

Voorbeelden van 3D-contactanalyse met MARC

Citation for published version (APA):

Heugen, R. (1995). *Voorbeelden van 3D-contactanalyse met MARC*. (DCT rapporten; Vol. 1995.032). Technische Universiteit Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1995

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

Voorbeelden van 3D-contactanalyse
met MARC

R. Heugen

Rapportnummer: WFW 95.032
(Stageverslag)

BEGELEIDERS: P. SCHAAP EN F. SAUREN
Faculteit Fundamentele Werktuigkunde
Technische Universiteit Eindhoven

Samenvatting

Driedimensionale contactanalyses spelen een grote rol in de studie naar de krachtdoorleiding in het kniegewricht. Eerder hebben G. Schreppers [5] in het EEM-pakket DIANA en J. Jongen [6] in het EEM-pakket MARC al 2D-contactanalyses aan een gestileerd model van de knie uitgevoerd. Een volgende stap zou een 3D-contactanalyse van dit model in MARC kunnen zijn. Voordat hier aan begonnen kan worden, dient er inzicht verkregen te worden in de werking van het 3D-contactalgoritme van MARC.

In deze stage werd het contactalgoritme voor deformeerbaar-deformeerbaar contact getest aan de hand van eenvoudige voorbeelden. Allereerst werden twee kubussen van niet-gelijke afmeting op verschillende manieren met elkaar in contact gebracht. De contactvlakken van de kubussen stonden in alle voorbeelden parallel t.o.v. elkaar. Het materiaal werd als homogeen, isotroop en lineair-elastisch verondersteld. Iedere kubus bestond uit één lineair achtknoops 3D-element. Er werden een geometrische niet-lineaire incrementele analyses uitgevoerd, waarbij in de incrementen gebruik werd gemaakt van de totale Lagrange methode. In de uitgevoerde analyses voldeed het contactalgoritme. In het contactvlak vond geen doordringing van knooppunten plaats. De door het algoritme gemaakte tying zorgde ervoor dat de spanningen en verplaatsingen van de knooppunten van het éne lichaam als functie van de knooppunten van het andere lichaam geschreven konden worden. Hierdoor is het verloop van de spanningen en de verplaatsingen continu over contactvlak.

Twee balken werden onder dezelfde contactcondities en op dezelfde wijze als de kubussen met elkaar in contact gebracht. De contactanalyses verliepen succesvol. Met het oog op de toepassingen van het algoritme in een complex 3D-model van de knie werd het algoritme tenslotte getest aan een vereenvoudigd axisymmetrisch model van de knie. Een cilinder met bolvormig uiteinde (femur) werd tegen een platte cilindervormige schijf (tibia) gedrukt. Het materiaal van femur en tibia werd homogeen, isotroop en lineair-elastisch verondersteld. De meshverdeling werd gemaakt m.b.v. achtknoops lineaire 3D-elementen. Er werd een geometrisch niet-lineaire analyse aan dit axisymmetrische model uitgevoerd. De resultaten werden vergeleken met een 2D-analyse van dit model.

Het verloop van de verplaatsing en de normaalspanning van het knooppunt van het femur, dat initieel tegen het tibia-oppervlak aanligt, werd bekeken in de 2D- en 3D-analyse. De resultaten lieten in de spanningen maximaal een verschil van 20% zien. Een oorzaak hiervoor zou enerzijds het voorkomen van elementen met 'collapsed nodes' in de 3D-mesh en anderzijds de gemaakte meshverdeling kunnen zijn.

In de beschouwde testvoorbeelden voldeed het contactalgoritme voor contact tussen deformeerbare lichamen. Tenslotte worden de volgende aanbevelingen gedaan m.b.t. het verschil in resultaat van de 2D- en 3D-analyse en het maken van een gestileerd model van de knie. Het gebruik van lineaire tetrahedrons in de 3D-mesh kan de resultaten van de contactanalyse verbeteren. In het model van femur en tibia kan een meniscus aangebracht worden. De resultaten van de 3D-analyse van dit model kunnen vergeleken worden met de resultaten van de axisymmetrische 2D-analyses van G. Schreppers en J. Jongen.

Inhoudsopgave

1	Inleiding	2
2	De werking van het contactalgoritme	3
2.1	Deformeerbaar-deformeerbaar contact	3
2.2	Wanneer komt een lichaam met een ander lichaam in contact?	3
2.3	Tying van de knooppunten in het contactvlak	4
2.3.1	Nummering van de lichamen	5
3	Testvoorbeelden van contactproblemen	6
3.1	Twee niet gelijke kubusvormige lichamen	6
3.1.1	resultaten en conclusie	7
3.2	Twee niet gelijke balkvormige lichamen	8
3.2.1	resultaten en conclusies	9
4	Een gestileerd model van femur en tibia	12
4.1	Het axisymmetrisch model	13
4.2	De axi-symmetrische 2D-mesh	14
4.2.1	Resultaten van de 2D-contactanalyse	14
4.3	De axi-symmetrisch 3D-mesh	15
4.3.1	Resultaten van de 3D-contactanalyse	16
4.4	Vergelijking van de resultaten van de 2D- met de 3D- contactanalyse	16
5	Conclusies en aanbevelingen	21
A	Regels voor het schrijven van contactalgoritmen	24
A.1	Algemene regels	24
A.2	Nummering van de lichamen in het contactalgoritme	24
B	Beschrijving van element 7	26
C	Beschrijving van element 10	33
D	Testen van elementtype 7 in een 3D-mesh	36

Hoofdstuk 1

Inleiding

In het eindige elementenpakket MARC is een contactalgoritme opgenomen dat enerzijds het contact tussen vervormbare lichamen en anderzijds het contact tussen starre en deformeerbare lichamen beschrijft. De werking van het contactalgoritme in tweedimensionale contactproblemen is al in kaart gebracht (J. Jongen [6]). Over de werking van het algoritme in driedimensionale contactproblemen was daarentegen nagenoeg niets bekend. Driedimensionale contactanalyses spelen een grote rol in de studie naar de krachtdoorleiding in het kniegewricht. In een gecompliceerd 3D EEM model zullen de algoritmen van MARC toegepast gaan worden. Het is daarom van belang voldoende inzicht te hebben in de werking van deze algoritmen.

In dit verslag werd de werking van het driedimensionale contactalgoritme voor deformeerbaar-deformeerbaar contact bekeken. Allereerst werden enkele eenvoudige contactproblemen geanalyseerd. Vervolgens werd er gekozen voor een complexere driedimensionale geometrie; een gestileerd 3D-model van het bovenbeen (femur) en het onderbeen (tibia) van de knie zonder zachte kraakbeenlagen.

In hoofdstuk 2 wordt kort uiteengezet hoe het contactalgoritme van MARC in 3D-analyses werkt. In hoofdstuk 3 wordt de deugdelijkheid met behulp van MARC versie-k5.2 van het contactalgoritme getest aan de hand van enkele testvoorbeelden, zoals die eerder door W. Meertens [1] in het eindige elementenpakket DIANA werden opgelost. Vervolgens wordt in hoofdstuk 4, op basis van het werk van G. Schreppers [5] en J. Jongen [6], een gestileerd 3D-model voor femur en tibia geconstrueerd. Aan de hand van dit model wordt het contactalgoritme in complexere situaties getest. De resultaten werden vergeleken met die van een contactanalyse van een axisymmetrisch 2D-model. In bijlage A worden vuistregels gegeven voor de nummervolgorde van de lichamen in het contactalgoritme. Bijlage B en C geven een beschrijving voor resp. elementtype 7 (lineaire achtknoops 3D-element) en elementtype 10 (lineair axisymmetrisch 2D-element). Bijlage D tenslotte geeft een eenvoudige testvoorbeeld weer, waarin de invloed op de contactanalyse van 'collapsed nodes' in een 3D-mesh werd onderzocht.

Hoofdstuk 2

De werking van het contactalgoritme

Het contactalgoritme, zoals het in MARC-k5.2 is opgenomen, is voor 2D-analyses al beschreven door J. Jongen [6]. De werking van het contactalgoritme voor 3D-analyses wordt in dit hoofdstuk beschreven. In MARC worden twee typen van contact onderscheiden: contact tussen deformeerbare lichamen en contact tussen deformeerbare en starre lichamen. Er wordt in dit verslag alleen gekeken naar wrijvingloos contact tussen twee deformeerbare lichamen. Aan de hand van deze contactsituatie wordt uiteengezet hoe MARC contact detecteert, de contactcondities voorschrijft en het contact in stand houdt.

2.1 Deformeerbaar-deformeerbaar contact

In MARC-k5.2 wordt aan de hand van een lijst van elementen een deformeerbaar lichaam beschreven. Het lichaamsoppervlak en de knooppunten op het oppervlak worden aan de hand van deze lijst bepaald. De elementzijden die het oppervlak van het lichaam vormen worden 'patches' genoemd. Een patch is een vlak met 4 knooppunten. Lichaamsdeformaties worden weergegeven door veranderingen in de positie van deze 'patches'.

2.2 Wanneer komt een lichaam met een ander lichaam in contact?

Wanneer een knooppunt van het éne lichaam binnen een contacttolerantie van het andere lichaam ligt, wordt er in MARC contact gedetecteerd tussen de lichamen. Deze contacttolerantie kan gezien worden als een band die over het lichaamsoppervlak heenligt. De grootte van deze band kan of zelf ingesteld worden of door MARC berekend wordt. Het knooppunt, dat zich in de contacttolerantie van het andere lichaam bevindt, wordt op het oppervlak van dat lichaam geplaatst. Op die manier zullen elementzijden die met elkaar in contact komen, netjes tegen elkaar aanliggen.

Het voorschrijven van een te hoge contacttolerantie kan ertoe leiden dat teveel knooppunten met het oppervlak contact maken. Deze knooppunten worden dan ten onrechte met het oppervlak verbonden. Een te kleine tolerantiewaarde leidt ertoe, dat een increment ge-

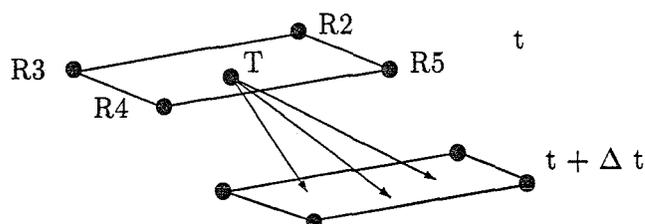
splitst wordt in een groot aantal kleinere incrementen, waardoor de rekentijd zal toenemen. De waarde die door MARC berekend wordt bedraagt $1/20$ van de kleinste elementzijde in de mesh.

Een knooppunt wordt beschouwd als zijnde niet meer in contact, wanneer een trekkracht ontstaat in dat knooppunt. Theoretisch zou dat bij iedere positieve trekkracht mogen gebeuren. Om soepele convergentie te waarborgen, mag er in MARC toch een kleine trekkracht ontstaan. MARC bepaalt de maximaal toelaatbare trekkracht uit de maximaal optredende residuele kracht in het hele model, zodat de fout in het contact altijd kleiner is dan een fout ergens anders in het model.

Het kan voorkomen dat er contact geconstateerd wordt tussen twee lichamen, maar dat er toch één of meerdere knooppunten doordringen in of loslaten van het andere lichaamsoppervlak. De oorzaak hiervoor is de volgorde waarin de tyings gegenereerd worden. Dit kan voorkomen worden door de lichaamsnumering te veranderen (paragraaf 2.3.1). Loslating van knooppunten in het contactvlak kan duiden op een te grote waarde voor de contacttolerantie.

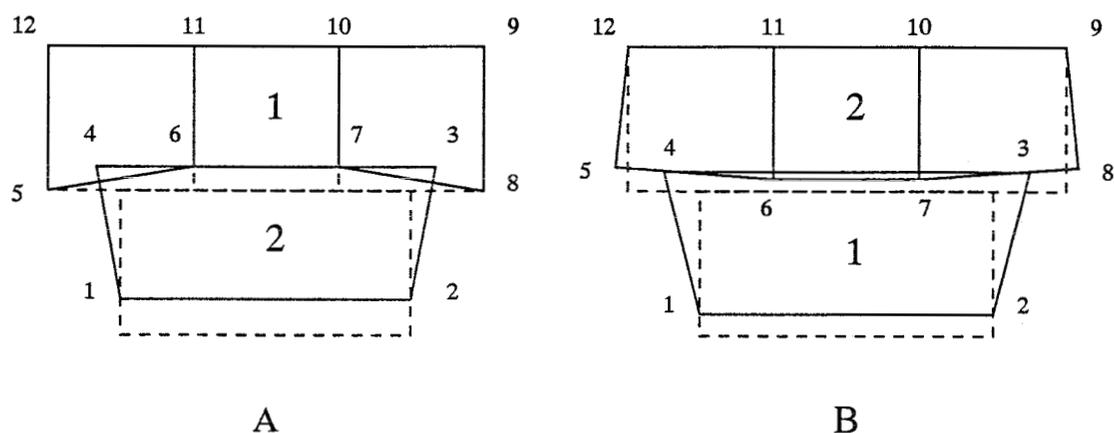
2.3 Tying van de knooppunten in het contactvlak

Wanneer twee deformeerbare lichamen met elkaar in contact gebracht worden, komt knooppunt T van het oppervlak van het éne lichaam in contact met het oppervlak met knooppunten van het andere lichaam. Wanneer een knooppunt van het éne lichaamsoppervlak een 'patch', met knooppunten R2, R3, R4, R5, van het andere lichaamsoppervlak raakt, wordt automatisch een tying aangemaakt (figuur 2.1). Een tying houdt in dat de verplaatsingen



Figuur 2.1: Tying die automatisch wordt gemaakt door het contactalgoritme

van de knooppunten (R2, R3, R4, R5) van de 'patch' een functie worden van de verplaatsing van knooppunt T. Knooppunt T is een 'tied node' en R2, R3, R4, R5 zijn 'retained nodes'. Wanneer de deformatie van het lichaam zo groot is dat het knooppunt langs het lichaamsoppervlak gaat glijden, dan zal het knooppunt naar de ernaast liggende 'patch' glijden. Er wordt een nieuwe tying van het knooppunt met de knooppunten van de 'patch', waarop het zich nu bevindt, gemaakt. Deze methode voor het maken van tyings, noemt men: 'variabel tying method'. Het voordeel van deze methode is dat het geen extra variabelen in de oppervlakteknooppunten creëert en het produceert geen stijfheidsmatrix met nullen op de diagonaal. Gedurende de analyse wordt aan het begin van ieder increment de contactcondities gecontroleerd en indien nodig worden de tyings aangepast.



Figuur 2.2: Het verloop van het contactalgoritme ten gevolge van de lichaamsnummering

2.3.1 Nummering van de lichamen

Bij de start van de incrementele analyse, het 0^{de} increment, wordt het probleem zonder belasting doorgerekend en gecontroleerd of er contact is. Wanneer er contact is, wordt automatisch een tying voor de knooppunten van het contactvlak gegenereerd. De opbouw van de tying is afhankelijk van de volgorde van nummering van de lichamen in de invoerfile.

In figuur 2.2 worden twee lichamen op twee verschillende manieren met elkaar in contact gebracht. De situaties zijn zo gekozen dat de invloed van de verschillende lichaamnummering duidelijk wordt weergegeven. In situatie A heeft de grote rechthoek lichaamnummer 1 en de kleine 2. De tying die het contactalgoritme genereert voor verplaatsing van de knooppunten in het contactvlak, luidt: $u_4 = f(u_5, u_6)$ en $u_3 = f(u_7, u_8)$. Situatie B laat een andere lichaamsnummering zien, waardoor ook de functieomschrijving van de tying verandert: $u_6 = f(u_3, u_4)$ en $u_7 = f(u_3, u_4)$. De resultaten van de contactanalyse veranderen diensgevolge. In beide situaties is voldaan aan krachterevenwicht. Maar door de manier waarop de tyings gegenereerd worden, vindt er toch doordringing plaats.

Bijlage A.2 geeft een leidraad voor de nummervolgorde van de lichamen in het contactalgoritme. Het kan voorkomen dat er meerdere, zelfs tegenstrijdige, vuistregels van toepassing zijn voor één en hetzelfde contactprobleem. Aangezien alle vuistregels even zwaar wegen, moet er aan de hand van de voorschriften verschillende nummervolgorden voor de lichamen uitgeteerd, totdat de analyse succesvol verloopt.

Hoofdstuk 3

Testvoorbeelden van contactproblemen

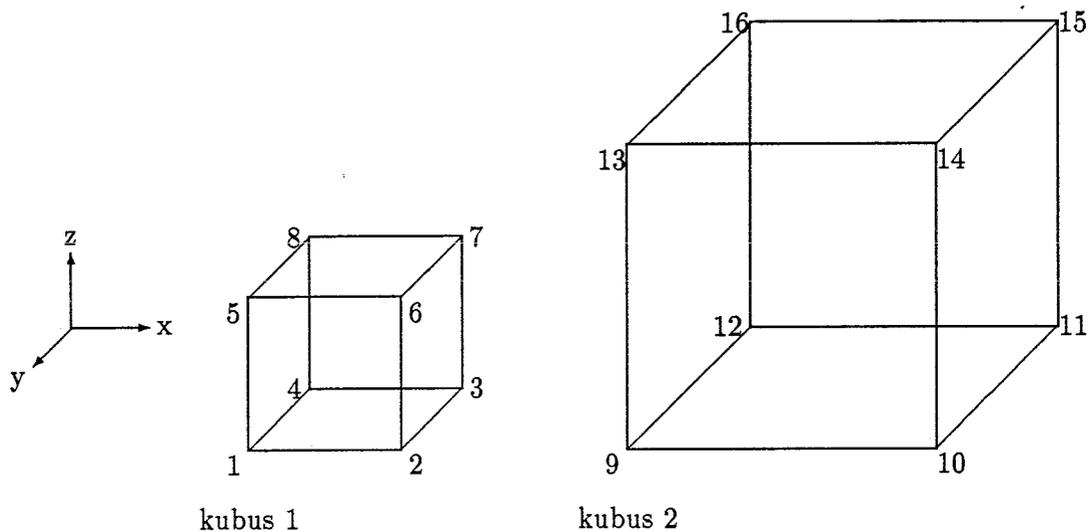
In het eindige elementenpakket DIANA zijn eerder door W. Meertens [1] 3D testvoorbeelden met contact uitgevoerd. De analyses verliepen niet succesvol. In MARC werden enkele van die testvoorbeelden uitgevoerd om te zien of deze programmatuur wel voldoet voor 3D-contactanalyses. In de testvoorbeelden werd gebruik gemaakt van achtknooppunts, lineaire 3D-elementen ('bricks': elementtype 7 (bijlage B)). Allereerst werden twee kubussen van verschillende afmeting met elkaar in contact gebracht. Er werden verschillende analyses uitgevoerd, waarbij de kubussen op verschillende manieren ten op zichte van elkaar gepositieerd werden. Tenslotte werden twee balken, bestaande uit meerdere elementen, tegen elkaar aangedrukt.

3.1 Twee niet gelijke kubusvormige lichamen

Twee kubussen van niet gelijke afmetingen werden op verschillende manieren met elkaar in contact gebracht. De contactvlakken van de kubussen stonden in alle testvoorbeelden parallel ten opzichte van elkaar (figuur 3.1). De kubussen werden zodanig ten opzichte van elkaar ge-positioneerd dat de knooppunten 2 en 3 van kubus 1 midden tussen knooppunten 9 en 12 van kubus 2 lagen. In de testvoorbeelden 1, 2 en 4 werden in de uitgangsituatie kubus 1 (vlak:2, 3, 7, 6) tegen kubus 2 (vlak:9, 12, 13, 16) geplaatst. In testvoorbeelden 3 en 5 was er initieel geen contact tussen kubus 1 en 2. De afstand tussen kubus 1 en 2 was hier net zo groot als de contacttolerantie.

Kubus 1 had de afmetingen van $2 \times 2 \times 2$ mm kubus 2 van $4 \times 4 \times 4$ mm (figuur 3.1). Iedere kubus bestond uit één element. Het materiaal van de kubussen werd homogeen, isotroop en lineair elastisch verondersteld ($E = 500\text{MPa}$ en $\nu = 0,2$). Op de volgende manieren werden ze met elkaar in contact gebracht (tabel 3.1):

1. De grondvlakken van beide lichamen, opgespannen door de knooppunten 1,2,3,4 en 9,10,11 en 12, lagen in hetzelfde vlak. De verplaatsing van de knooppunten van het rechterzijvlak van kubus 2 (knooppunten 10,11,14 en 15) werd in alle richtingen onderdrukt. (knooppunten 1,4,5 en 8). Initieel lag het rechter zijvlak van kubus 1 tegen het linker zijvlak van kubus 2 aan.



Figuur 3.1: Twee niet gelijke kubusvormige lichamen

2. Het uitgangspunt was hetzelfde als in voorbeeld 1. Echter de verplaatsing in z -richting van knooppunten 9 en 12 werd nu onderdrukt.
3. Het uitgangspunt was hetzelfde als in voorbeeld 2. Kubus 1 lag nu niet tegen kubus 2 aan. De afstand tussen de kubussen was gelijk aan de waarde die MARC berekend had voor de contacttolerantie ($1/20$ van de kleinste elementzijde in de mesh: $1/20 \cdot 2 = 0,1$).
4. Kubus 1 werd zodanig t.o.v. kubus 2 in z -richting verschoven dat het rechterzijvlak van kubus 1 op het midden van het linkerzijvlak van kubus 2 kwam te liggen. Kubus 1 lag initieel niet tegen kubus 2 aan.
5. Uitgangssituatie was als in voorbeeld 4, terwijl er een spleet van 0,1 tussen kubus 1 en 2 was.

In alle testvoorbeelden werd per increment een verplaatsing in positieve x -richting van 0,1 mm voorgeschreven aan het linker zijvlak van kubus 1 (vlak: 1, 4, 8, 5). Gedurende 10 incrementen werd er een geometrische niet-lineaire berekening uitgevoerd. Hierbij werd gebruik gemaakt van de totale Lagrange methode.

3.1.1 resultaten en conclusie

De resultaten van MARC na 10 incrementen staan weergegeven in tabel 3.1. In de eerste kolom staat het nummer van het betreffende voorbeeld. In de kolom met de titel ' $x - y$ '-vlak is de ligging van de knooppunten weergegeven. De derde kolom geeft de volgorde van de body-nummering in het contactalgoritme weer ('1:2'; de kleine kubus krijgt body-nummer 1, de grote body-nummer 2). In de vierde kolom is d.m.v. 'ja' of 'nee' aangegeven of MARC contact vaststelt. Wanneer er geen contact werd vastgesteld, dan vond doordringing plaats zonder dat MARC dat corrigeerde. Voor alle berekende gevallen was de som van de residuele krachten in de orde grootte van 10^{-14} N.

In voorbeeld 1 was er sprake van doordringing. Wanneer de lichaamsnummering werd omgedraaid, was er nog steeds sprake van doordringing. De uitvoerfile gaf aan dat de analyse succesvol verlopen was. De analyse werd bekeken met MENTATII-v1.2. In increment 2 drongen knooppunten 2 en 3 door in kubus 2. Knooppunten 6 en 7 bleven op het linkerzijvlak van kubus 2 liggen. Bij hogere incrementen gleden knooppunten 6 en 7 langs linkerzijvlak omhoog en drongen knooppunten 2 en 3 verder door. Hierdoor draaiden de kubussen inelkaar. In voorbeeld 2 werd de verplaatsing van de knooppunten 2,3,9 en 12 in z -richting onderdrukt om het inelkaar draaien van de kubussen te voorkomen. De analyse verliep succesvol (in de uitvoerfile: exit number 3004). De uitvoerfile in MENTATII-v2.1 liet zien dat er geen doordringing plaatsvindt. Knooppunten 2 en 3 bleven op de ribbe van knooppunten 9 en 12 liggen. De resterende testvoorbeelden gaven goede resultaten. Er werd in alle gevallen contact gedetecteerd en er vond geen doordringing plaats.

Er kan geconcludeerd worden dat de programmatuur van het contactalgoritme voldoet voor bovenstaande contactproblemen. MARC constateert contact wanneer een lichaam in de contacttolerantie van een ander lichaam ligt. De programmatuur laat toe dat in een succesvolle analyse (exit number 3004) doordringing van knooppunten optreedt. In de uitvoerfile wordt niet expliciet aangegeven dat er knooppunten in een lichaam doordringen. Daarvoor moet de uitvoerfile zorgvuldig m.b.v. een postprocessor als MENTATII-v1.2 bekeken worden.

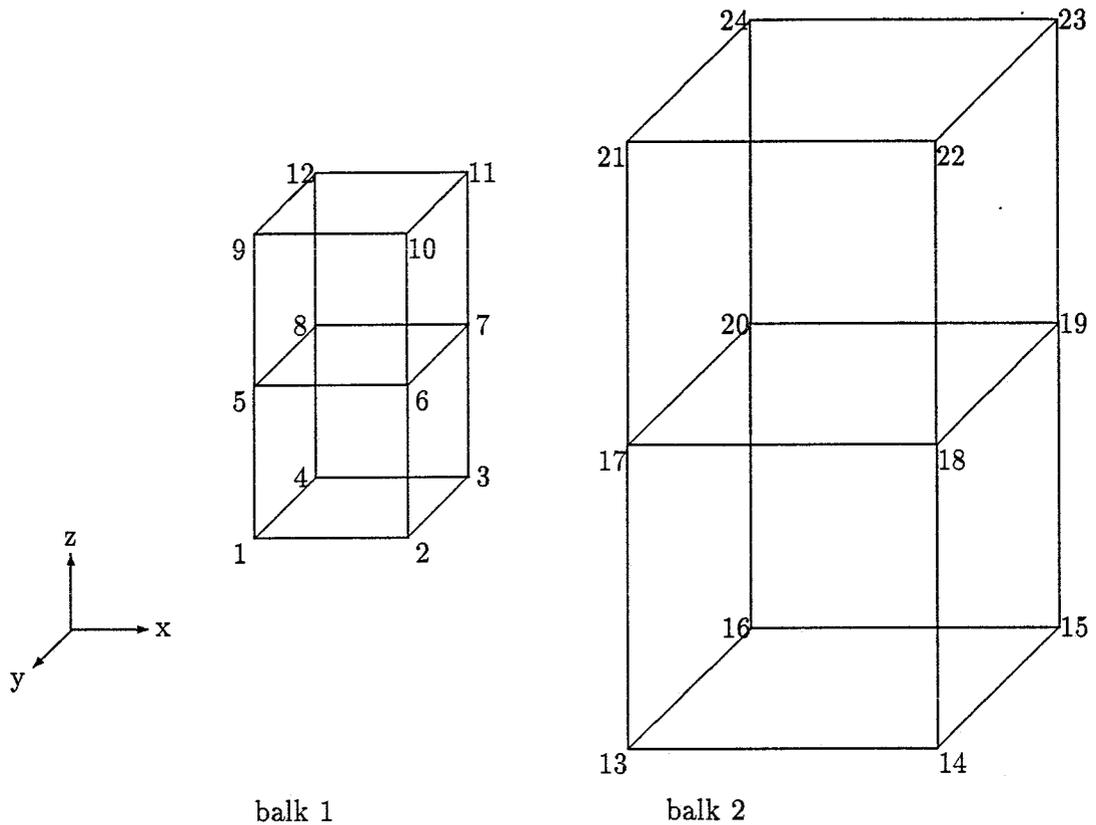
3.2 Twee niet gelijke balkvormige lichamen

Twee balken worden met hun lange zijden met elkaar in contact gebracht (figuur 3.2). De balken werden zodanig ten opzichte van elkaar gepositioneerd dat de knooppunten 6 en 7 midden tussen de knooppunten 17 en 20 lagen. Er werden twee testvoorbeelden geanalyseerd. In het éne voorbeeld lagen de balken initieel tegen elkaar, in het andere waren de balken op een afstand zo groot als de contacttolerantie van elkaar geplaatst. In beide situaties zijn de balken voor MARC in contact.

De balken bestonden ieder uit twee elementen (figuur 3.2). Balk 1 had de afmetingen van $2 \times 2 \times 4$ mm en balk 2 van $4 \times 4 \times 8$ mm. Het materiaal van de balken was homogeen, isotroop en lineair elastisch ($E = 500$ MPa en $\nu = 0,2$). De volgende randvoorwaarden werden aan de testvoorbeelden toegeschreven:

1. De verplaatsing van de rechterzijkant van balk 2 (knooppunten 14,15,18,19,22 en 23) werd in alle richtingen onderdrukt. Het rechter zijvlak van balk 1 en het linker zijvlak van balk 2 waren initieel in contact. De contactvlakken waren evenwijdig. In de uitgangstoestand is er contact en zijn de contactvlakken evenwijdig.
2. Uitgangstoestand was hetzelfde als in voorbeeld 1, met die uitzondering dat balk 1 niet tegen balk 2 lag. De afstand tussen de twee balken bedroeg 0,1 mm.

Er werd in de testvoorbeelden per increment een verplaatsing in x -richting van 0,1 mm op het linkerzijvlak van de balk 1 geplaatst (vlak:1, 4, 8, 12, 9, 5). Gedurende 10 incrementen werd een geometrische niet-lineaire berekening uitgevoerd. Hierbij werd gebruik gemaakt van de totale Lagrange methode.



Figuur 3.2: De knooppunten zoals ze voorgeschreven zijn voor de balken

3.2.1 resultaten en conclusies

De resultaten van de berekeningen in MARC met deze voorbeelden staan vermeld in tabel 3.2. In beide testvoorbeelden werd er in MARC contact gedetecteerd en verliep de analyse succesvol. Het veranderen van de lichaamnummering was niet van invloed op de uitkomst van de contactanalyse.

no.	$x - z$ -vlak	body nr.	contact
1		1:2	nee
		2:1	nee
2		1:2	ja
		2:1	ja
3		1:2	ja
		2:1	ja
4		1:2	ja
		2:1	ja
5		1:2	ja
		2:1	ja

Tabel 3.1: Resultaten van contactproblemen met twee ongelijkvormige kubussen

no.	$x - z$ -vlak	body nr.	contact
1		1:2	ja
		2:1	ja
2		1:2	ja
		2:1	ja

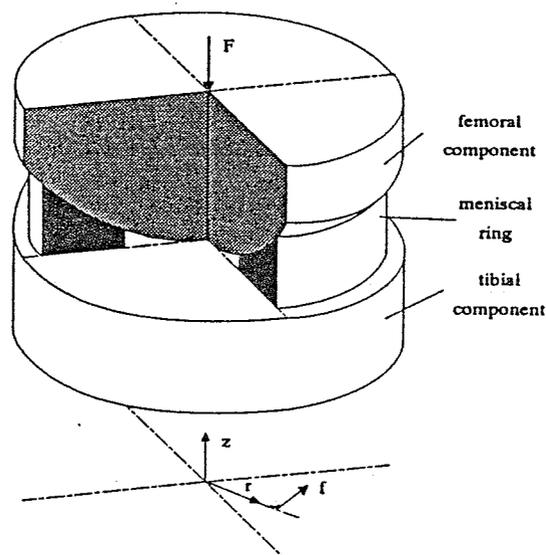
Tabel 3.2: Resultaten van contactproblemen met twee balken

Hoofdstuk 4

Een gestileerd model van femur en tibia

De test, die in dit hoofdstuk beschreven wordt, is een tussenstap tussen eenvoudige tests zoals beschreven in hoofdstuk 3 en toepassing in een complex model van het kniegewricht. Als uitgangspunt wordt een axisymmetrisch model gekozen, dat eerst door G. Schreppers [5] in DIANA en later door J. Jongen [6] in MARC gepresenteerd is (figuur 4.1). Dit model bestond uit een cilinder met een bolvormig uiteinde (het femur) dat tegen een platte cilindervormige schijf (de tibia) werd gedrukt met daartussen een ringvormige schijf (meniscus). In het femur en tibia waren zachte lagen aangebracht.

Het model (figuur 4.1) werd vereenvoudigd door de meniscus en de zachte lagen weg te laten. De werking van het contactalgoritme kan nu bekeken worden voor contact tussen twee geometrisch complexere, deformeerbare lichamen met dezelfde materiaaleigenschappen. Aan dit model werd zowel een 2D- als een 3D-analyse uitgevoerd en de resultaten van de analyses werden met elkaar vergeleken.



Figuur 4.1: Het axisymmetrisch kniemodel

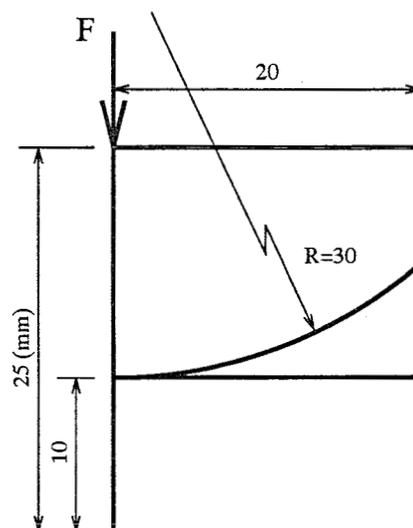
4.1 Het axisymmetrisch model

Een dwarsdoorsnede van het model staat met de afmetingen weergegeven in figuur 4.2. Dit axisymmetrisch model werd aan een driedimensionale analyse onderworpen. Het materiaal van femur en tibia werd homogeen, isotroop en lineair elastisch verondersteld. De enige belangrijke materiaalparameters waren de Young's modulus E en de Poisson ratio ν , resp. 500 MPa en 0,2.

Er werd een tying aan het bovenzvlak van het femur voorgeschreven, zodat het gehele bovenzvlak zich in de belastingsrichting verplaatste. In radiale richting werden geen restricties aan het bovenzvlak voorgeschreven. De verplaatsing in radiale richting van de symmetrie-as van het model werd onderdrukt om verschuiving in radiale richting van het femur t.o.v de tibia te voorkomen. Alle punten van het ondervlak, behalve op de symmetrie-as, kunnen alleen in radiale richting vrij bewegen. Er werd een axiale belasting loodrecht op het midden van het bovenzvlak van het femur aangebracht. In de onbelaste situatie ligt het femur tegen de tibia aan. Het contact tussen femur en tibia is wrijvingsloos.

De incrementele contactanalyses zijn uitgevoerd voor axiale belastingen tot 1000 N. Per increment werd er 100 N voorgeschreven. De niet-lineaire geometrische analyses werden in MARC-k6.1 uitgevoerd, waarbij in de berekening van de incrementen gebruik werd gemaakt van de totale Lagrange methode. De bandbreedte van de stijfheidsmatrix werd geoptimaliseerd m.b.v. het Cuthill-McKee algoritme.

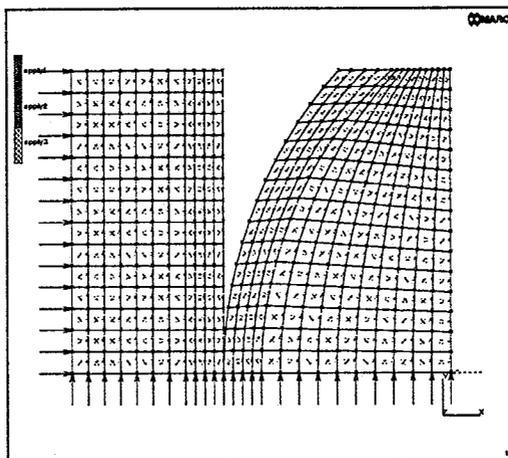
De respons van het model op de aangebrachte belasting werd geanalyseerd door het verloop van de axiale verplaatsing en normaalspanning (σ_{yy}) in het contactvlak te bekijken. De analyse werd eerst uitgevoerd aan een 2D-axisymmetrische mesh. Vervolgens werden de resultaten van deze analyse vergeleken worden met die van een 3D-axisymmetrische contactanalyse van dit model.



Figuur 4.2: Afmetingen van het gestileerde model van femur en tibia

4.2 De axi-symmetrische 2D-mesh

Aan de hand van het 2D-model van G. Schreppers 4.2 is in MENTATII-v2.1 een axisymmetrische 2D-mesh voor femur en tibia zonder zachte kraakbeenlagen geconstrueerd. De mesh werd gemaakt met lineaire axisymmetrische 4-knoopselementen (MARC: elementtype 10 (bijlage C)). Dit resulteerde in een mesh met 104 elementen en 208 knooppunten. Figuur 4.3 laat



Figuur 4.3: 2D-model van femur en tibia met de randvoorwaarden. Een pijl is de onderdrukte verplaatsing in de richting van de pijl

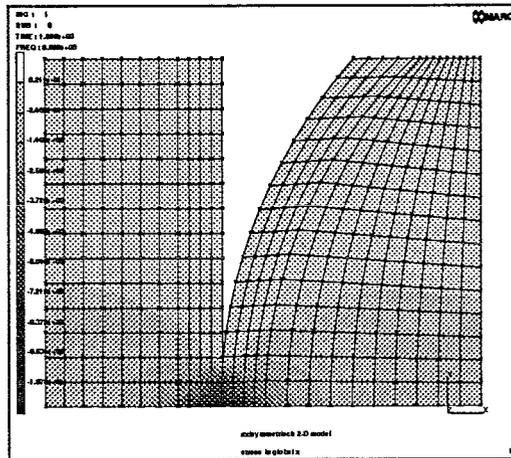
de meshverdeling met de daarop aangebrachte randvoorwaarden, zoals die in paragraaf 4.1 beschreven zijn, zien.

4.2.1 Resultaten van de 2D-contactanalyse

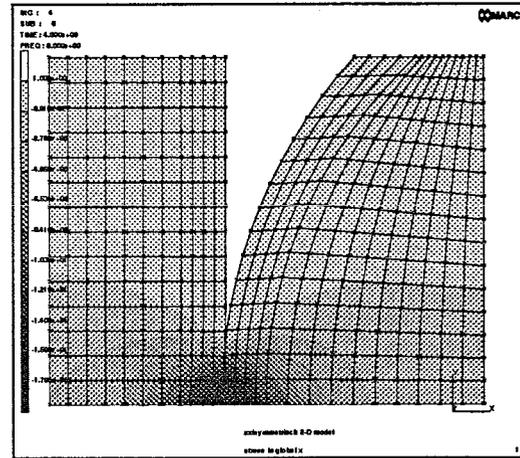
Gedurende het verloop van de stage is er een 'update' van MARC-k5.2 verschenen (MARC-k6.1), waardoor de contactanalyses in dit hoofdstuk met de nieuwe versie zijn uitgevoerd. Dit had verder geen consequenties voor de tests van het contactalgoritme. Tegelijkertijd verscheen er een 'update' van pre- en postprocessor MENTATII-v1.2 (MENTATII-v2.1).

De analyse van het model verliep succesvol en de rekestijd bedroeg 41 sec. De uitvoerfile werd in MENTAT-v2.1 bekeken. De analyse van het elastische 2D-model werd in het 0^{de} increment gestart. De mesh werd in dan zijn geheel doorgerekend zonder dat er een externe belasting opstond. De randvoorwaarden worden ingelezen (figuur 4.3) en de contactcondities bepaald. In het 1^{ste} increment wordt er voor de eerste keer een belasting van 100 N op het model gezet. Figuur 4.4 t/m 4.7 laat de spanningsverdeling in de gedeformeerde geometrie voor de incrementen 1, 4, 7 en 10 zien. De spanning is de normaalspanning in x -richting. Donkere gebieden geven hoge spanningen weer, lichtere gebieden lage spanningen. In het contactgebied is het spanningsverloop continu voor alle incrementen. De onderkant van het femur in het contactvlak ligt netjes tegen de bovenkant van de tibia aan. De knooppunten in het contactvlak dringen niet door en laten ook niet los gedurende de verschillende incrementen.

Om de resultaten van een 2D-contactanalyse met een 3D-contactanalyse te kunnen verge-



Figuur 4.4: Eerste increment:
F=100 N



Figuur 4.5: Vierde increment:
F=400 N

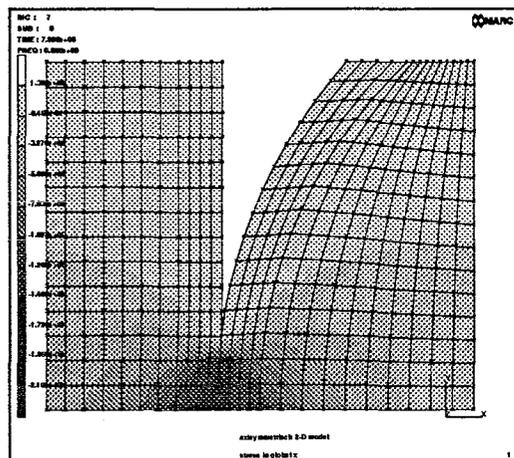
lijken werd gekeken naar de uitvoer van de analyse van dat knooppunt van het femuroppervlak, dat initieel tegen het tibia-oppervlak ligt. Figuur 4.8 geeft de verplaatsing in x -richting van dit knooppunt tegen de aangebrachte belasting weer. Figuur 4.9 laat de normaalspanning in x -richting tegen de aangebrachte belasting zien.

4.3 De axi-symmetrisch 3D-mesh

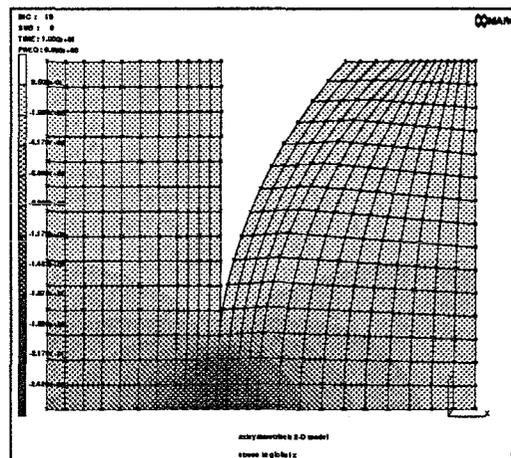
Een 3D-mesh van femur en tibia werd aan de hand van de afmetingen van het 2D-model in figuur 4.2 in I-DEAS geconstrueerd. De 2D-mesh, zoals die in paragraaf 4.2 werd gedefinieerd, werd 360° om haar symmetrie-as geroteerd. Er is nu een axisymmetrisch 3D-mesh ontstaan, die opgebouwd is uit lineaire 'bricks' (elementtype 7 (bijlage B)). De nog aanwezige 2D elementen werden uit het model verwijderd. Door de rotatie om de symmetrie-as werden de elementen, die tegen de symmetrie-as lagen, vervormd tot prisma's. De knooppunten van één zijde van het element zijn overelkaar geschoven ('collapsed nodes'). Dit uitte zich als volgt in het datadeck:

```
CONNECTIVITY
1 7 1 2 3 4 5 6 7 8
2 7 1 2 3 1 4 5 6 4
```

Het eerste getal geeft het elementnummer weer, het tweede getal het elementtype. De resterende getallen zijn de knooppunten van het element, die in deze volgorde doorlopen worden. Element 1 (figuur 4.10) geeft de knooppuntvolgorde van een lineaire 'brick' weer. Element 2 heeft 'collapsed nodes', waardoor knooppunten dubbel voorkomen in de nummering van het element (bijlage D). De randvoorwaarden, zoals ze voor het 2D-model beschreven zijn, waren ook voor het 3D-model van toepassing (figuur 4.11). In de 3D-analyse moest extra een starre lichaamsbeweging onderdrukt worden, namelijk de rotatie om de symmetrie-as. Dit werd voorkomen door de volgende extra randvoorwaarden te definiëren:



Figuur 4.6: Zevende increment:
F=700 N



Figuur 4.7: Tiende increment:
F=1000 N

- De verplaatsing in x -richting van de knooppunten die liggen op $x = 0$ en $z = \pm 20$, behalve degene die in het bovenvlak van het femur liggen, werd onderdrukt.
- Idem werd de verplaatsing in z -richting van de knooppunten gelegen op $x = \pm 20$ en $z = 0$, behalve degene die in het bovenvlak van het femur liggen, onderdrukt.

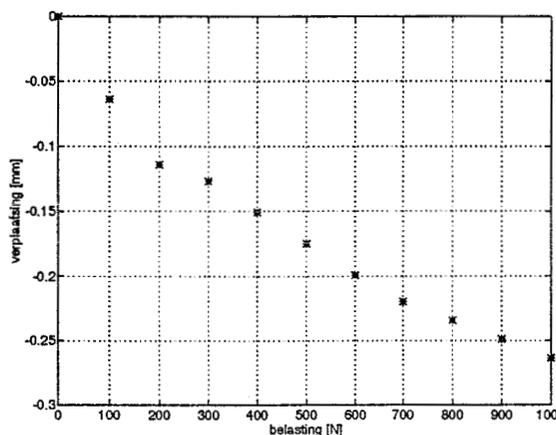
Het femur is opgebouwd uit 1151 en de tibia uit 721 elementen. Het totale aantal knooppunten bedroeg 2175. Aan de hand van de vuistregels voor de lichaamsnummering bij contact (bijlage A), kreeg het femur bodynr. 1 en de tibia bodynr. 2.

4.3.1 Resultaten van de 3D-contactanalyse

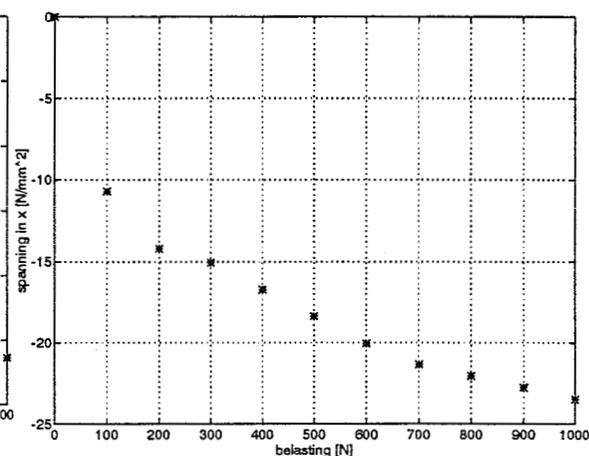
De analyse verliep succesvol en de rekestijd bedroeg 41 minuten. De uitvoerfile werd bekeken met MENTATII-v2.1. Figuur 4.12 t/m 4.15 laat de spanningsverdeling in de gedeformeerde geometrie van het elastisch 2D-model zien voor increment 1, 4, 7 en 10. De spanning is de normaalspanning in x -richting. Donkere gebieden geven hoge spanningen weer, lichtere gebieden lage spanningen. In het contactgebied is het spanningsverloop continu voor alle incrementen. De figuren 4.12 t/m 4.15 komen overeen met de resultaten van 2D-contactanalyse van paragraaf 4.2 (figuren 4.12 t/m 4.15).

4.4 Vergelijking van de resultaten van de 2D- met de 3D- contactanalyse

Een nauwkeuriger vergelijk tussen de resultaten van de 3D- met de 2D-contactanalyse kunnen we krijgen door de data-uitvoer van één knooppunt te bekijken. Namelijk het knooppunt van het femuroppervlak, dat initieel in contact is met het tibia-oppervlak. Figuur 4.16 laat de verplaatsing in axiale richting van dit knooppunt tegen de aangebrachte belasting zien, voor zowel de 2D- als de 3D-analyse. Increment 3 t/m 7 geven hetzelfde resultaat te zien. De



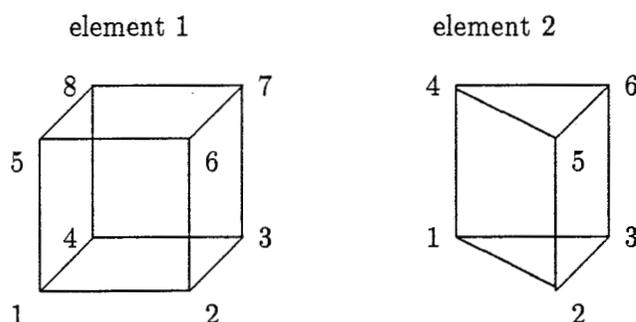
Figuur 4.8: Axiale verplaatsing van het knooppunt van het femur dat op het tibia-oppervlak ligt



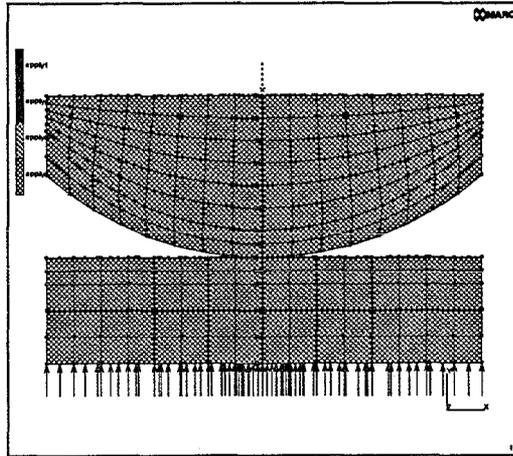
Figuur 4.9: Axiale normaalspanning van het knooppunt van het femur dat op het tibia-oppervlak ligt

overige incrementen laten een afwijking van ongeveer 10% zien.

Figuur 4.17 laat voor hetzelfde knooppunt het verloop van de normaalspanning in axiale richting tegen de aangebrachte belasting zien. Er treedt nu een duidelijk verschil op in de oplossing van de twee modellen. De afwijking in de oplossing bedraagt maximaal 20%. Het lineaire axisymmetrische element (bijlage C) dat in de 2D-mesh werd gebruikt heeft 4 integratiepunten. De lineaire 'brick' (bijlage B) in de 3D-mesh heeft 8 integratiepunten. Het verschil in de resultaten van de analyses kan niet liggen in het aantal integratiepunten dat in de beide meshen voorkomt. Een oorzaak zou het voorkomen van elementen met 'collapsed nodes' kunnen zijn (bijlage D). Er is tevergeefs geprobeerd, een 3D-contactanalyse van dit model met een mesh die volledig bestond uit vervormde lineaire 'bricks' uit te voeren. Het integratieproces convergeerde niet. Hieruit kon geconcludeerd worden dat er slechts een beperkt aantal

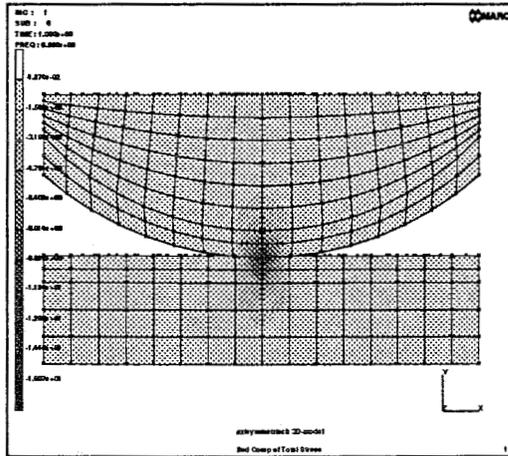


Figuur 4.10: Elementtype 7 enerzijds als 'brick' anderzijds met 'collapsed nodes'

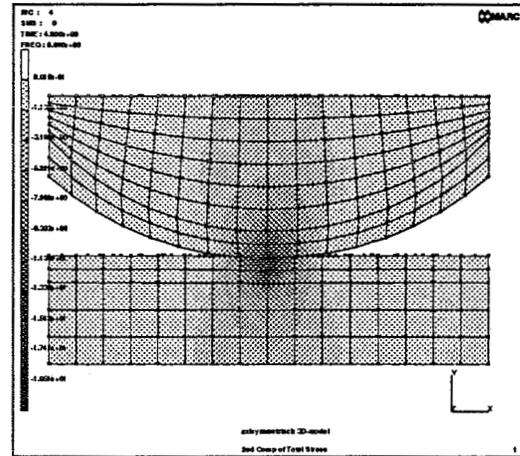


Figuur 4.11: Doorsnede van femur en tibia met de randvoorwaarden

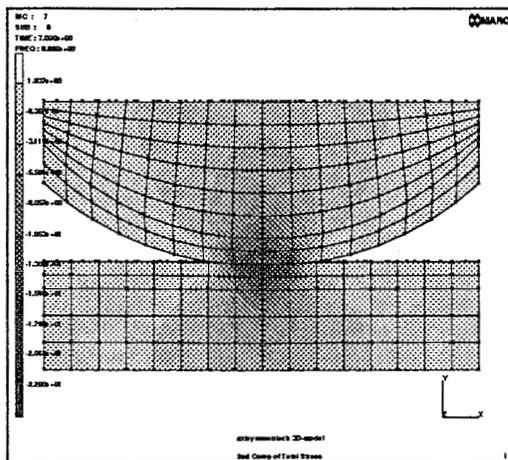
gedeformeerde 'bricks' in een 3D-mesh aanwezig mogen zijn. In hoeverre de aanwezigheid van deze gedeformeerde 'bricks' de resultaten van de contactanalyse beïnvloeden is niet duidelijk geworden.



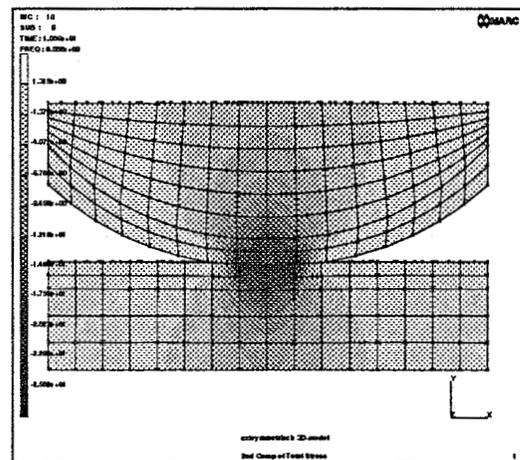
Figuur 4.12: Eerste increment:
F=100 N



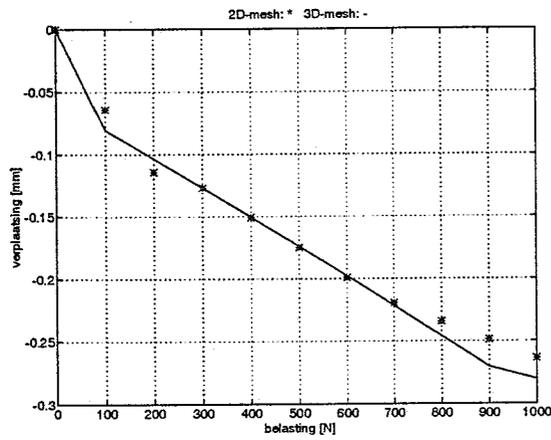
Figuur 4.13: Vierde increment:
F=400 N



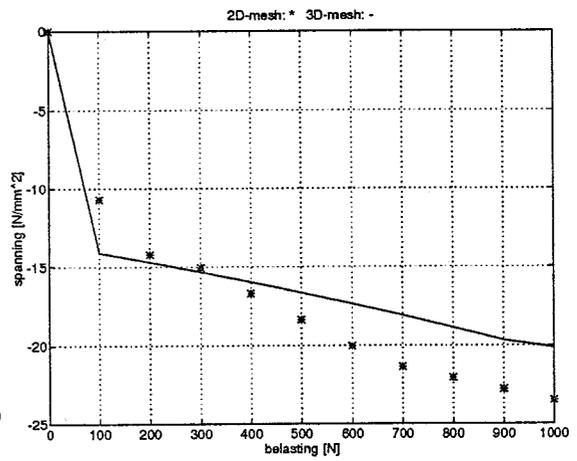
Figuur 4.14: Zevende increment:
F=700 N



Figuur 4.15: Tiende increment:
F=1000 N



Figuur 4.16: Axiale verplaatsing van het knooppunt van het femur dat op het tibia-oppervlak ligt



Figuur 4.17: Normaalspanning in axiale richting van het knooppunt van het femur dat op het tibia-oppervlak ligt

Hoofdstuk 5

Conclusies en aanbevelingen

Driedimensionale contactanalyses spelen een grote rol in de studie naar de krachtdoorleiding in het kniegewricht. In een gecompliceerd 3D EEM model van dit gewricht zullen de algoritmen van MARC toegepast gaan worden. Om inzicht te krijgen in de werking van het contactalgoritme voor deformeerbaar-deformeerbaar contact, zijn aan de hand van eenvoudige voorbeelden contactanalyses uitgevoerd. Uit de resultaten van de analyses kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

- Het contactalgoritme van MARC voldoet voor het beschrijven van contact tussen eenvoudige driedimensionale geometriën. De resultaten van de contactanalyse werden met de postprocessor MENTATII bekeken. De elementzijden van de verschillende lichamen bleven in het contactvlak netjes tegen elkaar liggen gedurende de incrementele contactanalyses. Er vond geen doordringing van een knooppunt in of loslating van een knooppunt van een lichaam in het contactvlak plaats. De tying, die door het contactalgoritme wordt aangemaakt voor de knooppunten in het contactvlak, voldeed in de uitgevoerde analyses. In het contactvlak worden de verplaatsingen van de knooppunten van het éne lichaam als functie van de verplaatsingen van de knooppunten van het andere lichaam geschreven. Hierdoor is het verloop van de normaalspanning en de verplaatsing in de richting van de aangebrachte belasting continu in het contactvlak.
- De volgorde van de lichaamsnummering in het contactalgoritme is conform de voorgescreven vuistregels. Deze volgorde is van belang voor de tying die gemaakt wordt in het contactalgoritme. Door verandering van lichaamsnummering in het datadeck kan doordringing van het éne lichaam in het andere lichaam voorkomen worden. Wanneer meerdere vuistregels van toepassing zijn voor de gemaakte meshverdeling, moet er aan de hand van de vuistregels gezocht worden naar de optimale nummering van de lichamen. Alle vuistregels gelden even zwaar.

Alvorens een succesvolle analyse aan een complexe geometrische 3D model te kunnen uitvoeren, zouden de volgende contactsituaties bekeken moeten worden:

- Wanneer er 3D-meshverdeling gemaakt wordt, die niet axisymmetrisch is, biedt I-DEAS niet langer de mogelijkheid de meshverdeling met lineaire 'bricks' te maken. Het alternatief is het gebruik van lineaire tetrahedrons. Het gestileerde 3D-model van femur en tibia kan hiervoor gebruikt worden. De resultaten van de analyse kunnen vergeleken

worden met de axisymmetrische 2D- en 3D-contactanalyse. Tevens kan op deze manier de invloed van de meshverdeling op de nauwkeurigheid van de oplossing bekeken worden.

- Toevoegen van meniscus en zachte lagen in het gestileerde kniemodel, om met name de krachtdoorleiding in de knie te bekijken. De werking van het contactalgoritme wordt nu bekeken voor contact tussen drie deformeerbare lichamen. Dit is het model van G. Schreppers. De resultaten van de 3D-analyse in MARC kan vergeleken worden met de 2D-axisymmetrische berekeningen zoals die door J. Jongen zijn uitgevoerd.

Bibliografie

- [1] Meertens W.: *Het gebruik van contactelement CONT3 in DIANA-versie 5.1*
WFW-rapport 94.006
- [2] Konter A.W.A.: *FEM analysis of contact in metal forming and rubber*
MARC Analysis Research Corporation - Europe
Congresverslag, Zoetermeer, april 22-23, 1993
- [3] The Customer Support Staff: *Automated contact analysis using MARC*
MARC Analysis Research Corporation - Palo Alto, California
Paper: Contact analysis
- [4] Tomlin M.: *Contact analysis hints*
MARC Analysis Research Corporation - Palo Alto, California
Paper: Contact analysis hints
- [5] Schreppers G.J.: *Force transmission in the tibio-femoral contact complex*
TU Eindhoven 1991
- [6] Jongen J.H.: *The tibio-femoral joint model in MARC*
WFW-rapport 94.119

Bijlage A

Regels voor het schrijven van contactalgoritmen

Onderstaande regels [3] [4] geven een leidraad voor het voorschrijven van contactalgoritmen. Wanneer twee of meer regels van toepassing zijn, sluit de ene de andere regel niet uit. Het is dan aan te raden de contactanalyse voor verschillende volgorde van lichaamsnummeringen uit te rekenen. De beste nummering aan de hand van de resultaten te kiezen.

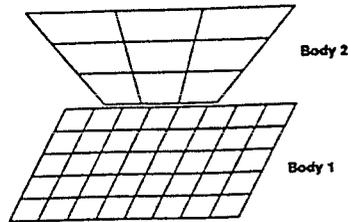
A.1 Algemene regels

1. Een knooppunt, dat in contact kan komen met een vast oppervlak, dient niet opgenomen te zijn in een tying, zowel niet als een 'getied' als een 'retained' knooppunt.
2. Een element kan alleen toebehoren aan één lichaam. Evenzo ligt een knooppunt in één lichaam. Het is niet noodzakelijk dat elk element in een lichaam ligt.
3. Het gebruik van **contact table** en **contact node** reduceert de rekentijd.
4. Gebruik het commando **optimize** om de bandbreedte te minimaliseren. Gedurende het contact tussen twee deformeerbare lichamen leidt het veranderen van de contactcondities tot veranderingen in de bandbreedte van de stijfheidsmatrix. **Optimize** zorgt voor optimalisatie van de bandbreedte wanneer het contact verandert.
5. Elementen die niet in contact komen, hoeven niet opgenomen te zijn in de definiëring van een lichaam.
6. Increment 0 is een nulstap in de contact-analyse. Belasting, die in de 'model definition section' is voorgeschreven, zal in increment 0 niet op het model geplaatst worden. In increment 1 zal de voorgeschreven belasting op het model geplaatst worden.

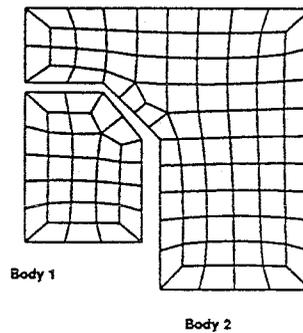
A.2 Nummering van de lichamen in het contactalgoritme

1. Deformeerbare lichamen dienen gedefinieerd te worden voor starre lichamen. Deze regel kan niet geschonden worden.

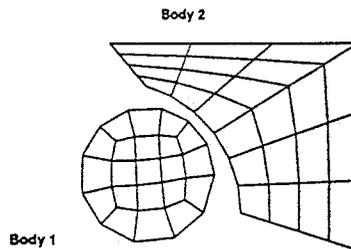
2. Wanneer de meshdichtheid tussen twee lichamen verschilt, moet het lichaam met de fijnere mesh eerst gedefinieerd worden.



3. Wanneer de grootte van de lichamen verschillen, dan moet het kleinste lichaam eerst gedefinieerd worden.



4. Wanneer een lichaam convex is en het ander concaaf, dan moet het convexe lichaam als eerste gedefinieerd worden.



5. Wanneer er een groot verschil in materiaaleigenschappen bestaat tussen de twee lichamen, dan moet het lichaam met de laagste stijfheid als eerste gedefinieerd worden.

Bijlage B

Beschrijving van element 7

THREE-DIMENSIONAL ARBITRARILY DISTORTED CUBE - ELEMENT 7

This is an eight-node isoparametric element (Figure B7.1-1). Element 21 is a better element for linear analysis, however, and should be used if possible. Element 7 is based on the following type of displacement assumption and mapping into a cube in the (g-h-r) space:

$$x = a_0 + a_1g + a_2h + a_3r + a_4gh + a_5hr + a_6gr + a_7ghr$$

$$u = b_0 + b_1g + b_2h + b_3r + b_4gh + b_5hr + b_6gr + b_7ghr$$

The 24 generalized displacements are related to the u-v-w displacements (in global coordinates) at the eight corners of the distorted cube. The strain-displacement relations for this element are written for finite strain, large displacement analysis. The stiffness of the element is formed by numerical integration using eight points defined in the (g-h-r) space.

NOTE: For the assumed strain formulation, the interpolation functions are modified to improve the bending characteristics of the element.

Caution: As in all three-dimensional analyses, a large nodal bandwidth results in long computing times. Optimize the nodal bandwidth.

QUICK REFERENCE

. TYPE 7:
Eight-node, three-dimensional, first-order isoparametric element (arbitrarily distorted cube).

. CONNECTIVITY:
Eight nodes per element. Node numbering must follow the scheme below:

Nodes 1, 2, 3 and 4 are corners of one face, given in counterclockwise order when viewed from inside the element. Node 5 has the same edge as node 1, node 6 as node 2, node 7 as node 3, and node 8 as node 4.

. GEOMETRY:
If the automatic brick to shell constraints are to be used, the first field must contain the transition thickness (see Figure B7.1-3).

If a non-zero value is entered in the second data field (EGEOM2), the volume strain will be constant throughout the element. This is particularly useful for analysis of approximately incompressible materials, and for analysis of structures in the fully plastic range. It is also recommended for creep problems in which it is attempted to obtain the steady state solution.

If a 1 is placed in the third field, the assumed strain formulation will be activated.

- . COORDINATES:
Three coordinates in the global x, y and z directions.
- . DEGREES OF FREEDOM:
Three global degrees of freedom u, v and w per node.
- . DIST LOADS:
Distributed loads chosen by value of IBODY as follows:

<u>Load Type</u>	<u>Description</u>
0	uniform pressure on 1-2-3-4 face.
1	non-uniform pressure on 1-2-3-4 face with magnitude supplied through user subroutine FORCEM.
2	uniform body force per unit volume in -z direction.
3	non-uniform body force per unit volume (e.g., centrifugal force) with magnitude and direction supplied through user subroutine FORCEM.
4	uniform pressure on 6-5-8-7 face.
5	non-uniform pressure on 6-5-8-7 face (FORCEM).
6	uniform pressure on 2-1-5-6 face.
7	non-uniform pressure on 2-1-5-6 face (FORCEM).
8	uniform pressure on 3-2-6-7 face.
9	non-uniform pressure on 3-2-6-7 face (FORCEM).
10	uniform pressure on 4-3-7-8 face.
11	non-uniform pressure on 4-3-7-8 face (FORCEM).
12	uniform pressure on 1-4-8-5 face.
13	non-uniform pressure on 1-4-8-5 face (FORCEM).
20	same as 0.
21	non-uniform load on 1-2-3-4 face with magnitude and direction supplied in user subroutine FORCEM.
22	same as 2.
23	same as 3.
24	same as 4.
25	non-uniform load on 6-5-8-7 face with magnitude and direction supplied in FORCEM.
26	same as 6.
27	non-uniform load on 2156 face with magnitude and direction supplied in FORCEM.
28	same as 8.
29	non-uniform load on 3267 face with magnitude and direction supplied in FORCEM.
30	same as 10.
31	non-uniform load on 4378 face with magnitude and direction supplied in FORCEM.
32	same as 12.
33	non-uniform load on 1485 face with magnitude and direction supplied in FORCEM.
40	uniform shear 1234 face in 12 direction.
41	non-uniform shear 1234 face in 12 direction.
42	uniform shear 1234 face in 23 direction.
43	non-uniform shear 1234 face in 23 direction.
48	uniform shear 6587 face in 56 direction.

<u>Load Type</u>	<u>Description</u>
49	non-uniform shear 6587 face in 56 direction.
50	uniform shear 6587 face in 67 direction.
51	non-uniform shear 6587 face in 67 direction.
52	uniform shear 2156 face in 12 direction.
53	non-uniform shear 2156 face in 12 direction.
54	uniform shear 2156 face in 15 direction.
55	non-uniform shear 2156 face in 15 direction.
56	uniform shear 3267 face in 23 direction.
57	non-uniform shear 3267 face in 23 direction.
58	uniform shear 3267 face in 26 direction.
59	non-uniform shear 2367 face in 26 direction.
60	uniform shear 4378 face in 34 direction.
61	non-uniform shear 4378 face in 34 direction.
62	uniform shear 4378 face in 37 direction.
63	non-uniform shear 4378 face in 37 direction.
64	uniform shear 1485 face in 41 direction.
65	non-uniform shear 1485 face in 41 direction.
66	uniform shear 1485 face in 15 direction.
67	non-uniform shear 1485 face in 15 direction.
100	Centrifugal load, magnitude represents square of angular velocity [rad/time]. Rotation axis specified on rotation axis card.
102	Gravity loading in global direction. Enter 3 magnitudes of gravity acceleration in respectively global x, y, z direction.

Pressure forces are positive into element face.

- . OUTPUT OF STRAINS:
 - 1 = global xx strain
 - 2 = global yy strain
 - 3 = global zz strain
 - 4 = global engineering xy strain
 - 5 = global engineering yz strain
 - 6 = global engineering xz strain
- . OUTPUT OF STRESSES:
 - Output of stress is the same as for strain.
- . TRANSFORMATION:
 - Standard transformation of three global degrees of freedom to local degrees of freedom.
- . TYING:
 - No special tying available. An automatic constraint is available for brick to shell transition meshes. (See GEOMETRY.)
- . OUTPUT POINTS:
 - Centroid or the eight integration points as shown in Figure B7.2-2.

- . MESH GENERATOR:
MARC Mesh3D
- . UPDATED LAGRANGE PROCEDURE AND FINITE STRAIN PLASTICITY:
Capability is available.
- . COUPLED ANALYSIS:
In a coupled thermal-mechanical analysis the associated heat transfer element is 43. See B43.1- for a description of the conventions used for entering the flux and film data for this element. Volumetric flux generated by dissipated plastic energy is specified with type 101.
- . ASSUMED STRAIN:
The assumed strain formulation is available to improve the bending behavior. This increases the stiffness assembly costs per element, but it also improves the accuracy.

NOTE: The element can be collapsed to a tetrahedron.

NOTE: By collapsing one plane of the element to a line (see Figure B7.1-3) a transition element for connecting bricks with 4-node shell element type 75 is generated. Thickness of the shell is specified in the geometry field.

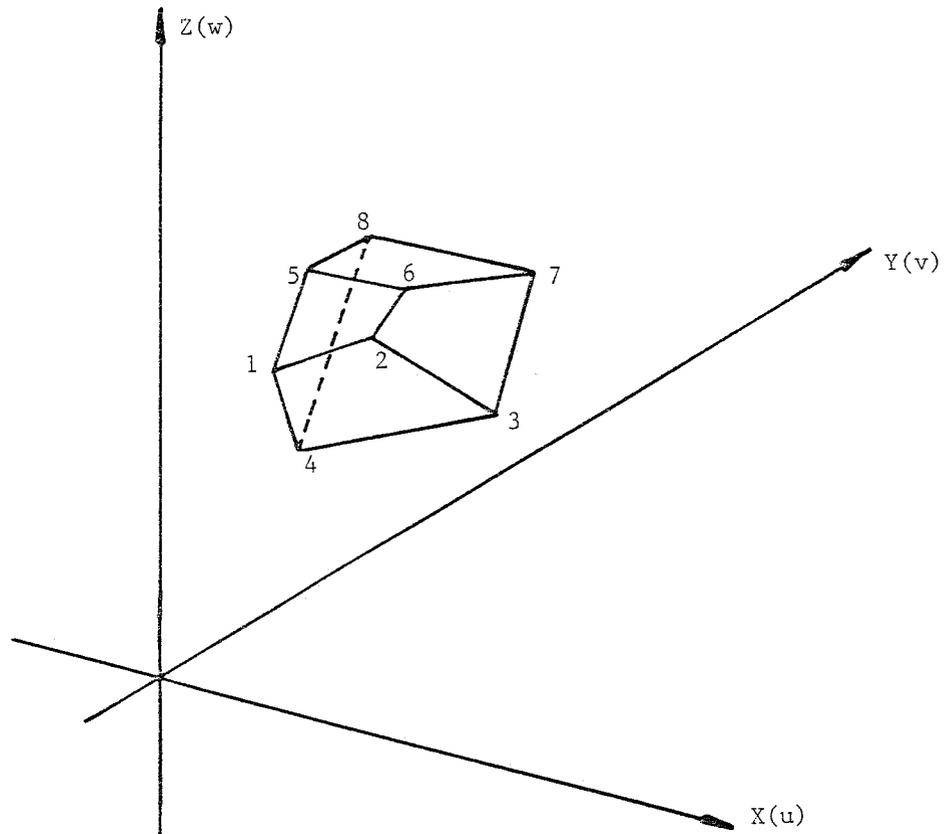


Figure B7.1-1. Arbitrarily Distorted Cube

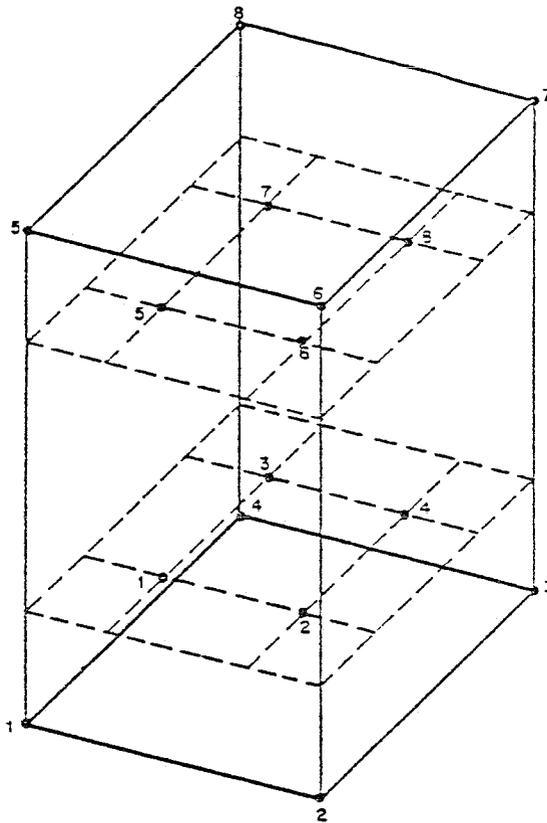


Figure B7.1-2. 8-Point Gauss Integration Scheme for Element 7

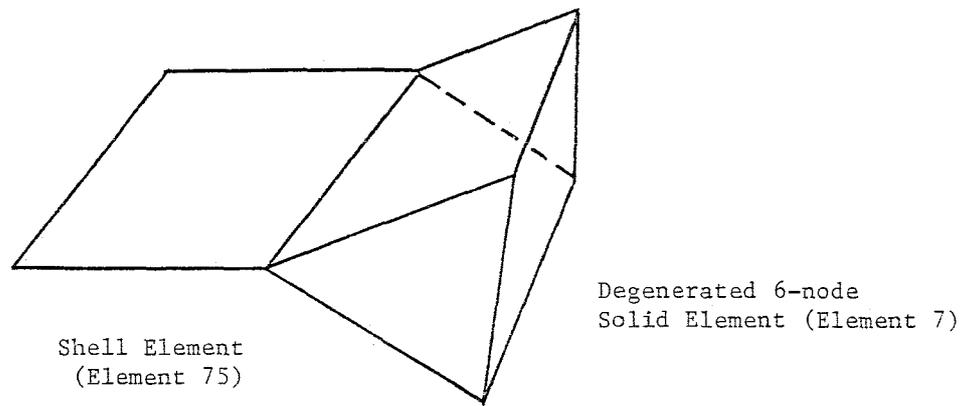


Figure B7.1-3 Shell-to-Solid Automatic Constraint

Bijlage C

Beschrijving van element 10

ARBITRARY QUADRILATERAL AXISYMMETRIC RING - ELEMENT 10

This is the same formulation as element 3, written for axisymmetric geometry (element 28 is the better element, use it if possible).

QUICK REFERENCE

- . TYPE 10:
Axisymmetric, arbitrary ring with a quadrilateral cross-section.
- . CONNECTIVITY:
Four nodes per element. Node numbering follows right-handed convention (counterclockwise).
- . GEOMETRY:
If a nonzero value is entered in the second data field (EGEOM2), the volume strain will be constant throughout the element. This is particularly useful for analysis of approximately incompressible materials, and for analysis of structures in the fully plastic range. It is also recommended for creep problems in which it is attempted to obtain the steady-state solution. For details see Volume F, Reference XXV.
- . COORDINATES:
Two coordinates in the global z and r directions.
- . DEGREES OF FREEDOM:
1 = u (displacement in the global z direction).
2 = v (displacement in the global r direction).
- . DIST LOADS:
Load types for distributed loads as follows:

<u>Load Type</u>	<u>Description</u>
0	Uniform pressure distributed on 1-2 face of the element.
1	Uniform body force per unit volume in first coordinate direction.
2	Uniform body force by unit volume in second coordinate direction.
3	Non-uniform pressure on 1-2 face of the element, magnitude supplied through subroutine FORCEM.
4	Non-uniform body force per unit volume in first coordinate direction, magnitude supplied through subroutine FORCEM.
5	Non-uniform body force per unit volume in second coordinate direction, magnitude supplied through subroutine FORCEM.
6	Uniform pressure on 2-3 face of the element.
7	Non-uniform pressure on 2-3 face of the element, magnitude supplied through subroutine FORCEM.
8	Uniform pressure on 3-4 face of the element.
9	Non-uniform pressure on 3-4 face of the element, magnitude supplied through subroutine FORCEM.

<u>Load Type</u>	<u>Description</u>
10	Uniform pressure on 4-1 face of the element.
11	Non-uniform pressure on 4-1 face of the element, magnitude supplied through subroutine FORCEM.
20	Uniform shear force on side 1 - 2 (positive from 1 to 2).
21	Non-uniform shear force on side 1 - 2, magnitude supplied through user subroutine FORCEM.
22	Uniform shear force on side 2 - 3 (positive from 2 to 3).
23	Non-uniform shear force on side 2 - 3, magnitude supplied through user subroutine FORCEM.
24	Uniform shear force on side 3 - 4 (positive from 3 to 4).
25	Non-uniform shear force on side 3 - 4, magnitude supplied through user subroutine FORCEM.
26	Uniform shear force on side 4 - 1 (positive from 4 to 1).
27	Non-uniform shear force on side 4 - 1, magnitude supplied through user subroutine FORCEM.

All pressures are positive when directed into the element. In addition, point loads may be applied at the nodes. The magnitude of point loads must correspond to the load integrated around the circumference.

- . OUTPUT OF STRAINS:
Output of strains at the centroid of the element in global coordinates is:

$$1 = \varepsilon_{zz}; 2 = \varepsilon_{rr}; 3 = \varepsilon_{\theta\theta}; 4 = \gamma_{rz}$$
- . OUTPUT OF STRESSES:
Same as for strain.
- . TRANSFORMATION:
Two global degrees of freedom may be transformed into local coordinates.
- . TYING:
May be tied to axisymmetric shell type 1 using standard tying type 23.
- . OUTPUT POINTS:
Output is available at the centroid or at the 4 Gaussian points shown in Figure B10.1-1.
- . MESH GENERATOR:
MESH2D Option.
- . UPDATED LAGRANGE PROCEDURE AND FINITE STRAIN PLASTICITY:
Capability is available - stress and strain output in global coordinate directions. Reduced volume strain integration recommended. (See GEOMETRY).
- . COUPLED ANALYSIS:
In a coupled thermal-mechanical analysis the associated heat transfer element is 40. See page B40 for a description of the conventions used for entering the flux and film data for this element.

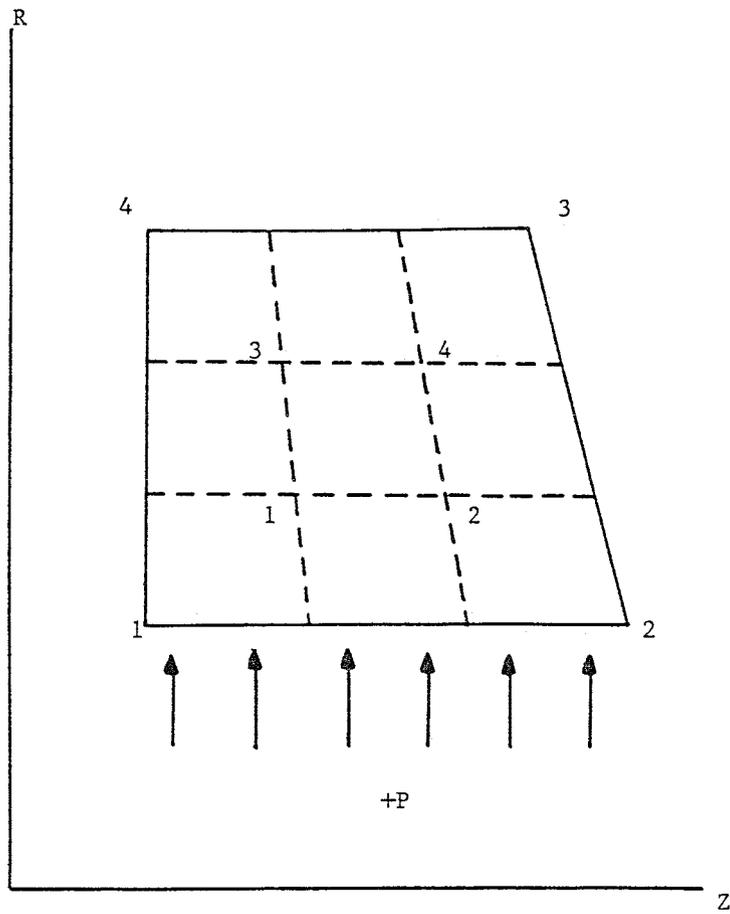


Figure B10.1-1. Integration Points for Element 10

Bijlage D

Testen van elementtype 7 in een 3D-mesh

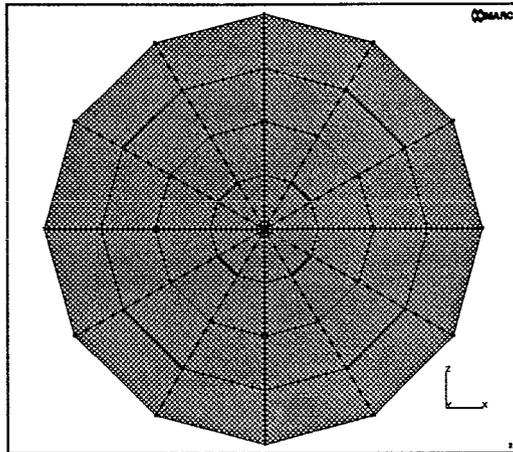
Op twee manieren is er een 3D-mesh voor femur en tibia geconstrueerd. De éne wijze was een rotatie van een 2D-mesh rond een symmetrie-as, waardoor een axi-symmetrisch model ontstond. De andere wijze liet de preprocessor I-DEAS vrij om in de gedefinieerde geometriën van femur en tibia de elementen aan te brengen. In beide gevallen werd gebruik gemaakt van elementtype 7. Eén van de eigenschappen van dit elementtype is, dat het element vervormd kan worden doordat knooppunten overelkaar schuiven (figuur B). In hoeverre dit van invloed is op de analytische oplossing werd aan de hand van de volgende twee voorbeelden onderzocht:

1. In I-DEAS werd een 2D-mesh van 20×10 geconstrueerd (8 elementen). $x = 0$ werd als symmetrie-as gekozen. De 2D-mesh werd met stappen van 30° om deze as geroteerd. Hierdoor ontstond een cilinder bestaande uit 96 elementen (figuur D.1). In deze mesh waren 24 elementen met 'collapsed nodes, (rond de symmetrie-as) en 72 'bricks' te zien (paragraaf 4.3, figuur 4.10). Aan de onderkant van de schijf werd de verplaatsing in y -richting onderdrukt, de verplaatsing in x - en z -richting werd vrij verondersteld. Langs de symmetrie-as werd de verplaatsing in x - en z -richting onderdrukt. Voor het bovenvlak werd een tying voor de verplaatsing in y -richting van de knooppunten voorgeschreven. In het midden van het bovenvlak ($x = 0$ en $z = 0$ (figuur D.1)) werd een puntbelasting in negatieve y -richting aangebracht. Met stappen van 100 N werd er een maximale belasting van 1000 N op de cilinder aangebracht.
2. In I-DEAS werd een cilinder met straal 20 en hoogte 10 getekend. I-DEAS vulde deze geometrie automatisch met elementen (88) (figuur D.2). Alle elementen in deze mesh waren tetrahedrons (figuur D.3). De datafile voor de knooppuntvolgorde van een tetrahedron ziet er als volgt uit:

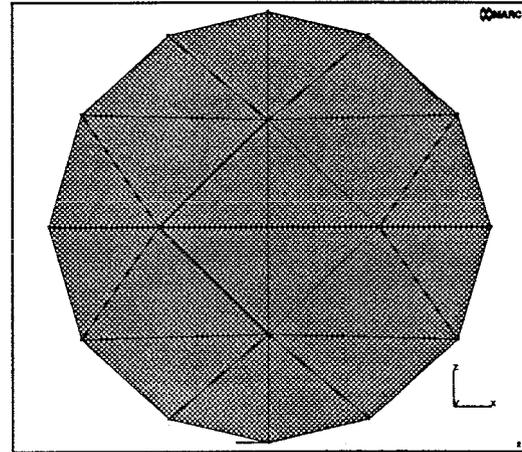
CONNECTIVITY

```
1 7 1 2 3 4 5 6 7 8
2 7 1 2 3 1 4 4 4 4
```

Het eerste getal is het nummer van het element, het tweede het elementtype. De volgende 8 getallen geven de knooppuntvolgorde weer. De tetrahedron (viervlak) heeft 4

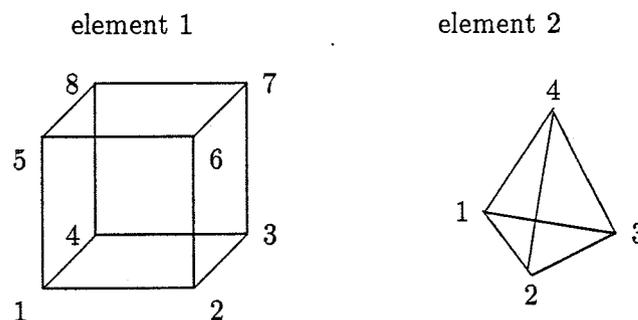


Figuur D.1: Bovenaanzicht van de cilinder (rotatiemesh in I-DEAS)



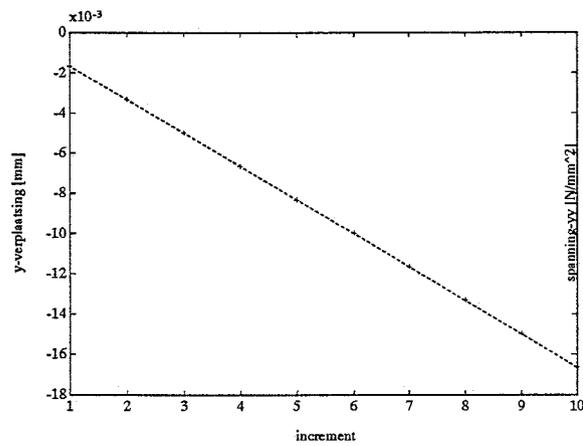
Figuur D.2: Bovenaanzicht van de cilinder (automesh in I-DEAS)

hoekknooppunten. Knooppunten 1,2 en 3 vormen een grondvlak, knooppunt 4 ligt in de top van de tetrahedron. De randvoorwaarden die opgelegd werden, zijn identiek aan die van voorbeeld 1. Met die uitzondering dat, door het ontbreken van een symmetrie-as, de knooppuntverplaatsing in x - en z -richting voor de knooppunten $x=0$ en $z=0$ onderdrukt werd.

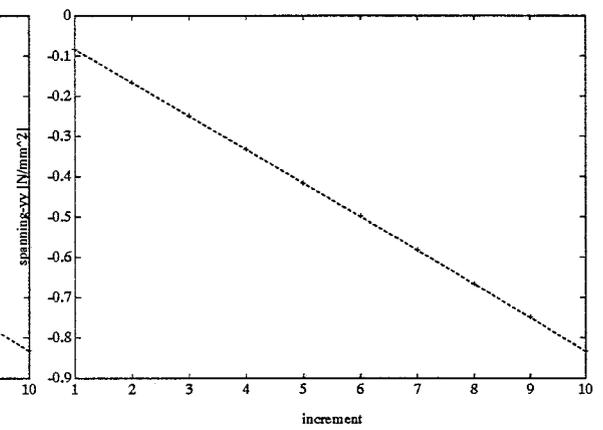


Figuur D.3: Element 7 weergegeven als 'brick' (element 1) en als tetrahedron (element 2)

De resultaten van deze berekeningen staan weergegeven in figuren D.4 en D.5. Figuur D.4 laat de verplaatsing in y -richting van het knooppunt $x=0$ en $z=0$ in het bovenvlak tegen de aangebrachte belasting voor zowel voorbeeld 1 als 2 zien. Het maximale verschil in de oplossing tussen voorbeeld 1 en 2 is in dezelfde orde grootte als de afrondfouten die in de berekening gemaakt worden. De verplaatsing in y -richting van het beschouwde knooppunt voor zowel voorbeeld 1 als 2 is identiek. Figuur D.5 laat het spanningsverloop in y -richting tegen de aangebrachte belasting van hetzelfde knooppunt voor beide voorbeelden zien. Het spanningsverloop is voor beide voorbeelden identiek.



Figuur D.4: De verplaatsing in y -richting: voorbeeld 1 '-', voorbeeld 2 '+'



Figuur D.5: De normaalspanning in y -richting: voorbeeld 1 '-', voorbeeld 2 '+'