

2000-CON-BM-R3017

**Numerieke Simulaties Dwarsverbinding  
Westerscheldetunnel.  
Deel IV: Resultaten Variant 5 en 6**

oktober 2000

dr. ir. A.H.J.M. Vervuurt  
ir. F.B.J. Gijsbers

Opdrachtgever:

Bouwdienst Rijkswaterstaat Utrecht  
t.a.v. ir. N.M. Naaktgeboren  
postbus 20000  
3502 LA UTRECHT

Projectnaam: Dwarsverbinding  
Westerscheldetunnel  
Projectnr. : 006.91052/01.01

Pagina's : 118  
Tabellen : 46  
Figuren : 76  
Bijlagen : 4

2000

Thema : betonconstructies  
WP-onderwerp : 221  
Trefwoord(en) : beton, DIANA, boortunnels, dwarsverbinding, vriezen



## Samenvatting

In 1998 zijn in opdracht van de Bouwdienst van Rijkswaterstaat, door TNO Bouw een viertal eindige elementenberekeningen uitgevoerd aangaande de dwarsverbindingen in de Westerscheldetunnel. In deze berekeningen is voor de verschillende bouwstadia gekeken naar de krachtsverdeling in de tunnelling als gevolg van het, middels vriestechnieken, aanbrengen van de dwarsverbindingen. De vier berekeningen zijn in een drietal TNO Bouw-rapporten gepresenteerd, te weten [1], [2] en [3].

De verschillen en overeenkomsten tussen de vier varianten welke eerder zijn uitgevoerd, zijn samengevat in Tabel 1. Nadat in variant 1 de situatie is onderzocht waarbij is uitgegaan van een belastingssituatie behorende bij een diepe ligging van de tunnel in combinatie met een hoge beddingconstante van de omringende grond, is in variant 2 uitgegaan van lagere beddingconstanten voor de grond die gebaseerd waren op een ondergrens aangaande de Boomse Klei. In de varianten 3 en 4 is vervolgens uitgegaan van gehalveerde axiale normaalkracht en de radiale waterdruk. In variant 4 is verder de vriesbelasting met een factor 3 verhoogd ten opzichte van de eerdere varianten.

Als gevolg van onzekerheden voor wat betreft de aanvankelijk aangenomen uitzetting en stijfheid van het vrieslichaam is in 1999 door TNO NITG nader experimenteel onderzoek gedaan met betrekking tot deze problematiek [4]. De uitkomst van het onderzoek heeft voor Rijkswaterstaat tot de wens geleid om variant 5 en 6 enigszins aangepast uit te voeren (Tabel 1). De resultaten van deze aangepaste varianten zijn gepresenteerd in de onderhavige rapportage. Zoals uit Tabel 1 blijkt is in variant 5 en 6 uitgegaan van een verlaging van de stijfheid van het vrieslichaam van 25000 MPa naar 30 MPa. In dat geval is de stijfheid van het vrieslichaam qua orde grootte dus gelijk met die van de grond (welke 20 MPa bedraagt). In variant 5a en 6a is daarentegen uitgegaan van een verlaging van de stijfheid met een factor 83 (overeenkomend met een verlaging van 25000 MPa naar 300 MPa). Om in alle gevallen een gelijke vrije uitzetting van het vrieslichaam te behouden is in variant 5 en 6 de vriesbelasting rechtevenredig verlaagd met de verlaging van de stijfheid van het vrieslichaam. In variant 6 en 6a is de invloed onderzocht van triplex ringvoegplaatjes in plaats van Kaubit, hetgeen conform wijzigingen in de detaillering van de ringvoegen is.

*Tabel 1 Onderzochte varianten betreffende de in 1998 uitgevoerde berekeningen (variant 1-4) en de recentelijk onderzochte varianten 5 en 6.*

| variant-nummer | stijfheid grond (MPa) | stijfheid vrieslichaam (MPa) | vries-belasting (kN/m <sup>2</sup> ) | axiale normaalkracht (MN) | voeg-materiaal |
|----------------|-----------------------|------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|----------------|
| 1              | 100                   | 25000                        | 21000                                | 45,70                     | Kaubit         |
| 2              | 20                    | 25000                        | 21000                                | 45,70                     | Kaubit         |
| 3              | 20                    | 25000                        | 21000                                | 22,85                     | Kaubit         |
| 4              | 20                    | 25000                        | 63000                                | 22,85                     | Kaubit         |

|    |    |     |      |       |         |
|----|----|-----|------|-------|---------|
| 5  | 20 | 30  | 25,2 | 22,85 | Kaubit  |
| 5a | 20 | 300 | 252  | 22,85 | Kaubit  |
| 6  | 20 | 30  | 25,2 | 22,85 | triplex |
| 6a | 20 | 300 | 252  | 22,85 | triplex |



Concluderend kan worden gesteld dat de invloed van de verlaging van de stijfheid van het vrieslichaam tot uitdrukking komt in een kleinere indrukking van de tunnelwand ten tijde van het bevriezen en dat tijdens het ontgraven grotere verplaatsingen te verwachten zijn. Dit laatste wordt veroorzaakt doordat de vervormingen in de kern van het vrieslichaam in mindere mate worden geïsoleerd door het vrieslichaam.

Het vervangen van het Kaubit in de ringvoegen door triplex heeft tot gevolg dat de verschuivingen lokaal ter plaatse van de langsvogen vrij kunnen optreden, waardoor deze aanzienlijk groter zijn. Verder gaat het voordeel van de hogere wrijvingscoëfficiënt van het triplex met betrekking tot de opneembare dwarskracht grotendeels verloren door het feit dat er geen beton-beton contact meer plaats vindt in de ringvoegen en doordat slechts de helft van de triplexplaatjes is verlijmd. Doordat de normaalspanning wordt gehalveerd wordt de effectieve wrijvingscoëfficiënt van de ringvoeg hierdoor eveneens gehalveerd.

Een samenvattend overzicht van de resultaten met betrekking tot de maximale ovalisaties, voegopeningen en voegverschuivingen in de verschillende berekeningsvarianten waarop dit rapport betrekking heeft, is weergegeven in Tabel 5. In de tabel is tevens een overzicht gegeven van de berekende normaalkracht in de dwarsverbinding in fase 5 van de berekeningen. Een overzicht van de maximaal optredende koppelkrachten is weergegeven in het onderste deel van de tabel. Hierbij wordt opgemerkt dat het, als gevolg van de definitie van de koppelkrachten, niet mogelijk is de resultaten van variant 5 en 5a te vergelijken met de koppelkrachten volgens variant 6 en 6a.

*Tabel 2 Overzicht van de maximale ovalisatie, de maximale voegopening en -verschuiving en de in de dwarsverbinding optredende normaalkracht voor een aantal varianten. In het onderste gedeelte van de tabel is een overzicht van de maximaal optredende koppelkrachten weergegeven.*

| variant | voeg-materiaal | stijfheid vrieslichaam<br>m<br>(MPa) | maximale horizontale ovalisatie<br>(mm) | maximale voeg-opening<br>(mm) | maximale voeg-verschuiving<br>(mm) | normaal-kracht in de dwarsverbinding<br>(MN) |
|---------|----------------|--------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|----------------------------------------------|
| 3       | Kaubit         | 25000                                | 14,0                                    | 0,8                           | 2,2                                | 11                                           |
| 5       | Kaubit         | 30                                   | 10,3                                    | 1,7                           | 3,5                                | 3                                            |
| 5a      | Kaubit         | 300                                  | 14,8                                    | 1,0                           | 1,7                                | 9                                            |
| 6       | triplex        | 30                                   | 10,6                                    | 3,6                           | 14,1                               | 3                                            |
| 6a      | triplex        | 300                                  | 14,8                                    | 1,2                           | 2,2                                | 9                                            |

|    | $F_{K;tan;max}$<br>(kN) | $F_{K;rad;max}$<br>(kN) | $F_{K;max}$<br>(kN) |
|----|-------------------------|-------------------------|---------------------|
| 5  | 125                     | 142                     | 144                 |
| 5a | 128                     | 142                     | 149                 |
| 6  | 410                     | 367                     | 456                 |
| 6a | 360                     | 381                     | 483                 |



## Inhoudsopgave

|                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------|----|
| SAMENVATTING.....                                         | 1  |
| INHOUDSOPGAVE.....                                        | 3  |
| 1. INLEIDING .....                                        | 5  |
| 2. UITGEVOERDE BEREKENINGEN.....                          | 7  |
| 2.1 VARIANT 1 TOT EN MET 4 .....                          | 7  |
| 2.2 VARIANT 5 EN 6.....                                   | 9  |
| 2.2.1 Inleiding .....                                     | 9  |
| 2.2.2 Variant 5 en 5a.....                                | 9  |
| 2.2.3 Variant 6 en 6a.....                                | 9  |
| 2.2.3.1 Inleiding.....                                    | 9  |
| 2.2.3.2 Beschrijving ringvoeggedrag .....                 | 9  |
| 2.2.3.3 Materiaaleigenschappen ringvoegen.....            | 10 |
| 3. BESPREKING VAN DE RESULTATEN .....                     | 15 |
| 3.1 INLEIDING .....                                       | 15 |
| 3.2 VARIANT 5.....                                        | 16 |
| 3.2.1 Inleiding .....                                     | 16 |
| 3.2.2 Fase 1.....                                         | 16 |
| 3.2.3 Fase 2.....                                         | 16 |
| 3.2.4 Fase 3.....                                         | 17 |
| 3.2.5 Fase 5.....                                         | 18 |
| 3.2.6 Grootte en ontwikkeling van de koppelkrachten ..... | 19 |
| 3.3 VARIANT 6.....                                        | 22 |
| 3.3.1 Inleiding .....                                     | 22 |
| 3.3.2 Fase 1.....                                         | 22 |
| 3.3.3 Fase 2.....                                         | 22 |
| 3.3.4 Fase 3.....                                         | 23 |
| 3.3.5 Fase 5.....                                         | 25 |
| 3.3.6 Grootte en ontwikkeling van de koppelkrachten ..... | 25 |
| 3.4 VARIANT 5A.....                                       | 27 |
| 3.5 VARIANT 6A.....                                       | 28 |
| 4. CONCLUSIES.....                                        | 30 |
| 5. LITERATUUR.....                                        | 33 |
| BIJLAGE A RESULTATEN VARIANT 5.....                       | 35 |
| BIJLAGE A.1 VERPLAATSINGEN EN VOEGOPENINGEN .....         | 35 |
| BIJLAGE A.2 KOPPELKRACHTEN IN DE RINGVOEGEN .....         | 36 |



|                  |                                                   |           |
|------------------|---------------------------------------------------|-----------|
| BIJLAGE A.3      | SPANNINGSVERDELINGEN EN VERVORMINGEN FASE 1 ..... | 44        |
| BIJLAGE A.4      | SPANNINGSVERDELINGEN EN VERVORMINGEN FASE 2 ..... | 47        |
| BIJLAGE A.5      | SPANNINGSVERDELINGEN EN VERVORMINGEN FASE 3 ..... | 50        |
| BIJLAGE A.6      | SPANNINGSVERDELINGEN EN VERVORMINGEN FASE 5 ..... | 53        |
| <b>BIJLAGE B</b> | <b>RESULTATEN VARIANT 6 .....</b>                 | <b>57</b> |
| BIJLAGE B.1      | VERPLAATSINGEN EN VOEGOPENINGEN .....             | 57        |
| BIJLAGE B.2      | KOPPELKRACHTEN IN DE RINGVOEGEN .....             | 58        |
| BIJLAGE B.3      | SPANNINGSVERDELINGEN EN VERVORMINGEN FASE 1 ..... | 64        |
| BIJLAGE B.4      | SPANNINGSVERDELINGEN EN VERVORMINGEN FASE 2 ..... | 67        |
| BIJLAGE B.5      | SPANNINGSVERDELINGEN EN VERVORMINGEN FASE 3 ..... | 70        |
| BIJLAGE B.6      | SPANNINGSVERDELINGEN EN VERVORMINGEN FASE 5 ..... | 73        |
| <b>BIJLAGE C</b> | <b>RESULTATEN VARIANT 5A .....</b>                | <b>77</b> |
| BIJLAGE C.1      | VERPLAATSINGEN EN VOEGOPENINGEN .....             | 77        |
| BIJLAGE C.2      | VERPLAATSINGEN IN DE RINGVOEGEN .....             | 78        |
| BIJLAGE C.3      | KOPPELKRACHTEN IN DE RINGVOEGEN .....             | 79        |
| BIJLAGE C.4      | SPANNINGSVERDELINGEN EN VERVORMINGEN FASE 1 ..... | 87        |
| BIJLAGE C.5      | SPANNINGSVERDELINGEN EN VERVORMINGEN FASE 2 ..... | 90        |
| BIJLAGE C.6      | SPANNINGSVERDELINGEN EN VERVORMINGEN FASE 3 ..... | 93        |
| BIJLAGE C.7      | SPANNINGSVERDELINGEN EN VERVORMINGEN FASE 5 ..... | 96        |
| <b>BIJLAGE D</b> | <b>RESULTATEN VARIANT 6A .....</b>                | <b>99</b> |
| BIJLAGE D.1      | VERPLAATSINGEN EN VOEGOPENINGEN .....             | 99        |
| BIJLAGE D.2      | VERPLAATSINGEN IN DE RINGVOEGEN .....             | 100       |
| BIJLAGE D.3      | KOPPELKRACHTEN IN DE RINGVOEGEN .....             | 101       |
| BIJLAGE D.4      | SPANNINGSVERDELINGEN EN VERVORMINGEN FASE 1 ..... | 107       |
| BIJLAGE D.5      | SPANNINGSVERDELINGEN EN VERVORMINGEN FASE 2 ..... | 110       |
| BIJLAGE D.6      | SPANNINGSVERDELINGEN EN VERVORMINGEN FASE 3 ..... | 113       |
| BIJLAGE D.7      | SPANNINGSVERDELINGEN EN VERVORMINGEN FASE 5 ..... | 116       |



## 1. Inleiding

In 1998 zijn in opdracht van de Bouwdienst van Rijkswaterstaat, door TNO Bouw een viertal eindige elementenberekeningen uitgevoerd aangaande de Westerscheldetunnel. In deze berekeningen werd in de verschillende bouwstadia gekeken naar de krachtsverdeling in de tunnelling als gevolg van het, middels vriestechnieken, aanbrengen van dwarsverbindingen. De vier berekeningen zijn in een drietal TNO Bouw-rapporten gepresenteerd, te weten [1], [2] en [3].

Conform het oorspronkelijke projectplan (98-CON-B053/GSFA/DNP, d.d. 3 maart 1998) is in de eerste variantberekening [1] uitgegaan van een belastingsituatie behorende bij een diepe ligging van de tunnel in combinatie met een hoge beddingconstante van de omringende grond, welke de aannemerscombinatie KMW maatgevend achtte voor de optredende krachtswerking. In variant 2 is daarentegen uitgegaan van lagere beddingconstanten voor de grond die gebaseerd waren op een ondergrens aangaande de Boomse Klei [2]. Een groot deel van het tunnel-tracé bevindt zich in deze grondslag. De ondergrens voor de stijfheid van de Boomse Klei is indertijd vastgesteld op 20% van de stijfheid van de grond volgens variant 1 [5].

In de in [3] behandelde varianten 3 en 4 is vervolgens uitgegaan van een ondiepe ligging van de hoofdtunnelbuis hetgeen is geschematiseerd door het halveren van de axiale normaalkracht en de radiale (uniforme) waterdruk. De beddingconstanten van de grond waren in variant 3 en 4 ongewijzigd ten opzichte van variant 2 (lage grondstijfheid). In variant 4 is verder de vriesbelasting met een factor 3 verhoogd ten opzichte van de eerdere varianten (van 21 MN/m<sup>2</sup> naar 63 MN/m<sup>2</sup>). De stijfheid van het vrieslichaam was in variant 4 ongewijzigd ten opzichte van variant 3.

Op basis van de resultaten van voorgenoemde berekeningen en als gevolg van onzekerheden voor wat betreft de aanvankelijk aangenomen uitzetting en stijfheid van het vrieslichaam zijn de laatste twee geplande varianten (variant 5 en 6) toentertijd niet uitgevoerd. In 1999 is door TNO NITG nader experimenteel onderzoek gedaan met betrekking tot deze problematiek [4], hetgeen voor Rijkswaterstaat tot de wens heeft geleid om variant 5 en 6 enigszins aangepast uit te voeren. (brief WSTBD-00.03205, d.d. 17 april 2000). De resultaten van deze aangepaste varianten zijn gerapporteerd in de onderhavige rapportage en zijn uitgevoerd in hoofdlijnen overeenkomstig het door TNO Bouw opgestelde voorstel aangaande de betreffende varianten (TNO Bouw-brief 2000-CON-BM-B3116 d.d. 26 april 2000).

In het vervolg van deze rapportage zal allereerst worden ingegaan op de gehanteerde invoergegevens betreffende de in 1998 uitgevoerde berekeningen en de varianten 5 en 6 (Hoofdstuk 2). Daarna zal in Hoofdstuk 3 nader worden ingegaan op de resultaten. Voor wat betreft variant 5 worden vergelijkingen en verschillen ten opzichte van variant 3 beschouwd op basis van TNO Bouw-rapport 1998-CON-R0903 [3]. In paragraaf 3.3 zal variant 5 nader worden beschouwd in relatie tot variant 6. Hierbij zal tevens aandacht worden besteed aan de krachtsverdeling tussen de verschillende ringvoegen. In paragraaf 3.4 en 3.5 wordt vervolgens kort ingegaan op de resultaten van variant 5a en 6a. Tenslotte zal in Hoofdstuk 4 worden afgesloten met de conclusies aangaande de uitgevoerde berekeningen.





## 2. Uitgevoerde berekeningen

### 2.1 Variant 1 tot en met 4

Bij de eerste variantberekening [1] is uitgegaan van grond- en geometrische parameters zoals die, in een vergelijkbare berekening voor de dwarsverbinding, zijn toegepast door de KMW. Doordat er is uitgegaan van een relatief diepe ligging van de hoofdtunnelbuis, is impliciet gekozen voor een relatief hoge beddingsconstante voor de grond van 100 MPa (laag GZ2, zie [6]) en een hoge waterdruk.

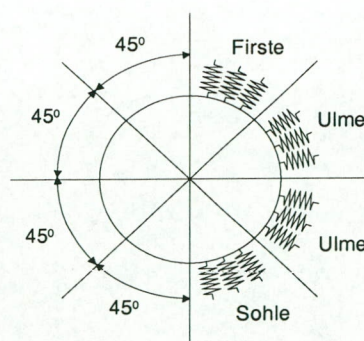
De invoergegevens zoals gebruikt in de eindige elementenberekening betreffende variant 1 staan, evenals de resultaten, gedetailleerd beschreven in [1]. Volledigheidshalve staan de beddingsconstanten van de grond die de tunnel in variant 1 omringt, nogmaals weergegeven in onderstaande tabel.

Tabel 3 Radiale en tangentiële grondveerstijfheden betreffende variant 1, uitgaande van hoge beddingsconstanten voor de grond [1].

| Kwadrant                            | fase 1                        |                               | fase 2-5                      |                               |
|-------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
|                                     | $K_r$<br>[kN/m <sup>3</sup> ] | $K_t$<br>[kN/m <sup>3</sup> ] | $K_r$<br>[kN/m <sup>3</sup> ] | $K_t$<br>[kN/m <sup>3</sup> ] |
| Firste                              | $0,948 \cdot 10^4$            | $0,474 \cdot 10^4$            | $0,470 \cdot 10^4$            | $0,500 \cdot 10^4$            |
| Ulme (tegenover de dwarsverbinding) | $1,896 \cdot 10^4$            | $0,948 \cdot 10^4$            | $0,470 \cdot 10^4$            | $0,400 \cdot 10^4$            |
| Sohle                               | $1,896 \cdot 10^4$            | $0,948 \cdot 10^4$            | $0,500 \cdot 10^4$            | $0,600 \cdot 10^4$            |
| Ulme (zijde dwarsverbinding)        | $1,896 \cdot 10^4$            | $0,948 \cdot 10^4$            | $0,500 \cdot 10^4$            | $0,350 \cdot 10^4$            |

Een verklaring van de namen van kwadranten waar onderscheid naar is gemaakt voor de bepaling van de beddingsconstanten is weergegeven in Figuur 1.

In variant 2 is bekeken wat de invloed van een lagere beddingsconstanten is op de krachtwerking in de tunnel gedurende fase 1 tot en met 5. De beddingsconstanten die hiervoor zijn gebruikt, hebben betrekking op de ondergrens van de stijfheid voor de Boomse klei [7]. Deze bedraagt ongeveer 20 MPa, hetgeen neerkomt op 20% van de oorspronkelijk aangenomen stijfheid (variant 1). De waarden voor de stijfheden van de grondveerelementen die voor de berekening van variant 2 zijn gebruikt, staan samengevat in Tabel 4. De overige invoer voor variant 2 is conform variant 1 geweest.



Figuur 1 Overzicht van de grondmodellering volgens vier kwadranten.



*Tabel 4 Radiale en tangentiële grondveerstijfheden betreffende variant 2, 3 en 4, uitgaande van lage beddingsconstanten voor de grond [2].*

| Kwadrant                            | fase 1                        |                               | fase 2-5                      |                               |
|-------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
|                                     | $K_r$<br>[kN/m <sup>3</sup> ] | $K_t$<br>[kN/m <sup>3</sup> ] | $K_r$<br>[kN/m <sup>3</sup> ] | $K_t$<br>[kN/m <sup>3</sup> ] |
| Firste                              | $0,190 \cdot 10^4$            | $0,095 \cdot 10^4$            | $0,094 \cdot 10^4$            | $0,100 \cdot 10^4$            |
| Ulme (tegenover de dwarsverbinding) | $0,379 \cdot 10^4$            | $0,190 \cdot 10^4$            | $0,094 \cdot 10^4$            | $0,080 \cdot 10^4$            |
| Sohle                               | $0,379 \cdot 10^4$            | $0,190 \cdot 10^4$            | $0,100 \cdot 10^4$            | $0,120 \cdot 10^4$            |
| Ulme (zijde dwarsverbinding)        | $0,379 \cdot 10^4$            | $0,190 \cdot 10^4$            | $0,100 \cdot 10^4$            | $0,070 \cdot 10^4$            |

In variant 3 en 4 (waarvan de resultaten zijn weergegeven in TNO Bouw-rapport 98-CON-R0903) is ervoor gekozen om de invloed van de diepteligging (variant 3) en van de aangenomen (gemiddelde) vriesbelasting (variant 4) op de krachtwerking in de hoofdtunnelbuis te onderzoeken. Een samenvatting van de verschillen tussen de eerste vier varianten is gegeven in Tabel 5. Zoals uit de tabel blijkt komen de gehanteerde grondstijfheden voor de variant 3 en 4 overeen met die van variant 2 (zie Tabel 4). Evenals de grondstijfheid is de grootte van de vriesbelasting in variant 3 ongewijzigd ten opzichte van de varianten 1 en 2.

Voor variant 1 en 2 is de grootte van de aan te brengen axiale normaalkracht bepaald aan de hand van het oppervlak van de tunnel (uitgaande van de systeemdiameter van 10,55 m) en de, voor de diepteligging van de hoofdtunnelbuis volgende, waterdruk ( $N_{ax}=45,7$  MN, zie [1]). Verder is voor de radiale waterdruk het uitgangspunt gehanteerd dat een hydrostatische waterdruk op de tunnel wordt aangebracht en dat de stijghoogte van het water bij hoogwater 56,1 m bedraagt [6]. Bij de berekening van variant 3 is de ondiepe ligging gesimuleerd door het halveren van zowel de axiale normaalkracht als de stijghoogte van het water.

*Tabel 5 Karakteristieke verschillen en overeenkomsten tussen de varianten 1 tot en met 4.*

| variant | beddings-constanten | Stijghoogte Water<br>[m] | axiale normaalkracht<br>hoofdtunnelbuis<br>[MN] | vriesbelasting<br>$P_h$<br>[MN/m <sup>2</sup> ] |
|---------|---------------------|--------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 1       | Tabel 3 (hoog)      | 56,10 (gem.)             | 45,70 (gem.)                                    | 21 (gem.)                                       |
| 2       | Tabel 4 (laag)      | 56,10 (gem.)             | 45,70 (gem.)                                    | 21 (gem.)                                       |
| 3       | Tabel 4 (laag)      | 28,05 (laag)             | 22,85 (laag)                                    | 21 (gem.)                                       |
| 4       | Tabel 4 (laag)      | 28,05 (laag)             | 22,85 (laag)                                    | 63 (hoog)                                       |

Zoals bovenstaand opgemerkt is in variant 3 de grootte van de vriesbelasting niet gewijzigd ten opzichte van variant 1 en 2. In variant 4 is de vriesbelasting echter verhoogd met een factor 3 ten opzichte van voorgaande varianten (van 21 MN/m<sup>2</sup> naar 63 MN/m<sup>2</sup>). De stijfheid van de ijsveren die het vrieslichaam representeren is in variant 4 echter niet veranderd.

Voor wat betreft de diepteligging van de tunnel en de beddingsconstanten van de grond is in variant 4 uitgegaan van dezelfde waarden als gebruikt in variant 3. Hiertoe is variant 3, na de berekening ervan, vergeleken met variant 1 en 2. Daar in variant 3 grotere voegopeningen en -verschuivingen



werden gevonden dan in voorgaande varianten, is indertijd besloten om voor variant 4 dezelfde uitgangspunten te hanteren als voor variant 3 (ondiepe ligging en lage beddingsconstanten).

## **2.2 Variant 5 en 6**

### **2.2.1 Inleiding**

Op basis van de resultaten van voorgenoemde berekeningen en als gevolg van onzekerheden voor wat betreft de in die berekeningen aangenomen uitzetting en stijfheid van het vrieslichaam zijn de laatste twee geplande varianten (variant 5 en 6) aanvankelijk (in 1998) niet uitgevoerd. Wel is in 1999 is door TNO NITG nader experimenteel onderzoek gedaan met betrekking tot deze problematiek [4], hetgeen voor Rijkswaterstaat tot de wens heeft geleid om variant 5 en 6 enigszins aan te passen. In de navolgende paragrafen zijn de verschillen van deze varianten ten opzichte van de voorgaand uitgevoerde berekeningen nader toegelicht.

#### **2.2.2 Variant 5 en 5a**

De resultaten van het door TNO NITG uitgevoerde onderzoek geven aan dat voor de vervorming van het vrieslichaam evenwijdig aan de dwarsverbinding gerekend moet worden met een waarde van 0,2% contractie tot 0,1% dilatantie [4]. Verder geven de metingen inzake de stijfheid van de bevroren grond aan dat de aanvankelijk gehanteerde waarde van 25000 MPa erg hoog is. Een waarde van 300 MPa lijkt meer reëel. Om de betreffende berekeningsvariant te kunnen blijven vergelijken met variant 3 is ten opzichte van deze variant alleen de stijfheid van de bevroren grond gewijzigd en is de vrije uitzetting van het vrieslichaam niet gewijzigd ten opzichte van variant 3, zijnde 10 mm uitzetting van het halve vrieslichaam.

In variant 5 is allereerst de invloed beschouwd van een stijfheid van het vrieslichaam die qua orde grootte gelijk is aan de onbevroren grond (30 MPa). In variant 5a is een meer reële verlaging van de stijfheid aangenomen (van 25000 MPa naar 300 MPa).

Om de gelijke uitzetting van het vrieslichaam bij afgenomen stijfheid te kunnen realiseren, is de vriesbelasting evenredig verlaagd ( $F=K \cdot u$ ). De overige invoergegevens voor variant 5 en 5a zijn ongewijzigd ten opzichte van variant 3 (zie Tabel 4 en Tabel 5).

#### **2.2.3 Variant 6 en 6a**

##### **2.2.3.1 Inleiding**

Omdat er tussen 1998 en heden een wijziging is opgetreden in de detaillering van de ringvoegen, is door de opdrachtgever voorgesteld om de invloed van deze wijziging te onderzoeken aan de hand van variant 6. De wijziging in de detaillering heeft betrekking op het gebruik van triplexplaatjes in plaats van Kaubit. In de eindige elementenberekeningen is deze wijziging aangebracht door het wijzigen van de (niet lineaire) materiaaleigenschappen van de ringvoegelementen. Onderstaand zal hierop in detail worden ingegaan (paragraaf 2.2.3.2 en 2.2.3.3). De overige materiaalgegevens en de belastingen zijn in variant 6 en 6a niet gewijzigd ten opzichte van respectievelijk variant 5 en 5a.

##### **2.2.3.2 Beschrijving ringvoeggedrag**

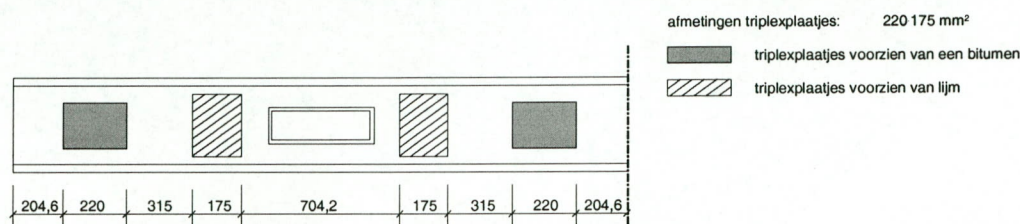
Voor de elementen die het ringvoeggedrag beschrijven, wordt in variant 6 en 6a onderscheid gemaakt naar twee gebieden, te weten (1) het gedeelte waar de nokken zich bevinden en (2) het



gedeelte met een vlakke voeg. In variant 1 tot en met 5 werd voor beide gebieden verondersteld dat (een deel van) de ringvoeg was voorzien van stroken Kaubit, waardoor deze delen van de ringvoeg wel normaalkracht maar geen schuifkracht konden overbrengen. In de gebieden zonder Kaubit werd beton-betoncontact verondersteld, hetgeen een beperkte, normaalspanningsafhankelijke schuifsterkte tot gevolg heeft (wrijvingscoëfficiënt  $\mu=0,4$ ). Voor de nokken werd verder aangenomen dat deze na 8 mm gingen aanliggen waardoor de afschuifstijfheid bij verschuivingen groter dan 8 mm substantieel toenam. Deze schuifsterkte is in dat geval onafhankelijk van de aanwezige normaalspanning. Opgemerkt wordt dat in geen van de varianten 1 tot en met 4 aanliggen van de nokken werd waargenomen. Uitgangspunt in deze berekeningen was perfecte plaatsing van de ringen, zodat vóór het belasten steeds 8 mm ruimte aanwezig was.

De detaillering van de ringvoegen in de huidige situatie is voor een half segment geïllustreerd in Figuur 2. Uit de figuur blijkt dat op 8 plaatsen per segment in de ringvoeg triplexplaatjes zijn aangebracht. In totaal zijn dat dus 56 triplexplaatjes per ringvoeg.

In overleg met de opdrachtgever is voor de berekening van variant 6 en 6a uitgegaan van afmetingen van de triplexplaatjes van 220-175 mm<sup>2</sup>. Op basis van de min of meer gelijkmatige verdeling van de triplexplaatjes kan de bestaande modellering, waarbij het ringvoeggedrag rond de omtrek van de hoofdtunnelbuis constant wordt verondersteld, ook worden toegepast voor variant 6 en 6a.



Figuur 2 Detaillering van de ringvoeg van een half segment waarbij triplexplaatjes zijn toegepast.

Het gebruik van triplex in plaats van Kaubit leidt ertoe dat zowel de axiale normaalkracht als de afschuifkrachten door de triplexplaatjes worden overgebracht. Dit in tegenstelling tot de voorgaande varianten waarbij de normaalkracht werd overgebracht door de gehele ringvoeg en de afschuifkracht door het vlakke voegdeel (beton-beton contact).

Uit Figuur 2 blijkt verder dat de triplexplaatjes nabij de nokken zijn voorzien van lijm, terwijl de overige ringvoegplaatjes zijn voorzien van een bitumen. Voor de triplexplaatjes met bitumen is met de opdrachtgever afgesproken dat deze wel normaalspanning maar geen schuifspanning kunnen overbrengen. Feitelijk betekent dit laatste dat de effectieve wrijvingscoëfficiënt van het contactvlak met een factor 2 wordt verlaagd (zie ook Bijlage A van [1]) en dat de schuifspanning zeer lokaal (via de triplexplaatjes naast de nokken), wordt overgedragen.

In de berekeningen aangaande variant 6 en 6a is bovenstaand omschreven ringvoeggedrag beschreven door gebruik te maken van verschillende materiaalmodellen voor de gebieden tussen de nokken en de nokken zelf. In de eerdere varianten hadden deze gebieden overigens ook verschillende materiaaleigenschappen.

### 2.2.3.3 Materiaaleigenschappen ringvoegen

Voor de eindige elementenberekeningen zijn de volgende materiaaleigenschappen van het triplex van belang:



- 1) normaalstijfheid
- 2) afschuifstijfheid
- 3) wrijvingscoëfficiënt

Voor de bepaling van deze eigenschappen is gebruik gemaakt van gegevens afkomstig van proeven uitgevoerd bij TNO-Bouw [8] en zoals die in de berekeningen betreffende de eerste orde evaluatie K100 zijn gebruikt [9]. Voor de Westerscheldetunnel zijn vergelijkbare proeven uitgevoerd [10]. De uit [10] beschikbaar gekomen informatie was echter onvoldoende om de normaal- en afschuifstijfheid van het triplex te kunnen bepalen. De wrijvingscoëfficiënt volgens [10] is vrijwel gelijk is aan die volgens [9]. Onderstaand is een overzicht gegeven van de bepaling van de verschillende materiaaleigenschappen. Hierbij is tevens aangegeven welke waarde wordt gevonden indien wordt uitgegaan van de in [10] omschreven proefresultaten ( voorzover mogelijk).

### *Normaalstijfheid triplex*

Voor de bepaling van de stijfheden van de triplex plaatjes is gebruikt gemaakt van de resultaten van proeven aangaande het afschuifgedrag van ringvoegen welke zijn uitgevoerd bij TNO Bouw [8]. Opgemerkt wordt dat ook voor de triplexplaatjes welke in de Westerscheldetunnel zijn gebruikt, proeven zijn uitgevoerd voor de bepaling van de materiaaleigenschappen. Omdat de resultaten van deze proeven echter summier waren, maar desondanks op vergelijkbare waarden leken te duiden als de proeven volgens [8] is voor de berekeningen uitgegaan van de resultaten van de bij TNO uitgevoerde proeven.

Bij de proeven volgens [8] is allereerst een initiële normaalkracht van 780 kN op de voegplaatjes aangebracht en vervolgens is deze afgelaten tot een lagere waarde en is een afschuifproef uitgevoerd. Tijdens het aanbrengen van de belastingstappen is telkens de dikte (en dus ook de indrukking) van het triplexplaatje gemeten. (zie Tabel 6).

*Tabel 6 Normalkrachtvervormingen in de afschuifproeven op triplex voegplaatjes, uitgevoerd bij TNO Bouw, volgens [8].*

| proefnr. | initiële<br>drukkracht<br>( $N=N_0$ )<br>[kN] | indrukking<br>triplex<br>bij $N=N_0$<br>[mm] | drukkracht<br>na aflaten<br>( $N=N'$ )<br>[kN] | indrukking<br>triplex<br>bij $N=N'$<br>[mm] | stijfheid<br>triplex<br>plaatje ( $K^1$ )<br>[kN/mm] |
|----------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| 1        | 780                                           | 1,024                                        | 260                                            | 0,974                                       | 10400                                                |
| 2        | 780                                           | 0,889                                        | 260                                            | 0,852                                       | 14054                                                |
| 3        | 780                                           | 0,901                                        | 520                                            | 0,879                                       | 11818                                                |
| 4        | 780                                           | 0,960                                        | 520                                            | 0,942                                       | 14444                                                |

Op basis van de gemiddelde stijfheid volgens Tabel 6 ( $12679 \cdot 10^3$  kN/m) en de afmetingen van de plaatjes die voor de proeven [8] zijn gebruikt ( $150 \cdot 150$  mm<sup>2</sup>), kan de normaalstijfheid van de voegplaatjes worden bepaald aan de hand van:

$$(1) \quad K_N = \frac{12679 \cdot 10^3}{0,15 \cdot 0,15} = 5,64 \cdot 10^8 \text{ kN/m}^3$$



Voor 56 triplexplaatjes met afmetingen  $220 \cdot 175 \text{ mm}^2$  betekent dit een normaalstijfheid van één ringvoeg van  $K_{N;RV} = 1,2 \cdot 10^9 \text{ kN/m}$ .

### **Afschuifstijfheid triplex**

Voor de bepaling van de afschuifstijfheid van de triplex voegplaatjes is gebruik gemaakt van het in TNO Bouw rapport 97-CON-R1337 bepaalde bi-lineaire spannings-vervormings-diagram [8]. Dit diagram bestaat uit een (opgaande) lineaire tak met een helling van  $10^6 \text{ kN/m}$  en een (horizontale) plastische tak. De initiële stijfheid bedraagt derhalve:

$$(2) \quad K_s = \frac{10^6}{0,15 \cdot 0,15} = 44,4 \cdot 10^6 \text{ kN/m}^3$$

Voor het totaal van 28 (verlijmde) triplexringvoegplaatjes van  $175 \cdot 220 \text{ mm}^2$  geldt dus een afschuifstijfheidstijfheid van totaal  $K_{S;RV} = 48,0 \cdot 10^6 \text{ kN/m}$ . De informatie van de in [10] gepresenteerde proeven was onvoldoende om de afschuifstijfheid volgens deze proeven te bepalen. De exacte posities van de meetpunten aan de hand waarvan de afschuifvervorming is bepaald, zijn niet uit de beschikbare informatie af te leiden.

### **Wrijvingscoëfficiënt triplex**

Uit de resultaten van proeven op triplexplaatjes [8] is tenslotte gebleken dat de wrijvingscoëfficiënt van triplex bij benadering gelijk is aan die van beton ( $\mu_{\text{triplex}} = \mu_{\text{beton}} = 0,4$ ). Opgemerkt wordt dat langedureffecten in verband met mogelijke degradatie van het triplex hierin niet zijn verwerkt.

Uit de proeven op triplex volgens [10] volgt een vergelijkbare wrijvingscoëfficiënt als volgens [8], namelijk 0,39.

### **Verdeling van de stijfheden**

Omdat voor de berekeningen wordt verondersteld dat de normaalkrachtoverdracht via alle triplexplaatjes geschiedt, terwijl de schuifspanningen alleen worden overgedragen door de triplexplaatjes nabij de nokken, is voor de berekeningen van variant 6 en 6a uitgegaan van twee verschillende materiaalmodellen per ringvoeg.

In deze benaderingswijze worden de nokken in het eindige elementenmodel gebruikt om de triplexplaatjes nabij de nokken in de ringvoegen te schematiseren, terwijl het overige deel van de ringvoeg in het model alleen normaalkracht kan overdragen. De afschuifstijfheid van dit deel van de ringvoeg wordt dus verwaarloosd.

Omdat het oppervlak van de nokken in het eindige elementenmodel afwijkt van het oppervlak van de triplexplaatjes, zijn de stijfheden van de elementen zodanig aangepast, dat de stijfheid van de verschillende ringvoegonderdelen de gewenste waarde heeft. De stijfheid  $K$  wordt bepaald door:

$$(3) \quad K_i = B_i \cdot A_i$$

waarin  $B_i$  de beddingsconstante en  $A_i$  het oppervlak van het beschouwde onderdeel is. Uitgaande van de normaalstijfheid van één ringvoeg geldt voor de nokken en de vlakke voeg:

$$(4) \quad K_{N;nokken} = K_{N;vvoegen} = 0,5 \cdot K_{N;RV} = 303,7 \cdot 10^6 \text{ kN/m}$$



Voor de afschuifstijfheid van de elementen ter plaatse van de nokken geldt verder:

$$(5) \quad K_{S;nokken} = K_{S;RV} = 48,0 \cdot 10^6 \text{ kN/m}$$

terwijl voor de overige elementen (ter plaatse van het gedeelte met de vlakke voeg) geldt:

$$(6) \quad K_{S;vvoegen} = 0$$

Uitgaande van de in het eindige elementenmodel aanwezige oppervlakken van de nokken en de vlakke voegen kunnen vervolgens de beddingsconstanten van de twee onderdelen worden bepaald.

Om de wrijving van de triplexplaatjes nabij de nokken te modelleren is de wrijvingscoëfficiënt van de elementen die dit gedrag beschrijven (ter plaatse van de nokken) 0,4 verondersteld, hetgeen overeen komt met de proefondervindelijk vastgestelde wrijvingscoëfficiënt van het triplex. Doordat slechts de helft van de normaalkracht door de nokken gaat (omdat  $K_{N;nokken} = 0,5 \cdot K_{N;RV}$ ) zal afschuiving van de ringvoeg plaatsvinden bij een gemiddelde schuifkracht ter grootte van  $0,5 \cdot \mu \cdot N_{ax}$ .

Op basis van voorgaand omschreven eigenschappen kan voor de delen van de ringvoeg met een vlakke voeg lineair elastisch materiaalgedrag worden verondersteld.







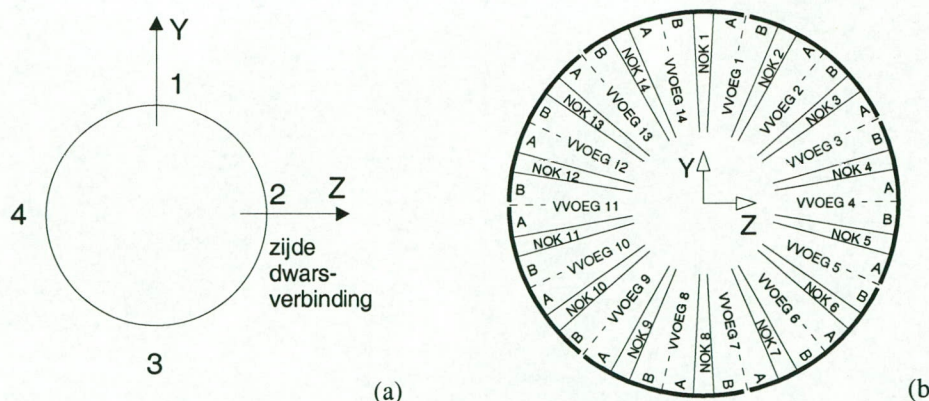
### 3. Bespreking van de resultaten

#### 3.1 Inleiding

De resultaten betreffende variant 5 en 6 staan weergegeven in achtereenvolgens Bijlage A en Bijlage B. De resultaten in annex 3 tot en met 6 van deze bijlagen, zijn op gelijksoortige wijze weergegeven als in voorgaande rapporten [1]-[3], namelijk aan de hand van contourplots van de axiale- en tangentiële normaalspanningen in de uiterste vezels van de wand van de segmenten alsmede aan de hand van de totale en de incrementele vervormingen zoals die in iedere fase optreden.

De verplaatsingen van een aantal markante punten op de mantel van de hoofdtunnelbuis (zoals weergegeven in Figuur 3a) staan eveneens samengevat in de bijlagen (annex 1). Verder is ook de ovalisatie ( $\delta_{Y3-Y1}$  en  $\delta_{Z4-Z2}$ ) en starre lichaamsverplaatsing ( $\delta_{Y1+Y3}/2$  en  $\delta_{Z2+Z4}/2$ ) van de buitenste en middelste ringen van het gemodelleerde tunneldeel (ring 1, 7 en 14) weergegeven in annex 1 van de bijlagen, alsmede een overzicht van de plaats en grootte van de maximaal optredende openingen en verschuivingen in de ring- en langsvoeegen gedurende de vijf berekende fasen.

In annex 2 van Bijlage A en Bijlage B is een overzicht gegeven van de berekende schuifspanningen en koppelkrachten in de ringvoegen van de eerste 5 gemodelleerde voegen nabij de dwarsverbinding. De koppelkrachten zijn hierbij gedefinieerd als de schuifkracht die in een gedeelte van één ringvoeg optreedt. De kracht kan radiaal en tangentieel gericht zijn (respectievelijk  $F_{K,rad}$  en  $F_{K,tan}$ ) en geldt voor een gebied ter grootte van een nok in het eindige elementenmodel of ter grootte van het gedeelte waar een vlakke voeg aanwezig is (dus daar waar Kaubit of triplex zit). Eén en ander is verduidelijkt aan de hand van Figuur 3b. Uitgaande van zeven gemodelleerde segmenten per ring en twee nokken per segment zijn er in totaal dus 14 nokken en koppelkrachten. Tevens zijn er 14 gebieden tussen de nokken. In Figuur 3b zijn deze gebieden weergegeven met *vvoeg 1* tot en met *vvoeg 14*. Om onderscheid te maken in de koppelkrachten ter plaatse van de verschillende segmenten zijn de laatst genoemde koppelkrachten onderverdeeld in een component A en een component B (zie Figuur 3b). In de bijlagen worden de componenten aangeduid met de sub-scripts A en B.



Figuur 3 Richting van de assen in het eindige elementenmodel (a) en nummering van de ringvoegonderdelen (vlakke voegen en nokken) (b)

Met betrekking tot de getoonde extremen in de legenda van de figuren in annex 3 tot en met 6 van Bijlage A en Bijlage B wordt opgemerkt dat dit het absolute maximum dan wel minimum betreft.



Meestal is dit een zeer lokaal optredende spanning. Voor een algemeen beeld kunnen de optredende spanningen derhalve beter worden afgeschat aan de hand van de kleurschakering in de betreffende figuur. De kleurverdeling in de spanningsfiguren is gelijk voor alle fasen en varianten. Om een eerste indruk te krijgen van de verschillen tussen de varianten, kunnen de absolute maxima en minima echter wel als indicatie worden gebruikt.

In de navolgende paragrafen zullen de resultaten van achtereenvolgens variant 5 en 6 worden besproken aan de hand van de verschillende berekende fasen. Daar variant 5 qua invoergegevens in grote mate overeen komt met variant 3, zullen de resultaten in hoofdzaak worden geëvalueerd en vergeleken op basis van de resultaten van variant 3 (paragraaf 3.2). Vervolgens zal in paragraaf 3.3 variant 6 worden beschouwd en in detail worden vergeleken met variant 5. De resultaten van de varianten 5a en 6a worden beknopt besproken aan het einde van dit hoofdstuk (respectievelijk paragraaf 3.4 3.5). In Bijlage C en Bijlage D is een uitgebreid overzicht van de resultaten betreffende deze twee varianten weergegeven. De opbouw van deze bijlagen is gelijk aan de opbouw van Bijlage A en Bijlage B met dien verstande dat in annex 2 een overzicht is gegeven van de verplaatsingen in de ringvoegen (verschuivingen).

## 3.2 Variant 5

### 3.2.1 Inleiding

Voor de beoordeling en evaluatie van variant 5 worden in deze paragraaf de resultaten van deze variant vergeleken met de resultaten van variant 3, daar met betrekking tot deze variant slechts één variabele (de stijfheid van het vrieslichaam) gewijzigd is. Omdat ten opzichte van variant 1, 2 en 4 meerdere variabelen in variant 5 zijn gewijzigd, is het niet eenduidig aan te geven door welke wijzigingen de verschillen worden veroorzaakt.

### 3.2.2 Fase 1

Doordat voor variant 5 alleen wijzigingen zijn aangebracht voor wat betreft de stijfheid van het vrieslichaam en omdat het vrieslichaam pas in fase 2 van de berekening wordt geactiveerd, zijn in fase 1 geen verschillen tussen variant 3 en 5. Een en ander blijkt uit de verplaatsingen, ovalisaties en spanningsverdelingen zoals weergegeven in de bijlagen.

Opgemerkt wordt dat eventuele (kleine) verschillen worden veroorzaakt doordat in de periode tussen het uitvoeren van de berekeningen aangaande variant 3 en 5 wijzigingen zijn aangebracht in de eindige elementenprogrammatuur. Hierdoor is de convergentie gedurende het berekeningsproces niet meer exact gelijk, hetgeen verschillen in de resultaten tot gevolg kan hebben. Deze verschillen zijn verwaarloosbaar klein en treden met name op bij de berekenende spannings- en vervormingspieken.

### 3.2.3 Fase 2

In fase 2 van variant 5 wordt de vriesbelasting aangebracht. Doordat de stijfheid van het vrieslichaam in variant 5 een factor 830 kleiner is dan bij variant 3 en omdat de vrije uitzetting van het vrieslichaam gelijk is (10 mm, zie paragraaf 2.2.2), is de belasting op het vrieslichaam evenredig verlaagd. In feite wordt de hoofdtunnelbuis hierdoor relatief stijver ten opzichte van het vrieslichaam, hetgeen kleinere vervormingen van de lining tot gevolg heeft. De berekende horizontale ovalisaties laten dit duidelijk zijn. In variant 3 neemt de horizontale ovalisatie in fase 2 toe van 9 mm (fase 1) naar 14 mm. In variant 5 neemt de horizontale ovalisatie daarentegen maar 1,3



mm toe, hetgeen dus 3,7 mm minder is dan in variant 3. Door de kleinere ovalisaties zijn ook de spanningen, en met name de tangentiële spanningen ( $\sigma_{yy}$ ), substantieel kleiner.

Uit Bijlage A volgt dat, door de kleinere stijfheid van het vrieslichaam, spanningswijzigingen ten opzichte van de aanvangssituatie (fase 1) over grotere lengte van de lining (vanaf de dwarsverbinding) merkbaar zijn. In dit kader kan de vraag worden gesteld of de aangenomen lengte van 14 gemodelleerde ringen voldoende lang is.

De maximale voegopeningen in de langs- en ringvoegen zijn in variant 3 in alle gevallen kleiner dan 0,75 mm. In variant 5 zijn deze, als gevolg van de kleinere verplaatsingen en spanningen zelfs kleiner dan 0,5 mm. De maximale voegverschuiving neemt in fase 2 van variant 5 toe tot 0,4 mm. In fase 2 van variant 3 bedroeg de maximale ringvoegverschuiving daarentegen 2,2 mm.

### 3.2.4 Fase 3

Doordat de stijfheid van het vrieslichaam aanzienlijk kleiner is dan in de voorgaande varianten, geeft de verwijdering van de grond in de kern van het vrieslichaam in fase 3 een substantiele ontlasting ter plaatse van de dwarsverbinding. Dit is duidelijk waarneembaar indien de incrementele vervormingen in fase 3 worden beschouwd (Figuur 23b in Bijlage A). In variant 3 was het verwijderen van de kern van het vrieslichaam en het daarin aanwezige tunnelsegment nauwelijks van invloed op de vervormingen buiten het vrieslichaam. De reden hiervoor was dat het vrieslichaam nagenoeg oneindig stijf was en daardoor de kern van het vrieslichaam feitelijk isoleerde van het overige deel van de lining. In variant 5 is de stijfheid van het ijs echter veel kleiner, waardoor een ontlasting van de kern van het vrieslichaam wel degelijk invloed heeft op de krachtwerving in de tunnelbuis buiten het vrieslichaam. Dit blijkt ook uit het feit dat de totale vervormingen van de tunnelbuis worden gedomineerd door de incrementele vervormingen in fase 3.

Berekeningen waarbij het stalen deursegment werd verwijderd en waarbij de door grond belaste tunnelbuis niet werd belast noch ondersteund door het vrieslichaam hebben aangetoond dat de vervormingen die in dat geval optreden, van dezelfde orde grootte zijn als de vervormingen welke in fase 3 (na ontlasten) worden waargenomen. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de vervormingen en spanningen na fase 3 niet zo zeer bepaald worden door de vriesbelasting, maar veel meer door het ontbreken van de ondersteuning van het vrieslichaam in combinatie met het verwijderen van het stalen deursegment. Hierdoor gaat de samenhang van de aansluitende segmenten met het overige deel van de tunnelbuis verloren.

Als gevolg van de grote verschillen in vervormingen tussen variant 3 en 5, treden eveneens grote verschillen op in de maximaal optredende voegopeningen en -verschuivingen. De verschuiving neemt zelfs toe tot meer dan 3,5 mm, terwijl in variant 3 maximaal 2,2 mm verschuiving optrad. De voegopening was in variant 3 in alle gevallen kleiner dan 0,8 mm. Bij variant 5 neemt deze plaatselijk toe tot 1,7 mm. In zowel variant 3 als 5 is de maximale ringvoegopening bij benadering gelijk aan de opening van de langsvoegen.

Het moge duidelijk zijn dat de maximale ringvoegverschuivingen optreden in de voeg direct naast de toekomstige dwarsverbinding. Als gevolg van de verschuivingen in de betreffende ringvoeg zullen de raveelbalken welke vóór het vriezen aan de binnenzijde van de hoofdtunnelbuis zijn aangebracht, worden belast, hetgeen de verschuivingen enigszins onderdrukt. De berekende grootte van de dwarskracht in de raveelbalken is overigens niet bekend omdat hiervan geen berekeningsresultaten beschikbaar zijn. Uit het vervormingsbeeld van de raveelbalken blijkt echter dat de invloed ervan beperkt is. Een mogelijke reden hiervoor is dat de (doorgaande) raveelbalken in het eindige



elementenmodel pendelend zijn verbonden tussen drie punten. Als gevolg hiervan zullen zich alleen dwarskrachten in de balken ontwikkelen indien deze drie punten niet meer op één lijn liggen.

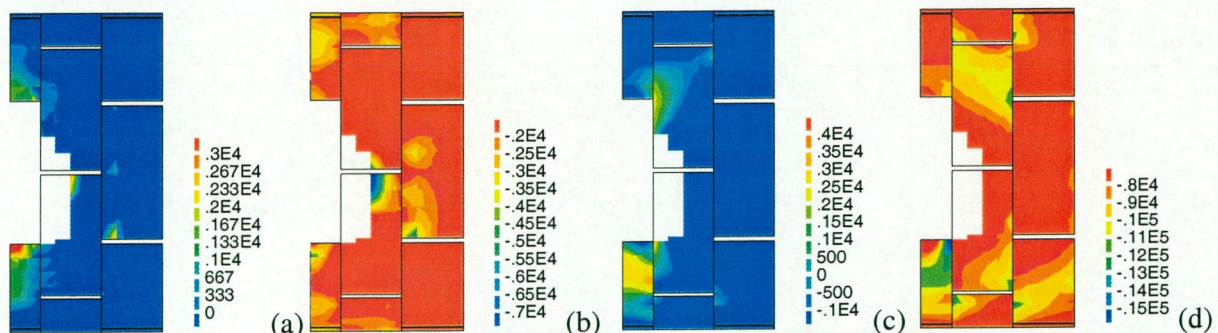
De spanningen (axiaal en tangentieel) zijn in zowel variant 3 als 5 extreem nabij de dwarsverbinding. In variant 5 zijn deze echter aanzienlijk groter dan in variant 3. Tevens zijn de spanningen in fase 3 en 5 van variant 5 vergelijkbaar. De reden hiervoor zal nader worden toegelicht in de navolgende paragraaf.

### 3.2.5 Fase 5

In fase 5 is de dwarsverbinding gemaakt en wordt het vrieslichaam ontdooid. Hierdoor vindt een verdere ontlasting plaats van de hoofdtunnelbuis nabij de dwarsverbinding. Deze toenemende ontlasting leidt tot een normaalkracht in de dwarsverbinding. Naarmate de ontlasting van de tunnelbuis groter is, neemt de normaalkracht in de dwarsverbinding toe. Doordat een groot deel van de ontlasting van de lining reeds in variant 5 in fase 3 heeft plaatsgevonden, wijzigen de vervormingen in fase 5 (Figuur 26) niet substantieel. Daar komt bij dat de samenhang van de hoofdtunnelbuis, welke in fase 3 beperkt was, weer is hersteld door de reeds gerealiseerde dwarsverbinding. Omdat verder de aanvankelijke vervorming door het bevriezen van het vrieslichaam in fase 2 kleiner was dan in variant 3, wordt de terugvering van de hoofdtunnelbuis nog verder beperkt. Doordat de dwarsverbinding dus praktisch spanningsloos tussen de twee hoofdtunnelbuizen wordt gemonteerd, bedraagt de normaalkracht in de dwarsverbinding “slechts” 3,0 MN. In variant 3 was dit nog 11,1 MN, hetgeen aanzienlijk meer is.

Het incrementele vervormingsbeeld betreffende fase 5 van variant 5 (Figuur 26b) laat duidelijk zien dat het ontdooien van het vrieslichaam weinig additionele ontlasting van de eerste twee ringen tot gevolg heeft (dit zijn de ringen waaraan de dwarsverbinding is bevestigd). Ring 3 vertoont daarentegen relatief grote vervormingen (maximaal 2 mm), dit in tegenstelling tot variant 3 waar de grootste vervormingen aan de onderzijde van ring 1 optraden (maximaal 4 mm).

De spanningsverdelingen nabij de dwarsverbinding in de laatste berekeningsfase (fase 5) van variant 5 zijn weergegeven in Figuur 4. In de figuur zijn de spanningen zodanig geschaald dat de maxima en minima worden benadrukt. Voor wat betreft de axiale normaalspanningen blijkt dat deze maximaal dan wel minimaal zijn aan respectievelijk de onder- en zijkant van de dwarsverbinding (Figuur 4a en Figuur 4b).



Figuur 4 Spanningscontouren variant 5 in de gebieden waar de axiale trek- (a) en drukspanningen (b) alsmede de tangentiële trek- (c) en drukspanningen (d) extreem zijn. Alle getoonde maxima en minima treden op in fase 5 aan respectievelijk de binnen- (a, c) en buitenzijde (b, d) van de tunnelwand.

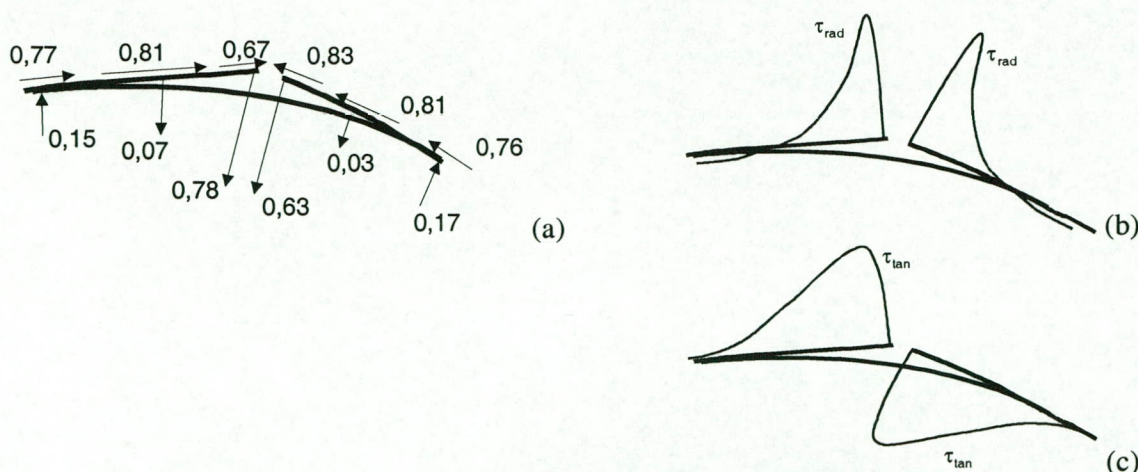


Uit Figuur 4a en Figuur 4b volgt dat de maximale axiale trekspanning orde grootte 5 MPa bedraagt (lineair elastisch), terwijl de maximale (axiale) drukspanning bij benadering  $-7,5$  MPa bedraagt. Ten opzichte van variant 3 zijn beide extremen afgenomen. Hetzelfde geldt voor de extreme tangentiële spanningen, welke ongeveer 3 MPa (trek) en  $-20$  MPa druk bedragen (Figuur 4c en Figuur 4d). Verder kan uit de figuren worden opgemaakt dat, evenals bij voorgaande varianten, de extremen snel afnemen.

### 3.2.6 Grootte en ontwikkeling van de koppelkrachten

De berekende schuifspanningsverdelingen en koppelkrachten in de ringvoegen zijn weergegeven in Bijlage A.2. Hiertoe zijn in Figuur 11 tot en met Figuur 14 de spanningsverdelingen na de verschillende berekeningsfasen weergegeven. In Tabel 14 tot en met Tabel 21 zijn de radiaal en tangentiële gerichte koppelkrachten in de vlakke delen van de ringvoegen (numeriek) weergegeven. Omdat de schuifspanningsverdelingen laten zien dat deze in de nokken verwaarloosbaar zijn, zijn de koppelkrachten in de nokken niet in de tabellen van Bijlage A.2 weergegeven. Het feit dat de nokken geen schuifkrachten overbrengen komt overigens overeen met de verwachting gebaseerd op de berekende voegverschuivingen. Omdat de voegverschuiving in geen van de ringen groter is dan 8 mm, liggen de nokken niet aan in de inkassingen en brengen deze dus geen belasting over.

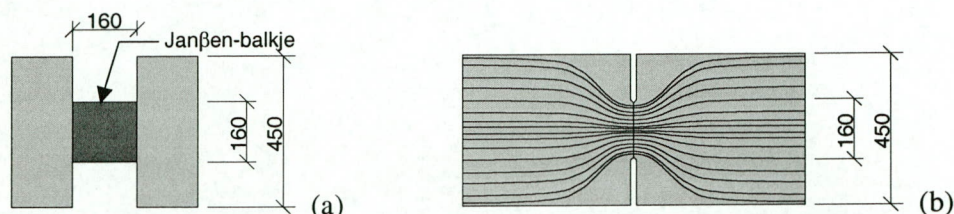
Indien de koppelkrachten in radiale en tangentiële richting met elkaar worden vergeleken, dan blijkt dat de tangentiële schuifspanningen substantieel groter zijn dan de radiale schuifspanningen. Een en ander wordt waarschijnlijk veroorzaakt doordat de langsvoegeen een relatief slap gedrag in normaalrichting vertonen. Hierop zal aansluitend nader worden ingegaan. In Figuur 5a is het verloop van de spanningen en de grootte daarvan in de knopen nabij een langsvoeg weergegeven. De vectoren duiden op de radiale en tangentiële schuifspanningen tussen twee ringen. Uit de figuur blijkt dat de schuifspanningen pieken ter plaatse van de aansluiting met de langsvoeg. Verder blijkt dat de radiale schuifspanning links en rechts van de langsvoeg gelijk is van teken, terwijl de tangentiële schuifspanning van teken wisselt. Het mogelijke verloop van de schuifspanningen links en rechts van de langsvoegeen is geïllustreerd in respectievelijk Figuur 5b ( $\tau_{rad}$ ) en Figuur 5c ( $\tau_{tan}$ ). Op basis van de randvoorwaarde ter plaatse van de langsvoeg geldt dat de schuifspanning ( $\tau_{rad}$  én  $\tau_{tan}$ ) daar nul is. In beide gevallen neemt de spanning snel toe tot een piekwaarde, waarna deze wederom afneemt.



Figuur 5 Overzicht van de grootte (in  $\text{kN/m}^2$ ) en richting van de schuifspanningen op knooppniveau nabij een willekeurige langsvoeg in fase 1 van variant 5.



Zoals voorgaand opgemerkt worden de tangentiële schuifspanningsconcentraties nabij de langsvoeugen vermoedelijk veroorzaakt door het slappere gedrag van de langsvoeugen in normaalrichting. Doordat de feitelijke aansluiting tussen twee segmenten slechts over beperkte hoogte plaatsvindt, is er sprake van spanningsspreiding voor en na de voegaansluiting (zie Figuur 6a), hetgeen een verzwakking van de doorsnede tot gevolg heeft (verlaging van de stijfheid  $EA$ ). In het eindige elementenmodel is de voeg gemodelleerd met behulp van een zogenaamd Janßen-balkje met een doorsnede van  $160 \cdot 150 \text{ mm}^2$  (Figuur 6b). Doordat in het numerieke model sprake is van perfecte aansluiting (zonder invloeden van spanningsspreiding over de dikte van de schaafelementen, komt de stijfheid van de aansluiting overeen met de stijfheid van de doorsnede zoals die in werkelijkheid is.



Figuur 6 Schematisatie van de langsvoeg met een Janßen-balkje (a) en werkelijke detaillering van de langsvoeg met de daarin optredende spanningstrajectoriën (b).

Ter illustratie: indien één segment wordt beschouwd dan bedraagt de normaalstijfheid in ringrichting  $EA_s/l_s$ . Het oppervlak van het Janßen-balkje bedraagt verder ongeveer 35% van het segmentoppervlak  $A_s$  en de lengte van het balkje is 3,3% van de lengte van het totale segment ( $l_s$ ). Doordat het segment en het Janßen-balkje in serie zijn geschakeld geldt voor de gecombineerde normaalstijfheid

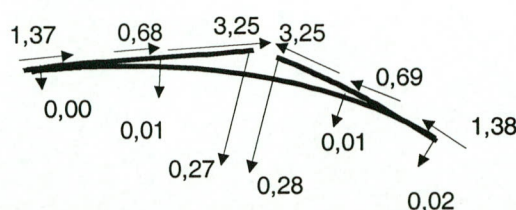
$$(7) \quad \frac{1}{K} = \frac{l_s}{EA_s} + \frac{3,3 \cdot l_s}{35 \cdot EA_s}$$

Uitwerking van bovenstaande vergelijking levert een gecombineerde stijfheid van ongeveer 90% van de stijfheid van een doorgaande (monoliete) verbinding, hetgeen overeenkomt met de waarde zoals bepaald in [9]. Door de lokaal lagere normaalstijfheid van de langsvoeg concentreren de normaalvervormingen zich in de langsvoeg, terwijl deze in de naastgelegen ring uniform (willen) verdelen. Hierdoor ontwikkelen zich tangentiële schuifspanningen in de ringvoegen nabij de langsvoeugen. Aan weerszijden van de voeg zijn deze schuifspanningen tegengesteld gericht. De resultaten in Figuur 5 en in de tabellen van Bijlage A.2 bevestigen dit beeld.

Indien een monoliete tunnelbuis wordt belast met een uniforme, radiaal gerichte belasting, dan zal dit voor de tunnelwand alleen een uniforme ringvoorspanning tot gevolg hebben. Er zal in dat geval geen ovalisatie optreden en de schuifspanningen zullen nul zijn. Op basis van bovenstaande zal voor een gesegmenteerde tunnelbuis daarentegen gelden dat aanzienlijke tangentiële schuifspanningen in de ringvoegen zullen optreden. Een lineaire berekening waarbij de gemiddelde grondbelasting uit fase 1 op de tunnelbuis is aangebracht, bevestigt dit beeld (zie Figuur 7). Ten opzichte van fase 1 (Figuur 5a) neemt de het maximum van de tangentiële schuifspanning toe tot 3,25 MPa ter plaatse van de langsvoeg. Zoals verwacht is de radiale schuifspanning nagenoeg nul. De lokale schuifspanningspiek ter plaatse van de langsvoeg wordt vermoedelijk deels veroorzaakt dwars-contractie-effecten.



De maximaal berekende koppelkrachten per voegdeel kunnen worden afgelezen uit de tabellen in Bijlage A.2. Een overzicht hiervan voor de verschillende fasen is gegeven in Tabel 7. Iedere koppelkracht zoals gegeven in de tabel omvat de kracht die door 1/28 deel van de ringvoeg wordt overgedragen (zie ook Figuur 3b). In de tabel is verder aangegeven hoe groot de schuifkracht ten opzichte van de normaalkracht op deze plaats is ( $F/N$ ). Uit de tabel kan worden afgeleid dat deze waarde nooit groter is dan de wrijvingscoëfficiënt ( $\mu=0,17$ ). In de laatste kolom van Tabel 7 is het maximum van de gecombineerde koppelkracht gegeven (de modulus van  $F_{K;rad}$  en  $F_{K;tan}$ ). De plaats waar deze optreedt behoeft overigens niet dezelfde te zijn als de plaats waar het maximum van  $F_{K;rad}$  of  $F_{K;tan}$  optreedt.



Figuur 7 Overzicht van de grootte (in  $\text{kN/m}^2$ ) en richting van de schuifspanningen op knooppniveau bij een uniforme grondbelasting van  $250 \text{ kN/m}^2$

Het overzicht van de maximale koppelkrachten in Tabel 7 geeft aan dat de gecombineerde schuifkracht in de ringvoegen in de eerste fase wordt gedomineerd door de tangentiële component. De radiale component is nauwelijks van invloed. Vanaf fase 2 neemt de radiale component als gevolg van de vriesbelasting echter aanzienlijk toe. In fase 3 is de radiale component zelfs bepalend voor de grootte van de gecombineerde koppelkracht ( $F_{K;max}$ ). In dit kader wordt opgemerkt dat  $F_{K;rad;max}$  en  $F_{K;max}$  niet op dezelfde plaats in de ringvoegen hoeven op te treden.

Tabel 7 Overzicht van de maximale koppelkrachten in de ringvoegen in de verschillende berekeningsfasen. De waarden tussen haakjes duiden op de maximale koppelkracht als percentage van de gemiddelde axiale voorspankracht ( $N_{ax}=22,85 \text{ MN}$ )

| fase | $F_{K;tan;max}$<br>[kN] (%) | $F_{K;rad;max}$<br>[kN] (%) | $F_{K;max}$<br>[kN] (%) |
|------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| 1    | 96 17                       | 34 5                        | 96 17                   |
| 2    | 95 12                       | 87 13                       | 97 17                   |
| 3    | 125 14                      | 142 17                      | 144 17                  |
| 5    | 115 14                      | 100 12                      | 121 17                  |

\*) Voor iedere ringvoeg in variant 5 kunnen 28 koppelkrachten worden berekend. Iedere koppelkracht kan worden bepaald voor het gebied tussen een langsvoeg en de naastgelegen nok.

Er vanuit gaande dat slippen optreedt bij  $0,17 \cdot N_{ax}$  ( $\mu_{eq}=0,17$ ), dan kan worden geconcludeerd dat in iedere fase de schuifsterkte in de voeg wordt overschreden. Over het algemeen lokaliseren de verschuivingen zich op plaatsen met schuifspanningspieken in combinatie met relatief lage normaalspanningen.

Uit Tabel 7 kan verder worden geconcludeerd dat de ringvoegen in fase 3 het zwaarst worden belast in zowel tangentiële als radiale richting. Ten opzichte van de uitgangssituatie (fase 1) is de



tangentiële schuifkracht in fase 3 met 30% toegenomen. De radiaal gerichte koppelkracht neemt in fase 3 toe tot ruim 140 kN, hetgeen meer dan vier maal zoveel is als in fase 1. De maximale koppelkracht in variant 5 bedraagt bijna 145 kN.

Tenslotte wordt opgemerkt dat in deze rapportage de koppelkrachten zoals die zijn berekend voor variant 5 niet zijn vergeleken met die volgens variant 3, daar in laatstgenoemde variant geen koppelkrachten zijn berekend. Een vergelijking van de koppelkrachten berekend voor variant 5 en 6 is gegeven in paragraaf 3.3.

### **3.3 Variant 6**

#### **3.3.1 Inleiding**

Voor de beoordeling en evaluatie van variant 6 worden in deze paragraaf de resultaten van deze variant vergeleken met de resultaten van variant 5 daar met betrekking tot deze variant slechts één variabele is gewijzigd, namelijk de materiaalmodellering van de ringvoegelementen. Omdat ten opzichte van de overige varianten meerdere variabelen zijn gewijzigd, is het niet eenduidig aan te geven door welke wijzigingen de verschillen worden veroorzaakt. In de navolgende paragrafen zal aandacht worden geschonken aan de vier afzonderlijke berekeningsfasen. In paragraaf 3.3.6 zal in detail worden ingegaan op de koppelkrachten in de ringvoegen gedurende de verschillende berekeningsfasen.

#### **3.3.2 Fase 1**

In de fase voordat wordt begonnen met het bevriezen van de grond (fase 1), is de invloed van het toepassen van triplexplaatjes niet erg groot. De in Bijlage B.3 getoonde vervormingen geven aan dat de vervormingen vergelijkbaar zijn met die in variant 5. De ovalisaties verschillen hierdoor ook slechts enkele procenten. Voor variant 6 bedraagt de horizontale ovalisatie van ring 1 9,41 mm (indrukking), hetgeen ruim 0,3 mm meer is dan bij variant 5. De verticale ovalisatie in de eerste ring in variant 5 en 6 is in deze fase respectievelijk 5,85 mm (variant 5) en 6,15 mm (variant 6).

De tangentiële spanningsverdelingen in Bijlage B.3 geven aan dat met name de trekspanningen aan de onderzijde van de hoofdtunnelbuis in variant 6 kleiner zijn dan bij variant 5. De normaalspanningen, welke worden bepaald door de axiale normaalkracht is vergelijkbaar voor beide varianten.

Evenals in variant 5 zijn de verschuivingen en openingen in de langsvoegen in variant 6 verwaarloosbaar klein. In de ringvoegen treden daarentegen aanzienlijk grotere voegverschuivingen en -opening op. De maximale ringvoegopenstand neemt toe van 0,25 mm (variant 5) tot 0,4 mm (variant 6). De maximale ringvoegverschuiving neemt zelfs met een factor 6 toe (van 0,1 mm tot 0,6 mm). De reden hiervoor is vermoedelijk dat de ringvoegen ter plaatse van de langsvoegen (daar waar de ringstijfheid minimaal is), vrij kunnen verschuiven ( $\mu=0$ ).

#### **3.3.3 Fase 2**

In fase 2 wordt de vriesbelasting aangebracht. Evenals voor fase 1 geldt hierbij dat de verschillen tussen variant 5 en 6 niet bijzonder groot zijn. De toename van de horizontale ovalisatie van de eerste ring als gevolg van het aanbrengen van de zijdelingse vriesbelasting is voor variant 5 en 6 gelijk (1,2 mm).



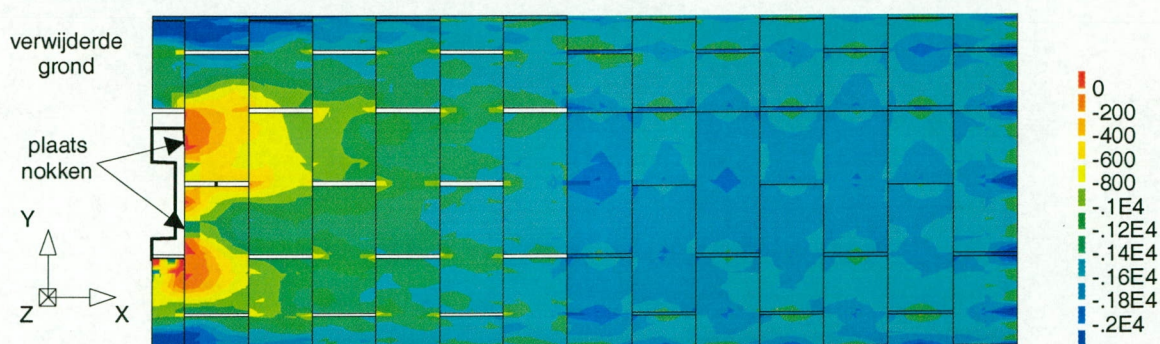
Voor wat betreft de voegverschuivingen en -openingen geldt dat deze, evenals in fase 1, maximaal zijn in de ringvoeg tussen de tweede en de derde ring ter plaatse van het vrieslichaam. Beiden zijn, evenals in fase 1, kleiner dan 1 mm.

De krachtsverdeling in de hoofdtunnelbuis is voor variant 6 vergelijkbaar met die van variant 5, met dien verstande dat de spanningsgradiënt in variant 6 kleiner is. Een en ander geldt voor zowel de tangentiële spanningen ( $\sigma_{tan}$ ) als de axiale spanningen ( $\sigma_{ax}$ ).

### 3.3.4 Fase 3

Doordat de grondstijfheid in variant 6 ongewijzigd is ten opzichte van variant 5, heeft het verwijderen van de grond binnenin het vrieslichaam en het deursegment een vergelijkbaar effect. Er treedt namelijk een aanzienlijke ontlasting van de hoofdtunnelbuis op, aan de zijde van de dwarsverbinding (zie Bijlage B.4). In tegenstelling tot variant 5 vindt deze ontlasting hoofdzakelijk plaats in de ring direct naast de dwarsverbinding (ring 2). In variant 5 ondervonden ook ring 3 en 4 nog enig effect van de ontlasting. Hieruit kan worden geconcludeerd dat het verwijderen van de grond binnenin het vrieslichaam feitelijk tot gevolg heeft dat de twee segmenten in ring 2 naast het stalen deursegment, uit de lining worden gedrukt. De mogelijke oorzaak hiervan is geïllustreerd in Figuur 8. In de figuur is een overzicht gegeven van het verloop van de gemiddelde axiale normaalspanning in de lining. Het omlijnde gebied aan de linkerzijde van de figuur geeft de plaats van de grond aan welke in fase 3 is verwijderd. Verder is ook de plaats van de nokken tussen ring 2 en het stalen deursegment gegeven. Uit het normaalspanningsverloop blijkt dat de in de figuur gemarkeerde nokken een aanzienlijke lagere kracht overbrengen dan de overige nokken. Hetzelfde geldt voor de nokken tussen ring 2 en 3 en die in het verlengde liggen. Door deze lokaal relatief kleine opspanning van ring 2 zijn de betreffende nokken nauwelijks effectief en wordt het roteren van de aansluitende segmenten nauwelijks verhinderd.

Het feit dat het uitdrukken van de segmenten aansluitend aan de dwarsverbinding in variant 5 niet (of in mindere mate) optreedt, is waarschijnlijk het gevolg van de meer verdeelde normaalspannings-overdracht in de ringvoeg. Door deze verdeling kunnen zich namelijk over een groter gebied schuifspanningen ontwikkelen die tezamen een moment kunnen vormen dat het roteren van de segmenten en daarmee het uitdrukken ervan voorkomt. In variant 6 zijn de koppelkrachten geconcentreerd in vier punten per segment (aan iedere zijde de nokken). Bij het wegvallen van twee van die punten ontstaat feitelijk een scharnier, waarmee het roteren van de segmenten vrijwel niet kan worden verhinderd.



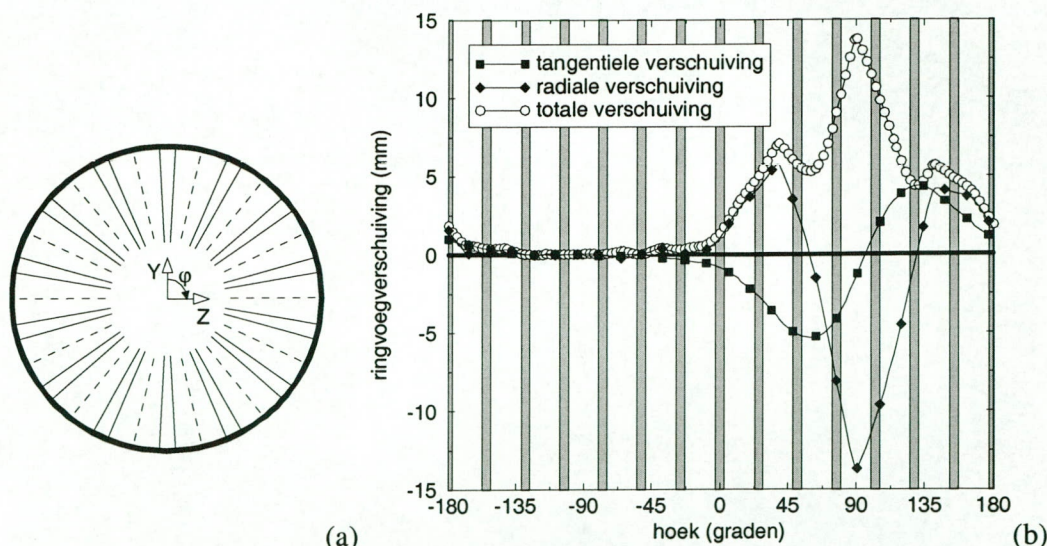
Figuur 8 Aanzicht van de hoofdtunnelbuis vanaf de zijde van de dwarsverbinding en de gemiddelde axiale spanningsverdeling in de lining.



Het lokaal uitdrukken van de segmenten in de ring naast de dwarsverbinding heeft tot gevolg dat in de langs- en ringvoegen grote openstanden optreden ( $\pm 3,5$  mm, zie Tabel 23) en dat in de voeg tussen ring 2 en 3 extreme verschuivingen optreden. Uit Tabel 23 in Bijlage B1 blijkt dat de verschuiving bijna 14 mm bedraagt. In Figuur 9 is het verloop van de verschuiving in de betreffende ringvoeg weergegeven. Figuur 9a toont de orientatie van de assen en de hoekverdraaiing, alsmede van de plaats van de langsvoegen (de stippellijnen) en de nokken (de getrokken lijnen). De nokken zijn in Figuur 9b weergegeven aan de hand van de grijs gearceerde gebieden. In de figuur zijn verder de tangentiële en radiale verschuiving, alsmede de totale (modulus van de) verschuiving weergegeven. In de figuur is te zien dat de maximale verschuiving op  $\varphi = 90^\circ$  optreedt en dat dit ter plaatse van een langsvoeg is. Dit laatste is duidelijk waarneembaar door de knik in de vervormingslijn, hetgeen duidt op een lokaal grote kromming (gaping).

Uit Figuur 9 blijkt verder dat de totale verschuiving ter plaatse van de nok rechts van het maximum nog steeds groter is dan 10 mm en dat deze hoofdzakelijk wordt veroorzaakt door de radiale ringvoegverschuiving, hetgeen begrijpelijk is aangezien het segment loodrecht op het vrieslichaam uit de tunnelring wordt gedrukt. Aangezien de nokken 8 mm vrij kunnen verschuiven voordat deze in de inkassingen gaan aanliggen, betekent dat dus dat in werkelijkheid de nokken zouden aanliggen. In het materiaalmodel dat voor variant 6 is gebruikt, is dit echter niet gemodelleerd, omdat een dergelijk gedrag niet gecombineerd kan worden met het droge-wrijvingsmodel dat gebruikt is voor de nokken. Het aanliggen van de nokken zou overigens tot gevolg hebben dat de voegverschuiving en voegopeningen zouden worden gereduceerd, maar de spanningen zouden daarentegen toenemen.

Als gevolg van de grote verschuivingen in de ringvoeg nabij de dwarsverbinding zullen de raveelbalken welke vóór het vriezen aan de binnenzijde van de hoofdtunnelbuis zijn aangebracht, worden belast, hetgeen de verschuivingen enigszins onderdrukt. Uit het vervormingsbeeld van de raveelbalken blijkt echter dat de invloed ervan, evenals bij variant 5 (zie paragraaf 3.2.4), beperkt is. Een mogelijke reden hiervoor is dat de (doorgaande) raveelbalken in het eindige elementenmodel pendelend zijn verbonden tussen drie punten. Als gevolg hiervan zullen zich alleen dwarskrachten in de balken ontwikkelen indien deze drie punten niet meer op één lijn liggen.



Figuur 9 Overzicht en verdeling van de verschuivingen in de voeg tussen ring 2 en 3.

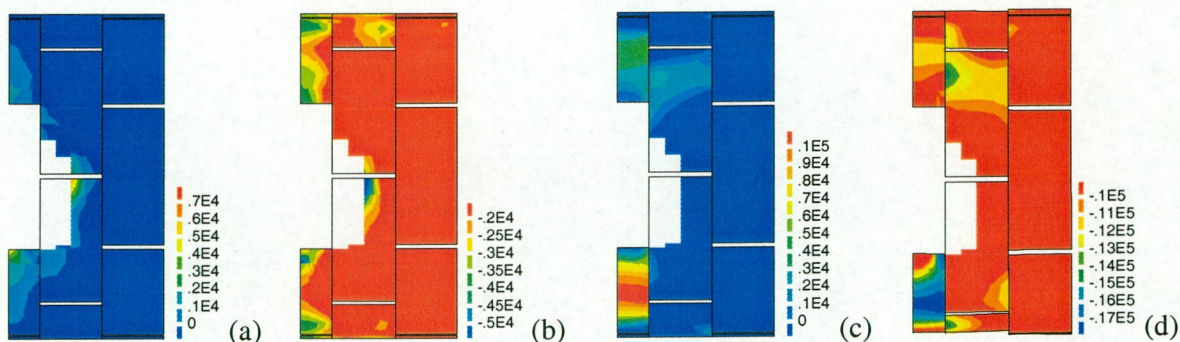


De axiale normaalspanningsverdelingen zijn voor variant 5 en 6 vergelijkbaar, met dien verstande dat de piekspanningsgradiënten in variant 6 over het algemeen kleiner zijn. Voor wat betreft de tangentiële normaalspanningen is de maximale trekspanning in variant 6 enigszins groter dan in variant 5, terwijl de maximale drukspanning juist kleiner is.

### 3.3.5 Fase 5

In fase 5 is de dwarsverbinding gemaakt en wordt het vrieslichaam ontdooid. Hierdoor vindt een verdere ontlasting plaats van de hoofdtunnelbuis nabij de dwarsverbinding. Evenals bij variant 5 is in variant 6 de invloed hiervan ten opzichte van fase 3 beperkt, getuige de kleine incrementele vervormingen (Figuur 42b). Deze kleine verandering van het vervormingsbeeld is ook terug te vinden in de spanningen en voegverschuivingen en -openingen. In alle gevallen komen deze in belangrijke mate overeen met fase 3.

Doordat de dwarsverbinding evenals in variant 5, bijna spanningsloos tussen de twee hoofdtunnelbuizen is aangebracht, is de axiale normaalkracht in de dwarsverbinding ook in variant 6 relatief klein. De berekende normaalkracht bedraagt, evenals in variant 5, 3,0 MN. De spanningscontouren aangaande de gebieden waar de maximale en minimale spanningen (tangenteel en axiaal) na het aanbrengen van de dwarsverbinding optreden in gegeven in Figuur 10. In de figuur zijn de spanningen zodanig geschaald dat de maxima en minima worden benadrukt. Ten opzichte van variant 5 treden de pieken op nagenoeg dezelfde plaatsen nabij de dwarsverbinding op. De grootte varieert, maar neemt in de meeste gevallen vrij snel af. Evenals bij variant 5 is met name de tangentiële spanningsgradiënt aan de onderzijde van de dwarsverbinding groot, zoals uit Figuur 10c en Figuur 10d kan worden geconcludeerd. Voor wat betreft de axiale normaalspanningen concentreren de pieken zich direct onder de dwarsverbinding (Figuur 10a en Figuur 10b). Zoals uit Figuur 8 is gebleken is de gemiddelde normaalspanning in met name het gebied naast de dwarsverbinding erg klein, hetgeen betekent dat de pieken hoofdzakelijk worden veroorzaakt door de tangentiële momenten.



Figuur 10 Spanningscontouren variant 6 in de gebieden waar de axiale trek- (a) en drukspanningen (b) alsmede de tangentiële trek- (c) en drukspanningen (d) extreem zijn. Alle getoonde maxima en minima treden op in fase 5 aan respectievelijk de binnen- (a, c) en buitenzijde (b, d) van de tunnelwand.

### 3.3.6 Grootte en ontwikkeling van de koppelkrachten

De berekende schuifspanningsverdelingen en koppelkrachten in de ringvoegen zijn weergegeven in Bijlage B.2. Hiertoe zijn in Figuur 27 tot en met Figuur 30 de spanningsverdelingen na de



verschillende berekeningsfasen weergegeven en in Tabel 25 tot en met Tabel 28 de radiaal en tangentieel gerichte koppelkrachten in de ringvoegen numeriek weergegeven. Omdat de schuifspanningsverdelingen laten zien dat deze in de vlakke voegdelen verwaarloosbaar klein zijn, zijn in de tabellen van Bijlage B.2 alleen de koppelkrachten in de nokken weergegeven. Het feit dat de schuifkrachten tussen de ringen in de berekeningen alleen worden overgebracht door de nokken, komt overigens overeen met de gekozen materiaalmodellering voor de ringvoegen (zie paragraaf 2.2.3). Opgemerkt wordt dat de schuifkracht feitelijk niet door de nokken, maar door de triplexplaatjes aan weerszijden van de nokken wordt overgedragen. Doordat er 14 gebieden zijn waar de koppelkrachten berekend zijn (nok 1 tot en met 14 volgens Figuur 3b), terwijl in variant 5 2·14 koppelkrachten zijn berekend, is de waarde van de berekende koppelkracht in variant 6 dus twee maal zo groot bij een gelijke totale schuifkracht in de ringvoeg.

Indien de koppelkrachten in radiale en tangentiële richting met elkaar worden vergeleken, dan blijkt voor variant 6 eenzelfde tendens als voor variant 5, namelijk dat de tangentiële koppelkrachten vergelijkbaar van grootte zijn als de radiale en in sommige gevallen zelfs groter (hier zal aansluitend nader op worden ingegaan). De reden hiervoor lijkt eveneens dezelfde als in variant 5, namelijk het verhinderen van de tangentiële verkorting ter plaatse van de langsvoegen.

De maximaal berekende koppelkrachten per voegdeel kunnen worden afgelezen uit de tabellen Bijlage B.2. Een overzicht van de maximale koppelkrachten volgens de tabellen van Bijlage B.2 is voor de verschillende fasen is gegeven in Tabel 8. Tevens is voor deze plaats de verhouding  $F/N$  weergegeven, waarmee wordt aangegeven over de afschuifcapaciteit al dan niet wordt overschreden ( $\mu=0,4$ ). In de laatste kolom van Tabel 8 is de gecombineerde koppelkracht gegeven (de modulus van  $F_{K,rad}$  en  $F_{K,tan}$ ).

*Tabel 8 Overzicht van de maximale koppelkrachten in de ringvoegen in de verschillende berekeningsfasen. De waarden tussen haakjes duiden op de maximale koppelkracht als percentage van de gemiddelde axiale voorspankracht ( $N_{ax}=22,85$  MN)*

| fase | $F_{K,tan,max}$<br>[kN] (%) | $F_{K,rad,max}$<br>[kN] (%) | $F_{K,max}$<br>[kN] (%) |
|------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| 1    | 216 31                      | 37 5                        | 216 31                  |
| 2    | 231 34                      | 44 6                        | 231 34                  |
| 3    | 410 36                      | 325 33                      | 456 40                  |
| 5    | 403 35                      | 367 37                      | 450 39                  |

\*) Voor iedere ringvoeg in variant 6 kunnen 14 koppelkrachten worden berekend. Iedere koppelkracht kan worden bepaald voor het gebied ter plaatse van een nok.

Het overzicht van de maximale koppelkrachten in Tabel 8 geeft aan dat de gecombineerde schuifkracht in de ringvoegen in fase 1, net als bij variant 5, wordt gedomineerd door de tangentiële component. In tegenstelling tot variant 5, is bij variant 6 de radiale component in fase 2 nog relatief klein ten opzichte van  $F_{K,tan,max}$ . In fase 3 neemt ook de radiale component toe. De waarde van het gecombineerde maximum ( $F_{K,max}$ ) wordt in deze fase echter nog steeds bepaald door de tangentiële component ( $F_{K,tan}$ ). In fase 5 bedraagt de maximale koppelkracht 450 kN, hetgeen ruim twee maal zoveel is als bij variant 5 (121 kN).



Er vanuit gaande dat slippen optreedt bij  $0,40 \cdot N_{ax}$  ( $\mu_{\text{triplex}}=0,40$ ), dan kan worden geconcludeerd dat er alleen in fase 3 verschuivingen in de ringvoegen worden verwacht. Uit paragraaf 3.3.4 is echter gebleken dat het tegengestelde gebeurt. In het gebied naast de dwarsverbinding treden grote verschuiving op. De reden hiervoor is ook reeds in paragraaf 3.3.4 besproken, namelijk het ontbreken van normaalspanningen in de ringvoeg, waardoor slippen kan optreden bij aanzienlijk lagere waarden dan  $0,4 \cdot N_{ax}$ . Doordat de afschuifkracht in deze gevallen klein is, komen deze waarden niet tot uitdrukking in Tabel 8. In het totaaloverzicht in Bijlage B.2 zijn de koppelkrachten in deze gebieden wel weergegeven.

### 3.4 Variant 5a

In variant 5 (paragraaf 3.2) is uitgegaan van een verlaging van de stijfheid van het vrieslichaam met een factor 830, hetgeen overeen komt met een verlaging van 25000 MPa naar 30 MPa, waardoor de stijfheid van het vrieslichaam qua orde grootte dus gelijk met die van de grond (welke 20 MPa bedraagt). In variant 5a is daarentegen uitgegaan van een verlaging van de stijfheid met een factor 83 (overeenkomend met een verlaging van 25000 MPa naar 300 MPa). De overige invoergegevens in variant 5a zijn gelijk aan die in variant 5.

Een overzicht van de resultaten met betrekking tot de maximale ovalisaties, voegopeningen en voegverschuivingen in variant 5a is weergegeven in Tabel 9. Ter vergelijking zijn in de tabel zijn tevens de waarden opgenomen voor variant 3 en 5. Verder zijn in de tabel de berekende normaalkrachten in de dwarsverbinding in fase 5 van de berekeningen weergegeven. Een overzicht van de maximaal optredende koppelkrachten is weergegeven in het onderste deel van de tabel. Uit de tabel blijkt dat het vervormingsgedrag van de tunnelbuis in variant 5a meer overeenkomsten vertoont met variant 3 dan met variant 5. Ook voor de spanningsverdeling in de constructie gedurende de verschillende fasen is het gedrag van variant 5a meer vergelijkbaar met variant 3 dan met variant 5.

Het gedrag van de hoofdtunnelbuis in fase 2 wordt gekarakteriseerd door de horizontale ovalisatie ( $\delta_{z4}-\delta_{z2}$ ) van de eerste ring. In variant 5a bedraagt deze 14,8, hetgeen vergelijkbaar is met variant 3 (14,0 mm). In fase 2 van variant 5 bedraagt horizontale ovalisatie daarentegen 10,3 mm. De maximale ringvoegverschuiving is in variant 5a 1,7 mm. In variant 3 en 5 bedraagt deze respectievelijk 2,2 mm en 3,5 mm. Voor wat betreft de maximale ringvoegopenstand wordt in variant 5a een waarde van 1,0 mm gevonden, terwijl deze in variant 3 en respectievelijk 0,8 mm en 1,7 mm bedroeg.

Het gedrag van de hoofdtunnelbuis in fase 3 van variant 5a is vergelijkbaar met dat in fase 2, met uitzondering van het gebied nabij de dwarsverbinding (binnenin het vrieslichaam). Feitelijk betekent dit dat het vrieslichaam dermate stijf is, dat de tunnelbuis buiten het vrieslichaam vrijwel geen invloed ondervindt van het ontgraven. Hetzelfde gedrag wordt in variant 3 waargenomen, terwijl in variant 5 het ontgraven van de grond binnenin het vrieslichaam een aanzienlijk grotere invloed heeft op het gedrag van de tunnelbuis buiten het vrieslichaam. De normaalkracht in de dwarsverbinding (fase 5) bedraagt in variant 5a bijna 9 MN. In variant 3 en 5 bedroeg deze achtereenvolgend 11 MN en 3 MN. Het verschil in gevonden normaalkracht kan worden verklaard door het in fase 3 gevonden incrementele vervormingsgedrag. Naarmate de hoofdtunnelbuis in fase 3 ter plaatse van de dwarsverbinding meer naar buiten *veert*, wordt de normaalkracht in de dwarsverbinding kleiner. In variant 3, 5a en 5 bedraagt de maximale incrementele vervorming (de *terugvering*) respectievelijk 0,001, 0,006 en 0,016 mm. Hieruit kan worden geconcludeerd dat de normaalkracht in de dwarsverbinding toeneemt, naarmate de stijfheid van het vrieslichaam groter is (bij gelijke uitzetting).



Indien de maximale koppelkrachten in variant 5 en 5a met elkaar worden vergeleken, dan blijkt dat deze in variant 5a in alle fasen (met uitzondering van fase 1) groter zijn. In fase 2 is het verschil maximaal (34%) en in fase 3 minimaal (3%). In fase 5 van variant 5a is de toename van de maximale koppelkracht 19% ten opzichte van dezelfde fase in variant 5. De maximale koppelkracht is voor beide varianten echter vergelijkbaar.

*Tabel 9 Overzicht van de maximale ovalisatie, de maximale voegopening en -verschuiving en de in de dwarsverbinding optredende normaalkracht voor variant 3, 5, en 5a. In het onderste gedeelte van de tabel is een overzicht van de koppelkrachten in de verschillende fasen van beide varianten weergegeven.*

| variant | voeg-materiaal | stijfheid vrieslichaam (MPa) | maximale horizontale ovalisatie (mm) | maximale voeg-opening (mm) | maximale voeg-verschuiving (mm) | normaal-kracht in de dwarsverbinding (MN) |
|---------|----------------|------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------|
| 3       | Kaubit         | 25000                        | 14,0                                 | 0,8                        | 2,2                             | 11                                        |
| 5       | Kaubit         | 30                           | 10,3                                 | 1,7                        | 3,5                             | 3                                         |
| 5a      | Kaubit         | 300                          | 14,8                                 | 1,0                        | 1,7                             | 9                                         |

|        | variant | $F_{K;tan,max}$ [kN] | $F_{K;rad,max}$ [kN] | $F_{K,max}$ [kN] |
|--------|---------|----------------------|----------------------|------------------|
| fase 1 | 5       | 96                   | 34                   | 96               |
|        | 5a      | 96                   | 34                   | 96               |
| fase 2 | 5       | 95                   | 87                   | 97               |
|        | 5a      | 123                  | 111                  | 130              |
| fase 3 | 5       | 125                  | 142                  | 144              |
|        | 5a      | 128                  | 114                  | 149              |
| fase 5 | 5       | 115                  | 100                  | 121              |
|        | 5a      | 96                   | 142                  | 144              |

### 3.5 Variant 6a

In variant 6 (paragraaf 3.3) is, evenals voor variant 5, uitgegaan van een verlaging van de stijfheid van het vrieslichaam met een factor 830, hetgeen overeen komt met een verlaging van 25000 MPa naar 30 MPa. De stijfheid van het vrieslichaam is hierdoor qua orde grootte gelijk met die van de grond (welke 20 MPa bedraagt). In variant 6a is daarentegen, evenals in variant 5a, uitgegaan van een verlaging van de stijfheid met een factor 83 (overeenkomend met een verlaging van 25000 MPa naar 300 MPa). De overige invoergegevens in variant 6a zijn gelijk aan die in variant 6.

Een overzicht van de resultaten met betrekking tot de maximale ovalisaties, voegopeningen en voegverschuivingen in variant 6 en 6a, is weergegeven in Tabel 10. In de tabel is tevens een overzicht gegeven van de berekende normaalkracht in de dwarsverbinding in fase 5 van de berekeningen. Een overzicht van de maximaal optredende koppelkrachten is weergegeven in het onderste deel van de tabel.

Indien het gedrag van de hoofdtunnelbuis in variant 6a wordt vergeleken met variant 6 dan blijkt dat de horizontale ovalisatie in fase 2 groter is (14,8 mm in variant 6a ten opzichte van 10,6 mm in



variant 6), en vergelijkbaar met die in variant 5a waar deze 10,3 mm bedraagt. De maximale ringvoegverschuiving van 14,1 mm welke in fase 5 van variant 6 werd waargenomen, is in variant 6a afgenomen tot 2,2 mm, hetgeen kan wederom worden verklaard door het relatief stijve vrieslichaam. De maximale voegopenstand is in variant 6a (1,2 mm) enigszins groter dan in variant 5a (1,0 mm) en aanzienlijk kleiner dan in variant 6 (3,6 mm). De normaalkracht in de dwarsverbinding bedraagt in fase 5 van variant 6a 9 MN, terwijl deze in variant 6 *slechts* 3 MN was, hetgeen vergelijkbaar is met variant 5 en 5a (eveneens respectievelijk 3 en 9 MN, zie Tabel 9).

Indien de maximale koppelkrachten in variant 6 en 6a worden vergeleken, dan blijkt dat deze zoals verwacht het meest toenemen in fase 2. In variant 6a is deze 379 kN, hetgeen 64% groter dan in dezelfde fase van variant 6. In fase 3 en fase 5 is de koppelkracht in variant 6a daarentegen vergelijkbaar met variant 6. In fase 3 bedraagt de toename 6%, terwijl in fase 5 de maximale koppelkracht 12% afneemt tot 394 kN. De maximale koppelkracht neemt echter beperkt toe.

*Tabel 10 Overzicht van de maximale ovalisatie, de maximale voegopening en -verschuiving en de in de dwarsverbinding optredende normaalkracht voor variant 6 en 6a. In het onderste gedeelte van de tabel is een overzicht van de koppelkrachten in de verschillende fasen van beide varianten weergegeven.*

| variant | voeg-materiaal | stijfheid vrieslichaam (MPa) | maximale horizontale ovalisatie (mm) | maximale voeg-opening (mm) | maximale voeg-verschuiving (mm) | normaal-kracht in de dwarsverbinding (MN) |
|---------|----------------|------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------|
| 6       | triplex        | 30                           | 10,6                                 | 3,6                        | 14,1                            | 3                                         |
| 6a      | triplex        | 300                          | 14,8                                 | 1,2                        | 2,2                             | 9                                         |

|        | variant | $F_{K,tan,max}$ [kN] | $F_{K,rad,max}$ [kN] | $F_{K,max}$ [kN] |
|--------|---------|----------------------|----------------------|------------------|
| fase 1 | 6       | 216                  | 37                   | 216              |
|        | 6a      | 216                  | 37                   | 216              |
| fase 2 | 6       | 231                  | 44                   | 231              |
|        | 6a      | 360                  | 126                  | 379              |
| fase 3 | 6       | 410                  | 325                  | 456              |
|        | 6a      | 347                  | 364                  | 483              |
| fase 5 | 6       | 403                  | 367                  | 450              |
|        | 6a      | 288                  | 381                  | 394              |



## 4. Conclusies

Om inzicht te verkrijgen in het effect van de aanleg van een dwarsverbinding op de krachtswerking in de hoofdtunnelbuis en de grootte van de belasting in de dwarsverbinding zijn, in opdracht van de Bouwdienst van Rijkswaterstaat, door TNO Bouw in 1998 vier niet-lineaire gefaseerde berekeningen uitgevoerd met het eindige elementenprogramma DIANA. Nadat in 1999 door TNO NITG aanvullend onderzoek is verricht inzake de problematiek van de stijfheid van het vrieslichaam en de vriesbelasting, zijn variant 5 en 6 enigszins aangepast uitgevoerd. De resultaten van deze aangepaste varianten zijn beschreven in de onderhavige rapportage. Het belangrijkste verschil tussen variant 5 en variant 3 is dat in variant 5 is uitgegaan van een aanzienlijk lagere stijfheid van het vrieslichaam (30 MPa in plaats van 25000 MPa) en een evenredig lagere vriesbelasting. De stijfheid van het vrieslichaam komt in dit geval qua orde grootte dus overeen met die van de grond (welke 20 MPa bedraagt). In variant 6 is voor deze stijfheid van het vrieslichaam nagegaan wat het effect is van het toepassen van triplex voegplaatjes in plaats van Kaubit (zoals in de overige varianten). In variant 5a en 6a is tenslotte onderzocht wat het effect is van het verlagen van de stijfheid van het vrieslichaam van 25000 MPa naar 300 MPa. De overige invoergegevens van variant 5a en 6a zijn ongewijzigd ten opzichte van respectievelijk variant 5 en 6.

Het belangrijkste verschil tussen variant 3 en 5 is dat de hoofdtunnelbuis in variant 3 relatief slap is ten opzichte van het vrieslichaam. Hierdoor heeft de uitzetting van het vrieslichaam lokaal grote indrukkingen van de tunnelwand tot gevolg. Tijdens het ontgraven van de kern van het vrieslichaam (fase 3) zorgt de grote stijfheid ervoor dat de krachtswerking in de tunnelbuis hoofdzakelijk binnen deze kern wordt beïnvloedt. De ontgravingen zijn buiten het vrieslichaam nauwelijks merkbaar. De vervormingen van de hoofdtunnelbuis in fase 2 van variant 5 zijn kleiner dan in variant 5a als gevolg van de relatief lage stijfheid van het vrieslichaam. Door de lage stijfheid zijn de ontgravingen in fase 3 daarentegen op grotere afstand vanaf de dwarsverbinding merkbaar. De resultaten van variant 5a laten een vervormingsgedrag van de hoofdtunnelbuis zien dat vergelijkbaar is met variant 3.

Concluderend kan worden gesteld dat bij een onveranderde vrije uitzetting van het vrieslichaam de verlaging van de stijfheid van 300 MPa (variant 5a en 6a) naar 30 MPa (variant 5 en 6) relatief meer invloed heeft op de vervormingen van en de krachtsverdeling in de hoofdtunnelbuis dan de verlaging van 25000 MPa (variant 3) naar 300 MPa.

In de resultaten van variant 5 en 6 is ook gekeken naar de grootte en verdeling van de koppelkrachten welke tussen de verschillende ringen (in de ringvoegen) optreden. Uit deze resultaten is gebleken dat deze nabij de langsvoegen maximaal zijn (zoals verwacht). Verder is gebleken dat de tangentieel gerichte koppelkrachten qua orde grootte gelijk zijn aan de radiaal gerichte koppelkrachten. Dit wordt veroorzaakt door de relatief lage normaalkrachtstijfheid van de langsvoegen en doordat de ringvoegen in ringrichting continue zijn verondersteld.

Doordat de relatief lage stijfheid van het vrieslichaam een kleine indrukking van de tunnelwand tot gevolg heeft, kan de dwarsverbinding nagenoeg spanningsloos tussen de twee hoofdtunnelbuizen worden ingebouwd. De axiale normaalkracht in de dwarsverbinding is hierdoor in zowel variant 5 als 6 aanzienlijk kleiner (3 MN) dan in variant 3 (11 MN). Zoals te verwachten ligt de berekende normaalkracht in de dwarsverbinding in variant 5a en 6a hier tussenin (voor beide gevallen bedraagt de normaalkracht 9 MN).



De resultaten met betrekking tot de berekende koppelkrachten ( $F_K$ ) laten zien dat in iedere fase de schuifsterkte van de voeg wordt overschreden ( $F_K = \mu \cdot N$ ) en dus slippen optreedt. Over het algemeen lokaliseren de verschuivingen zich op plaatsen met schuifspanningspieken in combinatie met relatief lage normaalspanningen. Uit de resultaten is verder geconcludeerd dat de ringvoegen in fase 3 het zwaarst worden belast in zowel tangentiële als radiale richting.

Doordat de afschuifkrachten in variant 6 en 6a lokaal ter plaatse van de nokken worden overgedragen, zijn de (lokale) verschuivingen in de ringvoegen in het algemeen groter dan in variant 5. In fase 3 (ontgraven) van variant 6 zijn de verschuivingen zelfs groter dan 8 mm, hetgeen betekent dat de nokken in werkelijkheid zouden gaan aanliggen. In de modellering is hiervan niet uitgegaan. In de overige varianten blijven de verschuivingen kleiner dan 8 mm.







## 5. Literatuur

- [1] Vervuurt, A.H.J.M en Gijsbers, F.B.J. Numerieke Simulaties Dwarsverbinding Westerscheldetunnel. Deel I: Modelbeschrijving en Resultaten Variant 1. **TNO Bouw-rapport 98-CON-R0700/VTAC**, 1998.
- [2] Vervuurt, A.H.J.M en Gijsbers, F.B.J. Numerieke Simulaties Dwarsverbinding Westerscheldetunnel. Deel II: Resultaten Variant 2. **TNO Bouw-rapport 98-CON-R0894/VTAC**, 1998.
- [3] Vervuurt, A.H.J.M en Gijsbers, F.B.J. Numerieke Simulaties Dwarsverbinding Westerscheldetunnel. Deel II: Resultaten Variant 3 en 4. **TNO Bouw-rapport 98-CON-R0903/VTAC**, 1998.
- [4] Rijkers, R.H.B., e.a. Het vervormingsgedrag van bevroren grond: resultaten van vriesexperimenten en numerieke simulatie. **TNO NITG-rapport 99-232-B**, juni 2000.
- [5] Meijers, P en Luger, H.J. Westerschelde oeververbinding vriesbelasting op tunnelling. **GD rapport CO-380950/11 (versie 2)**, december 1998.
- [6] Combinatie Middelplaat Westerschelde. Hoofdberekening tunnel/dwarsverbinding. Documentnummer **BE-BA-HBR-006** (bijlage bij brief WSTBD-980961 d.d. 11-03-1998 van de Bouwdienst Rijkswaterstaat).
- [7] Naaktgeboren, N.M., Informatie betreffende aannamen variatie-studie. Brief **WSTBD-981493**, d.d. 14 april 1998.
- [8] Gijsbers, F.B.J. en Hordijk, D.A. Experimenteel onderzoek naar het afschuifgedrag van ringvoegen. **TNO Bouw-rapport 97-CON-R1337**, COB document K111-W-001, november 1997.
- [9] Vervuurt, A.H.J.M. en Gijsbers, F.B.J. Eerste orde evaluatie tunnelconstructie: predictie-modellen, postdictieberekeningen en vergelijking met meetresultaten, **TNO Bouw-rapport 1999-CON-BM-R3019**, COB document K111-W-106, november 1999.
- [10] Philip Holzmann AG – Wayss&Freytag AG. Relaxation- und scherversuche mit Sperrholz- und Hartfaserplatten, Februari 2000.







## Bijlage A Resultaten variant 5

### Bijlage A.1 Verplaatsingen en voegopeningen

Tabel 11 Verplaatsingen en ovalisering van beide uiteinden van de hoofdtunnelbuis voor de vijf berekende fasen volgens variant 5.

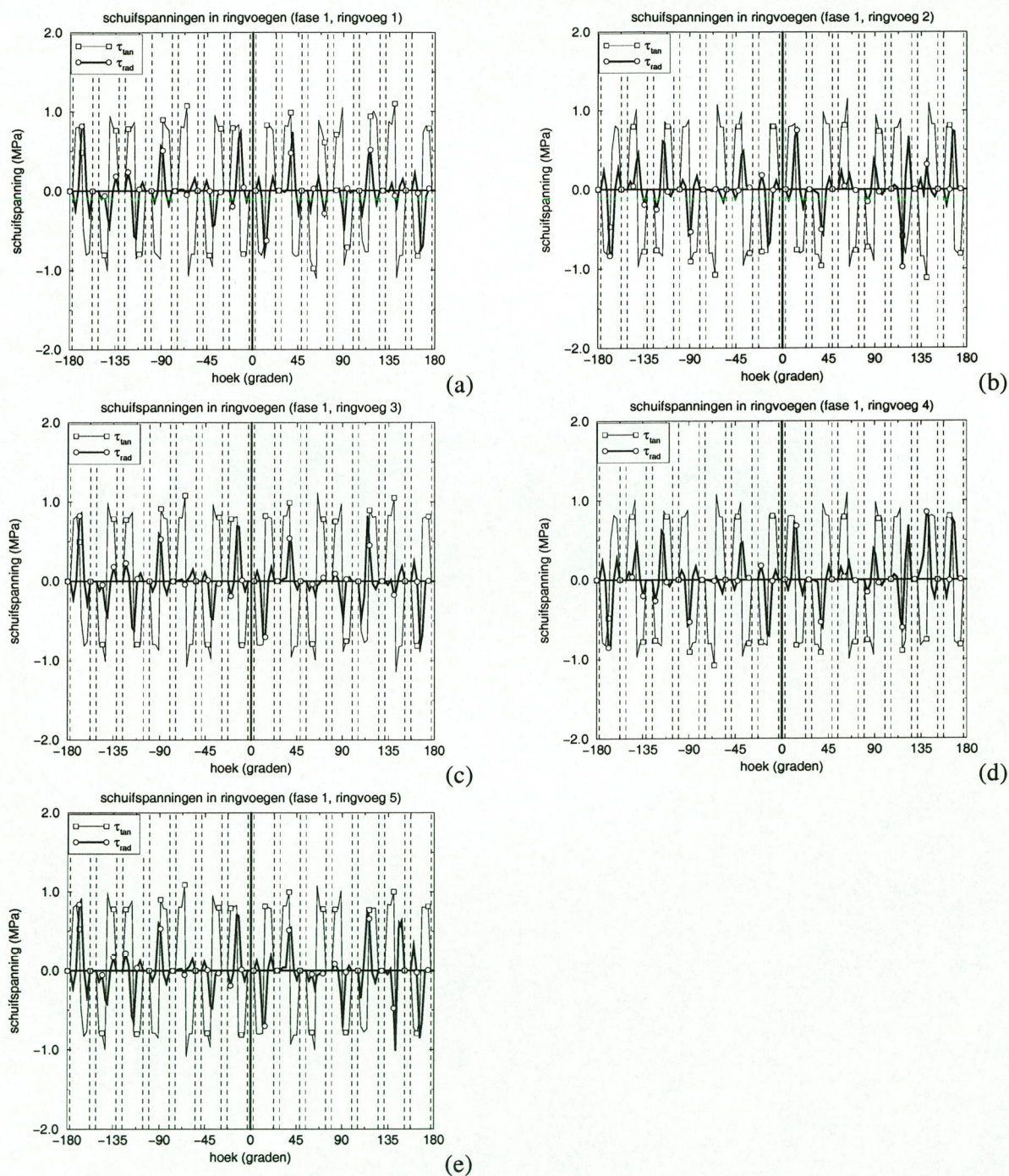
| Ring | Fase | $\delta_{Y1}$<br>[mm] | $\delta_{Z2}$<br>[mm] | $\delta_{Y3}$<br>[mm] | $\delta_{Z4}$<br>[mm] | $\delta_{Y3-Y1}$<br>[mm] | $\delta_{Z4-Z2}$<br>[mm] | $\delta_{Y1+Y3/2}$<br>[mm] | $\delta_{Z2+Z4/2}$<br>[mm] |
|------|------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 1    | 1    | -0.32                 | -4.28                 | -6.17                 | 4.80                  | -5.85                    | 9.08                     | -3.24                      | 0.26                       |
|      | 2    | 0.25                  | -5.67                 | -6.83                 | 4.59                  | -7.08                    | 10.26                    | -3.29                      | -0.54                      |
|      | 3    | -4.57                 |                       | -1.92                 | 5.27                  | 2.65                     |                          | -3.24                      |                            |
|      | 5    | -5.16                 |                       | -1.78                 | 5.27                  | 3.38                     |                          | -3.47                      |                            |
| 7    | 1    | -0.32                 | -4.29                 | -6.22                 | 4.76                  | -5.90                    | 9.05                     | -3.27                      | 0.24                       |
|      | 2    | -0.07                 | -5.13                 | -6.47                 | 4.42                  | -6.40                    | 9.55                     | -3.27                      | -0.35                      |
|      | 3    | -2.01                 | -0.31                 | -5.26                 | 6.04                  | -3.24                    | 6.35                     | -3.63                      | 2.87                       |
|      | 5    | -1.66                 | -1.32                 | -5.81                 | 5.94                  | -4.15                    | 7.26                     | -3.73                      | 2.31                       |
| 14   | 1    | -0.35                 | -4.22                 | -6.17                 | 4.64                  | -5.82                    | 8.86                     | -3.26                      | 0.21                       |
|      | 2    | -0.40                 | -4.62                 | -6.10                 | 4.12                  | -5.70                    | 8.74                     | -3.25                      | -0.25                      |
|      | 3    | -0.02                 | -3.10                 | -7.07                 | 7.01                  | -7.04                    | 10.11                    | -3.54                      | 1.95                       |
|      | 5    | -0.20                 | -3.46                 | -7.03                 | 6.43                  | -6.83                    | 9.89                     | -3.62                      | 1.49                       |

Tabel 12 Maximale voegopenstanden en verschuivingen in de hoofdtunnelbuis en de plaats waar deze (ten opzichte van de oorsprong) optreden voor variant 5.

|        |                                   | Waarde<br>[mm] | X<br>[m] | Y<br>[m] | Z<br>[m] |
|--------|-----------------------------------|----------------|----------|----------|----------|
| Fase 1 | maximale openstand ringvoegen     | 0.25           | 3.00     | -5.12    | -1.25    |
|        | maximale verschuiving ringvoegen  | 0.11           | 11.00    | -4.17    | 3.23     |
|        | maximale openstand langsvoegen    | 0.01           | 10.50    | -5.16    | -1.10    |
|        | maximale verschuiving langsvoegen | 0.01           | 1.00     | 2.36     | 4.72     |
| Fase 2 | maximale openstand ringvoegen     | 0.36           | 3.00     | -5.12    | -1.25    |
|        | maximale verschuiving ringvoegen  | 0.37           | 3.00     | -5.16    | -1.10    |
|        | maximale openstand langsvoegen    | 0.02           | 5.00     | -5.16    | -1.10    |
|        | maximale verschuiving langsvoegen | 0.01           | 1.00     | 2.36     | 4.72     |
| Fase 3 | maximale openstand ringvoegen     | 1.59           | 1.00     | 2.22     | 4.79     |
|        | maximale verschuiving ringvoegen  | 3.51           | 1.00     | 2.36     | 4.72     |
|        | maximale openstand langsvoegen    | 1.73           | 0.88     | 2.36     | 4.72     |
|        | maximale verschuiving langsvoegen | 1.22           | 1.00     | 2.36     | 4.72     |
| Fase 5 | maximale openstand ringvoegen     | 1.54           | 1.00     | 2.22     | 4.79     |
|        | maximale verschuiving ringvoegen  | 3.54           | 1.00     | 2.36     | 4.72     |
|        | maximale openstand langsvoegen    | 1.52           | 0.88     | 2.36     | 4.72     |
|        | maximale verschuiving langsvoegen | 1.26           | 1.00     | 2.36     | 4.72     |

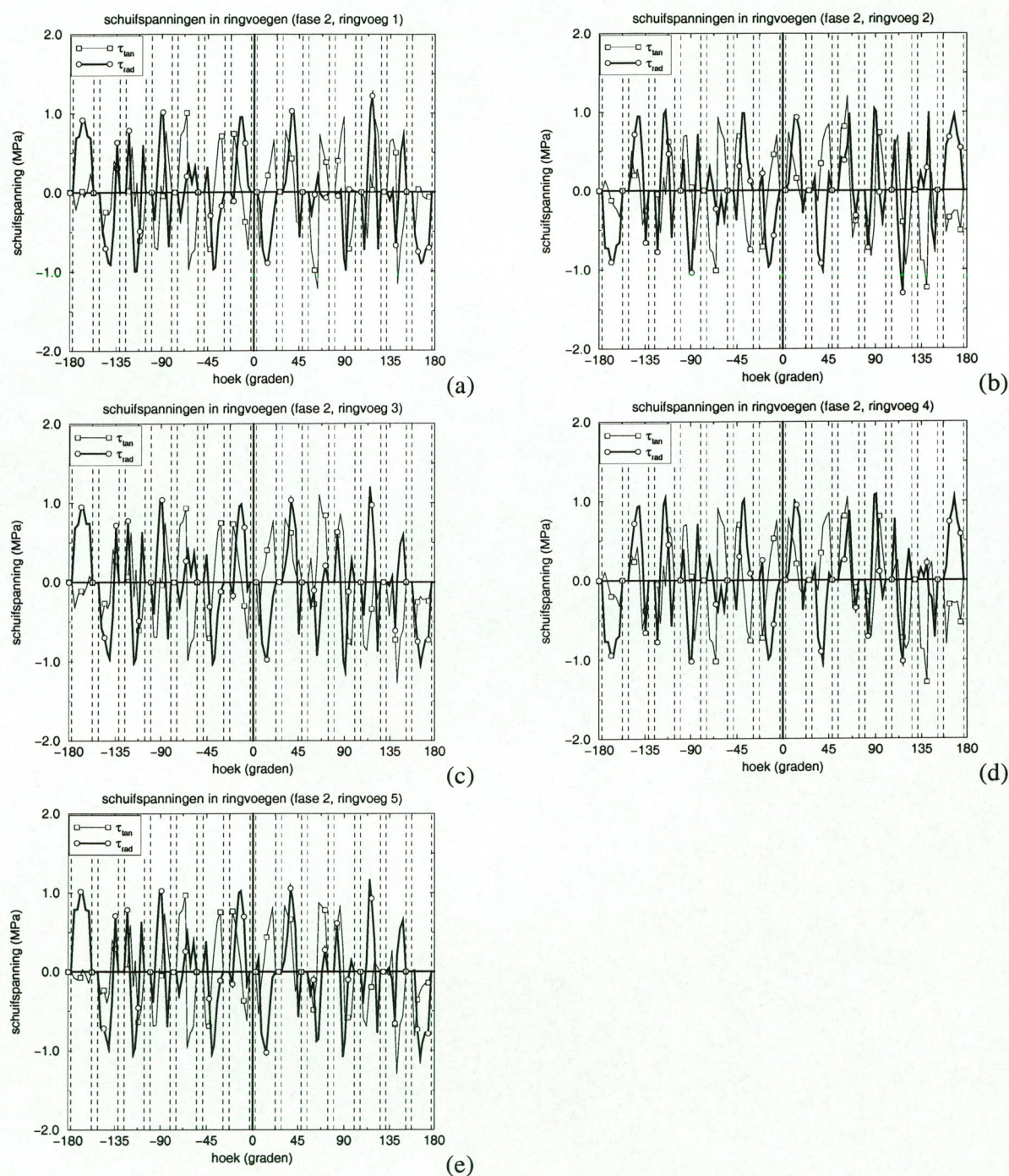


## Bijlage A.2 Koppelkrachten in de ringvoegen



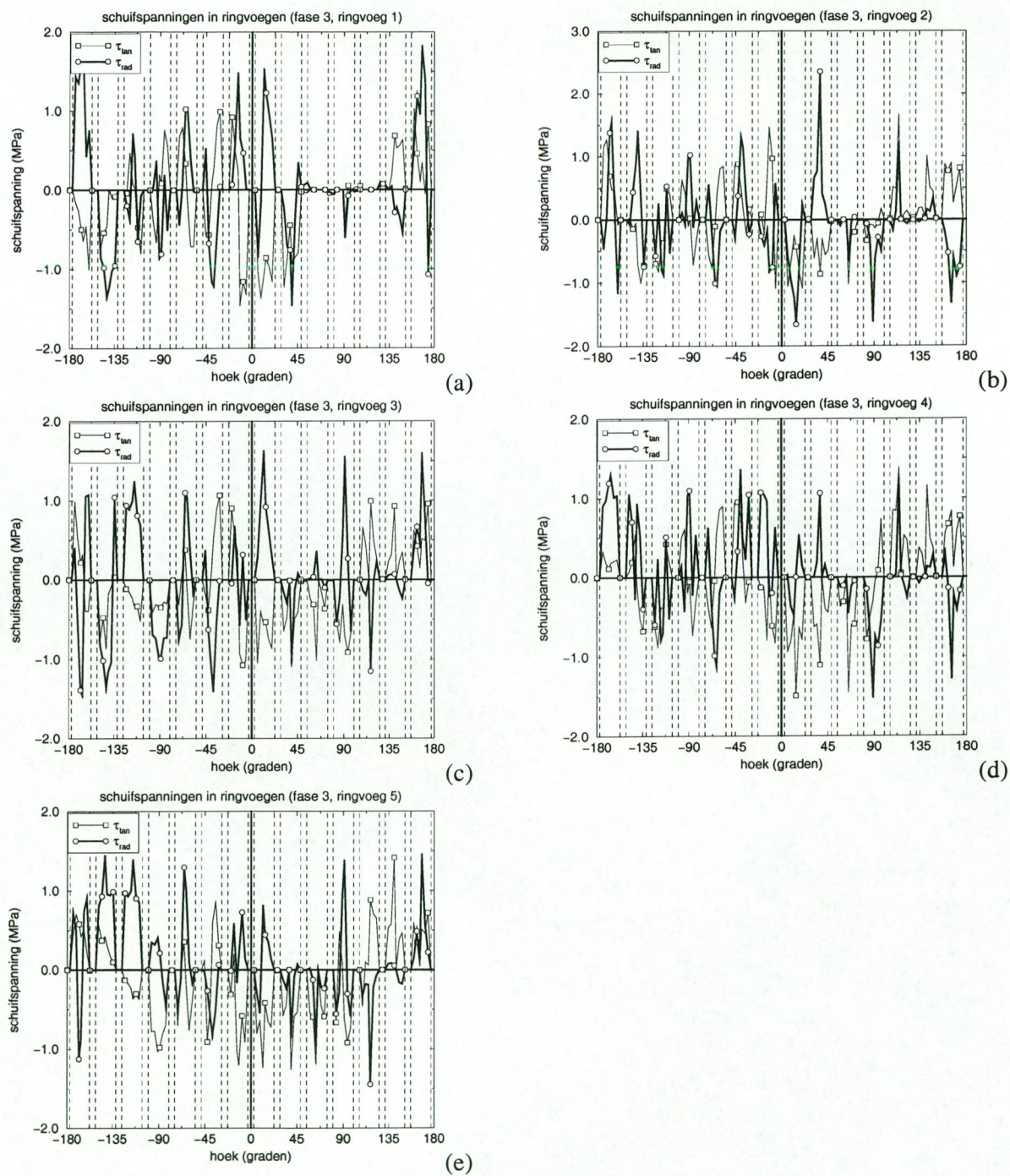
Figuur 11 Schuifspanningsverdelingen in fase 1 in de ringvoeg achter ring 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d) en 5 (e).





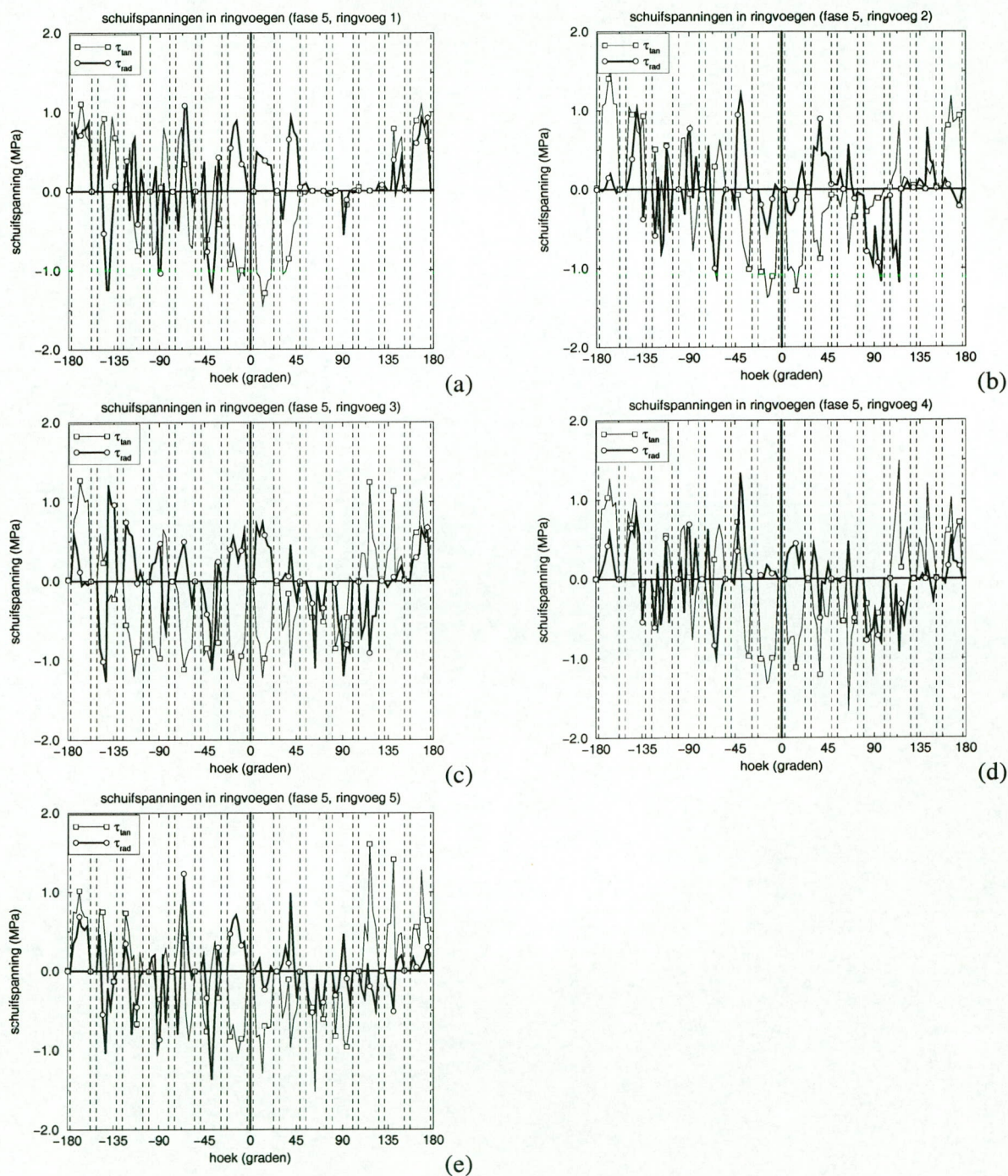
Figuur 12 Schuifspanningsverdelingen in fase 2 in de ringvoeg achter ring 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d) en 5 (e).





Figuur 13 Schuifspanningsverdelingen in fase 3 in de ringvoeg achter ring 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d) en 5 (e).





Figuur 14 Schuifspanningsverdelingen in fase 5 in de ringvoeg achter ring 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d) en 5 (e).



Tabel 13 Overzicht van de maximale koppelkrachten in de ringvoegen.

| fase | $F_{K;tan;max}$<br>[kN] | $F_{K;rad;max}$<br>[kN] | $F_{K;max}$<br>[kN] |
|------|-------------------------|-------------------------|---------------------|
| 1    | 96                      | 34                      | 96                  |
| 2    | 95                      | 87                      | 97                  |
| 3    | 125                     | 142                     | 144                 |
| 5    | 115                     | 100                     | 121                 |

Tabel 14 Tangentieel gerichte krachten in de vlakke voegdelen van de ringvoegen na fase 1 in variant 5. Het nummer in de eerste kolom refereert naar Figuur 3b.

| nr | ring<br>$F_{KA;tan}$<br>[kN] | 1-2<br>$F_{KB;tan}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA;tan}$<br>[kN] | 2-3<br>$F_{KB;tan}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA;tan}$<br>[kN] | 3-4<br>$F_{KB;tan}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA;tan}$<br>[kN] | 4-5<br>$F_{KB;tan}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA;tan}$<br>[kN] | 5-6<br>$F_{KB;tan}$<br>[kN] |
|----|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 1  | 75.7                         | -74.7                       | -75.3                        | 75.0                        | 76.1                         | -74.7                       | -76.1                        | 75.8                        | 77.9                         | -75.4                       |
| 2  | -82.2                        | 81.2                        | 82.5                         | -81.4                       | -82.4                        | 81.8                        | 82.6                         | -81.2                       | -81.8                        | 81.1                        |
| 3  | 79.7                         | -80.5                       | -78.9                        | 80.6                        | 79.6                         | -80.0                       | -78.7                        | 80.7                        | 80.3                         | -79.9                       |
| 4  | -80.4                        | 80.7                        | 80.7                         | -80.7                       | -80.4                        | 80.8                        | 80.4                         | -80.5                       | -79.5                        | 80.1                        |
| 5  | 83.8                         | -83.2                       | -83.7                        | 83.1                        | 83.7                         | -83.1                       | -83.8                        | 83.2                        | 84.4                         | -83.7                       |
| 6  | -81.9                        | 82.0                        | 82.2                         | -81.9                       | -82.1                        | 82.0                        | 81.9                         | -81.8                       | -81.3                        | 81.4                        |
| 7  | 79.8                         | -79.1                       | -79.2                        | 80.2                        | 79.6                         | -80.1                       | -80.0                        | 80.4                        | 80.6                         | -81.1                       |
| 8  | -77.5                        | 79.9                        | 80.5                         | -78.9                       | -80.1                        | 80.6                        | 80.4                         | -80.5                       | -79.7                        | 79.9                        |
| 9  | 83.5                         | -81.4                       | -83.8                        | 85.2                        | 84.4                         | -83.7                       | -82.8                        | 83.1                        | 84.4                         | -82.9                       |
| 10 | -96.2                        | 73.0                        | 85.9                         | -79.6                       | -82.0                        | 82.9                        | 83.4                         | -80.9                       | -81.3                        | 82.0                        |
| 11 | 75.4                         | -74.4                       | -75.2                        | 76.6                        | 78.4                         | -77.3                       | -78.6                        | 79.8                        | 81.0                         | -77.8                       |
| 12 | -72.5                        | 96.3                        | 79.2                         | -69.6                       | -72.9                        | 81.7                        | 79.8                         | -44.2                       | -74.6                        | 78.4                        |
| 13 | 88.0                         | -85.5                       | -88.2                        | 86.3                        | 85.6                         | -86.5                       | -78.5                        | 80.0                        | 85.4                         | 42.7                        |
| 14 | -78.3                        | 79.5                        | 79.6                         | -80.2                       | -78.7                        | 80.6                        | 78.1                         | -80.4                       | -74.3                        | 80.4                        |

Tabel 15 Radiaal gerichte krachten in de vlakke voegdelen van de ringvoegen na fase 1 in variant 5. Het nummer in de eerste kolom refereert naar Figuur 3b.

| nr | ring<br>$F_{KA;rad}$<br>[kN] | 1-2<br>$F_{KB;rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA;rad}$<br>[kN] | 2-3<br>$F_{KB;rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA;rad}$<br>[kN] | 3-4<br>$F_{KB;rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA;rad}$<br>[kN] | 4-5<br>$F_{KB;rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA;rad}$<br>[kN] | 5-6<br>$F_{KB;rad}$<br>[kN] |
|----|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 1  | 6.9                          | 4.6                         | -5.8                         | -4.3                        | 6.1                          | 4.3                         | -6.3                         | -4.4                        | 6.0                          | 4.5                         |
| 2  | -11.1                        | -2.1                        | 10.3                         | 1.3                         | -10.8                        | -1.0                        | 10.1                         | 1.4                         | -12.1                        | -0.6                        |
| 3  | 1.8                          | -4.2                        | -2.2                         | 4.4                         | 1.7                          | -4.0                        | -2.4                         | 4.4                         | 1.6                          | -3.5                        |
| 4  | 3.1                          | 1.1                         | -2.4                         | -0.4                        | 2.7                          | 0.6                         | -2.3                         | -0.4                        | 2.9                          | 0.8                         |
| 5  | 0.7                          | 6.9                         | -1.2                         | -7.5                        | 1.4                          | 7.5                         | -1.4                         | -7.6                        | 1.4                          | 7.7                         |
| 6  | -2.9                         | -9.6                        | 2.2                          | 10.0                        | -2.4                         | -9.7                        | 2.2                          | 9.6                         | -2.4                         | -9.6                        |
| 7  | 3.9                          | 9.1                         | -4.6                         | -6.6                        | 3.9                          | 7.0                         | -4.1                         | -7.5                        | 4.1                          | 7.2                         |
| 8  | -10.9                        | -5.4                        | 6.4                          | 3.4                         | -7.2                         | -4.6                        | 7.8                          | 3.7                         | -7.3                         | -3.7                        |
| 9  | 7.7                          | 4.5                         | -10.9                        | -3.3                        | 11.0                         | 3.5                         | -9.7                         | -4.2                        | 10.8                         | 4.3                         |
| 10 | -4.7                         | -8.3                        | 10.2                         | 3.0                         | -7.9                         | -0.4                        | 7.7                          | 3.6                         | -9.6                         | -4.1                        |
| 11 | -1.5                         | -6.3                        | -1.6                         | 0.0                         | 0.0                          | -3.8                        | -1.8                         | 0.2                         | -0.3                         | -9.5                        |
| 12 | -4.2                         | 5.3                         | -3.0                         | 15.1                        | -12.5                        | 1.8                         | -3.6                         | 23.3                        | 7.3                          | 3.5                         |
| 13 | 4.0                          | 4.5                         | 4.6                          | -3.7                        | -2.8                         | 7.9                         | 32.9                         | -0.2                        | -6.9                         | 34.3                        |
| 14 | -6.4                         | -13.3                       | 4.7                          | 12.4                        | -5.2                         | -11.2                       | 4.3                          | 12.4                        | -4.2                         | -10.2                       |



Tabel 16 Tangentieel gerichte krachten in de vlakke voegdelen van de ringvoegen na fase 2 in variant 5. Het nummer in de eerste kolom refereert naar Figuur 3b.

| nr | ring<br>$F_{KA,tan}$<br>[kN] | 1-2<br>$F_{KB,tan}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA,tan}$<br>[kN] | 2-3<br>$F_{KB,tan}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA,tan}$<br>[kN] | 3-4<br>$F_{KB,tan}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA,tan}$<br>[kN] | 4-5<br>$F_{KB,tan}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA,tan}$<br>[kN] | 5-6<br>$F_{KB,tan}$<br>[kN] |
|----|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 1  | -8.7                         | 7.4                         | 3.3                          | -25.2                       | -19.5                        | -3.9                        | -2.0                         | -23.5                       | -8.9                         | -5.3                        |
| 2  | -33.8                        | 28.8                        | 29.2                         | -30.4                       | -33.4                        | 27.8                        | 29.0                         | -43.8                       | -27.1                        | 27.4                        |
| 3  | 31.0                         | -47.9                       | -29.2                        | 49.9                        | 35.0                         | -45.6                       | -29.6                        | 50.9                        | 32.2                         | -47.7                       |
| 4  | -59.6                        | 54.3                        | 59.7                         | -52.4                       | -58.4                        | 52.6                        | 59.5                         | -52.6                       | -57.5                        | 52.3                        |
| 5  | 79.8                         | -78.5                       | -80.2                        | 74.4                        | 77.7                         | -77.8                       | -80.2                        | 75.9                        | 79.2                         | -77.8                       |
| 6  | -60.6                        | 60.8                        | 58.9                         | -61.2                       | -61.6                        | 60.9                        | 60.3                         | -60.4                       | -58.2                        | 62.4                        |
| 7  | 50.4                         | -42.5                       | -37.5                        | 49.8                        | 53.3                         | -36.6                       | -37.2                        | 56.1                        | 59.6                         | -36.8                       |
| 8  | -22.7                        | 44.6                        | 53.7                         | -5.7                        | -8.1                         | 59.2                        | 61.5                         | -8.8                        | -18.5                        | 64.5                        |
| 9  | 63.2                         | -29.7                       | -1.0                         | 78.2                        | 72.1                         | 17.1                        | -1.7                         | 78.7                        | 74.3                         | -10.8                       |
| 10 | -95.0                        | 51.1                        | 86.9                         | -41.6                       | -2.6                         | 89.3                        | 84.3                         | -17.4                       | -33.2                        | 82.0                        |
| 11 | 65.7                         | -66.8                       | -65.7                        | 62.5                        | 75.0                         | -66.8                       | -48.6                        | 61.0                        | 67.5                         | -58.5                       |
| 12 | -32.5                        | 73.5                        | 52.4                         | -77.4                       | -78.6                        | 2.5                         | 13.6                         | -82.0                       | -59.5                        | 6.8                         |
| 13 | 63.5                         | -67.7                       | -93.7                        | -2.2                        | -23.9                        | -75.6                       | -92.8                        | 1.5                         | 4.6                          | -72.9                       |
| 14 | -11.7                        | -7.6                        | -38.9                        | -33.0                       | -37.0                        | -22.1                       | -44.3                        | -35.1                       | -47.0                        | -15.2                       |

Tabel 17 Radiaal gerichte krachten in de vlakke voegdelen van de ringvoegen na fase 2 in variant 5. Het nummer in de eerste kolom refereert naar Figuur 3b.

| nr | ring<br>$F_{KA,rad}$<br>[kN] | 1-2<br>$F_{KB,rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA,rad}$<br>[kN] | 2-3<br>$F_{KB,rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA,rad}$<br>[kN] | 3-4<br>$F_{KB,rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA,rad}$<br>[kN] | 4-5<br>$F_{KB,rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA,rad}$<br>[kN] | 5-6<br>$F_{KB,rad}$<br>[kN] |
|----|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 1  | 73.4                         | 73.5                        | -74.9                        | -71.0                       | 74.9                         | 76.7                        | -79.0                        | -75.4                       | 81.8                         | 81.1                        |
| 2  | -65.9                        | -20.1                       | 61.6                         | 17.4                        | -69.0                        | -18.4                       | 65.5                         | 14.4                        | -73.4                        | -15.2                       |
| 3  | -3.0                         | -24.9                       | 3.6                          | 24.4                        | -0.9                         | -23.4                       | 3.2                          | 24.1                        | 0.6                          | -21.8                       |
| 4  | 24.9                         | 5.8                         | -24.1                        | -5.2                        | 25.1                         | 6.3                         | -23.1                        | -4.4                        | 25.6                         | 6.8                         |
| 5  | -9.1                         | 21.0                        | 8.5                          | -20.8                       | -7.5                         | 22.3                        | 7.6                          | -21.3                       | -7.4                         | 23.1                        |
| 6  | -21.5                        | -40.9                       | 21.2                         | 40.8                        | -22.0                        | -39.9                       | 20.5                         | 41.0                        | -22.9                        | -39.2                       |
| 7  | 40.9                         | 51.0                        | -45.4                        | -52.0                       | 39.6                         | 50.8                        | -46.5                        | -50.1                       | 39.0                         | 50.1                        |
| 8  | -58.0                        | -56.4                       | 48.2                         | 48.2                        | -57.3                        | -50.5                       | 47.6                         | 47.8                        | -52.8                        | -46.2                       |
| 9  | 47.7                         | 28.1                        | -54.0                        | -27.8                       | 45.9                         | 32.2                        | -49.8                        | -31.7                       | 45.8                         | 28.8                        |
| 10 | -6.8                         | -6.1                        | 42.4                         | 6.9                         | -27.3                        | -4.4                        | 31.3                         | 2.3                         | -26.3                        | -5.3                        |
| 11 | -11.8                        | -11.6                       | -12.6                        | 2.1                         | 8.3                          | -14.8                       | -3.5                         | 15.8                        | 3.7                          | -14.2                       |
| 12 | 7.8                          | 37.2                        | -20.0                        | 0.6                         | 21.4                         | 13.3                        | -14.3                        | -3.0                        | 14.3                         | 13.5                        |
| 13 | -11.2                        | 44.8                        | 13.2                         | -32.3                       | -5.9                         | 45.0                        | 9.5                          | -35.6                       | -13.5                        | 52.7                        |
| 14 | -71.6                        | -74.2                       | 67.3                         | 69.2                        | -68.5                        | -75.5                       | 59.2                         | 73.9                        | -56.9                        | -79.4                       |



Tabel 18 Tangentieel gerichte krachten in de vlakke voegdelen van de ringvoegen na fase 3 in variant 5. Het nummer in de eerste kolom refereert naar Figuur 3b.

| nr | ring<br>$F_{KA,tan}$<br>[kN] | 1-2<br>$F_{KB,tan}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA,tan}$<br>[kN] | 2-3<br>$F_{KB,tan}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA,tan}$<br>[kN] | 3-4<br>$F_{KB,tan}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA,tan}$<br>[kN] | 4-5<br>$F_{KB,tan}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA,tan}$<br>[kN] | 5-6<br>$F_{KB,tan}$<br>[kN] |
|----|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 1  | -26.4                        | -64.3                       | 115.3                        | 30.7                        | 61.2                         | -28.9                       | 21.8                         | 21.0                        | 60.8                         | 42.0                        |
| 2  | -58.3                        | -8.0                        | -8.3                         | -88.6                       | -61.4                        | -5.8                        | 20.9                         | -50.7                       | 43.6                         | 17.7                        |
| 3  | 26.8                         | -49.4                       | -72.0                        | 34.8                        | -15.1                        | -38.1                       | -72.8                        | 24.2                        | -16.4                        | -32.9                       |
| 4  | -46.7                        | 60.4                        | 40.1                         | -49.8                       | -33.7                        | -29.2                       | 46.3                         | -51.3                       | -80.6                        | -79.6                       |
| 5  | 69.2                         | -63.0                       | -61.6                        | 76.3                        | 1.2                          | -52.9                       | -47.0                        | 82.4                        | -17.6                        | -57.1                       |
| 6  | -47.4                        | 78.9                        | 83.0                         | -4.6                        | -25.6                        | 88.1                        | 92.6                         | -15.4                       | -54.2                        | 66.9                        |
| 7  | 58.0                         | -124.6                      | -0.5                         | 45.1                        | 62.0                         | -103.6                      | -21.6                        | -56.6                       | -11.7                        | -76.2                       |
| 8  | -122.8                       | -100.7                      | -72.6                        | -84.3                       | -60.3                        | -75.2                       | -79.3                        | -79.2                       | -76.7                        | -63.6                       |
| 9  | -91.5                        | -84.7                       | -47.1                        | -50.4                       | -46.3                        | -55.3                       | -67.0                        | -35.2                       | -41.9                        | -66.4                       |
| 10 | 0.0                          | 0.0                         | -3.4                         | -34.5                       | -39.4                        | -19.9                       | -28.1                        | -71.4                       | -66.1                        | -42.5                       |
| 11 | 0.0                          | -2.4                        | -15.8                        | -0.5                        | -64.0                        | -81.4                       | -55.1                        | 25.1                        | 10.2                         | -82.0                       |
| 12 | 0.0                          | 0.0                         | 66.7                         | 8.4                         | 43.1                         | 49.5                        | 91.8                         | 44.5                        | -6.4                         | 71.5                        |
| 13 | 20.7                         | 57.8                        | 16.2                         | 55.8                        | 37.7                         | 23.2                        | 27.2                         | 55.0                        | 68.2                         | 35.3                        |
| 14 | 57.0                         | 25.6                        | 81.2                         | 57.3                        | 44.0                         | 62.7                        | 65.9                         | 57.2                        | 37.6                         | 53.9                        |

Tabel 19 Radiaal gerichte krachten in de vlakke voegdelen van de ringvoegen na fase 3 in variant 5. Het nummer in de eerste kolom refereert naar Figuur 3b.

| nr | ring<br>$F_{KA,rad}$<br>[kN] | 1-2<br>$F_{KB,rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA,rad}$<br>[kN] | 2-3<br>$F_{KB,rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA,rad}$<br>[kN] | 3-4<br>$F_{KB,rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA,rad}$<br>[kN] | 4-5<br>$F_{KB,rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA,rad}$<br>[kN] | 5-6<br>$F_{KB,rad}$<br>[kN] |
|----|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 1  | 141.8                        | 70.0                        | 8.4                          | -2.7                        | -35.4                        | 70.2                        | 98.2                         | 105.8                       | 33.4                         | 55.2                        |
| 2  | -99.6                        | -103.3                      | 35.4                         | 19.7                        | -100.8                       | -46.0                       | 66.3                         | 32.7                        | 96.7                         | 95.4                        |
| 3  | -16.5                        | -33.0                       | -13.0                        | 2.4                         | 91.7                         | 83.7                        | -14.8                        | 4.1                         | 94.7                         | 95.7                        |
| 4  | 10.1                         | -15.0                       | 13.4                         | 15.9                        | -75.3                        | -76.6                       | -5.7                         | 18.4                        | 34.1                         | -18.8                       |
| 5  | 5.5                          | 36.8                        | -11.2                        | -27.5                       | -37.8                        | 30.1                        | -14.3                        | -27.8                       | -2.4                         | 15.5                        |
| 6  | -40.0                        | -49.0                       | 32.0                         | 31.4                        | -41.0                        | -52.5                       | 30.7                         | 50.0                        | -24.5                        | -39.2                       |
| 7  | 56.4                         | 36.2                        | -33.0                        | -38.4                       | 37.7                         | -4.6                        | 104.0                        | 3.5                         | 31.0                         | 48.3                        |
| 8  | -10.1                        | 90.0                        | -89.8                        | -58.7                       | 87.7                         | 56.4                        | -26.7                        | 35.2                        | -27.7                        | 30.6                        |
| 9  | -58.6                        | -31.4                       | 96.3                         | 18.7                        | -21.0                        | -19.7                       | 26.0                         | 9.0                         | -16.6                        | -14.7                       |
| 10 | 0.0                          | 0.0                         | -1.6                         | -10.1                       | 7.8                          | -2.3                        | -9.4                         | -13.9                       | -20.0                        | -18.9                       |
| 11 | 0.0                          | -13.0                       | -40.8                        | -39.2                       | -20.9                        | 18.8                        | -64.7                        | -74.9                       | -18.4                        | -14.0                       |
| 12 | 0.0                          | 0.0                         | 20.2                         | -3.8                        | -14.7                        | -10.2                       | 19.7                         | -12.1                       | -22.2                        | -34.9                       |
| 13 | -1.5                         | -38.1                       | -1.7                         | 18.7                        | 6.4                          | -14.6                       | -2.5                         | 16.9                        | 8.1                          | -14.1                       |
| 14 | 98.3                         | 75.5                        | -55.2                        | -81.1                       | 55.4                         | 66.6                        | -17.8                        | -30.9                       | 33.7                         | 60.6                        |



Tabel 20 Tangentieel gerichte krachten in de vlakke voegdelen van de ringvoegen na fase 5 in variant 5. Het nummer in de eerste kolom refereert naar Figuur 3b.

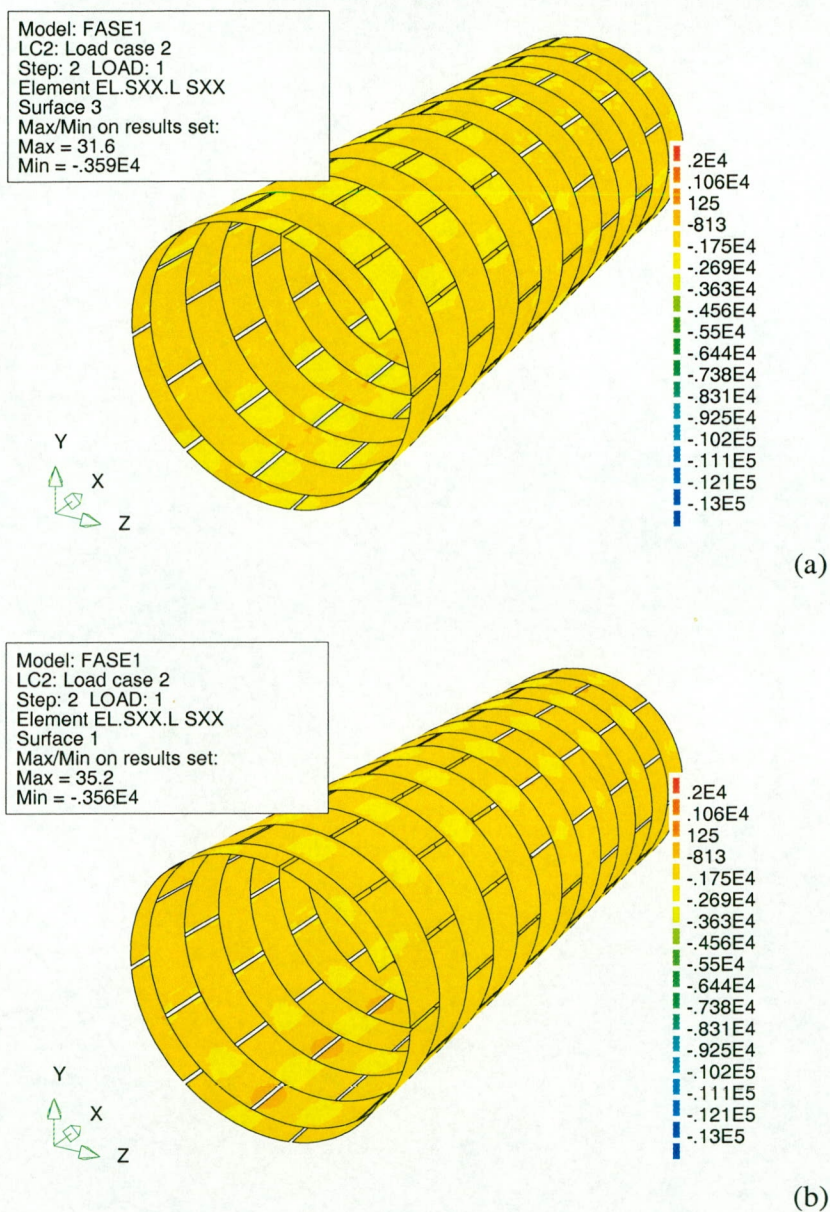
| nr | ring<br>$F_{KA;tan}$<br>[kN] | 1-2<br>$F_{KB;tan}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA;tan}$<br>[kN] | 2-3<br>$F_{KB;tan}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA;tan}$<br>[kN] | 3-4<br>$F_{KB;tan}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA;tan}$<br>[kN] | 4-5<br>$F_{KB;tan}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA;tan}$<br>[kN] | 5-6<br>$F_{KB;tan}$<br>[kN] |
|----|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 1  | 83.5                         | 73.7                        | 112.8                        | 114.6                       | 90.1                         | 102.7                       | 90.9                         | 98.2                        | 78.0                         | 70.2                        |
| 2  | 78.2                         | 78.0                        | 98.3                         | 76.5                        | 35.8                         | -19.6                       | 77.9                         | 2.2                         | 69.6                         | 23.0                        |
| 3  | 31.4                         | -72.7                       | -12.7                        | 40.2                        | -66.3                        | -92.8                       | -45.1                        | 39.6                        | 52.4                         | -28.3                       |
| 4  | -67.4                        | 63.9                        | 56.6                         | -56.8                       | -84.2                        | 39.3                        | 56.4                         | -49.4                       | -10.3                        | 8.5                         |
| 5  | 70.3                         | -56.8                       | -44.8                        | 52.1                        | -65.1                        | -87.8                       | -44.9                        | 61.2                        | 63.9                         | -74.7                       |
| 6  | -64.7                        | 4.2                         | -11.7                        | -87.1                       | -89.5                        | -18.3                       | 58.6                         | -80.1                       | -61.9                        | 13.9                        |
| 7  | -76.9                        | -103.9                      | -107.0                       | -113.1                      | -94.4                        | -95.3                       | -104.3                       | -102.9                      | -74.9                        | -87.2                       |
| 8  | -112.2                       | -114.4                      | -100.3                       | -102.1                      | -82.1                        | -79.9                       | -75.7                        | -77.1                       | -88.2                        | -70.5                       |
| 9  | -100.0                       | -45.6                       | -68.6                        | -26.6                       | -49.4                        | -56.0                       | -63.4                        | -41.8                       | -43.3                        | -62.1                       |
| 10 | 0.0                          | 0.0                         | -6.3                         | -42.0                       | -48.2                        | -28.5                       | -46.2                        | -80.7                       | -57.7                        | -41.5                       |
| 11 | 0.0                          | -14.9                       | -24.4                        | -10.7                       | -67.7                        | -36.9                       | -55.5                        | -43.0                       | -42.4                        | -86.4                       |
| 12 | 0.0                          | 0.0                         | 31.5                         | 12.3                        | 30.6                         | 60.1                        | 85.0                         | 43.6                        | 35.0                         | 81.9                        |
| 13 | 11.2                         | 58.9                        | 2.9                          | 24.6                        | 50.4                         | 22.8                        | 36.4                         | 58.0                        | 71.3                         | 39.5                        |
| 14 | 87.6                         | 78.1                        | 85.0                         | 89.1                        | 60.2                         | 66.2                        | 65.6                         | 61.8                        | 52.4                         | 75.6                        |

Tabel 21 Radiaal gerichte krachten in de vlakke voegdelen van de ringvoegen na fase 5 in variant 5. Het nummer in de eerste kolom refereert naar Figuur 3b.

| nr | ring<br>$F_{KA;rad}$<br>[kN] | 1-2<br>$F_{KB;rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA;rad}$<br>[kN] | 2-3<br>$F_{KB;rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA;rad}$<br>[kN] | 3-4<br>$F_{KB;rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA;rad}$<br>[kN] | 4-5<br>$F_{KB;rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA;rad}$<br>[kN] | 5-6<br>$F_{KB;rad}$<br>[kN] |
|----|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 1  | 72.7                         | 81.2                        | 3.0                          | 4.7                         | 41.0                         | -3.0                        | 21.7                         | 25.2                        | 44.4                         | 54.5                        |
| 2  | -29.2                        | -40.4                       | 37.5                         | 45.7                        | -99.8                        | 100.0                       | 57.4                         | 29.0                        | -32.4                        | -32.9                       |
| 3  | -1.0                         | -5.7                        | -19.0                        | 6.2                         | 63.9                         | 7.4                         | -13.9                        | 8.4                         | 5.6                          | -33.4                       |
| 4  | 3.2                          | -20.2                       | -8.8                         | 16.9                        | 25.8                         | -35.5                       | -8.6                         | 13.3                        | 3.0                          | -18.2                       |
| 5  | 12.5                         | 34.7                        | -19.6                        | -47.2                       | 32.7                         | -3.9                        | -13.1                        | -41.3                       | -4.1                         | 16.5                        |
| 6  | -49.1                        | -48.1                       | 63.8                         | 41.9                        | -35.1                        | -48.2                       | 37.6                         | 37.9                        | -28.6                        | -40.0                       |
| 7  | 75.3                         | 37.5                        | -33.4                        | -11.1                       | 48.6                         | 43.5                        | 5.0                          | 8.5                         | 61.0                         | 38.0                        |
| 8  | 45.9                         | 33.9                        | -30.2                        | 14.9                        | 64.2                         | 45.8                        | 37.3                         | 28.1                        | 8.8                          | -9.6                        |
| 9  | 1.8                          | 75.5                        | 56.6                         | 44.6                        | 7.2                          | -1.7                        | 16.2                         | 1.3                         | 21.9                         | 14.0                        |
| 10 | 0.0                          | 0.0                         | 6.5                          | 9.1                         | -35.2                        | -30.6                       | -1.7                         | -18.1                       | -52.5                        | -37.9                       |
| 11 | 0.0                          | -14.4                       | -82.6                        | -93.1                       | -41.8                        | -87.7                       | -70.1                        | -69.5                       | -18.7                        | -9.2                        |
| 12 | 0.0                          | 0.0                         | -79.9                        | 3.7                         | -52.7                        | -50.6                       | -36.4                        | -44.0                       | -24.6                        | -31.3                       |
| 13 | 5.6                          | 21.0                        | 8.3                          | 40.5                        | -2.5                         | 11.5                        | 3.1                          | -8.0                        | -25.4                        | 14.4                        |
| 14 | 62.5                         | 85.9                        | 6.9                          | -14.8                       | 29.5                         | 60.0                        | 15.7                         | 19.4                        | 7.6                          | 17.6                        |

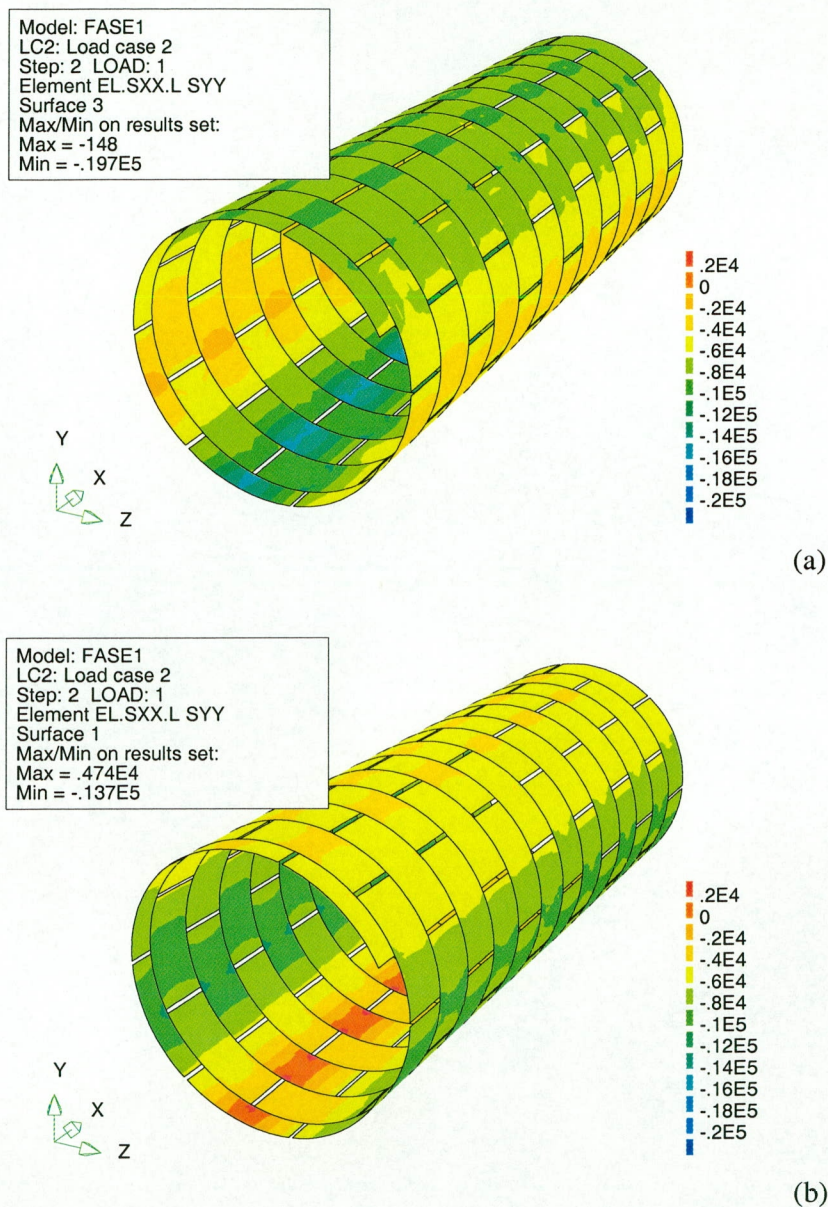


### Bijlage A.3 Spanningsverdelingen en vervormingen fase 1



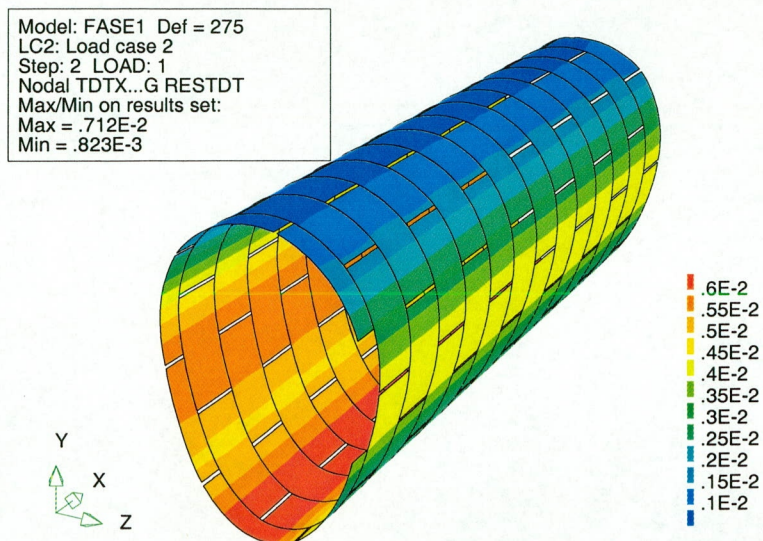
Figuur 15 Axiale normaalspanningen (in  $\text{kN/m}^2$ ) aan de binnen- (a) en de buitenzijde (b) van de hoofdtunnelbuis (variant 5, fase 1).





Figuur 16 Tangentiële normaalspanningen (in  $\text{kN/m}^2$ ) aan de binnen- (a) en de buitenzijde (b) van de hoofdtunnelbuis (variant 5, fase 1).

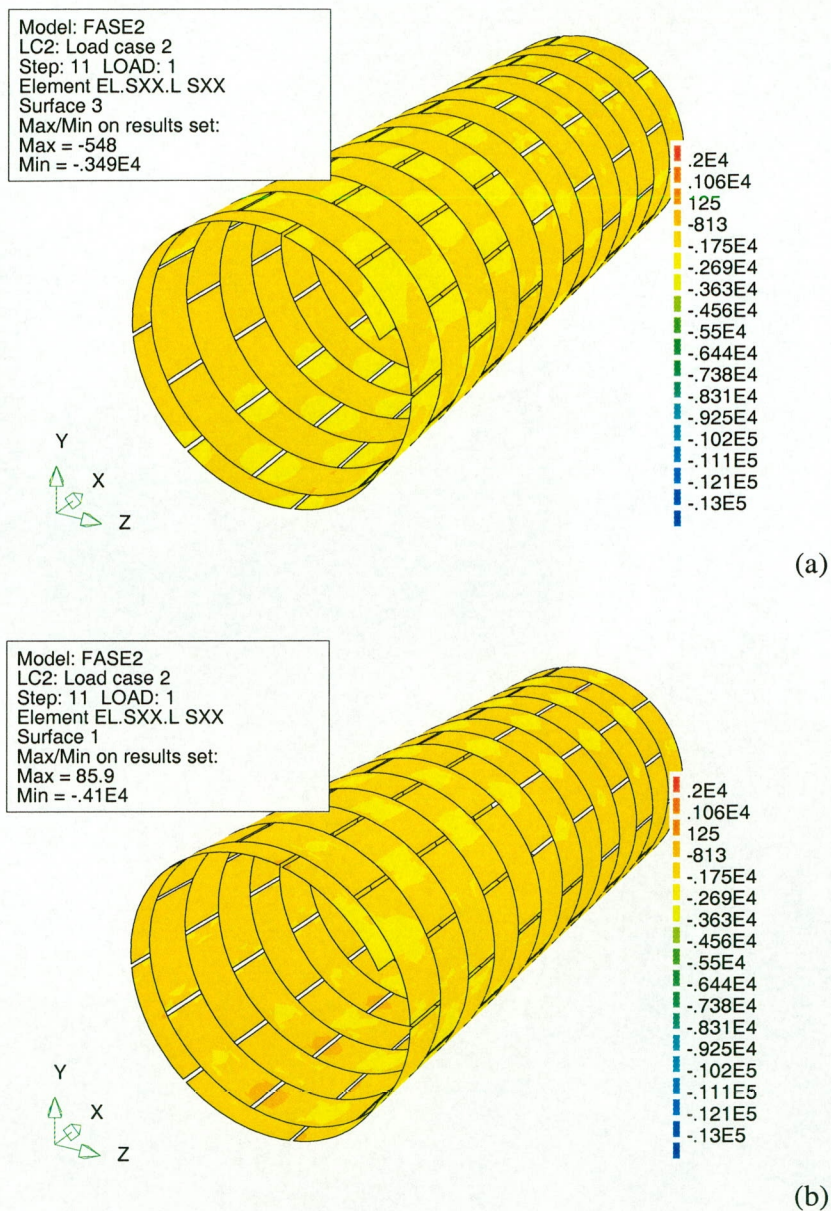




Figuur 17 Totale vervormingen (in m) van de hoofdtunnelbuis (variant 5, fase 1).

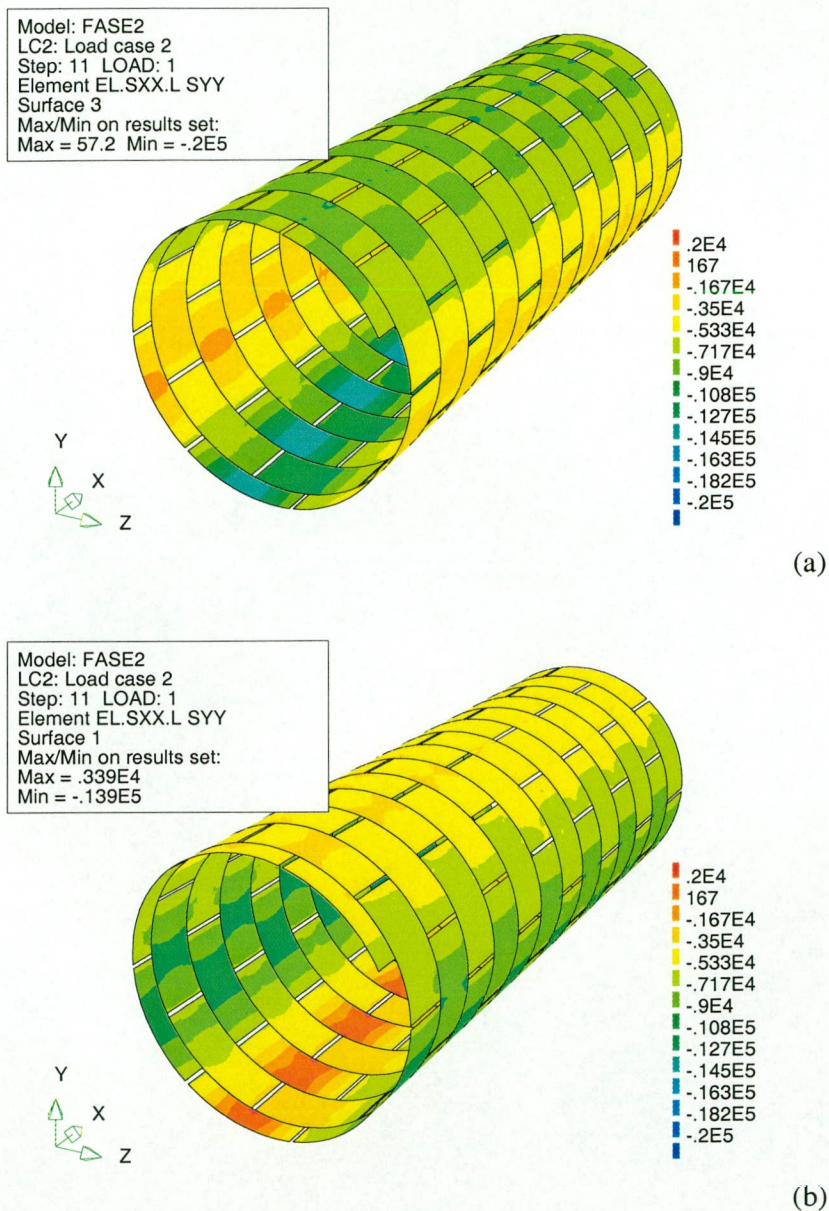


## Bijlage A.4 Spanningsverdelingen en vervormingen fase 2



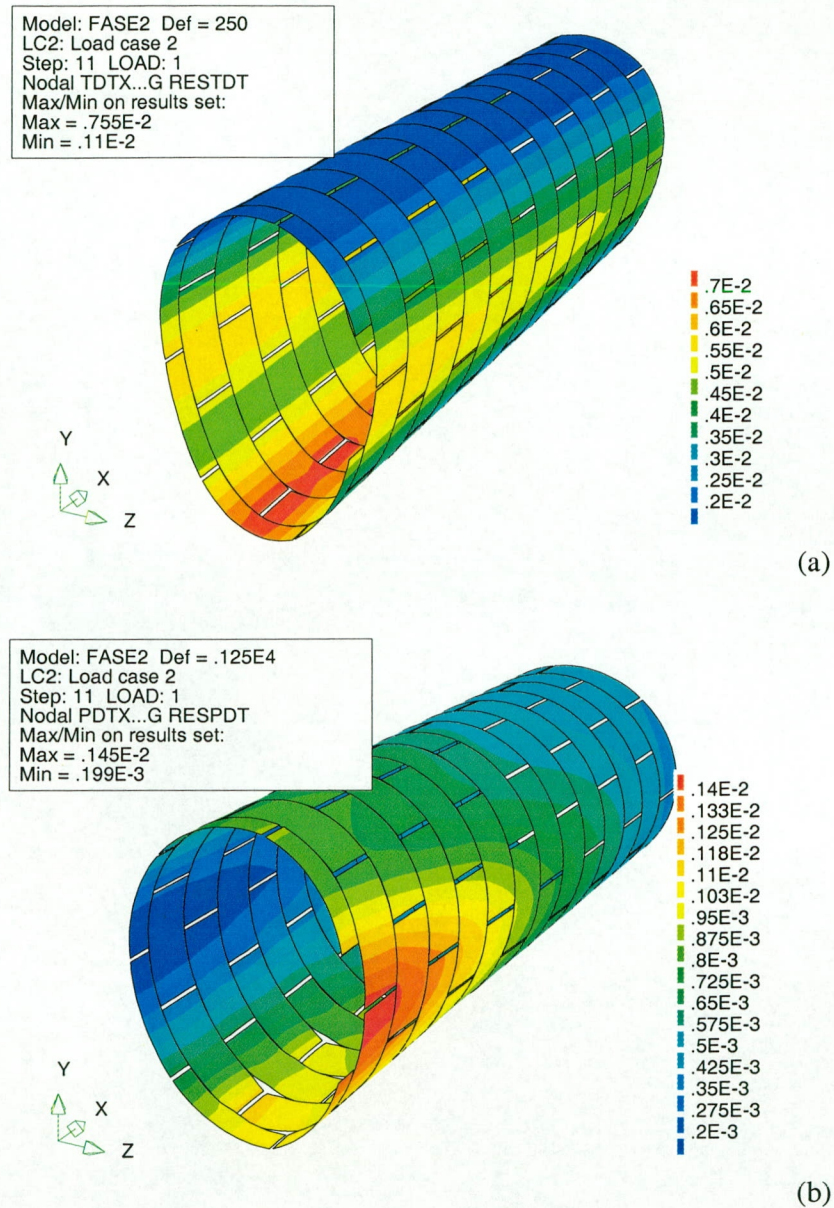
Figuur 18 Axiale normaalspanningen (in  $\text{kN/m}^2$ ) aan de binnen- (a) en de buitenzijde (b) van de hoofdtunnelbuis (variant 5, fase 2).





Figuur 19 Tangentiële normaalspanningen (in  $\text{kN/m}^2$ ) aan de binnen- (a) en de buitenzijde (b) van de hoofdtunnelbuis (variant 5, fase 2).

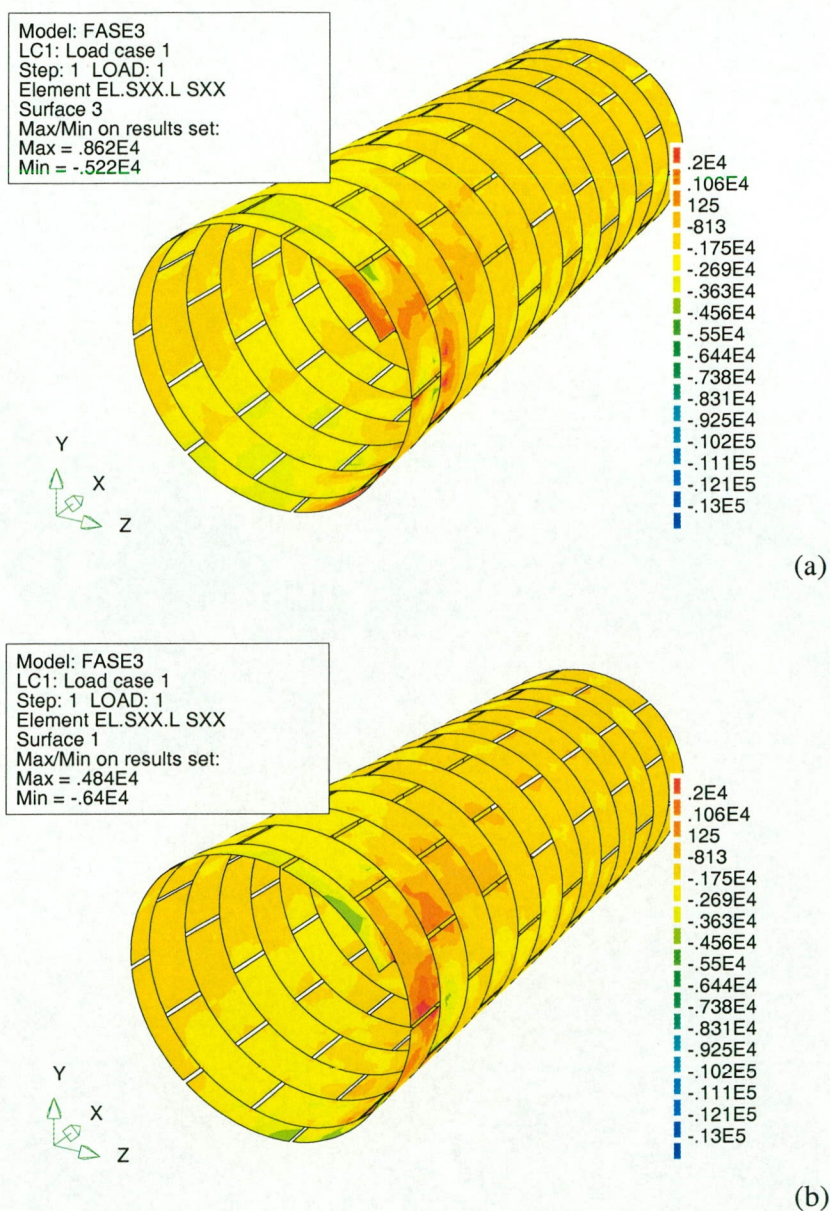




Figuur 20 Totale (a) en incrementele (b) vervormingen (in m) van de hoofdtunnelbuis (variant 5, fase 2).

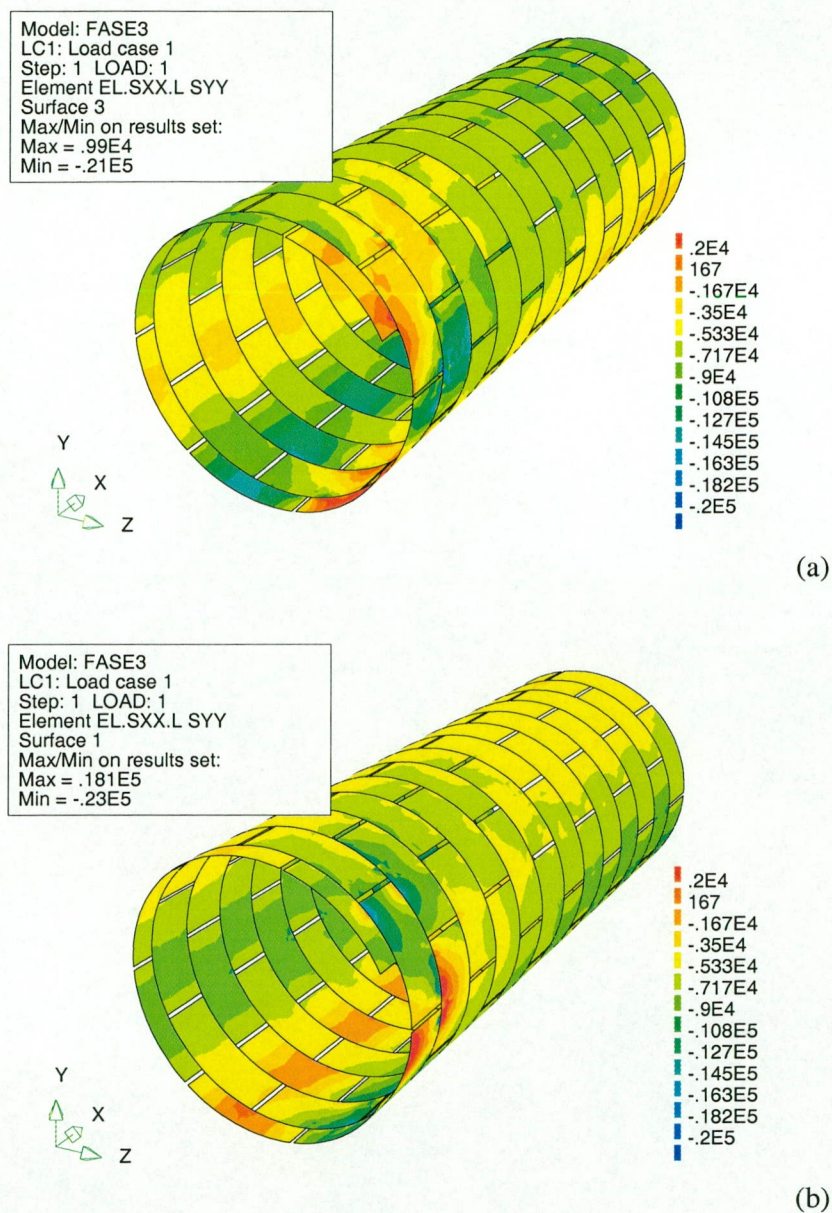


## Bijlage A.5 Spanningsverdelingen en vervormingen fase 3



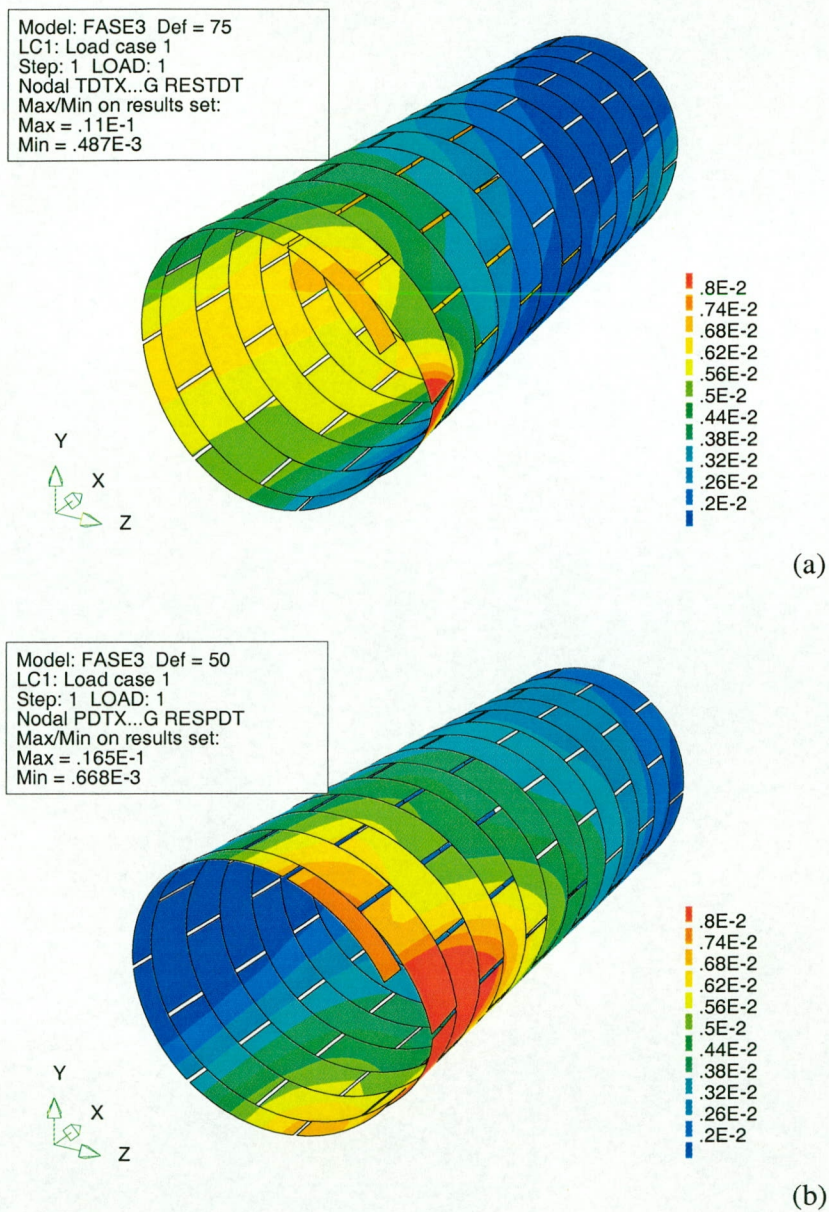
Figuur 21 Axiale normaalspanningen (in  $\text{kN/m}^2$ ) aan de binnen- (a) en de buitenzijde (b) van de hoofdtunnelbuis (variant 5, fase 3).





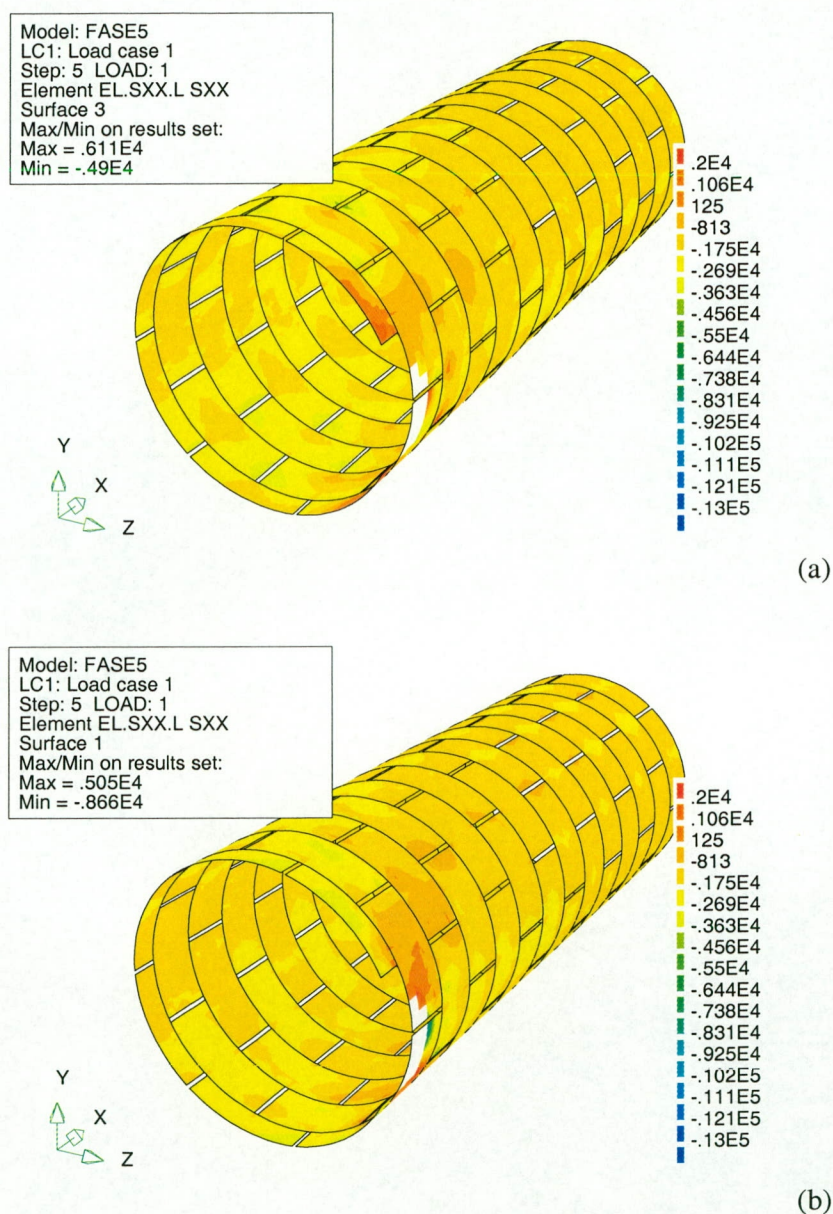
Figuur 22 Tangentiële normaalspanningen (in  $\text{kN/m}^2$ ) aan de binnen- (a) en de buitenzijde (b) van de hoofdtunnelbuis (variant 5, fase 3).





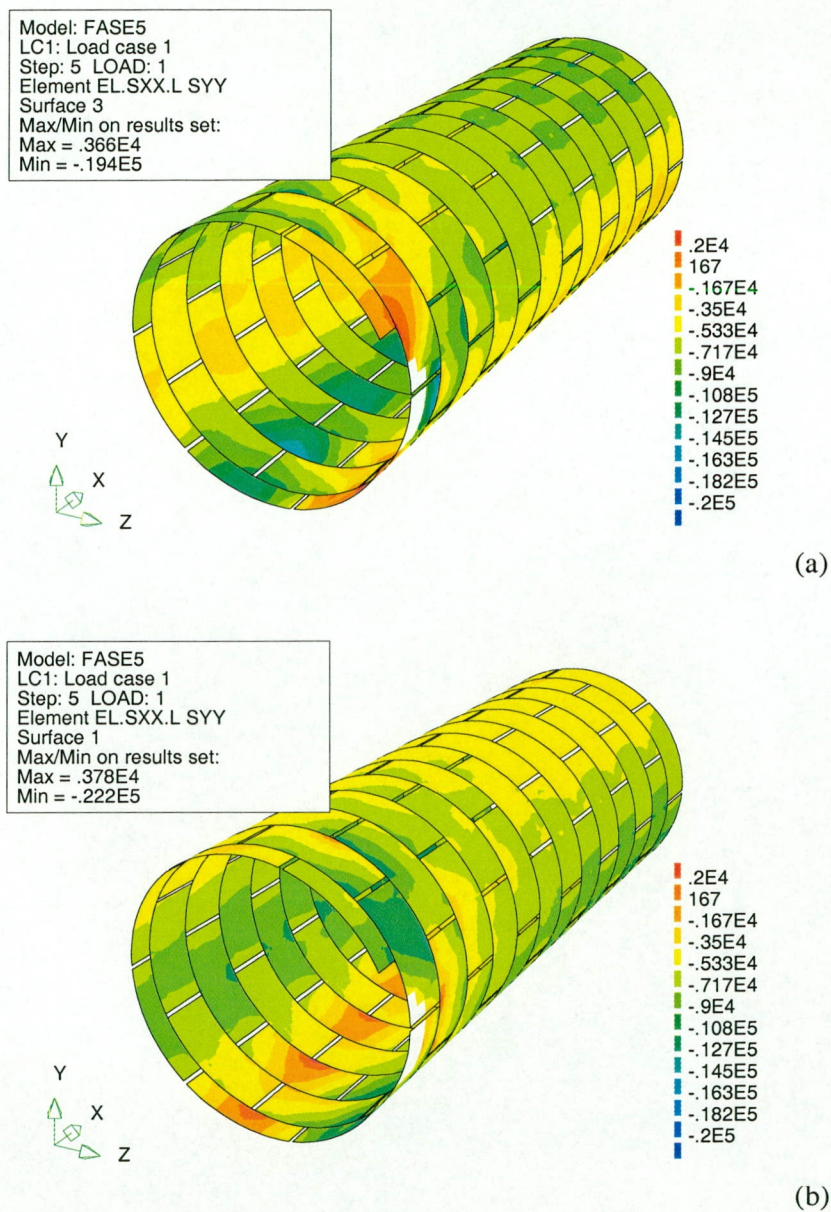
Figuur 23 Totale (a) en incrementele (b) vervormingen (in m) van de hoofdtunnelbuis (variant 5, fase 3).



**Bijlage A.6 Spanningsverdelingen en vervormingen fase 5**

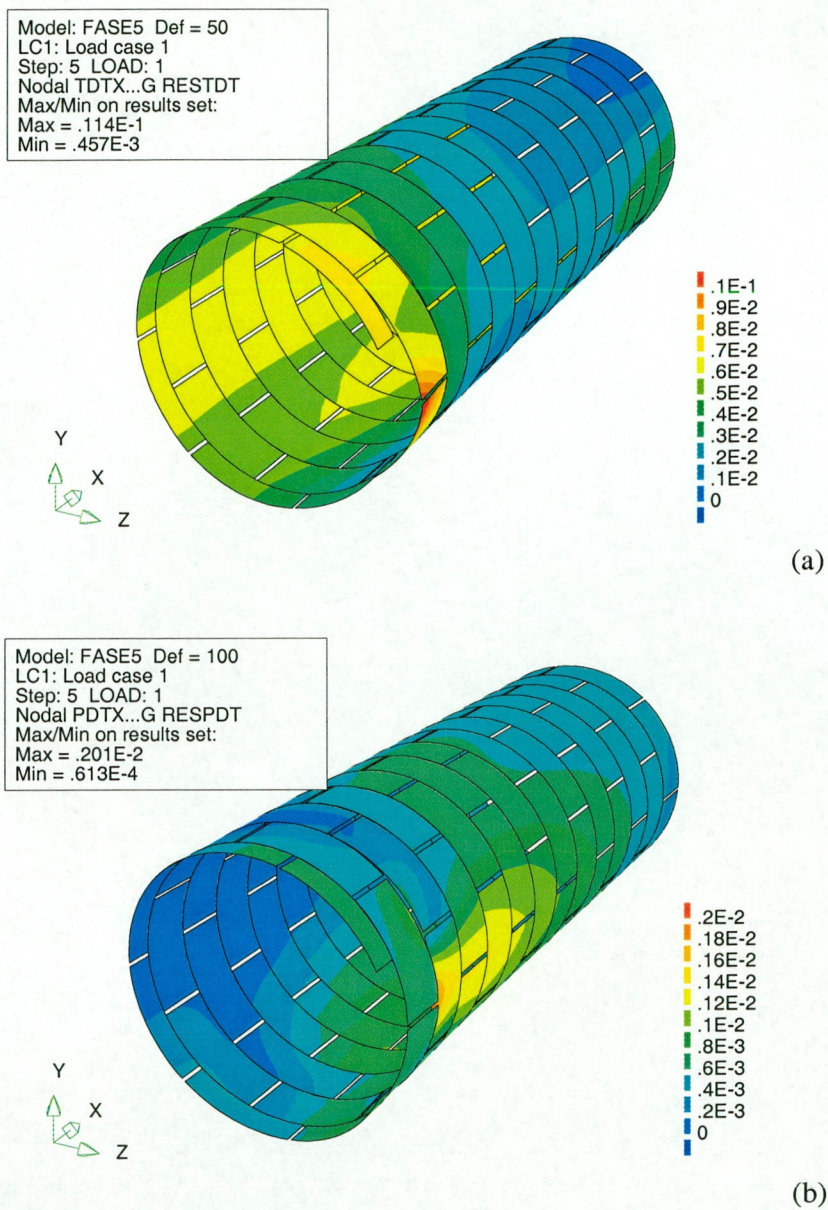
Figuur 24 Axiale normaalspanningen (in  $\text{kN/m}^2$ ) aan de binnen- (a) en de buitenzijde (b) van de hoofdtunnelbuis (variant 5, fase 5).





Figuur 25 Tangentiële normaalspanningen (in  $\text{kN/m}^2$ ) aan de binnen- (a) en de buitenzijde (b) van de hoofdtunnelbuis (variant 5, fase 5).





Figuur 26 Totale (a) en incrementele (b) vervormingen (in m) van de hoofdtunnelbuis (variant 5, fase 5).







## Bijlage B Resultaten variant 6

### Bijlage B.1 Verplaatsingen en voegopeningen

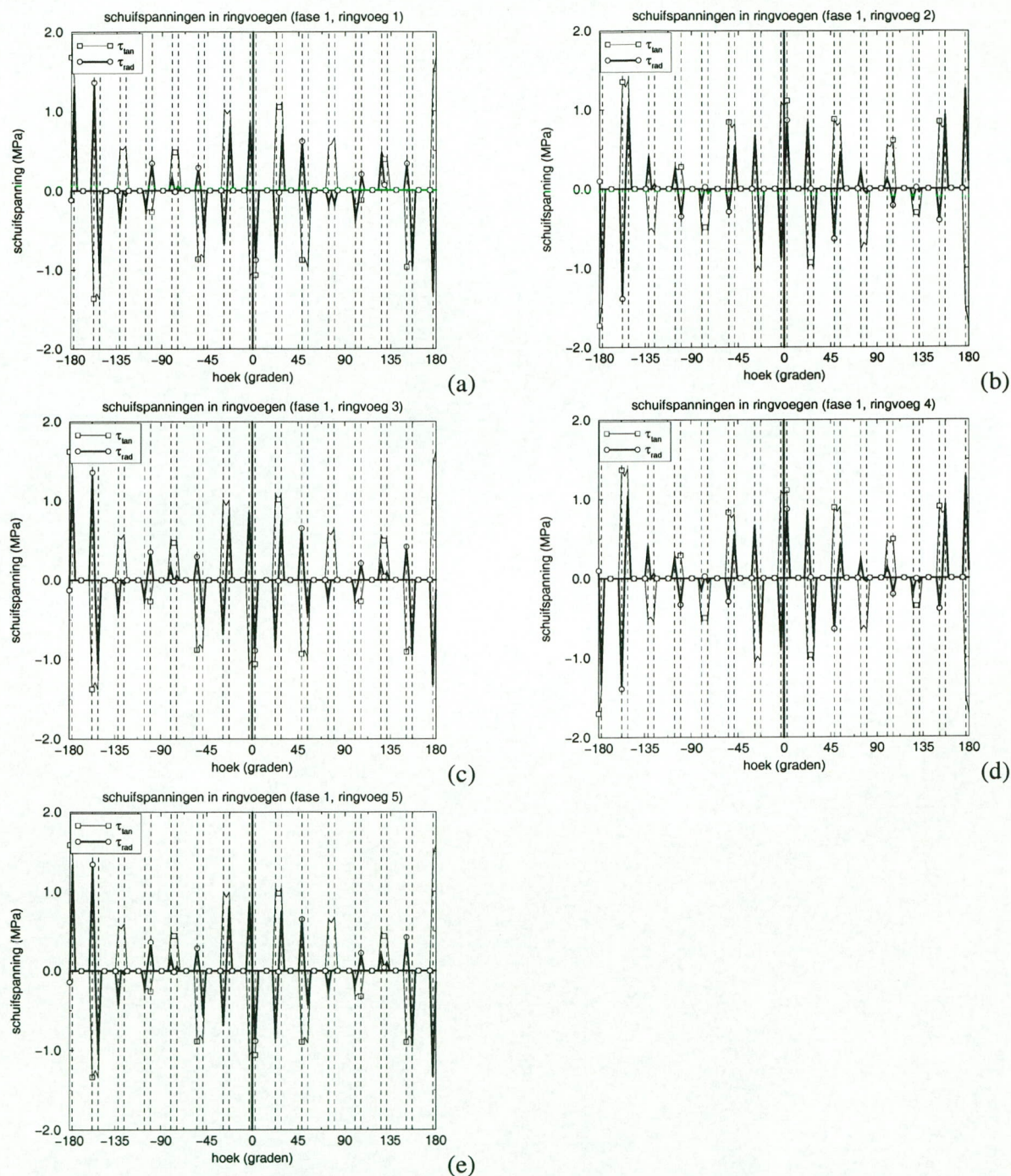
Tabel 22 Verplaatsingen en ovalisering van beide uiteinden van de hoofdtunnelbuis voor de vijf berekende fasen volgens variant 6.

| Ring | Fase | $\delta_{Y1}$<br>[mm] | $\delta_{Z2}$<br>[mm] | $\delta_{Y3}$<br>[mm] | $\delta_{Z4}$<br>[mm] | $\delta_{Y3-Y1}$<br>[mm] | $\delta_{Z4-Z2}$<br>[mm] | $\delta_{Y1+Y3}/2$<br>[mm] | $\delta_{Z2+Z4}/2$<br>[mm] |
|------|------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 1    | 1    | -0.23                 | -4.40                 | -6.38                 | 5.01                  | -6.15                    | 9.41                     | -3.30                      | 0.31                       |
|      | 2    | 0.36                  | -5.82                 | -7.00                 | 4.78                  | -7.36                    | 10.59                    | -3.32                      | -0.52                      |
|      | 3    | -7.31                 |                       | 0.63                  | 5.22                  | 7.94                     |                          | -3.34                      |                            |
|      | 5    | -7.55                 |                       | 0.64                  | 5.34                  | 8.20                     |                          | -3.45                      |                            |
| 7    | 1    | -0.26                 | -4.32                 | -6.27                 | 4.85                  | -6.01                    | 9.16                     | -3.27                      | 0.27                       |
|      | 2    | -0.03                 | -5.14                 | -6.50                 | 4.49                  | -6.47                    | 9.63                     | -3.26                      | -0.33                      |
|      | 3    | -1.60                 | -1.13                 | -5.57                 | 5.96                  | -3.97                    | 7.09                     | -3.59                      | 2.42                       |
|      | 5    | -1.74                 | -0.97                 | -5.70                 | 6.10                  | -3.96                    | 7.07                     | -3.72                      | 2.57                       |
| 14   | 1    | -0.35                 | -4.21                 | -6.15                 | 4.63                  | -5.80                    | 8.84                     | -3.25                      | 0.21                       |
|      | 2    | -0.40                 | -4.59                 | -6.08                 | 4.12                  | -5.68                    | 8.71                     | -3.24                      | -0.23                      |
|      | 3    | -0.22                 | -2.98                 | -6.75                 | 6.59                  | -6.52                    | 9.57                     | -3.48                      | 1.80                       |
|      | 5    | -0.34                 | -2.86                 | -6.86                 | 6.71                  | -6.52                    | 9.57                     | -3.60                      | 1.92                       |

Tabel 23 Maximale voegopenstanden en verschuivingen in de hoofdtunnelbuis en de plaats waar deze (ten opzichte van de oorsprong) optreden voor variant 6.

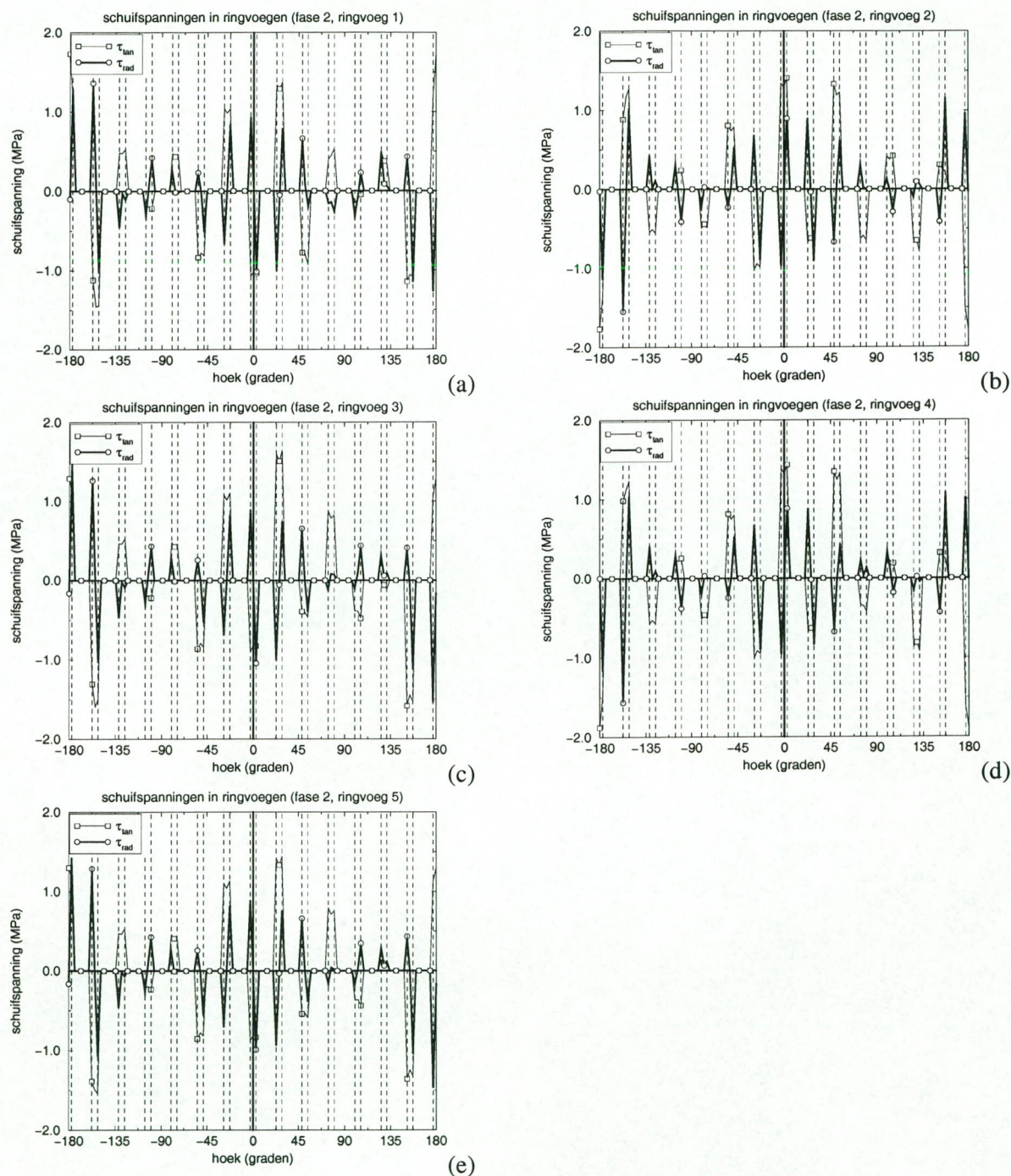
|        |                                   | Waarde<br>[mm] | X<br>[m] | Y<br>[m] | Z<br>[m] |
|--------|-----------------------------------|----------------|----------|----------|----------|
| Fase 1 | maximale openstand ringvoegen     | 0.40           | 3.00     | -5.12    | -1.25    |
|        | maximale verschuiving ringvoegen  | 0.59           | 3.00     | -5.16    | -1.10    |
|        | maximale openstand langsvoegen    | 0.02           | 1.00     | -5.16    | -1.10    |
|        | maximale verschuiving langsvoegen | 0.01           | 1.00     | -2.22    | 4.79     |
| Fase 2 | maximale openstand ringvoegen     | 0.45           | 3.00     | -5.12    | -1.25    |
|        | maximale verschuiving ringvoegen  | 0.70           | 3.00     | -5.16    | -1.10    |
|        | maximale openstand langsvoegen    | 0.07           | 1.00     | -5.16    | -1.10    |
|        | maximale verschuiving langsvoegen | 0.01           | 1.00     | -2.22    | 4.79     |
| Fase 3 | maximale openstand ringvoegen     | 3.64           | 1.00     | -2.22    | 4.79     |
|        | maximale verschuiving ringvoegen  | 14.03          | 3.00     | -0.08    | 5.27     |
|        | maximale openstand langsvoegen    | 3.55           | 0.88     | 2.36     | 4.72     |
|        | maximale verschuiving langsvoegen | 4.52           | 0.00     | -2.22    | 4.79     |
| Fase 5 | maximale openstand ringvoegen     | 3.63           | 1.00     | -2.22    | 4.79     |
|        | maximale verschuiving ringvoegen  | 14.10          | 3.00     | -0.08    | 5.27     |
|        | maximale openstand langsvoegen    | 3.45           | 0.88     | 2.36     | 4.72     |
|        | maximale verschuiving langsvoegen | 4.56           | 0.00     | -2.22    | 4.79     |



**Bijlage B.2 Koppelkrachten in de ringvoegen**

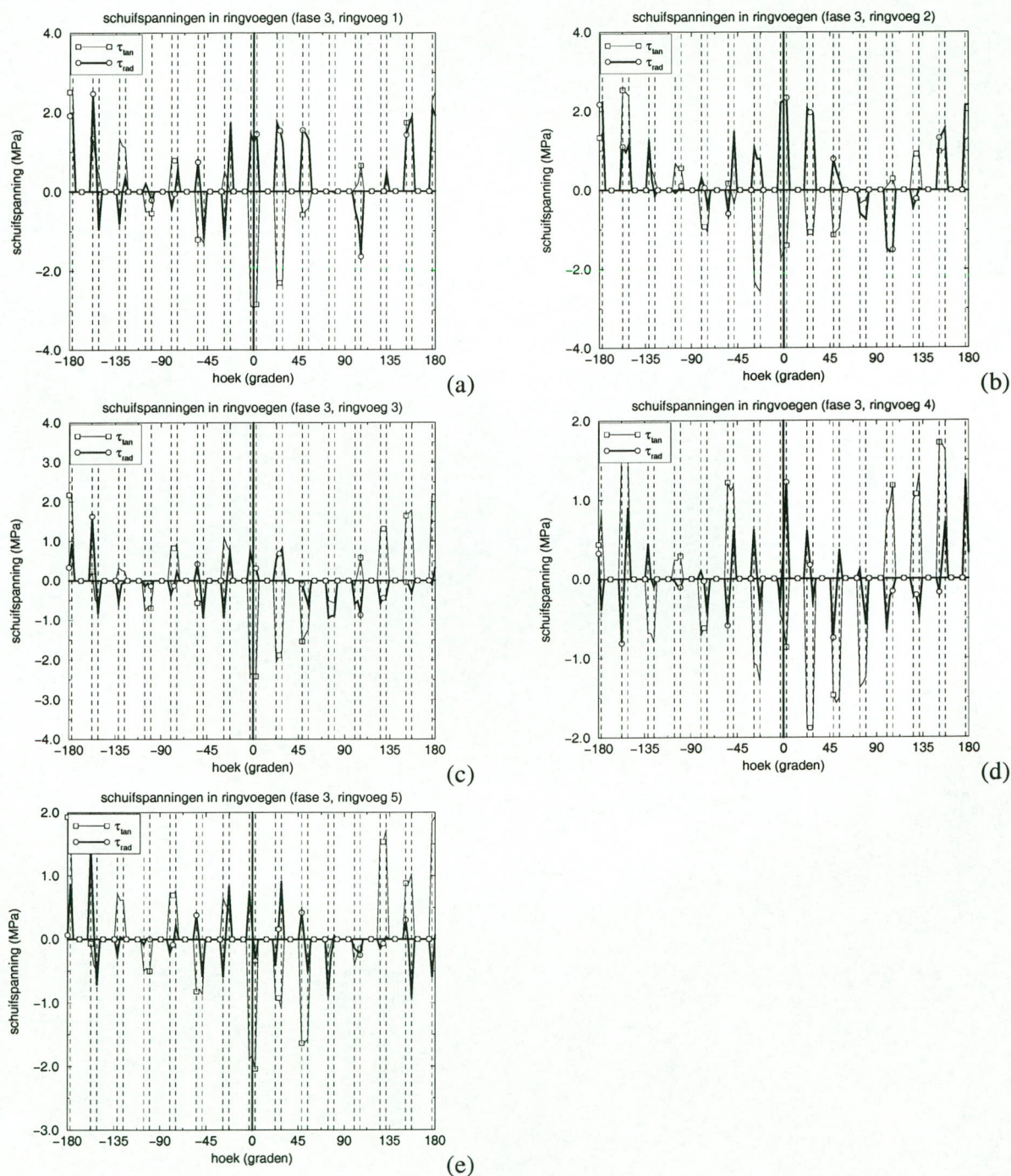
Figuur 27 Schuifspanningsverdelingen in fase 1 in de ringvoeg achter ring 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d) en 5 (e).





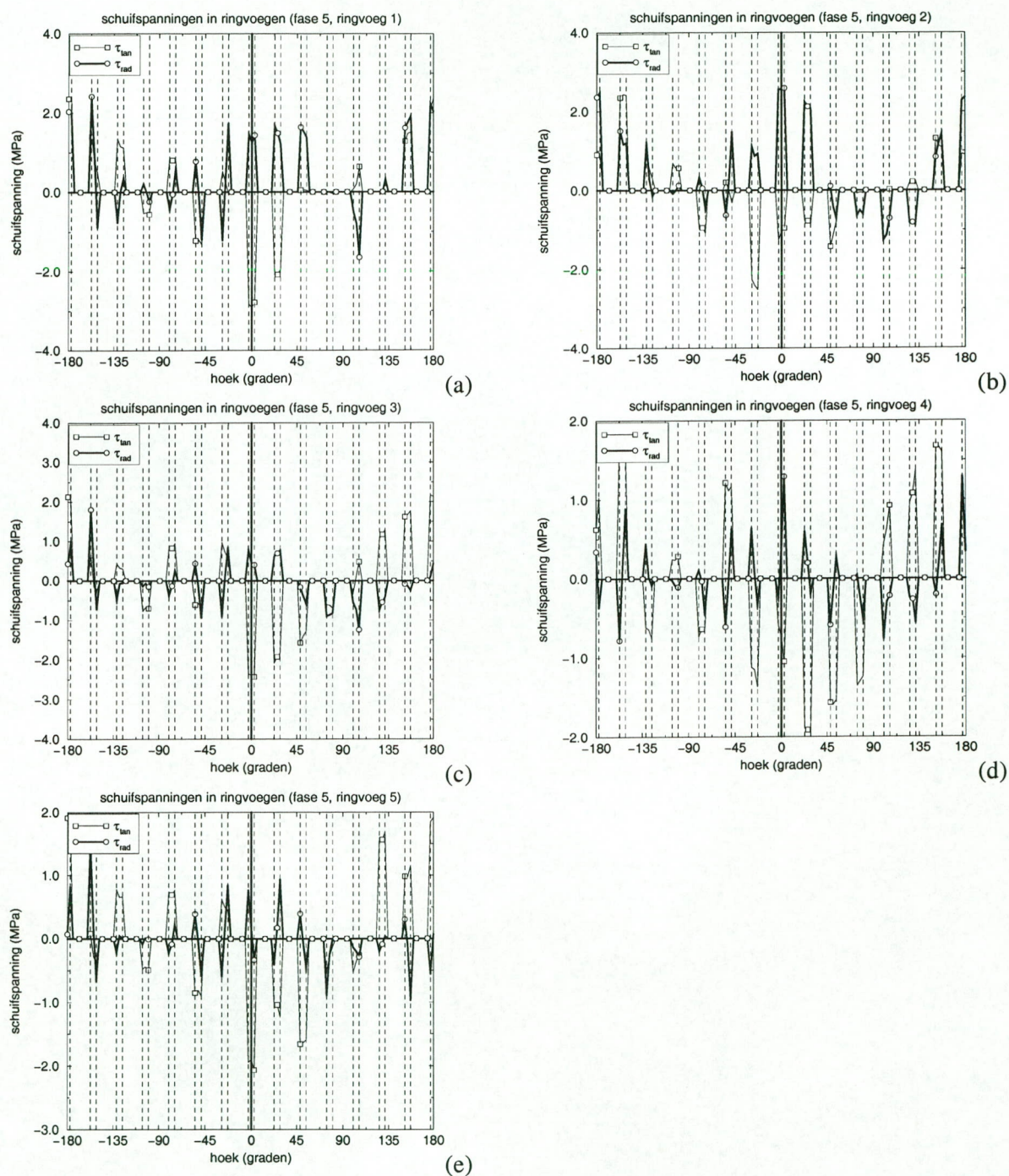
Figuur 28 Schuifspanningsverdelingen in fase 2 in de ringvoeg achter ring 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d) en 5 (e).





Figuur 29 Schuifspanningsverdelingen in fase 3 in de ringvoeg achter ring 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d) en 5 (e).





Figuur 30 Schuifspanningsverdelingen in fase 5 in de ringvoeg achter ring 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d) en 5 (e).



Tabel 24 Overzicht van de maximale koppelkrachten in de ringvoegen.

| fase | $F_{K,tan,max}$<br>[kN] | $F_{K,rad,max}$<br>[kN] | $F_{K,max}$<br>[kN] |
|------|-------------------------|-------------------------|---------------------|
| 1    | 216                     | 37                      | 216                 |
| 2    | 231                     | 44                      | 231                 |
| 3    | 410                     | 325                     | 456                 |
| 5    | 403                     | 367                     | 450                 |

Tabel 25 Tangentieel en radiaal gerichte krachten in de nokken van de ringvoegen na fase 1 in variant 6. Het nummer in de eerste kolom refereert naar Figuur 3b.

| nr | ring<br>$F_{K,tan}$<br>[kN] | 1-2<br>$F_{K,rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{K,tan}$<br>[kN] | 2-3<br>$F_{K,rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{K,tan}$<br>[kN] | 3-4<br>$F_{K,rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{K,tan}$<br>[kN] | 4-5<br>$F_{K,rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{K,tan}$<br>[kN] | 5-6<br>$F_{K,rad}$<br>[kN] |
|----|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 1  | 211.5                       | -2.0                       | -215.5                      | 0.2                        | 210.6                       | -3.0                       | -216.2                      | 0.0                        | 210.8                       | -3.3                       |
| 2  | -192.4                      | 15.3                       | 192.8                       | -15.5                      | -193.0                      | 13.6                       | 194.0                       | -16.0                      | -188.0                      | 12.4                       |
| 3  | 77.2                        | -27.3                      | -75.4                       | 27.6                       | 78.9                        | -26.8                      | -74.1                       | 27.3                       | 81.0                        | -26.5                      |
| 4  | -36.5                       | 7.0                        | 38.1                        | -6.4                       | -36.0                       | 7.7                        | 39.9                        | -5.4                       | -34.3                       | 9.7                        |
| 5  | 73.1                        | 11.7                       | -73.9                       | -11.1                      | 72.5                        | 12.2                       | -76.0                       | -10.5                      | 68.0                        | 13.2                       |
| 6  | -120.1                      | -15.3                      | 117.2                       | 15.6                       | -122.5                      | -15.2                      | 115.2                       | 15.0                       | -123.0                      | -16.2                      |
| 7  | 143.5                       | 8.8                        | -146.5                      | -8.7                       | 142.1                       | 8.0                        | -147.5                      | -9.5                       | 139.8                       | 8.0                        |
| 8  | -151.6                      | -1.5                       | 156.0                       | 0.0                        | -150.0                      | -2.0                       | 156.0                       | 0.0                        | -149.5                      | -1.3                       |
| 9  | 156.0                       | -9.1                       | -139.8                      | 5.3                        | 152.6                       | -6.1                       | -145.5                      | 6.5                        | 146.7                       | -6.0                       |
| 10 | -129.7                      | 19.0                       | 120.8                       | -9.0                       | -133.1                      | 14.2                       | 126.0                       | -12.3                      | -126.5                      | 13.1                       |
| 11 | 86.5                        | -20.2                      | -103.7                      | 9.3                        | 87.3                        | -14.7                      | -91.5                       | 10.1                       | 93.0                        | -13.6                      |
| 12 | -21.8                       | -12.8                      | 81.0                        | -4.0                       | -39.4                       | 0.7                        | 67.7                        | -2.7                       | -44.8                       | 2.9                        |
| 13 | 60.8                        | 28.2                       | -46.8                       | -9.1                       | 76.3                        | 19.1                       | -53.8                       | -12.9                      | 67.8                        | 19.3                       |
| 14 | -132.6                      | -37.1                      | 115.8                       | 31.1                       | -125.8                      | -30.0                      | 122.7                       | 31.7                       | -123.9                      | -29.5                      |

Tabel 26 Tangentieel en radiaal gerichte krachten in de nokken van de ringvoegen na fase 2 in variant 6. Het nummer in de eerste kolom refereert naar Figuur 3b.

| nr | ring<br>$F_{K,tan}$<br>[kN] | 1-2<br>$F_{K,rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{K,tan}$<br>[kN] | 2-3<br>$F_{K,rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{K,tan}$<br>[kN] | 3-4<br>$F_{K,rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{K,tan}$<br>[kN] | 4-5<br>$F_{K,rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{K,tan}$<br>[kN] | 5-6<br>$F_{K,rad}$<br>[kN] |
|----|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 1  | 183.3                       | -1.2                       | -214.9                      | -10.3                      | 159.2                       | -7.9                       | -230.8                      | -8.0                       | 167.0                       | -7.1                       |
| 2  | -187.7                      | 20.0                       | 156.1                       | -32.2                      | -205.3                      | 11.4                       | 158.0                       | -30.4                      | -209.4                      | 9.7                        |
| 3  | 71.6                        | -32.5                      | -77.4                       | 30.7                       | 70.0                        | -32.1                      | -80.2                       | 28.9                       | 70.7                        | -30.1                      |
| 4  | -29.7                       | 8.4                        | 32.4                        | -6.9                       | -30.1                       | 9.6                        | 34.3                        | -5.5                       | -31.2                       | 11.4                       |
| 5  | 66.2                        | 12.6                       | -68.2                       | -10.7                      | 65.7                        | 13.9                       | -71.1                       | -9.7                       | 63.1                        | 14.9                       |
| 6  | -116.4                      | -16.9                      | 111.9                       | 17.9                       | -120.0                      | -16.3                      | 113.3                       | 16.7                       | -117.5                      | -17.6                      |
| 7  | 146.3                       | 10.9                       | -141.5                      | -12.6                      | 153.6                       | 7.8                        | -137.1                      | -13.7                      | 157.3                       | 6.7                        |
| 8  | -149.4                      | -5.6                       | 193.3                       | -5.4                       | -121.7                      | -9.7                       | 198.1                       | -5.1                       | -120.8                      | -6.6                       |
| 9  | 191.5                       | -14.1                      | -92.7                       | -1.7                       | 228.0                       | -16.0                      | -93.8                       | 2.0                        | 201.3                       | -11.1                      |
| 10 | -119.9                      | 28.7                       | 179.9                       | -0.6                       | -60.1                       | 15.6                       | 188.6                       | -14.1                      | -79.6                       | 16.4                       |
| 11 | 66.2                        | -27.5                      | -89.6                       | 18.8                       | 120.0                       | 0.0                        | -53.1                       | 21.9                       | 108.9                       | -6.6                       |
| 12 | -14.0                       | -7.2                       | 58.4                        | -9.8                       | -60.2                       | 22.0                       | 32.8                        | 11.2                       | -56.5                       | 11.8                       |
| 13 | 58.6                        | 34.2                       | -100.2                      | 0.9                        | -8.1                        | 25.6                       | -124.9                      | -10.3                      | 14.5                        | 25.1                       |
| 14 | -157.5                      | -42.9                      | 37.2                        | 44.4                       | -218.5                      | -42.5                      | 40.0                        | 38.6                       | -188.3                      | -35.6                      |



Tabel 27 Tangentieel en radiaal gerichte krachten in de nokken van de ringvoegen na fase 3 in variant 6. Het nummer in de eerste kolom refereert naar Figuur 3b.

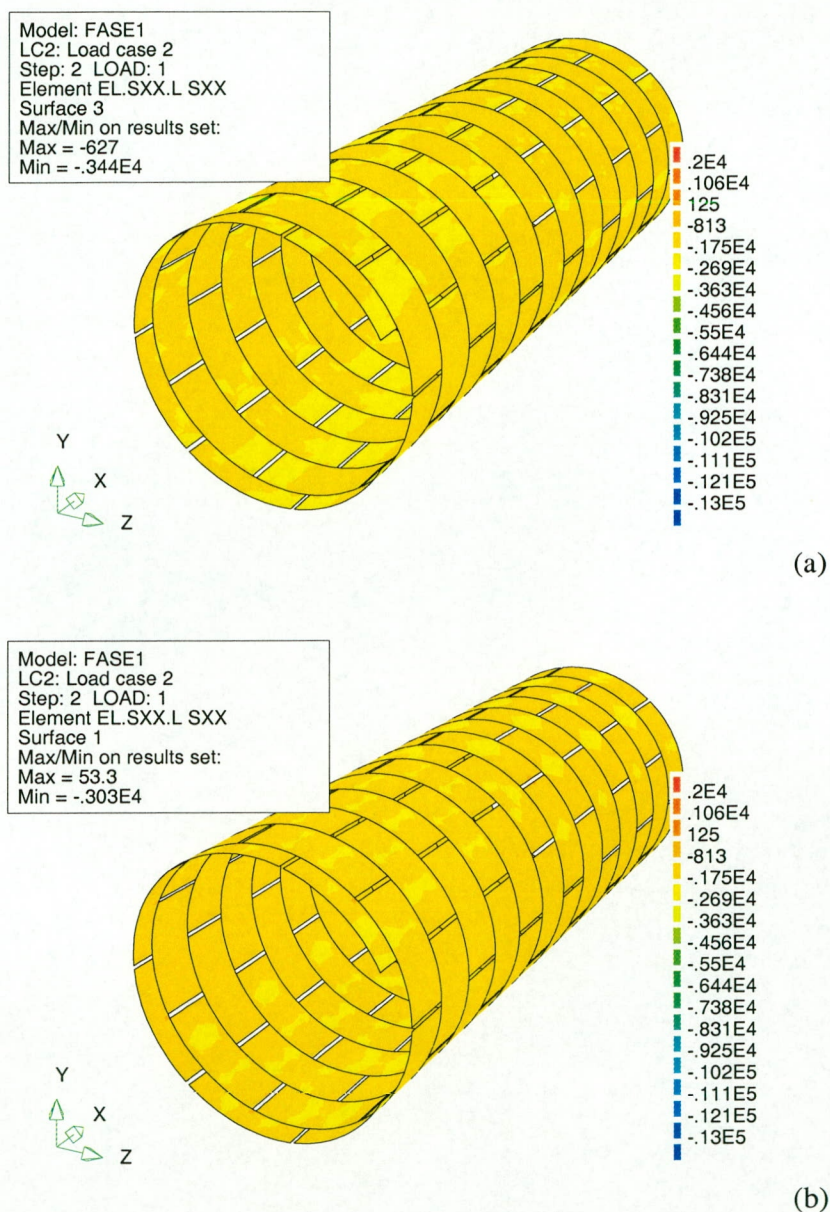
| nr | ring<br>$F_{K,tan}$<br>[kN] | 1-2<br>$F_{K,rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{K,tan}$<br>[kN] | 2-3<br>$F_{K,rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{K,tan}$<br>[kN] | 3-4<br>$F_{K,rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{K,tan}$<br>[kN] | 4-5<br>$F_{K,rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{K,tan}$<br>[kN] | 5-6<br>$F_{K,rad}$<br>[kN] |
|----|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 1  | 343.9                       | 285.2                      | 193.1                       | 312.2                      | 304.8                       | 58.1                       | 120.4                       | 58.5                       | 261.6                       | 17.5                       |
| 2  | 121.9                       | 110.3                      | 351.8                       | 156.2                      | -33.0                       | 52.2                       | 231.5                       | 9.5                        | -44.2                       | 47.4                       |
| 3  | 173.7                       | -26.2                      | 84.4                        | 72.2                       | 40.9                        | -35.7                      | -103.6                      | 20.7                       | 94.0                        | -12.4                      |
| 4  | -74.4                       | 0.0                        | 87.5                        | 2.7                        | -101.9                      | -17.0                      | 36.9                        | -9.8                       | -69.6                       | -4.3                       |
| 5  | 117.5                       | 4.8                        | -141.1                      | -4.9                       | 125.3                       | -9.6                       | -94.3                       | -19.8                      | 105.9                       | -2.3                       |
| 6  | -176.7                      | -28.0                      | -11.2                       | 59.2                       | -78.4                       | -34.1                      | 168.7                       | 1.1                        | -118.5                      | -12.8                      |
| 7  | 35.5                        | 34.9                       | -349.3                      | 129.5                      | 130.7                       | -10.2                      | -165.7                      | 19.7                       | 79.7                        | 17.4                       |
| 8  | -410.0                      | 200.2                      | -222.4                      | 325.4                      | -338.9                      | 71.1                       | -91.7                       | 66.7                       | -275.4                      | 29.0                       |
| 9  | -323.6                      | 213.9                      | -154.6                      | 285.7                      | -271.7                      | 97.8                       | -266.8                      | 24.4                       | -141.4                      | 33.5                       |
| 10 | -71.6                       | 205.1                      | -149.4                      | 74.0                       | -197.5                      | -49.6                      | -213.5                      | -27.6                      | -228.8                      | -5.9                       |
| 11 | -0.9                        | -1.6                       | -42.8                       | -94.5                      | -76.1                       | -129.7                     | -186.6                      | -32.5                      | -13.6                       | -58.3                      |
| 12 | 47.8                        | -144.3                     | 26.5                        | -216.4                     | 31.9                        | -97.5                      | 137.6                       | -52.4                      | -37.4                       | -27.4                      |
| 13 | 15.6                        | 26.9                       | 129.9                       | -29.5                      | 189.9                       | -66.9                      | 163.0                       | -42.9                      | 231.3                       | -8.1                       |
| 14 | 252.8                       | 237.0                      | 142.8                       | 205.4                      | 244.5                       | -23.3                      | 238.6                       | 37.5                       | 133.5                       | -37.9                      |

Tabel 28 Tangentieel en radiaal gerichte krachten in de nokken van de ringvoegen na fase 5 in variant 6. Het nummer in de eerste kolom refereert naar Figuur 3b.

| nr | ring<br>$F_{K,tan}$<br>[kN] | 1-2<br>$F_{K,rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{K,tan}$<br>[kN] | 2-3<br>$F_{K,rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{K,tan}$<br>[kN] | 3-4<br>$F_{K,rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{K,tan}$<br>[kN] | 4-5<br>$F_{K,rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{K,tan}$<br>[kN] | 5-6<br>$F_{K,rad}$<br>[kN] |
|----|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 1  | 323.2                       | 298.8                      | 132.1                       | 339.5                      | 301.6                       | 70.3                       | 149.0                       | 62.5                       | 260.7                       | 17.0                       |
| 2  | 131.3                       | 111.6                      | 341.5                       | 188.1                      | 17.9                        | 70.5                       | 244.0                       | 10.8                       | -24.8                       | 52.0                       |
| 3  | 173.9                       | -24.0                      | 88.4                        | 69.8                       | 51.3                        | -31.8                      | -96.5                       | 21.3                       | 101.0                       | -10.4                      |
| 4  | -76.7                       | -1.0                       | 88.3                        | 2.9                        | -102.6                      | -18.1                      | 36.8                        | -9.9                       | -67.6                       | -4.4                       |
| 5  | 119.5                       | 5.0                        | -143.3                      | -5.9                       | 125.7                       | -9.9                       | -97.1                       | -21.0                      | 105.9                       | -2.3                       |
| 6  | -179.3                      | -27.2                      | -6.6                        | 57.1                       | -86.1                       | -32.5                      | 167.5                       | 0.9                        | -122.7                      | -12.7                      |
| 7  | 35.5                        | 35.5                       | -341.0                      | 142.0                      | 108.7                       | -2.2                       | -174.8                      | 20.8                       | 75.4                        | 17.6                       |
| 8  | -402.6                      | 201.4                      | -155.1                      | 367.4                      | -340.6                      | 80.3                       | -114.8                      | 71.8                       | -282.4                      | 29.5                       |
| 9  | -290.2                      | 207.8                      | -114.6                      | 307.2                      | -277.5                      | 99.5                       | -272.6                      | 29.4                       | -159.9                      | 35.4                       |
| 10 | 6.7                         | 216.6                      | -158.1                      | -45.9                      | -202.6                      | -52.4                      | -222.0                      | -22.0                      | -231.9                      | -4.2                       |
| 11 | -1.0                        | -1.3                       | -9.5                        | -84.9                      | -91.1                       | -121.8                     | -184.8                      | -33.0                      | -43.8                       | -58.3                      |
| 12 | 46.1                        | -145.0                     | -1.9                        | -144.4                     | 11.6                        | -121.8                     | 95.6                        | -64.4                      | -55.1                       | -30.1                      |
| 13 | 13.1                        | 18.9                       | 31.6                        | -120.1                     | 168.2                       | -81.7                      | 164.0                       | -53.1                      | 231.4                       | -11.7                      |
| 14 | 201.3                       | 252.6                      | 168.8                       | 164.3                      | 240.9                       | -21.9                      | 234.3                       | 34.2                       | 149.4                       | -41.1                      |

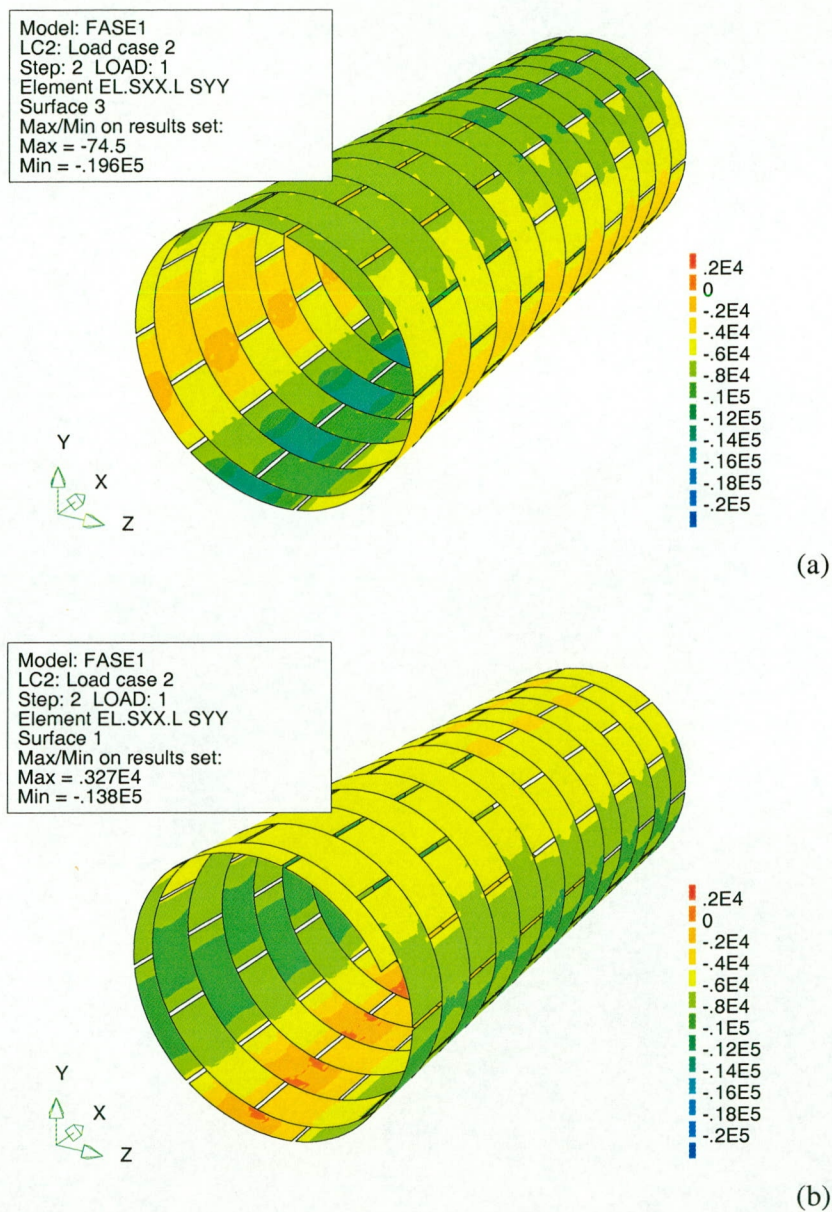


### Bijlage B.3 Spanningsverdelingen en vervormingen fase 1



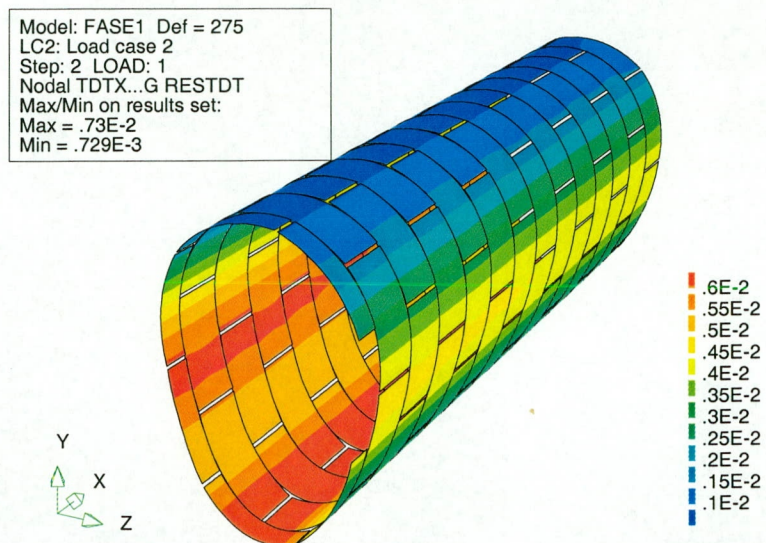
Figuur 31 Axiale normaalspanningen (in  $\text{kN/m}^2$ ) aan de binnen- (a) en de buitenzijde (b) van de hoofdtunnelbuis (variant 6, fase 1).





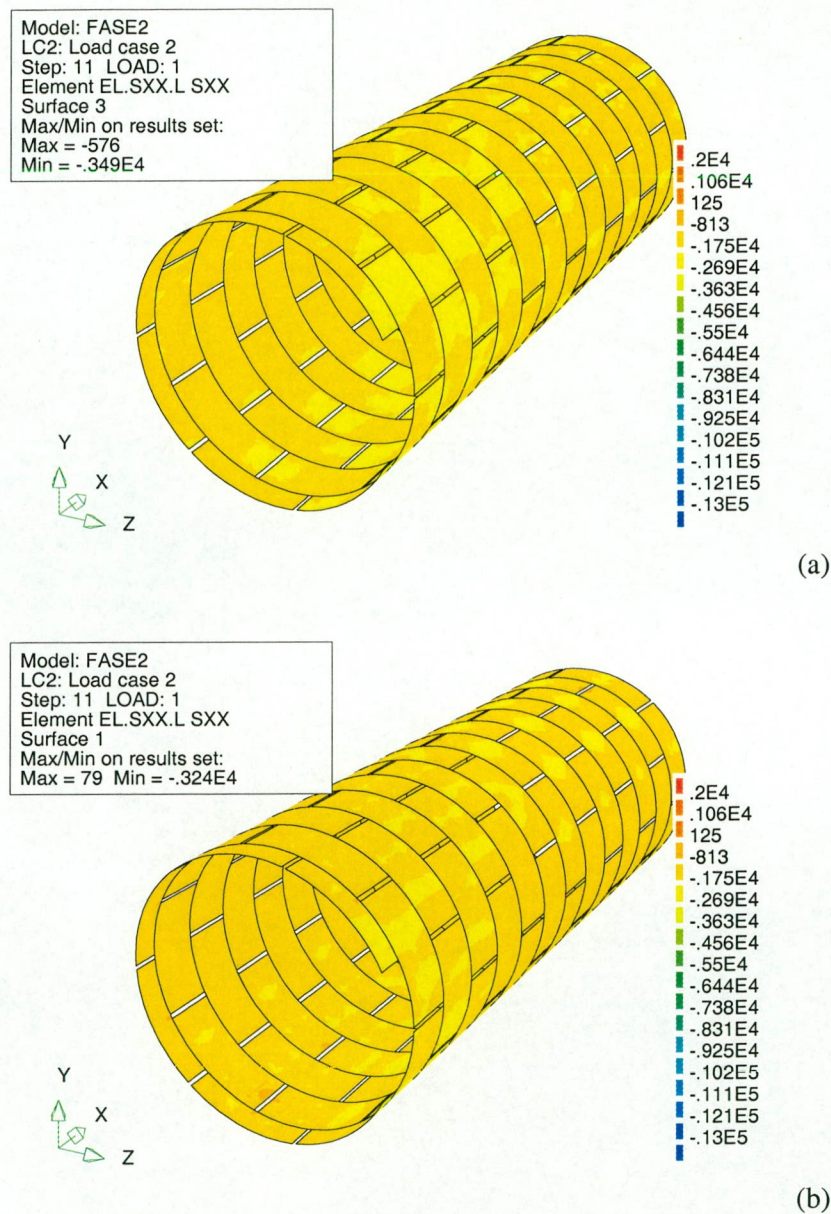
Figuur 32 Tangentiële normaalspanningen (in  $\text{kN/m}^2$ ) aan de binnen- (a) en de buitenzijde (b) van de hoofdtunnelbuis (variant 6, fase 1).





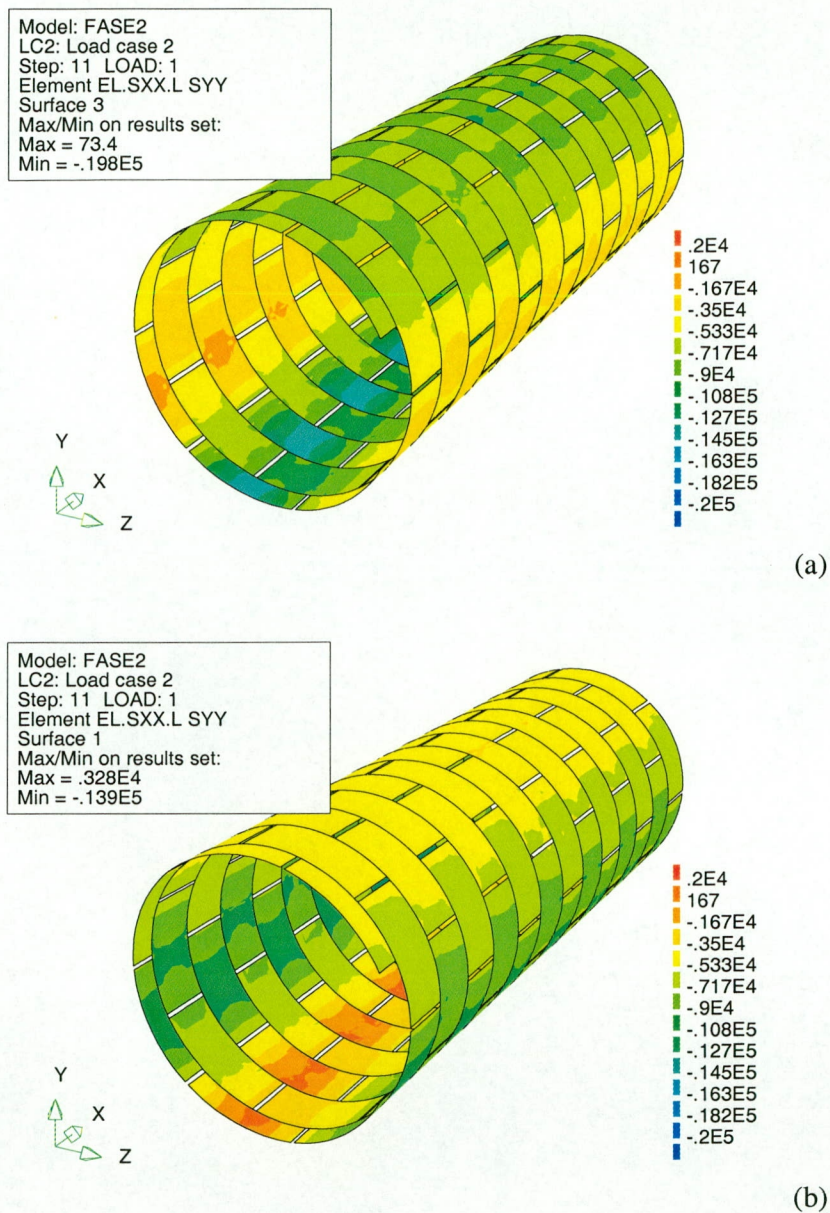
Figuur 33 Totale vervormingen (in m) van de hoofdtunnelbuis (variant 6, fase 1).



**Bijlage B.4 Spanningsverdelingen en vervormingen fase 2**

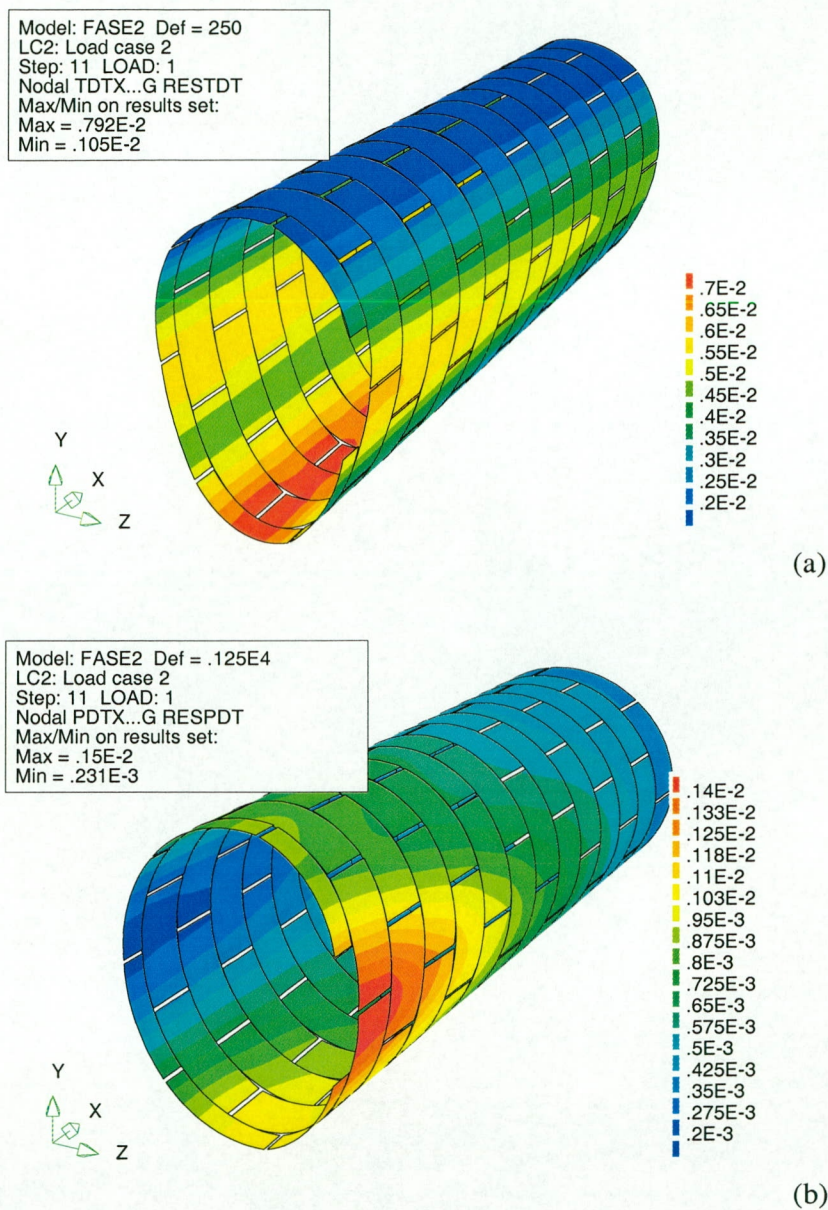
Figuur 34 Axiale normaalspanningen (in  $\text{kN/m}^2$ ) aan de binnen- (a) en de buitenzijde (b) van de hoofdtunnelbuis (variant 6, fase 2).





Figuur 35 Tangentiële normaalspanningen (in  $\text{kN/m}^2$ ) aan de binnen- (a) en de buitenzijde (b) van de hoofdtunnelbuis (variant 6, fase 2).

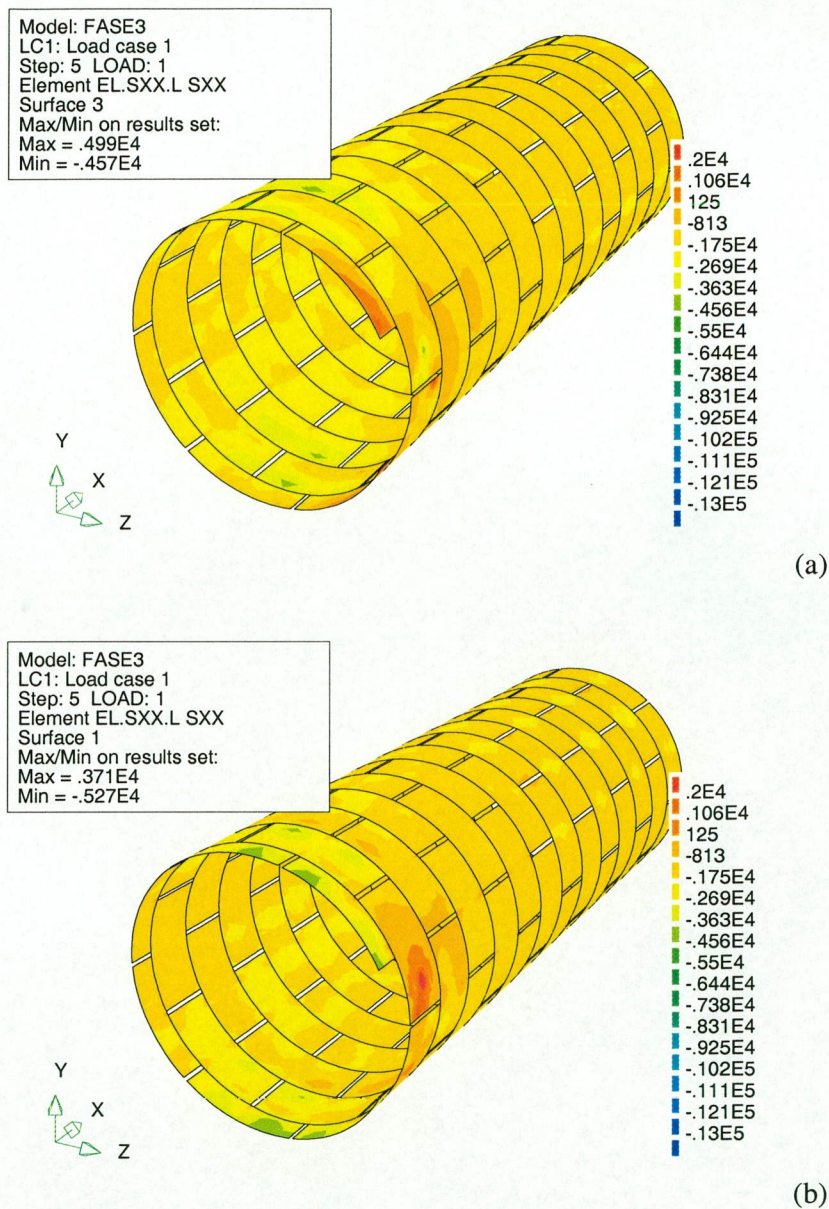




Figuur 36 Totale (a) en incrementele (b) vervormingen (in m) van de hoofdtunnelbuis (variant 6, fase 2).

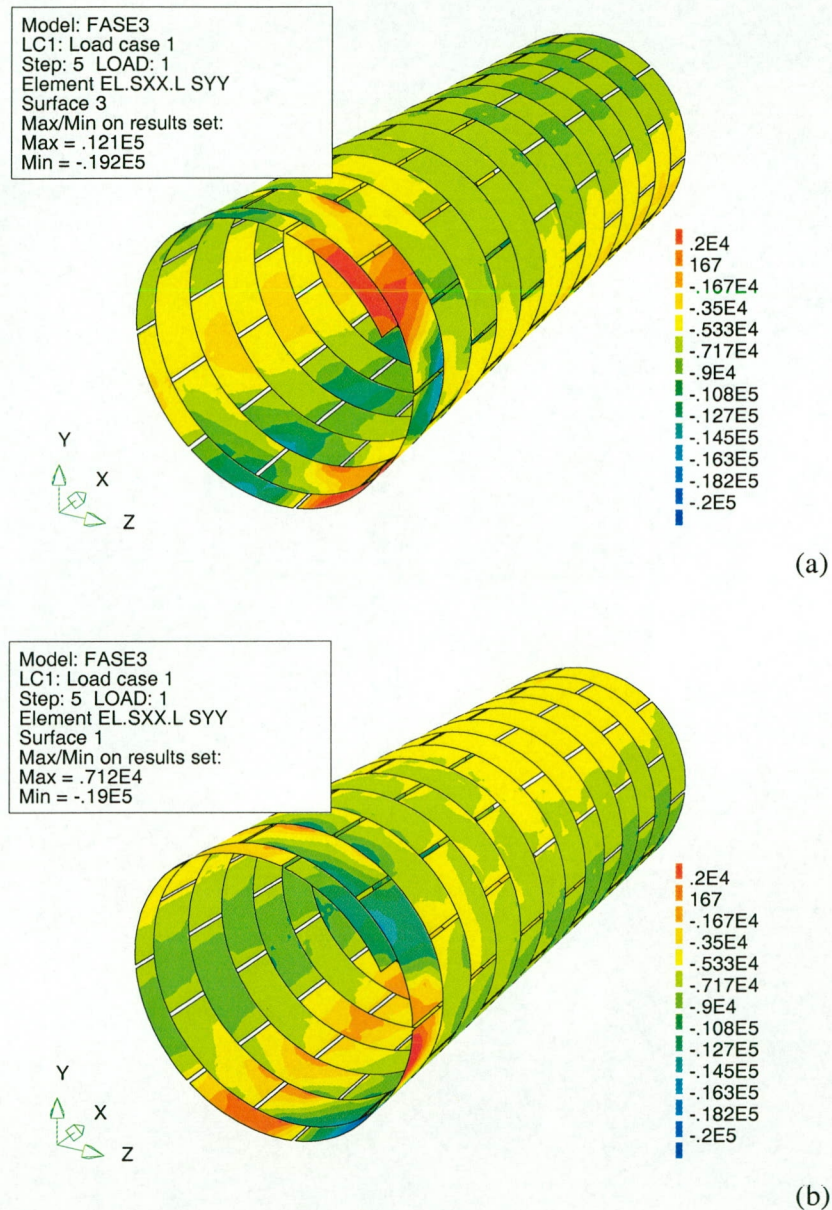


## Bijlage B.5 Spanningsverdelingen en vervormingen fase 3



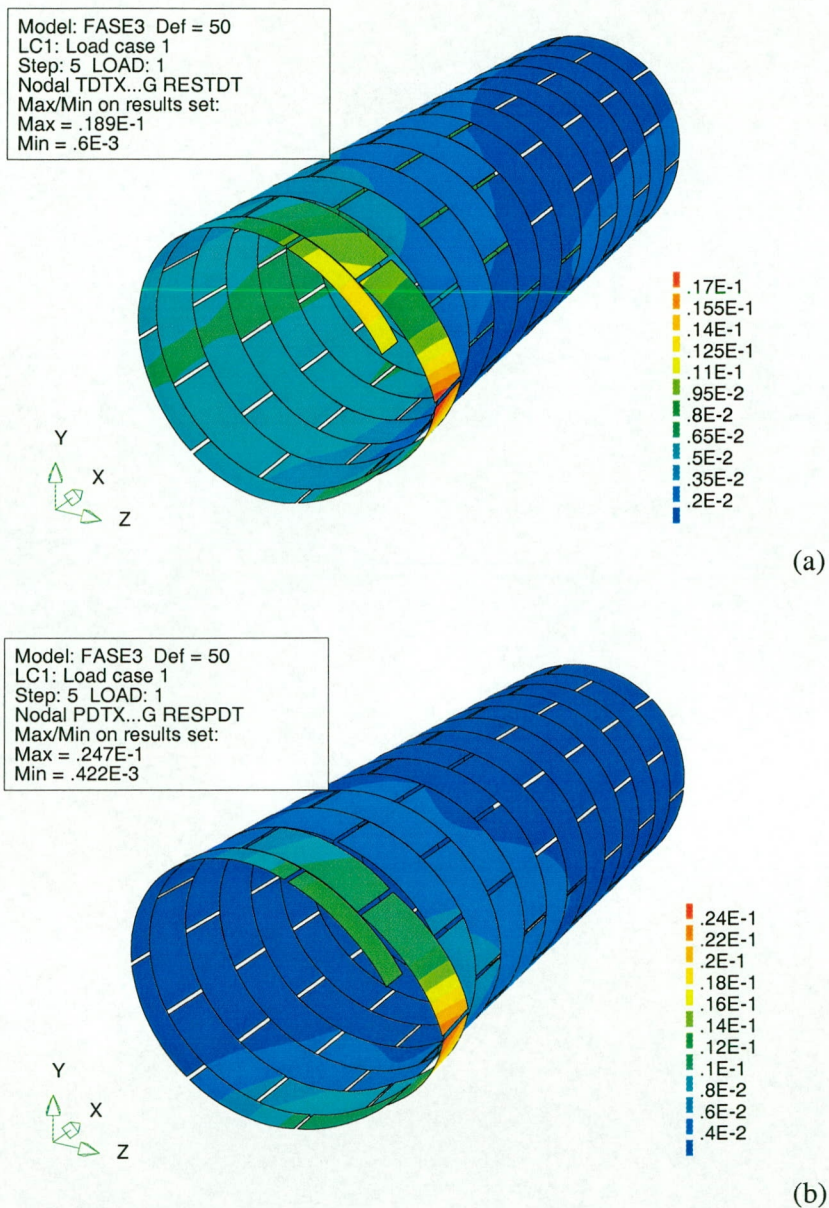
Figuur 37 Axiale normaalspanningen (in  $\text{kN/m}^2$ ) aan de binnen- (a) en de buitenzijde (b) van de hoofdtunnelbuis (variant 6, fase 3).





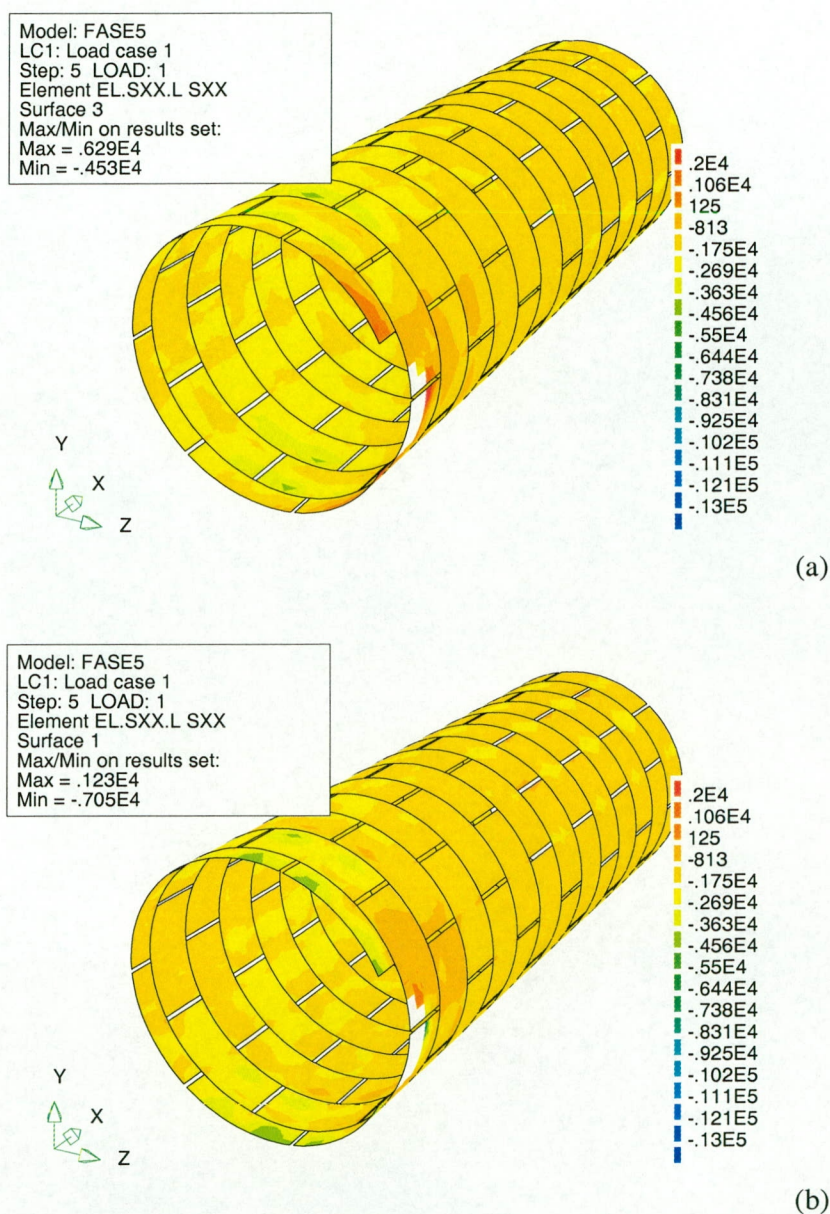
Figuur 38 Tangentiële normaalspanningen (in  $\text{kN/m}^2$ ) aan de binnen- (a) en de buitenzijde (b) van de hoofdtunnelbuis (variant 6, fase 3).





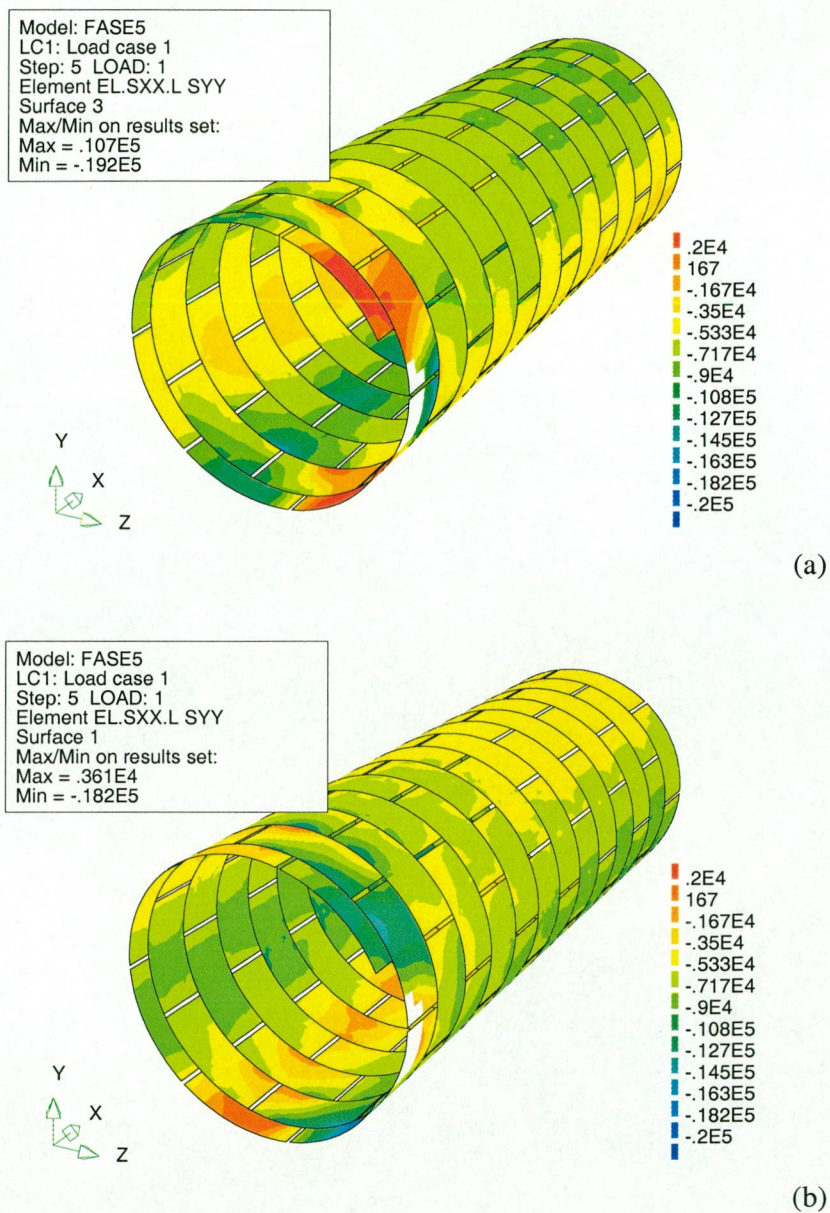
Figuur 39 Totale (a) en incrementele (b) vervormingen (in m) van de hoofdtunnelbuis (variant 6, fase 3).



**Bijlage B.6 Spanningsverdelingen en vervormingen fase 5**

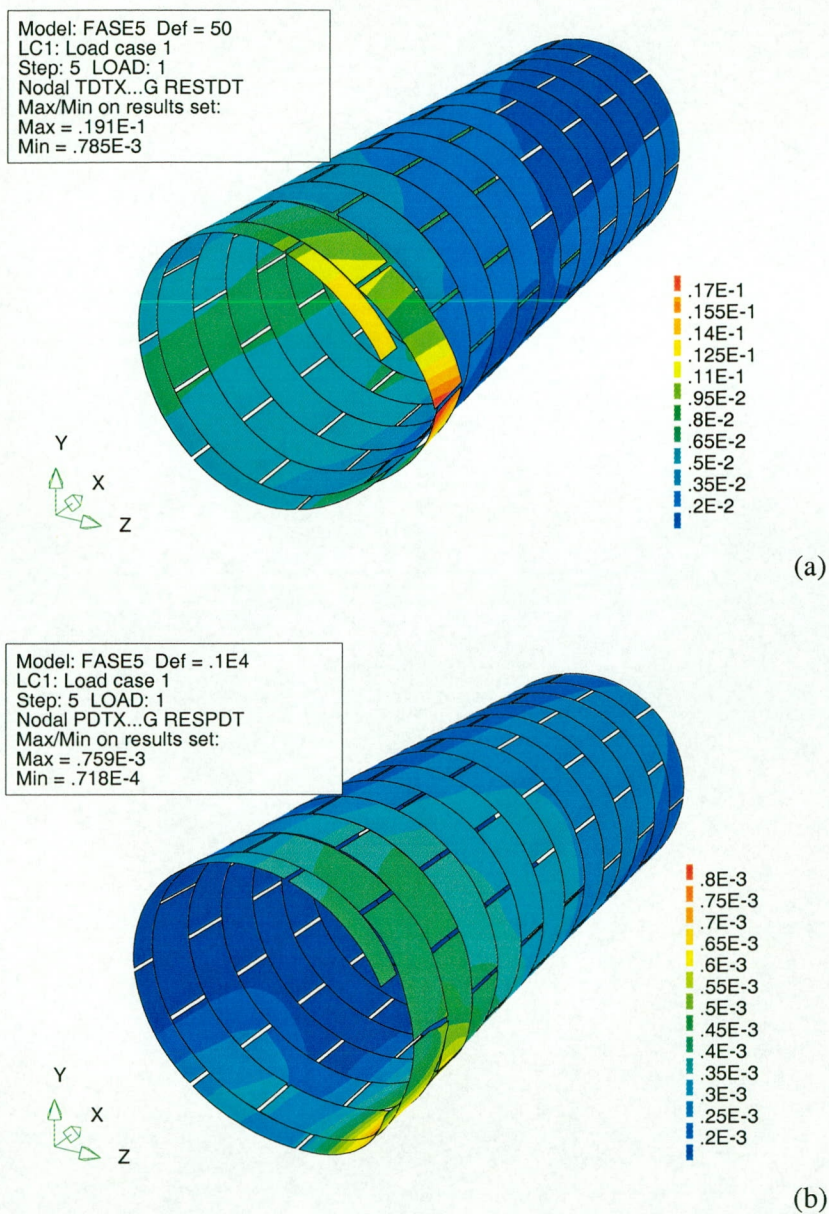
Figuur 40 Axiale normaalspanningen (in  $\text{kN/m}^2$ ) aan de binnen- (a) en de buitenzijde (b) van de hoofdtunnelbuis (variant 6, fase 5).





Figuur 41 Tangentiële normaalspanningen (in  $\text{kN/m}^2$ ) aan de binnen- (a) en de buitenzijde (b) van de hoofdtunnelbuis (variant 6, fase 5).





Figuur 42 Totale (a) en incrementele (b) vervormingen (in m) van de hoofdtunnelbuis (variant 6, fase 5).







## Bijlage C Resultaten variant 5a

### Bijlage C.1 Verplaatsingen en voegopeningen

Tabel 29 Verplaatsingen en ovalisering van beide uiteinden van de hoofdtunnelbuis voor de vijf berekende fasen volgens variant 5a.

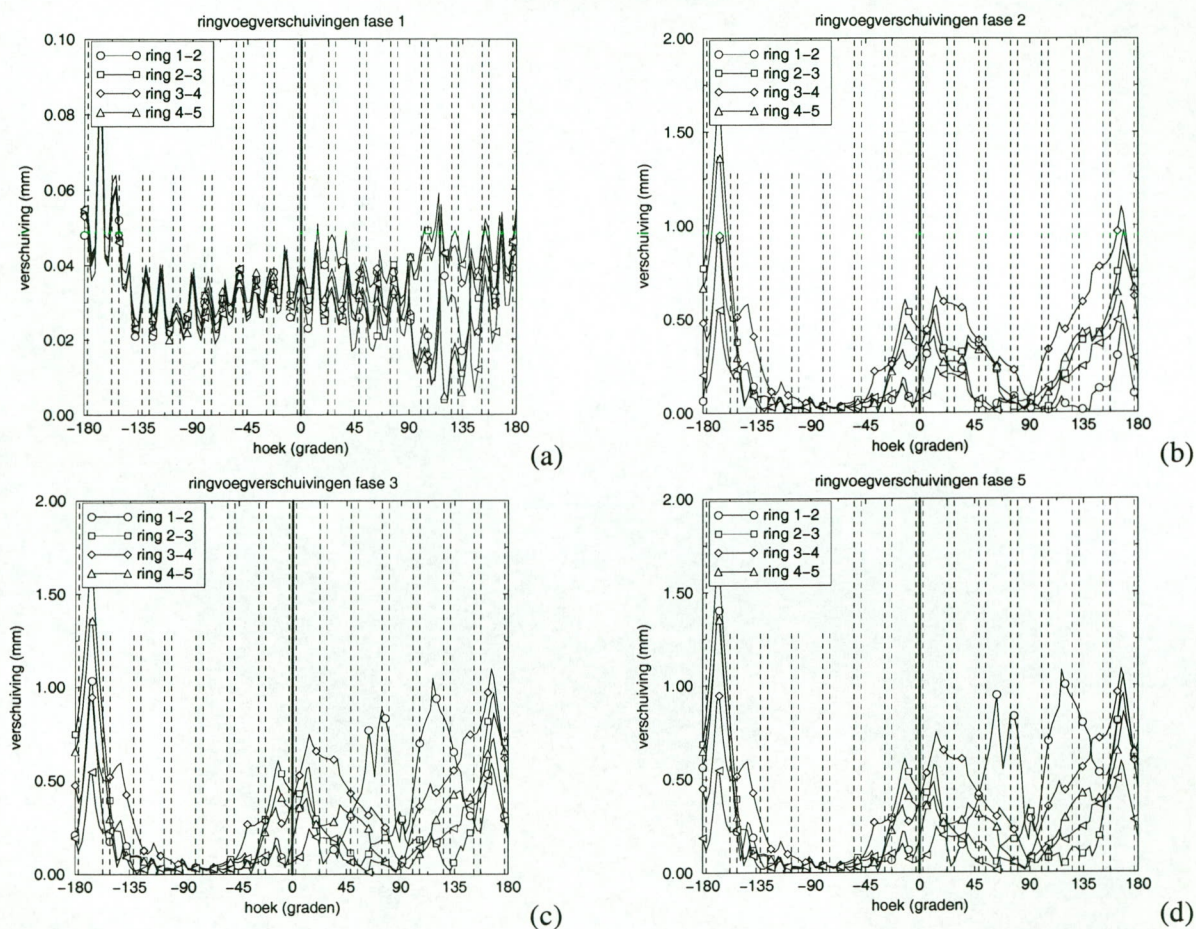
| Ring | Fase | $\delta_{Y1}$<br>[mm] | $\delta_{Z2}$<br>[mm] | $\delta_{Y3}$<br>[mm] | $\delta_{Z4}$<br>[mm] | $\delta_{Y3-Y1}$<br>[mm] | $\delta_{Z4-Z2}$<br>[mm] | $\delta_{Y1+Y3/2}$<br>[mm] | $\delta_{Z2+Z4/2}$<br>[mm] |
|------|------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 1    | 1    | -0.32                 | -4.28                 | -6.17                 | 4.80                  | -5.85                    | 9.08                     | -3.24                      | 0.26                       |
|      | 2    | 2.74                  | -11.26                | -9.24                 | 3.51                  | -11.98                   | 14.77                    | -3.25                      | -3.87                      |
|      | 3    | 1.15                  |                       | -7.49                 | 3.64                  | -8.64                    |                          | -3.17                      |                            |
|      | 5    | 0.48                  |                       | -7.52                 | 4.20                  | -8.00                    |                          | -3.52                      |                            |
| 7    | 1    | -0.32                 | -4.29                 | -6.22                 | 4.76                  | -5.90                    | 9.05                     | -3.27                      | 0.24                       |
|      | 2    | 0.62                  | -7.43                 | -6.91                 | 3.27                  | -7.53                    | 10.70                    | -3.15                      | -2.08                      |
|      | 3    | -0.16                 | -5.78                 | -6.49                 | 3.73                  | -6.33                    | 9.50                     | -3.33                      | -1.03                      |
|      | 5    | -0.68                 | -4.88                 | -6.76                 | 4.36                  | -6.08                    | 9.24                     | -3.72                      | -0.26                      |
| 14   | 1    | -0.35                 | -4.22                 | -6.17                 | 4.64                  | -5.82                    | 8.86                     | -3.26                      | 0.21                       |
|      | 2    | -0.41                 | -5.81                 | -5.88                 | 2.68                  | -5.47                    | 8.49                     | -3.14                      | -1.56                      |
|      | 3    | -0.35                 | -5.23                 | -6.23                 | 3.69                  | -5.88                    | 8.92                     | -3.29                      | -0.77                      |
|      | 5    | -0.71                 | -4.60                 | -6.55                 | 4.27                  | -5.84                    | 8.87                     | -3.63                      | -0.17                      |

Tabel 30 Maximale voegopenstanden en verschuivingen in de hoofdtunnelbuis en de plaats waar deze (ten opzichte van de oorsprong) optreden voor variant 5a.

|        |                                   | Waarde<br>[mm] | X<br>[m] | Y<br>[m] | Z<br>[m] |
|--------|-----------------------------------|----------------|----------|----------|----------|
| Fase 1 | maximale openstand ringvoegen     | 0.25           | 3.00     | -5.12    | -1.25    |
|        | maximale verschuiving ringvoegen  | 0.11           | 11.00    | -4.17    | 3.23     |
|        | maximale openstand langsvoegen    | 0.01           | 10.50    | -5.16    | -1.10    |
|        | maximale verschuiving langsvoegen | 0.01           | 1.00     | 2.36     | 4.72     |
| Fase 2 | maximale openstand ringvoegen     | 0.66           | 5.00     | -5.16    | -1.10    |
|        | maximale verschuiving ringvoegen  | 1.64           | 3.00     | -5.16    | -1.10    |
|        | maximale openstand langsvoegen    | 0.14           | 5.00     | -5.16    | -1.10    |
|        | maximale verschuiving langsvoegen | 0.02           | 9.00     | 4.17     | 3.23     |
| Fase 3 | maximale openstand ringvoegen     | 0.95           | 1.00     | 2.22     | 4.79     |
|        | maximale verschuiving ringvoegen  | 1.65           | 3.00     | -5.16    | -1.10    |
|        | maximale openstand langsvoegen    | 0.58           | 0.50     | 2.36     | 4.72     |
|        | maximale verschuiving langsvoegen | 0.69           | 0.00     | -2.22    | 4.79     |
| Fase 5 | maximale openstand ringvoegen     | 1.00           | 1.00     | 2.22     | 4.79     |
|        | maximale verschuiving ringvoegen  | 1.66           | 3.00     | -5.16    | -1.10    |
|        | maximale openstand langsvoegen    | 0.70           | 0.50     | 2.36     | 4.72     |
|        | maximale verschuiving langsvoegen | 0.69           | 0.00     | -2.22    | 4.79     |

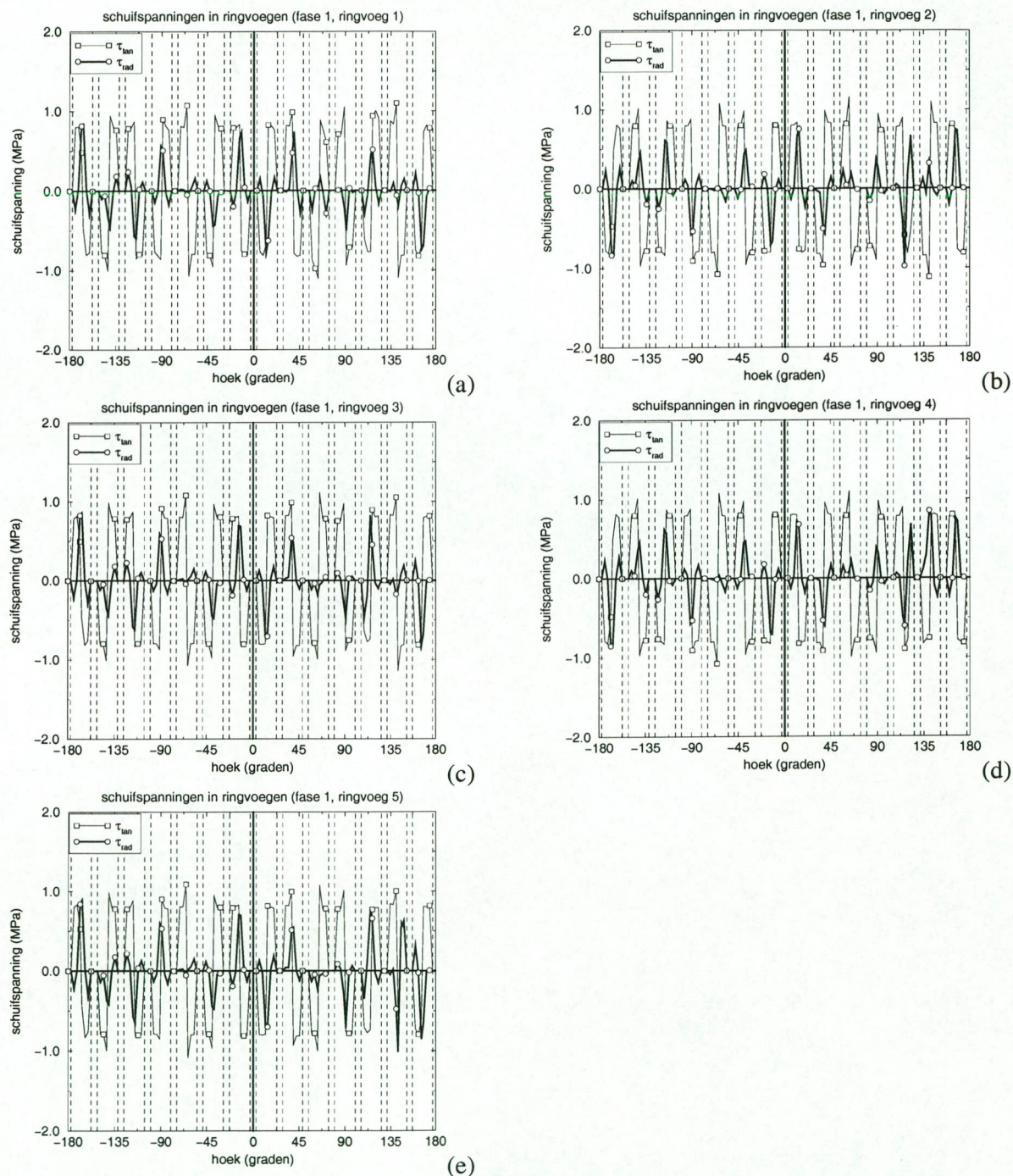


## Bijlage C.2 Verplaatsingen in de ringvoegen



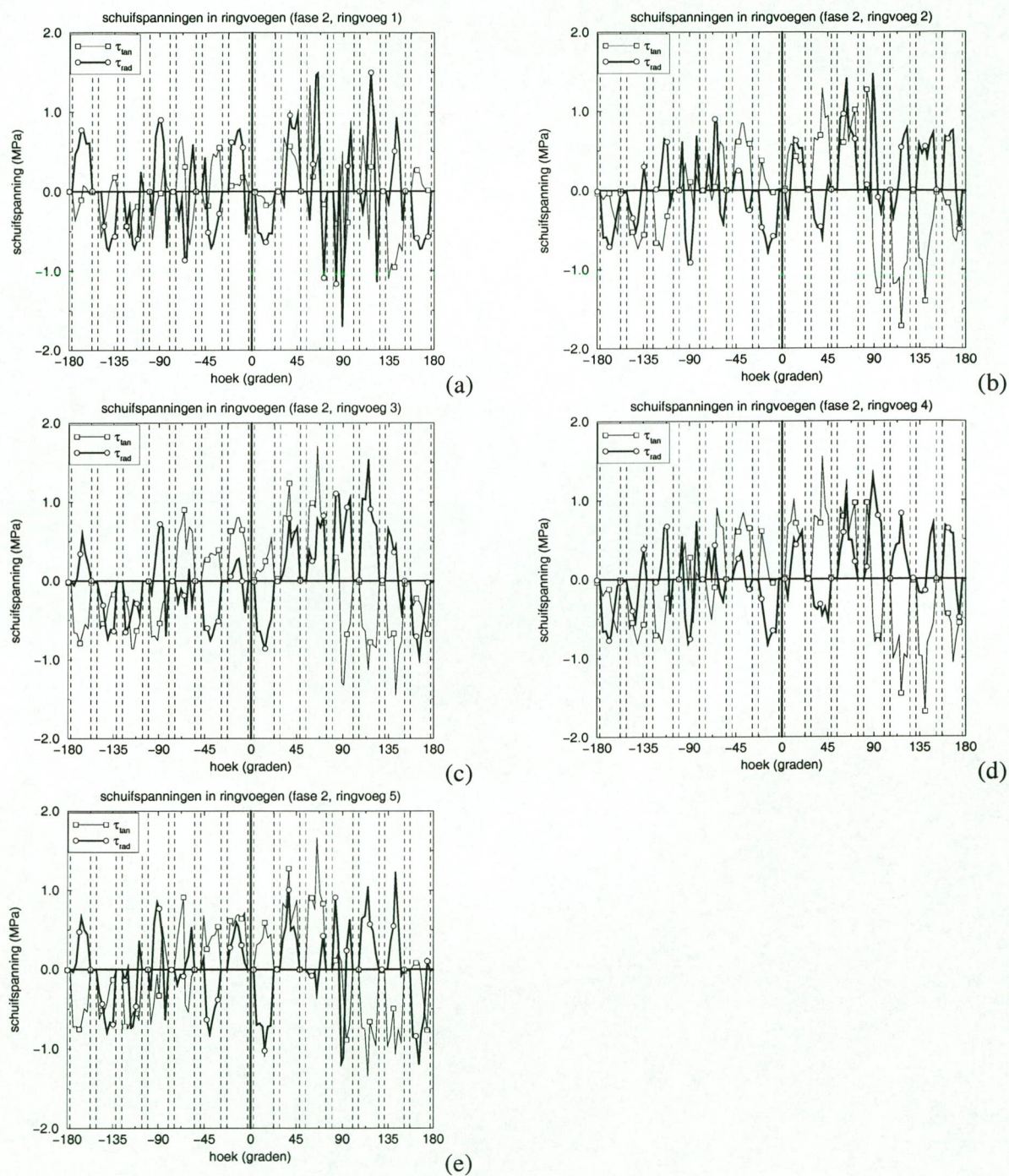
Figuur 43 Totale verplaatsingen in de ringvoegen in fase 1 (a), fase 2 (b), fase 3 (c) en fase 5 (d).



**Bijlage C.3 Koppelkrachten in de ringvoegen**

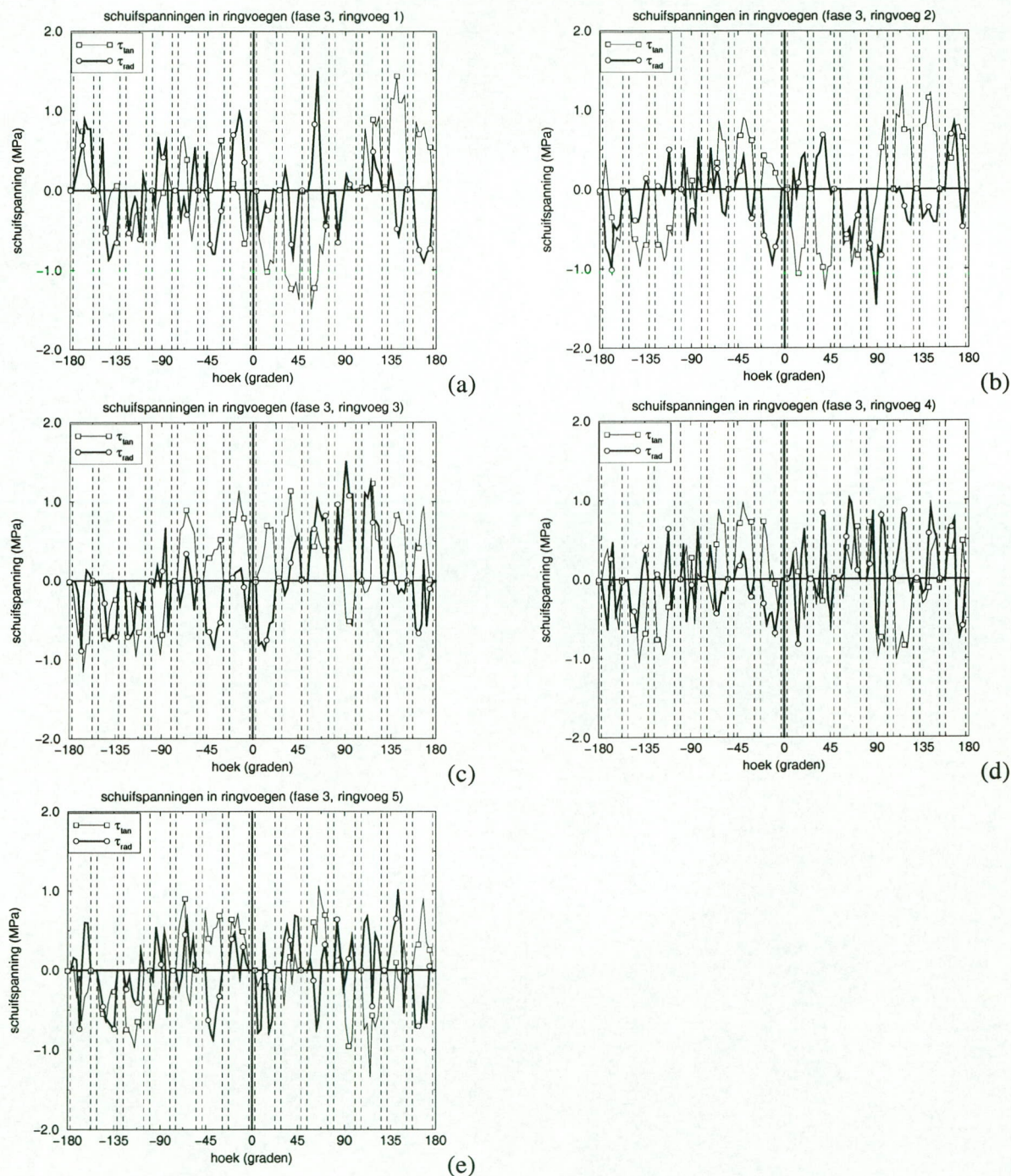
Figuur 44 Schuifspanningsverdelingen in fase 1 in de ringvoeg achter ring 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d) en 5 (e).





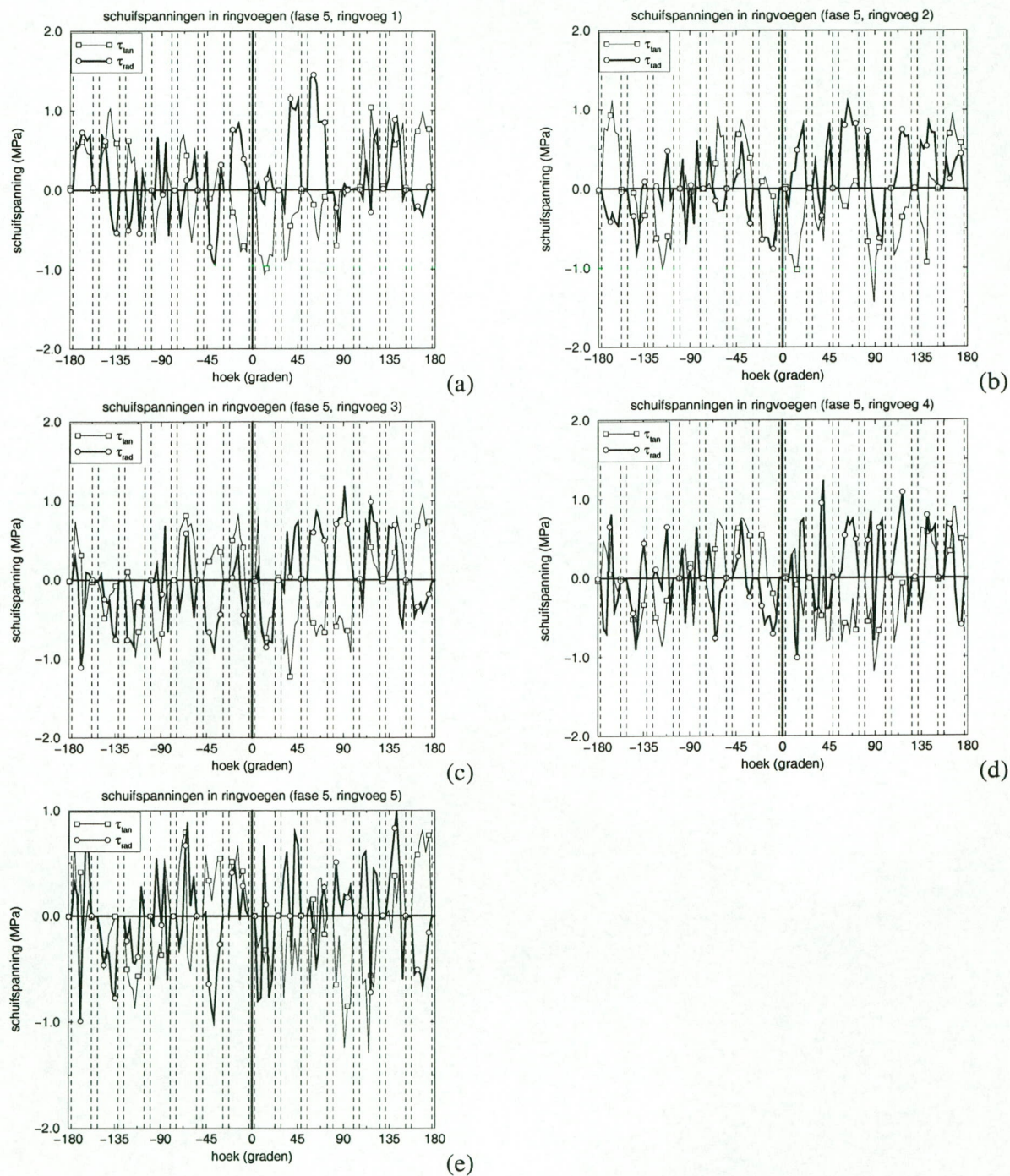
Figuur 45 Schuifspanningsverdelingen in fase 2 in de ringvoeg achter ring 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d) en 5 (e).





Figuur 46 Schuifspanningsverdelingen in fase 3 in de ringvoeg achter ring 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d) en 5 (e).





Figuur 47 Schuifspanningsverdelingen in fase 5 in de ringvoeg achter ring 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d) en 5 (e).



Tabel 31 Overzicht van de maximale koppelkrachten in de ringvoegen.

| fase | $F_{K;tan,max}$<br>[kN] | $F_{K;rad,max}$<br>[kN] | $F_{K,max}$<br>[kN] |
|------|-------------------------|-------------------------|---------------------|
| 1    | 96                      | 34                      | 96                  |
| 2    | 123                     | 111                     | 130                 |
| 3    | 128                     | 114                     | 149                 |
| 5    | 96                      | 142                     | 144                 |

Tabel 32 Tangentieel gerichte krachten in de vlakke voegdelen van de ringvoegen na fase 1 in variant 5a.

| nr | ring<br>$F_{KA,tan}$<br>[kN] | 1-2<br>$F_{KB,tan}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA,tan}$<br>[kN] | 2-3<br>$F_{KB,tan}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA,tan}$<br>[kN] | 3-4<br>$F_{KB,tan}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA,tan}$<br>[kN] | 4-5<br>$F_{KB,tan}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA,tan}$<br>[kN] | 5-6<br>$F_{KB,tan}$<br>[kN] |
|----|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 1  | 75.7                         | -74.7                       | -75.3                        | 75.0                        | 76.1                         | -74.7                       | -76.1                        | 75.8                        | 77.9                         | -75.4                       |
| 2  | -82.2                        | 81.2                        | 82.5                         | -81.4                       | -82.4                        | 81.8                        | 82.6                         | -81.2                       | -81.8                        | 81.1                        |
| 3  | 79.7                         | -80.5                       | -78.9                        | 80.6                        | 79.6                         | -80.0                       | -78.7                        | 80.7                        | 80.3                         | -79.9                       |
| 4  | -80.4                        | 80.7                        | 80.7                         | -80.7                       | -80.4                        | 80.8                        | 80.4                         | -80.5                       | -79.5                        | 80.1                        |
| 5  | 83.8                         | -83.2                       | -83.7                        | 83.1                        | 83.7                         | -83.1                       | -83.8                        | 83.2                        | 84.4                         | -83.7                       |
| 6  | -81.9                        | 82.0                        | 82.2                         | -81.9                       | -82.1                        | 82.0                        | 81.9                         | -81.8                       | -81.3                        | 81.4                        |
| 7  | 79.8                         | -79.1                       | -79.2                        | 80.2                        | 79.6                         | -80.1                       | -80.0                        | 80.4                        | 80.6                         | -81.1                       |
| 8  | -77.5                        | 79.9                        | 80.5                         | -78.9                       | -80.1                        | 80.6                        | 80.4                         | -80.5                       | -79.7                        | 79.9                        |
| 9  | 83.5                         | -81.4                       | -83.8                        | 85.2                        | 84.4                         | -83.7                       | -82.8                        | 83.1                        | 84.4                         | -82.9                       |
| 10 | -96.2                        | 73.0                        | 85.9                         | -79.6                       | -82.0                        | 82.9                        | 83.4                         | -80.9                       | -81.3                        | 82.0                        |
| 11 | 75.4                         | -74.4                       | -75.2                        | 76.6                        | 78.4                         | -77.3                       | -78.6                        | 79.8                        | 81.0                         | -77.8                       |
| 12 | -72.5                        | 96.3                        | 79.2                         | -69.6                       | -72.9                        | 81.7                        | 79.8                         | -44.2                       | -74.6                        | 78.4                        |
| 13 | 88.0                         | -85.5                       | -88.2                        | 86.3                        | 85.6                         | -86.5                       | -78.5                        | 80.0                        | 85.4                         | 42.7                        |
| 14 | -78.3                        | 79.5                        | 79.6                         | -80.2                       | -78.7                        | 80.6                        | 78.1                         | -80.4                       | -74.3                        | 80.4                        |

Tabel 33 Radiaal gerichte krachten in de vlakke voegdelen van de ringvoegen na fase 1 in variant 5a.

| nr | ring<br>$F_{KA,rad}$<br>[kN] | 1-2<br>$F_{KB,rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA,rad}$<br>[kN] | 2-3<br>$F_{KB,rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA,rad}$<br>[kN] | 3-4<br>$F_{KB,rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA,rad}$<br>[kN] | 4-5<br>$F_{KB,rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA,rad}$<br>[kN] | 5-6<br>$F_{KB,rad}$<br>[kN] |
|----|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 1  | 6.9                          | 4.6                         | -5.8                         | -4.3                        | 6.1                          | 4.3                         | -6.3                         | -4.4                        | 6.0                          | 4.5                         |
| 2  | -11.1                        | -2.1                        | 10.3                         | 1.3                         | -10.8                        | -1.0                        | 10.1                         | 1.4                         | -12.1                        | -0.6                        |
| 3  | 1.8                          | -4.2                        | -2.2                         | 4.4                         | 1.7                          | -4.0                        | -2.4                         | 4.4                         | 1.6                          | -3.5                        |
| 4  | 3.1                          | 1.1                         | -2.4                         | -0.4                        | 2.7                          | 0.6                         | -2.3                         | -0.4                        | 2.9                          | 0.8                         |
| 5  | 0.7                          | 6.9                         | -1.2                         | -7.5                        | 1.4                          | 7.5                         | -1.4                         | -7.6                        | 1.4                          | 7.7                         |
| 6  | -2.9                         | -9.6                        | 2.2                          | 10.0                        | -2.4                         | -9.7                        | 2.2                          | 9.6                         | -2.4                         | -9.6                        |
| 7  | 3.9                          | 9.1                         | -4.6                         | -6.6                        | 3.9                          | 7.0                         | -4.1                         | -7.5                        | 4.1                          | 7.2                         |
| 8  | -10.9                        | -5.4                        | 6.4                          | 3.4                         | -7.2                         | -4.6                        | 7.8                          | 3.7                         | -7.3                         | -3.7                        |
| 9  | 7.7                          | 4.5                         | -10.9                        | -3.3                        | 11.0                         | 3.5                         | -9.7                         | -4.2                        | 10.8                         | 4.3                         |
| 10 | -4.7                         | -8.3                        | 10.2                         | 3.0                         | -7.9                         | -0.4                        | 7.7                          | 3.6                         | -9.6                         | -4.1                        |
| 11 | -1.5                         | -6.3                        | -1.6                         | 0.0                         | 0.0                          | -3.8                        | -1.8                         | 0.2                         | -0.3                         | -9.5                        |
| 12 | -4.2                         | 5.3                         | -3.0                         | 15.1                        | -12.5                        | 1.8                         | -3.6                         | 23.3                        | 7.3                          | 3.5                         |
| 13 | 4.0                          | 4.5                         | 4.6                          | -3.7                        | -2.8                         | 7.9                         | 32.9                         | -0.2                        | -6.9                         | 34.3                        |
| 14 | -6.4                         | -13.3                       | 4.7                          | 12.4                        | -5.2                         | -11.2                       | 4.3                          | 12.4                        | -4.2                         | -10.2                       |



Tabel 34 Tangentieel gerichte krachten in de vlakke voegdelen van de ringvoegen na fase 2 in variant 5a.

| nr | ring<br>$F_{KA;tan}$<br>[kN] | 1-2<br>$F_{KB;tan}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA;tan}$<br>[kN] | 2-3<br>$F_{KB;tan}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA;tan}$<br>[kN] | 3-4<br>$F_{KB;tan}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA;tan}$<br>[kN] | 4-5<br>$F_{KB;tan}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA;tan}$<br>[kN] | 5-6<br>$F_{KB;tan}$<br>[kN] |
|----|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 1  | -24.9                        | 3.2                         | -6.9                         | -38.0                       | -67.8                        | -58.4                       | -15.3                        | -53.6                       | -72.0                        | -53.0                       |
| 2  | -42.8                        | 11.9                        | -55.3                        | -62.4                       | -55.2                        | -20.3                       | -59.3                        | -65.6                       | -54.1                        | -20.7                       |
| 3  | -49.1                        | -30.4                       | -67.2                        | -28.5                       | -40.7                        | -63.9                       | -71.2                        | -23.1                       | -71.3                        | -57.4                       |
| 4  | -28.8                        | 23.5                        | 21.0                         | -5.8                        | -70.6                        | -29.1                       | 31.6                         | -25.0                       | -44.3                        | 34.0                        |
| 5  | 61.6                         | -54.1                       | -4.1                         | 53.7                        | 69.5                         | 62.9                        | -38.7                        | 70.5                        | 61.9                         | -39.3                       |
| 6  | -11.5                        | 47.2                        | 65.3                         | 63.3                        | 28.5                         | 34.5                        | 63.8                         | 68.0                        | 39.5                         | 46.6                        |
| 7  | 8.3                          | 15.5                        | 20.0                         | -1.9                        | 64.6                         | 62.6                        | 39.5                         | -3.6                        | 58.5                         | 67.1                        |
| 8  | -6.0                         | -16.8                       | 54.6                         | 35.5                        | 13.0                         | 39.2                        | 75.3                         | 58.1                        | 34.0                         | 43.8                        |
| 9  | 58.0                         | 40.5                        | 64.9                         | 97.7                        | 88.0                         | 63.3                        | 77.4                         | 96.2                        | 86.5                         | 74.2                        |
| 10 | 53.3                         | -3.6                        | 67.9                         | 87.3                        | 96.6                         | 96.0                        | 89.3                         | 80.7                        | 89.3                         | 102.2                       |
| 11 | -20.2                        | -10.5                       | 84.4                         | -123.4                      | 5.4                          | -73.0                       | 49.3                         | -75.3                       | 17.2                         | -75.2                       |
| 12 | 22.6                         | 83.3                        | -117.0                       | -106.2                      | -69.0                        | -81.6                       | -90.3                        | -103.8                      | -82.8                        | -83.4                       |
| 13 | -97.0                        | -71.3                       | -94.7                        | -54.7                       | -70.7                        | -93.2                       | -107.4                       | -67.6                       | -83.0                        | -84.6                       |
| 14 | 26.3                         | 3.1                         | -17.4                        | -56.9                       | -25.7                        | -54.0                       | -46.3                        | -73.7                       | 7.2                          | -49.1                       |

Tabel 35 Radiaal gerichte krachten in de vlakke voegdelen van de ringvoegen na fase 2 in variant 5a.

| nr | ring<br>$F_{KA;rad}$<br>[kN] | 1-2<br>$F_{KB;rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA;rad}$<br>[kN] | 2-3<br>$F_{KB;rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA;rad}$<br>[kN] | 3-4<br>$F_{KB;rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA;rad}$<br>[kN] | 4-5<br>$F_{KB;rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA;rad}$<br>[kN] | 5-6<br>$F_{KB;rad}$<br>[kN] |
|----|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 1  | 56.1                         | 62.9                        | -60.6                        | -44.1                       | 5.7                          | 34.0                        | -66.9                        | -34.6                       | 10.5                         | 50.3                        |
| 2  | -34.8                        | -60.2                       | -34.1                        | -0.1                        | -31.7                        | -63.7                       | -37.1                        | 13.8                        | -42.8                        | -68.9                       |
| 3  | -32.9                        | -37.2                       | 8.7                          | 39.3                        | -57.1                        | -32.7                       | 2.3                          | 35.0                        | -13.2                        | -26.2                       |
| 4  | 44.0                         | 28.0                        | -31.1                        | -14.8                       | 14.5                         | 28.9                        | -23.9                        | -5.8                        | 37.9                         | 16.9                        |
| 5  | -26.4                        | 15.8                        | 25.5                         | -16.5                       | -16.2                        | -5.9                        | 20.0                         | -16.3                       | -10.3                        | 26.0                        |
| 6  | -27.2                        | -44.1                       | 24.3                         | -22.2                       | -62.3                        | -55.6                       | 24.5                         | -6.3                        | -43.4                        | -47.9                       |
| 7  | 62.5                         | 27.4                        | -57.0                        | -59.5                       | 13.5                         | -7.6                        | -49.8                        | -67.1                       | 39.3                         | 28.0                        |
| 8  | -54.5                        | -54.2                       | 6.5                          | 54.4                        | -65.9                        | -61.2                       | 9.7                          | 52.9                        | -68.9                        | -75.8                       |
| 9  | 38.9                         | 84.0                        | -43.6                        | -11.4                       | 32.1                         | 60.3                        | -36.2                        | -41.3                       | 56.2                         | 48.7                        |
| 10 | 30.2                         | -17.3                       | 101.5                        | 72.0                        | 29.3                         | 73.9                        | 59.6                         | 41.5                        | -6.3                         | 11.7                        |
| 11 | -38.1                        | 30.8                        | 13.0                         | 2.4                         | 99.5                         | 92.4                        | 73.4                         | 81.7                        | 28.7                         | 15.9                        |
| 12 | 10.3                         | 36.1                        | -15.0                        | 70.2                        | 110.6                        | 75.7                        | 39.5                         | 40.3                        | 71.8                         | 41.5                        |
| 13 | 12.5                         | 35.4                        | 51.7                         | 63.3                        | 56.1                         | -11.2                       | -17.5                        | 53.8                        | 28.3                         | 49.4                        |
| 14 | -60.9                        | -60.7                       | 67.4                         | -4.7                        | -73.8                        | -34.6                       | 63.9                         | -13.4                       | -89.3                        | -43.6                       |



Tabel 36 Tangentieel gerichte krachten in de vlakke voegdelen van de ringvoegen na fase 3 in variant 5a.

| nr | ring<br>$F_{KA;tan}$<br>[kN] | 1-2<br>$F_{KB;tan}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA;tan}$<br>[kN] | 2-3<br>$F_{KB;tan}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA;tan}$<br>[kN] | 3-4<br>$F_{KB;tan}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA;tan}$<br>[kN] | 4-5<br>$F_{KB;tan}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA;tan}$<br>[kN] | 5-6<br>$F_{KB;tan}$<br>[kN] |
|----|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 1  | 76.1                         | 20.1                        | 3.1                          | -64.1                       | -57.0                        | -84.7                       | 28.3                         | -39.0                       | -18.2                        | -35.7                       |
| 2  | -35.6                        | 2.8                         | -64.8                        | -74.6                       | -71.1                        | -27.3                       | -65.5                        | -77.9                       | -55.1                        | -28.2                       |
| 3  | -52.2                        | -36.6                       | -71.7                        | -56.1                       | -26.1                        | -68.1                       | -77.4                        | -38.4                       | -77.5                        | -71.2                       |
| 4  | -29.9                        | 23.7                        | 11.1                         | -8.3                        | -72.5                        | -24.4                       | 27.0                         | -26.1                       | -51.1                        | 34.6                        |
| 5  | 61.1                         | -49.4                       | 6.9                          | 65.2                        | 70.5                         | 69.3                        | -20.7                        | 72.9                        | 70.3                         | -25.9                       |
| 6  | -0.9                         | 48.8                        | 71.3                         | 68.8                        | 29.8                         | 43.2                        | 74.7                         | 74.6                        | 48.8                         | 57.9                        |
| 7  | 1.0                          | -62.0                       | 35.6                         | 18.1                        | 82.7                         | 75.9                        | 51.0                         | -12.3                       | 58.8                         | 44.0                        |
| 8  | -76.7                        | -90.4                       | -64.6                        | -79.0                       | 22.4                         | 67.1                        | 26.6                         | -19.3                       | -14.3                        | -30.9                       |
| 9  | -112.4                       | -122.9                      | -83.5                        | -101.4                      | 86.4                         | 58.5                        | -6.9                         | -14.4                       | -3.9                         | 8.1                         |
| 10 | -128.4                       | -67.3                       | -63.9                        | -80.1                       | 45.7                         | 40.5                        | 19.3                         | 55.1                        | 44.3                         | 82.4                        |
| 11 | -34.9                        | 2.3                         | -40.3                        | 57.3                        | 25.4                         | -52.5                       | 34.9                         | -80.6                       | 16.5                         | -89.0                       |
| 12 | 46.5                         | 84.7                        | 97.3                         | 74.4                        | -12.2                        | 61.5                        | -87.6                        | -76.3                       | -78.4                        | -65.2                       |
| 13 | 118.6                        | 112.5                       | 86.9                         | 79.8                        | 63.8                         | 72.5                        | -25.6                        | 45.3                        | -37.0                        | 0.3                         |
| 14 | 75.2                         | 60.2                        | 44.6                         | 76.5                        | 49.0                         | 36.3                        | 39.0                         | -0.9                        | 37.2                         | 40.0                        |

Tabel 37 Radiaal gerichte krachten in de vlakke voegdelen van de ringvoegen na fase 3 in variant 5a.

| nr | ring<br>$F_{KA;rad}$<br>[kN] | 1-2<br>$F_{KB;rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA;rad}$<br>[kN] | 2-3<br>$F_{KB;rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA;rad}$<br>[kN] | 3-4<br>$F_{KB;rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA;rad}$<br>[kN] | 4-5<br>$F_{KB;rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA;rad}$<br>[kN] | 5-6<br>$F_{KB;rad}$<br>[kN] |
|----|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 1  | 36.4                         | 78.7                        | -81.6                        | -47.5                       | -22.0                        | 6.4                         | -41.6                        | -24.6                       | 1.7                          | 50.9                        |
| 2  | -23.7                        | -69.2                       | -39.3                        | -4.5                        | -27.9                        | -69.7                       | -43.4                        | 14.4                        | -40.8                        | -70.0                       |
| 3  | -29.8                        | -31.5                       | 2.8                          | 29.2                        | -68.8                        | -30.3                       | -0.3                         | 27.4                        | -15.4                        | -21.7                       |
| 4  | 39.3                         | 23.2                        | -26.4                        | -8.6                        | 7.8                          | 21.4                        | -19.6                        | 0.0                         | 31.8                         | 10.5                        |
| 5  | -20.7                        | 21.8                        | 19.4                         | -23.3                       | -10.3                        | -3.9                        | 10.0                         | -20.0                       | -5.5                         | 27.1                        |
| 6  | -36.1                        | -48.0                       | 23.8                         | -21.4                       | -66.6                        | -61.4                       | 19.0                         | -9.1                        | -46.5                        | -51.2                       |
| 7  | 76.1                         | 18.1                        | -64.8                        | -71.7                       | 8.9                          | -17.2                       | -47.5                        | -56.5                       | 40.4                         | 18.4                        |
| 8  | -37.5                        | -17.9                       | 0.5                          | 36.5                        | -79.8                        | -56.2                       | 9.0                          | 22.2                        | -58.1                        | -62.2                       |
| 9  | -0.4                         | -36.1                       | 48.1                         | 16.2                        | -6.6                         | 50.0                        | -5.2                         | -15.1                       | 48.7                         | 60.0                        |
| 10 | 74.8                         | -10.9                       | -54.8                        | -42.5                       | 69.5                         | 80.2                        | 46.7                         | 51.5                        | -14.2                        | 8.4                         |
| 11 | -32.5                        | 7.0                         | -94.7                        | -70.7                       | 71.4                         | 114.3                       | 46.1                         | 55.1                        | 26.7                         | 18.3                        |
| 12 | 5.1                          | 28.9                        | -1.6                         | -38.7                       | 109.1                        | 73.4                        | 42.6                         | 16.5                        | 60.6                         | 29.7                        |
| 13 | 3.9                          | -30.7                       | -31.2                        | -40.0                       | 30.1                         | -12.6                       | -4.5                         | 63.6                        | 44.4                         | 31.5                        |
| 14 | -72.1                        | -78.4                       | 70.8                         | -3.9                        | -63.0                        | -31.9                       | 66.4                         | -64.5                       | -70.1                        | -41.3                       |



Tabel 38 Tangentieel gerichte krachten in de vlakke voegdelen van de ringvoegen na fase 5 in variant 5a.

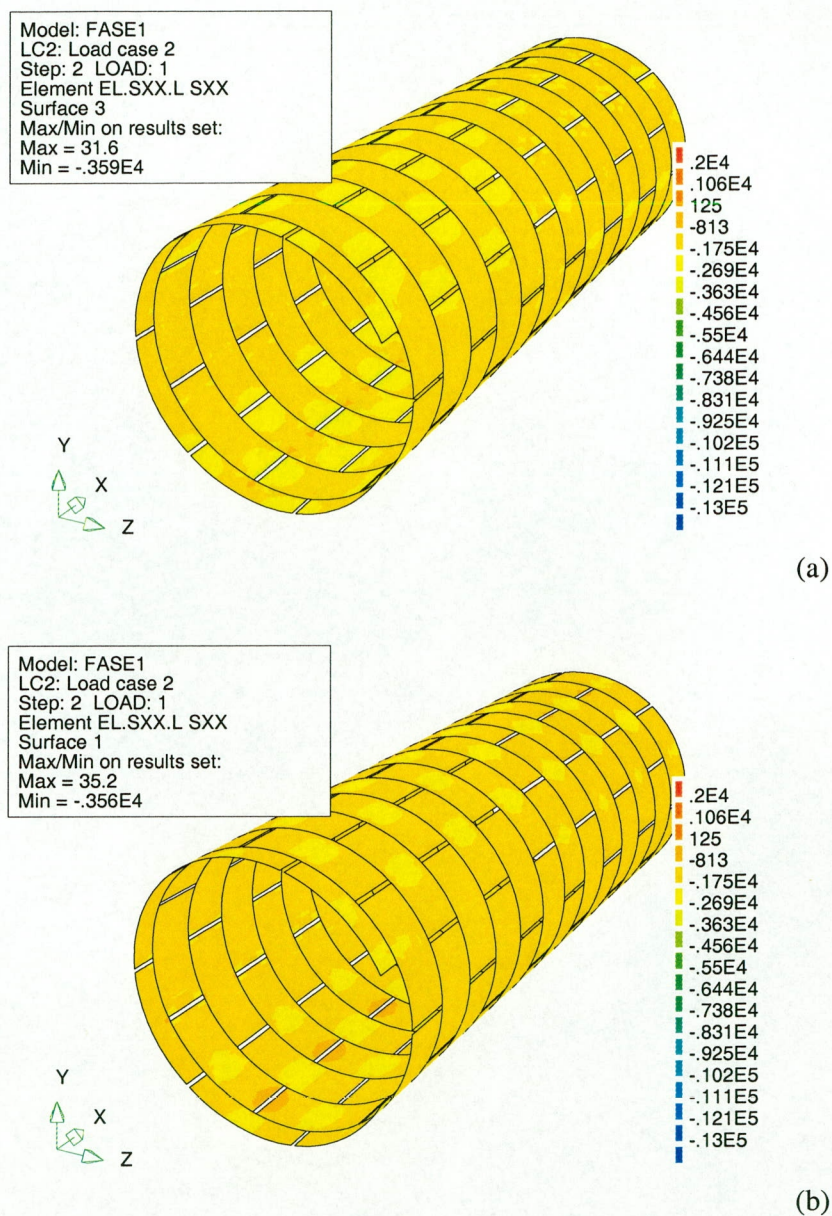
| nr | ring<br>$F_{KA,tan}$<br>[kN] | 1-2<br>$F_{KB,tan}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA,tan}$<br>[kN] | 2-3<br>$F_{KB,tan}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA,tan}$<br>[kN] | 3-4<br>$F_{KB,tan}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA,tan}$<br>[kN] | 4-5<br>$F_{KB,tan}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA,tan}$<br>[kN] | 5-6<br>$F_{KB,tan}$<br>[kN] |
|----|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 1  | 56.8                         | 47.9                        | 77.0                         | 76.5                        | 50.6                         | -25.9                       | 33.5                         | 2.7                         | 25.3                         | -6.0                        |
| 2  | 58.6                         | 68.9                        | 15.5                         | -40.5                       | -38.8                        | -14.1                       | -40.2                        | -53.3                       | -29.9                        | -8.5                        |
| 3  | 43.1                         | -19.0                       | -74.6                        | -69.1                       | -4.0                         | -69.5                       | -63.2                        | -30.9                       | -61.7                        | -61.5                       |
| 4  | -35.3                        | 23.7                        | -1.1                         | -19.2                       | -77.9                        | -25.3                       | 29.2                         | -31.9                       | -48.8                        | 34.7                        |
| 5  | 63.0                         | -52.0                       | 3.7                          | 69.4                        | 71.1                         | 64.7                        | -27.5                        | 67.4                        | 65.9                         | -36.3                       |
| 6  | -13.8                        | 17.4                        | 72.1                         | 57.3                        | 24.9                         | 41.2                        | 64.3                         | 63.5                        | 37.7                         | 48.6                        |
| 7  | -35.6                        | -73.7                       | 11.3                         | -25.1                       | 60.5                         | 23.2                        | 41.2                         | -24.4                       | 51.2                         | 35.7                        |
| 8  | -85.9                        | -83.9                       | -86.6                        | -60.3                       | -25.7                        | -51.4                       | 20.8                         | -23.6                       | -25.3                        | -44.3                       |
| 9  | -79.7                        | -29.1                       | -46.8                        | 18.6                        | -84.7                        | -61.6                       | -48.0                        | -67.8                       | -34.6                        | -35.2                       |
| 10 | -20.4                        | -22.3                       | -21.2                        | 6.5                         | -56.5                        | -60.1                       | -63.7                        | -44.0                       | -14.7                        | 20.6                        |
| 11 | -21.5                        | -0.9                        | -96.4                        | -75.4                       | -50.1                        | -72.5                       | -54.5                        | -69.0                       | -40.7                        | -90.2                       |
| 12 | 35.4                         | 69.1                        | -75.6                        | -25.7                       | 10.1                         | 22.1                        | -57.9                        | -34.6                       | -71.2                        | -53.5                       |
| 13 | 77.1                         | 68.2                        | -54.5                        | 12.0                        | 15.8                         | 56.4                        | 61.7                         | 47.4                        | -2.8                         | 42.7                        |
| 14 | 74.0                         | 79.7                        | 71.0                         | 61.0                        | 68.0                         | 73.8                        | 39.3                         | 55.6                        | 58.8                         | 67.4                        |

Tabel 39 Radiaal gerichte krachten in de vlakke voegdelen van de ringvoegen na fase 5 in variant 5a.

| nr | ring<br>$F_{KA,rad}$<br>[kN] | 1-2<br>$F_{KB,rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA,rad}$<br>[kN] | 2-3<br>$F_{KB,rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA,rad}$<br>[kN] | 3-4<br>$F_{KB,rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA,rad}$<br>[kN] | 4-5<br>$F_{KB,rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{KA,rad}$<br>[kN] | 5-6<br>$F_{KB,rad}$<br>[kN] |
|----|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 1  | 57.0                         | 65.4                        | -32.6                        | -41.3                       | -8.9                         | -5.2                        | -48.5                        | -20.5                       | 5.6                          | 48.9                        |
| 2  | 57.9                         | -47.0                       | -40.9                        | -8.5                        | -15.8                        | -63.1                       | -46.0                        | 14.0                        | -36.7                        | -67.5                       |
| 3  | -33.9                        | -22.1                       | -5.4                         | 25.4                        | -77.1                        | -29.8                       | 0.4                          | 27.9                        | -17.0                        | -20.4                       |
| 4  | 34.8                         | 17.3                        | -29.8                        | -7.5                        | 5.6                          | 17.7                        | -21.3                        | 1.4                         | 30.4                         | 8.4                         |
| 5  | -17.1                        | 22.9                        | 15.2                         | -27.6                       | -8.6                         | -7.3                        | 6.7                          | -23.5                       | -5.1                         | 28.9                        |
| 6  | -39.9                        | -34.6                       | 24.6                         | -21.8                       | -67.7                        | -57.3                       | 29.8                         | -6.5                        | -48.3                        | -52.3                       |
| 7  | 75.3                         | 40.6                        | -62.2                        | -67.6                       | 16.7                         | -47.6                       | -50.3                        | -63.1                       | 42.0                         | 17.2                        |
| 8  | -7.2                         | 19.0                        | 9.5                          | 66.5                        | -38.3                        | -78.7                       | 6.2                          | 46.9                        | -57.7                        | -59.7                       |
| 9  | 33.5                         | 104.8                       | -0.4                         | 52.3                        | 31.8                         | 63.3                        | -19.7                        | -15.4                       | 46.0                         | 59.6                        |
| 10 | 142.0                        | 85.4                        | 86.3                         | 83.9                        | 64.5                         | 59.9                        | 44.1                         | 66.3                        | -10.9                        | 10.6                        |
| 11 | -33.4                        | 0.9                         | 19.6                         | -60.5                       | 76.3                         | 66.8                        | 50.3                         | 55.4                        | 23.5                         | 20.6                        |
| 12 | 18.0                         | 54.3                        | 22.2                         | 66.9                        | 40.0                         | 76.9                        | 54.6                         | 34.6                        | 51.3                         | 25.9                        |
| 13 | 48.5                         | 42.3                        | 53.3                         | 72.8                        | 66.6                         | -35.8                       | -5.0                         | 60.7                        | 49.3                         | 21.7                        |
| 14 | -22.9                        | -11.1                       | 20.5                         | 41.2                        | -37.0                        | -28.7                       | 66.6                         | -51.7                       | -52.7                        | -42.0                       |

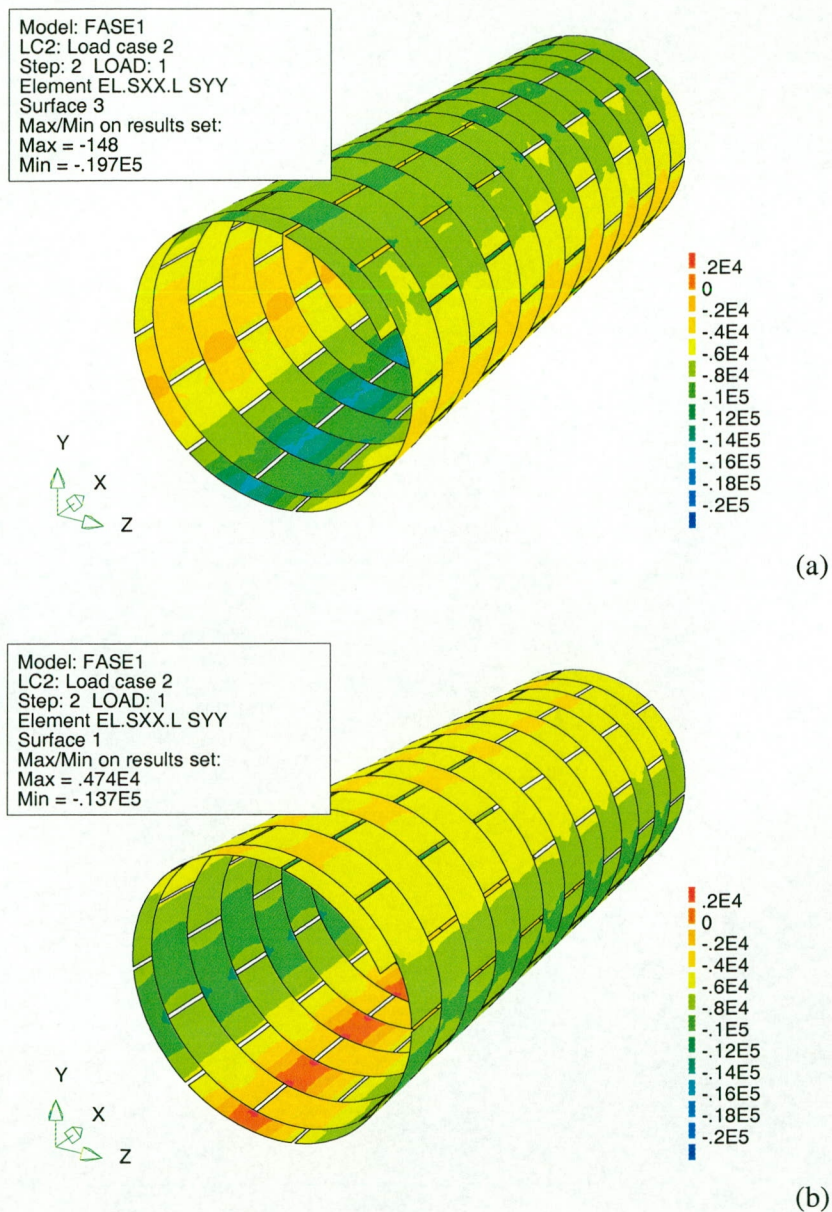


## Bijlage C.4 Spanningsverdelingen en vervormingen fase 1



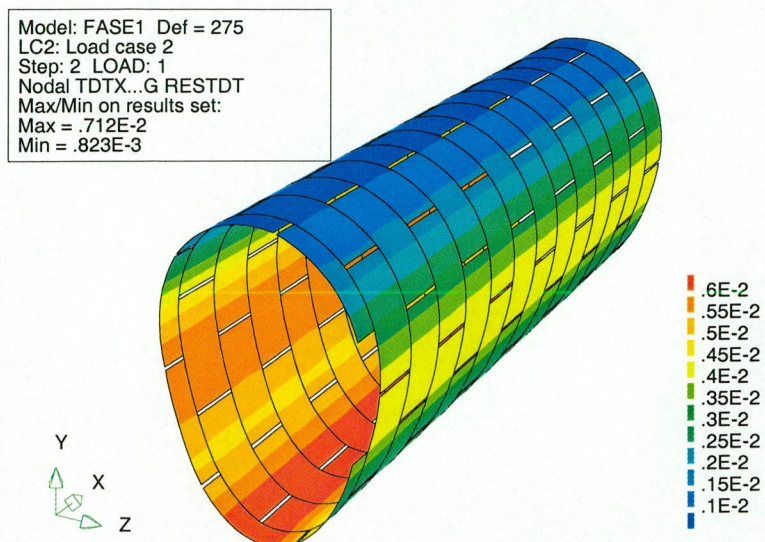
Figuur 48 Axiale normaalspanningen (in  $\text{kN/m}^2$ ) aan de binnen- (a) en de buitenzijde (b) van de hoofdtunnelbuis (variant 5a, fase 1).





Figuur 49 Tangentiële normaalspanningen (in  $\text{kN/m}^2$ ) aan de binnen- (a) en de buitenzijde (b) van de hoofdtunnelbuis (variant 5a, fase 1).

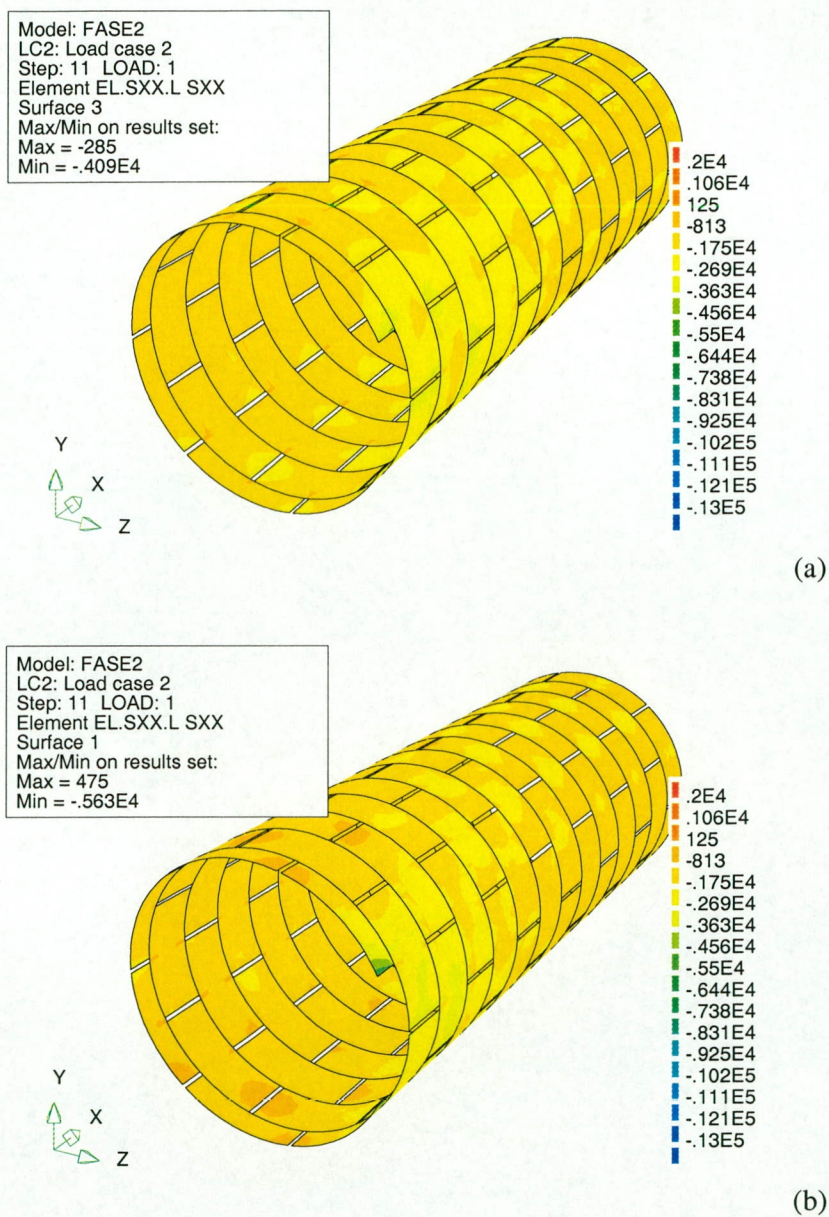




Figuur 50 Totale vervormingen (in m) van de hoofdtunnelbuis (variant 5a, fase 1).

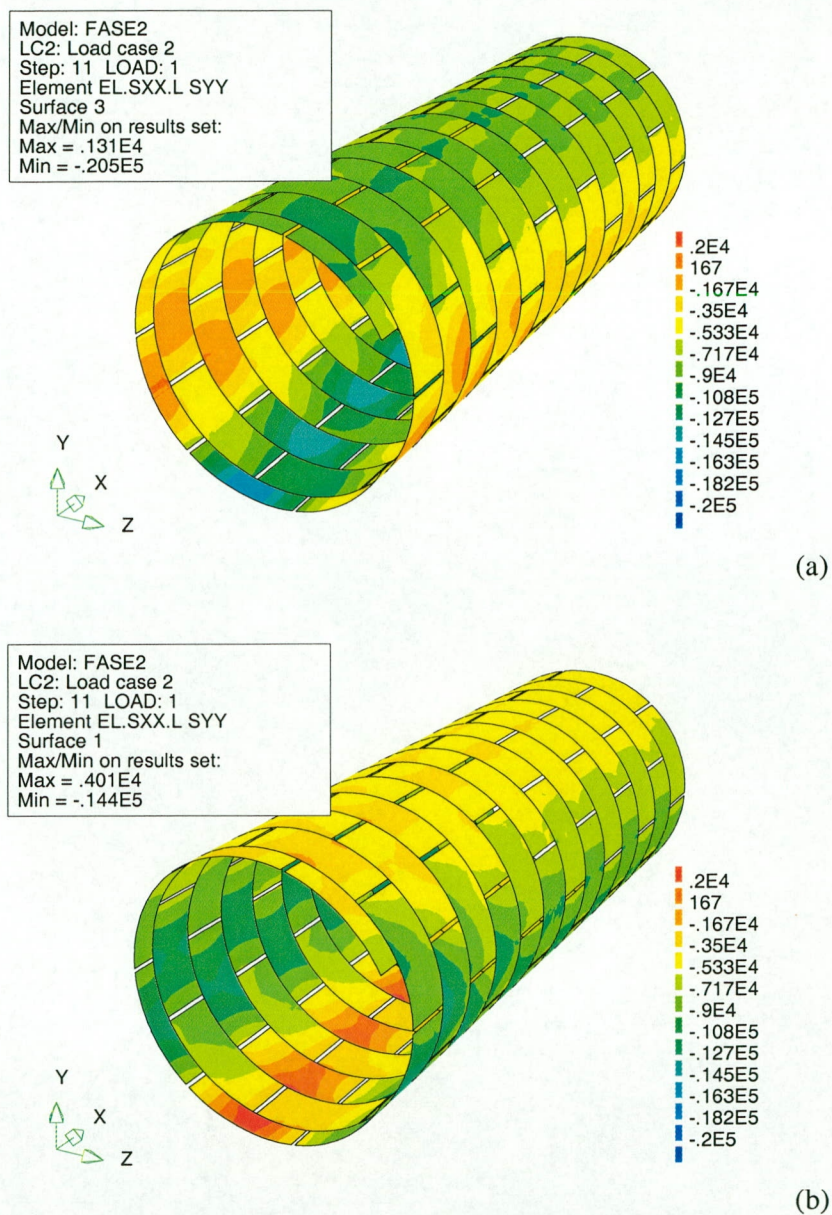


## Bijlage C.5 Spanningsverdelingen en vervormingen fase 2



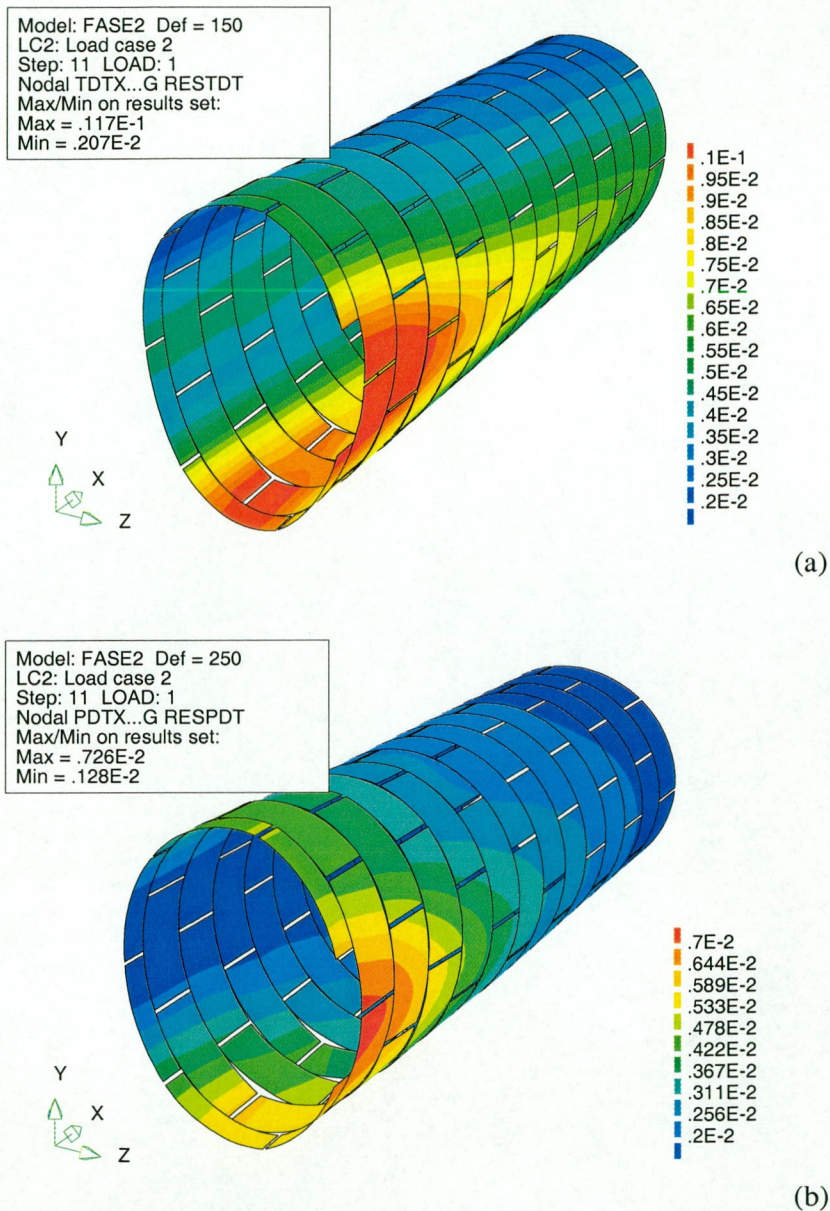
Figuur 51 Axiale normaalspanningen (in kN/m<sup>2</sup>) aan de binnen- (a) en de buitenzijde (b) van de hoofdtunnelbuis (variant 5a, fase 2).





Figuur 52 Tangentiële normaalspanningen (in  $\text{kN/m}^2$ ) aan de binnen- (a) en de buitenzijde (b) van de hoofdtunnelbuis (variant 5a, fase 2).

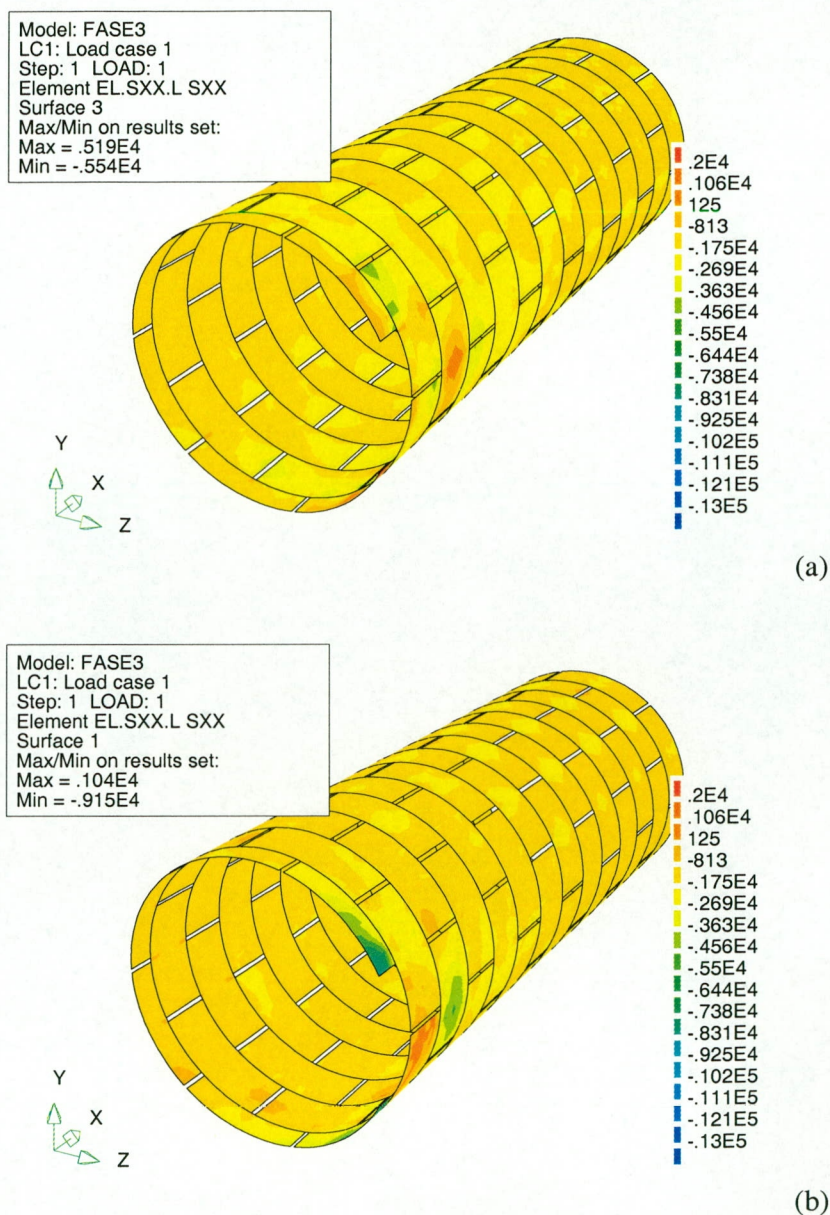




Figuur 53 Totale (a) en incrementele (b) vervormingen (in m) van de hoofdtunnelbuis (variant 5a, fase 2).

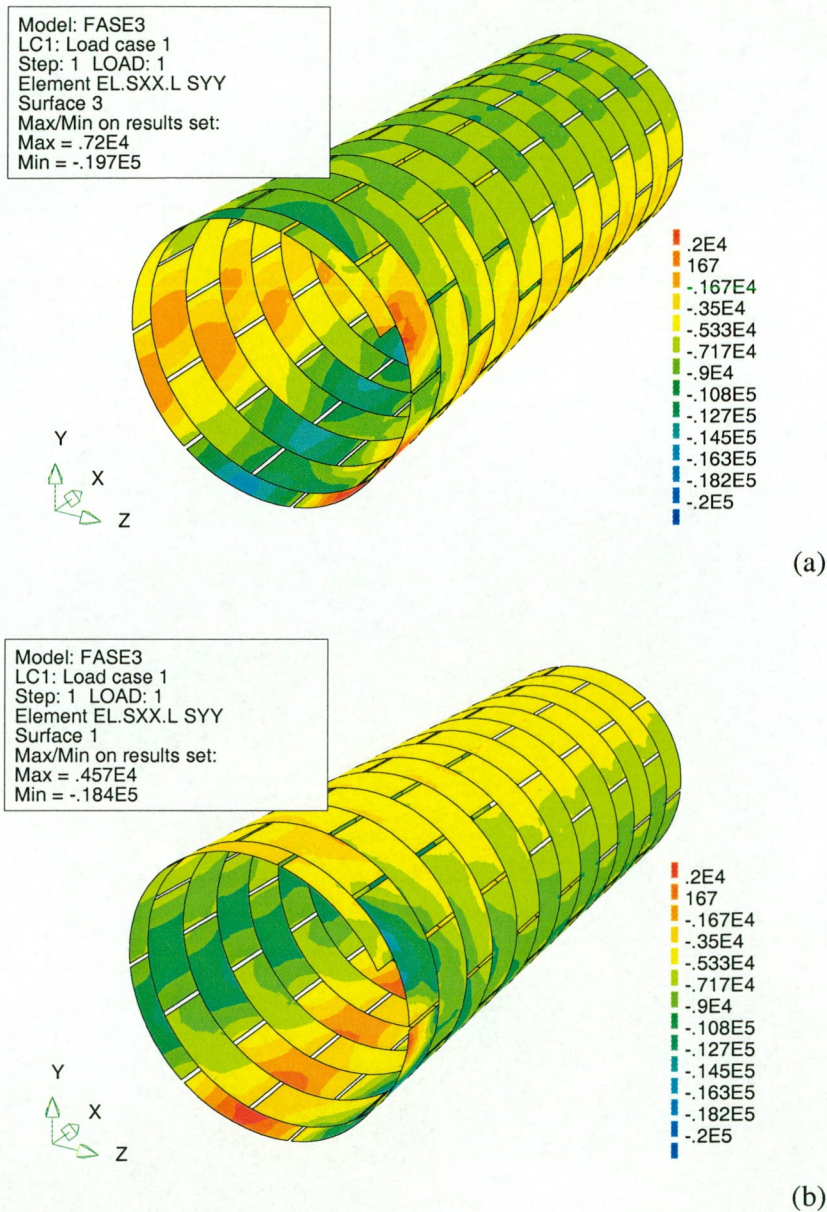


## Bijlage C.6 Spanningsverdelingen en vervormingen fase 3



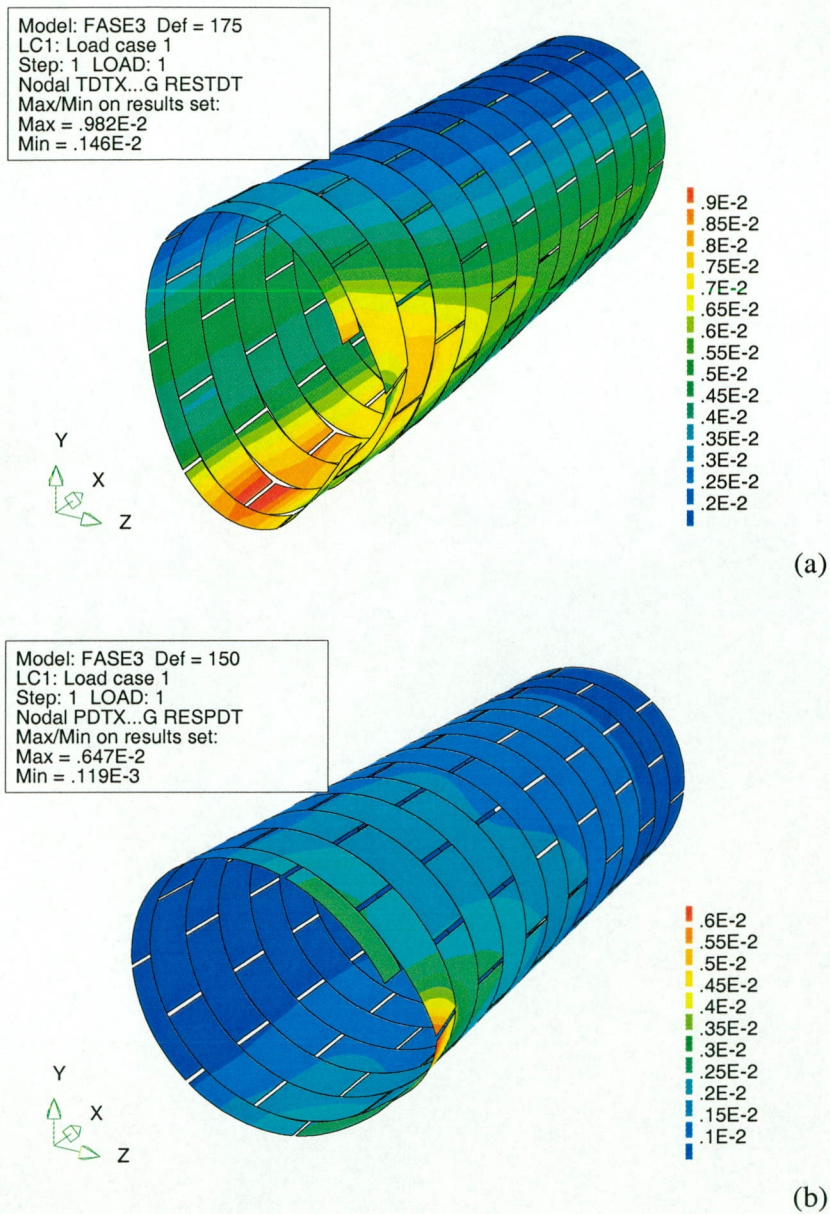
Figuur 54 Axiale normaalspanningen (in  $\text{kN/m}^2$ ) aan de binnen- (a) en de buitenzijde (b) van de hoofdtunnelbuis (variant 5a, fase 3).





Figuur 55 Tangentiële normaalspanningen (in  $\text{kN/m}^2$ ) aan de binnen- (a) en de buitenzijde (b) van de hoofdtunnelbuis (variant 5a, fase 3).

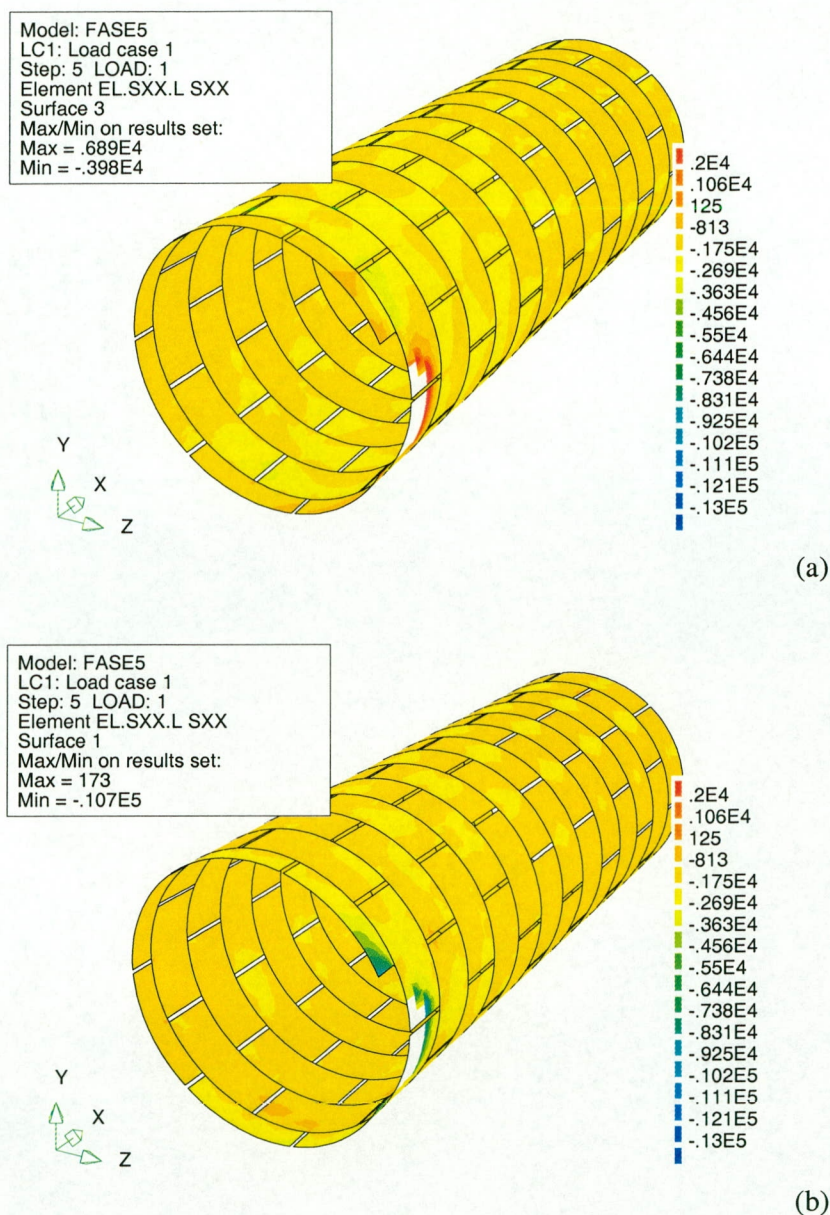




Figuur 56 Totale (a) en incrementele (b) vervormingen (in m) van de hoofdtunnelbuis (variant 5a, fase 3).

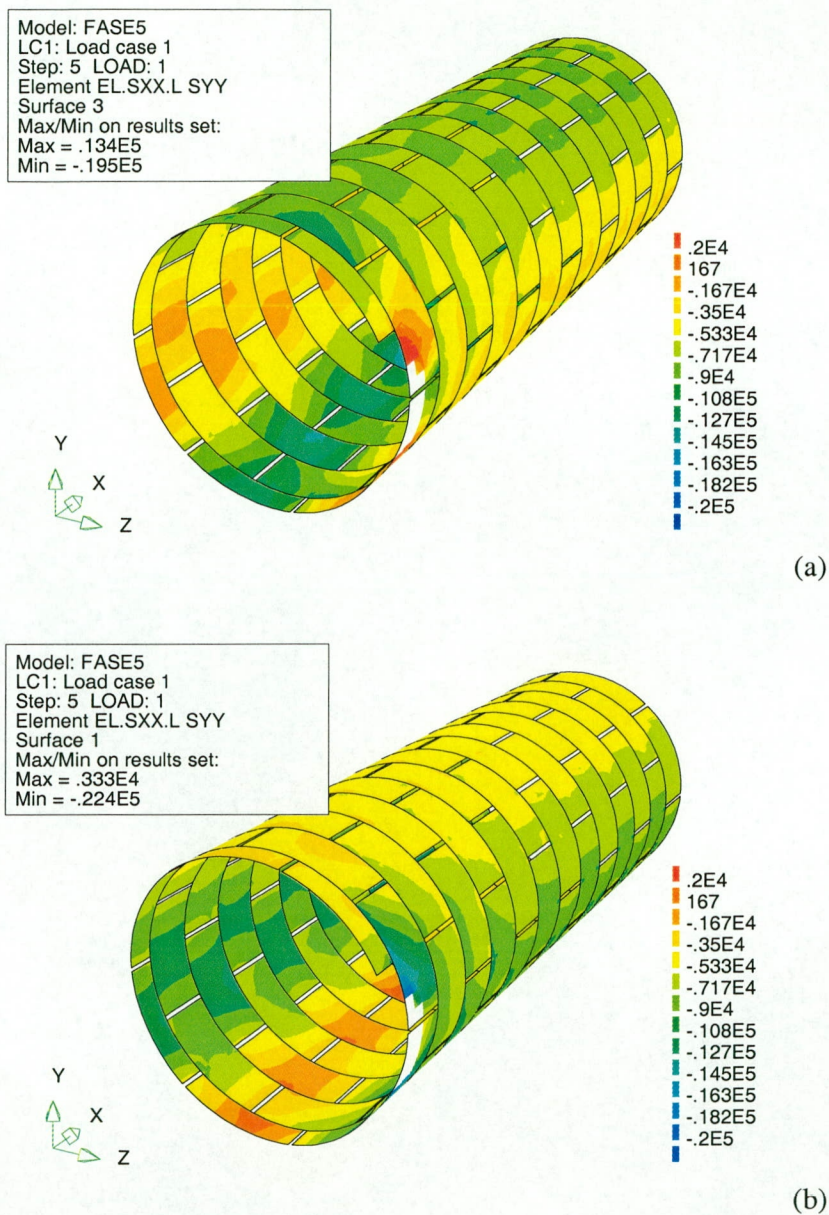


## Bijlage C.7 Spanningsverdelingen en vervormingen fase 5



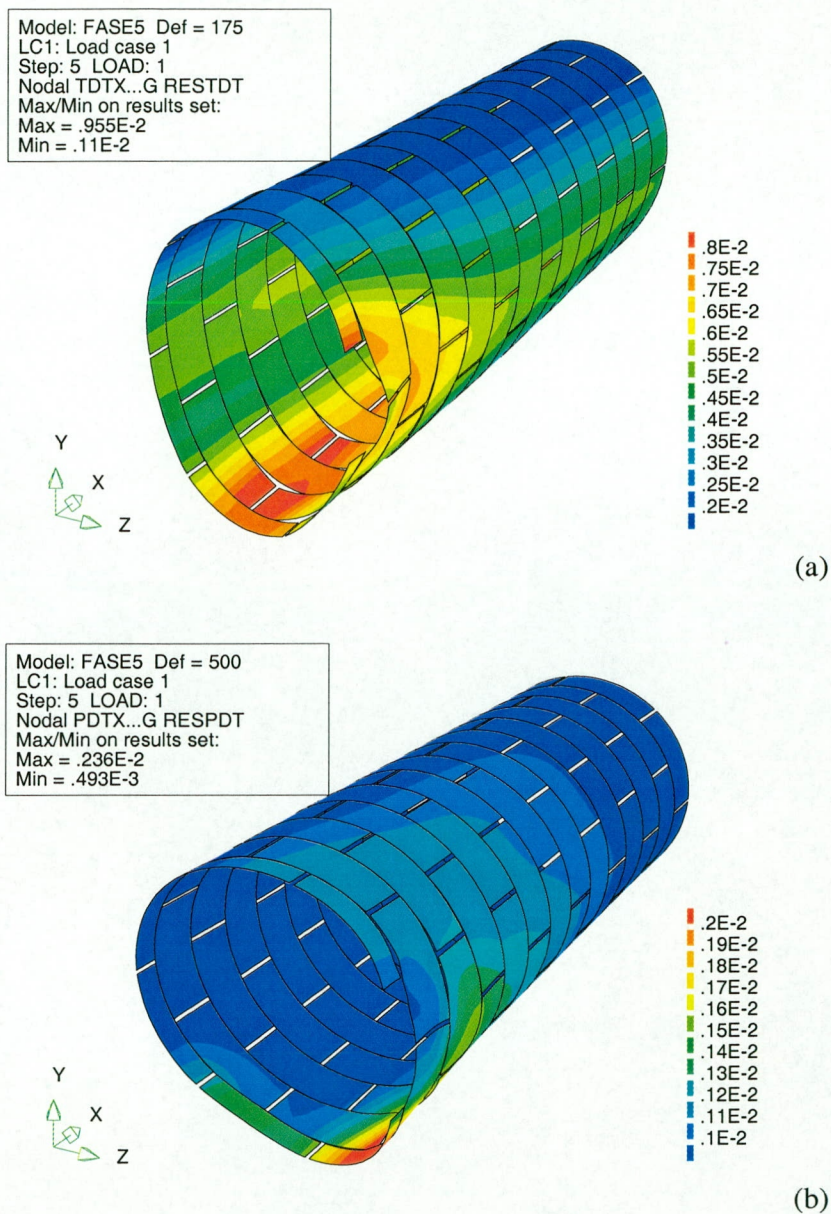
Figuur 57 Axiale normaalspanningen (in  $\text{kN/m}^2$ ) aan de binnen- (a) en de buitenzijde (b) van de hoofdtunnelbuis (variant 5a, fase 5).





Figuur 58 Tangentiële normaalspanningen (in  $\text{kN/m}^2$ ) aan de binnen- (a) en de buitenzijde (b) van de hoofdtunnelbuis (variant 5a, fase 5).





Figuur 59 Totale (a) en incrementele (b) vervormingen (in m) van de hoofdtunnelbuis (variant 5a, fase 5).



## Bijlage D Resultaten variant 6a

### Bijlage D.1 Verplaatsingen en voegopeningen

Tabel 40 Verplaatsingen en ovalisering van beide uiteinden van de hoofdtunnelbuis voor de vijf berekende fasen volgens variant 6a.

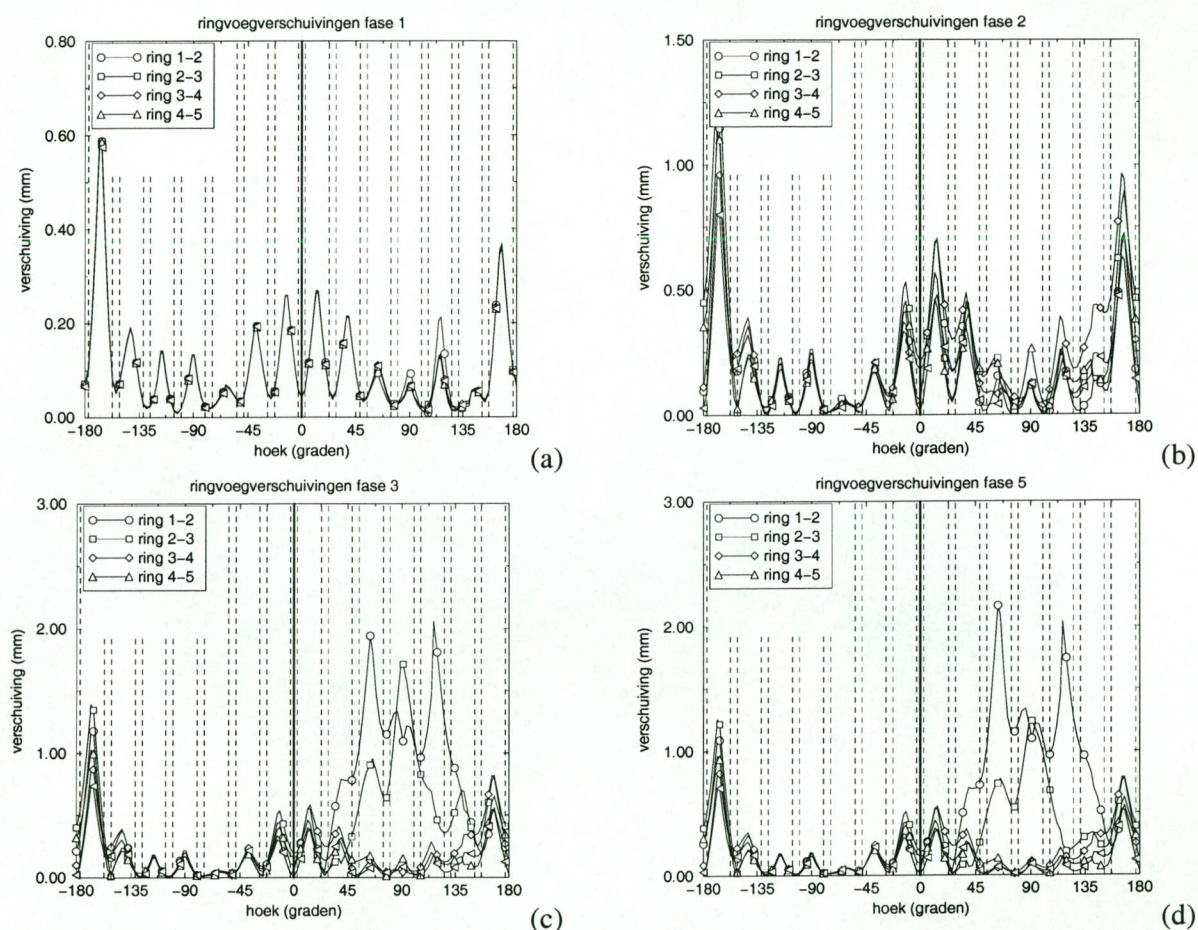
| Ring | Fase | $\delta_{Y1}$<br>[mm] | $\delta_{Z2}$<br>[mm] | $\delta_{Y3}$<br>[mm] | $\delta_{Z4}$<br>[mm] | $\delta_{Y3-Y1}$<br>[mm] | $\delta_{Z4-Z2}$<br>[mm] | $\delta_{Y1+Y3}/2$<br>[mm] | $\delta_{Z2+Z4}/2$<br>[mm] |
|------|------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 1    | 1    | -0.23                 | -4.40                 | -6.38                 | 5.01                  | -6.15                    | 9.41                     | -3.30                      | 0.31                       |
|      | 2    | 2.67                  | -10.98                | -9.20                 | 3.80                  | -11.86                   | 14.78                    | -3.26                      | -3.59                      |
|      | 3    | 0.81                  |                       | -7.31                 | 3.84                  | -8.11                    |                          | -3.25                      |                            |
|      | 5    | 0.12                  |                       | -7.39                 | 4.44                  | -7.52                    |                          | -3.64                      |                            |
| 7    | 1    | -0.26                 | -4.32                 | -6.27                 | 4.85                  | -6.01                    | 9.16                     | -3.27                      | 0.27                       |
|      | 2    | 0.79                  | -8.04                 | -7.21                 | 3.14                  | -8.00                    | 11.18                    | -3.21                      | -2.45                      |
|      | 3    | 0.10                  | -6.52                 | -6.80                 | 3.55                  | -6.90                    | 10.07                    | -3.35                      | -1.48                      |
|      | 5    | -0.47                 | -5.49                 | -7.00                 | 4.20                  | -6.54                    | 9.69                     | -3.74                      | -0.64                      |
| 14   | 1    | -0.35                 | -4.21                 | -6.15                 | 4.63                  | -5.80                    | 8.84                     | -3.25                      | 0.21                       |
|      | 2    | -0.55                 | -5.97                 | -5.82                 | 2.32                  | -5.27                    | 8.29                     | -3.18                      | -1.82                      |
|      | 3    | -0.47                 | -5.43                 | -6.12                 | 3.25                  | -5.65                    | 8.68                     | -3.29                      | -1.09                      |
|      | 5    | -0.80                 | -4.77                 | -6.45                 | 3.90                  | -5.65                    | 8.68                     | -3.62                      | -0.43                      |

Tabel 41 Maximale voegopenstanden en verschuivingen in de hoofdtunnelbuis en de plaats waar deze (ten opzichte van de oorsprong) optreden voor variant 6a.

|        |                                   | Waarde<br>[mm] | X<br>[m] | Y<br>[m] | Z<br>[m] |
|--------|-----------------------------------|----------------|----------|----------|----------|
| Fase 1 | maximale openstand ringvoegen     | 0.40           | 3.00     | -5.12    | -1.25    |
|        | maximale verschuiving ringvoegen  | 0.59           | 3.00     | -5.16    | -1.10    |
|        | maximale openstand langsvoegen    | 0.02           | 1.00     | -5.16    | -1.10    |
|        | maximale verschuiving langsvoegen | 0.01           | 1.00     | -2.22    | 4.79     |
| Fase 2 | maximale openstand ringvoegen     | 0.69           | 3.00     | -5.12    | -1.25    |
|        | maximale verschuiving ringvoegen  | 1.41           | 3.00     | -5.16    | -1.10    |
|        | maximale openstand langsvoegen    | 0.18           | 3.00     | -5.16    | -1.10    |
|        | maximale verschuiving langsvoegen | 0.01           | 1.00     | -2.22    | 4.79     |
| Fase 3 | maximale openstand ringvoegen     | 1.05           | 1.00     | 2.22     | 4.79     |
|        | maximale verschuiving ringvoegen  | 2.06           | 1.00     | -2.36    | 4.72     |
|        | maximale openstand langsvoegen    | 0.81           | 1.00     | 2.36     | 4.72     |
|        | maximale verschuiving langsvoegen | 1.15           | 0.00     | -2.22    | 4.79     |
| Fase 5 | maximale openstand ringvoegen     | 1.23           | 1.00     | 2.22     | 4.79     |
|        | maximale verschuiving ringvoegen  | 2.17           | 1.00     | 2.36     | 4.72     |
|        | maximale openstand langsvoegen    | 1.19           | 0.50     | 2.36     | 4.72     |
|        | maximale verschuiving langsvoegen | 1.15           | 0.00     | -2.22    | 4.79     |

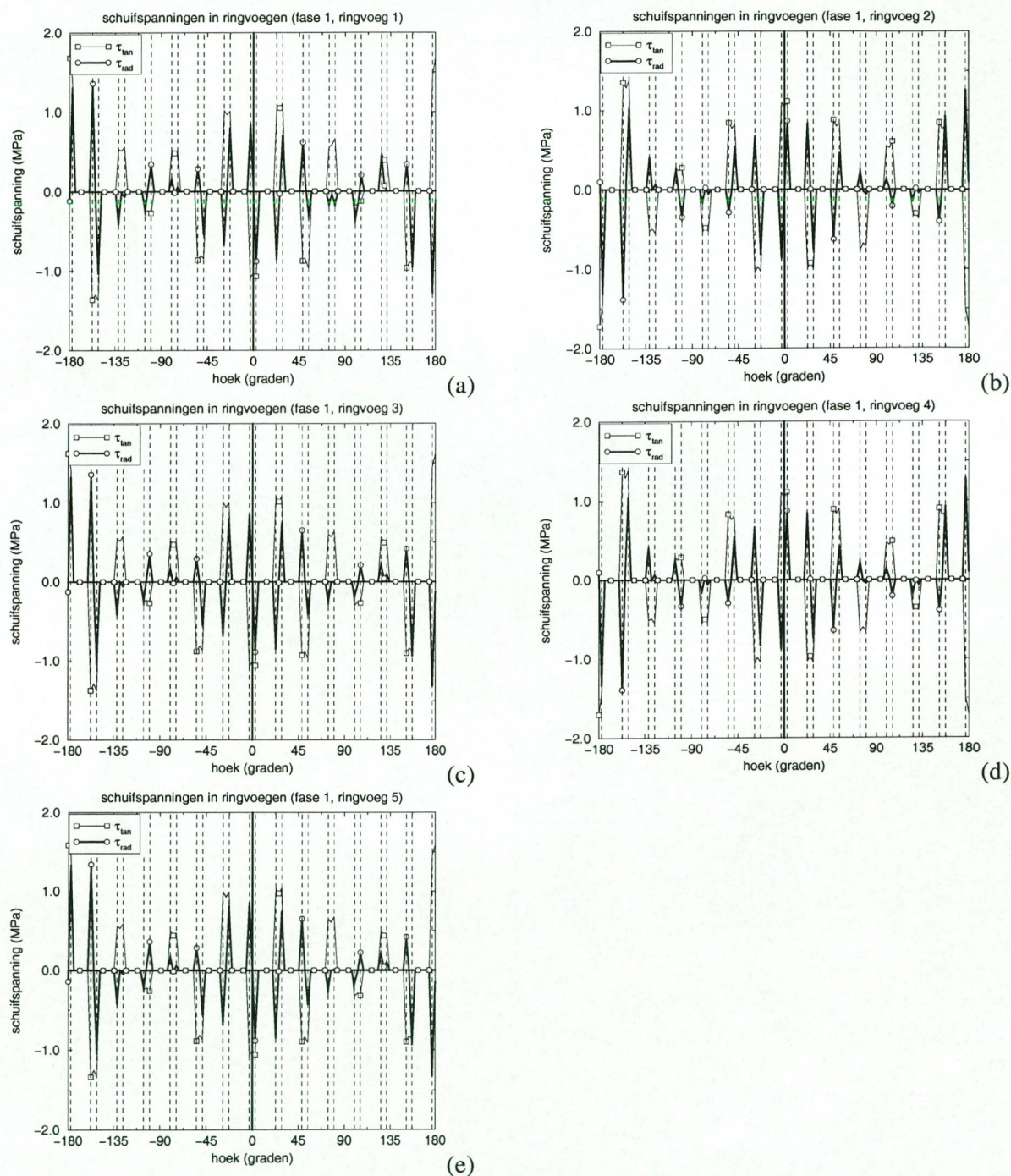


## Bijlage D.2 Verplaatsingen in de ringvoegen



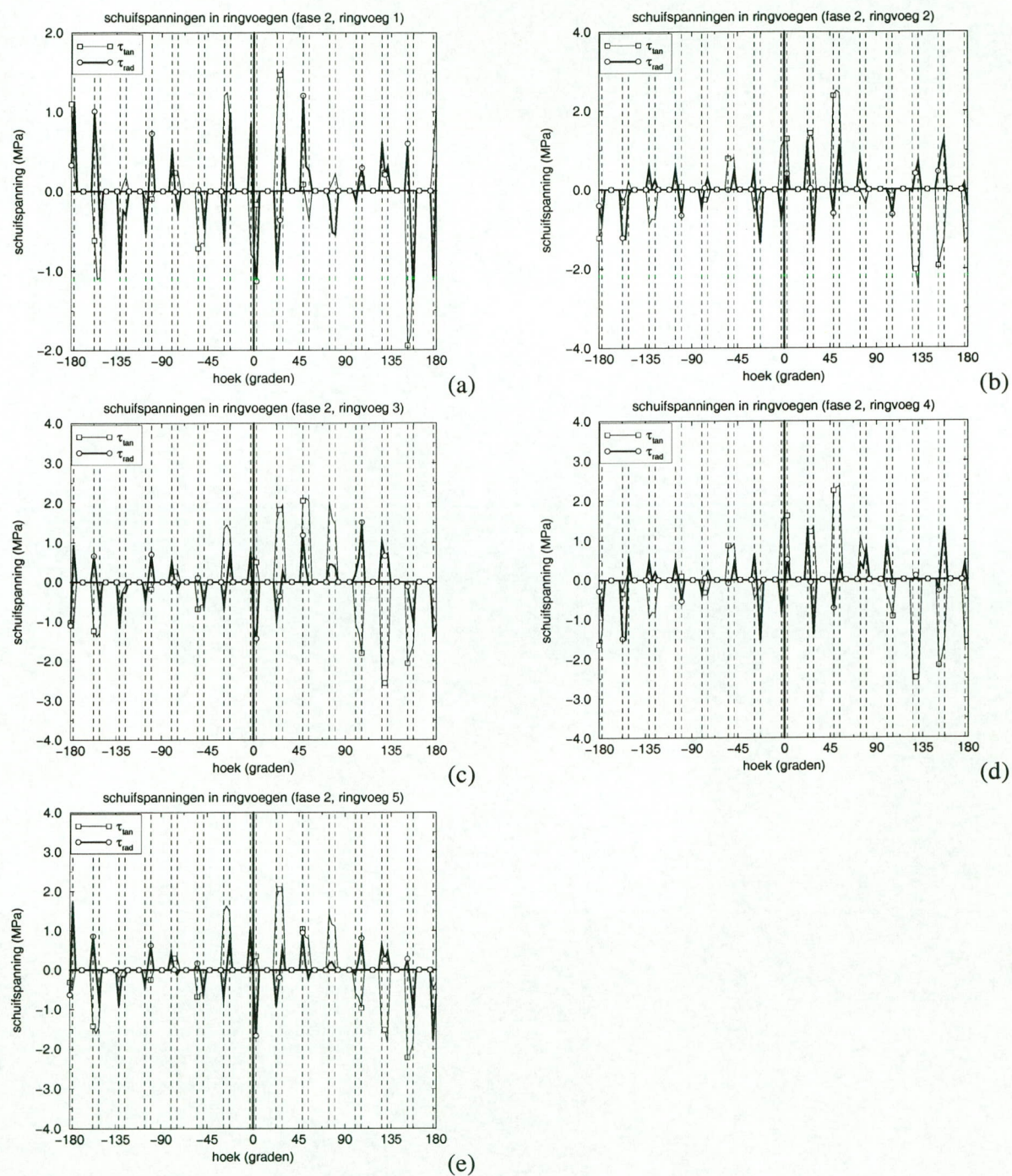
Figuur 60 Totale verplaatsingen in de ringvoegen in fase 1 (a), fase 2 (b), fase 3 (c) en fase 5 (d).



**Bijlage D.3 Koppelkrachten in de ringvoegen**

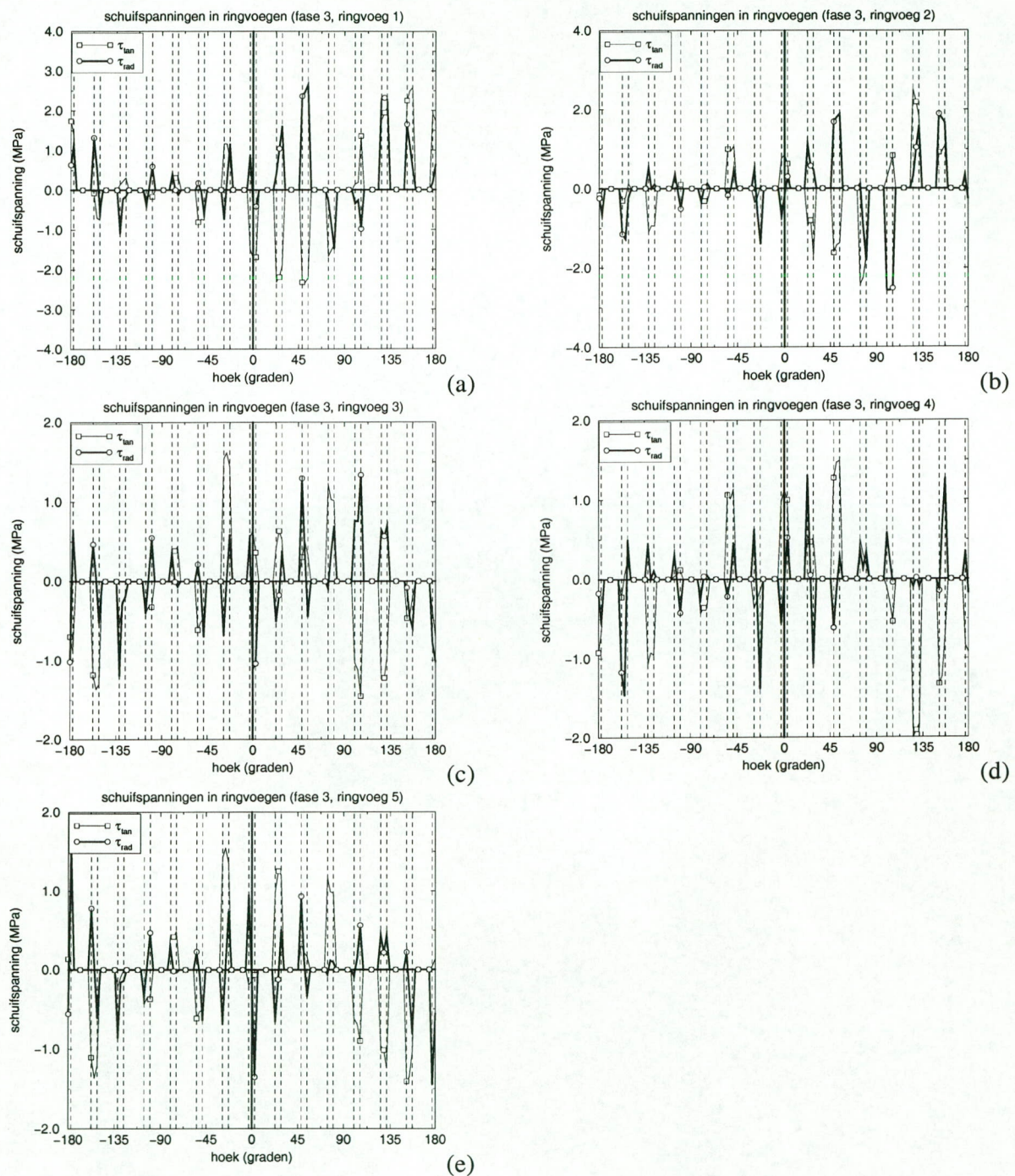
Figuur 61 Schuifspanningsverdelingen in fase 1 in de ringvoeg achter ring 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d) en 5 (e).





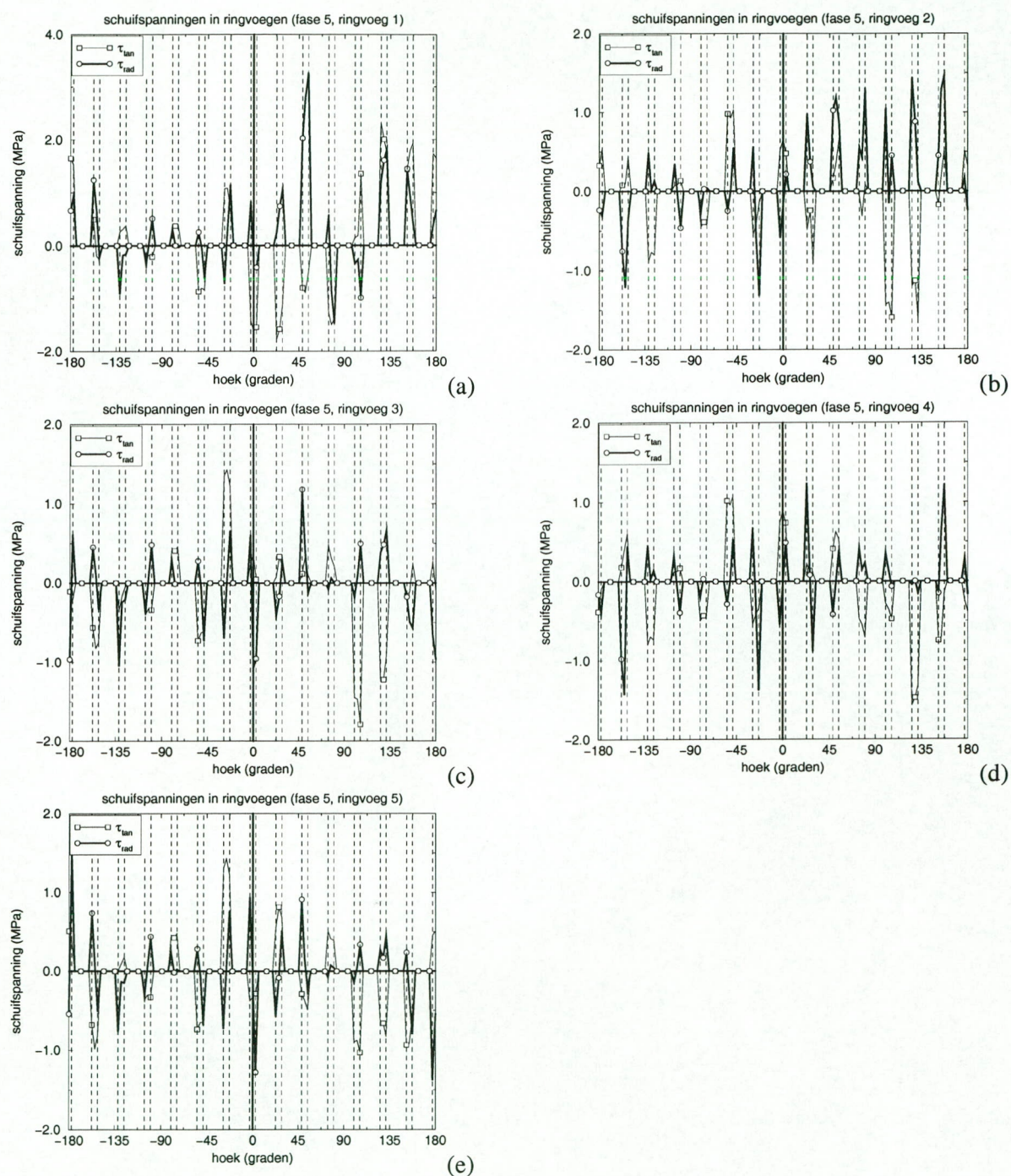
Figuur 62 Schuifspanningsverdelingen in fase 2 in de ringvoeg achter ring 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d) en 5 (e).





Figuur 63 Schuifspanningsverdelingen in fase 3 in de ringvoeg achter ring 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d) en 5 (e).





Figuur 64 Schuifspanningsverdelingen in fase 5 in de ringvoeg achter ring 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d) en 5 (e).



Tabel 42 Overzicht van de maximale koppelkrachten in de ringvoegen.

| fase | $F_{K,tan,max}$<br>[kN] | $F_{K,rad,max}$<br>[kN] | $F_{K,max}$<br>[kN] |
|------|-------------------------|-------------------------|---------------------|
| 1    | 216                     | 37                      | 216                 |
| 2    | 360                     | 126                     | 379                 |
| 3    | 347                     | 364                     | 483                 |
| 5    | 288                     | 381                     | 394                 |

Tabel 43 Tangentieel en radiaal gerichte krachten in de nokken van de ringvoegen na fase 1 in variant 6.

| nr | ring<br>$F_{K,tan}$<br>[kN] | 1-2<br>$F_{K,rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{K,tan}$<br>[kN] | 2-3<br>$F_{K,rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{K,tan}$<br>[kN] | 3-4<br>$F_{K,rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{K,tan}$<br>[kN] | 4-5<br>$F_{K,rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{K,tan}$<br>[kN] | 5-6<br>$F_{K,rad}$<br>[kN] |
|----|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 1  | 211.5                       | -2.0                       | -215.5                      | 0.2                        | 210.6                       | -3.0                       | -216.2                      | 0.0                        | 210.8                       | -3.3                       |
| 2  | -192.4                      | 15.3                       | 192.8                       | -15.5                      | -193.0                      | 13.6                       | 194.0                       | -16.0                      | -188.0                      | 12.4                       |
| 3  | 77.2                        | -27.3                      | -75.4                       | 27.6                       | 78.9                        | -26.8                      | -74.1                       | 27.3                       | 81.0                        | -26.5                      |
| 4  | -36.5                       | 7.0                        | 38.1                        | -6.4                       | -36.0                       | 7.7                        | 39.9                        | -5.4                       | -34.3                       | 9.7                        |
| 5  | 73.1                        | 11.7                       | -73.9                       | -11.1                      | 72.5                        | 12.2                       | -76.0                       | -10.5                      | 68.0                        | 13.2                       |
| 6  | -120.1                      | -15.3                      | 117.2                       | 15.6                       | -122.5                      | -15.2                      | 115.2                       | 15.0                       | -123.0                      | -16.2                      |
| 7  | 143.5                       | 8.8                        | -146.5                      | -8.7                       | 142.1                       | 8.0                        | -147.5                      | -9.5                       | 139.8                       | 8.0                        |
| 8  | -151.6                      | -1.5                       | 156.0                       | 0.0                        | -150.0                      | -2.0                       | 156.0                       | 0.0                        | -149.5                      | -1.3                       |
| 9  | 156.0                       | -9.1                       | -139.8                      | 5.3                        | 152.6                       | -6.1                       | -145.5                      | 6.5                        | 146.7                       | -6.0                       |
| 10 | -129.7                      | 19.0                       | 120.8                       | -9.0                       | -133.1                      | 14.2                       | 126.0                       | -12.3                      | -126.5                      | 13.1                       |
| 11 | 86.5                        | -20.2                      | -103.7                      | 9.3                        | 87.3                        | -14.7                      | -91.5                       | 10.1                       | 93.0                        | -13.6                      |
| 12 | -21.8                       | -12.8                      | 81.0                        | -4.0                       | -39.4                       | 0.7                        | 67.7                        | -2.7                       | -44.8                       | 2.9                        |
| 13 | 60.8                        | 28.2                       | -46.8                       | -9.1                       | 76.3                        | 19.1                       | -53.8                       | -12.9                      | 67.8                        | 19.3                       |
| 14 | -132.6                      | -37.1                      | 115.8                       | 31.1                       | -125.8                      | -30.0                      | 122.7                       | 31.7                       | -123.9                      | -29.5                      |

Tabel 44 Tangentieel en radiaal gerichte krachten in de nokken van de ringvoegen na fase 2 in variant 6. Het nummer in de eerste kolom refereert naar

| nr | ring<br>$F_{K,tan}$<br>[kN] | 1-2<br>$F_{K,rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{K,tan}$<br>[kN] | 2-3<br>$F_{K,rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{K,tan}$<br>[kN] | 3-4<br>$F_{K,rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{K,tan}$<br>[kN] | 4-5<br>$F_{K,rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{K,tan}$<br>[kN] | 5-6<br>$F_{K,rad}$<br>[kN] |
|----|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 1  | 69.5                        | 11.9                       | -166.4                      | -48.5                      | -141.2                      | -52.0                      | -220.6                      | -36.6                      | -64.0                       | -20.5                      |
| 2  | -128.1                      | 37.6                       | -7.9                        | -112.9                     | -182.6                      | 4.8                        | -5.9                        | -92.9                      | -208.6                      | 6.3                        |
| 3  | 10.6                        | -81.7                      | -113.7                      | 47.3                       | -37.4                       | -89.4                      | -125.1                      | 39.1                       | -11.4                       | -65.9                      |
| 4  | -13.3                       | 13.1                       | 6.6                         | -8.8                       | -29.0                       | 13.7                       | 8.5                         | -6.4                       | -37.6                       | 14.9                       |
| 5  | 36.8                        | 15.8                       | -40.2                       | -8.4                       | 42.7                        | 19.4                       | -49.3                       | -6.8                       | 46.4                        | 19.6                       |
| 6  | -96.9                       | -27.0                      | 113.2                       | 26.2                       | -87.5                       | -29.0                      | 126.1                       | 21.3                       | -86.9                       | -25.9                      |
| 7  | 154.1                       | 25.8                       | -48.3                       | -63.8                      | 190.8                       | 5.4                        | -44.8                       | -55.3                      | 216.1                       | 2.0                        |
| 8  | -79.1                       | -37.8                      | 170.8                       | -23.7                      | 77.0                        | -70.1                      | 220.9                       | -18.8                      | 32.4                        | -42.2                      |
| 9  | 187.0                       | -35.7                      | 170.8                       | -2.0                       | 253.0                       | -47.4                      | 187.7                       | -3.8                       | 283.2                       | -26.7                      |
| 10 | -20.8                       | 92.4                       | 347.4                       | 39.2                       | 294.4                       | 74.8                       | 329.4                       | -21.0                      | 129.4                       | 47.4                       |
| 11 | 17.5                        | -53.3                      | -27.3                       | 60.6                       | 243.4                       | 59.9                       | 116.8                       | 76.4                       | 177.3                       | 19.8                       |
| 12 | 4.8                         | 13.2                       | -9.9                        | -41.2                      | -200.9                      | 116.2                      | -92.0                       | 63.7                       | -107.6                      | 46.8                       |
| 13 | 37.5                        | 59.2                       | -310.8                      | 48.9                       | -360.1                      | 119.3                      | -359.4                      | -1.3                       | -229.8                      | 71.5                       |
| 14 | -225.0                      | -51.2                      | -226.4                      | 125.5                      | -261.8                      | -79.2                      | -269.7                      | 76.9                       | -292.8                      | -51.9                      |



Tabel 45 Tangentieel en radiaal gerichte krachten in de nokken van de ringvoegen na fase 3 in variant 6.

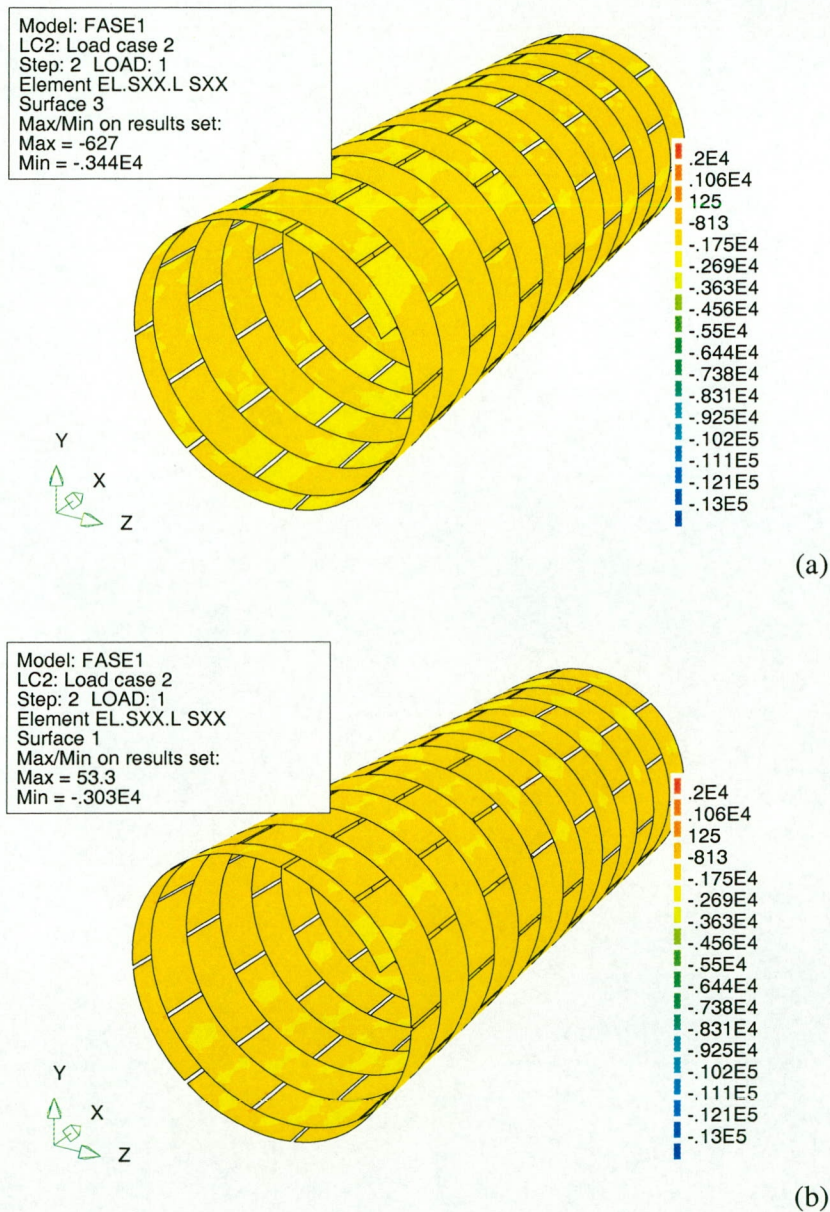
| nr | ring<br>$F_{K,tan}$<br>[kN] | 1-2<br>$F_{K,rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{K,tan}$<br>[kN] | 2-3<br>$F_{K,rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{K,tan}$<br>[kN] | 3-4<br>$F_{K,rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{K,tan}$<br>[kN] | 4-5<br>$F_{K,rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{K,tan}$<br>[kN] | 5-6<br>$F_{K,rad}$<br>[kN] |
|----|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 1  | 239.2                       | 93.2                       | -2.6                        | -24.2                      | -90.9                       | -36.3                      | -112.6                      | -16.3                      | 5.4                         | -8.1                       |
| 2  | -67.1                       | 59.5                       | -16.0                       | -113.9                     | -180.3                      | -2.7                       | 3.5                         | -80.0                      | -171.0                      | 10.2                       |
| 3  | 32.4                        | -77.1                      | -142.5                      | 36.6                       | -50.3                       | -87.3                      | -141.7                      | 32.3                       | -14.8                       | -61.5                      |
| 4  | -23.4                       | 13.9                       | 9.1                         | -9.5                       | -50.3                       | 9.9                        | 10.8                        | -7.3                       | -55.8                       | 8.9                        |
| 5  | 47.7                        | 16.8                       | -48.7                       | -9.5                       | 59.7                        | 17.0                       | -55.5                       | -9.4                       | 65.0                        | 13.9                       |
| 6  | -110.3                      | -25.7                      | 145.0                       | 17.2                       | -76.2                       | -30.1                      | 154.0                       | 14.0                       | -79.2                       | -25.2                      |
| 7  | 141.0                       | 30.9                       | -22.1                       | -68.6                      | 216.5                       | -5.3                       | -36.6                       | -48.5                      | 202.5                       | 3.3                        |
| 8  | -229.5                      | 16.4                       | 103.8                       | -26.5                      | 70.4                        | -57.4                      | 144.5                       | -3.0                       | -18.1                       | -26.3                      |
| 9  | -302.1                      | 145.6                      | -172.8                      | 108.8                      | 72.0                        | -12.0                      | 74.0                        | 15.0                       | 160.6                       | -12.0                      |
| 10 | -325.2                      | 356.7                      | -211.7                      | 255.4                      | 51.4                        | 58.8                       | 199.6                       | -22.6                      | 35.0                        | 37.6                       |
| 11 | -217.5                      | -124.5                     | -299.3                      | -125.1                     | 157.1                       | 44.3                       | 47.3                        | 44.3                       | 150.7                       | 5.6                        |
| 12 | 90.9                        | -82.8                      | 76.3                        | -363.5                     | -173.0                      | 141.2                      | -44.8                       | 38.0                       | -106.1                      | 32.0                       |
| 13 | 273.5                       | 326.7                      | 308.3                       | 137.9                      | -157.3                      | 93.3                       | -272.8                      | -9.8                       | -154.3                      | 57.6                       |
| 14 | 346.5                       | 155.8                      | 140.5                       | 254.0                      | -50.3                       | -51.1                      | -150.6                      | 82.4                       | -177.6                      | -42.0                      |

Tabel 46 Tangentieel en radiaal gerichte krachten in de nokken van de ringvoegen na fase 5 in variant 6.

| nr | ring<br>$F_{K,tan}$<br>[kN] | 1-2<br>$F_{K,rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{K,tan}$<br>[kN] | 2-3<br>$F_{K,rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{K,tan}$<br>[kN] | 3-4<br>$F_{K,rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{K,tan}$<br>[kN] | 4-5<br>$F_{K,rad}$<br>[kN] | ring<br>$F_{K,tan}$<br>[kN] | 5-6<br>$F_{K,rad}$<br>[kN] |
|----|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 1  | 232.8                       | 93.4                       | 69.4                        | -14.6                      | -0.3                        | -30.3                      | -30.1                       | -10.6                      | 62.5                        | -7.4                       |
| 2  | 8.5                         | 76.9                       | 32.0                        | -97.6                      | -98.1                       | 10.0                       | 56.4                        | -70.9                      | -113.0                      | 14.8                       |
| 3  | 45.3                        | -66.3                      | -117.8                      | 36.2                       | -26.3                       | -78.5                      | -107.1                      | 35.1                       | 13.3                        | -55.3                      |
| 4  | -29.2                       | 10.6                       | 14.5                        | -8.1                       | -51.2                       | 7.3                        | 20.4                        | -4.7                       | -47.6                       | 8.7                        |
| 5  | 56.4                        | 16.1                       | -60.1                       | -11.5                      | 62.9                        | 16.1                       | -66.2                       | -10.8                      | 65.9                        | 14.5                       |
| 6  | -120.2                      | -22.5                      | 141.1                       | 17.8                       | -94.2                       | -27.7                      | 146.5                       | 14.2                       | -97.3                       | -24.4                      |
| 7  | 127.7                       | 31.7                       | -50.8                       | -59.6                      | 187.7                       | -1.2                       | -62.1                       | -45.0                      | 185.0                       | 2.4                        |
| 8  | -215.2                      | 12.2                       | 75.9                        | -25.7                      | 26.6                        | -50.3                      | 110.1                       | -4.1                       | -46.5                       | -22.5                      |
| 9  | -210.0                      | 95.6                       | -86.7                       | 69.5                       | 26.4                        | -11.8                      | 22.2                        | 22.4                       | 93.9                        | -5.2                       |
| 10 | -100.2                      | 381.2                      | 57.7                        | 142.5                      | 22.2                        | 72.6                       | 71.8                        | -2.2                       | -54.4                       | 43.5                       |
| 11 | -193.5                      | -75.7                      | -6.3                        | 118.8                      | 49.0                        | -2.0                       | -82.5                       | 41.8                       | 63.4                        | 0.7                        |
| 12 | 90.5                        | -83.4                      | -212.6                      | 81.4                       | -226.2                      | 21.4                       | -53.3                       | 20.4                       | -134.8                      | 13.0                       |
| 13 | 287.8                       | 217.8                      | -192.3                      | 114.0                      | -157.9                      | 74.2                       | -206.7                      | -10.6                      | -100.7                      | 46.6                       |
| 14 | 242.4                       | 133.2                      | 25.3                        | 146.2                      | 2.0                         | -56.3                      | -70.2                       | 79.8                       | -111.6                      | -40.2                      |

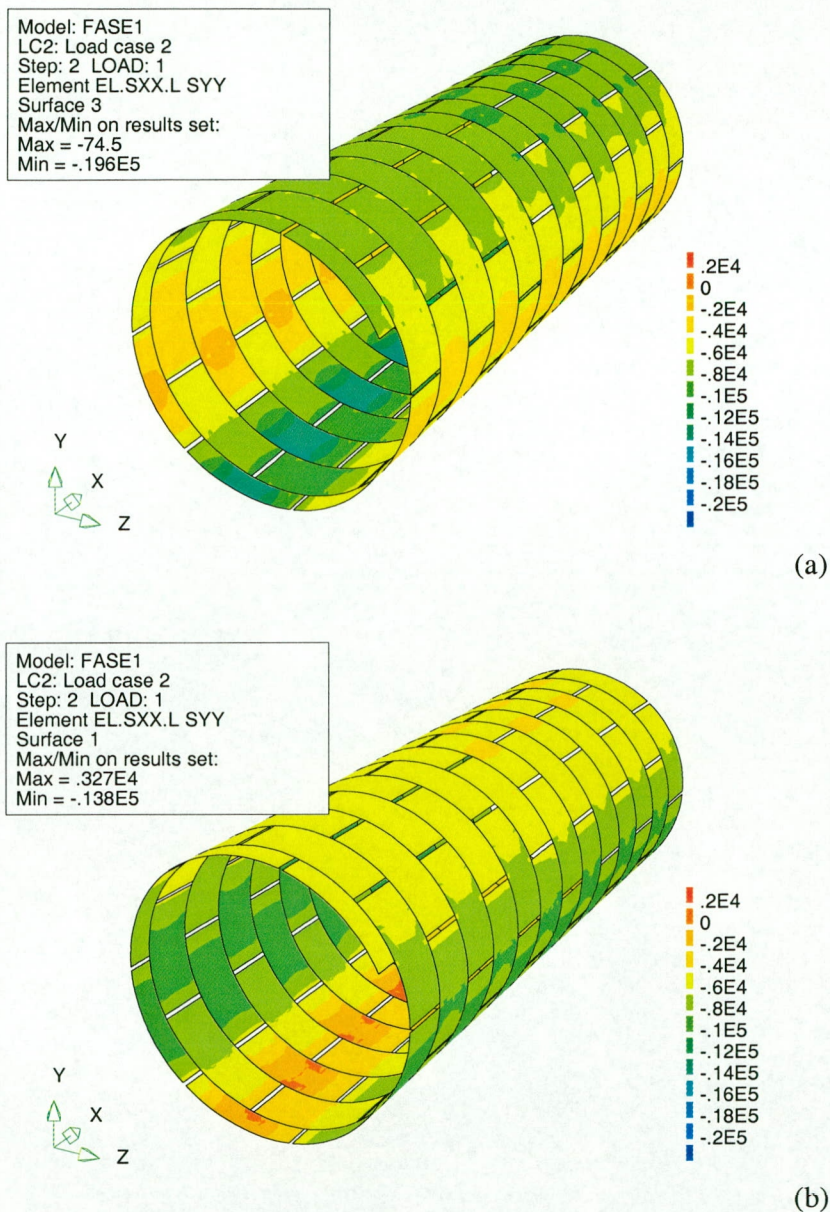


## Bijlage D.4 Spanningsverdelingen en vervormingen fase 1



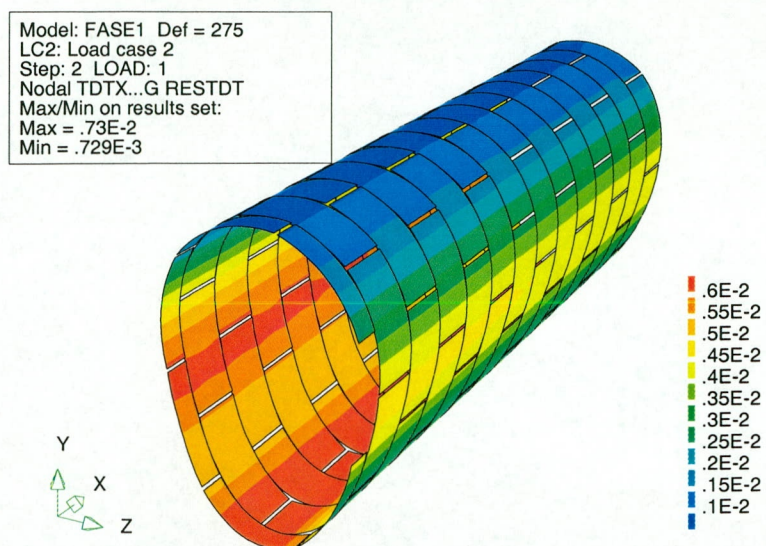
Figuur 65 Axiale normaalspanningen (in  $\text{kN/m}^2$ ) aan de binnen- (a) en de buitenzijde (b) van de hoofdtunnelbuis (variant 6a, fase 1).





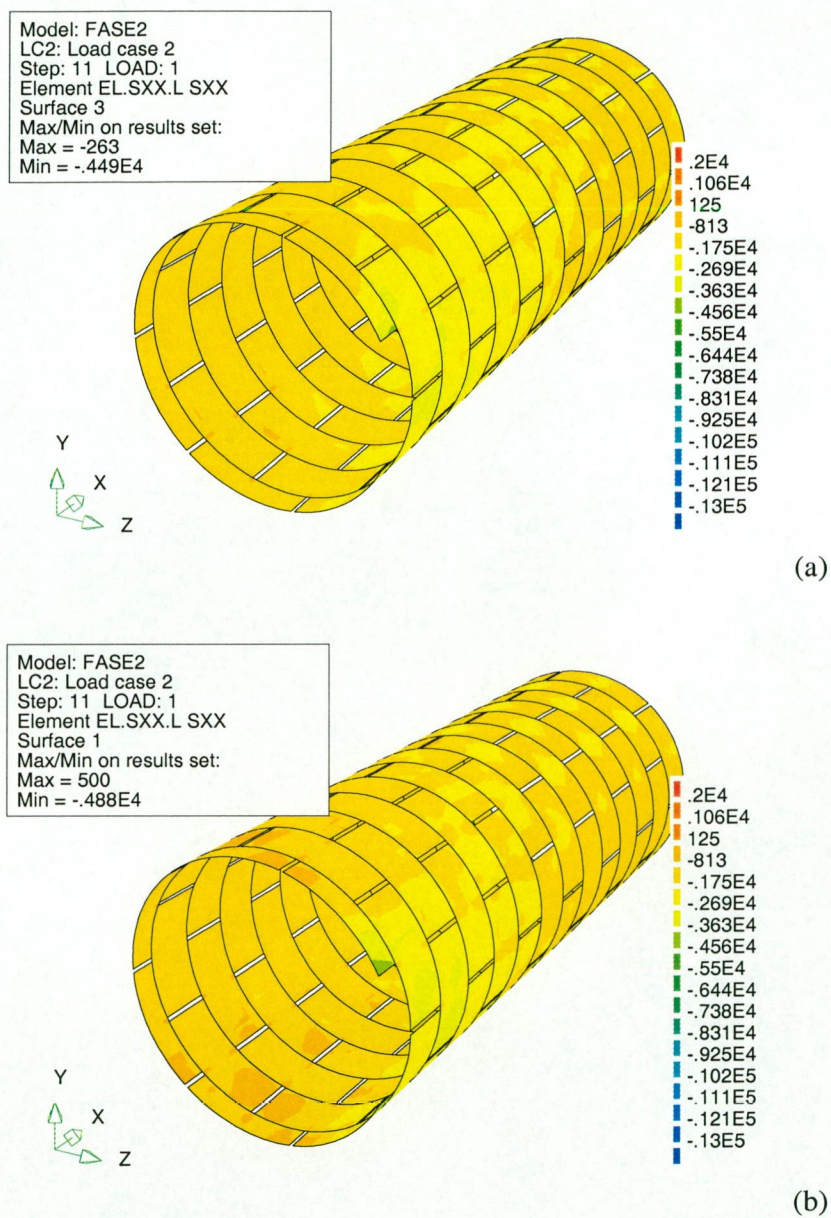
Figuur 66 Tangentiële normaalspanningen (in  $\text{kN/m}^2$ ) aan de binnen- (a) en de buitenzijde (b) van de hoofdtunnelbuis (variant 6a, fase 1).





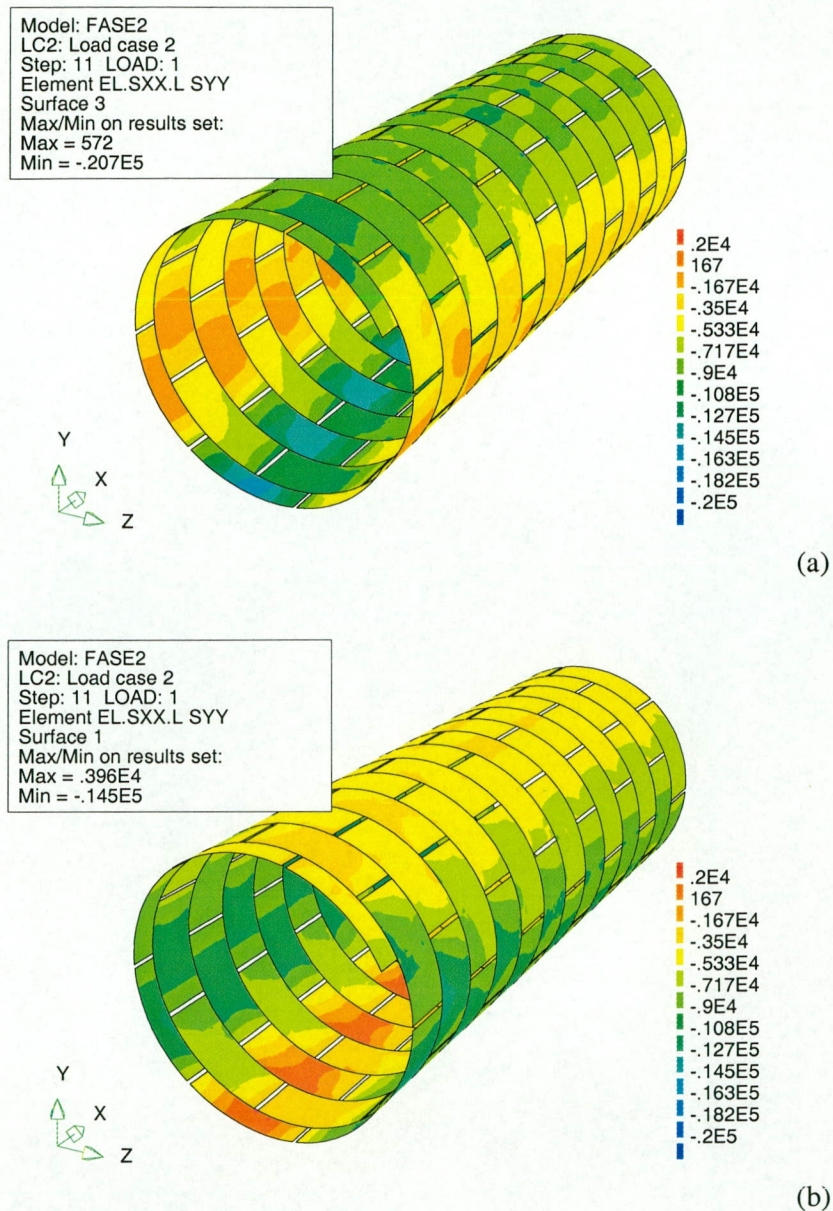
Figuur 67 Totale vervormingen (in m) van de hoofdtunnelbuis (variant 6a, fase 1).



**Bijlage D.5 Spanningsverdelingen en vervormingen fase 2**

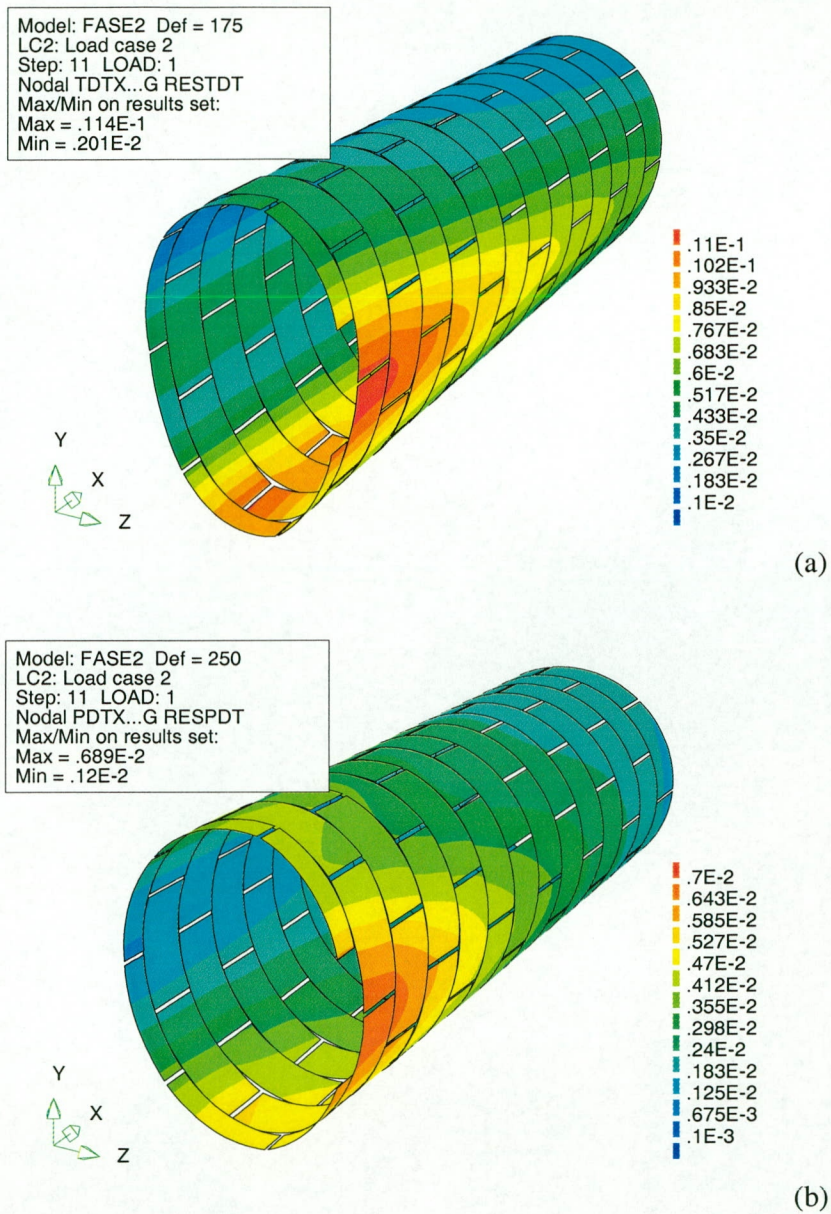
Figuur 68 Axiale normaalspanningen (in  $\text{kN/m}^2$ ) aan de binnen- (a) en de buitenzijde (b) van de hoofdtunnelbuis (variant 6a, fase 2).





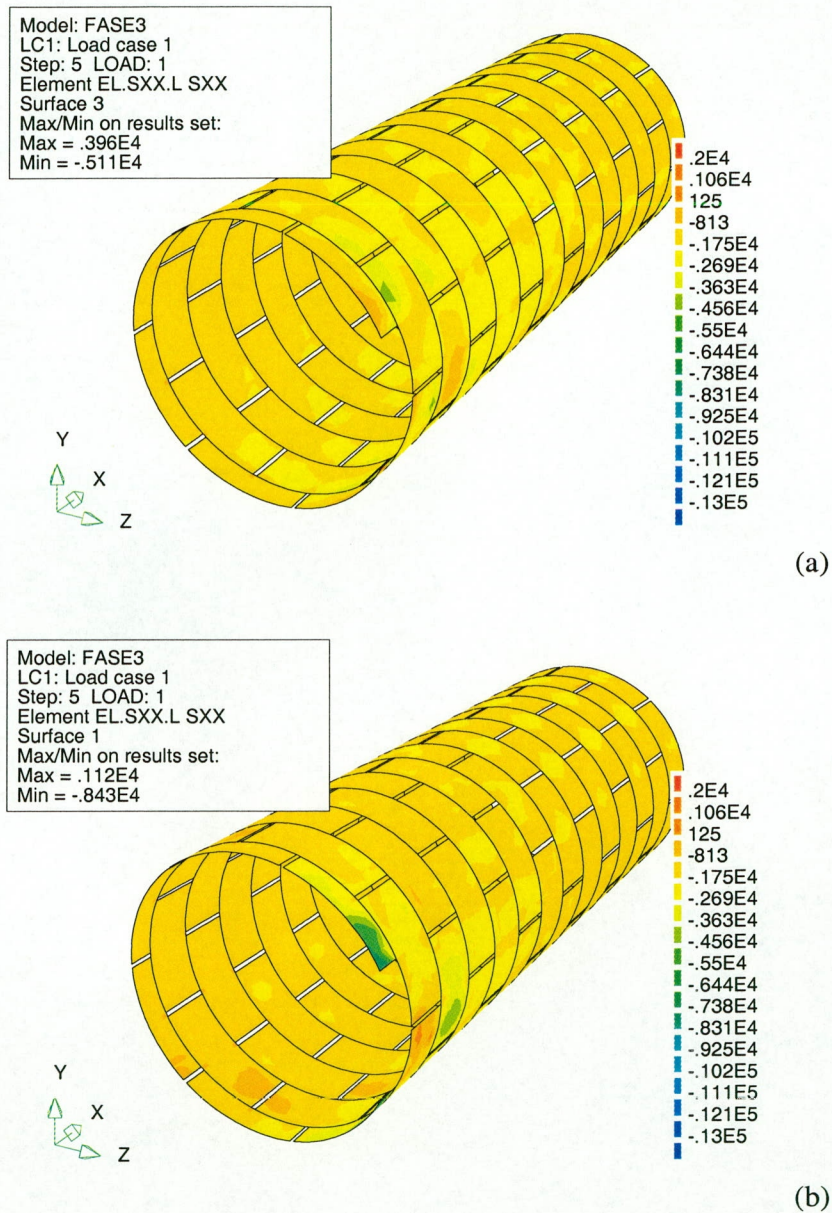
Figuur 69 Tangentiële normaalspanningen (in  $\text{kN/m}^2$ ) aan de binnen- (a) en de buitenzijde (b) van de hoofdtunnelbuis (variant 6a, fase 2).





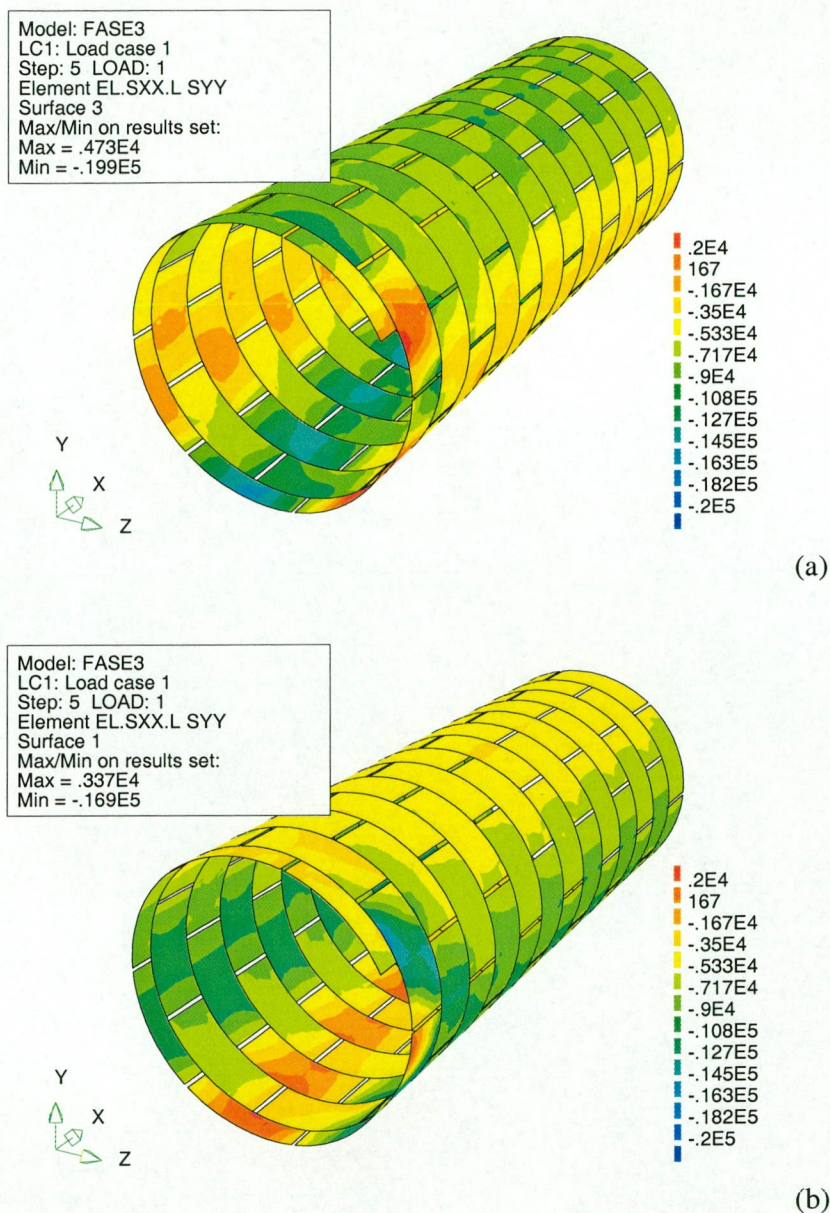
Figuur 70 Totale (a) en incrementele (b) vervormingen (in m) van de hoofdtunnelbuis (variant 6a, fase 2).



**Bijlage D.6 Spanningsverdelingen en vervormingen fase 3**

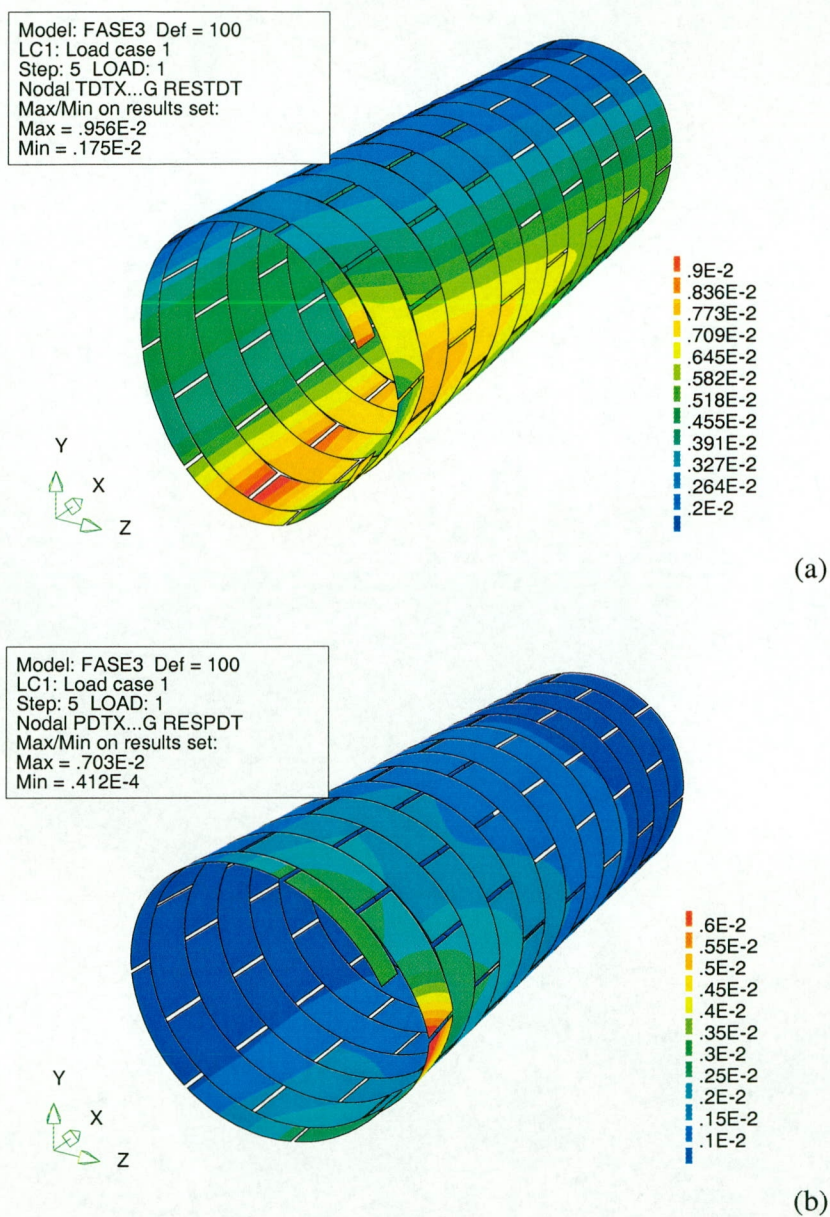
Figuur 71 Axiale normaalspanningen (in  $\text{kN/m}^2$ ) aan de binnen- (a) en de buitenzijde (b) van de hoofdtunnelbuis (variant 6a, fase 3).





Figuur 72 Tangentiële normaalspanningen (in  $\text{kN/m}^2$ ) aan de binnen- (a) en de buitenzijde (b) van de hoofdtunnelbuis (variant 6a, fase 3).

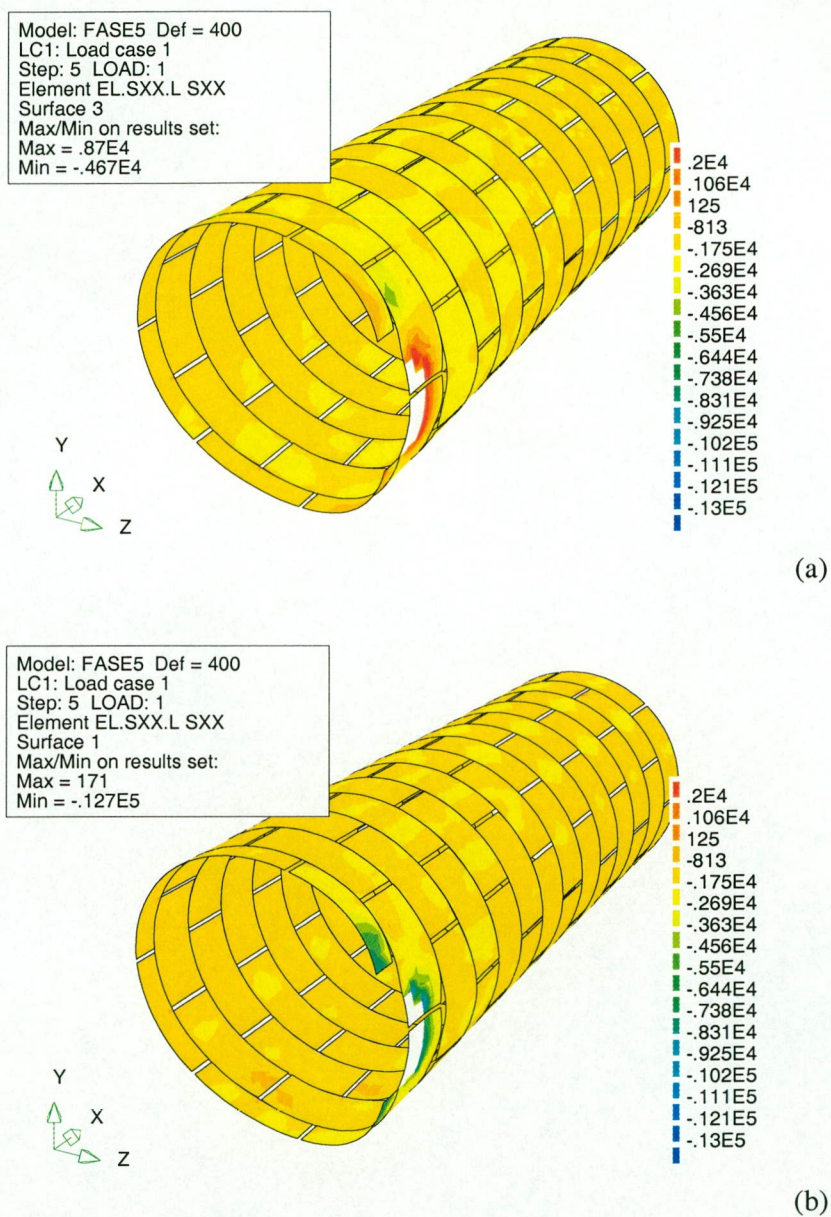




Figuur 73 Totale (a) en incrementele (b) vervormingen (in m) van de hoofdtunnelbuis (variant 6a, fase 3).

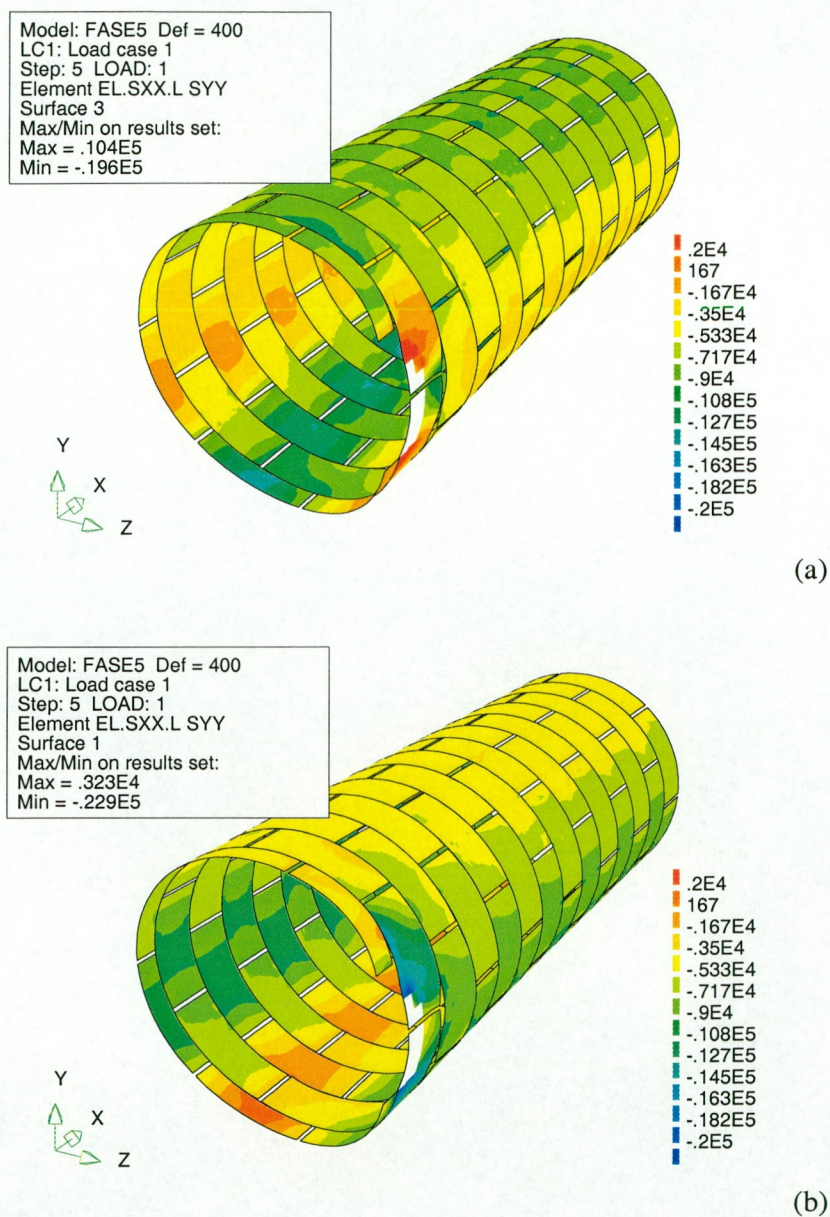


## Bijlage D.7 Spanningsverdelingen en vervormingen fase 5



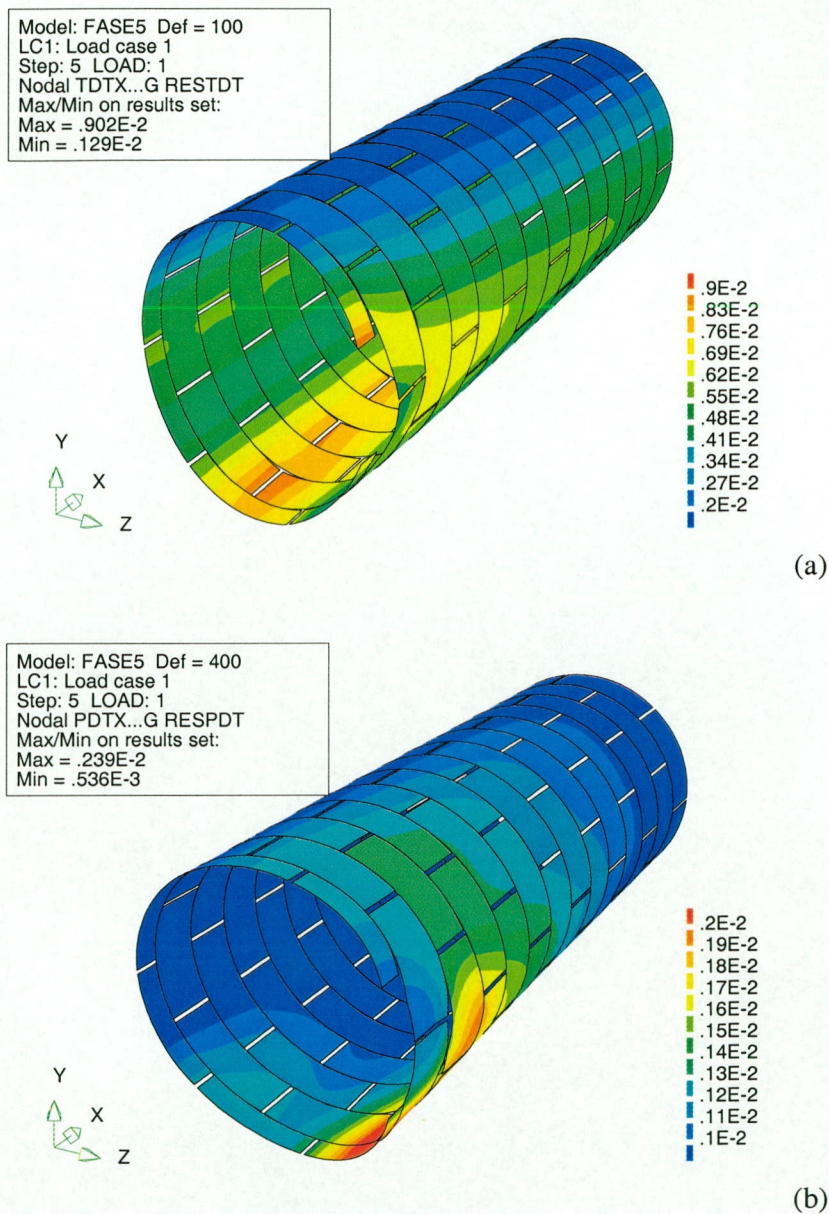
Figuur 74 Axiale normaalspanningen (in  $\text{kN/m}^2$ ) aan de binnen- (a) en de buitenzijde (b) van de hoofdtunnelbuis (variant 6a, fase 5).





Figuur 75 Tangentiële normaalspanningen (in  $\text{kN/m}^2$ ) aan de binnen- (a) en de buitenzijde (b) van de hoofdtunnelbuis (variant 6a, fase 5).





Figuur 76 Totale (a) en incrementele (b) vervormingen (in m) van de hoofdtunnelbuis (variant 6a, fase 5).



