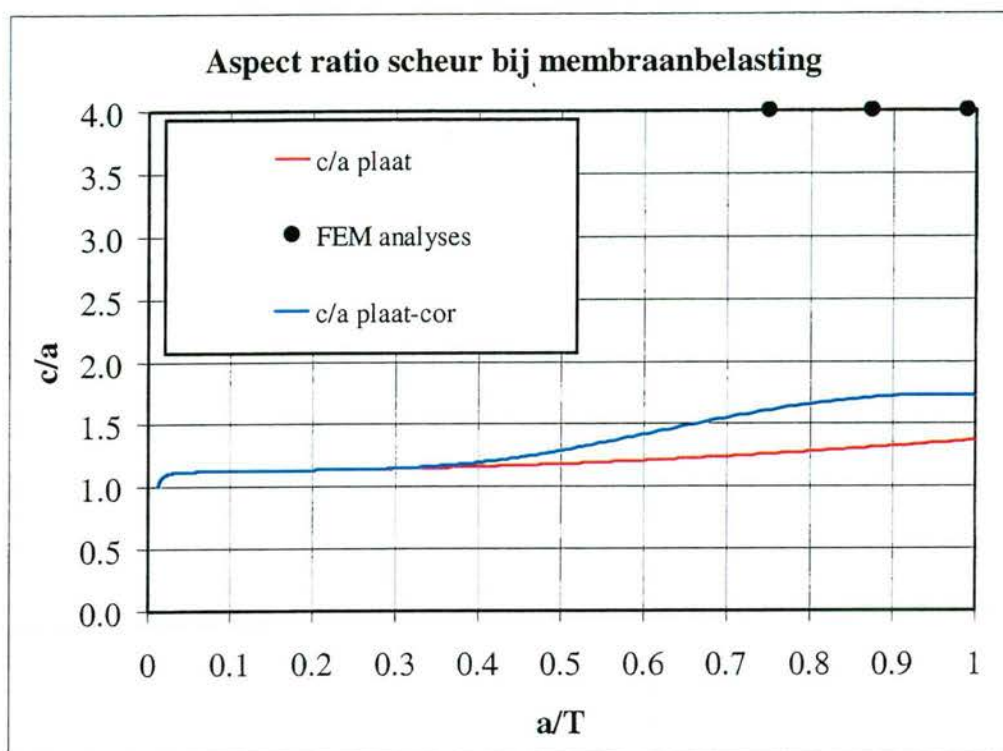
Figuur 4.10 Aspect ratio bij buigbelasting

De resultaten voor de **membraanbelasting** zijn weergegeven in Figuur 4.11 en Figuur 4.12.

De levensduur is met de gecorrigeerde SIFs nauwelijks langer dan met de niet gecorrigeerde SIFs. De aspect ratio wijkt iets af voor diepere scheuren.



Figuur 4.11 a-N relatie voor plaat bij membraanbelasting



Figuur 4.12 Aspect ratio bij membraanbelasting

De belangrijkste resultaten van beide analyses op het moment van doorscheuren ($a = 12$ mm) zijn in Tabel 4.3 samengevat. Hieruit blijkt dat voor membraanbelasting de levensduur korter is en dat de scheurbreedte veel kleiner is ten opzichte van de buigbelasting. Deze resultaten zijn verklaarbaar door de andere spanningssituatie bij membraan ten opzichte van buiging. Voor combinaties van buiging- en membraanbelasting zal de aspect ratio (c/a) tussen de waarden voor buiging en membraan in liggen.

Tabel 4.3 Resultaten op moment van doorscheuren (zonder en met RWS correctie)

Belastings-soort	Newman-Raju factoren			Newman-Raju factoren met RWS correctie		
	N-totaal	c [mm]	c/a	N-totaal	c [mm]	c/a
buiging	$22.27 \cdot 10^6$	94.5	7.87	$26.67 \cdot 10^6$	157.8	13.15
membraan	$12.72 \cdot 10^6$	16.4	1.37	$12.76 \cdot 10^6$	20.8	1.73

De c/a waarden bij de membraanbelasting liggen dan ook allemaal onder de laagste waarde die bij de FEM analyses zijn gebruikt ($c/a = 4$) en dus eigenlijk buiten het toepassingsgebied van de formules.

Opgemerkt moet worden dat er tot nu toe van uit is gegaan dat de buigbelasting de dominante belasting is in een brugdek en daarom zijn scheurgroeianalyses voor membraanbelasting tot nu toe ook niet gemaakt.

Verder moet worden opgemerkt dat de resultaten voor buiging binnen het tot nu toe onderzochte gebied liggen en deze resultaten dus betrouwbaar zijn. Voor de resultaten voor membraanbelasting geldt dit echter niet en mogen kunnen afwijkingen worden verwacht.

4.6 Slotopmerkingen

De bestaande formules voor SIFs van half ellipsvormige scheuren in een plaat van Newman en Raju zijn niet geldig voor brede diepe scheuren. Daarom is een negental FEM analyses uitgevoerd voor deze situaties.

Met behulp van de resultaten van deze FEM analyses zijn analytische correctiefactoren op de formules van Newman en Raju ontwikkeld.

Met deze gecorrigeerde formules zijn nauwkeurige SIFs te bepalen voor alle scheurdiepten en voor c/a waarden tussen 4 en 26.

Uit een levensduuranalyse van een plaat belast op buiging blijkt dat met de nieuwe formules een ca 20% langere levensduur wordt verkregen. De langere levensduur ontstaat vooral door een tragere scheurgroei voor diepe scheuren.

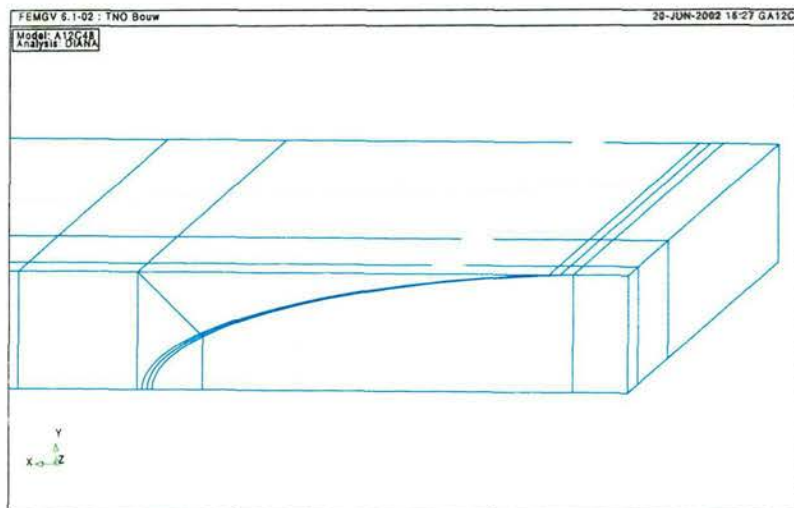
Een plaat belast op membraanspanning geeft slechts een zeer geringe toename van het aantal wisselingen.

Deze resultaten van deze analyses, met name die voor buiging, ondersteunen de aan het begin van dit project geuite veronderstelling dat het tot nu toe gebruikte model conservatief is voor diepe scheuren in een brede plaat.

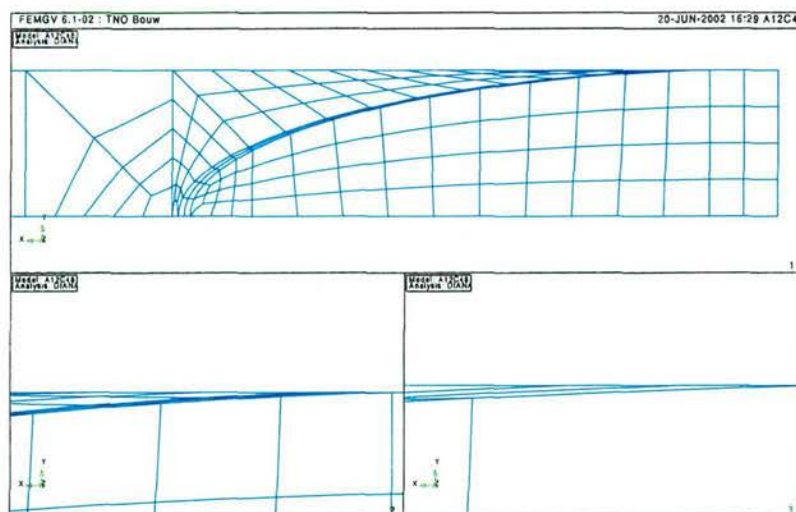
5 FEM modellen en SIF van door-de-wand scheuren

5.1 Modellerings scheuren

In het rapport 2002-BC-R0009 [1], waarin de resultaten van fase 1, de algemene voorstudie, zijn vermeld, zijn de geometrische opbouw en de elementenverdeling voor de modellen van fase 2 gegeven. Deze geometrie is aangepast met een extra diagonaallijn aan de hand van de resultaten van brede scheuren (zie hoofdstuk 3). In Figuur 5.1 is de voorgestelde geometrische opbouw te zien. Figuur 5.2 geeft de elementenverdeling voor dit model.



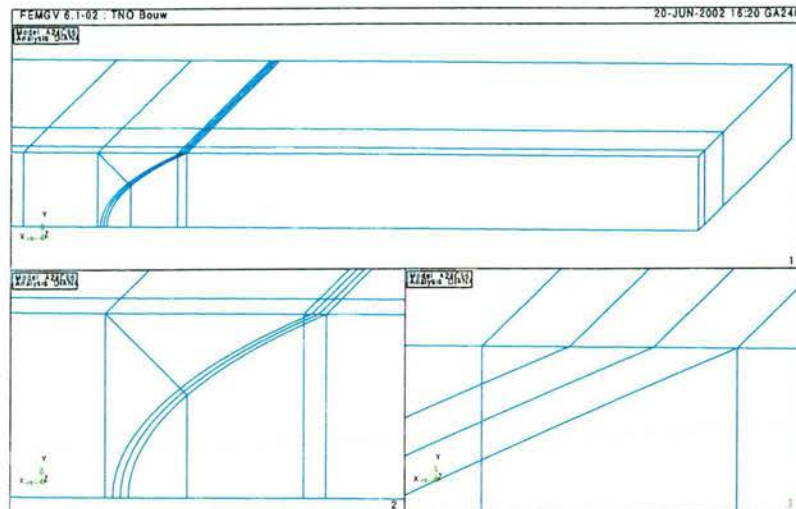
Figuur 5.1 Geometrische opbouw model 1 voor door-de-wand scheuren, $a=12.12$, $c=48.48$



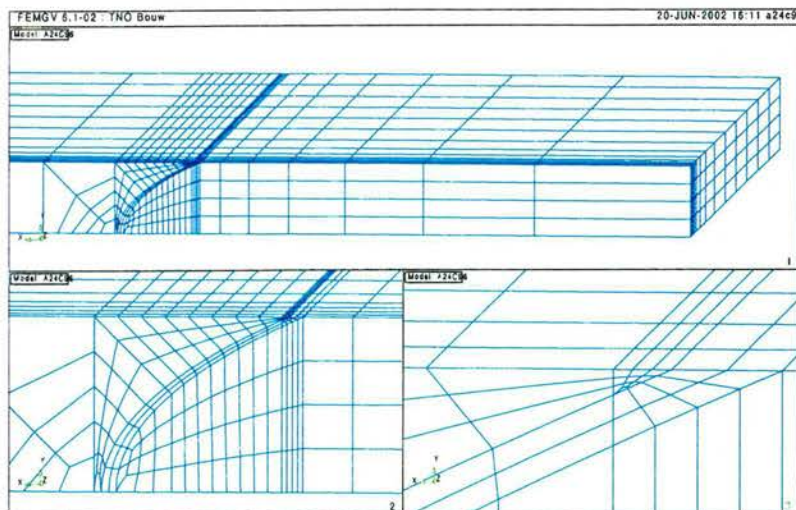
Figuur 5.2 Elementenverdeling model 1 voor door-de-wand scheuren, $a=12.12$, $c=48.48$

Voor scheuren die juist door de wand gaan komt het scheurfront onder een scherpe hoek aan bij de vrije rand. In Figuur 5.2 is te zien dat de elementen langs de rand

hierdoor zeer scherpe hoeken hebben. Het is goed mogelijk dat hierdoor een grote afwijking gevonden wordt tussen de berekende SIFs met het eindige elementenmodel en de werkelijke SIFs. Om deze reden is de geometrie iets aangepast. De nieuwe geometrische opbouw van dit tweede model is gegeven in Figuur 5.3. De elementenverdeling is gegeven in Figuur 5.4.

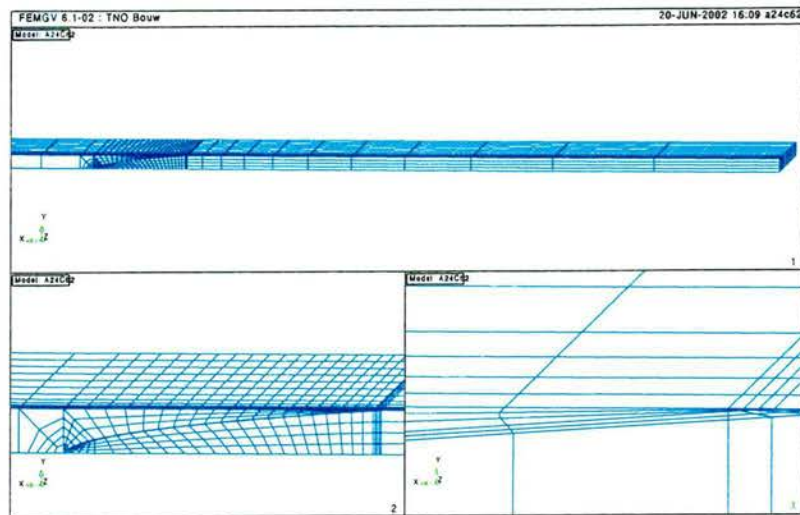


Figuur 5.3 Geometrische opbouw model 1 voor door-de-wand scheuren, $a=24$, $c=96$



Figuur 5.4 Elementenverdeling model 1 voor door-de-wand scheuren, $a=24$, $c=624$

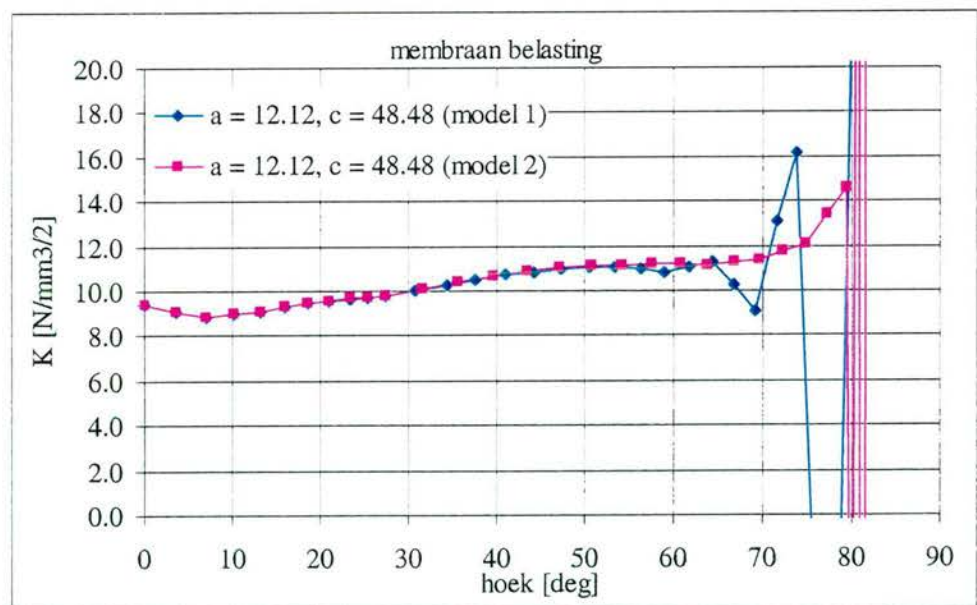
De hoeken in de elementen nabij de rand van de scheur zijn nog steeds erg scherp. Dit geldt vooral voor door-de-wand scheuren met een grote c over a verhouding, zie Figuur 5.5. Dit is echter niet te voorkomen, aangezien de hoek tussen de scheur en de rand van de plaat erg klein wordt bij brede scheuren. Door de aanpassing in het model is ervoor gezorgd dat het aantal elementen met een scherpe hoek zo beperkt mogelijk is gebleven.



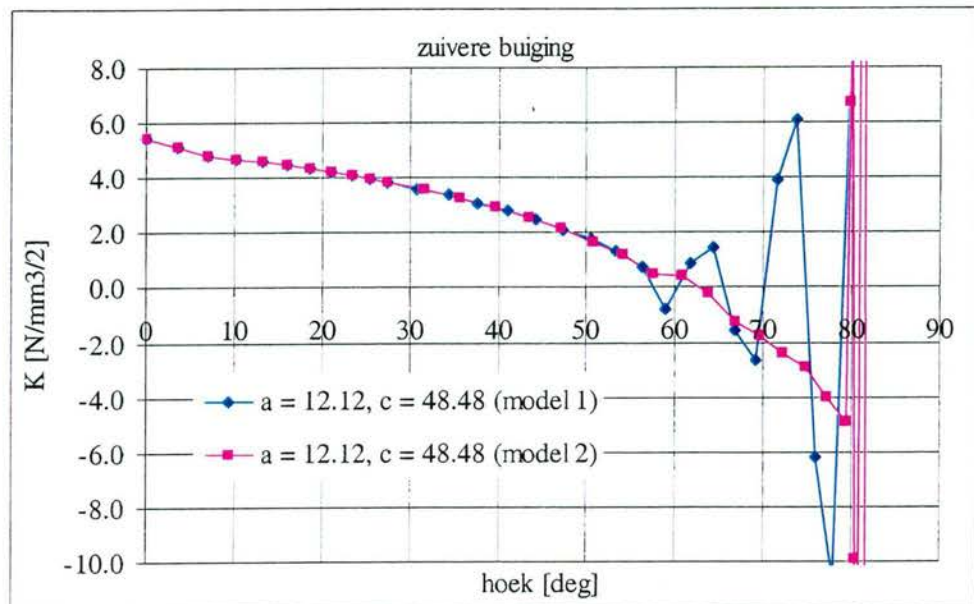
Figuur 5.5 Elementenverdeling model 1 voor door-de-wand scheuren, $a=24$, $c=360$

Zoveel mogelijk elementen hebben in het tweede model een vrij optimale vorm voor zowel normale als zeer brede scheuren.

De SIFs zijn uitgerekend voor scheuren met afmeting $a/T = 1.01$ en $c/a = 4$ voor zowel model 1 als model 2 voor membraanbelasting en buiging. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 5.6 voor membraanbelasting en in Figuur 5.7 voor buiging.



Figuur 5.6 Vergelijking SIFs van model 1 en 2, membraanbelasting



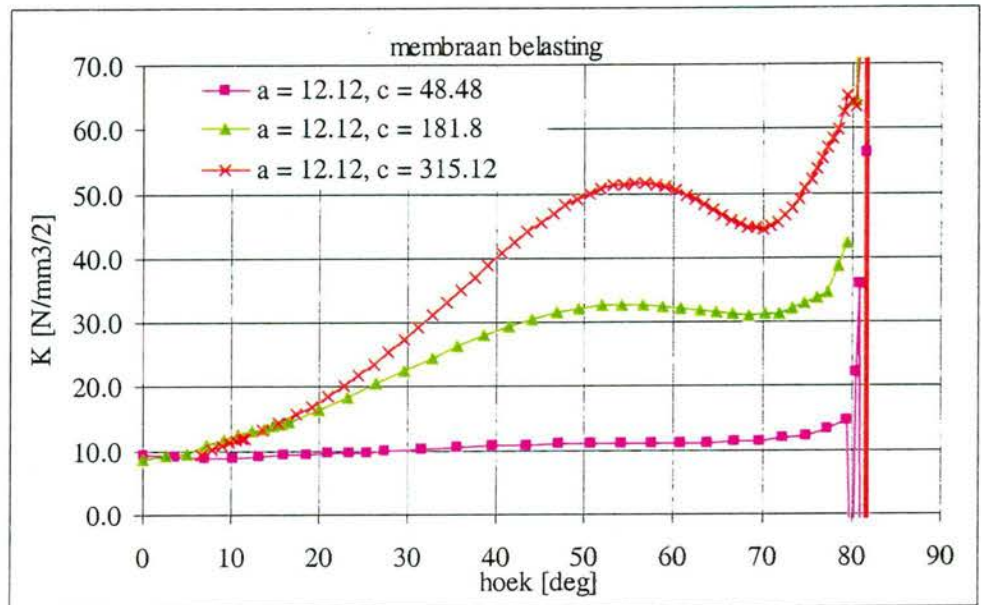
Figuur 5.7 Vergelijking SIFs van model 1 en 2, buiging

In de figuren is te zien dat de SIF bepaald met het optimalere model (model 2) minder slingert dan in geval van het eerste model. Enkel zeer dicht bij de vrije rand zijn de waarden bepaald met model 2 onbetrouwbaar. Dit komt waarschijnlijk deels door het randeffect en deels door de minder optimale vorm van de laatste elementen nabij de rand.

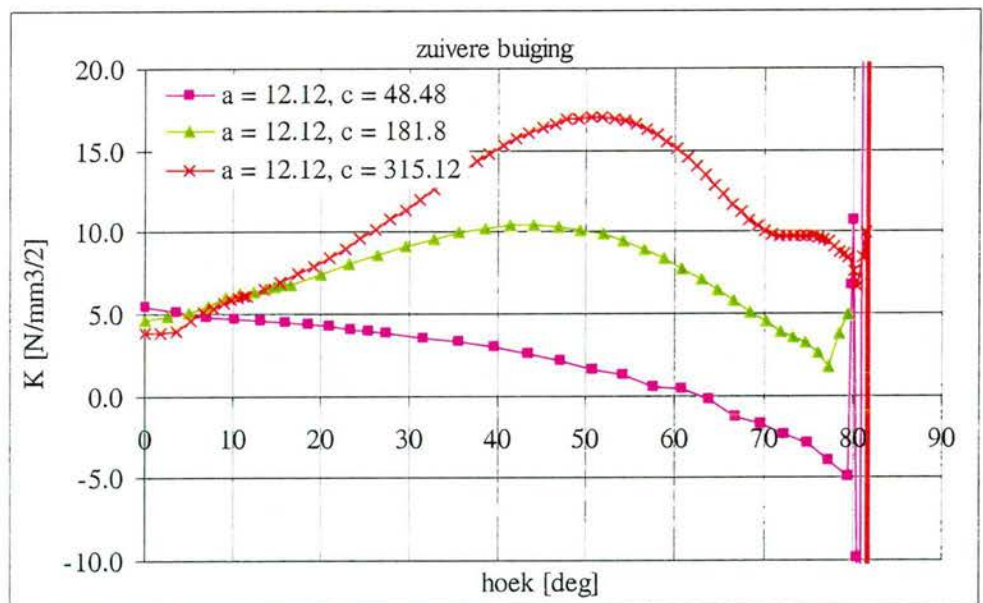
In het vervolgtraject zijn de SIFs bepaald met model 2.

5.2 SIFs langs het scheurfront voor door-de-wand scheuren

In Figuur 5.8 en Figuur 5.9 zijn de SIFs langs het scheurfront gegeven voor membraanbelasting en buiging voor scheuren met een fictieve diepte $a = 12.12$ mm en $a/c = 4, 15$ en 26 .

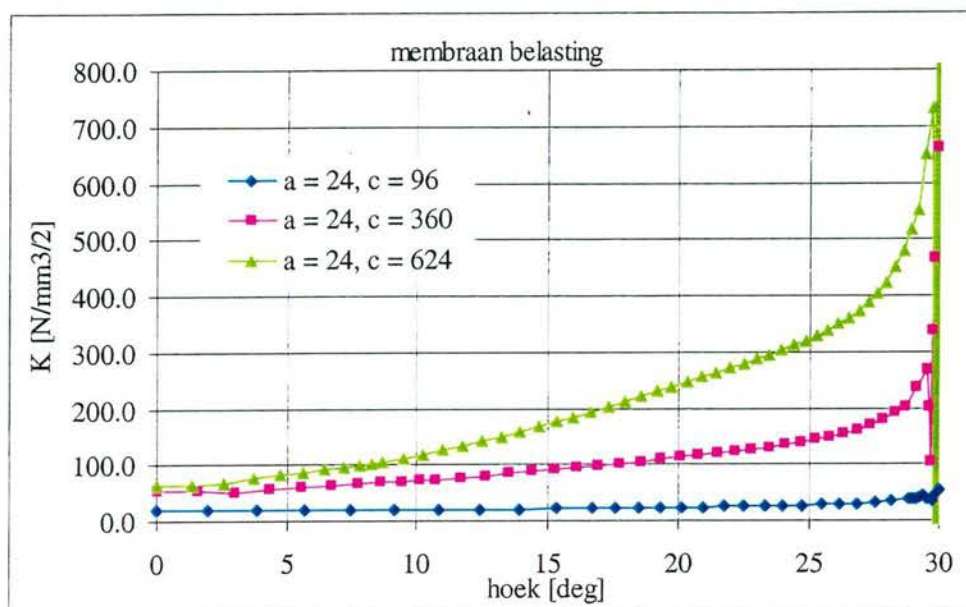


Figuur 5.8 SIF langs het scheurfront voor membraanbelasting, $a = 12.12$

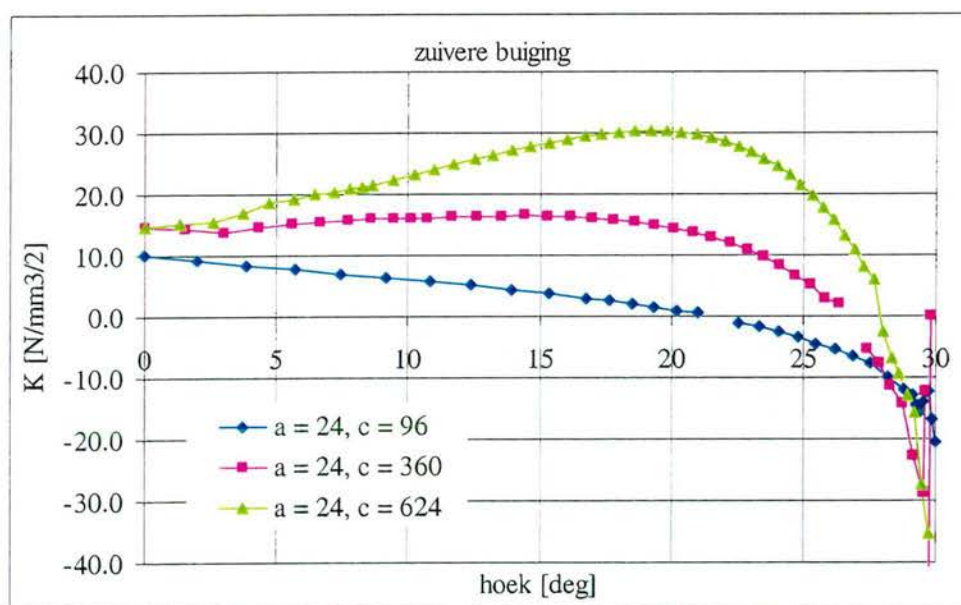


Figuur 5.9 SIF langs het scheurfront voor buiging, $a = 12.12$

In Figuur 5.10 en Figuur 5.11 zijn de SIFs langs het scheurfront gegeven voor membraanbelasting en buiging voor scheuren met een fictieve diepte $a = 24 \text{ mm}$ en $a/c = 4, 15$ en 26 .

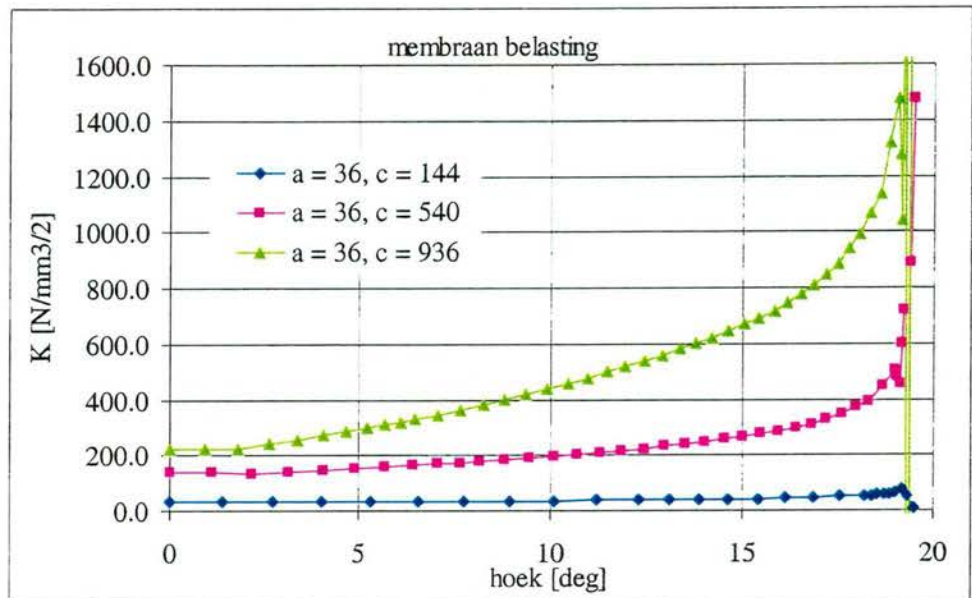


Figuur 5.10 SIF langs het scheurfront voor membraanbelasting, $a = 24$

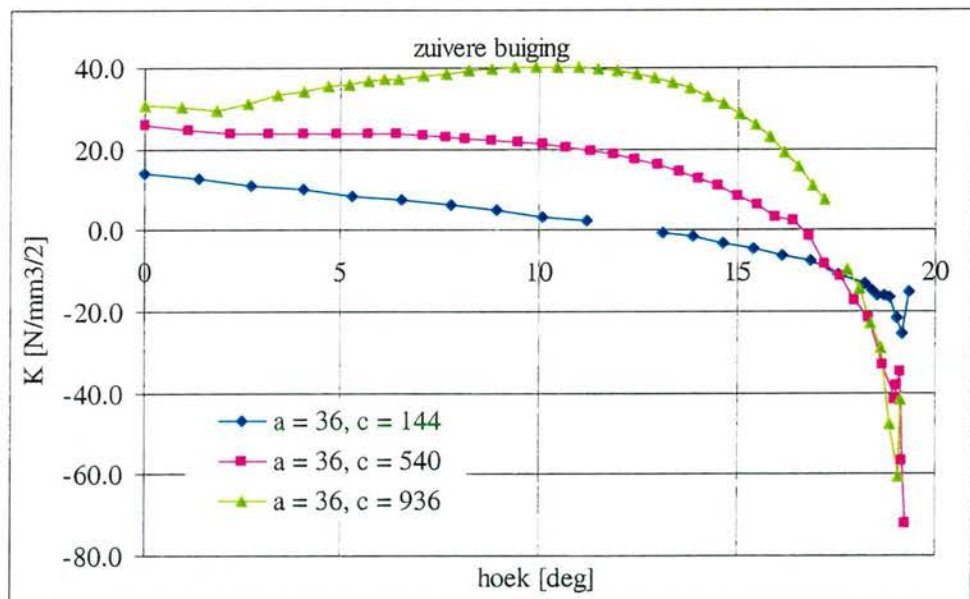


Figuur 5.11 SIF langs het scheurfront voor buiging, $a = 24$

In Figuur 5.12 en Figuur 5.13 zijn de SIFs langs het scheurfront gegeven voor membraanbelasting en buiging voor scheuren met een fictieve diepte $a = 36$ mm en $a/c = 4, 15$ en 26 .

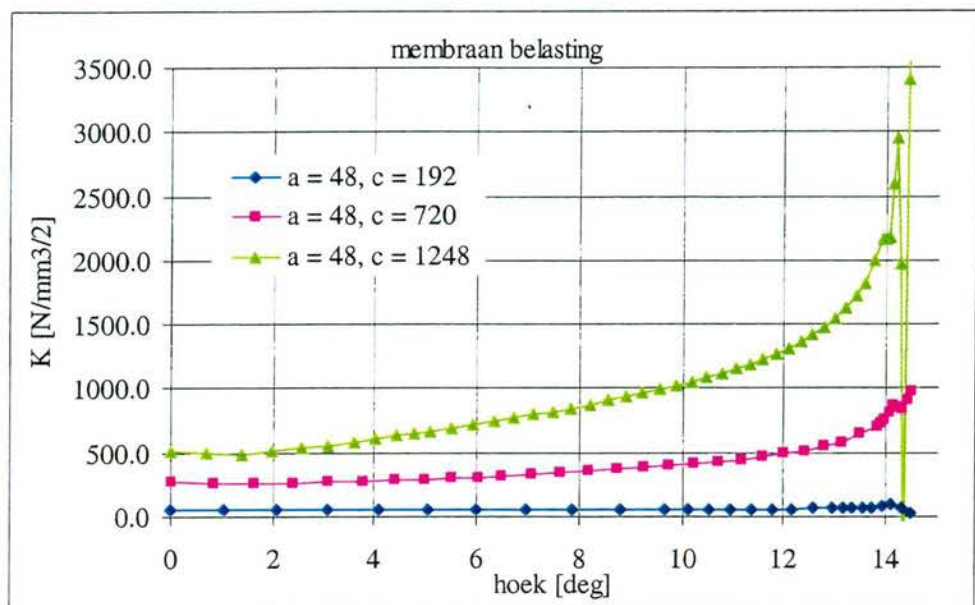


Figuur 5.12 SIF langs het scheurfront voor membraanbelasting, $a = 36$

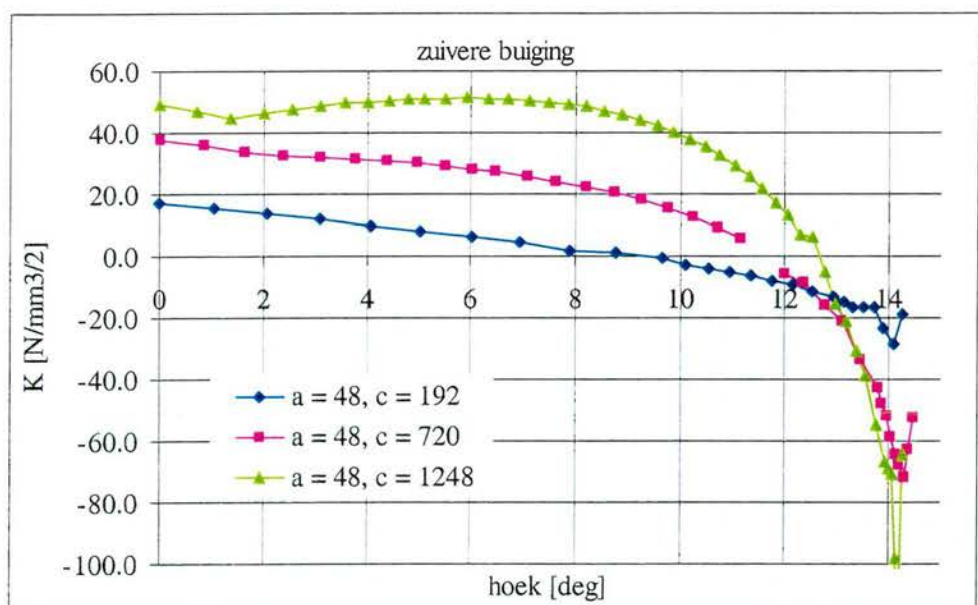


Figuur 5.13 SIF langs het scheurfront voor buiging, $a = 36$

In Figuur 5.14 en Figuur 5.15 zijn de SIFs langs het scheurfront gegeven voor membraanbelasting en buiging voor scheuren met een fictieve diepte $a = 48$ mm en $a/c = 4, 15$ en 26 .

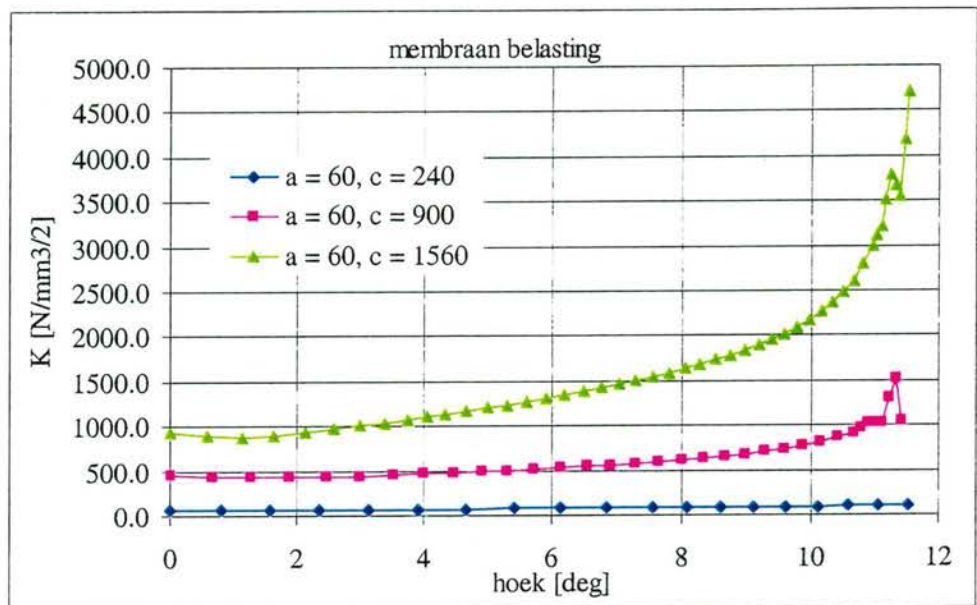


Figuur 5.14 SIF langs het scheurfront voor membraanbelasting, $a = 48$

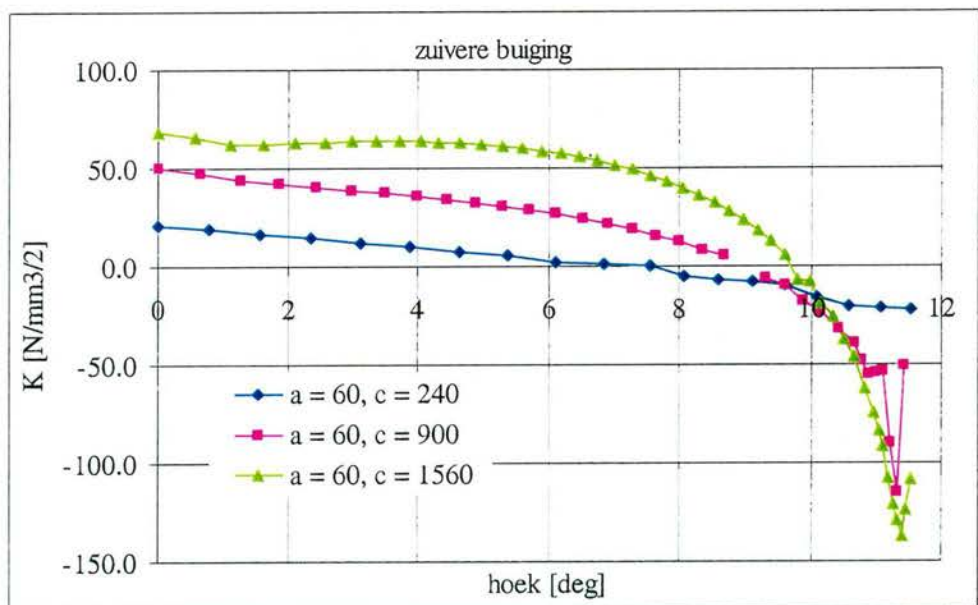


Figuur 5.15 SIF langs het scheurfront voor buiging, $a = 48$

In Figuur 5.16 en Figuur 5.17 zijn de SIFs langs het scheurfront gegeven voor membraanbelasting en buiging voor scheuren met een fictieve diepte $a = 60$ mm en $a/c = 4, 15$ en 26 .

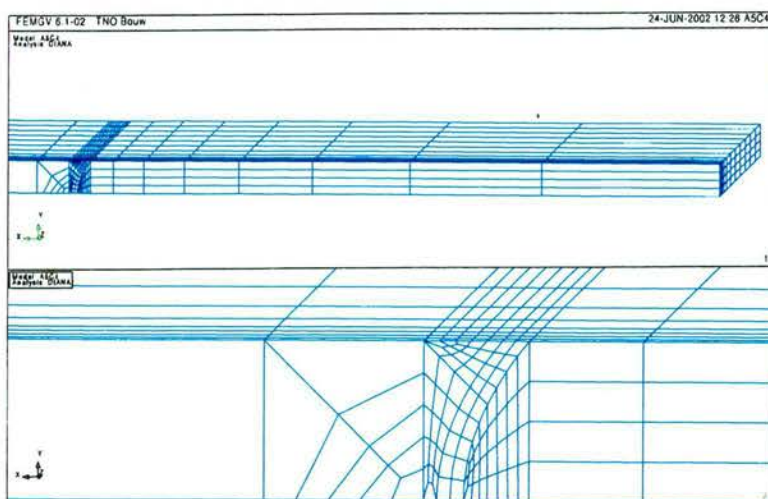


Figuur 5.16 SIF langs het scheurfront voor membraanbelasting, a = 60

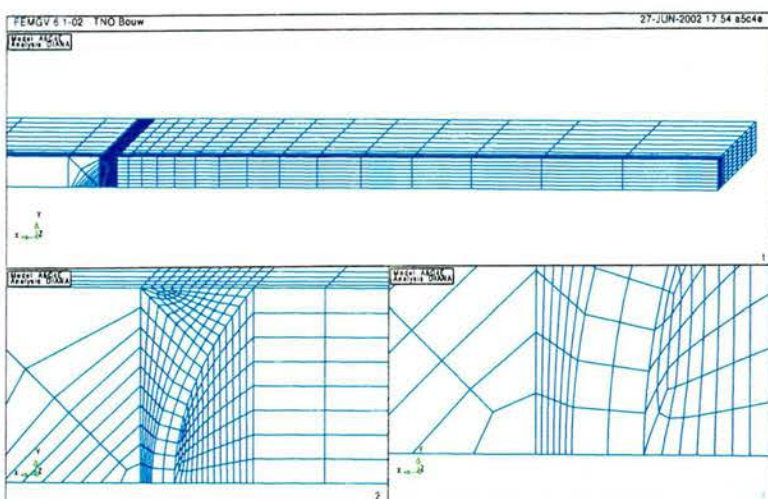


Figuur 5.17 SIF langs het scheurfront voor buiging, a = 60

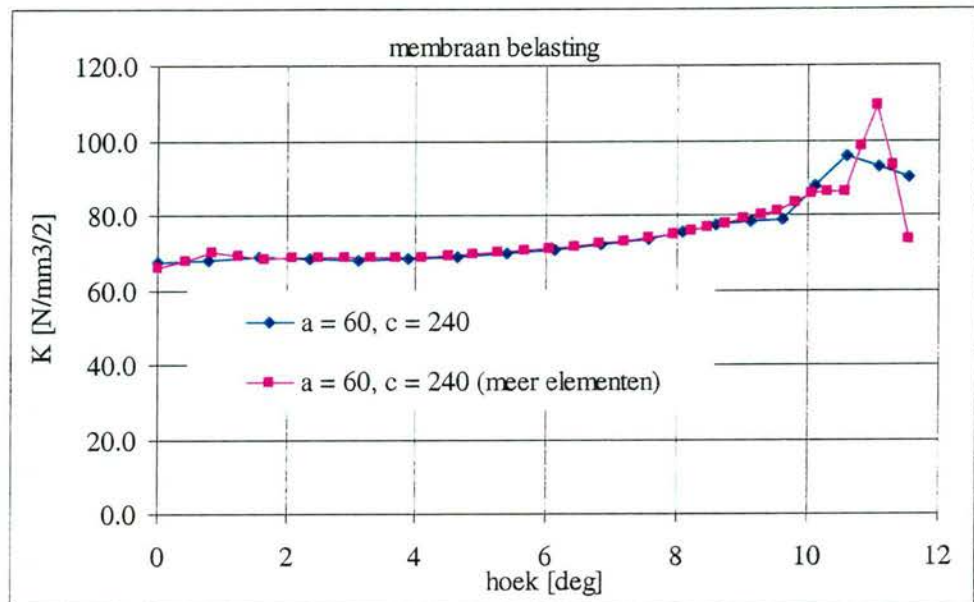
De SIF voor een scheurdiepte a van 60 mm geeft een niet vloeiend verloop te zien. Om deze reden is een model gemaakt met meer elementen. Figuur 5.18 en Figuur 5.19 geven de elementenverdeling van deze modellen. De resulterende SIFs zijn gegeven in Figuur 5.20 voor membraanspanning en Figuur 5.21 voor buiging. Uit de figuren blijkt dat het verloop van de SIF weliswaar niet vloeiend is, maar dat de gemiddelde waarden toch goed overeenkomen voor beide modellen.



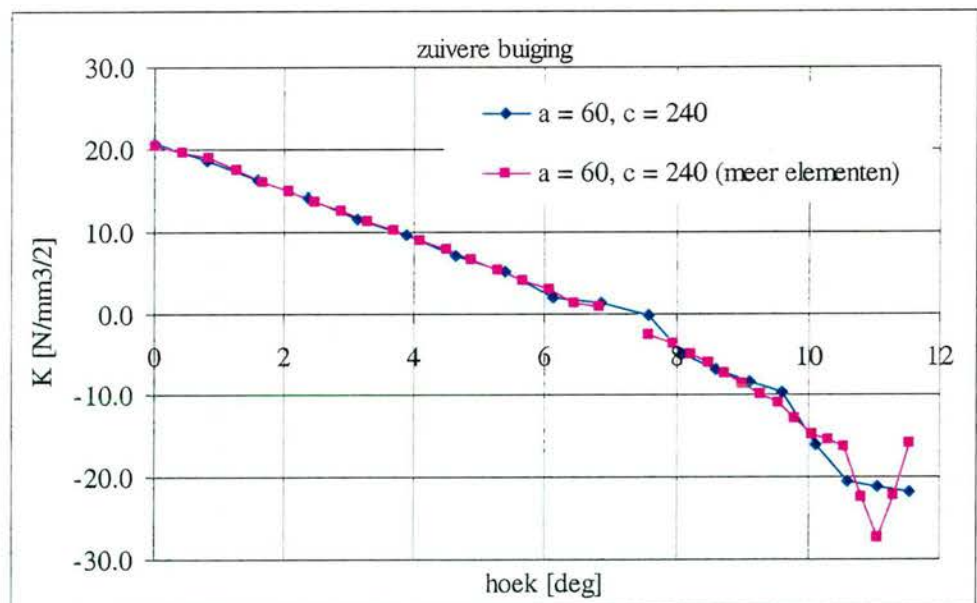
Figuur 5.18 Elementenverdeling voor $a = 60$ en $c = 240$, weinig elementen



Figuur 5.19 Elementenverdeling voor $a = 60$ en $c = 240$, fijn elementennet



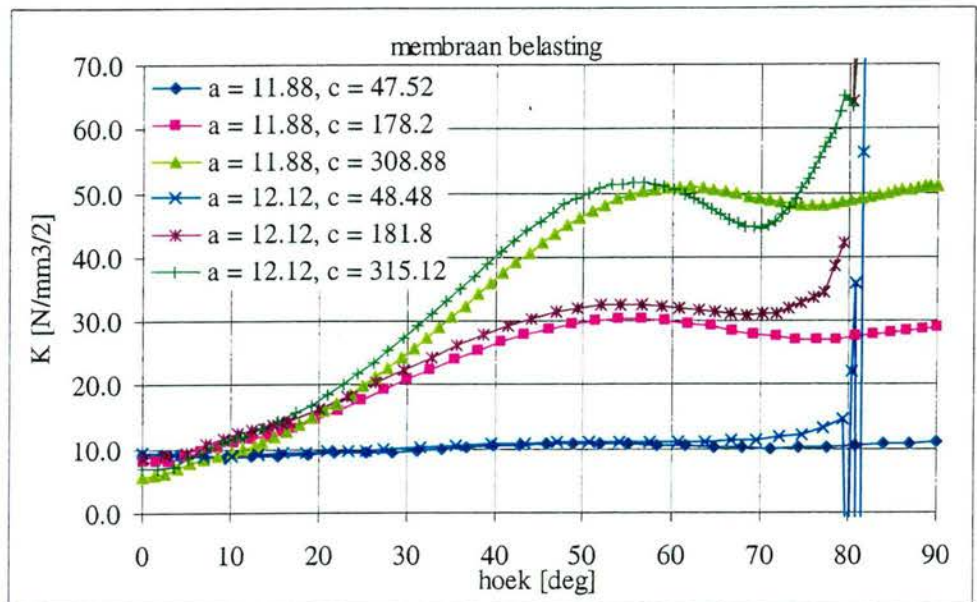
Figuur 5.20 SIF langs het scheurfront voor membraanspanning van 2 modellen van $a = 60$ en $c = 240$



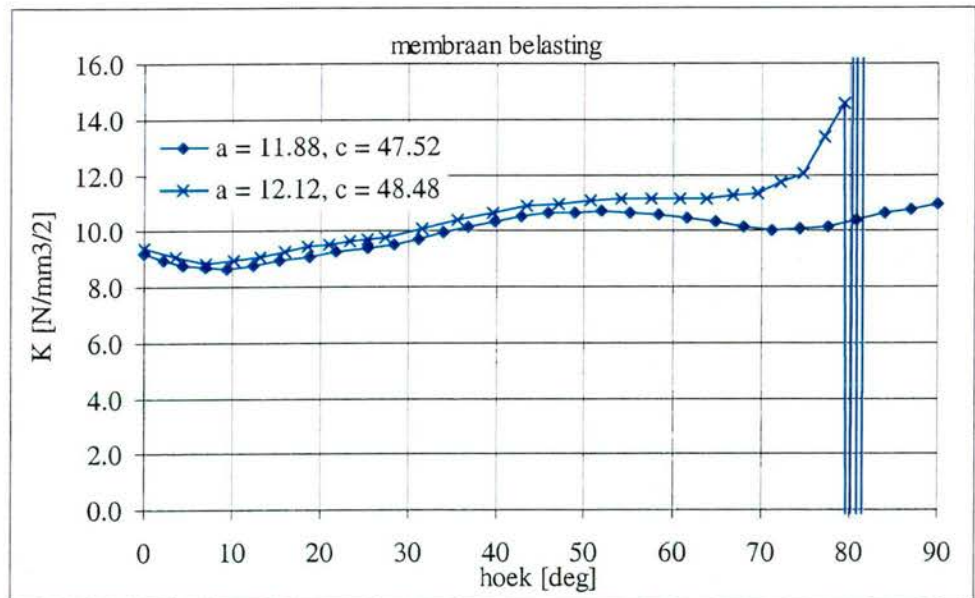
Figuur 5.21 SIF langs het scheurfront voor buiging van 2 modellen van $a = 60$ en $c = 240$

5.3 SIFs van de gemodelleerde scheuren: net wel of net niet door de wand

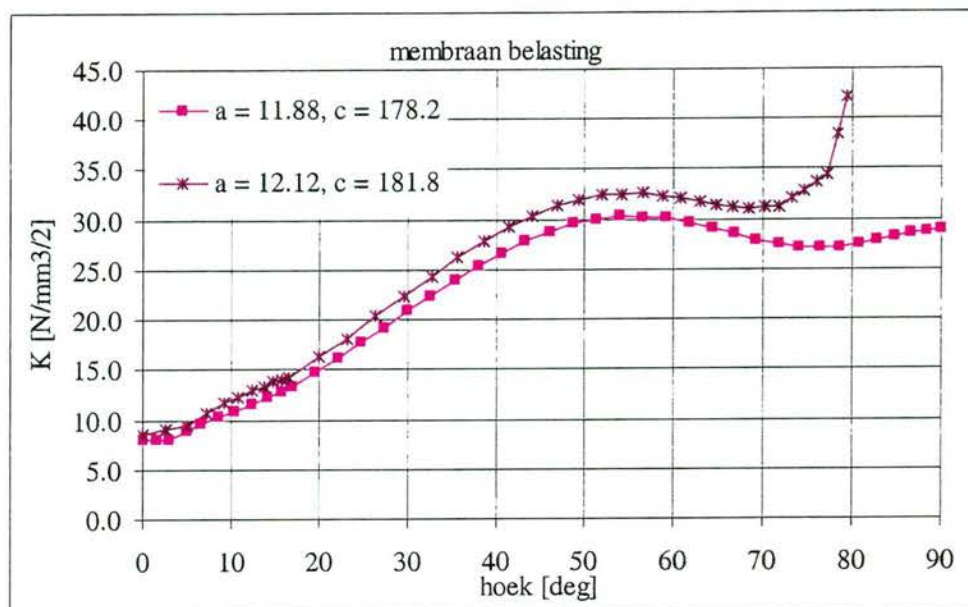
Er is een vergelijking gemaakt van de SIFs voor scheuren die net niet door de rand zijn ($a = 0.99 \times T$) met scheuren die net wel door de wand zijn ($a = 1.01 \times T$). Figuur 5.22 t/m Figuur 5.25 geven de resultaten voor membraanspanning. Figuur 5.26 t/m Figuur 5.29 geven de resultaten voor buiging. Voor $\phi = 0$ (langs de c -as) geldt dat de SIF nagenoeg onveranderd is in de situatie na doorscheuren ten opzichte van net niet doorscheurd.



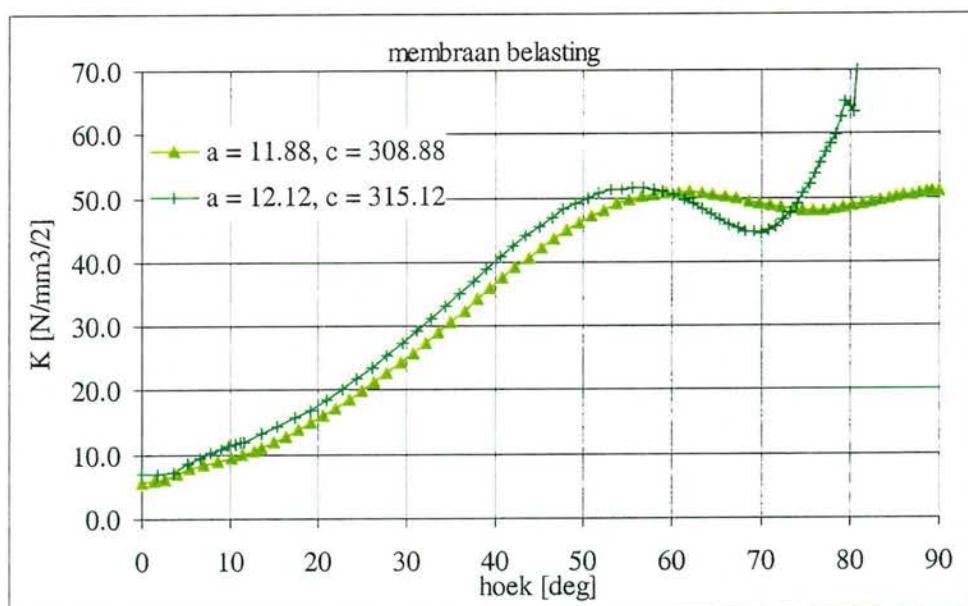
Figuur 5.22 SIF langs het scheurfront voor membraanbelasting, net wel of net niet door de wand



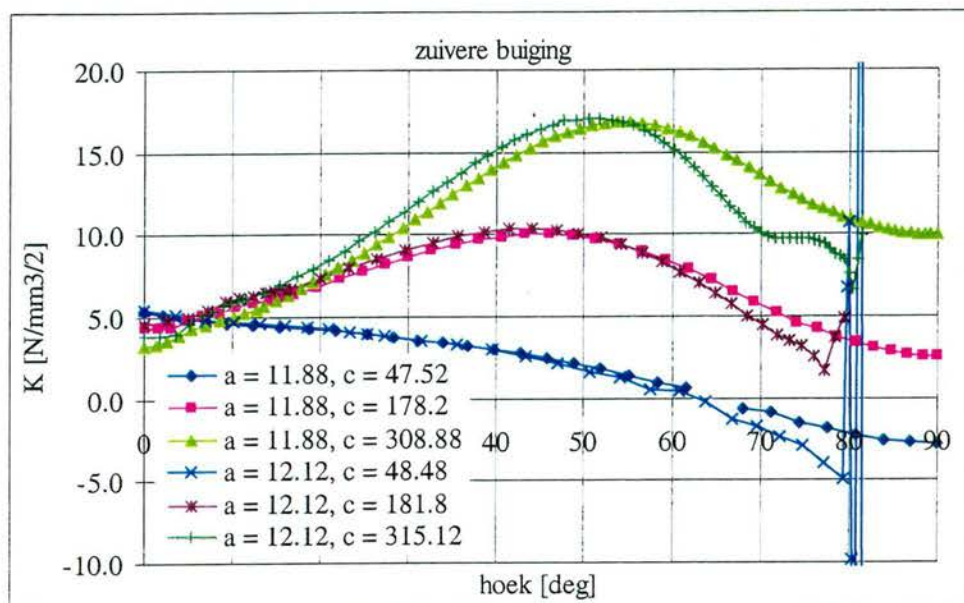
Figuur 5.23 SIF langs het scheurfront voor membraanbelasting, net wel of net niet door de wand, $c/a = 4$



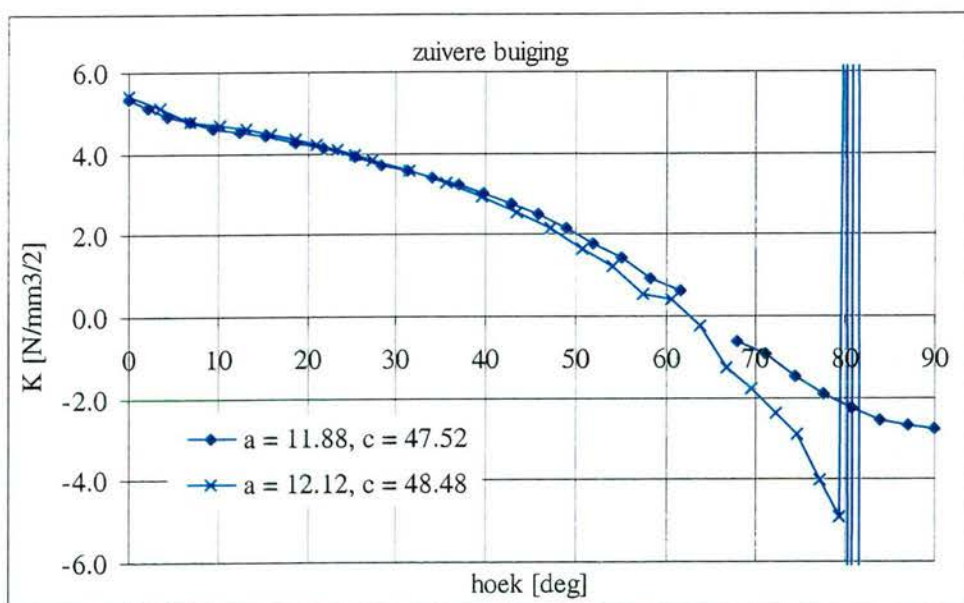
Figuur 5.24 SIF langs het scheurfront voor membraanbelasting, net wel of net niet door de wand, $c/a = 15$



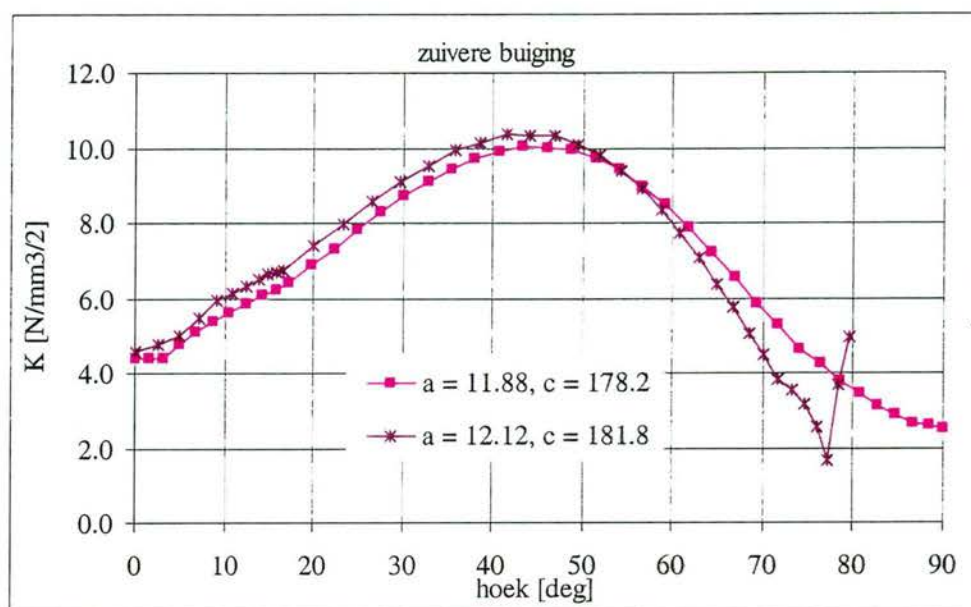
Figuur 5.25 SIF langs het scheurfront voor membraanbelasting, net wel of net niet door de wand, $c/a = 26$



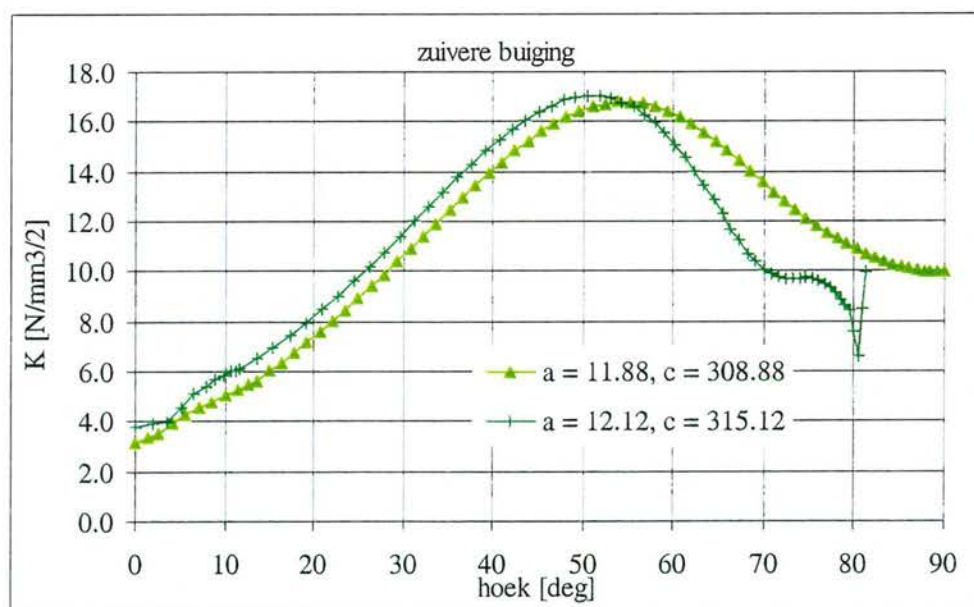
Figuur 5.26 SIF langs het scheurfront voor buiging, net wel of net niet door de wand



Figuur 5.27 SIF langs het scheurfront voor buiging, net wel of net niet door de wand,
 $c/a = 4$



Figuur 5.28 SIF langs het scheurfront voor buiging, net wel of net niet door de wand,
 $c/a = 15$



Figuur 5.29 SIF langs het scheurfront voor buiging, net wel of net niet door de wand,
 $c/a = 26$

6 Analytische uitdrukking voor door de wand scheuren

6.1 Modificatie SIF verloop tot lineair verloop op basis van scheurfrontlengte

Bij de ellipsvormige scheuren is steeds uitgegaan van de SIF op het diepste punt en aan het oppervlak. De scheurgroei op die posities werd bepaald en er werd verder gerekend met een halve ellipsvormige scheur door de nieuwe waarden voor de scheurdiepte (a) en halve scheurbreedte (c). Het verloop langs het scheurfront werd eigenlijk buiten beschouwing gelaten.

Bij de door de wand scheuren, waarvan de resultaten van de FEM analyses in het vorig hoofdstuk zijn gerapporteerd, blijkt dat het verloop van de SIF langs het scheurfront zodanig is dat in het middengebied een hogere SIF aanwezig is dan bij de oppervlakken. Dit verschijnsel is hier zo sterk aanwezig dat het niet verantwoord werd geacht om hier dezelfde procedure toe te passen. Het uitsluitend gebruiken van de waarden aan het eind zou waarschijnlijk de globale scheurgroeisnelheid onderschatten en daarmee tot niet-conservatieve resultaten leiden.

Er is uitgebreid nagedacht hoe dit probleem moet worden opgelost. uiteindelijk is gekozen voor een modificatie van het FEM-verloop van de SIF langs het scheurfront tot een lineair verloop, waarbij het oppervlak onder de FEM lijn gelijk is gehouden aan het oppervlak onder de lineaire lijn en verder is het zwaartepunt van het oppervlak op dezelfde plaats gehouden (hiermee komt de lijn dus onder een helling te staan). Deze procedure is toegepast met de lengte langs het scheurfront als maat en niet de hoek, zoals tot nu toe gebruikelijk. Indien nodig, in verband met slingeren, is het verloop aan de rand gemodificeerd.

In Figuur 6.1 en Figuur 6.2 is voor een tweetal gevallen de SIF afkomstig uit de eindige elementenberekening en de lineaire benadering weergegeven. De gepresenteerde figuren zijn de resultaten waarvan de waarden het meest afwijken van een rechte lijn. De SIF bij de randen (K_a en K_c), berekend met de eindige elementenmethode en de SIF uit de lineaire benadering zijn vergeleken in bijlage B.

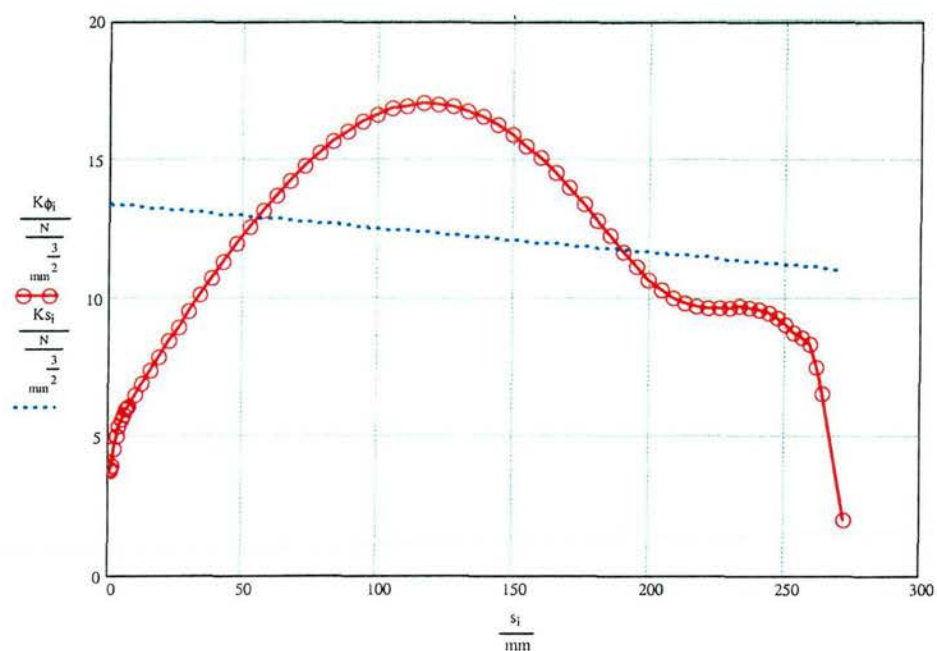
De resultaten voor de SIF aan de einden en de daarbij horende waarden voor de geometrische correctiefactoren zijn weergegeven in Tabel 6.1.

6.2 Curve fitting resultaten

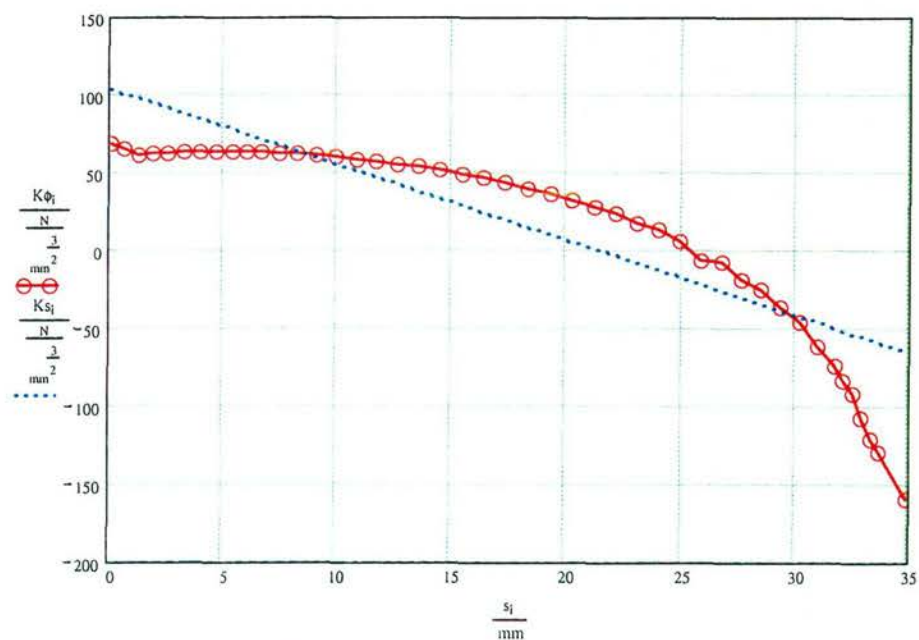
De resultaten van Tabel 6.1 zijn met behulp van een curve fitting procedure gebruikt voor de ontwikkeling van algebraïsche uitdrukkingen voor de SIF voor een door de wand scheur. Aangezien de analyses ver buiten het gebied zitten van de Newman-Raju formules wordt er niet meer naar deze formules gekeken, maar wordt de curve fitting procedure direct op de factoren zelf toegepast. De procedure verloopt verder grotendeels analoog aan die voor de SIF voor half ellipsvormige scheuren.

In eerste instantie zijn dan ook voor elke c/a waarde de resultaten gefit in a/T richting. Hierbij zijn de 5 punten benaderd door een kwadratische polynoom. Hierbij zijn de in Tabel 6.2 staande resultaten voor p , q en r verkregen.

$$M = p + q \left(\frac{a}{T} \right) + r \left(\frac{a}{T} \right)^2$$



Figuur 6.1 Vergelijking SIF verloop volgens FEM analyse en lineaire benadering voor buiging met $a/T = 1.01$ en $c/a = 26$



Figuur 6.2 Vergelijking SIF verloop volgens FEM analyse en lineaire benadering voor buiging met $a/T = 5$ en $c/a = 26$

Tabel 6.1 SIF bij lineair verloop en bijbehorende M factoren

Belasting	a/T	c/a	a (fict.)	c	Φ	$Ka' (\phi = 0^\circ)$	Mma	$Kc (\phi = 90^\circ)$	Mmc
	-	-	[mm]	[mm]	-	[Nmm-3/2]	-	[Nmm-3/2]	-
Mem- braan $\sigma_m =$ 1 N/mm ²	1.01	4	12.12	48.48	1.072	13.262	2.303	8.926	1.550
	1.01	15	12.12	181.80	1.008	40.804	6.668	18.512	3.025
	1.01	26	12.12	315.12	1.003	64.488	10.486	22.821	3.711
	2	4	24.00	96.00	1.072	32.554	4.018	15.561	1.921
	2	15	24.00	360.00	1.008	208.66	24.232	39.115	4.542
	2	26	24.00	624.00	1.003	509.11	58.830	36.044	4.165
	3	4	36.00	144.00	1.072	48.153	4.853	28.043	2.826
	3	15	36.00	540.00	1.008	427.47	40.532	90.780	8.608
	3	26	36.00	936.00	1.003	1186.0	111.898	118.33	11.164
	4	4	48.00	192.00	1.072	65.133	5.685	44.26	3.863
	4	15	48.00	720.00	1.008	704.01	57.809	171.00	14.041
	4	26	48.00	1248.0	1.003	2121.3	173.328	289.49	23.654
	5	4	60.00	240.00	1.072	85.138	6.646	63.503	4.957
	5	15	60.00	900.00	1.008	989.79	72.696	305.11	22.409
	5	26	60.00	1560.0	1.003	3086.9	225.599	512.34	37.444
Belasting	a/T	c/a	a (fict.)	c	Φ	$Ka' (\phi = 0^\circ)$	Mba	$Kc (\phi = 90^\circ)$	Mbc
	-	-	[mm]	[mm]	-	[Nmm-3/2]	-	[Nmm-3/2]	-
Buiging $\sigma_b =$ 1 N/mm ²	1.01	4	12.12	48.48	1.072	-4.252	-0.739	5.913	1.027
	1.01	15	12.12	181.80	1.008	2.690	0.440	11.041	1.804
	1.01	26	12.12	315.12	1.003	11.050	1.797	13.398	2.179
	2	4	24.00	96.00	1.072	-10.515	-1.298	11.818	1.459
	2	15	24.00	360.00	1.008	-10.332	-1.200	25.139	2.919
	2	26	24.00	624.00	1.003	0.949	0.110	35.589	4.112
	3	4	36.00	144.00	1.072	-14.282	-1.439	15.913	1.604
	3	15	36.00	540.00	1.008	-23.940	-2.270	38.086	3.611
	3	26	36.00	936.00	1.003	-21.254	-2.005	59.482	5.612
	4	4	48.00	192.00	1.072	-16.285	-1.421	18.867	1.647
	4	15	48.00	720.00	1.008	-38.625	-3.172	51.121	4.198
	4	26	48.00	1248.0	1.003	-42.479	-3.471	81.142	6.630
	5	4	60.00	240.00	1.072	-18.594	-1.451	21.932	1.712
	5	15	60.00	900.00	1.008	-52.462	-3.853	64.252	4.719
	5	26	60.00	1560.0	1.003	-65.49	-4.786	102.888	7.519

Tabel 6.2 Coëfficiënten voor p, q en r na curve fitting in a/T richting

Aspect ratio	c/a	4	15	26
Mma	p	0.817	-11.815	-40.209
	q	1.695	18.630	48.072
	r	-0.110	-0.338	1.084
Mba	p	-0.188	2.227	4.089
	q	-0.681	-1.966	-2.295
	r	0.088	0.151	0.103
Mmc	p	1.177	3.570	6.019
	q	0.204	-1.626	-5.084
	r	0.112	1.076	2.297
Mbc	p	0.599	0.653	-0.071
	q	0.517	1.276	2.443
	r	-0.060	-0.094	-0.187

Daarna is in c/a richting gefit met als uitdrukking voor de van c/a afhankelijke waarden van p, q en r.

$$pqr(c/a) = x + y (c/a - 15) + z (c/a - 15)^2$$

De door curve fitting bepaalde coëfficiënten zijn voor de vier M factoren gegeven in Tabel 6.3.

Tabel 6.3 Coëfficiënten voor x, y en z na curve fitting in c/a richting

		x	y	z
Mma	p	-11.815	-1.865	-0.06513
	q	18.630	2.108	0.05168
	r	-0.338	0.054270	0.006818
Mba	p	2.227	0.1944	-0.002285
	q	-1.966	-0.07336	0.003950
	r	0.151	0.0006818	-0.0004587
Mmc	p	3.570	0.2201	0.0002314
	q	-1.626	-0.2404	-0.006727
	r	1.076	0.09932	0.001062
Mbc	p	0.653	-0.03045	-0.003215
	q	1.276	0.08755	0.001686
	r	-0.094	-0.005773	-0.00002438

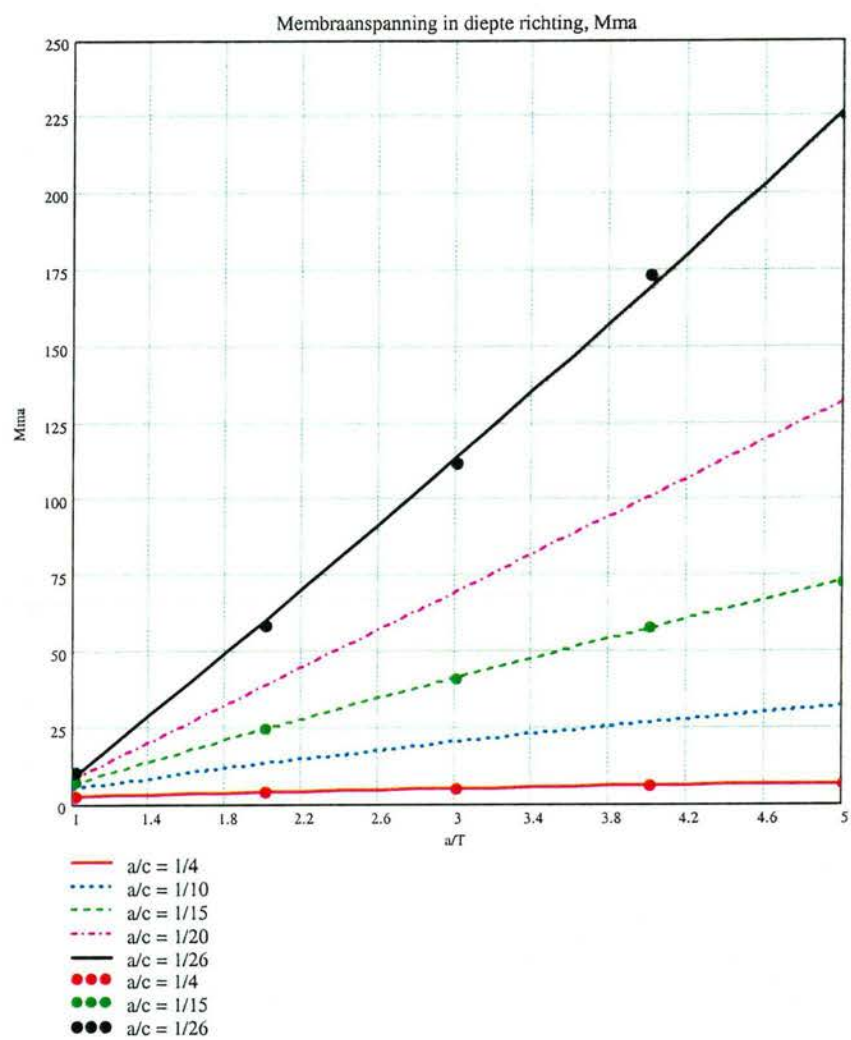
De met deze coëfficiënten verkregen lijnen en de FEM punten zijn in Figuur 6.3 t/m Figuur 6.6 weergegeven. Ter controle zijn ook voor c/a van 10 en 20 lijnen gegeven.

De lijnen lopen over het algemeen goed door de uitgangspunten.

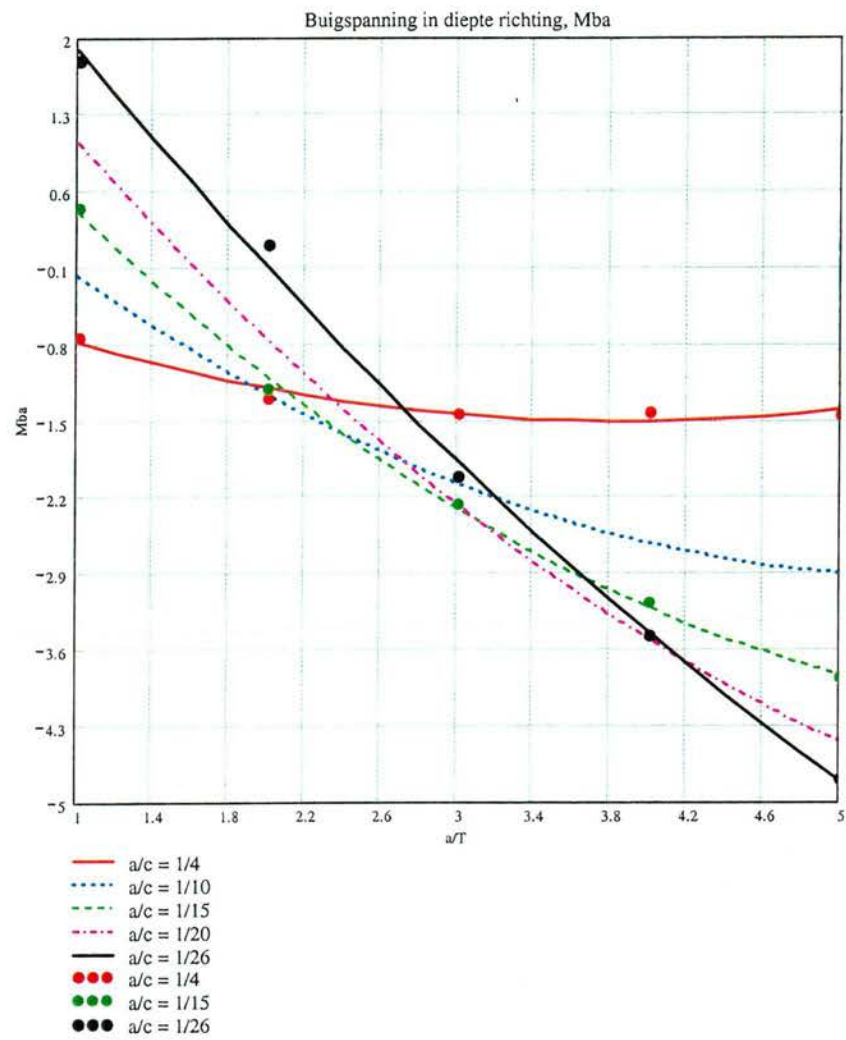
Voor Mba doet zich het verschijnsel voor dat de lijnen elkaar kruisen. Dit is niet direct verklaarbaar.

Voor lage a/T waarden lopen de resultaten en de lijnen voor Mmc enigszins door elkaar. Dit lijkt meer een nauwkeurigheidsprobleem.

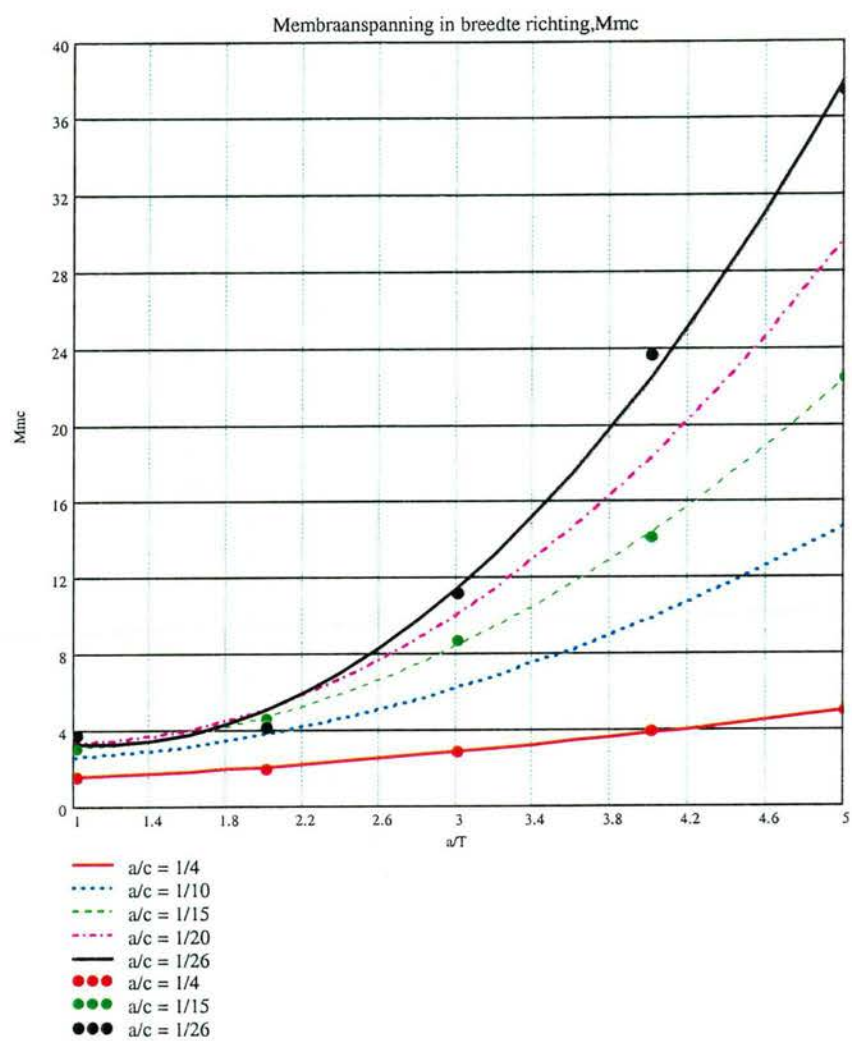
Voorlopig wordt er van uitgegaan dat de resultaten nauwkeurig genoeg zijn om de benodigde analyses te maken.



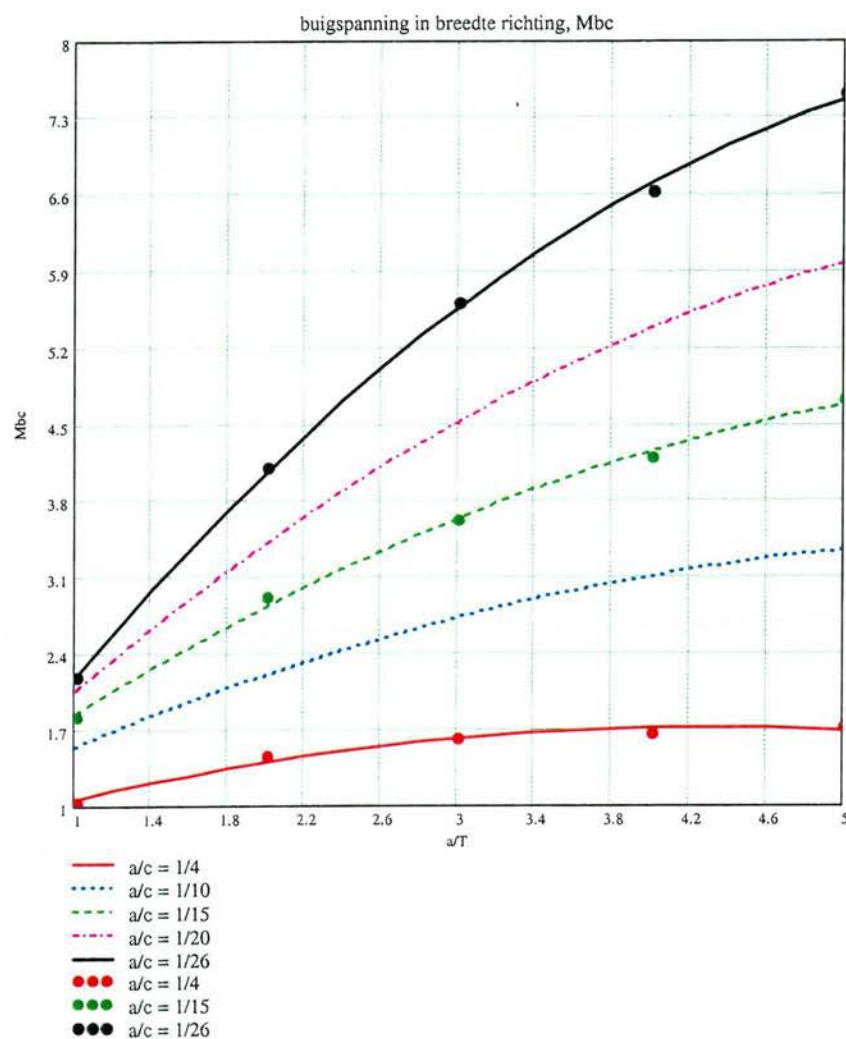
Figuur 6.3 M_{ma} als functie van a/T en a/c



Figuur 6.4 M_{ba} als functie van a/T en a/c



Figuur 6.5 M_{mc} als functie van a/T en a/c



Figuur 6.6 M_{bc} als functie van a/T en a/c

6.3 Scheurgroei-analyse

De bovenstaande uitdrukkingen voor de M factoren zijn in een Mathcad subroutine gebracht.

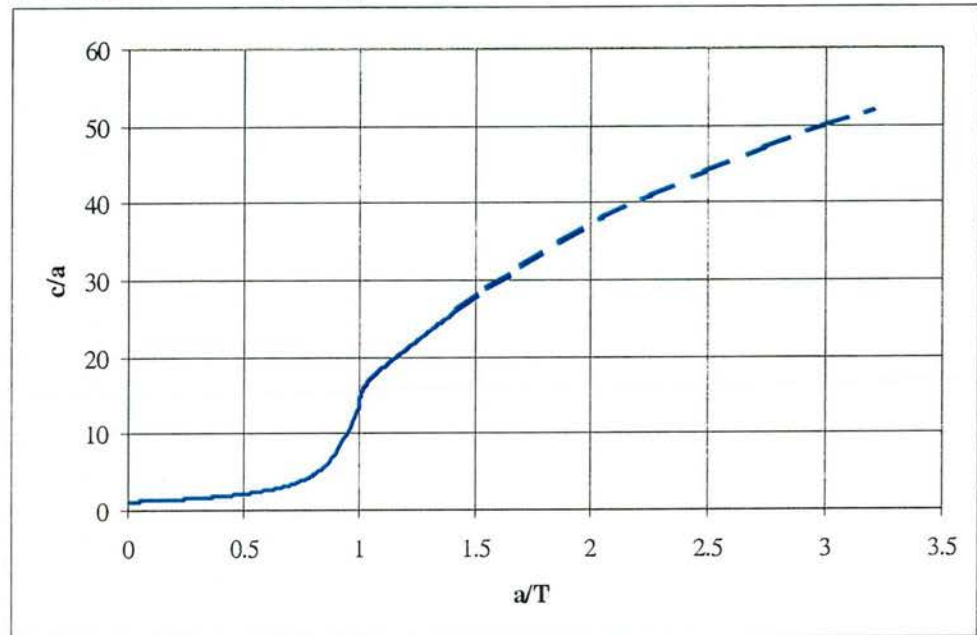
Verder is een aanpassing gepleegd in het integratie schema, in verband met de door de wand scheur geometrie. Hierbij is in eerste instantie de scheur op het diepste punt loodrecht op het scheurfront (buiten het materiaal) uitgebreid. Daarna is dit teruggerekend naar het oppervlak. Door dat punt en het nieuwe punt bij de c -as is daarna een nieuwe ellips gelegd voor de volgende integratiestap.

De analyse van 4.5 is uitgebreid tot een door de wand scheur (zie bijlage A).

De additionele levensduur na door scheuren bleek slechts 2.2% te zijn van de levensduur tot doorscheuren. Deze zeer geringe toename is waarschijnlijk te wijten aan de toch nog beperkte breedte van de geometrie (plaat van 4000 mm breed), zodat er nog

weinig steun is van de omgeving. Verwacht wordt dat dit bij een grotere plaat, zoals toegepast in een brug, meer zal zijn.

Verder loopt de c/a verhouding uit het bekeken gebied en er dus moet worden getwijfeld aan de geldigheid van de toegepaste formules voor de SIF. Onderzocht is het gebied met c/a van 4 tot 26, terwijl hier voor relatieve dieptes boven de 1.5 de c/a waarde toeneemt tot 52 (zie Figuur 6.7)



Figuur 6.7 Aspect ratio scheur (ook na door de wand scheuren)

6.4 Slotopmerkingen

Het berekend verloop van de SIF is omgezet naar een lineair verloop. Dit is uitgevoerd om zonder al te veel problemen tegemoet te komen aan de grotere waarden voor de SIF in het midden van de plaat.

Indien voor een gecompliceerdere aanpak was gekozen door b.v. voor “elke” locatie de scheurgroei uit te willen rekenen was het praktisch onmogelijk geweest om daarvoor algebraïsche uitdrukkingen te ontwikkelen. Bovendien was dan de scheurvorm niet meer ellipsvormig gebleven. In zo’n situatie was de scheurgroei in het midden groter geweest en aan de randen kleiner. De daardoor ontstane scheurvorm was waarschijnlijk aanleiding geweest voor een verlaging van de SIF in het midden en een vergroting aan de randen, waardoor er een gelijkmatiger SIF verloop was ontstaan. Door nu direct het berekende verloop te vertalen naar een lineair verloop wordt als het ware op voorhand aan deze verwachte situatie tegemoet gekomen. Het huidige project voorziet niet in een uitgebreide nadere analyse op dit punt.

Door het oppervlak voor beide benaderingen gelijk te houden mag worden verwacht dat de globale scheurgroei ongeveer gelijk blijft. Door het zwaartepunt gelijk te houden wordt er nog een mogelijkheid geboden om de scheurvorm te veranderen.

7 Conclusies

In deze fase van het RWS project Restlevensduur zijn door middel van FEM analyses SIFs bepaald voor diepe brede ellipsvormige scheuren en door de wand scheuren. De verkregen resultaten zijn door middel van curve fitting omgezet in analytische uitdrukkingen, waarmee scheurgroei-analyses gemaakt kunnen worden.

De volgende conclusies kunnen uit de studie met betrekking tot de brede diepe half-ellipsvormige scheuren worden getrokken:

- a) De negen FEM analyses van de SIFs geven consistente resultaten.
- b) Voor de brede diepe ellipsvormige scheuren is een aanzienlijke correctie noodzakelijk op de formules van Newman en Raju. Dit geldt met name voor de correctiefactoren voor de breedterichting.
- c) In verband met de aard van de correctie bleek een, door middel van curve fitting bepaalde, analytische uitdrukking voor het verschil tussen de Newman en Raju formules en de FEM resultaten het meest voor de hand te liggen..
- d) In verband met parameters waarvoor FEM-analyses zijn uitgevoerd, zijn de gecorrigeerde formules voor de SIF voor half ellipsvormige scheuren geldig voor het gehele a/T gebied van 0 tot 1 en voor c/a verhoudingen tussen 4 en 26.
- e) Een levensduuranalyse voor een plaat belast op buiging geeft met de gecorrigeerde formules een ca 20% langere levensduur dan met de niet gecorrigeerde formules. De langere levensduur ontstaat vooral door een tragere scheurgroei voor diepe scheuren.

De volgende conclusies kunnen uit de studie met betrekking tot de door-de-wand scheuren worden getrokken:

- a) De vijftien FEM analyses van de SIFs geven consistente resultaten.
- b) Aan de "diepe" zijde van de scheur, waar het scheurfront onder een flauwe hoek staat met het oppervlak ontstaat vaak een slingering in de resultaten.
- c) Uit een vergelijking tussen scheur net niet en net wel door de wand blijkt dat de SIF aan het oppervlak, langs de c -as, nagenoeg gelijk is.
- d) Het SIF-verloop uit de FEM analyses is sterk niet lineair.
- e) Ten einde de aan de ene kant rekening te houden met het totale verloop en aan de andere kant de scheurgroei-analyses niet te gecompliceerd te moeten maken is het FEM-verloop benaderd door een lineair verloop met hetzelfde oppervlak en met hetzelfde ligging voor het zwaartepunt. Vervolgens zijn de zodanig verkregen SIFs aan de uiteinden gebruikt voor verdere bewerking.
- f) Door middel van curve fitting zijn deze resultaten omgezet in een analytische uitdrukking voor SIFs voor door de wand scheuren met een a/T verhouding van 1 tot 5 en een c/a verhouding van 4 tot 26.
- g) Uit een aanvullende scheurgroei-analyse voor de door de wand scheur in een plaat belast op buiging blijkt dat er slechts 2.2% aan de levensduur wordt toegevoegd. Bij deze analyse loopt wel de c/a verhouding na a/T van 1.5 op tot boven het geldigheidsgebied van 26. Er is dus twijfel aan de betrouwbaarheid van de toegepaste SIF boven a/T waarden van 1.5.

Resumerend kan worden geconcludeerd dat voor de half ellipsvormige scheuren alles min of meer naar verwachting is verlopen.

Bij de door de wand scheuren zijn een tweetal onverwachte problemen gerezen. Ten eerste het sterk niet-lineair verloop van de SIF. Dit is opgelost door een lineaire benadering. Ten tweede het uit het geldigheidsgebied lopen van de c/a verhouding tijdens een scheurgroei-analyse, gecombineerd met een onverwacht geringe toename in de levensduur.

8 Aanbevelingen

Uitgaande van de oorspronkelijke fasering en de resultaten van de werkzaamheden in fase 2a worden de volgende werkzaamheden aanbevolen voor een volgende fase:

- a) Het nader onderzoeken van de wijze waarop omgegaan moet worden met het sterke niet-lineaire verloop van de SIF bij door de wand scheuren. Met name zou moeten worden bekeken of de nu gebruikte methode wel optimaal is.
- b) Het uitvoeren van aanvullende SIF analyses, zodat ook het gebied met c/a groter dan 26 kan worden afgedekt.
- c) Het uitvoeren van de voorgestelde experimentele verificatie door middel van een proef op een plaat belast op buiging. Hierbij moet het experiment en de wijze waarop de FEM analyses zijn uitgevoerd goed op elkaar aansluiten. Dit geldt met name voor de opleggingen en de wijze van belasten. De FEM analyses zijn uitgevoerd met een zuivere buigbelasting op de randen. Het is de vraag of dit in een experiment op dezelfde wijze aangebracht kan worden.

9 Referenties

- [1] Dijkstra, O. D. en Maljaars, J., "Vermoeiing stalen rijdekken – Restlevensduur – Fase 1 Algemene oriëntatie en haalbaarheid" TNO Bouw rapport 2002-BC-0009, mei 2002
- [2] Dijkstra, O.D., Straalen, I.J.J. van, "Fracture mechanics and fatigue of welded structure", International conference on Performance of dynamically Loaded Welded Structures – IIW 50th Annual Assembly Conference, San Francisco, CA, USA, July 14-15, 1997

10 Bijlagen

- A Scheurgroei-analyse van een plaatgeometrie vanuit een initieel randdefect tot een door-de-wand scheur
- B SIF bij de randen uit de eindige elementenanalyses en uit de lineaire benadering voor door-de-wand scheuren
- C Correction factors for SIF in flat plate according to Newman and Raju

A Scheurgroei-analyse van een plaatgeometrie vanuit een initieel randdefect tot een door-de-wand scheur

Fatigue fracture mechanics analysis
(FAFRAM)
from initial defect to through crack

Part A Plate with semi elliptical crack
 SIF-plate Newman Raju +
 wide and deep crack correction
 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 := 4000
		Initial defect depth	a_i := 0.15
		Initial half defect width	c_i := 0.15
		Final crack depth	a_f := 1·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	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)

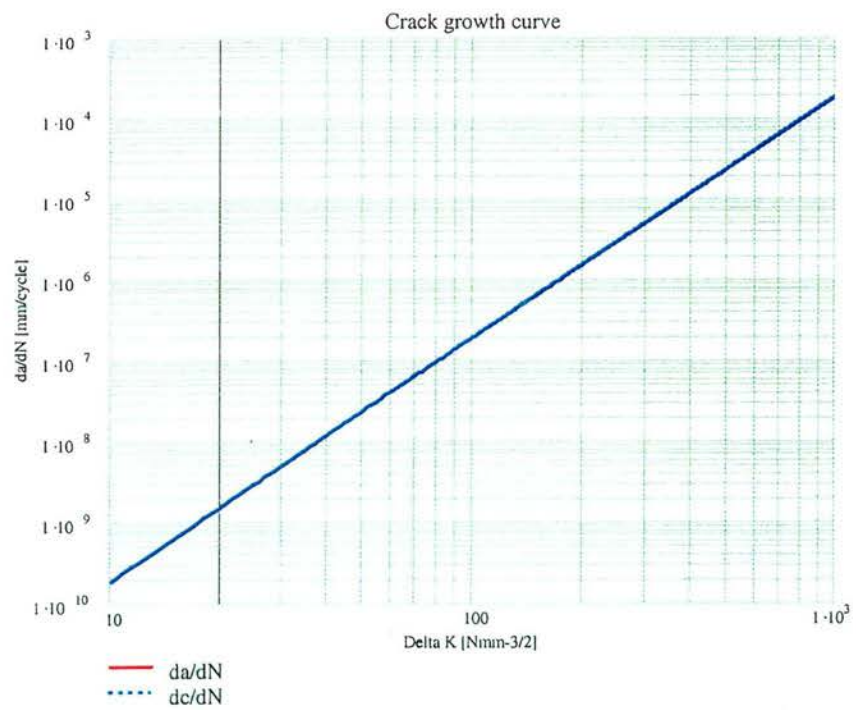
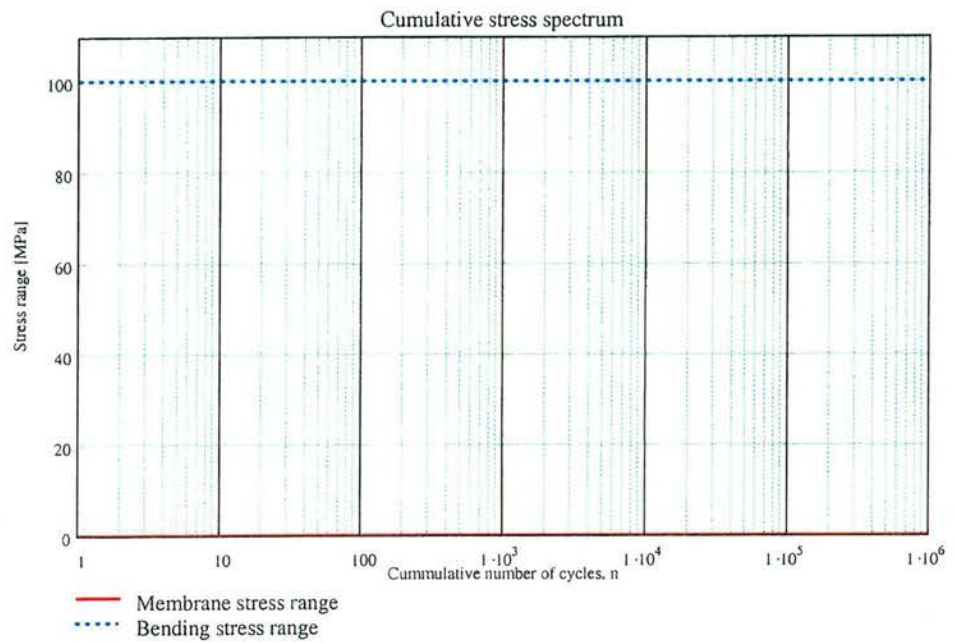
Depth direction	ma := 3	Ca := 1.832 10 ⁻¹³
Width direction	mc := ma	Cc := Ca

 Reference: \\Srv-filer\dao\AAPRO_F\mc_ffrm\Crack_G_L\LAws_002.mcd
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_Fmc_ffrm\Var_amp\Spect_020.mcd



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

Mma, Mba, Mmc and Mbc with correction for wide and deep cracks

☞ Reference: \\Srv-filer\dao\AAPRO_F\mc_ffrm\Sif_3d_RWS_cor\N_R_RWS_003.mcd

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

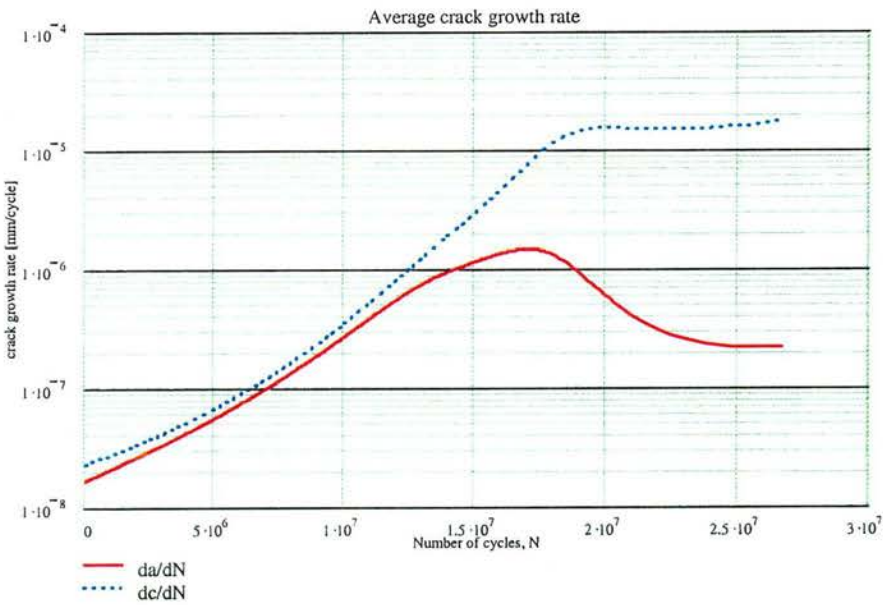
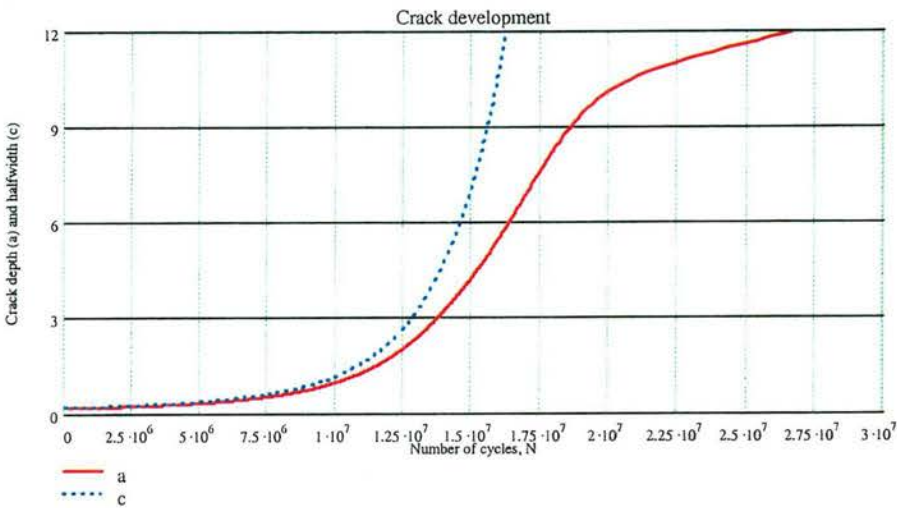
☞ Reference: \\Srv-filer\dao\AAPRO_F\mc_ffrm\Integration\int_as_Mul_VA_001.mcd

5 Summary of results

Number of integration steps	nr := 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 = 157.573
Final number of cycles	N_n := M _{nr,6}	N_n = 26615098
		N_n = 2.662 × 10 ⁷

6 Graphical presentation results elliptical crack growth

i := 1..nr iel := i



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

Part B
Additional analyses for plate with through crack and SIF-plate according to TNO analyses

7 Input parameters for through crack analyses

Initial defect depth	$a_i := 1.000001a_n$
Initial half defect width	$c_i := c_n$
Final crack depth	$a_f := 5 \cdot T$
Initial number of cycles	$N_i := N_n$

8 Correction factors for finite plate dimensions (SIF) for through crack

Mma, Mba, Mmc and Mbc

 Reference:\\Srv-filer\\dao\\AAPRO_F\\mc_ffrm\\DDW_3D_RWS\\DDW_RWS_001.mcd

9 Total stress intensity factors for deepest point (a) and for the surface width direction (c)

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

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

10 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, including correction schedule for through crack

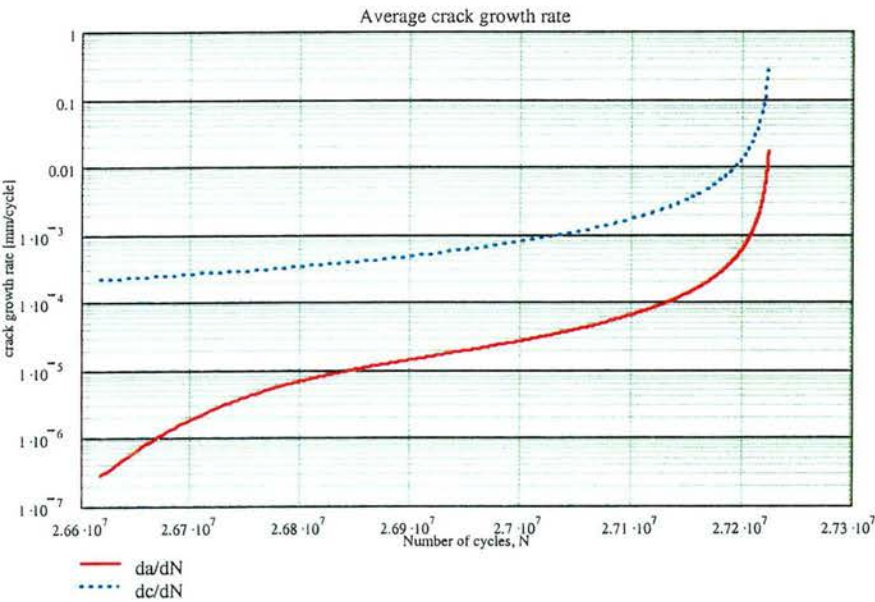
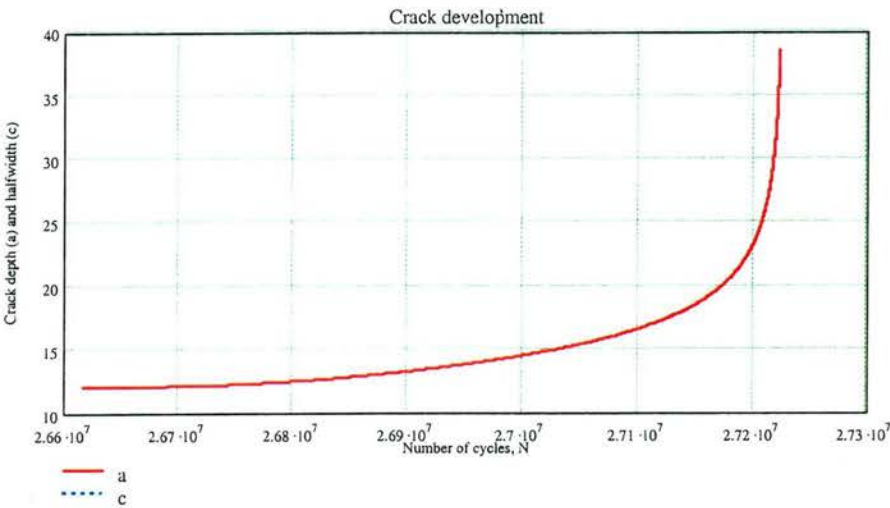
 Reference:\\Srv-filer\\dao\\AAPRO_F\\mc_ffrm\\DDW_3D_RWS\\int_as_Mul_VA_DDW_001.mcd

11 Summary of results

Number of integration steps	$nr := rows(M)$	$nr = 597$
Final crack depth	$a_n := M_{nr,4}$	$a_n = 38.491$
Final half crack width	$c_n := M_{nr,5}$	$c_n = 2000.000$
Final number of cycles	$N_n := M_{nr,6}$	$N_n = 27222265$
		$N_n = 2.722 \times 10^7$

12 Graphical presentation results trough crack analyses

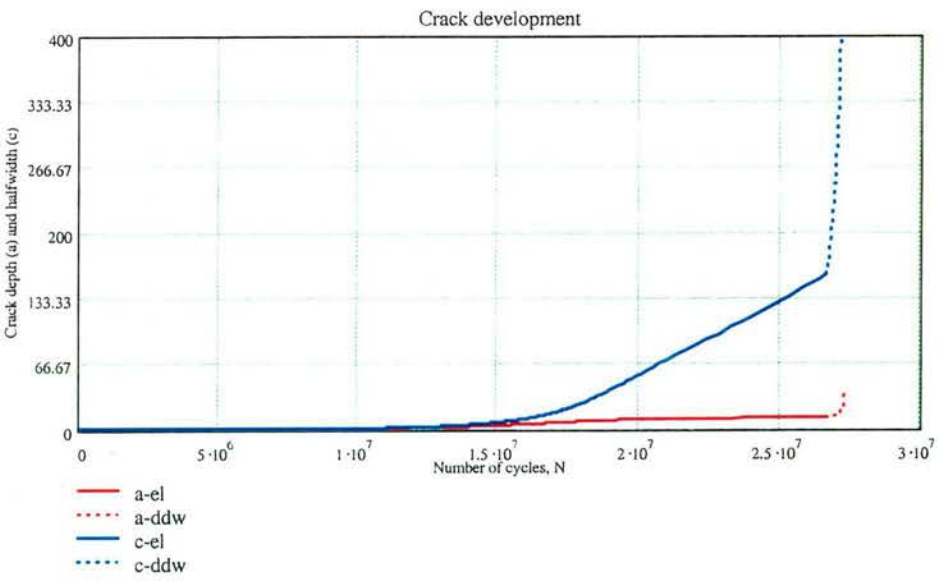
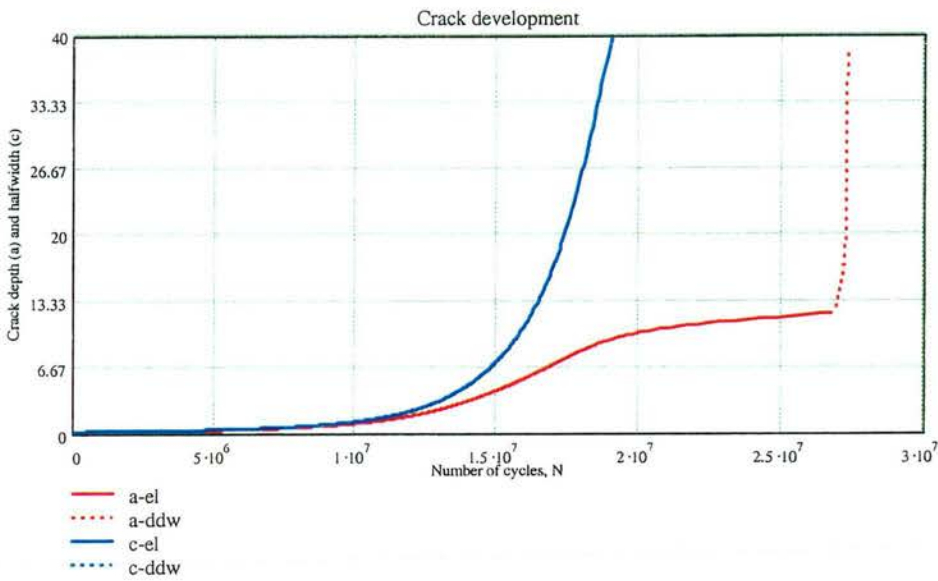
i:= 1..nr



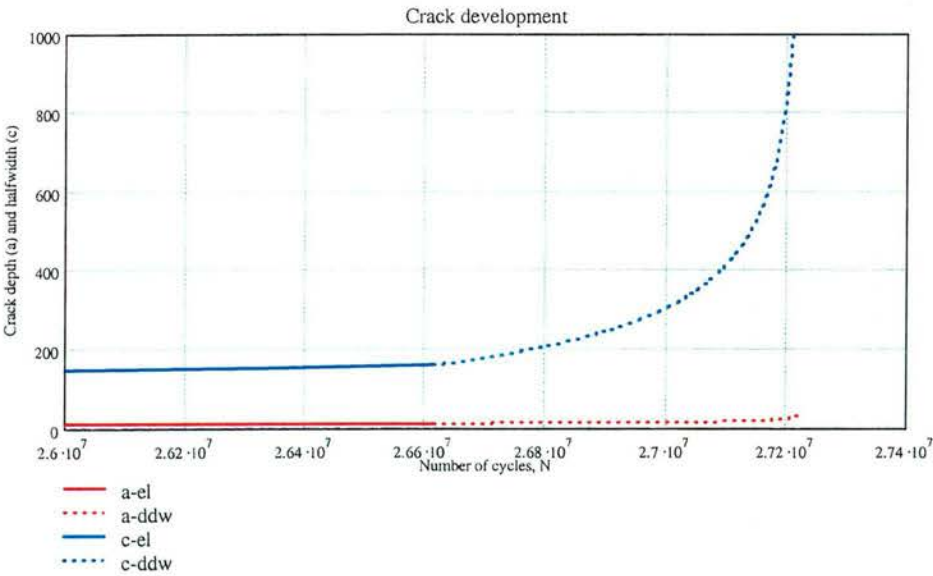
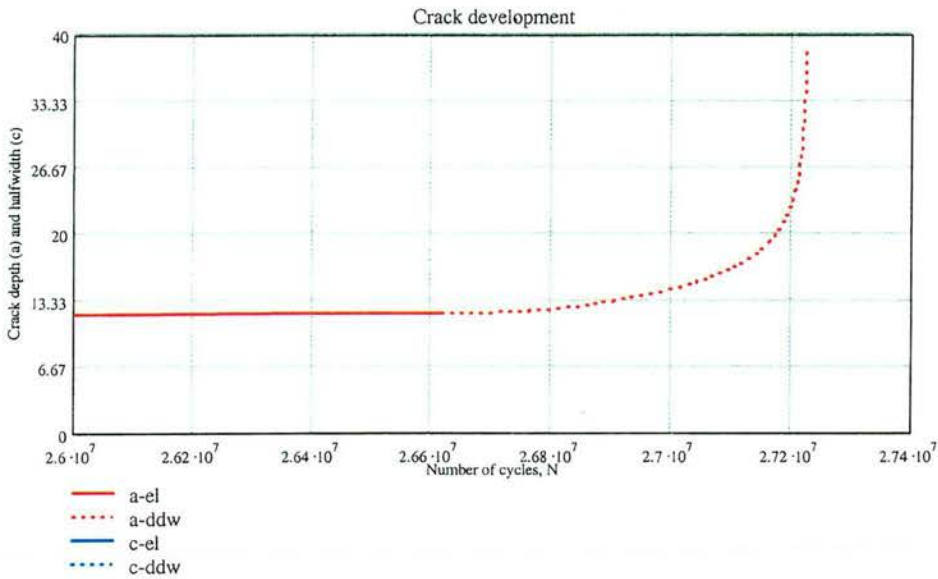
Export of main parameters per integration step (da/dN , dc/dN , ΔN , a, c, N) WRITEPRN("tabel_ddw.prn") := M

Mddw := M

13 Graphical presentation results total analyses



14 Detailed presentation of transition zone to trough crack



B SIF bij de randen uit de eindige elementenanalyses en uit de lineaire benadering voor door-de-wand scheuren

B SIF bij de randen uit de eindige elementenanalyses en uit de lineaire benadering voor door-de-wand scheuren

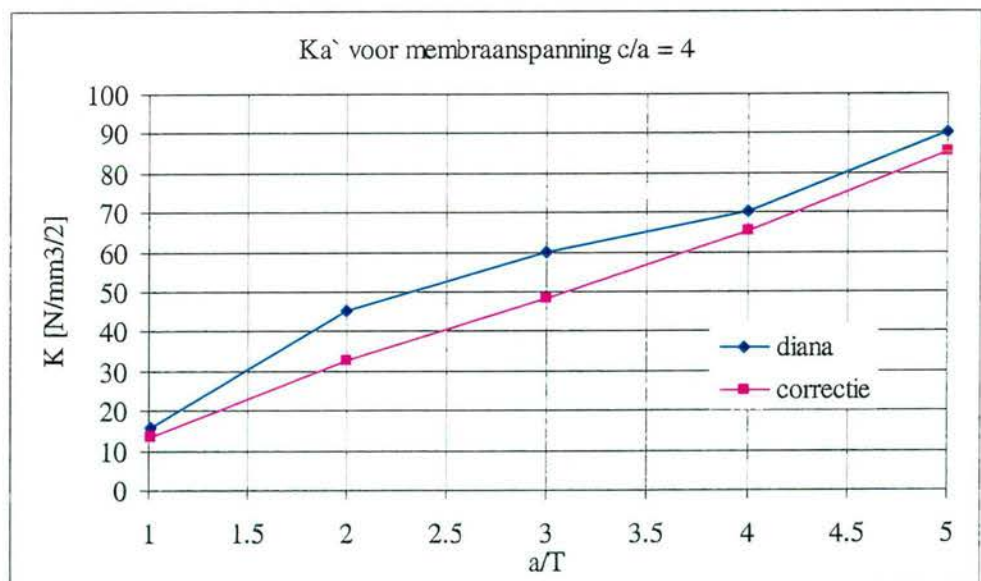
In deze bijlage zijn de SIF bij de randen voor door-de-wand scheuren (K_a' en K_c') uit de lineaire benadering vergeleken met de resultaten afkomstig uit de eindige elementenanalyse.

In de figuren in hoofdstuk 5 is te zien dat de berekende SIF bij de bovenrand (K_a') heen en weer schieten. Dit wordt veroorzaakt door het randeffect (zie rapport fase 1) en door de schuine hoek waarmee de scheur door de wand gaat, waardoor ter plaatse van de bovenrand geen optimale elementvorm gegenereerd kan worden en zodoende een minder nauwkeurige SIF bepaald wordt. Om deze reden is ter bepaling van de lineaire benadering bij deze scheuren vanuit een zekere diepte geëxtrapoleerd voor K_a' . Deze waarden zijn in deze bijlage gepresenteerd.

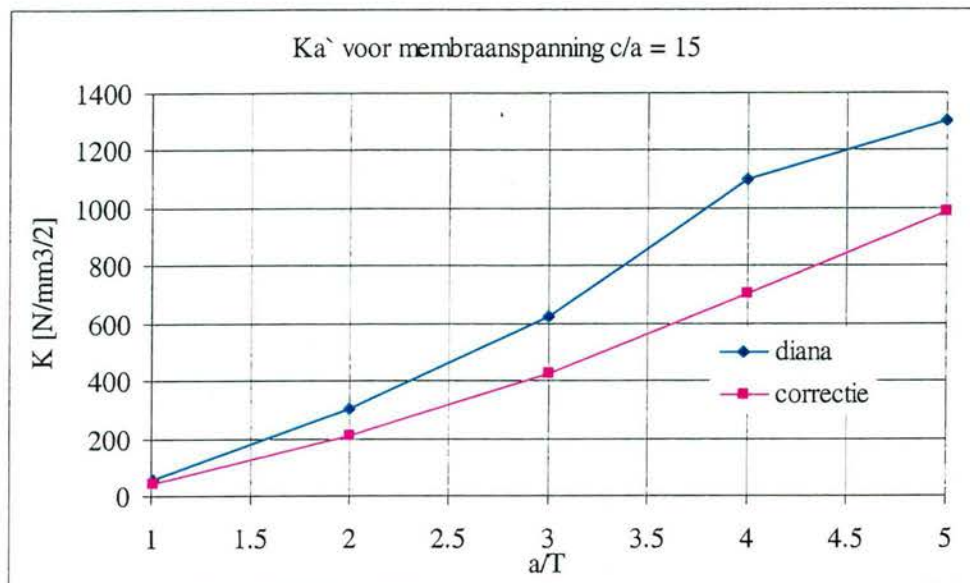
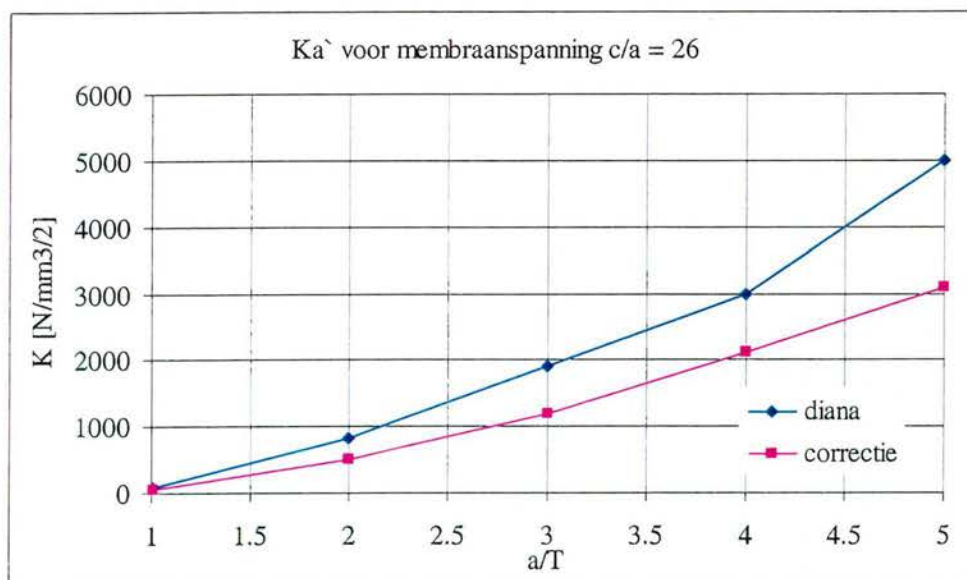
B.1 Vergelijking tussen de SIFs

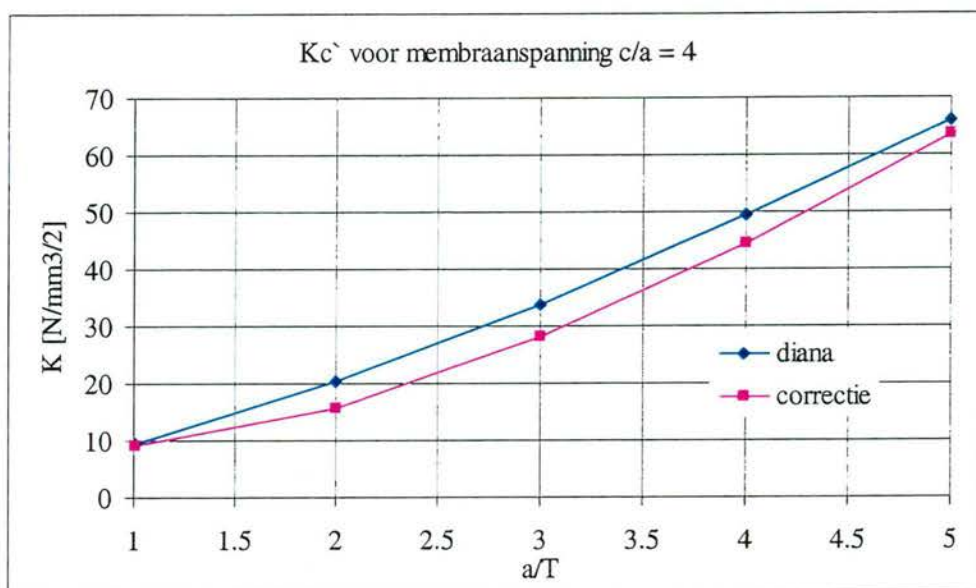
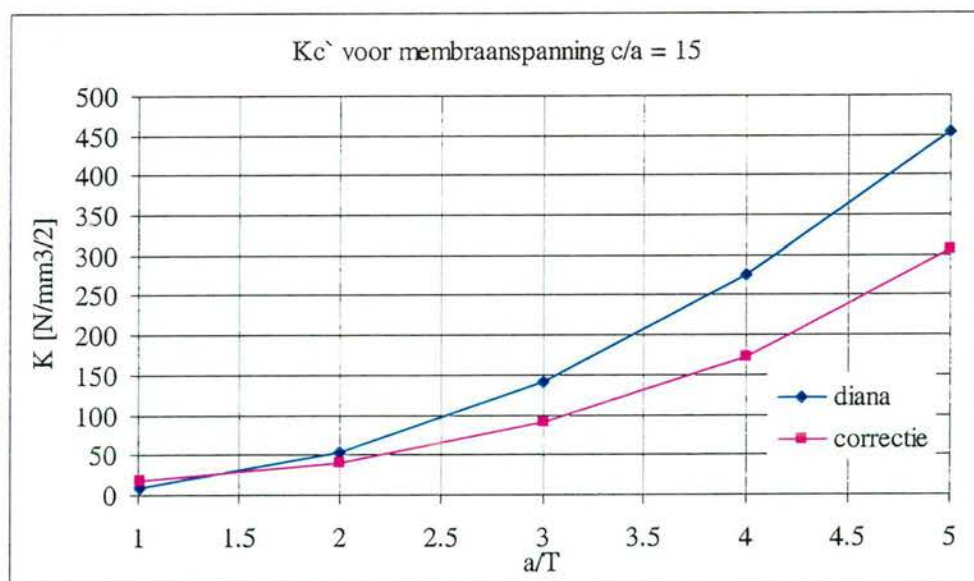
In Figuur B.10.1 t/m Figuur B.10.12 geven de blauwe lijnen de resultaten van de eindige elementenberekening weer, waarbij voor K_a' vanuit een zekere diepte uit de wand geëxtrapoleerd is. De roze lijnen geven de lineaire benadering weer.

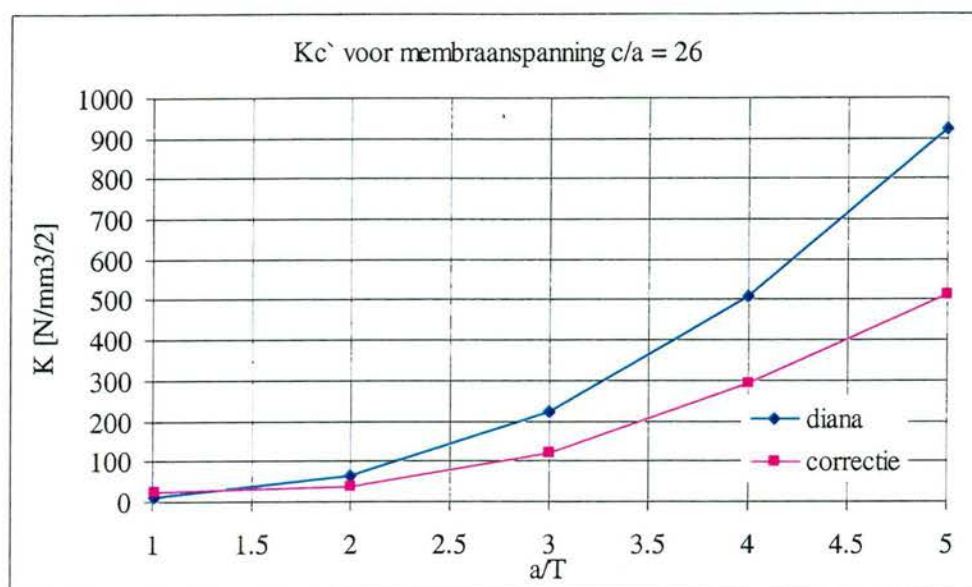
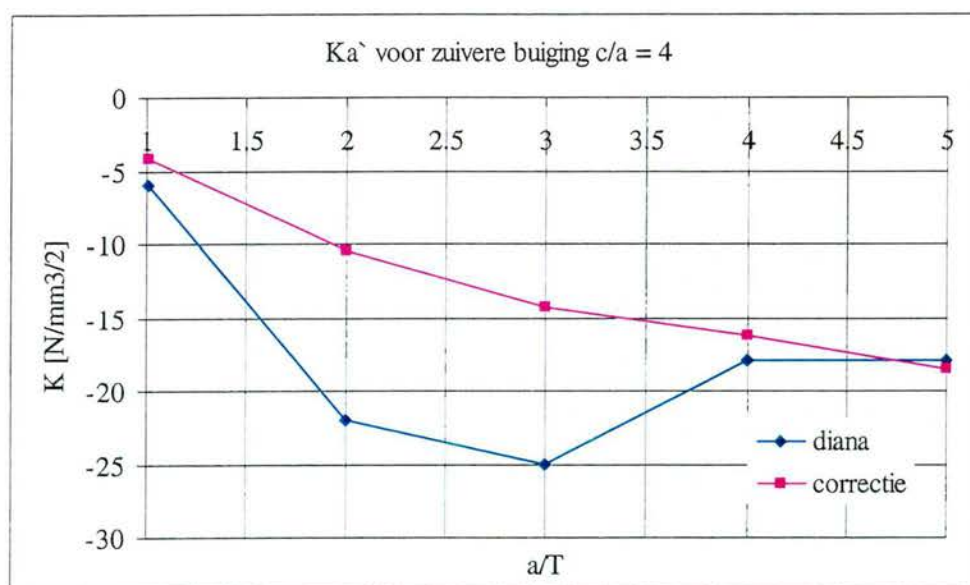
In de figuren is te zien dat de K_a' berekend met de eindige elementenmethode geen vloeiend verloop hebben. Dit wordt veroorzaakt door onnauwkeurigheden in de interpolatie die gebruikt is. Deze onnauwkeurigheid heeft geen significante invloed op de lineaire benadering, zie ook bijlage B.2.

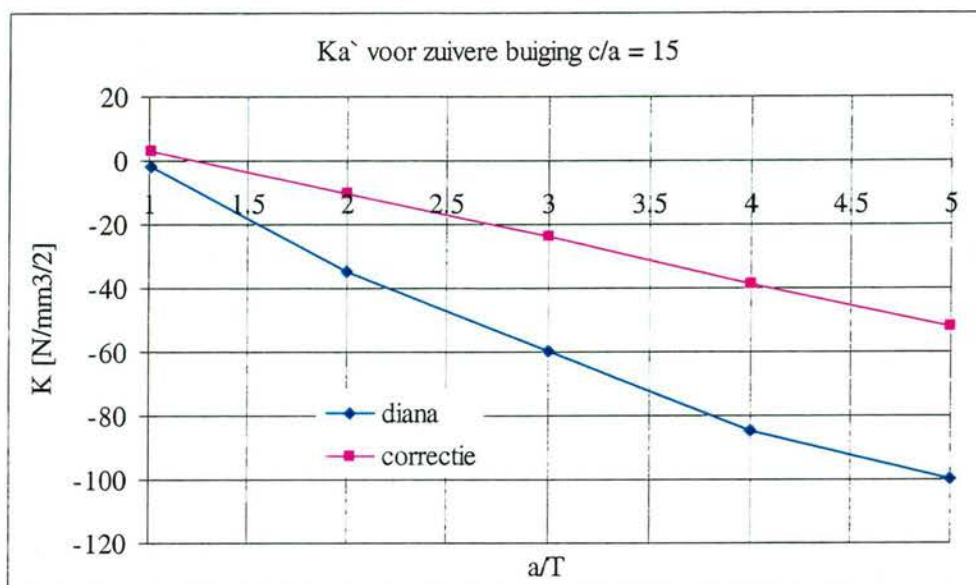
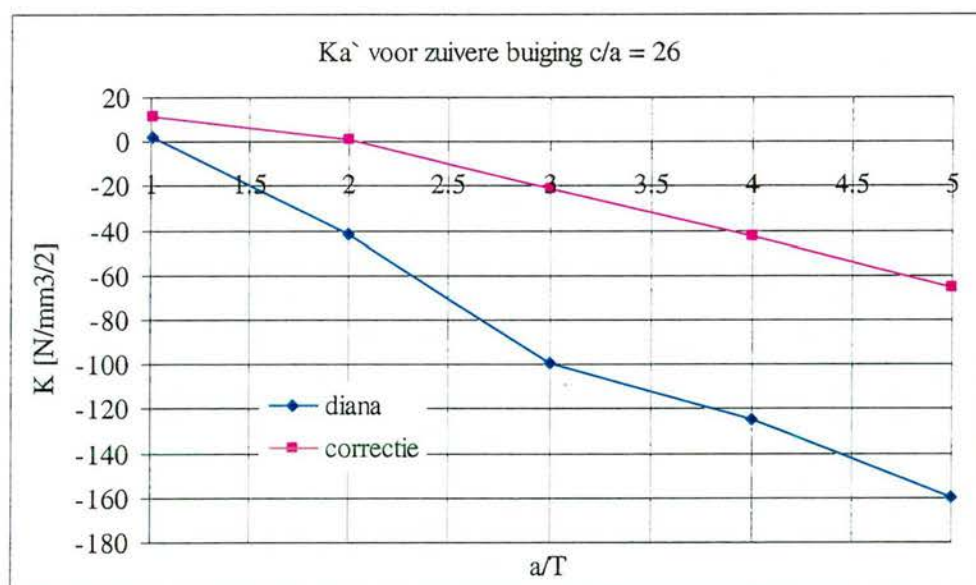


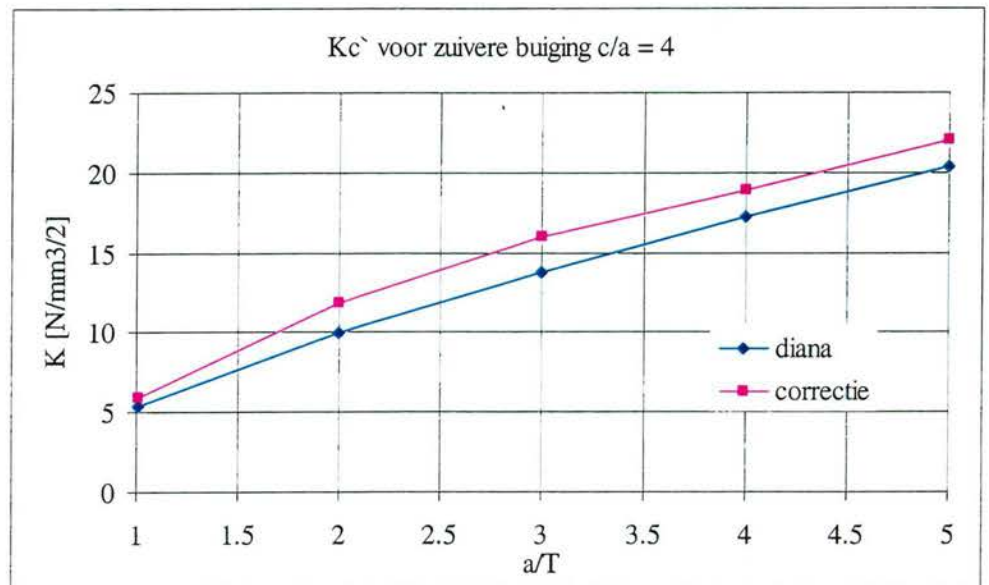
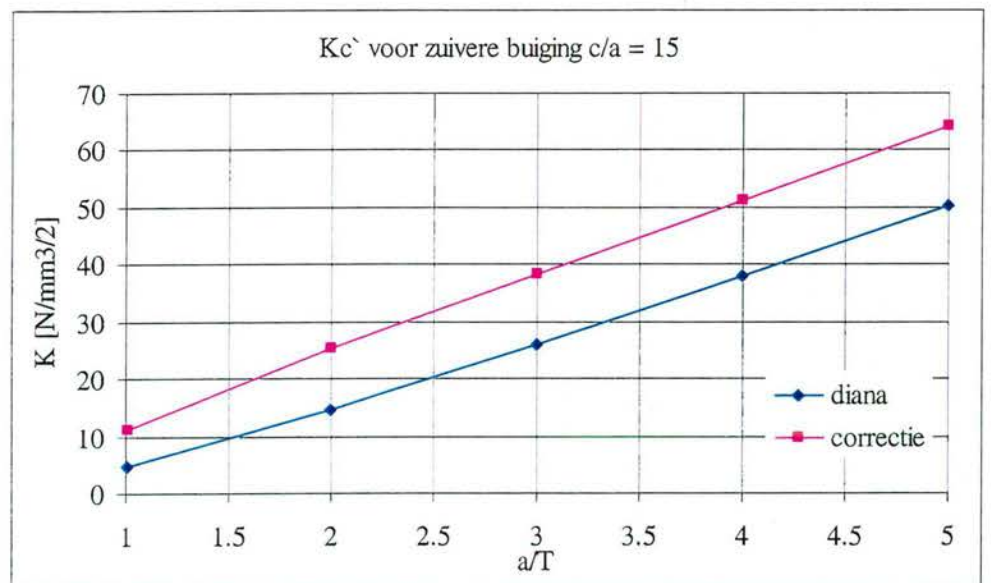
Figuur B.10.1 K_a' voor membraanspanning en $c/a = 4$

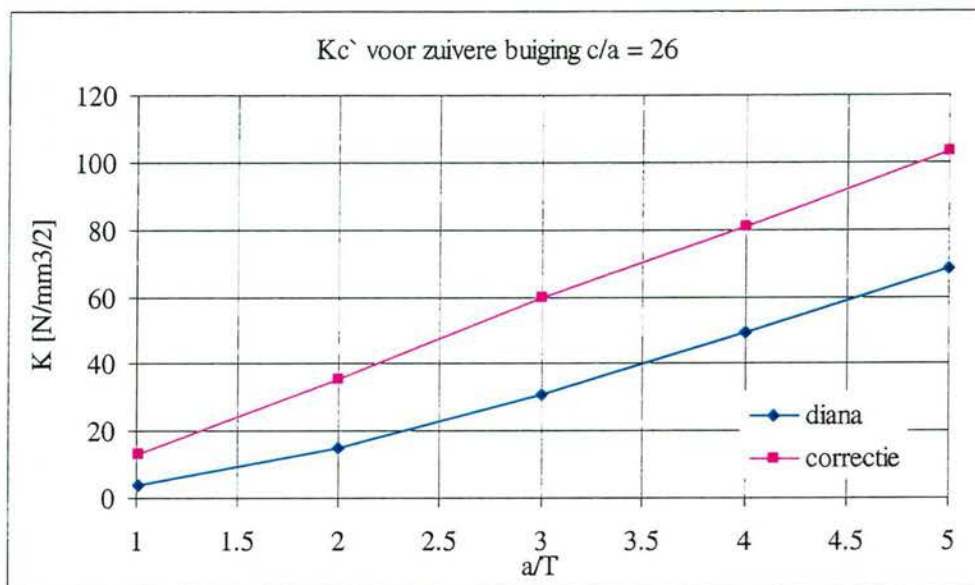
Figuur B.10.2 Ka' voor membraanspanning en $c/a = 15$ Figuur B.10.3 Ka' voor membraanspanning en $c/a = 26$

Figuur B.10.4 Kc' voor membraanspanning en $c/a = 4$ Figuur B.10.5 Kc' voor membraanspanning en $c/a = 15$

Figuur B.10.6 Kc' voor membraanspanning en $c/a = 26$ Figuur B.10.7 Ka' voor zuivere buiging en $c/a = 4$

Figuur B.10.8 Ka' voor zuivere buiging en $c/a = 15$ Figuur B.10.9 Ka' voor zuivere buiging en $c/a = 26$

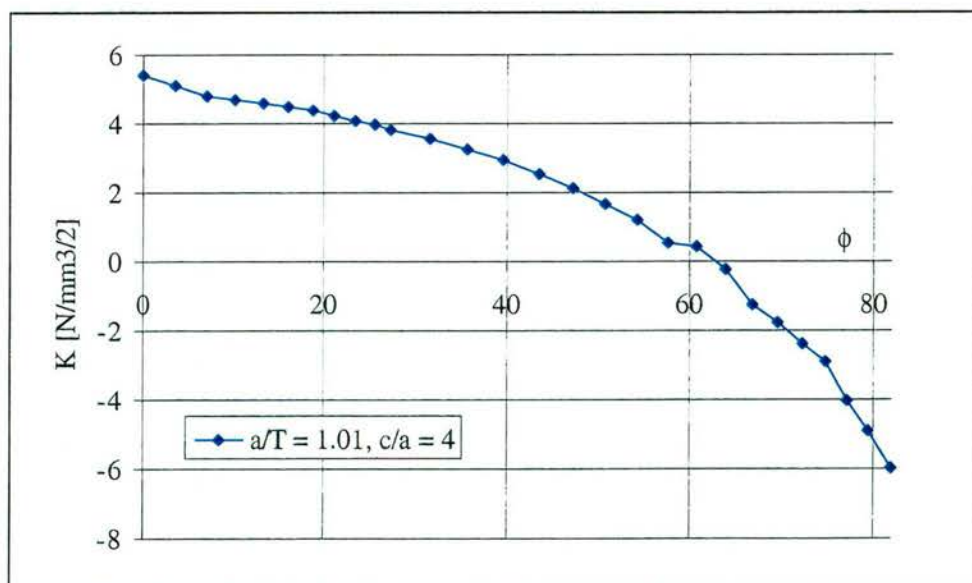
Figuur B.10.10 Kc' voor zuivere buiging en $c/a = 4$ Figuur B.10.11 Kc' voor zuivere buiging en $c/a = 15$



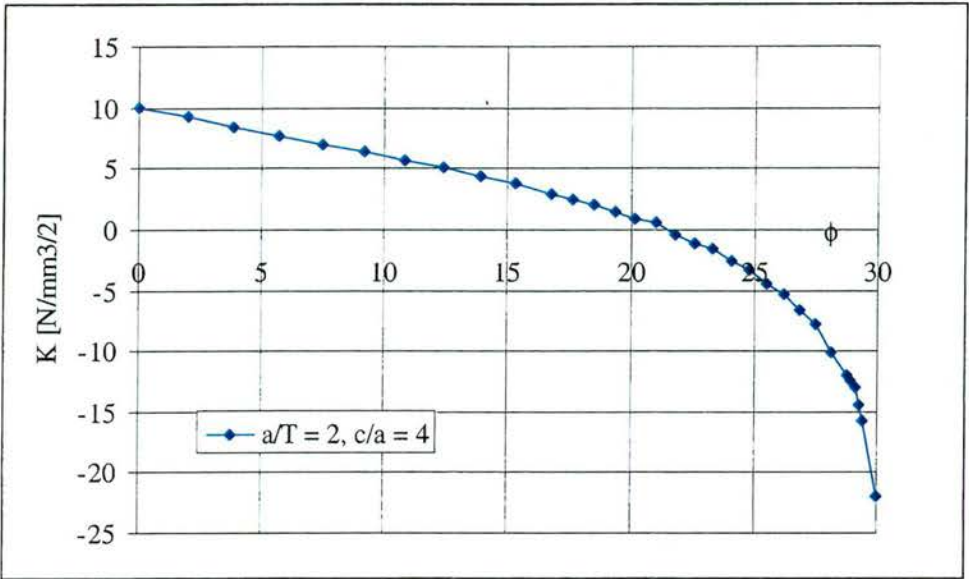
Figuur B.10.12 Kc' voor zuivere buiging en c/a = 26

B.2 Lineaire interpolatie bij zuivere buiging c/a = 4

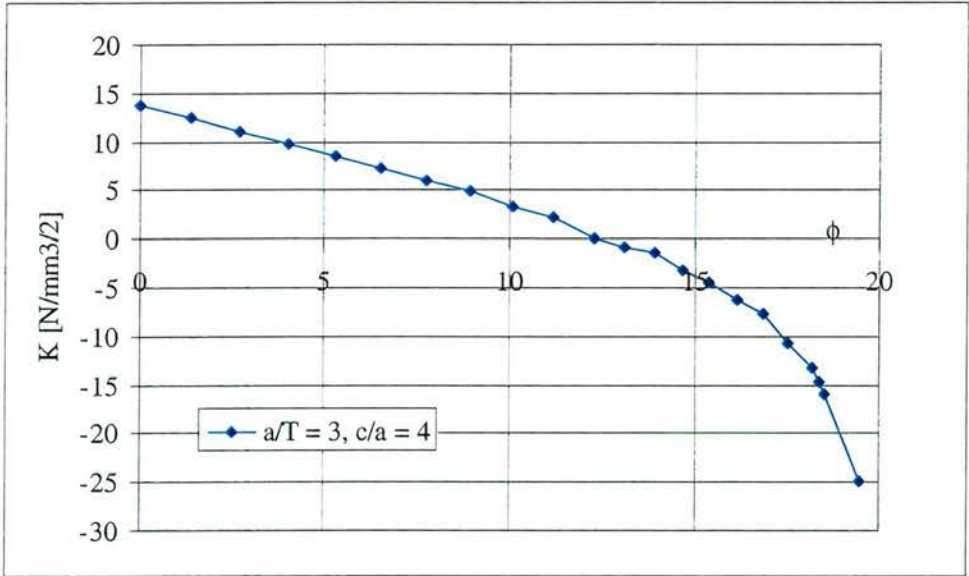
In figuur B.7 is geen vloeiend verloop zichtbaar van de Ka' bij toenemende a/T verhouding voor scheuren met $c/a = 4$ belast op buiging. Dit wordt veroorzaakt door onnauwkeurigheid in de extrapolatie nabij de rand. Figuur B.10.13 t/m Figuur B.10.17 geven voor deze scheuren de SIF langs het scheurfront, volgend uit de eindige elementenanalyse, met de extrapolatie. In de figuren is te zien, dat een wijziging in de waarde voor Ka' (een wijziging in de extrapolatie) nauwelijks invloed heeft op het oppervlak onder de grafiek en op het zwaartepunt van de grafiek. Daarom zal een wijziging in de extrapolatie geen significante invloed hebben op de lineaire benadering van de SIF.



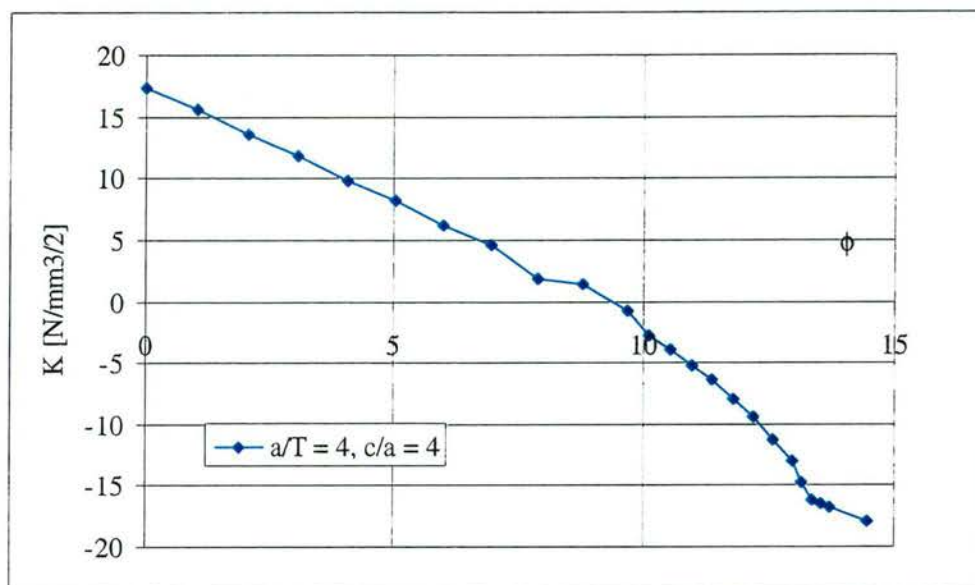
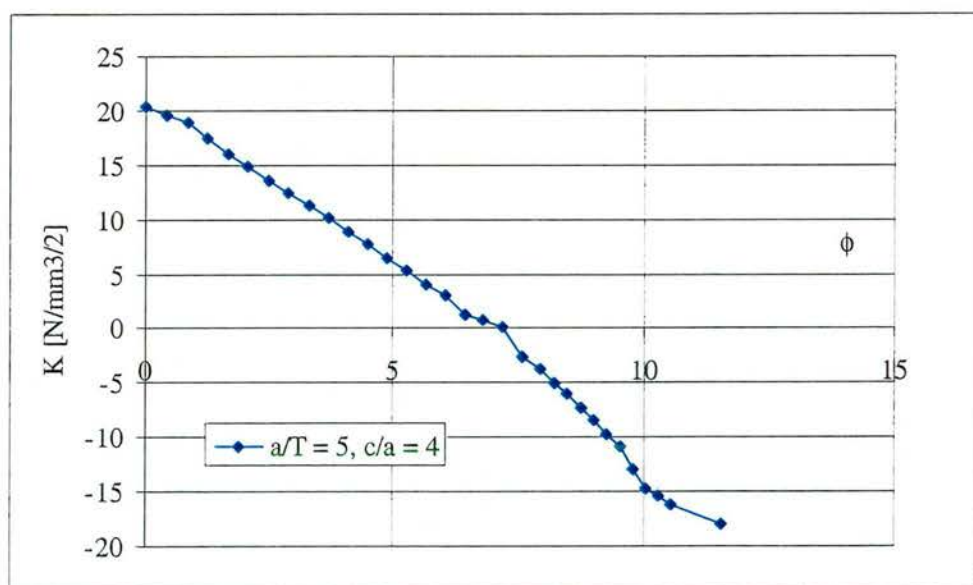
Figuur B.10.13 SIF langs het scheurfront voor zuivere buiging $a/T = 1.01$ en $c/a = 4$



Figuur B.10.14 SIF langs het scheurfront voor zuivere buiging $a/T = 2$ en $c/a = 4$

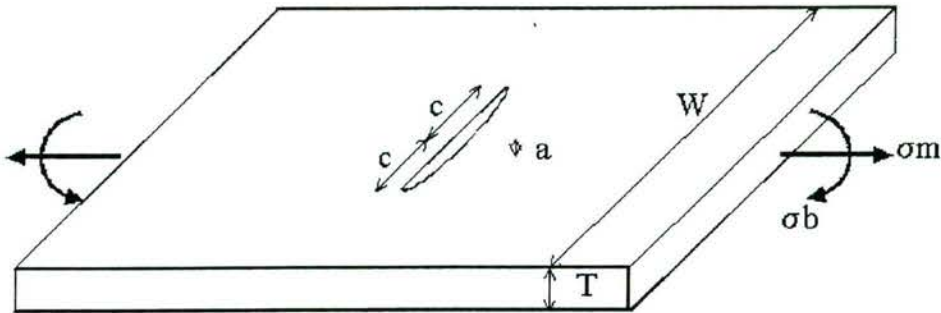


Figuur B.10.15 SIF langs het scheurfront voor zuivere buiging $a/T = 3$ en $c/a = 4$

Figuur B.10.16 SIF langs het scheurfront voor zuivere buiging $a/T = 4$ en $c/a = 4$ Figuur B.10.17 SIF langs het scheurfront voor zuivere buiging $a/T = 4$ en $c/a = 4$

C Correction factors for SIF in flat plate according to Newman and Raju

Correction factors for SIF in flat plate according to Newman and Raju



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

Geometrical Parameters	Plate thickness	T := 10·mm
	Plate width	W := 1000 mm
	Crack depth	a := 2·mm
	Half crack width	c := 5·mm
Stress Parameters	Membrane stress	σ_m := 50·MPa
	Bending stress	σ_b := 25·MPa

Elliptical integral (eq. E2 of PD6493)

$$\Phi(a,c) := \begin{cases} \left[1 + 1.464 \left(\frac{a}{c} \right)^{1.65} \right]^{0.5} & \text{if } \frac{a}{c} \leq 1 \\ \left[1 + 1.464 \left(\frac{c}{a} \right)^{1.65} \right]^{0.5} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$\Phi(a,c) = 1.150$

$$ac(a, c) := \frac{a}{c}$$

$$ca(a, c) := \frac{c}{a}$$

$$aT(a) := \frac{a}{T}$$

Correction factors (eq. E5 and E6 of PD6493)

$$M1(a, c) := \begin{cases} 1.13 - 0.09(ac(a, c)) & \text{if } ac(a, c) \leq 1 \\ (ca(a, c))^{0.5} \cdot [1 + 0.04(ca(a, c))] & \text{otherwise} \end{cases} \quad M1(a, c) = 1.094$$

$$M2(a, c) := \begin{cases} \frac{0.89}{0.2 + ac(a, c)} - 0.54 & \text{if } ac(a, c) \leq 1 \\ 0.2 \cdot (ca(a, c))^4 & \text{otherwise} \end{cases} \quad M2(a, c) = 0.943$$

$$M3(a, c) := \begin{cases} 0.5 - \frac{1}{0.65 + ac(a, c)} + 14 \cdot (1 - ac(a, c))^{24} & \text{if } ac(a, c) \leq 1 \\ -0.11 \cdot (ca(a, c))^4 & \text{otherwise} \end{cases} \quad M3(a, c) = -0.452$$

$$ga := 1$$

$$gc(a, c) := \begin{cases} 1.1 + 0.35(aT(a))^2 & \text{if } ac(a, c) \leq 1 \\ 1.1 + 0.35 ca(a, c) \cdot (aT(a))^2 & \text{otherwise} \end{cases} \quad gc(a, c) = 1.114$$

$$fa\theta := 1$$

$$fc\theta(a, c) := \begin{cases} (ac(a, c))^{0.5} & \text{if } ac(a, c) \leq 1 \\ 1.0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad fc\theta(a, c) = 0.632$$

$$fw(a, c) := \left(\sec \left(\frac{\pi \cdot c}{W} \cdot \sqrt{aT(a)} \right) \right)^{0.5} \quad fw(a, c) = 1$$

$$G1(a, c) := \begin{cases} -1.22 - 0.12 ac(a, c) & \text{if } ac(a, c) \leq 1 \\ -2.11 + 0.77 ca(a, c) & \text{otherwise} \end{cases} \quad G1(a, c) = -1.268$$

$$G2(a, c) := \begin{cases} 0.55 - 1.05(ac(a, c))^{0.75} + 0.47(ac(a, c))^{1.5} & \text{if } ac(a, c) \leq 1 \\ 0.55 - 0.72(ca(a, c))^{0.75} + 0.14(ca(a, c))^{1.5} & \text{otherwise} \end{cases} \quad G2(a, c) = 0.141$$

$$H1(a, c) := \begin{cases} 1 - 0.34 aT(a) - 0.11 ac(a, c) \cdot aT(a) & \text{if } ac(a, c) \leq 1 \\ 1 - (0.04 + 0.41 ca(a, c)) \cdot aT(a) \dots & \text{otherwise} \\ + [0.55 - 1.93(ca(a, c))^{0.75} + 1.38(ca(a, c))^{1.5}] \cdot (aT(a))^2 & \end{cases} \quad H1(a, c) = 0.923$$

$$H2(a, c) := 1 + G1(a, c) \cdot aT(a) + G2(a, c) \cdot (aT(a))^2 \quad H2(a, c) = 0.752$$

Resulting correction factors for flat plate with semi-elliptical crack

Membrane stress

$$Mma(a, c) := \left[M1(a, c) + \left[M2(a, c) \cdot (aT(a))^2 + M3(a, c) \cdot (aT(a))^4 \right] \right] \cdot ga \cdot fa \cdot \theta \cdot fw(a, c)$$

$$Mma(a, c) = 1.131$$

$$Mmc(a, c) := \left[M1(a, c) + \left[M2(a, c) \cdot (aT(a))^2 + M3(a, c) \cdot (aT(a))^4 \right] \right] \cdot gc(a, c) \cdot fc \theta(a, c) \cdot fw(a, c)$$

$$Mmc(a, c) = 0.797$$

Bending stress

$$Mba(a, c) := Mma(a, c) \cdot H2(a, c)$$

$$Mba(a, c) = 0.851$$

$$Mbc(a, c) := Mmc(a, c) \cdot H1(a, c)$$

$$Mbc(a, c) = 0.736$$

Resulting stress intensity factors for depth and width direction

$$\text{SIF for depth (a) direction} \quad \Delta K_a := (Mma(a, c) \cdot \sigma_m + Mba(a, c) \cdot \sigma_b) \cdot \frac{\sqrt{\pi \cdot a}}{\Phi(a, c)}$$

$$\text{SIF for width (c) direction} \quad \Delta K_c := (Mmc(a, c) \cdot \sigma_m + Mbc(a, c) \cdot \sigma_b) \cdot \frac{\sqrt{\pi \cdot a}}{\Phi(a, c)}$$

Numerical values in N.mm^{-3/2} and MPa.m^{1/2}

$$\Delta K_a = 169.593 \text{ N} \cdot \text{mm}^{\frac{-3}{2}} \quad \text{or} \quad \Delta K_a = 5.363 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$$

$$\Delta K_c = 126.919 \text{ N} \cdot \text{mm}^{\frac{-3}{2}} \quad \text{or} \quad \Delta K_c = 4.014 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$$

