

Veiligheidsniveau van bestaande geleiderailconstructies

Ing. W.H.M. van de Pol

D-2001-15

Veiligheidsniveau van bestaande geleiderailconstructies

Simulatieonderzoek op H2-niveau met een gevalideerd VEDYAC-model

Documentbeschrijving

Rapportnummer: D-2001-15
Titel: Veiligheidsniveau van bestaande geleiderailconstructies
Ondertitel: Simulatieonderzoek op H2-niveau met een gevalideerd VEDYAC-model

Auteur(s): Ing. W.H.M. van de Pol
Onderzoeksthema: Het verkeerskundig ontwerp en verkeersveiligheid
Themaleider: Ir. A. Dijkstra
Projectnummer SWOV: 69.146
Ordernummer opdrachtgever: 20002347
Opdrachtgever: Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, Bouwdienst Rijkswaterstaat

Trefwoord(en): Safety fence, program (computer), calibration, simulation, collision, car, bus, deflection, deceleration, stiffness, safety, evaluation (assessment).

Projectinhoud: In nieuwe richtlijnen voor bermbeveiligingsvoorzieningen wordt aangegeven dat het veiligheidsniveau van de Nederlandse afschermvoorzieningen, indien mogelijk, H2 zou moeten zijn. De bestaande geleiderailconstructies zijn echter niet op ware schaal op H2-niveau beproefd. Dit rapport doet verslag van simulaties van aanrijdingen op H2-niveau voor de belangrijkste bestaande geleiderailconstructies.

Aantal pagina's: 36 + 90 blz.
Prijs: f 65,-
Uitgave: SWOV, Leidschendam, 2001

Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV
Postbus 1090
2260 BB Leidschendam
Telefoon 070-3173333
Telefax 070-3201261

Samenvatting

In de nieuwe CROW-richtlijnen voor bermbeveiligingsvoorzieningen uit 2000 wordt aangegeven dat het veiligheidsniveau van de Nederlandse afschermvoorzieningen, indien mogelijk, H2 zou moeten zijn. De bestaande geleiderailconstructies zijn echter niet op H2-niveau op ware schaal beproefd. In opdracht van de Bouwdienst van Rijkswaterstaat te Apeldoorn zijn in dit onderzoek simulaties uitgevoerd om meer inzicht te verkrijgen in het veiligheidsniveau van de belangrijkste bestaande geleiderailconstructies. De volgende constructies zijn voor deze simulaties geselecteerd:

- constructies in 'aarden banen' (bermen):
 - F 2M 400-80
 - VLP 2ZC 133-80
- constructies op kunstwerken:
 - F 2DL 400-80
 - VLP 1DL 133-60R met 3-regelige leuning langs inspectiepad
 - VLP 1LV 133-60R
 - VLP 1DL 133-60R met verzwaarde leuning langs inspectiepad (H4-niveau).

De simulaties zijn gedaan voor aanrijdingen met een personenauto en een bus (H2-niveau) en in een enkel geval voor een aanrijding met een trekker met oplegger (H4-niveau). Ze geven een goed inzicht in de mogelijkheden van de geselecteerde geleiderailconstructies.

Voor de personenauto werkt alleen de F 2M 400 constructie echt als een flexibele constructie. De ASI-waarde voldoet aan niveau A (≤ 1). De andere constructies werken voor de personenauto als verstijfd tot sterk verstijfd; de ASI-waarden hiervan voldoen aan niveau B ($\leq 1,4$). Ook de als flexibel aangegeven F 2DL 400 constructie werkt voor de personenauto als verstijfd. Dit komt doordat de lassen van de DL-lascode in de loop der tijd verzwaard zijn van 3 mm naar 4 mm.

De beide als flexibel aangegeven geleiderailconstructies voldoen volgens de simulaties niet op H2-niveau; ze weerstaan een aanrijding met een bus niet. De andere vier constructies werken wel goed op H2-niveau.

De VLP 1DL 133 met verzwaarde leuning zou aan het H4-niveau kunnen voldoen, op voorwaarde dat de voetplaat van de leuning sterk genoeg aan het kunstwerk verankerd kan worden. Deze verankeringen zijn niet in dit simulatieonderzoek meegenomen.

Simulaties van een aanrijding met een bus op de twee 'flexibele' geleiderailconstructies zijn nogmaals uitgevoerd met nieuwe invoerparameters.

Deze parameters zijn berekend uit aanvullende metingen van de torsiestijfheid en de buigstijfheid van de betreffende liggers. Volgens deze nieuwe simulaties weerstaat de F 2M 400 constructie wel een aanrijding met een bus. De bus kantelt echter tijdens de aanrijding. Bij de F 2DL 400 constructie rijdt de bus nog steeds door de constructie heen.

Simulatie met een diagonaal in het middenveld van het liggerelement heeft wel het gewenste resultaat bij de flexibele constructies. De constructies voldoen dan wel aan de NEN-EN-norm. In werkelijkheid bestaan flexibele constructies met een diagonaal echter niet.

Inhoud

1.	Inleiding	7
2.	Criteria	9
3.	Simulatiemodel geleiderailconstructie	10
3.1.	De geleiderailconstructie	10
3.2.	Modellering geleiderailconstructie	10
3.3.	Paalweerstand	13
3.4.	Stijlweerstand	14
3.5.	Leuningweerstand	16
3.5.1.	Drie-regelige leuning	16
3.5.2.	Verzwaarde leuning	17
3.6.	Resultaten geselecteerde proeven op ware schaal	18
4.	Resultaten verificatiesimulaties	20
5.	Simulatiereultaten bestaande geleiderailconstructies	23
5.1.	Simulaties in aarden banen	23
5.1.1.	De F 2M 400-80 constructie	23
5.1.1.1.	Simulatie met de personenauto	23
5.1.1.2.	Simulatie met de bus	24
5.1.2.	De VLP 2ZC 133-80 constructie	24
5.1.2.1.	Simulatie met de personenauto	24
5.1.2.2.	Simulatie met de bus	24
5.2.	Simulaties op kunstwerken	25
5.2.1.	De F 2DL 400-80 constructie	25
5.2.1.1.	Simulatie met de personenauto	25
5.2.1.2.	Simulatie met de bus	25
5.2.2.	De VLP 1DL 133-60R constructie met 3-regelige leuning	25
5.2.2.1.	Simulatie met de personenauto	25
5.2.2.2.	Simulatie met de bus	25
5.2.3.	De VLP 1LV 133-60R constructie	26
5.2.3.1.	Simulatie met de personenauto	26
5.2.3.2.	Simulatie met de bus	26
5.2.4.	De VLP 1DL 133-60R constructie met verzwaarde leuning	26
5.2.4.1.	Simulatie met de personenauto	26
5.2.4.2.	Simulatie met de trekker-opleggercombinatie	27
6.	Verslag buig- en torsieproeven en nieuwe simulaties	28
6.1.	Inleiding	28
6.2.	Verwerking resultaten buigproef naar VEDYAC-model	28
6.2.1.	Ligger zonder diagonaal	28
6.2.2.	Ligger met diagonaal	29
6.3.	Verwerking resultaten torsieproef naar VEDYAC-model	30
6.4.	Vergelijking traagheidsmomenten	30
6.5.	Resultaten simulaties	32
6.5.1.	De F 2M 400-80 constructie	32
6.5.2.	De F 2DL 400-80 constructie	32
6.6.	Conclusies	32

7. Discussie	33
8. Conclusies	35
Literatuur	36
Bijlage 1 t/m 10	37

1. Inleiding

Sinds de komst van de NEN-EN 1317 normen is Rijkswaterstaat zich gaan bezighouden met de vraag of de bestaande afschermvoorzieningen voldoen aan deze normen. In de nieuwe richtlijnen uit het *Handboek bermbeveiligingsvoorzieningen* (CROW, 2000) wordt gesteld dat het veiligheidsniveau voor de Nederlandse afschermvoorzieningen, indien mogelijk, aan het veiligheidsniveau H2 uit de NEN-EN 1317-2 norm moeten voldoen.

Nieuwe typen afschermvoorzieningen zijn reeds op het H2-niveau getest, zowel door simulaties als door proeven op ware schaal. De bestaande typen nog niet. In dit onderzoek zijn een aantal simulaties uitgevoerd, waardoor kan worden vastgesteld in hoeverre de bestaande geleiderailconstructies zich verhouden tot de veiligheidsniveaus van de NEN-EN-normen.

De simulaties zijn bedoeld om vast te stellen of de bestaande geleiderailconstructies (kunnen) voldoen aan het H2-niveau. Zijn de simulatie-resultaten voldoende hoopgevend, dan kunnen proeven op ware schaal op H2-niveau worden uitgevoerd. Zijn ze onvoldoende hoopgevend, dan moeten aanpassingen worden uitgevoerd, of moet worden geaccepteerd dat de bestaande geleiderailconstructies niet aan het H2-niveau voldoen, maar aan een lager niveau (bijvoorbeeld H1-niveau).

De simulaties zijn uitgevoerd met een VEDYAC-model dat is ontwikkeld voor geleiderailconstructies (zie bijvoorbeeld Van der Sluis, 2000). Dit model is in het onderhavige onderzoek daartoe eerst gevalideerd door een groot aantal proeven op ware schaal uit het verleden te simuleren. Ook resultaten uit de literatuur zijn gebruikt voor validatie van het VEDYAC-model.

In de jaren 1964 tot 1969 zijn een groot aantal proeven op ware schaal uitgevoerd op diverse typen geleiderailconstructies *in aarden banen*. Een deel van de resultaten hiervan zijn gebruikt om het VEDYAC-model van de geleiderailconstructie te valideren. Er zijn twee typen constructies geselecteerd, één met breekbouten en één zonder breekbouten.

Naast deze proeven op ware schaal is in de literatuur gezocht naar resultaten van slingerproeven op palen van geleiderailconstructies. De resultaten uit dit onderzoek zijn ook gebruikt voor het valideren van het VEDYAC-model.

In de jaren 1970 tot 1973 zijn een groot aantal proeven op ware schaal uitgevoerd op diverse typen geleiderailconstructies *op kunstwerken*. Op de stijlen van deze constructies zijn in eerste instantie een groot aantal slingerproeven uitgevoerd om de werking van deze stijlen vast te leggen.

In dit rapport wordt zowel verslag gedaan van deze verificatiesimulaties als van de simulaties op de bestaande geleiderailconstructies die door de Bouwdienst zijn geselecteerd:

- constructies in aarden banen:
 - F 2M 400-80
 - VLP 2ZC 133-80
- constructies op kunstwerken:
 - F 2DL 400-80
 - VLP 1DL 133-60R met 3-regelige leuning langs inspectiepad

VLP 1LV 133-60R

VLP 1DL 133-60R met verzwaarde leuning langs inspectiepad op H4-niveau.

Daarnaast bevat dit rapport een verslag van aanvullende buig- en torsieproeven die zijn uitgevoerd op de leggers van de twee als flexibel aangemerkte constructies F 2M 400-80 en F 2DL 400-80. De meetwaarden hiervan zijn gebruikt voor nieuwe simulaties op deze twee constructies.

2. Criteria

De eisen die in het algemeen aan afschermvoorzieningen worden gesteld gelden ook voor de geleiderailconstructie.

Deze eisen zijn:

1. Het botsende voertuig mag niet door de constructie breken, eroverheen rijden of kantelen, dan wel eronderdoor schieten.
2. Letsel van inzittenden, schade aan de constructie en schade aan het voertuig moeten zo beperkt mogelijk blijven.
3. Het voertuig mag niet door de constructie in de eigen verkeersstroom worden teruggekaatst.
4. De constructie moet na een aanrijding zijn werking zo veel mogelijk blijven behouden.
5. De begin- en eindverankering mogen niet bezwijken.

Behalve op deze algemene eisen wordt bij de beoordeling van de constructie ook gelet op de voertuigbewegingen, zoals de rol-, dump- en gierhoeken (roll, pitch en yaw), en ook op het *loskomen* van het voertuig van de weg.

Voorts wordt nog gelet op de voertuigvertragingen, die in een ASI-waarde wordt vertaald. In de NEN-EN-normen¹ (CEN, 1998a; 1998b) worden twee ASI-waarden gegeven:

- niveau A: $ASI \leq 1$
- niveau B: $ASI \leq 1,4$.

Deze waarden gelden voor het zwaartepunt van het voertuig. De veronderstelling hierbij is, dat indien de vertragingen beneden niveau A blijven, er geen ernstig letsel van inzittenden zou hoeven optreden. Voor stijve en starre constructies wordt ook niveau B nog acceptabel geacht. De ASI-waarden worden alleen voor de personenauto's bepaald.

De geleiderailconstructie moet voldoen aan het H2-niveau uit de NEN-EN 1317-1 en NEN-EN 1317-2 norm. Dit wil zeggen dat de TB11- en TB51-tests (aanrijdingen met respectievelijk een personenauto en een bus) moeten worden doorstaan.

Het VEDYAC-model moet voldoen aan de resultaten van de proeven op ware schaal. Dit houdt in dat het VEDYAC-model moet worden gevalideerd met geselecteerde resultaten van de proeven uit *Resultaten van proeven op geleiderailconstructies vertaald naar simulatiemodel geleiderailconstructie* (Van de Pol, 1998a). Deze resultaten komen overeen met de NEN-EN 1317-2 tests TB11, TB22, TB31, TB32, TB41 en TB42. De paalweerstand wordt verkregen uit de notitie *Palenproeven* van Van de Pol (1998b), waarin een aantal slingerproeven op palen beschreven staat.

Met behulp van het gevalideerde VEDYAC-model is vervolgens ook de TB51-simulatie uitgevoerd ter controle van de eis van H2-niveau uit de richtlijnen.

¹ Het CEN (Comité Européen de Normalisation) stelt voor Europa normen op waaraan afschermvoorzieningen moeten voldoen; ook wordt bepaald onder welke inrijcondities de proeven op deze afschermvoorzieningen moeten worden uitgevoerd.

3. Simulatiemodel geleiderailconstructie

3.1. De geleiderailconstructie

Het simulatiemodel van de geleiderailconstructie heeft een lengte van 100 meter. Het begin en eind van de geleiderailconstructie is in de grond verankerd. De constructie is dubbel uitgebouwd en de paalafstand bedraagt 4 meter.

De geleiderailconstructie is opgebouwd uit twee rails die onderling zijn verbonden door afstandhouders (deze samenstelling wordt verder aangeduid als ligger). Per raillengte zijn drie afstandhouders aangebracht. De paal is in het midden van de afstandhouder bevestigd. De paal is in de grond geplaatst. De diepte van de paal in de grond bedraagt 1 meter. Hierdoor ontstaat een constructie die 0,8 meter breed is en 0,75 meter boven het maaiveld uitsteekt.

Tijdens de aanrijding komen beide rails onder spanning te staan. Ongeveer de halve lengte van de rails in de golf staat onder druk en de andere helft onder trek. De beide rails worden door de afstandhouders op constante afstand van elkaar gehouden. De verbinding tussen rail en afstandhouder bestaat uit een scharnier met enige weerstand (de omgezette plaat van 3 mm). Het traagheidsmoment van de ligger zal dus iets meer dan 2 maal het traagheidsmoment van de enkele rail zijn.

Het traagheidsmoment van de ligger wordt vergroot door het toepassen van een diagonaal in het middenveld van het liggerelement. Het vergroten van het traagheidsmoment wordt begrensd door de sterkte van de verbinding rail-afstandhouder-diagonaal. Bij het overschrijden van een bepaalde belasting, gaat de verbindingbout door de rail 'snijden'.

Tijdens een proef op ware schaal zijn de M16 4.6 bouten afgeschoven. De M16 8.8 bouten sneden door de rail.

3.2. Modelleringsgeleiderailconstructie

De proeven op ware schaal zijn uitgevoerd op een 100 meter lange constructie. De uiteinden van de constructie zijn in de grond verankerd. De botsing vindt op één derde van het begin van de constructie plaats. Bij de modellering wordt van deze situatie uitgegaan.

Er is gekozen voor een eenvoudig model van de geleiderailconstructie. De constructie is opgedeeld in elementlengten van 4 meter (raillengte) zonder een onderverdeling in massa's. Het model blijft hierdoor veel stabiel in zijn rekenstappen.

Bij de 'vertaling' van de geleiderailconstructie in het VEDYAC-simulatiemodel worden de volgende aannamen gedaan:

- Gezien de vormgeving/werking van de geleiderailconstructie treedt er geen breuk op in het krachtenpatroon in de y- en z-richting in de elementverbinding.
- Gezien de vormgeving/werking van de geleiderailconstructie treedt er geen breuk op in het momentenpatroon om de x- en y-as in de elementverbinding.

- Gezien de vormgeving/werking van de geleiderailconstructie brengen de langskrachten in de rails geen moment op, omdat de verbinding rail-afstandhouder als een scharnier werkt.
- Gezien de vormgeving/werking van de geleiderailconstructie met diagonaal zijn de langskrachten in de rails maximaal de 'de doorsnijdingskracht' van de (diagonaal)bout door de rail. Deze kracht levert het maximaal haalbare moment om de z-as op, dat in de ligger mogelijk is.
- Gezien het bewegingspatroon van de paal in de grond verplaatst het draaipunt van de paal in de grond zich niet.
- Gezien het bewegingspatroon van de paal in de grond kan de paal alleen uit de grond getrokken worden, de kracht in z-richting breekt.
- Gezien het bewegingspatroon van de paal in de grond treedt er geen breuk op in de krachten in x- en y-richting.
- Gezien het bewegingspatroon van de paal in de grond treedt er geen breuk op in de momenten om de x-, y- en z-as.

Contactgeometrie

Het contact tussen voertuig en geleiderailconstructie vindt plaats tussen de voorste rail en het plaatwerk van het voertuig. De rail wordt in het model vertegenwoordigd door een POLYHEDRON en het plaatwerk door CYLINDERS. Het contact tussen de achterste rail en de grond vindt op gelijke wijze plaats. De grond wordt vertegenwoordigd door een PLANE en de rail door een CYLINDER. Bij voldoende uitbuiging van de constructie kunnen de wielen van het voertuig de palen raken. Dit contact wordt tot stand gebracht door de POLYHEDRONS aan de paal en de CYLINDERS aan de wielen. Wanneer de constructie tijdens de aanrijding tevens voldoende is gekanteld, kunnen de wielen ook op de achterste rail komen te rijden. Dit contact wordt tot stand gebracht door een POLYHEDRON aan de achterste rail en de CYLINDER aan het wiel.

Stijfheid en sterkte

De elementen worden door een POINT aan elkaar verbonden. Zie voor een overzicht van deze POINT-verbindingen *Afbeelding 1.1 (Bijlage 1)*. Het POINT ligt in het hart van de twee rails en de drie afstandhouders en ligt 0,61 meter boven maaiveld. In het POINT zijn de sterkte-eigenschappen van de rails ondergebracht.

De palen worden door een POINT aan de vaste ondergrond verbonden. Het POINT ligt 0,7 meter onder maaiveld en functioneert tevens als draaipunt van de paal in de grond. In het POINT is de paalweerstand van de paal in de grond ondergebracht. Ook de draagkracht van de paal is hier ondergebracht.

De verbinding tussen de rails wordt door 2 maal 8 M16 4.6 bouten tot stand gebracht. De verbinding breekt door het afschuiven van deze bouten dan wel door uitscheuren van de rail zelf. In onderstaande tabellen zijn alle (theoretisch) berekende dan wel aangenomen waarden van deze POINT-verbinding samengebracht. In *Tabel 3.1* zijn de waarden samengebracht **zonder** de invloed van de diagonaal in elk middenveld van de ligger en in *Tabel 3.2* zijn de waarden samengebracht **met** de invloed van de diagonaal in elk middenveld van de ligger. De berekeningen zelf worden in *Bijlage 9* gegeven.

Kracht-component	k [N/m]	d [Ns/m]	el+ [N]	b+ [m]	el- [N]	b- [m]
in x-as	1,5E8	1,8E4	3,1E5	0,02	-3,1E5	-0,02
in y-as	5,5E8	3,2E4	1,1E6	0,02	-1,1E6	-0,02
in z-as	5,5E8	3,2E4	1,1E6	0,02	-1,1E6	-0,02
Moment-component	k [Nm/rad]	d [Nms/rad]	el+ [Nm]	b+ [rad]	el- [Nm]	b- [m]
om x-as	4,3E1	1,0E1	4,3E1	1	-4,3E1	-1
om y-as	6,1E6	3,3E3	2,0E5	0,3	-2,0E5	-0,3
om z-as	4,5E5	9,0E2	1,5E4	0,3	-1,5E4	-0,3

Tabel 3.1. *Parameters van de POINT-verbinding tussen de elementen.*

Door in elk middenveld (per railengte) van de ligger een diagonaal aan te brengen wordt de ligger stijver. Dit is weergegeven in *Tabel 3.2.*

Kracht-component	k [N/m]	d [Ns/m]	el+ [N]	b+ [m]	el- [N]	b- [m]
in x-as	1,5E8	1,8E4	3,1E5	0,02	-3,1E5	-0,02
in y-as	5,5E8	3,2E4	1,1E6	0,02	-1,1E6	-0,02
in z-as	5,5E8	3,2E4	1,1E6	0,02	-1,1E6	-0,02
Moment-component	k [Nm/rad]	d [Nms/rad]	el+ [Nm]	b+ [rad]	el- [Nm]	b- [m]
om x-as	4,3E1	1,0E1	4,3E1	1	-4,3E1	-1
om y-as	6,1E6	3,3E3	2,0E5	0,3	-2,0E5	-0,3
om z-as	4,1E5	9,0E2	1,4E4	0,3	-1,4E4	-0,3

Tabel 3.2. *Parameters van de POINT-verbinding tussen de elementen met invloed van de diagonaal in elk middenveld.*

In de verbindingen tussen de rails is enige speling aanwezig. De invloed van deze speling is in *Tabel 3.3.*

Krachtcomponent	fa+ [N]	p [m]	fa- [N]	p [m]
in x-as	2,4E4	0,004	-2,4E4	0,004
Momentcomponent	fa+ [Nm]	p [rad]	fa- [Nm]	p [rad]
om z-as	1,7E4	0,057	-1,7E4	-0,057

Tabel 3.3. *Parameters van de POINT-verbinding tussen de elementen, die de invloed van de speling en de wrijving weergeven.*

In dit eenvoudig model bestaat een geleiderailconstructie alleen uit elementen die met POINTS aan elkaar zijn verbonden. Testruns hebben uitgewezen dat deze eenvoudige vertaling gelijkwaardige resultaten geeft aan een veel gecompliceerder model, waarbij elke boutverbinding als een POINT-verbinding wordt weergegeven en elk constructieonderdeel (rail/afstandhouder/paal) een eigen massa heeft. De gevoeligheid voor eigenfrequenties is in het eenvoudige model veel kleiner.

3.3. Paalweerstand

De geselecteerde paalweerstand uit het rapport *Palenproeven* zijn in de onderstaande *Tabel 3.4* samengebracht. Een overzicht van het totaal beschikbare materiaal wordt in *Bijlage 10* gegeven.

Grondsoort zand	Paal		Stijfheid grond bij		Kracht gemiddeld [kN]	Verplaatsing	
	massa [kg]	breedte [mm]	piekkr. [kN/m]	verplaatsing [kN/m]		d ₁ [m]	d ₂ [m]
Vaste zandgrond							
INP-140 paal	24,3	66	792	21,2	15,28	0,021	0,422
INP-100 paal	14,2	50	409	17,6	14,05	0,045	0,484
76 ∅ x 5 paal	14,9	76	333	12,5	10,27	0,044	0,422
SWOV-paal	14,9	33	190	12,6	5,60	0,065	0,288
Losse zandgrond							
INP-140 paal	24,3	66	428	???	7,03	0,023	0,324
76 ∅ x 5 paal + bol	14,9	76	323	???	5,47	0,039	0,409

Tabel 3.4. *Verzameltabel van de resultaten (gemiddelde waarden) van de proeven met de stalen palen in vaste en losse zandgrond.*

De resultaten van de palenproeven komen redelijk overeen met de grondsituatie op het proefterrein 'de Vlasakkers' te Amersfoort. In eerste instantie zal de grond vast geweest zijn en na het vele gebruik meer los, ook vanwege het ingraven van de Wiegelbollen en de schotels. Voor de vertaling van deze paalweerstand naar VEDYAC-invoer is aangenomen dat voor de verschillende gebruikte paalvormen bij de proeven op ware schaal, de verschillen in paalweerstand niet groot zijn geweest. Van de bovenstaande gegevens is een gemiddelde genomen. Als enige invloed is losse of vaste grond genomen. *Afbeelding 1.2 (Bijlage 1)* geeft een (geschematiseerde) kracht-verplaatsingsdiagram van de beide uitgevoerde slingerproeven. De onderbroken lijn is een mogelijke vertaling naar VEDYAC-invoer. Deze gegevens gelden voor de bewegingsrichting van de palen. Voor het VEDYAC-model is dit de y-richting, de uitbuigrichting van de constructie. De gegevens voor de andere richtingen (x en z) zijn berekend of aangenomen. In deze berekeningen is voor de paal de maatvoering van de SWOV-paal aangehouden. De berekeningen worden in *Bijlage 9* gegeven.

De vertaling naar het VEDYAC-model voor de simulaties met losse grond staat in *Tabel 3.5*.

Kracht-component	k [N/m]	d [Ns/m]	el+ [N]	b+ [m]	el- [N]	b- [m]
in x-as	2,6E5	6E2	1E5	0,9	-1E5	-0,9
in y-as	2,6E5	6E2	1E5	0,9	-1E5	-0,9
in z-as	1E5	5E1	2E4	0,9	-4E4	-0,9
Moment-component	k [Nm/rad]	d [Nms/rad]	el+ [Nm]	b+ [rad]	el- [Nm]	b- [m]
om x-as	1E5	1E2	7,2E3	2	-7,2E3	-2
om y-as	1E5	1E2	6E3	2	-6E3	-2
om z-as	1E5	1E2	6E3	2	-6E3	-2

Tabel 3.5. *Parameters van de POINT-verbinding tussen de paal en de losse zandgrond.*

De vertaling naar het VEDYAC-model voor de simulaties met vaste grond staat in *Tabel 3.6*.

Kracht-component	k [N/m]	d [Ns/m]	el+ [N]	b+ [m]	el- [N]	b- [m]
in x-as	3,7E5	8E2	1E5	0,9	-1E5	-0,9
in y-as	3,7E5	8E2	1E5	0,9	-1E5	-0,9
in z-as	1E5	5E1	2E4	0,9	-4E4	-0,9
Moment-component	k [Nm/rad]	d [Nms/rad]	el+ [Nm]	b+ [rad]	el- [Nm]	b- [m]
om x-as	1E5	1E2	1,6E4	2	-1,6E4	-2
om y-as	1E5	1E2	6E3	2	-6E3	-2
om z-as	1E5	1E2	6E3	2	-6E3	-2

Tabel 3.6. *Parameters van de POINT-verbinding tussen de paal en de vaste zandgrond.*

De grote van de paalweerstand is voornamelijk afhankelijk van de volgende grootheden:

- paalvorm (profiel, breedte, slankheid, snijdend, lengte);
- grondsoort (zand, klei, leem);
- samenstelling van de grond (stenen, ingeklonken);
- weersgesteldheid (vocht, temperatuur);
- wrijving paaloppervlak - grondsoort.

Op de wijze waarop deze grootheden hun invloed uitoefenen wordt in dit rapport niet nader ingegaan. Hiervoor wordt verwezen naar het rapport *Palenproeven* (Van de Pol, 1998).

3.4. Stijlweerstand

In *Afbeeldingen 1.3 en 1.4 (Bijlage 1)* zijn de geschematiseerde kracht-verplaatsingsdiagrammen van de stijlen van de te simuleren geleiderail-constructies opgenomen. Deze kracht-verplaatsingsdiagrammen vormen de basis voor de invoergegevens voor het VEDYAC-model.

Uit NEN-EN 5190 blijkt dat de lassen voor de IPE-100-stijlen 5 mm bedragen. Alleen voor de DL-lascode wordt 4 mm aangehouden. De plaatjes zijn ook 4 mm. De geselecteerde geleiderailconstructies hebben de LV5-las en de DL4/4-las.

De LV5-las is een asymmetrische las en is bedoeld voor de zijberm, van één zijde aanrijdbaar. De belangrijkste parameters zijn de kracht in y-as en het moment om de x-as. De kracht vanuit de aanrijdzijde is veel groter dan van de andere kant, achterflens niet gelast. Deze kracht is gelijk aan de kracht van de L4-las.

Beide parameters zijn door de slingerproeven bepaald. Beide andere krachten en momenten zijn minder bepalend voor de werking van de constructie. De grootte van deze parameters zijn geschat. De kracht in de x-as is kleiner en de kracht in de z-as zal zeker gelijk zijn aan de kracht in de y-as. De berekeningen zijn gedaan door Iv-Infra (2000).

In Tabel 3.7 zijn de invoergegevens van de LV5-las gegeven.

Kracht-component	k [N/m]	d [Ns/m]	el+ [N]	b+ [m]	el- [N]	b- [m]
in x-as	2,6E6	6E2	4,0E4	0,2	-4,0E4	-0,2
in y-as	2,6E6	6E2	4,0E4	0,2	-4,0E4	-0,2
in z-as	2,6E6	5E1	4,0E4	0,2	-4,0E4	-0,2
Moment-component	k [Nm/rad]	d [Nms/rad]	el+ [Nm]	b+ [rad]	el- [Nm]	b- [m]
om x-as	2,7E5	1E2	2,0E4	,3	-7,2E3	-,3
om y-as	1E5	1E2	6E3	,2	-6E3	-,2
om z-as	1E5	1E2	6E3	,2	-6E3	-,2

Tabel 3.7. Parameters van de POINT-verbinding van de LV5-las tussen de stijl en de voetplaat van de stijl op kunstwerken.

In Tabel 3.8 zijn de invoergegevens van de nieuwe L-las, de LL3/4-las gegeven. In deze tabel zijn alleen de parameters verwerkt van de verkleinde vrije ruimte tot 10 mm.

Kracht-component	k [N/m]	d [Ns/m]	el+ [N]	b+ [m]	el- [N]	b- [m]
in x-as	5,2E5	6E2	2,8E4	0,2	-2,8E4	-0,2
in y-as	5,2E5	6E2	2,2E4	0,2	-2,2E4	-0,2
in z-as	5,2E5	5E1	2,8E4	0,2	-2,8E4	-0,2
Moment-component	k [Nm/rad]	d [Nms/rad]	el+ [Nm]	b+ [rad]	el- [Nm]	b- [m]
om x-as	9,3E4	1E2	9,4E3	,2	-9,4E3	-,2
om y-as	6E4	1E2	6E3	,2	-6E3	-,2
om z-as	6E4	1E2	6E3	,2	-6E3	-,2

Tabel 3.8. Parameters van de POINT-verbinding van de LL3/4-las tussen de stijl en de voetplaat van de stijl (vrije ruimte 10 mm) op kunstwerken.

3.5. Leuningweerstand

Uit de berekeningen van de telefaxberichten Iv/Bd-Swov-02 en Iv/Bd-Swov-03 zijn vertalingen gemaakt naar de invoergegevens voor het VEDYAC-model. Deze vertalingen gelden voor de stijlen en regels voor de drie-regelige leuning en de stijlen en regels voor de verzwaarde leuning. Uit de beschikbare gegevens is gekozen voor de moment-rotatiediagrammen met versteviging van het materiaal zonder invloed van de speling. Dit geldt voor zowel de regels als de stijlen. De berekeningen zijn gedaan door Iv-Infra (2000).

3.5.1. Drie-regelige leuning

In onderstaande *Tabellen 3.9 en 3.10* zijn de parameters van de regel en de stijl opgenomen, die als invoergegeven voor het VEDYAC-model dienen.

Kracht-component	k [N/m]	d [Ns/m]	el+ [N]	b+ [m]	el- [N]	b- [m]
in x-as	1,1E6	6E2	1,2E5	0,9	-1,2E5	-0,9
in y-as	1,1E6	6E2	4,3E4	0,9	-4,3E4	-0,9
in z-as	1,1E6	5E1	4,3E4	0,9	-4,3E4	-0,9
Moment-component	k [Nm/rad]	d [Nms/rad]	el+ [Nm]	b+ [rad]	el- [Nm]	b- [m]
om x-as	3,8E7	1E2	2,1E3	,2	-2,1E3	-,2
om y-as	1E7	1E2	2E3	,2	-2E3	-,2
om z-as	1E7	1E2	2E3	,2	-2E3	-,2

Tabel 3.9. *Parameters van de POINT-verbinding tussen de regels (57x2,9 buis) van de drie-regelige leuning.*

Kracht-component	k [N/m]	d [Ns/m]	el+ [N]	b+ [m]	el- [N]	b- [m]
in x-as	1,1E6	6E2	2,7E5	0,9	-2,7E5	-0,9
in y-as	1,1E6	6E2	2,7E5	0,9	-2,7E5	-0,9
in z-as	1,1E6	5E1	4,7E5	0,9	-4,7E5	-0,9
Moment-component	k [Nm/rad]	d [Nms/rad]	el+ [Nm]	b+ [rad]	el- [Nm]	b- [m]
om x-as	3,7E6	1E2	5,9E3	,2	-5,9E3	-,2
om y-as	1E5	1E2	6E3	,2	-6E3	-,2
om z-as	1E5	1E2	6E3	,2	-6E3	-,2

Tabel 3.10. *Parameters van de POINT-verbinding van de las tussen de stijl (100 x 20 plaat) en de voetplaat van de drie-regelige leuning.*

3.5.2. Verzwaarde leuning

In onderstaande *Tabellen 3.11 t/m 3.13* zijn de parameters van de regels en de stijl opgenomen, die als invoergegeven voor het VEDYAC-model dienen.

Kracht-component	k [N/m]	d [Ns/m]	el+ [N]	b+ [m]	el- [N]	b- [m]
in x-as	1,1E7	6E2	2,6E2	0,2	-2,6E5	-0,2
in y-as	1,1E6	6E2	7,8E4	0,2	-7,8E4	-0,2
in z-as	1,1E6	5E1	7,8E4	0,2	-7,8E4	-0,2
Moment-component	k [Nm/rad]	d [Nms/rad]	el+ [Nm]	b+ [rad]	el- [Nm]	b- [m]
om x-as	2,1E8	1E2	7,4E3	,2	-7,4E3	-,2
om y-as	1E8	1E2	7,1E3	,2	-7,1E3	-,2
om z-as	1E8	1E2	7,1E3	,2	-7,1E3	-,2

Tabel 3.11. *Parameters van de POINT-verbinding tussen de regels (80x80x3,6 kokerprofiel) van de verzwaarde leuning.*

Kracht-component	k [N/m]	d [Ns/m]	el+ [N]	b+ [m]	el- [N]	b- [m]
in x-as	5,0E7	6E2	3,2E2	0,2	-3,2E5	-0,2
in y-as	2,1E7	6E2	1,3E5	0,2	-1,3E5	-0,2
in z-as	1,1E6	5E1	6,5E4	0,2	-6,5E4	-0,2
Moment-component	k [Nm/rad]	d [Nms/rad]	el+ [Nm]	b+ [rad]	el- [Nm]	b- [m]
om x-as	5,0E8	1E2	1,2E4	,2	-1,2E4	-,2
om y-as	6,1E8	1E2	1,6E4	,2	-1,6E4	-,2
om z-as	7,1E8	1E2	2,6E4	,2	-2,6E4	-,2

Tabel 3.12. *Parameters van de POINT-verbinding tussen de regel (120x60x4 kokerprofiel) van de verzwaarde leuning.*

Kracht-component	k [N/m]	d [Ns/m]	el+ [N]	b+ [m]	el- [N]	b- [m]
in x-as	1,1E7	6E2	1,4E5	0,2	-1,4E5	-0,2
in y-as	1,1E7	6E2	2,7E5	0,2	-2,7E5	-0,2
in z-as	1,1E7	5E1	6,5E5	0,2	-6,5E5	-0,2
Moment-component	k [Nm/rad]	d [Nms/rad]	el+ [Nm]	b+ [rad]	el- [Nm]	b- [m]
om x-as	5,0E6	1E2	1,1E4	,2	-1,1E4	-,2
om y-as	1E7	1E2	6E4	,2	-6E4	-,2
om z-as	1E6	1E2	6E3	,2	-6E3	-,2

Tabel 3.13. *Parameters van de POINT-verbinding van de las tussen de stijl (2 x 100 x 50 x 5 kokerprofiel) en de voetplaat van de verzwaarde leuning.*

3.6. Resultaten geselecteerde proeven op ware schaal

Uit de resultaten van de geselecteerde proeven op ware schaal in aarden banen zijn twee groepen van aanrijdingen geselecteerd. De ene groep omvat de aanrijdingen in losse grond en de andere groep omvat de aanrijdingen in vaste grond. Elke groep is onderverdeeld in vier typen van

zwaarte van aanrijding; de botsenergie van de aanrijding bepaalt in welk van deze vier groepen de aanrijding is opgenomen.

De verdeling naar botsenergie is zo dicht mogelijk gekozen bij die van TB-aanrijdingen uit de NEN-EN 1317-2 norm.

Tabel 3.14 geeft een overzicht van de geselecteerde groepen van proeven op ware schaal, de gemiddelde resultaten daarvan en de simulaties die moeten worden uitgevoerd voor de verificatie van het VEDYAC-model.

De waarden uit *Tabel 3.14* zijn *gemiddelden* van de verschillende groepen van proeven. In *Afbeelding 1.5* van *Bijlage 1* zijn deze waarden grafisch weergegeven. De statische uitbuigingen zijn uitgezet tegen de botsenergie. In de *Afbeeldingen 1.6 en 1.7* zijn de waarnemingen van *alle afzonderlijke* proeven uitgezet. Met cirkels is aangegeven welke proeven tot een groep behoren. Hieruit blijkt dat voor drie groepen maar een zeer beperkt aantal waarnemingen aanwezig zijn. Het aantal waarnemingen voor de andere vijf groepen is redelijk. Uit de afbeeldingen blijkt dat de proeven op ware schaal niet voor honderd procent reproduceerbaar zijn. Er ontstaat een 'wolk' van punten. Hoe meer punten in de wolk hoe nauwkeuriger het rekenkundig gemiddelde van de wolk.

Voor de situatie met vaste grond is de grafiek van *Afbeelding 1.5* redelijk nauwkeurig te bestempelen. Voor de situatie met losse grond is de grafiek veel minder nauwkeurig vast te leggen. Het eerste gedeelte van de grafiek is goed vast te stellen maar het tweede gedeelte niet. Om het verloop van de grafiek in dit tweede gedeelte te bepalen is daarom naar de verhouding tussen de statische uitbuigingen in losse grond en vaste grond gekeken. Uit *Tabel 3.14* blijkt dat deze verhouding voor de TB22-aanrijding ongeveer 1,5 : 1 is. Wordt deze verhouding op de andere drie groepen in het toegepast dan worden de statische uitbuigingen resp. $1,5 \times 90 = 135$ cm, $1,5 \times 123 = 184$ cm en $1,5 \times 154 = 231$ cm (**vet** in *Tabel 3.14*). Op deze getallen is de curve voor losse grond in *Afbeelding 1.5* gebaseerd.

De **cursief vet** gedrukte getallen in *Tabel 3.14* zijn de waarden voor de statische uitbuigingen van de TB-aanrijdingen. Deze waarden zijn afgelezen uit de twee curven van de proeven op ware schaal in *Afbeelding 1.5*. De gewone *cursieve* getallen zijn geschatte waarden.

	Inrijconditie voertuig				Uitbuiging constructie			Verhouding	
	massa [kg]	V [km/uur]	α [grad]	E_y [kNm]	statisch [cm]	dynamisch [cm]	golf [cm]	dyn./ statisch	statisch/ golf
Personenauto									
Simulatie TB22									
losse grond	1300	80	15	22	81				
vaste grond	1300	80	15	22	48				
Proef									
losse grond	1206	81	15	20	76	97	3600	1,27	1:47
vaste grond	655	86	20	23	50	63	3600	1,26	1:72
Simulatie TB11									
losse grond	900	100	20	41	124				
vaste grond	900	100	20	41	78				
Simulatie TB31									
losse grond	1500	80	20	43	128				
vaste grond	1500	80	20	43	81				
Proef									
losse grond	1185	96	20	49	135	--	4800	--	1:31
vaste grond	1354	94	20	52	90	--	3500	--	1:39
Vrachtauto									
Simulatie TB32									
losse grond	1500	110	20	82	190				
vaste grond	1500	110	20	82	123				
TB41	10000	70	8	37					
Proef									
losse grond	3500	71	20	80	184	--	5000	--	1:25
vaste grond	4050	70	20	87	128	--	3200	--	1:31
Simulatie TB42									
losse grond	10000	70	15	127	240				
vaste grond	10000	70	15	127	156				
Proef									
losse grond	3500	85	20	114	231	250	4000	1,09	1:17
vaste grond	4250	82	20	121	154	168	3800	1,09	1:25

Tabel 3.14. Gemiddelde resultaten van proeven op ware schaal, verdeeld naar de testcondities volgens de NEN-EN 1317-1 en -2 norm.

4. Resultaten verificatiesimulaties

De invoergegevens van de geleiderailconstructie uit paragraaf 3.2 en de invoergegevens van de paalweerstand uit paragraaf 3.3 zijn in het VEDYAC-model ingevoerd. Door middel van simuleren wordt gekeken in hoeverre deze gegevens corresponderen met de resultaten uit de proeven op ware schaal uit paragraaf 3.4.

Als testruns zijn de TB11-, de TB31- en de TB22-tests uit de NEN-EN 1317-2 norm uitgevoerd. Voor de vergelijking is voor de proeven op ware schaal in vaste grond gekozen. Ook de TB32-testrun is uitgevoerd. De resultaten van deze run zijn echter vergeleken met de resultaten van de proeven op ware schaal met lichte vrachtauto's. De botsenergieën van TB32 en de proef met lichte vrachtauto's komen met elkaar overeen. Deze vergelijking wordt gedaan omdat er geen resultaten van proeven op ware schaal met personenauto's met deze botsenergie zijn uitgevoerd.

In *Tabel 4.1* worden de resultaten van de eerste serie uitgevoerde simulaties en de resultaten van de proeven op ware schaal met elkaar vergeleken.

	Inrijconditie voertuig				Uitbuiging constructie			Verhouding	
	massa [kg]	V [km/uur]	α [grad]	E_y [kNm]	statisch [cm]	dynamisch [cm]	golf [cm]	dyn./statisch	statisch/golf
Personenauto									
Simulatie									
TB22	1300	80	15	22					
vaste grond	1500	80	15	25	50	63	4000	1,26	
Proef									
vaste grond	655	86	20	23	50	63	3600	1,26	1:72
Simulatie									
TB11	900	100	20	41					
TB31	1500	80	20	43					
vaste grond	900	100	20	41	68	78	4800	1,15	
vaste grond	1500	80	20	43	85	97	5600	1,14	
Proef									
vaste grond	1354	94	20	52	90	113*	3500	--	1:39
Personenauto									
Simulatie									
TB32	1500	110	20	82					
vaste grond	1500	110	20	82	120	140	8000	1,17	
Proef [#]									
vaste grond	4050	70	20	87	104	131*	3200	--	1:31

* de statische uitbuiging maal 1,26 om de dynamische uitbuiging te schatten.

resultaten van proeven op ware schaal met lichte vrachtauto's.

Tabel 4.1. *Overzicht van de koppeling tussen resultaten van de geselecteerde proeven op ware schaal en de daarbij behorende NEN-EN-testen.*

Uit de resultaten in *Tabel 4.1* blijkt dat de TB22-simulatie en proef op ware schaal goed met elkaar overeenkomen. Wat betreft de TB11- en de TB31-simulatie zijn zowel de statische als de dynamische uitbuiging aan de kleine kant, maar de golflengte is weer veel groter. Voor de TB32-simulatie geldt weer dat de statische als de dynamische uitbuiging in grootteorde redelijk voldoen, maar de golflengte is weer veel te groot. Als algemene conclusie geldt dat de ligger te stijf is en de paalweerstand wat elastischer moet zijn. De *lineaire x- en de rotatie(z-)stijfheidscoëfficiënten* van de ligger zijn met een factor 2 respectievelijk een factor 3 verkleind. Door het minder stijf maken van de ligger moeten de palen een grotere weerstand in de grond ondervinden om een gelijke uitbuiging te verkrijgen. Dit is voornamelijk tot stand gebracht door de *plasticiteitsgrens (el) en de plastische stijfheidscoëfficiënt (kp) om de x-as* aan te passen. De *plasticiteitsgrens (el)* is met een factor 2 vergroot en de *rotatiestijfheidscoëfficiënt (kp)* is met een factor 400 vergroot.

Met de aangepaste invoerwaarden is een tweede serie simulaties uitgevoerd. In *Tabel 4.2* worden de resultaten van deze tweede serie en de resultaten van de proeven op ware schaal met elkaar vergeleken.

	Inrijconditie voertuig				Uitbuiging constructie			Verhouding	
	massa [kg]	V [km/uur]	α [grad]	E_y [kNm]	statisch [cm]	dynamisch [cm]	golf [cm]	dyn./statisch	statisch/golf
Personenauto									
Simulatie									
TB22	1300	80	15	22					
vaste grond	1500	80	15	25	35	60	2800	1,26	
Proef									
vaste grond	655	86	20	23	50	63	3600	1,26	1:72
Simulatie									
TB11	900	100	20	41					
TB31	1500	80	20	43					
vaste grond	900	100	20	41	34	72	3600	1,15	
vaste grond	1500	80	20	43	56	92	3600	1,14	
Proef									
vaste grond	1354	94	20	52	90	113*	3500	--	1:39
Personenauto									
Simulatie									
TB32	1500	110	20	82					
vaste grond	1500	110	20	82	90	139	3600	1,17	
Proef [#]									
vaste grond	4050	70	20	87	104	131*	3200	--	1:31

* de statische uitbuiging maal 1,26 om de dynamische uitbuiging te schatten.

resultaten van proeven op ware schaal met lichte vrachtauto's.

Tabel 4.2. Overzicht koppeling resultaten geselecteerde proeven op ware schaal en de daarbij behorende NEN-EN testen.

Uit de resultaten van de tweede serie proeven wordt de conclusie getrokken dat de plastische *stijfheidscoëfficiënten* (*kp*) voor zowel de krachten als de momenten te klein zijn. Voor de derde serie simulaties worden deze grootheden met een factor 10 verhoogd.

In *Tabel 4.3* worden de resultaten van deze derde serie en de resultaten van de proeven op ware schaal met elkaar vergeleken.

	Inrijconditie voertuig				Uitbuiging constructie			Verhouding	
	massa [kg]	V [km/uur]	α [grad]	E_y [kNm]	statisch [cm]	dynamisch [cm]	golf [cm]	dyn./statisch	statisch/golf
Personenauto									
Simulatie									
TB22	1300	80	15	22					
vaste grond	1500	80	15	25	50	67	3600	1,34	
Proef									
vaste grond	655	86	20	23	50	63	3600	1,26	1:72
Simulatie									
TB11	900	100	20	41					
TB31	1500	80	20	43					
vaste grond	900	100	20	41	50	77	4000	1,54	
vaste grond	1500	80	20	43	78	99	4000	1,27	
Proef									
vaste grond	1354	94	20	52	90	113*	3500	--	1:39
Personenauto									
Simulatie									
TB32	1500	110	20	82					
vaste grond	1500	110	20	82	99	138	4000	1,39	
Proef [#]									
vaste grond	4050	70	20	87	104	131*	3200	--	1:31

* de statische uitbuiging maal 1,26 om de dynamische uitbuiging te schatten.

resultaten van proeven op ware schaal met lichte vrachtauto's.

Tabel 4.3. Overzicht koppeling resultaten geselecteerde proeven op ware schaal en de daarbij behorende NEN-EN testen.

Voor de simulaties met de constructies met breekbouten worden de paalweerstand van de vaste grond genomen. Het breekmoment van paal met de vaste wereld vindt echter veel eerder plaats. Uit de proeven op ware schaal blijkt dat het breken van de breekbouten plaats gaat vinden bij ongeveer de TB11-aanrijding.

5. Simulatieresultaten bestaande geleiderailconstructies

De werkgroep 'Simulatieonderzoek bestaande geleiderailconstructies op H2-niveau' heeft de volgende constructies geselecteerd om op H2-niveau te simuleren.

- in aarden banen:
 - F 2M 400-80 (zie *Afbeelding 1.8*);
 - VLP 2ZC 133-80 (zie *Afbeelding 1.9*).
- Op kunstwerken:
 - F 2DL 400-80 (zie *Afbeelding 1.10*);
 - VLP 1DL 133-60R met 3-regelige leuning langs inspectiepad (zie *Afbeelding 1.11*);
 - VLP 1LV 133-60R (zie *Afbeelding 1.12*);
 - VLP 1DL 133-60R met verzwaarde leuning langs inspectiepad op H4-niveau (zie *Afbeelding 1.13*).

De 3-regelige en de verzwaarde leuning staan op een 15 centimeter hoge schampkant. Achter de 1LV-gelaste constructie is een 15 centimeter hoge schampkant aanwezig.

De proeven op ware schaal voor de geleiderailconstructies op kunstwerken zijn uitgevoerd met lassen van 3 mm. In de loop van de tijd zijn deze lassen verzwaard. In NEN-EN 5190 wordt aangegeven dat de lassen voor de LV-las en de R-las zijn verzwaard van 3 mm naar 5 mm en voor de DL-las van 3 naar 4 mm. De 3 mm lassen zijn destijds gekozen omdat de werking van de stijlen met deze lassen redelijk overeenkwamen met de werking van de SWOV-paal. Door de verzwaring van de lassen wordt de werking van de constructies (veel) stijver.

5.1. Simulaties in aarden banen

5.1.1. De F 2M 400-80 constructie

5.1.1.1. Simulatie met de personenauto

De resultaten van de simulatie zijn ondergebracht in *Bijlage 2, Afbeeldingen 2.1 t/m 2.7*.

De aanrijding met de personenauto heeft een vloeiend verloop. Het contact tussen personenauto en constructie duurt ca. 0,7 seconde. Tijdens de aanrijding worden 10 elementen verplaatst. Dit geeft een golflengte van 40 meter. De dynamische uitbuiging bedraagt hierbij 77 centimeter. De statische uitbuiging bedraagt 51 centimeter.

De voertuigbewegingen blijven tijdens de aanrijding klein. De maximale rolhoek bedraagt 7 graden. De uitrijhoek is ca. 5 graden en wordt wat groter. Tijdens het 'rear-end' effect treedt de grootste dwarsvertraging op ongeveer 7 G. De ASI-waarde is hierbij 0,7 waarmee het voldoet aan niveau A.

5.1.1.2. *Simulatie met de bus*

De resultaten van de simulatie zijn ondergebracht in *Bijlage 2, Afbeeldingen 2.8 t/m 2.12*.

De aanrijding met de bus heeft tot gevolg dat de constructie breekt. In de simulatie rijdt de bus echter niet door de constructie heen. In hoeverre dit in de praktijk ook zal gebeuren is niet vast te stellen. Tijdens het 'rear-end' effect treedt de grootste dwarsvertraging op ongeveer 2,6 G.

5.1.2. *De VLP 2ZC 133-80 constructie*

5.1.2.1. *Simulatie met de personenauto*

De resultaten van de simulatie zijn ondergebracht in *Bijlage 3, Afbeeldingen 3.1 t/m 3.7*.

Uit de simulatie blijkt, dat de VLP 2ZC 133-80 constructie voor de personenauto als een starre constructie werkt. Het contact tussen personenauto en constructie duurt ca. 0,4 seconde. Tijdens de aanrijding worden 7 elementen verplaatst. Dit geeft een golflengte van 28 meter. De dynamische uitbuiging bedraagt hierbij 31 centimeter. De statische uitbuiging bedraagt waarschijnlijk ongeveer 20 centimeter. In de simulatie beweegt de constructie nog steeds heen en weer. De paalweerstand bevindt zich voornamelijk in het elastische gebied.

De personenauto wordt in zeer korte tijd, ca. 0,1 seconde, omgeleid. De maximale rolhoek bedraagt 10 graden. De uitrijhoek is klein; het voertuig wordt als het ware weer teruggeworpen. Tijdens de primaire botsing treedt de grootste dwarsvertraging op ongeveer 10,3 G. De ASI-waarde is hierbij 1,2, waarmee het voldoet aan niveau B.

5.1.2.2. *Simulatie met de bus*

De resultaten van de simulatie zijn ondergebracht in *Bijlage 3, Afbeeldingen 3.8 t/m 3.13*.

De aanrijding met de bus heeft een vloeiend verloop. Het contact tussen bus en constructie duurt de volle simulatietijd van 2 seconden. Tijdens de aanrijding worden 13 elementen verplaatst. Dit geeft een golflengte van 52 meter. De dynamische uitbuiging bedraagt hierbij 109 centimeter. De statische uitbuiging bedraagt 84 centimeter.

De voertuigbewegingen blijven tijdens de aanrijding klein. De maximale rolhoek bedraagt 5 graden. De uitrijhoek is klein, de bus blijft tegen de constructie kleven. Tijdens het 'rear-end' effect treedt de grootste dwarsvertraging op ongeveer 1,6 G.

5.2. Simulaties op kunstwerken

5.2.1. De F 2DL 400-80 constructie

5.2.1.1. Simulatie met de personenauto

De resultaten van de simulatie zijn ondergebracht in *Bijlage 4, Afbeeldingen 4.1 t/m 4.7*.

De aanrijding met de personenauto heeft een vloeiend verloop. Het contact tussen personenauto en constructie duurt ca. 0,4 seconde. Tijdens de aanrijding worden 8 elementen verplaatst. Dit geeft een golflengte van 32 meter. De dynamische uitbuiging bedraagt hierbij 60 centimeter. De statische uitbuiging bedraagt 27 centimeter. In de simulatie beweegt de constructie nog steeds heen en weer. Een deel van de lussen van de stijlen zijn nog niet gaan scheuren en bevinden zich nog in het elastische gebied. De personenauto wordt in korte tijd, ca. 0,13 seconde, omgeleid. De maximale rolhoek bedraagt 4 graden. De uitrijhoek is klein, ca. 2 graden, en wordt wat groter. Tijdens de primaire botsing treedt de grootste dwarsvertraging op ongeveer 7 G. De ASI-waarde is hierbij 0,9 waarmee het voldoet aan niveau A.

5.2.1.2. Simulatie met de bus

De resultaten van de simulatie zijn ondergebracht in *Bijlage 4, Afbeelding 4.8*.

De aanrijding met de bus heeft tot gevolg dat de constructie breekt. In de simulatie rijdt de bus door de constructie heen.

5.2.2. De VLP 1DL 133-60R constructie met 3-regelige leuning

5.2.2.1. Simulatie met de personenauto

De resultaten van de simulatie zijn ondergebracht in *Bijlage 5, Afbeeldingen 5.1 t/m 5.7*.

De aanrijding met de personenauto heeft een vloeiend verloop. Het contact tussen personenauto en constructie duurt ca. 0,4 seconde. Tijdens de aanrijding worden 8 elementen verplaatst. Dit geeft een golflengte van 32 meter. De dynamische uitbuiging bedraagt hierbij 36 centimeter. De statische uitbuiging bedraagt 10 centimeter. De 3-regelige leuning wordt niet geraakt.

De personenauto wordt in korte tijd, ca. 0,13 seconde, omgeleid. De maximale rolhoek bedraagt 14 graden. De uitrijhoek is klein ca. 2 graden en wordt wat groter. Tijdens de primaire botsing treedt de grootste dwarsvertraging op ongeveer 10 G. De ASI-waarde is hierbij 1,1 waarmee het voldoet aan niveau B.

5.2.2.2. Simulatie met de bus

De resultaten van de simulatie zijn ondergebracht in *Bijlage 5, Afbeeldingen 5.8 t/m 5.13*.

De aanrijding met de bus heeft tot gevolg dat de bus door de geleiderail-constructie rijdt maar door de 3-regelige leuning wordt omgeleid. Het contact tussen bus en constructie duurt de volle simulatietijd van 2 seconden. Tijdens de aanrijding worden 7 leuning-elementen verplaatst. Dit geeft een golflengte van 42 meter. De dynamische uitbuiging van de leuning bedraagt hierbij 13 centimeter. De statische uitbuiging bedraagt 12 centimeter.

De voertuigbewegingen blijven in het begin van de aanrijding klein, maar door het 'rear-end' effect worden de voertuigbewegingen heftiger. De maximale rolhoek bedraagt 14 graden en de dumphoek 12 graden. De uitrijhoek is klein, de bus blijft tegen de constructie kleven. Tijdens het 'rear-end' effect treedt de grootste dwarsvertraging op ongeveer 3,7 G.

5.2.3. De VLP 1LV 133-60R constructie

5.2.3.1. Simulatie met de personenauto

De resultaten van de simulatie zijn ondergebracht in *Bijlage 6, Afbeeldingen 6.1 t/m 6.7*.

Uit de simulatie blijkt, dat de VLP 1LV 133-60 constructie voor de personenauto als een starre constructie werkt. Het contact tussen personenauto en constructie duurt ca. 0,4 seconde. Tijdens de aanrijding worden 6 elementen min of meer verplaatsen. Dit geeft een golflengte van 24 meter. De dynamische uitbuiging bedraagt hierbij 18 centimeter. De statische uitbuiging bedraagt waarschijnlijk ongeveer 2 centimeter. In de simulatie beweegt de constructie nog steeds heen en weer. De stijlweerstand bevindt zich voornamelijk in het elastische gebied.

De personenauto wordt in zeer korte tijd, ca. 0,1 seconde, omgeleid. De maximale rolhoek bedraagt 5 graden en de dumphoek 6 graden. De uitrijhoek is klein, het voertuig wordt als het ware weer teruggeworpen. Tijdens de primaire botsing treedt de grootste dwarsvertraging op ongeveer 11,5 G. De ASI-waarde is hierbij 1,2 waarmee het voldoet aan niveau B.

5.2.3.2. Simulatie met de bus

De resultaten van de simulatie zijn ondergebracht in *Bijlage 6, Afbeeldingen 6.8 t/m 6.13*.

De aanrijding met de bus heeft een heftig verloop. Ook voor de bus is deze constructie star. Tijdens de aanrijding worden 5 elementen verplaatst. Dit geeft een golflengte van 20 meter. De dynamische uitbuiging bedraagt hierbij 39 centimeter. De statische uitbuiging bedraagt 30 centimeter. De voertuigbewegingen zijn heftig, de bus rolt om maar lijkt niet van het kunstwerk te vallen. Tijdens het 'rear-end' effect treedt de grootste dwarsvertraging op ongeveer 2 G.

5.2.4. De VLP 1DL 133-60R constructie met verzwaarde leuning

5.2.4.1. Simulatie met de personenauto

De aanrijding met de personenauto is niet uitgevoerd omdat deze simulatie gelijk is aan de simulatie uit paragraaf 5.2.2.

5.2.4.2. Simulatie met de trekker-opleggercombinatie

De resultaten van de simulatie zijn ondergebracht in *Bijlage 7, Afbeeldingen 7.1 t/m 7.10*.

De aanrijding met de trekker-opleggercombinatie heeft tot gevolg dat de trekker met oplegger door de geleiderailconstructie rijdt maar door de verzwaarde leuning wordt omgeleid. Tijdens de aanrijding worden 5 leuningelementen min of meer verplaatst. Dit geeft een golflengte van 30 meter. De dynamische uitbuiging bedraagt hierbij 12 centimeter. De statische uitbuiging bedraagt 2 centimeter. Bij de aanrijding met de trekker is de dynamische uitbuiging van de leuning 6 centimeter en statisch 0 centimeter.

De voertuigbewegingen blijven in het begin van de aanrijding klein, maar door het 'rear-end' effect van de oplegger worden de voertuigbewegingen zo heftig dat de trekker-opleggercombinatie omrolt. In de simulatie vindt het omrollen van de trekker-opleggercombinatie op het kunstwerk plaats. Tijdens de primaire botsing van de trekker treedt een dwarsvertraging op ongeveer 4 G. Tijdens het 'rear-end' effect van de oplegger treedt de grootste dwarsvertraging op ongeveer 5,9 G.

6. Verslag buig- en torsieproeven en nieuwe simulaties

6.1. Inleiding

De torsiestijfheid en de buigstijfheid van de ligger van een geleiderail-constructie lijken een (grote) invloed te hebben op het al dan niet breken van de ligger in de simulatie. De torsiestijfheid van de ligger is echter nog nooit vastgesteld. Het is niet (goed) mogelijk om de goede grootteorde van deze torsiestijfheid te berekenen.

Om deze reden zijn bij LAURA metaal BV in Eyselshoven enkele buig- en torsieproeven uitgevoerd om de traagheidsmomenten van de ligger om de x-as (lengte richting ligger) en de z-as (verticaal) vast te stellen. Dit is gedaan voor de liggers van de twee als flexibel aangemerkte constructies (F 2M en F 2DL 400-80), zowel zonder als met diagonaal. De zo verkregen traagheidsmomenten zijn gebruikt om nieuwe parameters voor de POINT-verbindingen van de elementen te berekenen. Daarmee zijn nieuwe simulaties voor de twee constructies uitgevoerd.

Voor de metingen zijn vier stukken ligger gemaakt van 12 meter lengte, twee zonder diagonaal en twee met diagonaal. Op deze vier stukken ligger zijn twee buigproeven en twee torsieproeven uitgevoerd. *Afbeelding 8.1* geeft schematisch de opstelling voor de buigproef weer.

De resultaten van de proeven zijn vastgelegd in de *Afbeeldingen 8.2 en 8.3*. Uit de resultaten blijkt, dat de invloed van de diagonaal op buiging groot is en op torsie niet aanwezig is. Uit de torsieproef blijkt, dat het torsiemoment over een grote hoekverdraaiing maar weinig toeneemt. Daarna neemt het torsiemoment sterk toe totdat vervorming optreedt. Gezien de werking van de geleiderailconstructie tijdens het uitbuigen zal de ligger alleen bij zware aanrijdingen in dit sterk stijgende gebied terechtkomen.

6.2. Verwerking resultaten buigproef naar VEDYAC-model

Voor zowel voor het traagheidsmoment voor buiging (verticale as) van de ligger zonder diagonaal als met diagonaal zijn drie metingen geselecteerd om het traagheidsmoment te berekenen. De berekeningen zijn uitgevoerd met behulp van de formules:

$$f = \frac{Pl^3}{3EI_z} \text{ en } \Phi = \frac{Pl^2}{2EI_z}, \quad \text{zie Afbeelding 8.1}$$

N.B. De metingen beginnen op 38 cm van het nulpunt, omdat het meetnulpunt 38 cm achter de ligger staat opgesteld.

6.2.1. Ligger zonder diagonaal

Uit de formule volgt dat, met $f = 0,38 \text{ m}$, $0,46 \text{ m}$, $0,64 \text{ m}$ en met $\frac{1}{2}P = 2000 \text{ N}$, 2500 N , 3500 N en met $l = \frac{1}{2}x = 6 \text{ m}$ en met $E = 210E9 \text{ N/m}^2$,

$$\begin{aligned} I_z &= 1,8045E-6 \text{ m}^4 \\ I_z &= 1,8634E-6 \text{ m}^4 \\ I_z &= 1,8750E-6 \text{ m}^4 \end{aligned} \quad \text{gemiddeld } 1,8476E-6 \text{ m}^4$$

De bijbehorende hoekverdraaiing Φ van de ligger bij maximale belasting bedraagt over 6 meter 0,167 rad. (9,3 grad).

Uit de *Afbeelding 8.2* blijkt, dat de ligger plastisch gaat vervormen bij een belasting van 3500 N ($\frac{1}{2}P$). Voor een element lengte van 4 meter is de belasting $\frac{1}{2}P = 3500 * 6 / 4 = 5250$ N. De bijbehorende hoekverdraaiing Φ is gelijk aan 0,108 rad. (6,2 grad).

Rotatiecomponenten van de POINT-verbinding tussen elementen

De berekening van het plastisch moment is uitgevoerd met behulp van de formule:

$$M_{pl} = \frac{1}{2}Pl.$$

Uit de formule volgt dat, met $\frac{1}{2}P = 5250$ N en $l = 4$ m .

$$M_{pl} = 2,1E4 \text{ Nm}$$

De *rotatiestijfheidcoëfficiënt* (k) wordt bepaald met behulp van het plastisch moment en de elastische hoekverdraaiing Φ . De *stijfheidscoëfficiënt* wordt berekend met behulp van de formule:

$$k = M_{pl} / \Phi_M$$

Uit de formule volgt dat, met $M_{pl} = 2,1E4$ Nm en $\Phi = 0,108$ rad.

$$k = 1.94E5 \text{ Nm/rad.}$$

6.2.2. Ligger met diagonaal

Uit de formule volgt dat, met $f = 0,09$ m, $0,13$ m, $0,18$ m en met $\frac{1}{2}P = 3500$ N, 5000 N, 7000 N en met $l = \frac{1}{2}x = 6$ m en met $E = 210E9$ N/m²,

$$I_z = 1,3333E-5 \text{ m}^4$$

$$I_z = 1,3187E-5 \text{ m}^4$$

$$I_z = 1,3333E-5 \text{ m}^4$$

gemiddeld $1,3284E-5 \text{ m}^4$

De bijbehorende hoekverdraaiing Φ van de ligger bij maximale belasting bedraagt over 6 meter 0,045 rad (2,58 grad).

Uit de *Afbeelding 8.2* blijkt, dat de ligger plastisch gaat vervormen bij een belasting van ca 10000 N ($\frac{1}{2}P$). Voor een element lengte van 4 meter is de belasting $\frac{1}{2}P = 10000 * 6 / 4 = 15000$ N. De bijbehorende hoekverdraaiing Φ is gelijk aan 0,043 rad. (2,5 grad).

Rotatie componenten van de POINT-verbinding tussen de elementen

De berekening van het plastische moment is uitgevoerd met behulp van de formule:

$$M_{pl} = \frac{1}{2}Pl.$$

Uit de formule volgt dat, $\frac{1}{2}P = 15000$ en $l = 4$ m.

$$M_{pl} = 6,0E4 \text{ Nm.}$$

De *rotatiestijfheidcoëfficiënt* (k) wordt bepaald met behulp van het plastisch moment en de elastische hoekverdraaiing Φ . De *stijfheidscoëfficiënt* wordt berekend met behulp van de formule:

$$k = M_{pl} / \Phi_M$$

Uit de formule volgt dat, met $M_{pl} = 6,0E4$ Nm en $\Phi = 0,043$ radiaal.

$$k = 1,4E6 \text{ Nm/rad.}$$

6.3. Verwerking resultaten torsieproef naar VEDYAC-model

Uit de resultaten van de torsieproeven op de ligger met en zonder diagonaal blijkt dat er nauwelijks verschil in uitkomst van de proef is waar te nemen. Bij het vaststellen van de benodigde grootheden wordt dan ook geen onderscheid meer gemaakt tussen wel of geen diagonaal. Bij de proef wordt de belasting (P) op een momentarm van 0,2 meter uitgeoefend. Voor het verkrijgen van het torsiemoment in de ligger moet de belasting met 0,2 worden vermenigvuldigd.

De benodigde grootheden worden uit de *Afbeelding 8.3* berekend. Het moment dat de ligger min of meer plastisch gaat vervormen is op 2500 N gesteld en de hoekverdraaiing $\Phi = 1$ radiaal. Deze hoekverdraaiing vindt plaats over 12 meter. De hoekverdraaiing over een elementlengte van 4 meter is dus éénderde radiaal.

De berekening van het plastisch moment is uitgevoerd met behulp van de formule:

$$M_{pl} = Pl$$

Uit de formule volgt dat, met $P = 2500$ N en $l = 0,2$ m.

$$M_{pl} = 5E2 \text{ Nm.}$$

De *rotatiestijfheidscoëfficiënt* (k) wordt bepaald met behulp van het plastisch moment en de elastische hoekverdraaiing Φ . De *rotatiestijfheidscoëfficiënt* (k) wordt berekend met behulp van de formule:

$$k_x = M_{xpl} / \Phi_M$$

Uit de formule volgt dat, met $M_{xpl} = 5E2$ Nm en $\Phi_M = 0,3333$ radiaal

$$k_x = 1,5E3 \text{ Nm/rad.}$$

6.4. Vergelijking traagheidsmomenten

Uit de resultaten van de buig-/torsieproeven op de ligger (*Tabel 6.1*) blijkt, dat het traagheidsmoment om de verticaal (buiging) voor de ligger zonder diagonaal gelijk is aan twee maal het traagheidsmoment van de enkele rail. De invloed van de diagonaal is groot, het traagheidsmoment wordt ca. 7 maal zo groot. De invloed van de diagonaal op het traagheidsmoment om de lengteas (torsie) is niet aanwezig. In het begin van de torsie is het traagheidsmoment iets groter dan van een enkele rail. Na een hoekverdraaiing van zo'n 60 á 70 graden wordt het traagheidsmoment steeds groter.

De beide rails worden dan (in verhouding) steeds meer op buiging belast en minder op torsie.

Traagheidsmoment	Enkele rail	Ligger zonder diagonaal	Ligger met diagonaal
I_x (oplopend tot..)	0,1111E-7 m ⁴	1,4694E-8 m ⁴ (2,0354E-7 m ⁴)	1,4694E-8 m ⁴ (2,0354E-7 m ⁴)
I_y	0,1309E-4 m ⁴		
I_z	0,0102E-4 m ⁴	1,8476E-6 m ⁴	1,3284E-5 m ⁴

Tabel 6.1. *Traagheidsmomenten verkregen uit de buig- en torsieproeven op de verschillende liggers.*

In de *Tabellen 6.2 en 6.3* zijn de berekende parameters van de POINT-verbinding tussen de elementen zonder diagonaal en met diagonaal opgenomen. De berekende parameters voor de krachtcomponent zijn overgenomen uit *Bijlage 8*. Ook de momentcomponent om de y-as is uit *Bijlage 8* overgenomen. Deze parameters behoeven niet te worden aangepast, zij zijn goed uit te rekenen.

Kracht-component	k [N/m]	d [Ns/m]	el+ [N]	b+ [m]	el- [N]	b- [m]
in x-as	1,5E8	1,8E4	3,1E5	0,02	-3,1E5	-0,02
in y-as	5,5E8	3,2E4	1,1E6	0,02	-1,1E6	-0,02
in z-as	5,5E8	3,2E4	1,1E6	0,02	-1,1E6	-0,02
Moment-component	k [Nm/rad]	d [Nms/rad]	el+ [Nm]	b+ [rad]	el- [Nm]	b- [m]
om x-as	1,5E3	1,0E1	5,0E2	1,5	-5,0E2	-1,5
om y-as	6,1E6	3,3E3	2,0E5	0,3	-2,0E5	-0,3
om z-as	1,94E5	9,0E2	2,1E4	0,3	-2,1E4	-0,3

Tabel 6.2. *Berekende parameters van de POINT-verbinding tussen de elementen zonder diagonaal.*

Kracht-component	k [N/m]	d [Ns/m]	el+ [N]	b+ [m]	el- [N]	b- [m]
in x-as	1,5E8	1,8E4	3,1E5	0,02	-3,1E5	-0,02
in y-as	5,5E8	3,2E4	1,1E6	0,02	-1,1E6	-0,02
in z-as	5,5E8	3,2E4	1,1E6	0,02	-1,1E6	-0,02
Moment-component	k [Nm/rad]	d [Nms/rad]	el+ [Nm]	b+ [rad]	el- [Nm]	b- [m]
om x-as	1,5E3	1,0E1	5,0E2	1,5	-5,0E2	-1,5
om y-as	6,1E6	3,3E3	2,0E5	0,3	-2,0E5	-0,3
om z-as	1,4E6	9,0E2	6,0E4	0,3	-6,0E4	-0,3

Tabel 6.3. *Berekende parameters van de POINT-verbinding tussen de elementen met diagonaal weergeven.*

6.5. Resultaten simulaties

6.5.1. De F 2M 400-80 constructie

De resultaten van de simulatie met de nieuwe parameters zijn ondergebracht in *Bijlage 8, Afbeeldingen 8.4 t/m 8.9*.

De aanrijding met de bus heeft een vloeiend verloop. Het contact tussen bus en constructie duurt ca. 1,3 seconde. Tijdens de aanrijding worden 13 elementen verplaatst. Dit geeft een golflengte van 52 meter. De dynamische uitbuiging bedraagt hierbij 206 centimeter. De statische uitbuiging bedraagt 144 centimeter.

De voertuigbewegingen nemen tijdens het verloop van de aanrijding toe. De rolhoek neemt zo ver toe, dat de bus kantelt. Tijdens het 'rear-end' effect treedt de grootste dwarsvertraging op ongeveer 1,6 G.

6.5.2. De F 2DL 400-80 constructie

De resultaten van de simulatie met de nieuwe parameters zijn ondergebracht in *Bijlage 8, Afbeeldingen 8.10 en 8.11*.

De aanrijding met de bus heeft tot gevolg, dat de constructie breekt. In de simulatie rijdt de bus door de constructie heen.

Het aanbrengen van de diagonaal in de ligger van de F 2DL 400 constructie heeft tot gevolg, dat de constructie tijdens de aanrijding met de bus heel blijft. De uitbuiging wordt echter heel groot.

6.6. Conclusies

De resultaten van de uitgevoerde buig-/torsieproeven hebben geleid tot een gunstig resultaat bij de simulatie tegen de F 2M 400-80 constructie. De bus wordt door de constructie omgeleid. De bewegingen van de bus zijn echter zo groot, dat de bus kantelt (*Afbeelding 8.4*). Hierdoor voldoet de constructie niet aan de NEN-norm. Het voertuig moet rechtop blijven. In hoeverre het kantelen tijdens een proef op ware schaal zal voorkomen, is niet aan te geven.

De resultaten met de simulatie tegen de F 2DL 400-80 constructie blijven negatief, de bus rijdt nog steeds door de constructie heen (*Afbeelding 8.10*). Het aanbrengen van een diagonaal in deze constructie heeft tot gevolg, dat de constructie wel goed functioneert. De te verwachten dynamische uitbuiging is groter dan 4 meter (*Afbeelding 8.11*).

7. Discussie

ASI-waarden van de personenauto uit de simulaties liggen waarschijnlijk ca. 10% hoger dan bij de proeven op ware schaal. Dit wordt veroorzaakt doordat in de simulaties de personenauto en de constructie-elementen, afgezien van de vervormingsgrootheden, volledig star zijn.

De vergelijking van de ASI-waarden voor de constructies op kunstwerken uit het verleden geldt niet voor de ASI-waarden van de nu gesimuleerde constructies. De lassen zijn immers verzwaard van 3 mm naar 5 mm.

Er bestaat verschil in werking van de geheide SWOV-paal en de gelaste IPE-100-stijl bij een aanrijding met een (lichte) personenauto. De geheide SWOV-paal komt ten opzichte van de gelaste IPE-100-stijl relatief makkelijk in beweging (weerstand laag). Tijdens het door de grond snijden van de paal wordt de weerstand tegen het door de grond snijden groter. Bij de gelaste IPE-100 stijl vindt het tegenovergestelde plaats. Het laten scheuren van de lasnaad geeft relatief veel weerstand ten opzichte van het laten bewegen van de paal door de grond. Nadat de lasnaad scheurt wordt de weerstand tegen scheuren steeds kleiner. De lasnaad wordt immers steeds kleiner.

De geheide paal geeft een lagere ASI-waarde dan een gelaste paal.

De bewegingen van de voertuigen op de kunstwerken zijn wat heftiger door het oprijden van de wielen op het wat hogere inspectiepad en door de aanwezigheid van de schampkant.

De stijllengte voor een geleiderailconstructie op een stalen kunstwerk is ca. 10 centimeter langer dan de stijllengte voor een geleiderailconstructie op een betonnen kunstwerk. Aangezien de lassen gelijk zijn, is de constructie met de kortere stijllengte wat stijver van karakter. De breekbelasting voor deze stijl ligt daardoor ca. 17 % hoger. Ten opzichte van de aanrijding met de lichte personenauto (de TB11) kan dit van grote invloed op de hoogte ASI-waarde zijn. In dit onderzoek zijn de constructies op betonnen kunstwerken gesimuleerd.

De torsiestijfheid van de ligger van de geleiderailconstructie in de lengterichting van de constructie lijkt een (grote) invloed te hebben op het al dan niet breken van de ligger in de simulatie. Deze torsiestijfheid van de ligger is echter nog nooit vastgesteld. Het berekenen van de goede grootteorde van deze torsiestijfheid is niet (goed) mogelijk.

Uit twee simulaties, de F 2M 400 constructie en de F 2DL 400 constructie, blijkt dat de gesimuleerde constructie niet aan de TB51-simulatie voldoet. Vanwege de onbekendheid van de torsiestijfheid van de liggers is het niet mogelijk om een redelijke uitspraak over het veiligheidsniveau van deze constructies te doen. Vooral nog wordt dan ook negatief geoordeeld over beide constructies.

Enkele 'laboratoriumproeven' op een lengte ligger hebben inzicht gegeven in de grootte van de torsiestijfheid in de lengterichting en de buigstijfheid om de verticaal van de ligger.

Nieuwe simulaties op de F 2M 400 constructie en de F 2DL 400 constructie laten zien dat de constructie nu de TB51-simulatie goed doorstaan, met dien verstande dat de bus bij de F 2M 400 aanrijding kantelt. Hierdoor voldoet de constructie niet aan de norm; de voertuigen mogen niet

kantelen. In hoeverre het kantelen van de bus bij een full-scale test zal gebeuren, hangt van veel bijkomende factoren af en is voor deze constructie niet goed aan te geven.

Er is een groot verschil in werking en de energieopname tussen de SWOV-paal, de SWOV-paal met stabilisatieplaat C, de DL4/4 stijl en de LV5 stijl. De SWOV-paal heeft een lage weerstand tegen uitbuigen maar wel over een grote hoekverdraaiing. De SWOV-paal met stabilisatieplaat C heeft een grote weerstand tegen uitbuigen en over dezelfde hoekverdraaiing als de SWOV-paal. De DL4/4-stijl en de LV5-stijl hebben een grote weerstand tegen uitbuigen maar over een relatief kleine hoekverdraaiing.

In onderstaande *Tabel 7.1* zijn de simulatieresultaten van de geselecteerde geleiderailconstructies nog eens samengevat. Tevens is het niveau waaraan de constructie voldoet opgenomen.

Simulatie.	Constructie	Voertuigbeweging			Dwarsvertraging	ASI	Uitbuiging constructie			Leuning			Niveau
		dump	rol	gier			stat.	dyn.	lengte	stat.	dyn.	lengte	
TB11	F 2M 400	-	7	5	7	0,7	51	77	4000	-	-	-	kantelen
TB51													
TB11	VLP 2ZC 133	-	10	1	10,3	1,2	20	31	2800	-	-	-	H2
TB51			-	5	1	1,6	-	84	109	5200	-	-	-
TB11	F 2DL 400	-	4	2	7	0,9	27	60	3200	-	-	-	H2
TB51													
TB11	VLP 1DL 133 (3 leuningen)	-	14	2	10	1,1	10	36	3200	-	-	-	H2
TB51			12	14	1	3,7	-				12	13	4200
TB11	VLP 1LV 133	6	5	1	11,5	1,2	2	18	2400	-	-	-	H2
TB51			-	90	-	2	-	30	39	2000	-	-	-
TB11	VLP 1DL 133 (verzw. leuning)	-	90	-	4	-	-	-	-	0	6	3000	-
TB81			-	90	-	5,9	-	-	-	-	2	12	3000

Tabel 7.1 *Overzicht simulatieresultaten.*

8. Conclusies

Op grond van de resultaten van de uitgevoerde simulaties zijn de volgende conclusies te trekken voor de onderzochte geleiderailconstructies.

Voor de personenauto geldt dat van de gesimuleerde geleiderailconstructies alleen de geleiderailconstructie met breekbouten, de F 2M 400, als een flexibele constructie werkt. De ASI-waarde bedraagt 0,7 en voldoet daarmee aan niveau A. De andere gesimuleerde geleiderailconstructies, de VLP 2ZC 133, de F 2DL 400, de VLP 1DL 133 met 3-regelige leuning, de VLP 1LV 133, werken als stijve tot starre constructies voor de personenauto. De ASI-waarden liggen altijd boven niveau A: $ASI \leq 1$ maar onder niveau B: $ASI \leq 1,4$.

Voor de bus geldt dat twee geleiderailconstructies, de F 2M 400 en de F 2DL 400, niet voldoen aan de aanrijding van de bus. De constructie wordt overreden of het gevaar daarvoor is groot.

Door in de ligger de invloed van de diagonaal aan te brengen - de paalafstand blijft 4 meter - worden de constructies niet meer overreden. Bij de F 2M 400 constructie kantelt de bus en voldoet deze constructie nog steeds niet aan de norm.

De andere gesimuleerde geleiderailconstructies, de VLP 2ZC 133, de VLP 1DL 133 met 3-regelige leuning en de VLP 1DL 133 met verzwaarde leuning geldt, dat de constructies voldoen aan het veiligheidsniveau H2. Bij de aanrijding met den VLP 1LV 133 constructie komt de bus op zijn kant te liggen. Hierdoor voldoet de constructie niet aan veiligheidsniveau H2.

Voor de trekker-met-oplegger-combinatie geldt, dat de VLP 1DL 133 met verzwaarde leuning alleen qua sterkte voldoet aan het veiligheidsniveau H4. Dit geldt uitsluitend voor de sterkte van de verzwaarde leuning en niet voor de geldende verankeringen in de schampkant. Deze verankeringen zijn niet in de simulatie opgenomen. Aangenomen is dat de lasverbindingen, zoals altijd is geëist, de zwakste schakel in de verbinding met het kunstwerk moeten zijn. De trekker-opleggercombinatie rolt tijdens de aanrijding om. Hierdoor voldoet de constructie niet aan het veiligheidsniveau H4.

Geen zekerheid kan worden verstrekt over het plaatselijk bezwijken van de liggers van beide typen leuning tijdens een aanrijding. De pijpprofielen van de 3-regelige leuning zullen eerder uitknikken dan de veel zwaardere kokerprofielen van de verzwaarde leuning.

Literatuur

CEN (1998a). *Road restraint systems. Part 1: Terminology and general criteria for tests methods*. NEN-EN 1317-1. Comité Européen de Normalisation CEN

CEN (1998b). *Road restraint systems. Part 2: Safety barriers. Performance classes, impact test acceptance criteria and test methods*. NEN-EN 1317-2. Comité Européen de Normalisation CEN.

CROW (2000). *Handboek bermbeveiligingsvoorzieningen*. CROW, kenniscentrum voor verkeer, vervoer en infrastructuur, Ede.

Iv-Infra b.v. (2000). *Bezwijkberekeningen van de drie-regelige leuning en de verzwaarde leuning*. L.O. 16-06-2000, L.O. 21-11-00 en L.O. 27-11-00, Papendrecht.

Nederlands Normalisatie-instituut (1993). *Geleiderail Bouwstoffen*. NEN 5190, Delft.

Pol. W.H.M. van de (1998a). *Resultaten van proeven op geleiderail-constructies vertaald naar het VEDYAC-simulatiemodel voor geleiderail-constructie*. SWOV, Leidschendam. [Interne notitie].

Pol. W.H.M. van de (1998b). *Palenproeven*. SWOV, Leidschendam. [Interne notitie].

Pol. W.H.M. van de (1996). *Verificatie-onderzoek simulatieresultaten RWS-barrier*. R-96-6. SWOV, Leidschendam.

Sluis, J. van der (2000). *De TRI-angel, geleiderail op H4-niveau*. R-2000-11. SWOV, Leidschendam.

Bijlage 1 t/m 10

1. *Afbeeldingen 1.1 t/m 1.13*
2. *Simulaties op de F 2M 400 constructie*
3. *Simulaties op de VLP 2ZC 133 constructie*
4. *Simulaties op de F 2DL 400 constructie*
5. *Simulaties op de VLP 1DL 133 constructie met 3-regelige leuning*
6. *Simulaties op de VLP 1LV 133 constructie*
7. *Simulaties op de VLP 1DL 133 constructie met verzwaarde leuning*
8. *Buig-/torsieproeven en daaruit volgende simulaties*
9. *Modellering modelcomponenten van de geleiderailconstructie*
10. *Paalweerstand*

Bijlage 1

Afbeeldingen 1.1 t/m 1.13

Afbeelding 1.1. *POINT-verbindingen geleiderailconstructie.*

Afbeelding 1.2. *Kracht-verplaatsingsdiagram SWOV-paal.*

Afbeelding 1.3. *Kracht-verplaatsingsdiagram LV5 stijl.*

Afbeelding 1.4. *Kracht-verplaatsingsdiagram LL3/4 stijl.*

Afbeelding 1.5. *Grafische weergave van de statische uitbuiging tegen debotsenergie van de proeven op ware schaal.*

Afbeelding 1.6. *Overzicht proefresultaten van de proeven op ware schaal op de geleiderailconstructies met ronde paal, platte paal en de SWOV-paal in losse grond.*

Afbeelding 1.7. *Overzicht proefresultaten van de proeven op ware schaal op de geleiderailconstructies met ronde paal, platte paal en de SWOV-paal in vaste grond.*

Afbeelding 1.8. *De F 2M 400 constructie.*

Afbeelding 1.9. *De VLP 2ZC 133 constructie.*

Afbeelding 1.10. *De F 2DL 400 constructie.*

Afbeelding 1.11. *De VLP 1DL 133 constructie met 3-regelige leuning.*

Afbeelding 1.12. *De VLP 1LV 133 constructie.*

Afbeelding 1.13. *De VLP 1DL 133 constructie met verzwaarde leuning.*

Resultaten van de TB11- en TB51-simulatie.

Afbeelding 2.1. *Overzicht aanrijding met de personenauto tegen de F 2M 400 constructie.*

Afbeelding 2.2. *Verloop van de roll-, pitch- en yawhoek van de personenauto tegen de tijd tijdens de aanrijding met de personenauto tegen de F 2M 400 constructie.*

Afbeelding 2.3. *Verloop van de snelheid tegen de tijd tijdens de aanrijding met de personenauto tegen de F 2M 400 constructie.*

Afbeelding 2.4. *Verloop van de vertragingen in het zwaartepunt van de personenauto tegen de tijd tijdens de aanrijding met de personenauto tegen de F 2M 400 constructie.*

Afbeelding 2.5. *Verloop van de krachten in het zwaartepunt van de personenauto tegen de tijd tijdens de aanrijding met de personenauto tegen de F 2M 400 constructie.*

Afbeelding 2.6. *De ASI-waarde in het zwaartepunt van de personenauto tegen de tijd tijdens de aanrijding met de personenauto tegen de F 2M 400 constructie.*

Afbeelding 2.7. *Verloop van de uitbuiging van de elementen 18, 19 en 20 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de personenauto tegen de F 2M 400 constructie.*

Afbeelding 2.8. *Overzicht aanrijding met de bus tegen de F 2M 400 constructie.*

Afbeelding 2.9. *Verloop van de roll-, pitch- en yawhoek van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de F 2M 400 constructie.*

Afbeelding 2.10. *Verloop van de snelheid tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de F 2M 400 constructie.*

Afbeelding 2.11. *Verloop van de vertragingen in het zwaartepunt van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de F 2M 400 constructie.*

Afbeelding 2.12. *Verloop van de krachten in het zwaartepunt van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de F 2M 400 constructie.*

Resultaten van de TB11- en TB51-simulatie.

Afbeelding 3.1. *Overzicht aanrijding met de personenauto tegen de VLP 2ZC 133 constructie.*

Afbeelding 3.2. *Verloop van de roll-, pitch- en yawhoek van de personenauto tegen de tijd tijdens de aanrijding met de personenauto tegen de VLP 2ZC 133 constructie.*

Afbeelding 3.3. *Verloop van de snelheid tegen de tijd tijdens de aanrijding met de personenauto tegen de VLP 2ZC 133 constructie.*

Afbeelding 3.4. *Verloop van de vertragingen in het zwaartepunt van de personenauto tegen de tijd tijdens de aanrijding met de personenauto tegen de VLP 2ZC 133 constructie.*

Afbeelding 3.5. *Verloop van de krachten in het zwaartepunt van de personenauto tegen de tijd tijdens de aanrijding met de personenauto tegen de VLP 2ZC 133 constructie.*

Afbeelding 3.6. *De ASI-waarde in het zwaartepunt van de personenauto tegen de tijd tijdens de aanrijding met de personenauto tegen de VLP 2ZC 133 constructie.*

Afbeelding 3.7. *Verloop van de uitbuiging van de elementen 18, 19 en 20 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de personenauto tegen de VLP 2ZC 133 constructie.*

Afbeelding 3.8. *Overzicht aanrijding met de bus tegen de VLP 2ZC 133 constructie.*

Afbeelding 3.9. *Verloop van de roll-, pitch- en yawhoek van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de VLP 2ZC 133 constructie.*

Afbeelding 3.10. *Verloop van de snelheid tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de VLP 2ZC 133 constructie.*

Afbeelding 3.11. *Verloop van de vertragingen in het zwaartepunt van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de VLP 2ZC 133 constructie.*

Afbeelding 3.12. *Verloop van de krachten in het zwaartepunt van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de VLP 2ZC 133 constructie.*

Afbeelding 3.13. *Verloop van de uitbuiging van de elementen 18, 19 en 20 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de VLP 2ZC 133 constructie.*

Resultaten van de TB11- en TB51-simulatie.

Afbeelding 4.1. *Overzicht aanrijding met de personenauto tegen de F 2DL 400 constructie.*

Afbeelding 4.2. *Verloop van de roll-, pitch- en yawhoek van de personenauto tegen de tijd tijdens de aanrijding met de personenauto tegen de F 2DL 400 constructie.*

Afbeelding 4.3. *Verloop van de snelheid tegen de tijd tijdens de aanrijding met de personenauto tegen de F 2DL 400 constructie.*

Afbeelding 4.4. *Verloop van de vertragingen in het zwaartepunt van de personenauto tegen de tijd tijdens de aanrijding met de personenauto tegen de F 2DL 400 constructie.*

Afbeelding 4.5. *Verloop van de krachten in het zwaartepunt van de personenauto tegen de tijd tijdens de aanrijding met de personenauto tegen de F 2DL 400 constructie.*

Afbeelding 4.6. *De ASI-waarde in het zwaartepunt van de personenauto tegen de tijd tijdens de aanrijding met de personenauto tegen de F 2DL 400 constructie.*

Afbeelding 4.7. *Verloop van de uitbuiging van de elementen 18, 19 en 20 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de personenauto tegen de F 2DL 400 constructie.*

Afbeelding 4.8. *Overzicht aanrijding met de bus tegen de F 2DL 400 constructie.*

Bijlage 5

Simulaties op de VLP 1DL 133 constructie met 3-regelige leuning

Resultaten van de TB11- en TB51-simulatie.

- Afbeelding 5.1. *Overzicht aanrijding met de personenauto tegen de VLP 1LV 133 constructie.*
- Afbeelding 5.2. *Verloop van de roll-, pitch- en yawhoek van de personenauto tegen de tijd tijdens de aanrijding met de personenauto tegen de VLP 1LV 133 constructie.*
- Afbeelding 5.3. *Verloop van de snelheid tegen de tijd tijdens de aanrijding met de personenauto tegen de VLP 1LV 133 constructie.*
- Afbeelding 5.4. *Verloop van de vertragingen in het zwaartepunt van de personenauto tegen de tijd tijdens de aanrijding met de personenauto tegen de VLP 1LV 133 constructie.*
- Afbeelding 5.5. *Verloop van de krachten in het zwaartepunt van de personenauto tegen de tijd tijdens de aanrijding met de personenauto tegen de VLP 1LV 133 constructie.*
- Afbeelding 5.6. *De ASI-waarde in het zwaartepunt van de personenauto tegen de tijd tijdens de aanrijding met de personenauto tegen de VLP 1LV 133 constructie.*
- Afbeelding 5.7. *Verloop van de uitbuiging van de elementen 18, 19 en 20 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de personenauto tegen de VLP 1LV 133 constructie.*
- Afbeelding 5.8. *Overzicht aanrijding met de bus tegen de VLP 1LV 133 constructie.*
- Afbeelding 5.9. *Verloop van de roll-, pitch- en yawhoek van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de VLP 1LV 133 constructie.*
- Afbeelding 5.10. *Verloop van de snelheid tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de VLP 1LV 133 constructie.*
- Afbeelding 5.11. *Verloop van de vertragingen in het zwaartepunt van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de VLP 1LV 133 constructie.*
- Afbeelding 5.12. *Verloop van de krachten in het zwaartepunt van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de VLP 1LV 133 constructie.*
- Afbeelding 5.13. *Verloop van de uitbuiging van de elementen 118, 119 en 120 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de VLP 1LV 133 constructie.*

Resultaten van de TB11- en TB51-simulatie.

Afbeelding 6.1. *Overzicht aanrijding met de personenauto tegen de VLP 1LV 133 constructie.*

Afbeelding 6.2. *Verloop van de roll-, pitch- en yawhoek van de personenauto tegen de tijd tijdens de aanrijding met de personenauto tegen de VLP 1LV 133 constructie.*

Afbeelding 6.3. *Verloop van de snelheid tegen de tijd tijdens de aanrijding met de personenauto tegen de VLP 1LV 133 constructie.*

Afbeelding 6.4. *Verloop van de vertragingen in het zwaartepunt van de personenauto tegen de tijd tijdens de aanrijding met de personenauto tegen de VLP 1LV 133 constructie.*

Afbeelding 6.5. *Verloop van de krachten in het zwaartepunt van de personenauto tegen de tijd tijdens de aanrijding met de personenauto tegen de VLP 1LV 133 constructie.*

Afbeelding 6.6. *De ASI-waarde in het zwaartepunt van de personenauto tegen de tijd tijdens de aanrijding met de personenauto tegen de VLP 1LV 133 constructie.*

Afbeelding 6.7. *Verloop van de uitbuiging van de elementen 18, 19 en 20 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de personenauto tegen de VLP 1LV 133 constructie.*

Afbeelding 6.8. *Overzicht aanrijding met de bus tegen de VLP 1LV 133 constructie.*

Afbeelding 6.9. *Verloop van de roll-, pitch- en yawhoek van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de VLP 1LV 133 constructie.*

Afbeelding 6.10. *Verloop van de snelheid tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de VLP 1LV 133 constructie.*

Afbeelding 6.11. *Verloop van de vertragingen in het zwaartepunt van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de VLP 1LV 133 constructie.*

Afbeelding 6.12. *Verloop van de krachten in het zwaartepunt van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de VLP 1LV 133 constructie.*

Afbeelding 6.13. *Verloop van de uitbuiging van de elementen 18, 19 en 20 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de VLP 1LV 133 constructie.*

Bijlage 7

Simulaties op de VLP 1DL 133 constructie met verzwaarde leuning

Resultaten van de TB81-simulatie.

Afbeelding 7.1. *Overzicht aanrijding met de trekker met oplegger combinatie tegen de VLP 1LV 133 constructie.*

Afbeelding 7.2. *Verloop van de roll-, pitch- en yawhoek van de trekker tegen de tijd tijdens de aanrijding met de trekker met oplegger combinatie tegen de VLP 1LV 133 constructie.*

Afbeelding 7.3. *Verloop van de snelheid van de trekker tegen de tijd tijdens de aanrijding met de trekker met oplegger combinatie tegen de VLP 1LV 133 constructie.*

Afbeelding 7.4. *Verloop van de vertragingen in het zwaartepunt van de trekker tegen de tijd tijdens de aanrijding met de trekker met oplegger combinatie tegen de VLP 1LV 133 constructie.*

Afbeelding 7.5. *Verloop van de krachten in het zwaartepunt van de trekker tegen de tijd tijdens de aanrijding met de trekker met oplegger combinatie tegen de VLP 1LV 133 constructie.*

Afbeelding 7.6. *Verloop van de roll-, pitch- en yawhoek van de oplegger tegen de tijd tijdens de aanrijding met de trekker met oplegger combinatie tegen de VLP 1LV 133 constructie.*

Afbeelding 7.7. *Verloop van de snelheid van de oplegger tegen de tijd tijdens de aanrijding met de trekker met oplegger combinatie tegen de VLP 1LV 133 constructie.*

Afbeelding 7.8. *Verloop van de vertragingen in het zwaartepunt van de oplegger tegen de tijd tijdens de aanrijding met de trekker met oplegger combinatie tegen de VLP 1LV 133 constructie.*

Afbeelding 7.9. *Verloop van de krachten in het zwaartepunt van de oplegger tegen de tijd tijdens de aanrijding met de trekker met oplegger combinatie tegen de VLP 1LV 133 constructie.*

Afbeelding 7.10. *Verloop van de uitbuiging van de elementen 118, 119 en 120 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de trekker met oplegger combinatie tegen de VLP 1LV 133 constructie.*

Bijlage 8

Buig-/torsieproeven en daaruit volgende simulaties

Resultaten van de TB51-simulaties.

Afbeelding 8.1. *Schematische weergave van de proefopstelling bij buiging ligger.*

Afbeelding 8.2. *Resultaten buigproeven.*

Afbeelding 8.3. *Resultaten torsieproeven.*

Afbeelding 8.4. *Overzicht aanrijding met de bus tegen de F 2M 400 constructie.*

Afbeelding 8.5. *Verloop van de roll-, pitch- en yawhoek van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de F 2M 400 constructie.*

Afbeelding 8.6. *Verloop van de snelheid tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de F 2M 400 constructie.*

Afbeelding 8.7. *Verloop van de vertragingen in het zwaartepunt van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de F 2M 400 constructie.*

Afbeelding 8.8. *Verloop van de krachten in het zwaartepunt van de bus tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de F 2M 400 constructie.*

Afbeelding 8.9. *Verloop van de uitbuiging van de elementen 18 t/m 23 tegen de tijd tijdens de aanrijding met de bus tegen de F 2M 400 constructie.*

Afbeelding 8.10. *Overzicht aanrijding met de bus tegen de F 2DL 400 constructie.*

Bijlage 9

Modellering modelcomponenten van de geleide-railconstructie

1. Modelcomponenten ligger

De hieronder uitgevoerde berekeningen hebben betrekking op de POINT-verbinding in de ligger van de geleiderailconstructie, de twee rails met daartussen de afstandhouders.

1.1. Modelparameters

Bij de berekeningen zijn de volgende waarden gebruikt:

Rail

oppervlak	A	$0,1410 \cdot 10^{-2}$	m^2
traagheidsmoment	I_x	$0,1111 \cdot 10^{-7}$	m^4
traagheidsmoment	I_y	$0,1309 \cdot 10^{-4}$	m^4
traagheidsmoment	I_z	$0,0102 \cdot 10^{-4}$	m^4

SWOV-paal (76,1 x 5)

oppervlak	A	$0,1117 \cdot 10^{-2}$	m^2
traagheidsmoment	I_x	$0,7100 \cdot 10^{-6}$	m^4
traagheidsmoment	I_y	$0,7100 \cdot 10^{-6}$	m^4
traagheidsmoment	I_z	$0,1420 \cdot 10^{-5}$	m^4

Bout M16 (4.6)

oppervlak	A_s	$1,57 \cdot 10^{-4}$	m^2
-----------	-------	----------------------	-------

Materiaaleigenschappen

treksterkte	σ_t	$400 \cdot 10^6$	N/m^2
stuijsterkte	σ_{st}	$400 \cdot 10^6$	N/m^2
afschuifsterkte	τ	$240 \cdot 10^6$	N/m^2 (0,6 treksterkte)
vloeisterkte	σ_{vl}	$240 \cdot 10^6$	N/m^2
elasticiteitsmodulus	E	$210 \cdot 10^9$	N/m^2
glijdingsmodulus G		$81 \cdot 10^9$	N/m^2

1.2. Lineaire componenten van de POINT-verbinding tussen elementen

De POINT-verbinding neemt krachten op in x-, y- en z-richting. Alleen in x-richting is speling aanwezig. In de koppeling zitten 2 maal 8 M16 4.6 bouten (*Afbeelding 1.1, Bijlage 1*).

Voor het uitrekenen van de benodigde verbindingsparameters is eerst nagegaan, wat de zwakste schakel in de verbinding is.

$$\text{afschuiven bouten: } F_{br} = A_{steel} \tau n$$

Uit de formule volgt, met $A_{steel} = 1,57 \cdot 10^{-4} m^2$, $\tau = 240 \cdot 10^6 N/m^2$ en $n = 8$ bouten,

$$F_{br} \text{ is } 301440 \text{ N.}$$

$$\text{stuij bouten: } F_{st} = A_{stuij} \sigma_{st} n$$

Uit de formule volgt, met $A_{\text{stuik}} = 4,8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$, $\sigma_{\text{st}} = 400 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$ en $n = 8$ bouten,

$$F_{\text{st}} \text{ is } 153600 \text{ N.}$$

Uit de berekeningen blijkt, dat in x-richting de stuikbelasting op de rail in trekrichting de zwakste schakel is en niet het afschuiven van de bouten, 153600 N tegen 301440 N. In y-, en z-richting is de verbinding veel sterker dan in de x-richting. In de simulatie wordt ervan uitgegaan, dat de boutverbinding in deze richtingen dan ook niet breekt. In beide richtingen is een waarde 564000 N genomen.

Voor de *plasticiteitsgrens* (el+ en el-) in x-richting voor trek en druk is de kleinste waarde aangehouden van de berekende waarden, zodat voor de beide rails samen de waarde van 307200 N wordt aangehouden.

Voor de y- en z-richting is de waarde 1128000 N aangehouden.

De *stijfheidscoëfficiënten* (k) worden bepaald uit de plasticiteitsgrens en de mogelijke elastische vervorming in de boutverbinding. De grootte van deze vervorming wordt op 10 mm aangenomen. De *stijfheidscoëfficiënten* worden berekend met behulp van de formule:

$$k_{k(x,y,z)} = F_{\text{pl}(x,y,z)} / f_F.$$

Uit de formule volgt dat, met $F_{\text{pl}x} = 3,1 \text{ E}5 \text{ N}$, $F_{\text{pl}(y,z)} = 1,1 \text{ E}6 \text{ N}$ en $f_F = 0,002 \text{ m}$,

$$k_{kx} \text{ is } 1,5 \text{ E}8 \text{ N/m. en}$$

$$k_{k(y,z)} \text{ is } 5,5 \text{ E}8 \text{ N/m.}$$

De *dempingscoëfficiënten* (d) zijn berekend met behulp van de formule:

$$d_{kr} = 2 \sqrt{(m \cdot n \cdot k_{k(x,y,z)})}.$$

Uit de formule volgt dat, met $m = 139 \text{ kg}$ (massa element), $n = 3$ (aantal verbindingen per element) voor het 4 meter lange element en $k_{kx} = 1,7 \text{ E}8 \text{ N/m}$ en $k_{k(y,z)} = 5,5 \text{ E}8 \text{ N/m}$,

$$d_{kr(x)} \text{ is } 5,3 \text{ E}5 \text{ Ns/m}$$

$$d_{kr(y,z)} \text{ is } 9,6 \text{ E}5 \text{ Ns/m}$$

Ten behoeve van numerieke stabiliteit in de simulatie is het gebruikelijk om voor de demping ééntiende van de kritische demping te nemen ($d_{kr}/10$). Deze waarde wordt over de drie koppelingen per element verdeeld. Voor de demping in de berekening in x-richting geldt de waarde $d = 5,3 \text{ E}5 / 30 = 1,8 \text{ E}4 \text{ Ns/m}$. en in y- en z-richting $d = 9,6 \text{ E}5 / 30 = 3,2 \text{ E}4 \text{ Ns/m}$.

De *breekverplaatsingen* (b+ en b-) in de y- en z-richting zijn groot genomen, omdat ervan wordt uitgegaan dat er geen breuk in die richtingen zullen optreden; b+ en b- zijn 0,02 meter. In x-richting is de *breekverplaatsing* (b+ en b-) op 0,025 meter berekend (alle bouten zijn afgeschoven plus enige vervorming). In deze breekverplaatsing is tevens de aanwezige speling tussen de bout en het boutgat opgenomen. Deze bout-gatspeling bedraagt 0,004 meter.

1.3. Rotatie componenten van de POINT-verbinding tussen elementen

De POINT-verbinding neemt momenten op om de x-, y- en z-as. Alleen om de z-as is speling aanwezig. Het maximale moment om de z-as wordt bepaald door de zwakste kracht (in dit geval de stuikkracht, die een railverbinding kan opnemen) 153600 N maal de afstand tussen beide railverbindingen. Deze afstand bedraagt 0,7 meter. Gezien het feit dat de verbindingen tussen de rails en de afstandhouders als een scharnier beschouwt kunnen worden, gaat deze redenering niet op. Het maximale moment om de z-as bedraagt twee maal het moment van de enkele rail plus een kleine toeslag.

De *plasticiteitsgrens* (el+ en el-) wordt berekend met behulp van de formule:

$$M_{pl(x,y,z)} = \sigma_{vl} I_{x,y,z} / e$$

Uit de formule volgt dat, met $\sigma_{vl} = 240 \cdot 10^6 \cdot 1,3 \text{ N/m}^2$, $I_x = 0,6666 \cdot 10^{-7} \text{ m}^4$, $I_y = 0,2618 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$ (2 rails), $I_z = 0,0204 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$ (2 rails) $e_x = 0,40 \text{ m}$, $e_y = 0,04 \text{ m}$, $e_z = 0,0425 \text{ m}$.

$$M_{plx} \text{ is } 43 \text{ Nm.}$$

$$M_{ply} \text{ is } 2,0 \text{ E5 Nm.}$$

$$M_{plz} \text{ is } 1,5 \text{ E4 Nm.}$$

NB 1. De factor 1,3 is bedoeld om de versteviging van het materiaal tijdens het vloeien te simuleren.

NB 2. De e_z maat is van de enkele rail genomen en niet over de breedte van de ligger. Deze keuze is gemaakt op grond van de scharnierwerking in de verbinding rail-afstandhouder.

De *rotatiestijfheidscoëfficiënt* (k) wordt bepaald uit de plasticiteitsgrens en de mogelijke elastische hoekverdraaiing Φ om de assen. Voor de x-as is 1 rad, voor de y-as is 0,033 rad en voor de z-as is 0,033 rad aangenomen. De *stijfheidscoëfficiënten* worden berekend met behulp van de formule:

$$k_{m(x)} = M_{pl} / \Phi_{M(x)}$$

Uit de formule volgt dat, met $M_{plx} = 43 \text{ Nm}$, $M_{ply} = 2,0 \cdot 10^5 \text{ Nm}$, $M_{plz} = 1,5 \cdot 10^4 \text{ Nm}$, $\Phi_{Mx} = 1,0 \text{ rad}$, $\Phi_{My} = 0,033 \text{ rad}$, $\Phi_{Mz} = 0,033 \text{ rad}$.

$$k_{mx} \text{ is } 43 \text{ Nm/rad.}$$

$$k_{my} \text{ is } 6,1 \text{ E6 Nm/rad.}$$

$$k_{mz} \text{ is } 4,5 \text{ E5 Nm/rad.}$$

De *dempingscoëfficiënten* (d) zijn berekend met behulp van de formule:

$$d_{kr} = 2 \sqrt{(m \cdot n \cdot k_{m(x,y,z)})}$$

Uit de formule volgt dat, met $m = 139 \text{ kg}$ (massa element), $n = 3$ (aantal verbindingen per element) voor het 4 meter lange element en de

paalafstand van 4 meter en $k_{mx} = 43 \text{ Nm/rad}$, $k_{my} = 6,1 \text{ E7 Nm/rad}$ en $k_{mz} = 4,5 \text{ E5 Nm/rad}$

d_{krx} is 268 Nms/rad

d_{kry} is 1,0 E5 Nms/rad

d_{krz} is 2,8 E4 Nms/rad

Ten behoeve van numerieke stabiliteit in de simulatie is het gebruikelijk om voor de demping één tiende van de kritische demping te nemen ($d_{kr}/10$). Deze waarde wordt over de zes of vijf, afhankelijk van elementlengte, koppelingen per element verdeeld. Voor de demping in de berekening in x-richting geldt de waarde $d = 268 / 30 = 9 \text{ Nsm/rad}$., in y-richting $d = 1,0 \text{ E5} / 30 = 3,3 \text{ E3 Nsm/rad}$ en in z-richting $d = 2,8 \text{ E4} / 30 = 920 \text{ Nsm/rad}$.

De *breekverplaatsingen* ($b+$ en $b-$) om de x-as is erg groot genomen, omdat ervan wordt uitgegaan, dat er geen breuk om de x-as (erg torsieslap) zal optreden; $b+$ en $b-$ zijn 1 radiaal aangenomen. Om de y- en z-as is de *breekverplaatsing* $b+$ en $b-$ op 0,3 radiaal (alle bouten aan één zijde zijn afgeschoven) berekend.

In deze breekverplaatsing is tevens de mogelijke hoekverdraaiing door de aanwezige speling opgenomen. Deze hoekverdraaiing bedraagt 0,002 radiaal.

In *Tabel 9.1* zijn de berekende parameters van de POINT-verbinding tussen de elementen opgenomen.

kracht component	k [N/m]	d [Ns/m]	el+ [N]	b+ [m]	el- [N]	b- [m]
in x-as	1,5E8	1,8E4	3,1E5	0,02	-3,1E5	-0,02
in y-as	5,5E8	3,2E4	1,1E6	0,02	-1,1E6	-0,02
in z-as	5,5E8	3,2E4	1,1E6	0,02	-1,1E6	-0,02
moment component	k [Nm/rad]	d [Nms/rad]	el+ [Nm]	b+ [rad]	el- [Nm]	b- [rad]
om x-as	4,3E1	1,0E1	4,3E1	1,0	-4,3E1	-1,0
om y-as	6,1E6	3,3E3	2,0E5	0,3	-2,0E5	-0,3
om z-as	4,5E5	9,0E2	1,5E4	0,3	-1,5E4	-0,3

Tabel 9.1. *Berekende parameters van de POINT-verbinding tussen de elementen weergeven.*

1.4. Invloed diagonaal op de buigstijfheid van de ligger

De diagonaal in elk middenveld van het element maakt de ligger om de z-as stijver. Deze invloed doet opgang tot het moment dat de bout, die de diagonaal met de rail verbind, door de rail wordt getrokken. De bout "snijdt" als het ware door het materiaal van de rail. De grootte van de kracht bedraagt oppervlakte rail maal stuksterkte.

In formule vorm:

stuik rail $F_{st} = A_{stuik} \sigma_{st}$

Uit de formule volgt, met $A_{stuik} = 4,8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$, $\sigma_{st} = 400 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$,

F_{st} is 19200 N.

De *plasticiteitsgrens* (el+ en el-) wordt berekend met behulp van de formule:

Voor de z-as geldt voor $F_x = 19200 \text{ N}$ en $a = 0,7 \text{ meter}$

M_{lpz} is 13440 Nm.

De *rotatiestijfheidscoëfficiënt* (k) wordt bepaald uit de plasticiteitsgrens en de mogelijke elastische hoekverdraaiing Φ om de assen. Voor de z-as is 0,033 rad aangenomen. De *stijfheidscoëfficiënten* worden berekend met behulp van de formule:

$$k_{m(z)} = M_{pl} / \Phi_{M(z)}$$

Uit de formule volgt dat, met $M_{plz} = 13440 \text{ Nm}$ en $\Phi_{zx} = 0,033 \text{ rad}$.

k_{mz} is 4,1 E5 Nm/rad.

De *dempingscoëfficiënten* (d) zijn berekend met behulp van de formule:

$$d_{kr} = 2 \sqrt{(m \cdot n \cdot k_{m(x,y,z)})}$$

Uit de formule volgt dat, met $m = 139 \text{ kg}$ (massa element), $n = 3$ (aantal verbindingen per element) voor het 4 meter lange element en de paalafstand van 4 meter en $k_{mz} = 4,1 \text{ E5 Nm/rad}$

d_{krz} is 2,6 E4 Nms/rad

Ten behoeve van numerieke stabiliteit in de simulatie is het gebruikelijk om voor de demping één tiende van de kritische demping te nemen ($d_{kr}/10$). Deze waarde wordt over de zes of vijf, afhankelijk van elementlengte, koppelingen per element verdeeld. Voor de demping in de berekening in z-richting $d = 2,6 \text{ E4} / 30 = 870 \text{ Nsm/rad}$.

De *breekverplaatsingen* (b+ en b-) om de x-as is erg groot genomen, omdat ervan wordt uitgegaan, dat er geen breuk om de x-as (erg torsieslap) zal optreden; b+ en b- zijn 1 radiaal aangenomen. Om de y- en z-as is de *breekverplaatsing* b+ en b- op 0,3 radiaal (alle bouten aan één zijde zijn afgeschoven) berekend.

In deze breekverplaatsing is tevens de mogelijke hoekverdraaiing door de aanwezige speling opgenomen. Deze hoekverdraaiing bedraagt 0,002 radiaal.

N.B. Alle andere waarden zijn gelijk aan de waarden voor de ligger zonder diagonaal.

In *Tabel 9.2* zijn de berekende parameters, inclusief invloed van de diagonaal in de ligger, van de POINT-verbinding tussen de elementen opgenomen.

kracht component	k [N/m]	d [Ns/m]	el+ [N]	b+ [m]	el- [N]	b- [m]
in x-as	1,5E8	1,8E4	3,1E5	0,02	-3,1E5	-0,02
in y-as	5,5E8	3,2E4	1,1E6	0,02	-1,1E6	-0,02
in z-as	5,5E8	3,2E4	1,1E6	0,02	-1,1E6	-0,02

moment component	k [Nm/rad]	d [Nms/rad]	el+ [Nm]	b+ [rad]	el- [Nm]	b- [rad]
om x-as	4,3E1	1,0E1	4,3E1	1,0	-4,3E1	-1,0
om y-as	6,1E6	3,3E3	2,0E5	0,3	-2,0E5	-0,3
om z-as	4,1E5	9,0E2	1,4E4	0,3	-1,4E4	-0,3

Tabel 9.2. *Berekende parameters, inclusief invloed diagonaal, van de POINT-verbinding tussen de elementen weergeven.*

1.5. Grootte wrijvingskrachten en wrijvingsmoment

De grootte van het wrijvingskrachten en wrijvingsmomenten zijn overgenomen uit het simulatieonderzoek (van de Pol 1996).

In *Tabel 9.3* zijn de parameters van de POINT-verbinding tussen de elementen, die de invloed van de speling en de wrijving weergeven, opgenomen.

kracht component	fa+ [N]	p [m]	fa- [N]	p [m]
in x-as	2,4E4	0,004	-2,4E4	0,004

moment component	fa+ [Nm]	p [rad]	fa- [Nm]	p [rad]
om z-as	1,7E4	0,057	-1,7E4	0,057

Tabel 9.3. *Berekende parameters van de POINT-verbinding tussen de elementen, die de invloed van de speling en de wrijving weergeven.*

2 Modelling modelcomponenten paal

De hieronder uitgevoerde berekeningen hebben betrekking op de POINT-verbinding van de paal van de geleiderailconstructie in de berm van zandgrond.

2.1. Modelparameters

Bij de berekeningen zijn de volgende waarden gebruikt:

grond
druksterkte σ_d $5 \cdot 10^5$ N/m²

paal
zie 1.1

De geselecteerde gemiddelde waarden van de palenproeven staan in *Tabel 9.4*.

Grondsoort zand [kN/m]	Stijfheid [kN]	Kracht gemid [m]	Verplaatsing	
			d ₁ [m]	d ₂
los	256	5,54	0,052	0,349
vast	371	12,16	0,044	0,453

Tabel 9.4.

2. Modelcomponenten paal in losse grond

2.1. Lineaire componenten van de POINT-verbinding tussen paal en berm

De POINT-verbinding neemt krachten op in x-, y- en z-richting. De krachten in x- en y-richting moeten groot genoeg zijn om de paal op zijn plaats te houden. In de simulatie mag geen verplaatsing optreden. Dit geldt ook voor de kracht in z-richting verder in de grond. De paal wordt wel uit de grond getrokken tijdens een aanrijding. In deze richting breekt de verbinding dus. Voor deze kracht is een aanname gedaan.

De aangenomen krachten zijn voor in x- en y-richting 1 E5 N en voor de z-richting in -4 E4 N en uit 2 E4 N.

De *stijfheidscoëfficiënten* (k) zijn voor de x- en y-richting uit de gegevens van de palenproeven gehaald en voor de z-richting aangenomen. Voor de x-, y-richting zijn deze waarden 2,6 E5 N/m en voor de z-richting is deze waarde op 1 E5 N/m gesteld.

De *dempingscoëfficiënten* (d) zijn berekend met behulp van de formule:

$$d_{kr} = 2 \sqrt{m n k_{k(x,y,z)}}.$$

Uit de formule volgt dat, met $m = 139$ kg (massa element), $n = 3$ (aantal verbindingen per element) voor het 4 meter lange element en $k_{k(x,y)} = 2,6$ E5 N/m en $k_{k(z)} = 1$ E5 N/m,

$$d_{kr(x,y)} \text{ is } 1,7 \text{ E4 Ns/m}$$

$$d_{kr(z)} \text{ is } 1,5 \text{ E4 Ns/m}$$

Ten behoeve van numerieke stabiliteit in de simulatie is het gebruikelijk om voor de demping ééntiende van de kritische demping te nemen ($d_{kr}/10$). Deze waarde wordt over de drie koppelingen per element verdeeld. Voor de demping in de berekening in x- en y-richting geldt de waarde $d = 1,7$ E4 / 30 = 6 E2 Ns/m. en in z-richting $d = 1,5$ E4 / 30 = 5 E2 Ns/m.

De *breekverplaatsingen* (b_+ en b_-) in de x- en y-richting zijn groot genomen, omdat ervan wordt uitgegaan dat er geen breuk in die richtingen zullen optreden; b_+ en b_- zijn 0,9 meter. In z-richting is de *breekverplaatsing* (b_+ en b_-) op 0,9 meter aangenomen.

2.2. Rotatiecomponenten van de POINT-verbinding tussen paal en berm

De POINT-verbinding neemt momenten op om de x-, y- en z-as. Het moment om de x-as is afhankelijk van de gemeten krachten bij de palenproeven en de momentarm van de kracht. De arm loopt van de kracht hoogte tot het draaipunt van de paal. De gemiddelde (slinger)kracht bedraagt $5,5 \text{ E}3 \text{ N}$ en de momentarm is ca 1,3 meter (0,6 meter boven maaiveld plus 0,7 meter onder maaiveld) zodat $M_x = 7,2 \text{ E}3 \text{ Nm}$. De momenten om de y- en z-as zijn niet van wezenlijk belang in de simulaties. De M_y en de M_z zijn aangenomen op $6 \text{ E}3 \text{ Nm}$.

De *stijfheidscoëfficiënten* (k) zijn aangenomen. Om de x-, y- en z-as zijn deze waarden op $1 \text{ E}5 \text{ Nm/rad}$ gesteld.

De *dempingscoëfficiënten* (d) zijn berekend met behulp van de formule:

$$d_{kr} = 2 \sqrt{(m \cdot n \cdot k_{m(x,y,z)})}$$

Uit de formule volgt dat, met $m = 139 \text{ kg}$ (massa element), $n = 3$ (aantal verbindingen per element) voor het 4 meter lange element en $k_{m(x)} = 7,2 \text{ E}3 \text{ Nm}$ en $k_{m(y,z)} = 6 \text{ E}3 \text{ Nm}$,

$$d_{mr(x)} \text{ is } 4,8 \text{ E}3 \text{ Nms/rad}$$

$$d_{mr(y,z)} \text{ is } 2,6 \text{ E}3 \text{ Nms/rad}$$

Ten behoeve van numerieke stabiliteit in de simulatie is het gebruikelijk om voor de demping ééntiende van de kritische demping te nemen ($d_{kr}/10$). Deze waarde wordt over de drie koppelingen per element verdeeld. Voor de demping in de berekening in x-richting geldt de waarde $d = 4,8 \text{ E}3 / 30 = 120 \text{ Ns/rad}$. en in y- en z-richting $d = 2,6 \text{ E}3 / 30 = 87 \text{ Ns/rad}$.

De *breekverplaatsingen* (b_+ en b_-) in de x-, y- en z-richting zijn groot genomen, omdat ervan wordt uitgegaan dat er geen breuk in die richtingen zullen optreden; b_+ en b_- zijn op 2 rad aangenomen.

In *Tabel 9.5* zijn de berekende parameters van de POINT-verbinding tussen paal en berm (losse grond) opgenomen.

kracht component	k [N/m]	d [Ns/m]	el+ [N]	b+ [m]	el- [N]	b- [m]
in x-as	2,6E5	6E2	1E5	0,9	-1E5	-0,9
in y-as	2,6E5	6E2	1E5	0,9	-1E5	-0,9
in z-as	1E5	5E2	2E4	0,9	-4E4	-0,9
moment component	k [Nm/rad]	d [Nms/rad]	el+ [Nm]	b+ [rad]	el- [Nm]	b- [rad]
om x-as	1E5	1E2	7,2E3	2	-7,2E3	-2
om y-as	1E5	1E2	6,0E3	2	-6,0E3	-2
om z-as	1E5	1E2	6,0E3	2	-6,0E3	-2

Tabel 9.5. *Berekende parameters van de POINT-verbinding tussen paal en berm (losse grond) weergegeven.*

3. Modelcomponenten paal in vaste grond

3.1. Lineaire componenten van de POINT-verbinding tussen paal en berm

De POINT-verbinding neemt krachten op in x-, y- en z-richting. De krachten in x- en y-richting moeten groot genoeg zijn om de paal op zijn plaats te houden. In de simulatie mag geen verplaatsing optreden. Dit geldt ook voor de kracht in z-richting verder in de grond. De paal wordt wel uit de grond getrokken tijdens een aanrijding. In deze richting breekt de verbinding dus. Voor deze kracht is een aanname gedaan.

De aangenomen krachten zijn voor in x- en y-richting 1 E5 N en voor de z-richting in -4 E4 N en uit 2 E4 N.

De *stijfheidscoëfficiënten* (k) zijn voor de x- en y-richting uit de gegevens van de palenproeven gehaald en voor de z-richting aangenomen. Voor de x-, y-richting zijn deze waarden 3,7 E5 N/m en voor de z-richting is deze waarde op 1 E5 N/m gesteld.

De *dempingscoëfficiënten* (d) zijn berekend met behulp van de formule:

$$d_{kr} = 2 \sqrt{m n k_{k(x,y,z)}}.$$

Uit de formule volgt dat, met $m = 139$ kg (massa element), $n = 3$ (aantal verbindingen per element) voor het 4 meter lange element en $k_{k(x,y)} = 3,7$ E5 N/m en $k_{k(z)} = 1$ E5 N/m,

$$d_{kr(x,y)} \text{ is } 2,5 \text{ E4 Ns/m}$$

$$d_{kr(z)} \text{ is } 1,5 \text{ E4 Ns/m}$$

Ten behoeve van numerieke stabiliteit in de simulatie is het gebruikelijk om voor de demping ééntiende van de kritische demping te nemen ($d_{kr}/10$). Deze waarde wordt over de drie koppelingen per element verdeeld. Voor de demping in de berekening in x- en y-richting geldt de waarde $d = 2,5$ E4 / 30 = 8 E2 Ns/m. en in z-richting $d = 1,5$ E4 / 30 = 5 E2 Ns/m.

De *breekverplaatsingen* (b_+ en b_-) in de x- en y-richting zijn groot genomen, omdat ervan wordt uitgegaan dat er geen breuk in die richtingen zullen optreden; b_+ en b_- zijn 0,9 meter. In z-richting is de *breekverplaatsing* (b_+ en b_-) op 0,9 meter aangenomen.

3.2. Rotatie componenten van de POINT-verbinding tussen paal en berm

De POINT-verbinding neemt momenten op om de x-, y- en z-as. Het moment om de x-as is afhankelijk van de gemeten krachten bij de palenproeven en de momentarm van de kracht. De arm loopt van de kracht hoogte tot het draaipunt van de paal. De gemiddelde (slinger)kracht bedraagt $1,2 \text{ E4 N}$ en de arm is ca 1,3 meter (0,6 meter boven maaiveld plus 0,7 meter onder maaiveld) zodat $M_x = 1,6 \text{ E4 Nm}$. De momenten om de y- en z-as zijn niet van wezenlijk belang in de simulaties. De M_y en de M_z zijn aangenomen op 6 E3 Nm .

De *stijfheidscoëfficiënten* (k) zijn aangenomen. Om de x-, y- en z-as zijn deze waarden op 1 E5 Nm/rad gesteld.

De *dempingscoëfficiënten* (d) zijn berekend met behulp van de formule:

$$d_{kr} = 2 \sqrt{m n k_{m(x,y,z)}}.$$

Uit de formule volgt dat, met $m = 139 \text{ kg}$ (massa element), $n = 3$ (aantal verbindingen per element) voor het 4 meter lange element en $k_{m(x)} = 1,6 \text{ E4 Nm}$ en $k_{m(y,z)} = 6 \text{ E3 Nm}$,

$$d_{mr(x)} \text{ is } 5,3 \text{ E3 Nms/rad}$$

$$d_{mr(y,z)} \text{ is } 2,6 \text{ E3 Nms/rad}$$

Ten behoeve van numerieke stabiliteit in de simulatie is het gebruikelijk om voor de demping ééntiende van de kritische demping te nemen ($d_{kr}/10$). Deze waarde wordt over de drie koppelingen per element verdeeld. Voor de demping in de berekening in x-richting geldt de waarde $d = 4,8 \text{ E3} / 30 = 160 \text{ Ns/rad}$. en in y- en z-richting $d = 2,6 \text{ E3} / 30 = 87 \text{ Ns/rad}$.

De *breekverplaatsingen* (b_+ en b_-) in de x-, y- en z-richting zijn groot genomen, omdat ervan wordt uitgegaan dat er geen breuk in die richtingen zullen optreden; b_+ en b_- zijn op 2 rad aangenomen.

In *Tabel 9.6* zijn de berekende parameters van de POINT-verbinding tussen paal en berm (vaste grond) opgenomen.

kracht component	k [N/m]	d [Ns/m]	el+ [N]	b+ [m]	el- [N]	b- [m]
in x-as	3,7E5	8E2	1E5	0,9	-1E5	-0,9
in y-as	3,7E5	8E2	1E5	0,9	-1E5	-0,9
in z-as	1E5	5E2	2E4	0,9	-4E4	-0,9
moment component	k [Nm/rad]	d [Nms/rad]	el+ [Nm]	b+ [rad]	el- [Nm]	b- [rad]
om x-as	1E5	1E2	1,6E4	2	-1,6E4	-2
om y-as	1E5	1E2	6,0E3	2	-6,0E3	-2
om z-as	1E5	1E2	6,0E3	2	-6,0E3	-2

Tabel 9.6. Berekende parameters van de POINT-verbinding tussen paal en berm (vaste grond) weergeven.

4. Modelcomponenten paal met stabilisatieplaat C in vaste grond

4.1. Lineaire componenten van de POINT-verbinding tussen paal en berm

De POINT-verbinding neemt krachten op in x-, y- en z-richting. De stabilisatieplaat C veroorzaakt tijdens een aanrijding zoveel weerstand dat de paal juist boven het platte gedeelte van de paal in de grond zal buigen. Aangenomen wordt dat de paal tijdens de aanrijding niet uit de grond gereden zal worden. De krachten in x- en y-richting moeten groot genoeg zijn om de paal op zijn plaats te houden. In de simulatie mag enkel een kleine verplaatsing optreden. Voor de kracht in z-richting is een aanname gedaan.

De aangenomen krachten zijn voor in x- en y-richting 2 E5 N en voor de z-richting in -4 E5 N en uit 2 E4 N.

De *stijfheidscoëfficiënten* (k) zijn voor de x-, y- en z-richting gebaseerd op aangenomen kleine verplaatsingen en zijn resp. op 3,7E5 N/m, 3,7E5 N/m en 1E5 N/m gesteld.

De *dempingscoëfficiënten* (d) zijn berekend met behulp van de formule:

$$d_{kr} = 2 \sqrt{m n k_{k(x,y,z)}}.$$

Uit de formule volgt dat, met $m = 139$ kg (massa element), $n = 5$ (aantal verbindingen per element) voor het 4 meter lange element en $k_{k(x,y)} = 3,7$ E5 N/m en $k_{k(z)} = 1$ E5 N/m,

$$d_{kr(x,y)} \text{ is } 3,2 \text{ E4 Ns/m}$$

$$d_{kr(z)} \text{ is } 1,7 \text{ E4 Ns/m}$$

Ten behoeve van numerieke stabiliteit in de simulatie is het gebruikelijk om voor de demping ééntiende van de kritische demping te nemen ($d_{kr}/10$). Deze waarde wordt over de vijf koppelingen per element verdeeld. Voor de

damping in de berekening in x- en y-richting geldt de waarde $d = 3,2 E4 / 50 = 640 \text{ Ns/m}$. en in z-richting $d = 1,7 E4 / 50 = 333 \text{ Ns/m}$.

De *breekverplaatsingen* ($b+$ en $b-$) in de x- en y-richting zijn groot genomen, omdat ervan wordt uitgegaan dat er geen breuk in die richtingen zullen optreden; $b+$ en $b-$ zijn 0,9 meter. In z-richting is de *breekverplaatsing* ($b+$ en $b-$) eveneens op 0,9 meter aangenomen.

4.2. Rotatie componenten van de POINT-verbinding tussen paal en berm

De POINT-verbinding neemt momenten op om de x-, y- en z-as. De stabilisatieplaat C ondervindt zoveel weerstand in de grond dat de paal tijdens de aanrijding zal ombuigen. De momenten om de x-, y- en z-as zijn afhankelijk van de traagheidsmomenten van de paal.

De *plasticiteitsgrens* (e_l+ en e_l-) wordt berekend met behulp van de formule:

$$M_{pl(x,y,z)} = \sigma_{vl} I_{x,y,z} / e$$

Uit de formule volgt dat, met $\sigma_{vl} = 240 \cdot 10^6 \cdot 1,3 \text{ N/m}^2$, $I_x = 0,7092 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$, $I_y = 0,7092 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$, $I_z = 0,14184 \cdot 10^{-5}$, $e = 0,038 \text{ m}$.

M_{plx} is $5,8 E3 \text{ Nm}$.

M_{ply} is $5,8 E3 \text{ Nm}$.

M_{plz} is $1,2 E4 \text{ Nm}$.

NB. De factor 1,3 is bedoeld om de versterking van het materiaal tijdens het vloeien te simuleren.

De *rotatiestijfheidscoëfficiënt* (k) wordt bepaald uit de plasticiteitsgrens en de mogelijke elastische hoekverdraaiing Φ om de assen. Voor de x-, y-, en de z-as is 0,09 rad aangenomen. De *stijfheidscoëfficiënten* worden berekend met behulp van de formule:

$$k_{m(x)} = M_{pl} / \Phi_{M(x)}$$

Uit de formule volgt dat, met $M_{plx} = 5,8 E3 \text{ Nm}$, $M_{ply} = 5,8 E3 \text{ Nm}$, $M_{plz} = 1,2 E4 \text{ Nm}$, $\Phi_{Mx} = 0,09 \text{ rad}$, $\Phi_{My} = 0,09 \text{ rad}$, $\Phi_{Mz} = 0,09 \text{ rad}$.

k_{mx} is $6,4 E4 \text{ Nm/rad}$.

k_{my} is $6,4 E4 \text{ Nm/rad}$.

k_{mz} is $1,3 E5 \text{ Nm/rad}$.

De *dampingscoëfficiënten* (d) zijn berekend met behulp van de formule:

$$d_{kr} = 2 \sqrt{(m \cdot n \cdot k_{m(x,y,z)})}$$

Uit de formule volgt dat, met $m = 139 \text{ kg}$ (massa element), $n = 5$ (aantal verbindingen per element) voor het 4 meter lange element en de paalafstand van 1,333 meter en $k_{mx} = 6,4 E4 \text{ Nm/rad}$, $k_{my} = 6,4 E4 \text{ Nm/rad}$ en $k_{mz} = 1,3 E5 \text{ Nm/rad}$

d_{krx} is $1,3 \text{ E4 Nms/rad}$

d_{kry} is $1,3 \text{ E4 Nms/rad}$

d_{krz} is $1,9 \text{ E4 Nms/rad}$

Ten behoeve van numerieke stabiliteit in de simulatie is het gebruikelijk om voor de demping één tiende van de kritische demping te nemen ($d_{kr}/10$). Deze waarde wordt over de zes of vijf, afhankelijk van elementlengte, koppelingen per element verdeeld. Voor de demping in de berekening in x-richting geldt de waarde $d = 1,3 \text{ E4} / 50 = 268 \text{ Nsm/rad.}$, in y-richting $d = 1,3 \text{ E4} / 50 = 268 \text{ Nsm/rad}$ en in z-richting $d = 1,9 \text{ E4} / 50 = 380 \text{ Nsm/rad}$.

De *breekverplaatsingen* ($b+$ en $b-$) in de x-, y- en z-richting zijn groot genomen, omdat ervan wordt uitgegaan dat er geen breuk in die richtingen zullen optreden; $b+$ en $b-$ zijn op 2 rad aangenomen.

In *Tabel 9.7* zijn de berekende parameters van de POINT-verbinding tussen paal en berm (vaste grond) opgenomen.

kracht component	k [N/m]	d [Ns/m]	el+ [N]	b+ [m]	el- [N]	b- [m]
in x-as	3,7E5	6,4E2	2E5	0,9	-2E5	-0,9
in y-as	3,7E5	6,4E2	2E5	0,9	-2E5	-0,9
in z-as	1E5	3,3E2	2E4	0,9	-4E5	-0,9
moment component	k [Nm/rad]	d [Nms/rad]	el+ [Nm]	b+ [rad]	el- [Nm]	b- [rad]
om x-as	6,4E4	2,7E2	5,8E3	2	-5,8E3	-2
om y-as	6,4E4	2,7E2	5,8E3	2	-5,8E3	-2
om z-as	1,3E5	3,8E2	1,2E4	2	-1,2E4	-2

Tabel 9.7. *Berekende parameters van de POINT-verbinding tussen paal met stabilisatieplaat C en berm (vaste grond) weergeven.*

Bijlage 10

Paalweerstand

Resultaten van de (slinger)proeven op diverse paalvormen bestemd voor de geleiderailconstructie (selectie uit Van de Pol, 1998b).

- Tabel 10.1. *Overzicht van de resultaten van de proeven met de ronde paal en de SWOV paal in zand.*
- Tabel 10.2. *Overzicht van de resultaten van de proeven met de INP 100 en de INP 140 paal in zand.*
- Tabel 10.3. *Overzicht van de resultaten van de proeven met de W6x8.5 paal, de 6B8.5 in zand*
- Tabel 10.4. *Overzicht van de resultaten van de proeven met de W6x8.5 paal in klei met verschillende vochtigheidsgehalte.*
- Tabel 10.5. *Verzameltabel van de resultaten (gemiddelde waarden) van de proeven met brede stalen palen in verschillende vaste soorten grond.*
- Tabel 10.6. *Verzameltabel van de resultaten (gemiddelde waarden) van de proeven met de stalen palen in vaste zandgrond.*
- Tabel 10.7. *Verzameltabel van de resultaten (gemiddelde waarden) van de proeven met de stalen palen in losse zandgrond.*
- Tabel 10.8. *Overzicht van de resultaten van de proeven met de W6x8.5 paal, de 6B8.5 paal en de 3I5.7 paal ingeklemd.*

Paal vorm	Piek kracht	gemidd. kracht	Verplaatsing		Stijfheid grond bij	Stijfheid grond bij
[mm]	[kN]	[kN]	d ₁	d ₂	piekkracht	verplaatsing
			[m]	[m]	[kN/m]	[kN/m]
76 rond x 5 mm zonder Wiegelbol						
12,15	12,15	0,086	0,432			
18,40	13,40	0,031	0,463			
23,25	14,50	0,023	0,602			
13,60	12,25	0,047	0,542			
--	9,20	--	--			
8,70	14,00	0,042	0,524			
10,40	2,90	0,034	0,432			
16,00	7,76	0,028	0,263			
14,55	6,30	0,031	0,231			
gemiddeld	14,63	10,27	0,044	0,422	333	12,5
max. waarde	23,25	14,50				
min. waarde	10,40	2,90				
met Wiegelbol						
9,70	3,64	0,031	0,494			
15,50	7,30	0,046	0,324			
gemiddeld	12,60	5,47	0,039	0,409	323	???
max. waarde						
min. waarde						
SWOV paal						
13,1	5,60	0,030	0,276	437		
11,6	5,60	0,100	0,300	116		
gemiddeld	12,35	5,60	0,065	0,288	190	12,6
max. waarde						
min. waarde						

Tabel 10.1. *Overzicht van de resultaten van de proeven met de ronde paal en de SWOV paal in zand.*

De palen kunnen vrij bewegen.

N.B. De proeven zijn gehouden met grote verschillen in grondgesteldheid. De paal is in losse grond beproefd, in grond goed aangestampt, in grond goed ingewaterd en aangestampt en ongeroerde grond. In de praktijk kan de berm een gelijke variatie hebben.

Paal vorm	Piek kracht	gemidd. kracht	Verplaatsing		Stijfheid grond bij piekkracht	Stijfheid grond bij verplaatsing
[mm]	[kN]	[kN]	d ₁ [m]	d ₂ [m]	[kN/m]	[kN/m]
INP-100 paal (I-profiel)						
21,80	--					
16,00	13,60	0,034	0,434			
22,80	14,50	0,046	0,524			
15,50	12,60	0,040	0,494			
16,00	15,50	0,062	0,494			
gemiddeld	18,42	14,05	0,045	0,484	409	17,6
max. waarde	22,80	15,50				
min. waarde	15,50	12,60				
INP-140 paal (I-profiel)						
19,40	16,50	0,039	0,432			14,55
14,55	0,012	0,354				
13,60	13,60	0,010	0,432			
23,20	18,40	0,031	0,594			
13,60	13,60	0,010	0,321			
15,50	15,05	0,023	0,401			
gemiddeld	16,64	15,28	0,021	0,422	792	21,2
max. waarde	23,20	18,40				
min. waarde	13,60	13,60				
INP-140 paal (I-profiel) *						
10,7	5,82	0,015	0,216			
34,0	6,30	0,025	0,416			
9,0	8,25	0,031	0,432			
27,15	3,88	0,046	0,494			+50 kg
gemiddeld	9,85	7,03	0,023	0,324	428	???
max. waarde						
min. waarde						

Tabel 10.2. *Overzicht van de resultaten van de proeven met de INP 100 en de INP 140 paal in zand.*

De palen kunnen vrij bewegen.

N.B. De proeven zijn gehouden met grote verschillen in grondgesteldheid. De paal is in losse grond beproefd, in grond goed aangestampt, in grond goed ingewaterd en aangestampt en ongeroerde grond. In de praktijk kan de berm een gelijke variatie hebben.

* Bij de laatste vier proeven zijn de palen alleen maar rechtop getrokken. De gaten zijn niet opgevuld met zand.

Paal vorm [mm]	Piek kracht [kN]	gemidd. kracht [kN]	Verplaatsing d ₁ [m] d ₂ [m]		Stijfheid grond [kN/m]	Breek energie [kNm]
<i>W6x8.5 paal (I-profiel)</i>						
--	26,6	0,061	0,508	436		
--	19,7	0,056	0,508	353		
gemiddeld	--	23,15	0,059	0,508	395	
max. waarde						
min. waarde						
<i>6B8.5 paal (I-profiel)</i>						
--	24,5		0,86			
--	16,9		0,76			
--	27,6		0,79			
gemiddeld	--	23,0		0,803		
max. waarde						
min. waarde						

Tabel 10.3. *Overzicht van de resultaten van de proeven met de W6x8.5 paal, de 6B8.5 in zand*
De palen kunnen vrij bewegen.

Paal vorm [mm]	Piek kracht [kN]	gemidd. kracht [kN]	Verplaatsing d ₁ [m] d ₂ [m]		Stijfheid grond [kN/m]	Breek energie [kNm]
<i>W6 x 8.5 paal (I-profiel)</i>						
laag	--	43,8	0,089	0,508	493	
--	38,0	0,084	0,508	454		
--	47,9	0,104	0,508	460		
optimaal	--	50,2	0,056	0,508	899	
--	37,0	0,053	0,508	693		
hoog	--	19,8	0,147	0,508	134	
--	21,7	0,089	0,508	244		
gemiddeld	--	36,91	0,089	0,508	482	
max. waarde		50,2	0,056	0,508	899	
min. waarde	19,8	0,147	0,508	134		

Tabel 10.4. *Overzicht van de resultaten van de proeven met de W6x8.5 paal in klei met verschillende vochtigheidsgehalte.*
De palen kunnen vrij bewegen.

Grond soort [kN/m]	Stijfheid gemidd. [kN]	Kracht d ₁ [m]	Verplaatsing d ₂ [m]	Opm.
<i>W6 x 8.5 paal (I-profiel)</i>				
basis materiaal	431	48,9	0,114	b = 15,2
droge klei	203	26,7	0,131	
verzadigde klei	198	15,1	0,076	
zanderige leem	340	29,4	0,086	
<i>W6 x 8.5 paal (I-profiel)</i>				
klei	482	36,91	0,089	0,508 b = 15,2
zand	395	23,15	0,059	0,508
<i>6B8.5 paal (I-profiel)</i>				
zand		23,0	0,803	b = 15,2

Tabel 10.5. Verzameltabel van de resultaten (gemiddelde waarden) van de proeven met brede stalen palen in verschillende vaste soorten grond.

<i>INP-140 paal (I-profiel)</i>				
zand	792	15,28	0,021	0,422 b = 6,6
<i>INP-100 paal (I-profiel)</i>				
zand	409	14,05	0,045	0,484 b = 5,0
<i>76 rond x 5 mm paal zonder Wiegelbol</i>				
	333	10,27	0,044	0,422 b = 7,6

Tabel 10.6. Verzameltabel van de resultaten (gemiddelde waarden) van de proeven met de stalen palen in vaste zandgrond.

<i>INP-140 paal (I-profiel)</i>				
zand	428	7,03	0,023	0,324 b = 6,6
<i>76 rond x 5 mm paal met Wiegelbol</i>				
	323	5,47	0,039	0,409 b = 7,6
<i>SWOV-paal (rechthoekig profiel)</i>				
190	5,60	0,065	0,288	b = 3,3

Tabel 10.7. Verzameltabel van de resultaten (gemiddelde waarden) van de proeven met de stalen palen in losse zandgrond.

De palen kunnen vrij bewegen

Noot

De SWOV-paal is door zijn snijdende werking ondergebracht bij de palen in losse grond.

Paal vorm [inch]	Piek kracht [kN]	gemidd. kracht [kN]	Verplaatsing d ₁ d ₂ [m] [m]		Stijfheid grond [kN/m]	Breek energie [kNm] [cm]
6B8.5	63,9	31,1				6,60
68,9	36,9				8,69	b=15,2
71,2	35,6				9,81	
68,1	28,9				7,67	
W6x8.5	77,0	--	0,126		611	
73,8	--	0,091		811		b=15,2
73,4	--	0,119		617		
75,6	--	0,096		788		
gemiddeld	71,49	33,13	0,108		707	8,19
max. waarde	77,0	36,9	0,091		811	9,81
min. waarde	63,9	28,9	0,126		611	6,60
315.7	21,8	15,1				4,66
22,2	15,6				4,83	b=7,6
24,5	12,9				4,09	
28,9	20,0				6,18	
315.7	25,6			0,53		
24,0			0,48			b=7,6
Ankerplaat in leem met stenen			(ijstijd)			
315.7	25,8			0,53		r=30
24,0			0,48			
17,8			0,48			10x61
23,1			0,61			
25,4			0,51			15x61
23,1			0,48			
22,2			0,43			
18,7			0,56			
16,5			0,51			
21,8			0,56			20x61
20,9			0,46			
25,4			0,53			15x99
26,2			0,43			
24,9			0,46			20x99
25,4			0,48			
gemiddeld	23,25	15,90		0,501		4,94
max. waarde	28,9	20,0		0,43		6,81
min. waarde	16,5	12,9		0,56		4,09

Tabel 10.8. *Overzicht van de resultaten van de proeven met de W6x8.5 paal, de 6B8.5 paal en de 315.7 paal ingeklemd. De palen zijn ingeklemd.*