

Dynamicaberekeningen boortunnel Groene Hart

Dynamisch gedrag van de tunnel bij passages van overgangen

Projectorganisatie HSL-Zuid
Projectbureau Noordelijk Holland

Holland Railconsult
ir. C.P.L. Walschot
Kenmerk GMV-CPL-000063554 - Versie 0.4

Utrecht, 5 oktober 2000

Inhoudsopgave

1	Inleiding	3
2	Modelbeschrijving	4
2.1	Algemeen	4
	Buis in lineair elastische halfruimte	5
2.1.1.	Geometrie	5
2.1.2.	Randvoorwaarden	6
2.2	Afmetingen	6
2.2.1.	Lengte	6
2.2.2.	Overige afmetingen	7
2.3	Grondparameters	8
2.4	Tunnelparameters	8
2.5	Treinbelasting	9
2.5.1.	Belasting door Thalys	9
3	Resultaten	11
3.1	Criteria	11
3.2	Numerieke resultaten	11
3.2.1.	Buigend moment	11
3.2.2.	Dwarskracht	14
3.2.3.	Samenvatting resultaten, opmerkingen	17
4	Samenvatting, conclusies, aanbevelingen	19
	Colofon	20
Bijlage I	Buigspanningen analytisch	
Bijlage II	Schuifspanningen analytisch	
Bijlage III	Buigspanningen LS-Dyna	
Bijlage IV	Schuifspanningen LS-Dyna	
Bijlage V	Vervormingen van de buiswand	

1 Inleiding

Voor de projectorganisatie Hogesnelheidslijn – Zuid is onderzoek verricht naar het dynamisch gedrag van de boortunnel onder het Groene Hart.

In dit rapport worden eindige elementen berekeningen besproken waarbij het dynamisch gedrag van de tunnel nabij overgangen is onderzocht. De tunnel is hiertoe gemodelleerd als een holle buis in een lineair elastische halfruimte.

Deze berekeningen vormen een aanvulling op een voorafgaand onderzoek naar het dynamisch gedrag van de als ligger gemodelleerde tunnel het vrije veld (zie “Onderzoek naar het dynamisch liggergedrag van de tunnel bij treinpassages in het vrije veld. Modellerings als Timoshenko ligger”, ir. C.L. Kamp, 3 april 2000).

Het eindige elementen model van de buis in een lineair elastische halfruimte en de gehanteerde modelparameters worden beschreven in hoofdstuk 2. De resultaten van de gemaakte berekeningen en de vergelijking met de resultaten van het voorafgaande onderzoek naar het dynamisch liggergedrag in het vrije veld worden besproken in hoofdstuk 3. Hoofdstuk 4 geeft de conclusies en een samenvatting van het onderzoek.

2 Modelbeschrijving

2.1 Algemeen

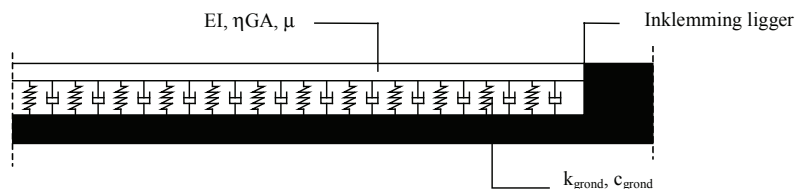
In fase 1 van het onderzoek naar het dynamisch gedrag van de HSL-Boortunnel is de tunnel gemodelleerd als een continu elastisch ondersteunde ligger in het vrije veld (zie "Dynamica berekeningen boortunnel Groene Hart, Onderzoek naar het dynamisch liggergedrag van de tunnel bij treinpassages in het vrije veld. Modelling als Timoshenko ligger", ir. C.L. Kamp, 3 april 2000).

De eigenschappen van de grond worden bij deze modellering bepaald door de parameters k_{grond} en c_{grond} , respectievelijk de verticale stijfheid en de verticale demping van de grond. De eigenschappen van de ligger worden bepaald door de parameters EI , ηGA en μ , respectievelijk de buigstijfheid en de afschuifstijfheid van de ligger en de meotrillende massa van de grond en van de tunnel per eenheid van lengte.

Een overgang wordt bij deze modellering op twee manieren gemodelleerd namelijk:

1. Als een scharnierende (punt)oplegging van de ligger;
2. Als een inklemming van de ligger.

Het model van de ingeklemde ligger is te zien in figuur 1.



Figuur 1 Elastisch ondersteunde ligger bij ingeklemde overgang

In fase 2 van het onderzoek naar het dynamisch gedrag van de HSL-Boortunnel is het model van de tunnel uitgebreid. De tunnel wordt hier gemodelleerd als een oneindig lange continue buis in een lineair elastische halfruimte (zie "Ligger en buis in lineair elastische halfruimte", C.P.L. Walschot, 29 mei 2000).

De eigenschappen van de buis worden bepaald door de parameters E_{beton} , ν_{beton} , ρ_{beton} , χ_{beton} , respectievelijk de elasticiteitsmodulus, de dwarscontractie, de soortelijke massa en de materiaaldemping van het beton waarvan de tunnelwand is gemaakt.

De eigenschappen van de grond worden bepaald door de parameters E_{grond} , ν_{grond} , ρ_{grond} , χ_{grond}^i , respectievelijk de elasticiteitsmodulus, de dwarscontractie, de soortelijke massa en de materiaaldemping van de grond.

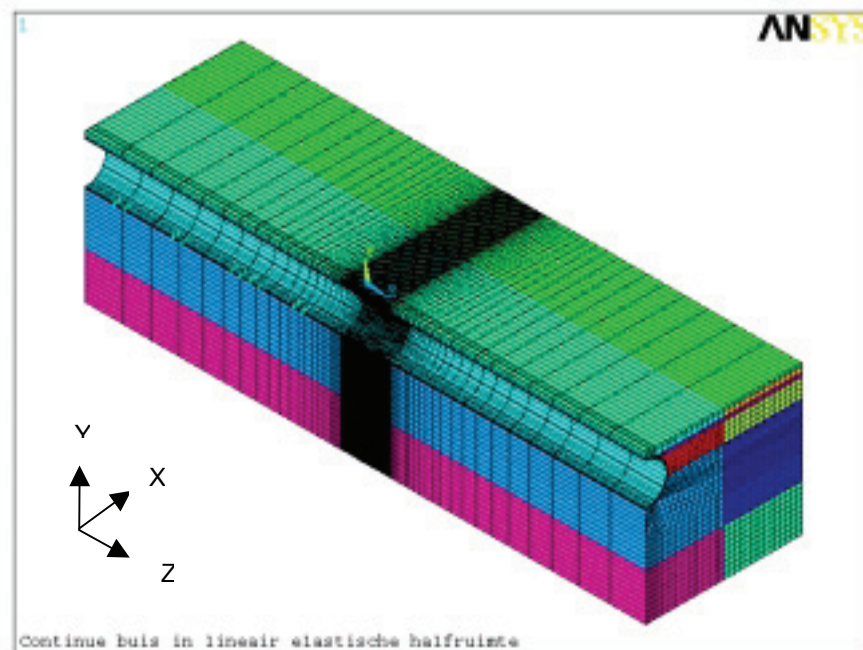
In fase 3 wordt het dynamisch gedrag van de HSL-Boortunnel bij een overgang onderzocht. De tunnel wordt gemodelleerd als in fase 2. De overgang wordt hierbij gemodelleerd door een bepaalde doorsnede van de tunnelbuis in te klemmen.

Buis in lineair elastische halfruimte

2.1.1. Geometrie

De buis in de lineair elastische halfruimte is gemodelleerd met behulp van eindige elementen. De lineair elastische halfruimte is gemodelleerd als een blok met een eindig volume. Het blok is opgebouwd uit meerdere lagen, overeenkomstig de verschillende grondlagen rondom de tunnel.

Ter plaatse van de tunnelbuis is in het blok in horizontale richting een cilindervormige uitsparing aangebracht. In deze uitsparing is de continue buis aangebracht. De buis sluit direct aan op de omringende grond. De grond en de buis zijn gemodelleerd met 8 – knoops solid elementen. Het model van de buis in de lineair elastische halfruimte is te zien in figuur 2.



Figuur 2 Buis in lineair elastische halfruimte met overgang

2.1.2. Randvoorwaarden

Om een starre overgang in de buis te kunnen modelleren, zijn alle vrijheidsgraden (u_x , u_y , u_z) van de knooppunten van de doorsnede van de buis in het vlak in het midden van het model vastgelegd. De doorsnede van de buis kan daardoor in zijn geheel niet meer bewegen en wordt op die manier als het ware ingeklemd.

De knooppunten in het voorvlak en in het achtervlak van het model zijn vastgelegd in de lengterichting (u_z) van de tunnel. Deze vlakken kunnen dus vrij bewegen in de horizontale- en verticale richting.

De knooppunten op de vlakken aan de onderzijde en de rechterzijde van het model hebben oneindige randvoorwaarden. Deze maken het mogelijk dat de opgewekte trillingsgolven in de grond door kunnen lopen over de grenzen van het model heen. De trillingsgolven worden dan niet gereflecteerd aan de randen van het model.

De vrijheidsgraden van de knooppunten die per vlak zijn vastgelegd, staan in tabel 1.

Tabel 1: vastgelegde vrijheidsgraden

Vlak / vrijheidsgraad	u_x	u_y	u_z	Oneindig
Boven	---	---	---	---
Achter	---	---	X	---
Midden (alleen doorsnede buis)	X	X	X	---
Voor	---	---	X	---
Links	X	---	---	---
Rechts	---	---	---	X
Onder	---	---	---	X

X = vastgelegde vrijheidsgraad

2.2 Afmetingen

2.2.1. Lengte

Het model is in lengterichting opgebouwd uit twee verschillende delen namelijk:

1. Een kort deel met een kleine en constante elementgrootte;
2. Twee lange delen met een naar het voor- en achtervlak toe oplopende elementgrootte.

Ad 1:

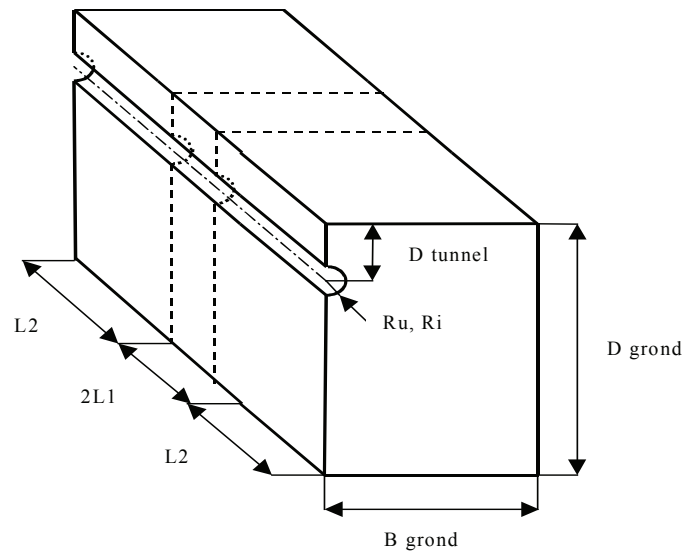
Dit deel van het model moet van voldoende lengte zijn om de relatief grote lokale vervormingen en spanningen in de buiswand ter plaatse van de overgang, goed te kunnen bepalen met de gekozen elementgrootte. De elementgrootte is zodanig gekozen dat één enkele golflengte van 3 [m] kan worden gemodelleerd met acht elementen. Deze golflengte komt overeen met de afstand tussen twee opeenvolgende assen van een draaistel van een Thalys (zie ook 2.6). De lengte van het deel met kleine elementen bedraagt 15.0 [m]. De elementgrootte in de lengterichting van de tunnel bedraagt 0.375 [m].

Ad 2:

De lengte van de andere twee delen is zodanig gekozen dat aan het begin van een berekening een aslastenstelsel van een Thalys bestaande uit een koploopbak en twee tussenloopbakken op dit deel van het model kan worden gezet (zie ook 2.6). Deze delen hebben elk een lengte van 82.5 [m].

2.2.2. Overige afmetingen

De overige afmetingen zijn te zien in figuur 3. Bijbehorende waarden staan in tabel 2.



Figuur 3 Afmetingen FE-model

Tabel 2: afmetingen FE-modellen

Maat	Betekenis	Waarde	Eenheid
B grond	Breedte grond	50	[m]
D grond	Diepte grond t.o.v. N.A.P.	50	[m]
L1	Lengte eerste deel	7.5	[m]
L2	Lengte tweede deel	82.5	[m]
Ru	Buitenstraal tunnelbuis	7.25	[m]
Ri	Binnenstraal tunnelbuis	6.65	[m]
D tun _{km29.7}	Diepte centrum tunnelbuis t.o.v. N.A.P. bij km 29.7	10.98	[m]

Het maaiveld ligt op 2.0 [m] beneden N.A.P.

2.3 Grondparameters

De grond rondom de tunnel is gemodelleerd overeenkomstig de opbouw van de grond bij km 29.7 omdat de verticale stijfheid van de grond hier de laagste waarde heeft (zie "Grondparameters", W. Gardien, 29 februari 2000). De materiaaleigenschappen van de verschillende grondlagen staan in tabel 3. Het maaiveld ligt op 2.0 [m] beneden N.A.P.

Tabel 3: Grondparameters km 29.7

	Diepte grondlaag [m]	Soortelijke massa ρ [kg/m ³]	Glijdingsmodulus G [N/m ²]	Materiaaldemping χ_i [-]	Dwars-contractie v [-]
1) Klei, zand	-2.0 tot -3.0	1550	$1.03 \cdot 10^6$	0.02	0.45
2) Zand	-3.0 tot -4.5	2000	$8.92 \cdot 10^6$	0.02	0.40
3) Veen	-4.5 tot -6.0	1050	$0.33 \cdot 10^6$	0.02	0.49
4) Klei	-6.5 tot -12.0	1460	$1.24 \cdot 10^6$	0.02	0.45
5) Zand	-12.0 tot -27.0	2010	$107 \cdot 10^6$	0.02	0.40
6) Pleistoceen zand	-27.0 tot -100.0	2000	$120 \cdot 10^6$	0.02	0.40

2.4 Tunnelparameters

Om de minst gunstige situatie met betrekking tot het dynamisch gedrag van de tunnel te kunnen simuleren, gelden de gebruikte buis- en liggerparameters voor een zo slap mogelijke tunnelbuis d.w.z. voor een tunnelbuis zonder inlay, waarbij de afzonderlijke segmenten van de tunnelwand met nokken worden verbonden. De nokken tussen de segmenten van de tunnelwand maken slechts 20 % contact.

De invloed van een reductie van het contactoppervlak tussen de nokken kan worden vertaald naar een lagere elasticiteitsmodulus van de buis (zie "Liggerparameters", C.P.L. Walschot, 29 maart 2000). De gebruikte buisparameters staan in tabel 4.

Let op: i.v.m. symmetrie (zie 2.2 en 2.3) gelden de parameters voor de halve tunnel!

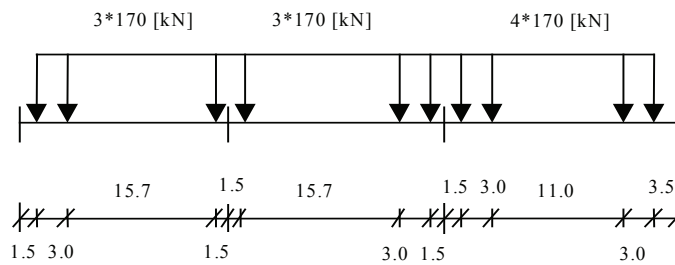
Tabel 4: Buisparameters

Parameter	Betekenis	Waarde	Eenheid
Dn	Buitendiameter	14.50	[m]
Di	Binnendiameter	13.30	[m]
E _{20%}	Elasticiteitsmodulus, 20 % contact nokken	$10.50 \cdot 10^9$	[N/m ²]
v	Dwarscontractie	0.2	[-]
ρ	Soortelijke massa	2500	[kg/m ³]

2.5 Treinbelasting

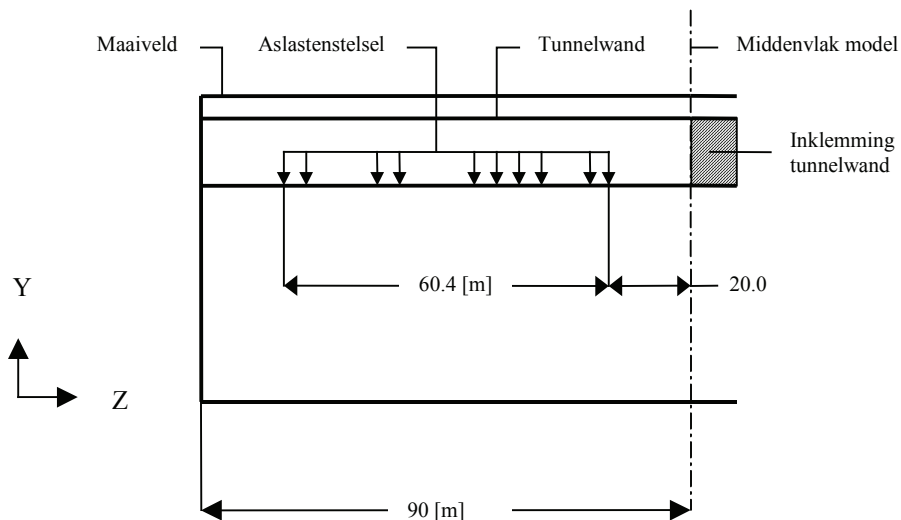
2.5.1. Belasting door Thalys

Het dynamisch gedrag van de continue buis in de lineair elastische halfruimte bij de overgang wordt bepaald door het model te belasten met het aslastenstelsel van een Thalys bestaande uit één koploopbak (rechts) en twee tussenloopbakken (links). Het aslastenstelsel is schematisch weergegeven in figuur 4.



Figuur 4 Aslastenstelsel Thalys

Het aslastenstelsel verschuift met een snelheid van 100 [m/s] in de richting van de positieve z-as van het FE-model. In figuur 5 is het aslastenstelsel schematisch weergegeven in het linker zij-aanzicht van het voorste deel van het FE-model. Aan het begin van een berekening staat de eerste aslast op 20 [m] vanaf de voorzijde van het model. In tabel 5 staan de tijdstippen waarop de assen de overgang in de tunnel passeren.



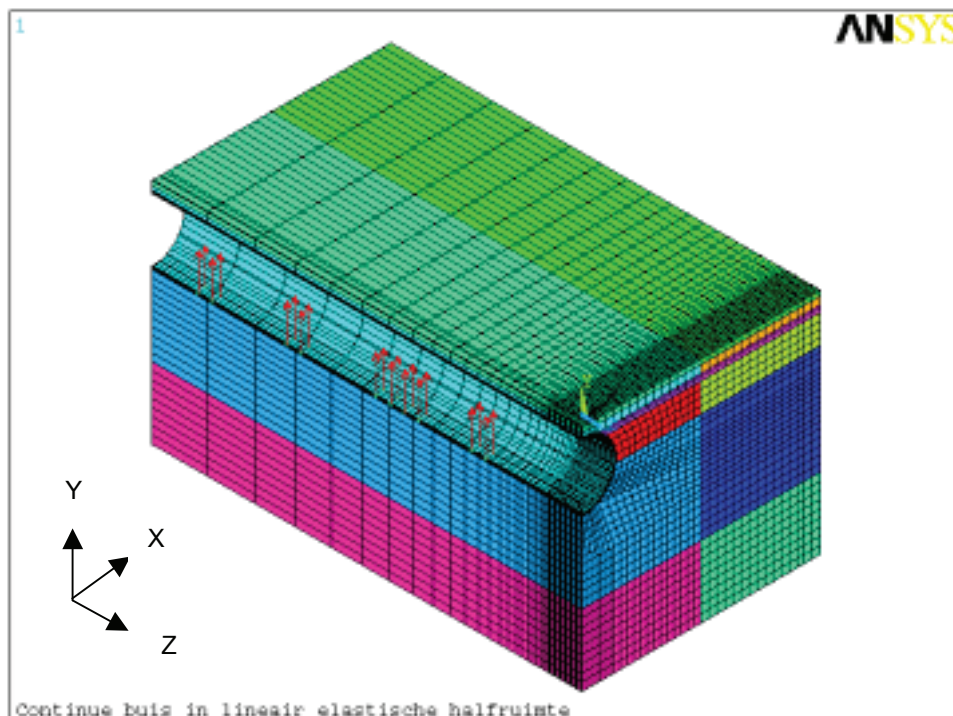
Figuur 5 Aslastenstelsel Thalys in continue buis, achterste helft FE-model

Tabel 5 passages aslasten

As	Afstand [m]	Tijdstip passage [s]
1	0	0.200
2	3	0.230
3	14	0.340
4	17	0.370
5	20	0.400
6	23	0.430
7	38.7	0.587
8	41.7	0.617
9	57.4	0.774
10	60.4	0.804

In figuur 6 is het aslastenstelsel te zien in het achterste deel van het FE-model van de buis in de lineair elastische halfruimte. Elke afzonderlijke aslast wordt gerepresenteerd door twee puntlasten (wiellasten). Eén van beide puntlasten grijpt aan op de middellijn van de onderzijde van de tunnel. De andere van beide puntlasten ligt rechts op 1.5 [m] afstand vanaf de middellijn van de onderzijde van de tunnel.

Omdat de berekeningen worden gemaakt voor de passage van een enkele trein, en omdat in het FE-model slechts de halve tunnel is gemodelleerd, bedragen de aslasten in het model niet 170 [kN] maar 85 [kN]. De puntlasten (wiellasten) bedragen daarmee dan 42.5 [kN].



Figuur 6 Aslastenstelsel Thalys in achterste helft FE-model

3 Resultaten

3.1 Criteria

De dynamische eigenschappen van de als inklemming gemodelleerde overgang in de continue buis in de lineair elastische halfruimte worden bepaald op basis van de volgende gegevens:

1. Het buigend moment in de tunneldoorsnede bij de inklemming;
2. De dwarskracht in de tunneldoorsnede bij de inklemming.

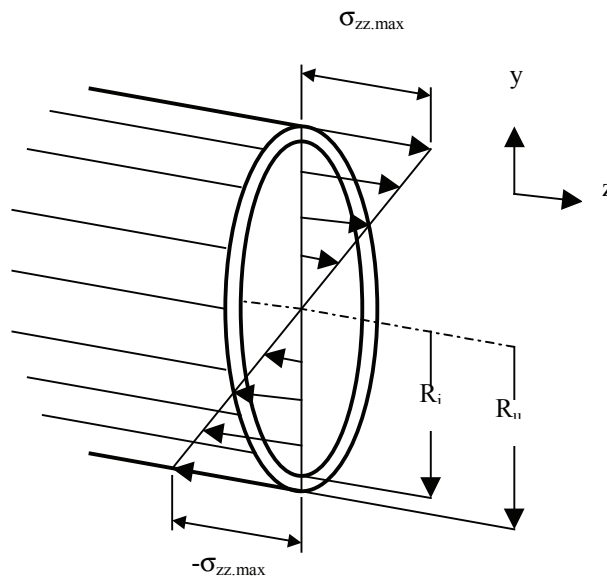
3.2 Numerieke resultaten

3.2.1. Buigend moment

Het buigend moment in de doorsnede van de tunnel ter plaatse van de inklemming kan bij benadering worden afgeleid van de maximale axiale spanning in de doorsnede. Als de tunnel wordt beschouwd als een continue buis, dan geldt voor de axiale spanning σ_{zz} als functie van het buigend moment M_b :

$$\sigma_{zz} = \frac{M_b \cdot y}{I_{zz}}$$

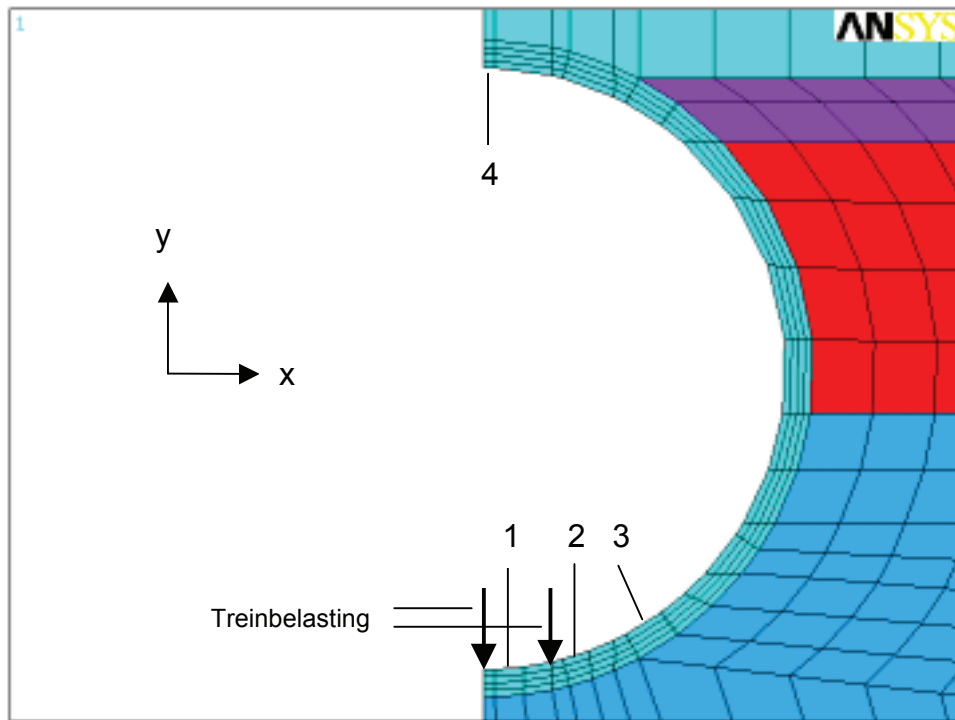
De maximale axiale spanningen treden op aan de bovenzijde en aan de onderzijde van de buis op $y = \pm R_u$. Het verloop van de axiale spanning over de doorsnede van de continue buis is schematisch weergegeven in figuur 7.



Figuur 7 Axiale spanningsverdeling

Indien de tunnel wordt gemodelleerd als een elastisch ondersteunde Timoshenko ligger in het vrije veld (zie “Dynamicaberekeningen boortunnel Groene Hart, Onderzoek naar het dynamisch liggergedrag van de tunnel bij treinpassages in het vrije veld. Modellerings als Timoshenko ligger”, ir. C.L. Kamp, 3 april 2000), dan bedraagt de maximale waarde van het buigend moment in de doorsnede van de tunnel bij een inklemming $3.2 \cdot 10^6$ [Nm] bij een treinsnelheid van 100 [m/s]. De maximale waarde van de bijbehorende axiale spanning bedraagt dan ongeveer $3.5 \cdot 10^4$ [Pa]. De berekening hiervan is uitgewerkt in bijlage 1.

De axiale spanningen in de buis die worden veroorzaakt door het passeren van het aslastenstelsel, zijn bepaald voor enkele elementen van de beschouwde doorsnede van de buis die te zien is in figuur 8. De bijbehorende elementnummers die gelden voor zowel de ingeklemde doorsnede als de normale - niet ingeklemde - doorsnede van de buis staan in tabel 6. De elementnummers lopen op in de negatieve y-richting.

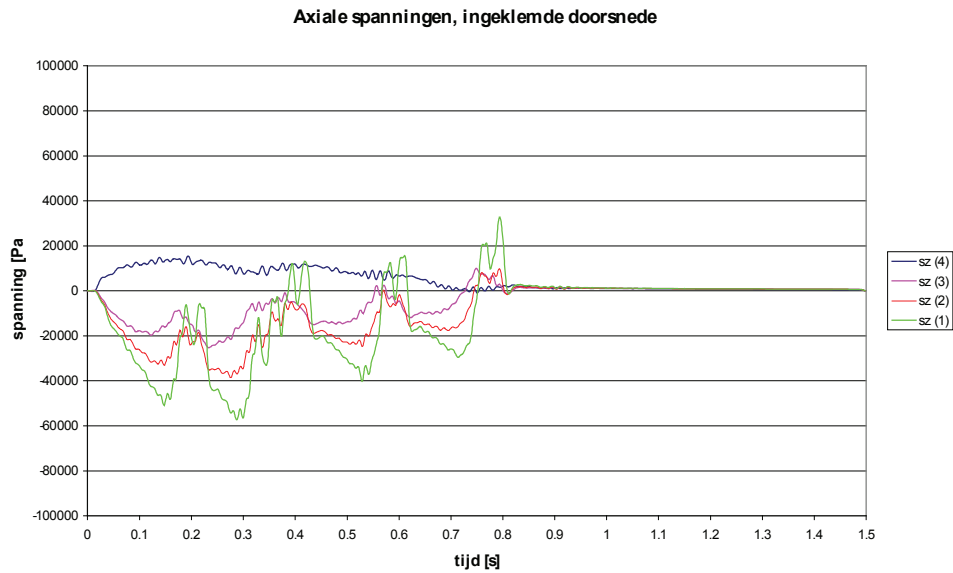


Figuur 8 (Ingeklemd) doorsnede van de buis

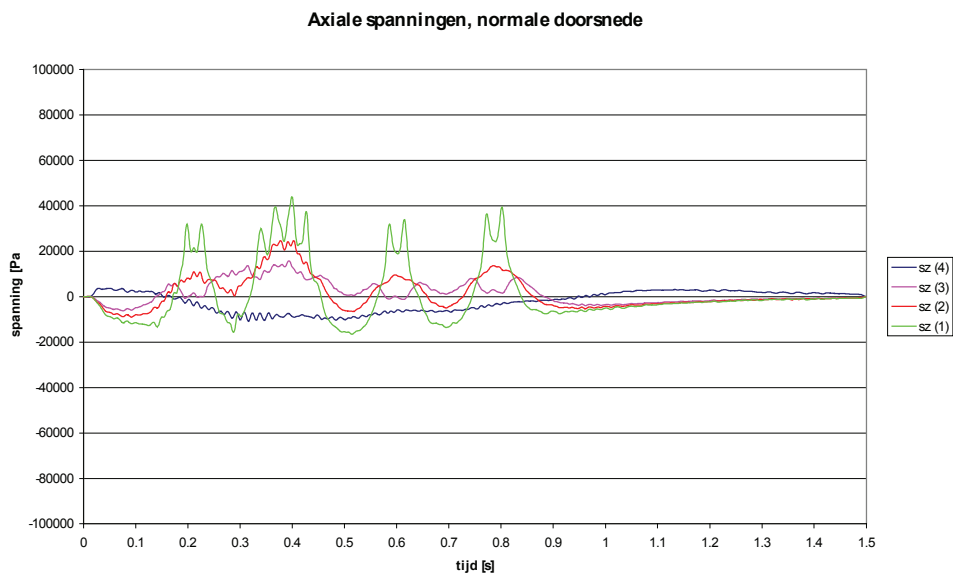
Tabel 6: Elementnummers

Positie 1	Positie 2	Positie 3	Positie 4
9081	9401	49941	1321
9101	9421	49961	1341
9121	9461	49981	1361
9141	9481	50001	1381

Het verloop van de axiale spanningen in de *ingeklemde doorsnede* die met het FE-model zijn berekend is te zien in figuur 9. Het verloop van de axiale spanningen in de *normale doorsnede* is te zien in figuur 10 (zie ook bijlage 3).



Figuur 9 Axiale spanningen, *ingeklemde doorsnede*



Figuur 10 Axiale spanningen, *normale doorsnede*

Bij de *ingeklemde doorsnede* bedraagt de axiale spanning aan de onderzijde van de buis tussen de aangrijppunten van de aslasten (positie 1) maximaal ongeveer $-6.0 \cdot 10^4$ [Pa] (drukspanning). Het patroon van het passerende aslastenstelsel is in het spanningsverloop op deze plaats vrij goed terug te zien. Aan de bovenzijde van de buis bedraagt de axiale spanning maximaal ongeveer $1.7 \cdot 10^4$ [Pa] (trekspanning).

Bij de *normale doorsnede* bedraagt de axiale spanning aan de onderzijde van de buis maximaal ongeveer $4.5 \cdot 10^4$ [Pa] (trekspanning). Ook hier is het patroon van het passerende aslastenstelsel in het spanningsverloop vrij goed terug te zien. Aan de bovenzijde van de buis bedraagt de axiale spanning maximaal ongeveer $-1.0 \cdot 10^4$ [Pa] (drukspanning). Globaal gezien zijn de axiale spanningen in de normale doorsnede ongeveer een factor 1.5 lager ten opzichte van ingeklemde doorsnede.

Als de tunnel zich zou gedragen als een Timoshenko ligger, dan zouden de axiale spanningen aan de bovenzijde en aan de onderzijde van de buis even groot en tegengesteld van richting moeten zijn (zie figuur 6). Dit geldt zowel voor de ingeklemde doorsnede als de normale doorsnede. De met het FE-model berekende axiale spanningen aan de bovenzijde en de onderzijde van de buis zijn globaal gezien inderdaad tegengesteld gericht.

Doordat echter de passerende aslasten direct aangrijpen op de onderzijde van de buis, zijn de vervormingen en spanningen daar groter dan aan de bovenzijde van de buis. Dit is een gevolg van de gekozen modellering van de tunnel als een eenvoudige continue buis. Door het ontbreken van inlay in de buis wordt de belasting door het aslastenstelsel niet gelijkmatig verdeeld over de wand van de buis. De vervormingen en spanningen aan de onderzijde van de buis zijn daardoor groter dan wanneer de inlay in de modellering zou zijn meegenomen.

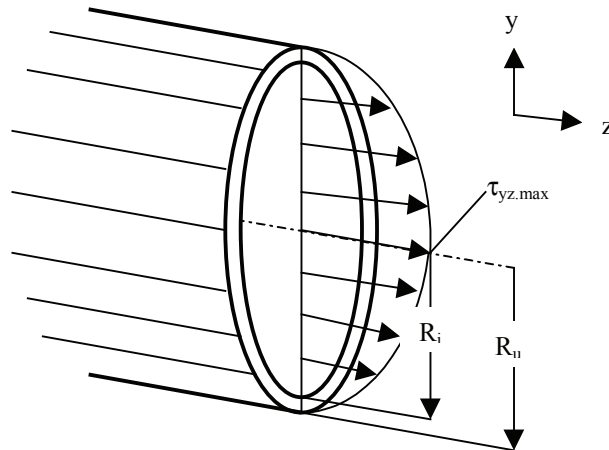
Het gegeven dat de buis voornamelijk lokaal vervormt rondom de aangrijppunten van de aslasten zorgt er ook voor dat de spanningen die met het FE-model zijn berekend, globaal gezien lager zijn dan de maximale spanning die wordt berekend uit het buigend moment in de ingeklemde doorsnede van de ligger in het vrije veld. Door de slaptte van de buiswand is het voornamelijk de buiswand zelf die vervormt aan de onderzijde van de buis. Zonder inlay in de buis worden de belastingen onvoldoende over de gehele doorsnede van de buis verdeeld om het gedrag van de buis gelijk te kunnen stellen aan dat van een Timoshenko ligger in het vrije veld. Ter illustratie is een afbeelding van de vervorming van de buis opgenomen in bijlage 5.

3.2.2. Dwarskracht

De dwarskracht in de doorsnede van de tunnel ter plaatse van de inklemming kan bij benadering worden afgeleid uit de schuifspanning in de doorsnede. Voor de maximale schuifspanning als functie van de dwarskracht geldt:

$$\tau_{xy, \max} = \frac{F}{\pi \cdot R \cdot t}$$

De maximale schuifspanning treedt op ter plaatse van de halve hoogte van de tunnel op $y = 0$. Het verloop van de schuifspanning over de doorsnede van de continue buis is schematisch weergegeven in figuur 11.



Figuur 11 Schuifspanningsverdeling

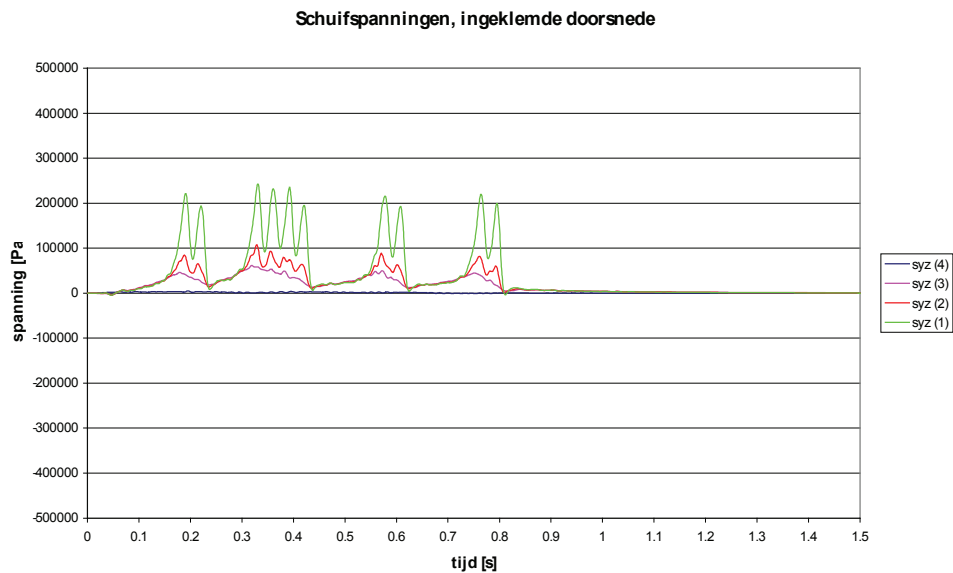
Indien de tunnel wordt gemodelleerd als een elastisch ondersteunde Timoshenko ligger in het vrije veld (zie “Onderzoek naar het dynamisch liggergedrag van de tunnel bij treinpassages in het vrije veld. Modellerings als Timoshenko ligger”, ir. C.L. Kamp, 3 april 2000), dan bedraagt de maximale waarde van de dwarskracht in de doorsnede van de buis ter plaatse van de inklemming bedraagt ongeveer $5.0 \cdot 10^5$ [N] bij een treinsnelheid van 100 [m/s]. De maximale waarde van de bijbehorende schuifspanning bedraagt dan ongeveer $2.0 \cdot 10^4$ [Pa]. De berekening hiervan is uitgewerkt in bijlage 2.

Het verloop van de schuifspanningen in de *ingeklemde doorsnede* die met het FE-model zijn berekend is te zien in figuur 12. Het verloop van de schuifspanningen in de *normale doorsnede* is te zien in figuur 13 (zie ook bijlage 4).

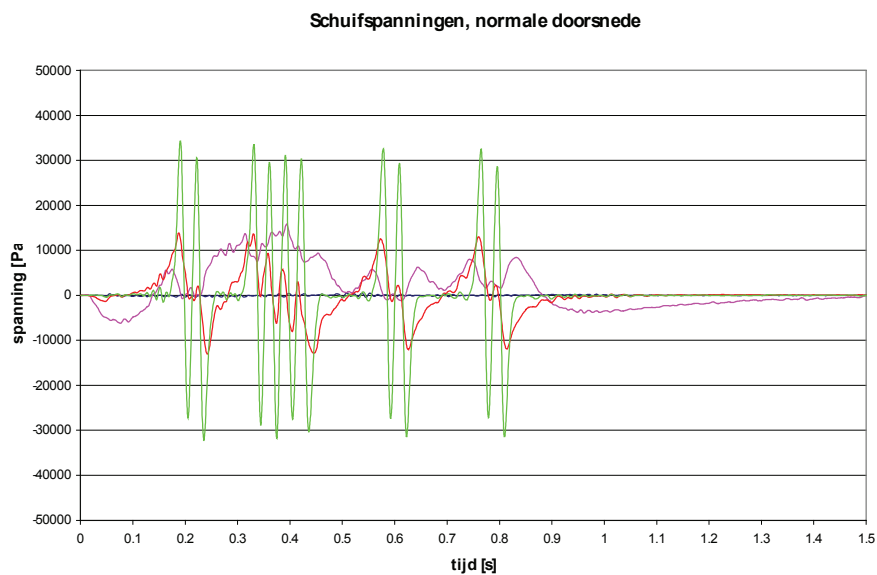
Bij de *ingeklemde doorsnede* bedraagt de schuifspanning aan de onderzijde van de buis tussen de aangrijppunten van de aslasten (positie 1) maximaal ongeveer $2.5 \cdot 10^5$ [Pa] (drukspanning). Het passeren van de aslasten is in het spanningsverloop op deze plaats zeer goed terug te zien. Ten opzichte van de schuifspanning aan de onderzijde is de schuifspanning aan de bovenzijde van de buis verwaarloosbaar.

Bij de *normale doorsnede* bedraagt de schuifspanning aan de onderzijde van de buis maximaal ongeveer $3.5 \cdot 10^4$ [Pa]. Ook hier is het passeren van de aslasten zeer goed terug te zien in het spanningsverloop. Ten opzichte van de schuifspanning aan de onderzijde is de schuifspanning aan de bovenzijde van de buis ook hier verwaarloosbaar.

Als de tunnel zich zou gedragen als een continue buis waarvan de doorsnede niet vervormt bij belasting op buiging en afschuiving (ofwel als een Timoshenko ligger), dan zou de schuifspanning aan de bovenzijde en aan de onderzijde van de buis gelijk zijn aan nul. De maximale schuifspanning treedt op ter hoogte van het midden van de buis op $y = 0$.



Figuur 12 Schuifspanningen, *ingeklemde doorsnede*



Figuur 13 Schuifspanningen, *normale doorsnede*

Uit de berekeningen met de FE-modellen volgt echter dat, net zoals dat bij de hiervoor (zie 3.2.1) besproken axiale spanningen het geval is, de schuifspanningen het grootst zijn aan de onderzijde van de buis. Doordat de passerende aslasten aangrijpen op de onderzijde van de buis, zijn de vervormingen en spanningen daar groter dan in rest van de buis.

Het grote verschil tussen de schuifspanningen bij de ingeklemde doorsnede en de normale doorsnede wordt veroorzaakt door het vrijwel directe aangrijpen van de aslasten op de elementen aan de onderzijde van de buis. Doordat alle vrijheidsgraden van deze elementen bij de ingeklemde doorsnede aan één zijde zijn vastgelegd, moeten deze elementen vrijwel de gehele belasting dragen waarmee ze op een bepaald moment worden belast. Daardoor treden hier relatief grote hoekverdraaiingen en bijbehorende schuifspanningen op. Bij de normale doorsnede wordt de belasting verspreid over een groter aantal omringende elementen. Doordat de tunnel bij de beschouwde doorsnede kan bewegen, kan de belasting door de elasticiteit van de tunnel beter worden verdeeld.

De spanningen die volgen uit de berekening voor een ligger in het vrije veld zijn niet goed vergelijkbaar spanningen die zijn berekend met de FE-modellen doordat de belasting door de aslasten in de buis ongelijkmatig wordt verdeeld. Alleen de schuifspanningen in de normale doorsnede naast de aangrijppunten van de aslasten (positie 2), komen qua orde van grootte vrij goed overeen met de spanningen die volgen uit de berekening voor een ligger in het vrije veld.

3.2.3. Samenvatting resultaten, opmerkingen

De resultaten van de berekeningen m.b.t. de spanningen zijn samengevat in tabel 7.

Tabel 7: overzicht spanningen

Moment	Analytisch (ligger in vrije veld)		FE-berekening	
	Inklemming	Normaal	Inklemming	Normaal
Positie1	-3.5*10 ⁴ [Pa]	1.15*10 ⁴ [Pa]	-5.5*10 ⁴ [Pa]	4.5*10 ⁴ [Pa]
Positie 2			-2.5*10 ⁴ [Pa]	1.7*10 ⁴ [Pa]
Positie 3			1.7*10 ⁴ [Pa]	-1.0*10 ⁴ [Pa]
Dwarskracht	Inklemming	Normaal	Inklemming	Normaal
Positie1	2.0*10 ⁴ [Pa]	0.76*10 ⁴ [Pa]	---	---
Positie 2			6.0*10 ⁵ [Pa]	1.5*10 ⁴ [Pa]
Positie 3			2.5*10 ⁵ [Pa]	3.5*10 ⁴ [Pa]

Buigend moment / axiale spanningen

De axiale spanningen in de beschouwde doorsnede van de buis door buiging die volgen uit de FE-berekeningen, komen voor zowel de ingeklemde doorsnede als de normale doorsnede qua orde van grootte overeen met de waarden die volgen uit de analytische berekeningen voor de ligger in het vrije veld. De verschillen worden veroorzaakt door een ongelijkmatige spreiding van de belasting en daaruit volgende lokale vervormingen van de buiswand.

Dwarskracht / schuifspanningen

De schuifspanningen in de beschouwde doorsnede van de buis door de dwarskracht die volgen uit de FE-berekeningen, zijn bij de ingeklemde doorsnede veel groter dan de waarden die volgen uit de analytische berekeningen voor de ligger in het vrije veld. De schuifspanningen in de beschouwde normale doorsnede komen qua orde van grootte wel overeen met de waarden die volgen uit de analytische berekeningen voor de ligger in het vrije veld. De verschillen worden ook hier veroorzaakt door een ongelijkmatige spreiding van de belasting en daaruit volgende lokale vervormingen van de buiswand.

Tunnelparameters

Bij de FE-berekeningen moet worden opgemerkt dat de elasticiteitsmodulus van de buiswand is bepaald aan de hand van de reductie van de axiale stijfheid van de tunnel door het beperkte contactoppervlak van de nokken tussen de afzonderlijke segmenten van de tunnel (zie ook 2.5). Het materiaal van de buiswand is hierbij isotroop verondersteld. In feite geldt de gecorrigeerde elasticiteitsmodulus echter alleen in de langsricting (z-richting) van de buis. Doordat de elasticiteitsmodulus bij de veronderstelde isotropie lager is in alle richtingen, zijn de berekende (lokale) vervormingen groter dan wanneer anisotrope materiaaleigenschappen voor de buiswand zouden zijn aangenomen. De gemodelleerde situatie is daardoor in dynamisch opzicht minder gunstig dan de werkelijke situatie. Indien voor de buiswand anisotrope eigenschappen worden verondersteld, wordt de buis stijver. De belasting wordt dan beter over de gehele doorsnede van de buis verdeeld.

Inlay

Door het ontbreken van inlay wordt de buis minder stijf ten opzichte van een buis met inlay. Naast de reeds genoemde slechte spreiding van de belasting over de tunnelwand is het berekende dynamisch gedrag van de tunnel door de gereduceerde stijfheid daardoor ook minder gunstig dan de werkelijke situatie.

4 Samenvatting, conclusies, aanbevelingen

Voor de projectorganisatie Hogesnelheidslijn – Zuid is onderzoek verricht naar het dynamisch gedrag bij verticale overgangen van de boortunnel onder het Groene Hart. De tunnel is hiertoe met eindige elementen gemodelleerd als een continue buis in een lineair elastische halfruimte. De verticale overgang is gemodelleerd als een inklemming van de buis.

Het gedrag van de tunnel bij verticale overgangen is bepaald door de buis te belasten met een aslastenstelsel van een Thalys. Het gedrag van de buis is bepaald op basis van de buigspanning (moment) en de schuifspanning (dwarskracht) in de buis ter plaatse van de inklemming. De maximale waarde van de buigspanning in de ingeklemde doorsnede is ongeveer een factor 1.5 hoger ten opzichte van een normale – niet ingeklemde – doorsnede.

De maximale waarde van de schuifspanning in de ingeklemde doorsnede is vele malen groter ten opzichte van een normale doorsnede. De belangrijkste oorzaak hiervan zijn relatief grote lokale vervormingen van de buiswand die een gevolg zijn van de gehanteerde modellering. Deze relatief grote vervormingen van de buiswand zijn er tevens de oorzaak van dat de buis zich nabij een overgang niet gedraagt als een ingeklemde Timoshenko beam met equivalente mechanische eigenschappen.

Om een beter beeld te krijgen van het werkelijke dynamisch gedrag is het aan te bevelen om de inlay in de tunnel mee te nemen in de modellering. De belasting op de buis wordt dan gelijkmatiger verdeeld over de buiswand.

Daarnaast dienen voor de buiswand anisotrope materiaaleigenschappen te worden aangenomen. De correctie van de elasticiteitsmodulus voor de reductie van de stijfheid van de buis in langsrichting door de nokken tussen de afzonderlijke tunnelsegmenten geldt dan niet meer in de radiale- en tangentiële richting van de buis. De buis wordt daardoor stijver. De belasting wordt dan beter over de gehele doorsnede van de buis verdeeld.

Colofon

Opdrachtgever Projectorganisatie HSL-Zuid
Projectbureau Noordelijk Holland
ir. P. Javanovic

Uitgave Holland Railconsult

Grote Projecten
Vakgroep Geotechniek, Milieu, Dynamica en Vergunningen

R 2.33
Daalseplein 101
3500 GW Utrecht

Telefoon (030) 265 36 73
Telefax (030) 265 3581

Auteur ir. C.P.L. Walschot
adviseur dynamica

Projectnummer 4823 NOH

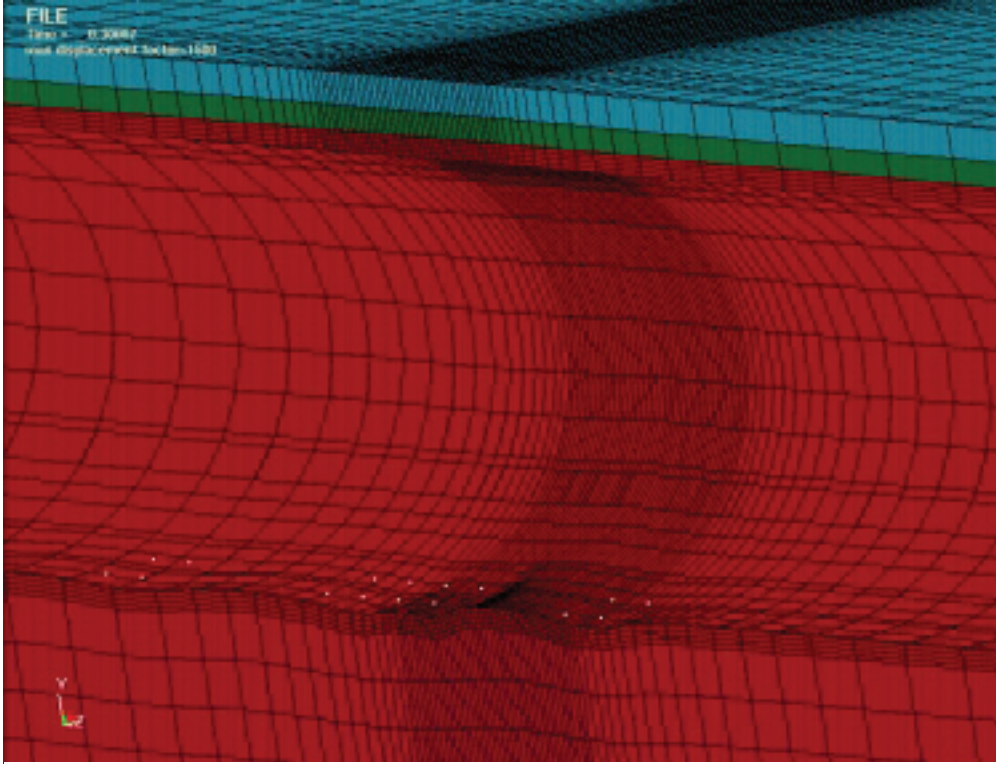
Bijlage I Buigspanningen analytisch

Bijlage II Schuifspanningen analytisch

Bijlage III Buigspanningen LS-Dyna

Bijlage IV Schuifspanningen LS-Dyna

Bijlage V Vervormingen van de buiswand



Vervorming van de buiswand op $t = 0.30$ [s]; schaalfactor 1500