

Onderzoek naar de constructieve werking van persroosters

R.B van Reekum

16-3-2015

Date	16 march, 2015
University	Delft University of Technology Faculty of Civil Engineering and Geosciences Department of Structural Engineering Section of Structural and Building Engineering
Author	R.B van Reekum
Master program	Civil Engineering Structural Engineering Steel and Timber Construction
Graduation committee	Prof. ir. F.S.K. Bijlaard (Chairman) Delft University of Technology Ir. R. Abspoel Delft University of Technology Ir. M. Feijen I-SAAC Ir. P.A. de Vries Delft University of Technology Dr. ir. P.C.J Hoogenboom Delft University of Technology Ir. L.J.M. Houben (Graduation coordinator) Delft University of Technology

Voorwoord

Dit afstudeerwerk is uitgevoerd bij de sectie Gebouwen en Civieltechnische Constructies van de faculteit civiele techniek van de TU Delft in samenwerking met Staco Holding B.V., een producent van persroosters. In dit onderzoek is het constructief gedrag van persroosters onderzocht. Daarnaast is gekeken in welke mate er sprake is van plastische capaciteit in persroosters.

Roland Abspoel attendeerde mij op dit onderwerp. Ik heb dit onderwerp gekozen omdat ik het interessant vond een product te onderzoeken waarvan er weinig bekend is over het constructief gedrag. Ook het experimentele deel trok mij erg aan.

Graag wil ik mijn dank uitspreken aan de afstudeercommissie voor de begeleiding en steun. Ook wil ik de mensen in het laboratorium Stevin II bedanken voor hun hulp bij het opzetten van de proeven. Daarnaast wil ik Jack Thibaudier en Jeroen de Beer van Staco Holding B.V. bedanken voor het mede mogelijk maken van dit onderzoek. Graag wil ik ook Roland Abspoel en Gabriël Bijleveld nadrukkelijk bedanken voor hun taalkundige hulp.

Ik hoop dat dit onderzoek de kennis over het constructieve gedrag van persrooster vergroot, en daarmee de basis legt voor verdere optimalisatie.

R.B van Reekum
Den Haag
Maart 2015

Samenvatting

Persroosters kennen vele toepassingen, zowel op het land als op zee. Dit komt door de grote mate van flexibiliteit in afmetingen en draagkracht. Ondanks de vele toepassingen in onze dagelijkse omgeving, zal de term *persrooster* voor velen onbekend zijn. De term duidt op de wijze waarop de belangrijkste verbindingen in deze roosters worden vervaardigd.

Persroosters worden verzinkt en/of gecoat om corrosie te voorkomen, hierbij wordt het verzinken verreweg het vaakst toegepast. Dit onderzoek is daarom primair gericht op het gedrag van verzinkte persroosters. In een persrooster zijn drie type staven te onderscheiden, namelijk draagstaven, vulstaven en randstaven. De verbindingen tussen de draag- en vulstaven worden gerealiseerd door de vulstaven in een vooraf vervaardigde inkeping in de draagstaven te persen. De staven zullen hierdoor lokaal plastisch vervormen en de verbinding ontstaat enkel door wrijving. Deze verbinding wordt een persverbinding genoemd.

De draagstaven dienen primair voor de afdracht van de belastingen, in één richting. De draagstaven worden door de persverbinding verzwakt, waardoor niet de gehele draagstaafhoogte ingezet kan worden om de belasting af te dragen. De vulstaven herverdelen een lokale belasting over meerdere draagstaven én zorgen voor verkleining van de kiplengte van de individuele draagstaven. Daarnaast hebben de vulstaven invloed op het globaal kipgedrag van het gehele persrooster. De randstaven worden gepuntlast aan zowel de draag- als vulstaven.

Persroosters worden getoetst op RAL-GZ-638, een norm uitgegeven door het *Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V.* In deze norm worden roosters op basis van de lineaire elasticiteitstheorie getoetst. Een toetsing op basis van EN 1993-1-1 is niet mogelijk, omdat deze code niet op de specifieke eigenschappen van persrooster toegespitst is.

Door middel van het toepassen van de plasticiteitstheorie kan de rekenkundige sterkte aanzienlijk vergroot worden, waarmee een grote economische winst te behalen is. De hoofddoelstelling van dit afstudeerwerk is daarom te onderzoeken of een toetsing op basis van de plasticiteitstheorie mogelijk is. Deze toetsing is mogelijk wanneer er in voldoende mate sprake is van plastische capaciteit in persroosters. Om deze doelstelling te kunnen onderzoeken is ook het constructieve gedrag van persroosters onderzocht. Het onderzoek is opgebouwd uit de onderstaande vier delen.

- Analytische beschouwing
- Experimenteel onderzoek
- FEM validatie
- Parametrisch onderzoek

De grote diversiteit in afmetingen en eigenschappen en maken persroosters een lastig product om te beschouwen. Ook heeft de persverbinding veel invloed op het constructieve gedrag van een persrooster. Wanneer een persrooster verzinkt is, speelt het zink hierbij ook een grote rol.

Uit de analytische beschouwing blijkt dat persroosters bezwijken door: *lokale kipinstabiliteit* van één of enkele draagstaven, *globale kipinstabiliteit* van het gehele rooster of t.g.v. een mechanisme door het ontstaan van plastische scharnieren in de draagstaven.

Om het gedrag goed in beeld te krijgen zijn er numerieke modellen ontwikkeld in het FEM-pakket ABAQUS. Om de betrouwbaarheid van deze modellen te kunnen vaststellen, zijn op een aantal persroostergeometrieën ook experimenten uitgevoerd. Aan de hand van deze proefresultaten zijn de FEM-modellen gevalideerd. De validatie heeft plaatsgevonden aan de hand van vier proefseries. Drie proefseries zijn gericht op bezwijkmechanismes, namelijk: bezwijken t.g.v. een mechanisme door het ontstaan van plastische scharnieren in de draagstaven, *proefserie 1A*, bezwijken t.g.v. *lokale-kipinstabiliteit*, *proefserie 2A* en bezwijken t.g.v. *globale-kipinstabiliteit*, *proefserie 2B*. Aan de hand van *proefserie 1B* is het constructief gedrag van een veel voorkomende persroostergeometrie onderzocht. Na deze validatie is het mogelijk om voor verschillende persroostergeometrieën FEM-modellen te maken en zodoende het gedrag van persroosters te onderzoeken.

Uit de validatie blijkt dat de bezwijkvormen én de bezwijklasten goed numeriek te simuleren zijn, maar dat met name de stijfheid van de FEM-modellen afwijkt van de stijfheid van de proefstukken. Dit komt door de invloed van de persverbinding op het constructieve gedrag, waarbij het zink in de persverbinding een belangrijke rol speelt.

Uit het onderzoek blijkt dat alle eerder genoemde bezwijkvormen een rol spelen, afhankelijk van de dimensies van de draag- en vulstaven en de vulstaafmaaswijdte. Bij relatief gedrongen draagstaven bezwijkt het persrooster t.g.v. een mechanisme door het ontstaan van plastische scharnieren in de draagstaven. Bij relatief slanke draagstaven bezwijkt het persrooster door *lokale of globale kipinstabiliteit*. Het is niet mogelijk om een concrete draagstaafslankheid en vulstaafmaaswijdte te benoemen waarbij de overgang tussen bezwijken t.g.v. instabiliteit en bezwijken t.g.v. een mechanisme optreedt. De reden hiervoor is dat de gehele persroostergeometrie bij deze overgang een rol speelt.

Met behulp van de FEM-modellen is op basis van een stuklijst, een lijst met geproduceerde persroosters, een schatting gemaakt in hoeverre de plastische capaciteit aanwezig is in daadwerkelijk geproduceerde persroosters. Uit deze analyse blijkt dat in 72% van de geproduceerde persroosters de plastische capaciteit van een draagstaaf benaderd kan worden tot 96% of meer. Bij deze conclusie dient echter aangetekend te worden dat de afmetingen van de draagstaven zowel door doorbuiging als door sterkte bepaald kunnen worden. Hierbij spelen de draagstaafhoogte en overspanningslengte een rol. Wanneer doorbuiging maatgevend is, heeft een plastische berekeningsmethodiek geen toegevoegde waarde, omdat deze alleen de rekenkundige sterkte verhoogt. Dit betekent dus, dat niet het volledige plastisch potentieel benut kan worden.

Op basis van dit onderzoek is het nog niet mogelijk om een plastische berekeningsmethodiek toe te passen op persroosters. De persverbinding kan namelijk een aanzienlijke invloed op de plastische sterkte hebben. Het is niet duidelijk of deze invloed constant is. Hierbij spelen vermoeiing, corrosie en productietoleranties een rol.

Summary

Pressure locked gratings have many uses, both on land and at sea. This is mainly due to the high degree of flexibility in dimensions and load bearing capacity. Despite the many uses in our surroundings, the term *pressure locked grating* is unknown to many. This term refers to the way in which the most important connection in pressure locked gratings is manufactured.

Pressure locked gratings are galvanized and/or coated to prevent corrosion, galvanization is almost always used. This thesis is primarily focused on the behavior of galvanized pressure locked gratings. A pressure locked grating is made up of three type of bars: load bearing bars, cross bars and support bars. The connections between the load bearing bars and the cross bars are realized by pressing the cross bar into premade notch in the load bearing bar. The bars will deform plastically, which results in a connection based only on friction. This connection is called a pressure locked connection.

The load bearing bars serve primarily for load transfer in one direction. The pressure locked connection weakens the load bearing bars. The cross bars redistribute a local load over the load bearing bars outside of the loading area and reduce the buckling length of the individual load bearing bar. The support bars are spot-welded to both the load bearing and cross bars.

Pressure locked gratings are calculated according to RAL-GZ-638, a standard published by the *Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V.* In this standard, pressure locked gratings are calculated on the basis of linear elasticity theory. A calculation according to the EN 1993-1-1 is not possible because it is not suited for pressure locked gratings.

The main objective of this thesis is to determine if a calculation based on the plasticity theory is possible for pressure locked gratings. Through the application of this theory the design strength can be greatly increased, which has a large economic potential. This research is divided up into four parts that are stated below.

- Analytical study
- Experimental study
- FEM validation
- Parametric study

The vast diversity in size and properties and the complex functioning of the pressure locked connection make pressure locked gratings a difficult product to research. The pressure locked connection also has a big influence on the strength and stiffness. In this galvanizing has a big influence.

The analytical study shows that pressure locked gratings fail through: *local lateral torsional buckling* of one of the load bearing bars, *global lateral torsional buckling* for the entire pressure locked grating or by a mechanism due to a plastic hinge in de load bearing bars.

To research the behavior, numerical models were developed in the FEM-package ABAQUS. To determine the accuracy of these models, experiments were carried out on a number of pressure locked grating geometries. The results of the tests were compared with FEM

simulations which made it possible to validate the FEM-models. The validation has taken place on the basis of four test series. Three test series focused on failure mechanisms, namely: collapse due to a mechanism as a result of plastic hinges in the load bearing bars, *test series 1A*, collapse due to *local lateral torsional buckling*, *test series 2A* and collapse due to *global lateral torsional buckling* of the entire pressure locked grating, *test series 2B*. The last test series, *test series 1B*, is aimed at examining the structural behavior of a common used pressure locked grating. After this validation it is possible to make FEM-models for a large number of different geometries. The behavior of these geometries can then be analyzed.

The validation shows that failure mode and failure load are correctly determined by the FEM models. There is however a notable difference between the stiffness of the FEM-model and the stiffness of the test specimens. This difference is likely the result of the influence of the pressure locked connection between the load bearing and cross bars.

The research shows that all aforementioned failure modes play a role depending on the dimensions of load bearing bars and cross bars. For relatively thick-set load bearing bars pressure locked gratings fail due to a mechanism as the result of plastic hinges in the load bearing bars. For slender load bearing bars pressure locked gratings fail as a result of instabilities.

With the aid of FEM models, it is possible to estimate the extent in which the plastic capacity is present in actually produced pressure locked gratings. This analysis shows that in 72% of the produced pressure locked gratings, the full plastic capacity of the load bearing bars can be reached to 96% or more. It is however important to keep in mind that, the dimensions of the load bearing bars are determined by deflection or by strength. This is determined by the load bearing bar height and span. When deflection is determining the dimensions of the load bearing bars, a plastic calculation methodology is not useful, because it only increases the design strength. It can thus be stated that the full plastic capacity cannot be fully used.

On the basis of this study it is not yet possible to apply a plastic calculation methodology on pressure locked gratings. This is because this research shows that the pressure locked connection can have a big influence on plastic strength. It is not clear if the pressure locked connection always has the same influence on the plastic capacity. It is possible that the plastic capacity is influenced by fatigue, corrosion and manufacturing tolerances.

Lijst van symbolen

Afkortingen

B.G.T	Bruikbaarheidsgrens toestand
DD	Draagstaafdikte
DH	Draagstaafhoogte
DM	Draagstaafmaaswijdte
FEM	Finite element method
VD	Vulstaafdikte
VH	Vulstaafhoogte
VM	Vulstaafmaaswijdte
U.G.T	Uiterste grenstoestand

Grieks

α	Verhouding tussen het elastisch-en plastisch moment van een doorsnede	-
ν	Correctiefactor op stijfheid en sterkte t.g.v. persverbinding volgens de RAL-GZ-638	-
ϕ'	Eerst afgeleiden van de rotatie	-

Latijn

B_t	Breedte van een geconcentreerde last in de vulstaafrichting	mm
B_q	Breedte van een geconcentreerde last in de draagstaafrichting	mm
C_w	Welvingconstante	-
E	E-modulus	$\frac{N}{mm^2}$
F_v	Verdeelde belasting in RAL-GZ-638	$\frac{kN}{m^2}$
F_p	Geconcentreerde belasting in RAL-GZ-638	kN
F_b	Bezwijklast aan de hand van een Riks analyse	N
F_{el}	Belasting die resulteer in het bereiken van de vloeigrens	N
F_{pl}	Belasting die resulteer in het bereiken van het vol plastisch moment	N
F_{cr}	Kritisch-kiplast	N
f_y	Vloeispanning	$\frac{N}{mm^2}$
G	Schuifmodulus	$\frac{N}{mm^2}$
HD_{bruto}	Draagstaaftoogte	mm
HD_{netto}	Draagstaaftoogte minus vulstaaftoogte	mm
L	Overspanningslengte	mm
J	St. Venant's torsie stijfheid	mm^4
M_{el}	Elastisch moment	Nmm
M_{pl}	Plastisch moment	Nmm
M_{cr}	Kritische-kiplast	Nmm
M_{kip}	Kipmoment waarin plasticiteit beschouwd is	Nmm
N	Aantal meedragen draagstaven in RAL-GZ-638	-
u''	Tweede afgeleiden van de horizontale verplaatsing	-
I	Traagheidsmoment	mm^4
V_p	Plastische dwarskrachtcapaciteit	N

Inhoudsopgave

Voorwoord	ii
Samenvatting	iii
Summary	v
Lijst van symbolen	vii
1 Inleiding	1
1.1 Achtergrond	1
1.2 Probleembeschrijving	3
1.3 Doelstellingen	3
1.4 Onderzoeksmethodiek	3
1.5 Rapportopbouw	4
2 Persroosters	5
2.1 Het product	5
2.1.1 Productvarianties	6
2.1.2 Persverbinding	8
2.1.3 Opleggingen	10
2.1.4 Krachtswerking	10
2.1.5 Productietoleranties	12
2.1.6 Toegepaste materialen	13
2.2 Productieproces	13
2.2.1 Stap 1: Productie draagstaven	13
2.2.2 Stap 2: Productie vulstaaf plus persing	14
2.2.3 Stap 3: Bevestigen randstaaf	15
2.2.4 Stap 4: Corrosiebescherming	15
3 Bestaande berekeningsmethodiek	16
3.1 RAL-GZ-638	16
3.1.1 Toetsing op sterkte en vervorming t.g.v. een geconcentreerde last	17
3.1.2 Toetsing op sterkte en vervorming t.g.v. een verdeelde belasting	19
3.1.3 Voorbeeld toetsing sterkte en doorbuiging	20
3.1.4 Opmerkingen op de RAL-GZ-638	22
3.2 EN 1993-1-1	23
4 Plasticiteitstheorie in relatie tot lineaire-elasticiteitstheorie	24
4.1 Rekenkundige draagkracht t.g.v. plastische spanningsverdeling	24

4.2 Rekenkundige draagkracht t.g.v. herverdeling door het ontstaan van plastische scharnieren	25
4.3 Toename van draagkracht in persroosters t.g.v. plasticiteitstheorie	26
5 Theoretische draagkracht van persroosters	28
5.1 Bezwijkmechanismes in persrooster.....	28
5.2 Bezwijken t.g.v. een mechanisme t.g.v. plastische scharnieren	28
5.2.1 Bezwijken t.g.v. een geconcentreerde last.....	29
5.2.2 Bezwijken t.g.v. een verdeelde last.....	31
5.3 Bezwijken t.g.v. van dwarskracht.....	31
5.3.1 Toegepaste methodiek.....	31
5.3.2 Bezwijken t.g.v. dwarskracht voor verschillende draagstaven.....	33
5.4 Bezwijken t.g.v. kipinstabiliteit	34
5.4.1 Toelichting kipinstabiliteit.....	34
5.4.2 Lokale-en globale kipinstabiliteit in persroosters	35
5.4.3 Kipmoment van een draagstaaf.....	36
5.4.4 Conclusie kipinstabiliteit in persroosters	43
5.5 Conclusie bezwijkmechanismes	43
6 Experimentele bepaling van de draagkracht	44
6.1 Beschrijving proef en opstelling.....	44
6.1.1 Lastinleiding	46
6.1.2 Opleggingen.....	47
6.1.3 Instrumentatie	48
6.1.4 Meetnauwkeurigheid.....	49
6.2 Beschouwde proefstukken.....	51
6.2.1 Materiaaleigenschappen	52
6.3 Geometrische imperfecties in de draagstaven	53
6.3.1 Grootte en locatie van de imperfecties.....	54
6.3.2 Vorm imperfecties.....	55
6.3.3 Invloed van het verzinken op grootte van de imperfecties.....	55
6.4 Vierpuntsbuigproeven- Plastische bezwijken	56
6.4.1 Proefserie 1A	56
6.5 Vierpuntsbuigproeven- veel voorkomende persroostergeometrie.....	59
6.5.1 Proefserie 1B	59
6.6 Vierpuntsbuigproeven- Instabiliteit	62

6.6.1 Proefserie 2A	62
6.6.2 Proefserie 2B	65
6.7 Bespreking proefresultaten.....	69
6.7.1 Beschrijving gevonden bezwijkmechanismes	69
6.7.2 Relatie tussen de initiële stijfheden van de drie meetlocaties	71
6.7.3 Invloed van de persverbinding op initiële stijfheid en sterkte.....	72
6.7.4 Stijfheid en sterkte van de proefstukken in relatie tot de [RAL-GZ-638]	75
6.7.5 Invloed van het verzinken op de stijfheid en sterkte.....	76
6.7.6 Invloed van de persverbinding op het constructief gedrag.....	76
6.7.7 Invloed van de imperfecties op de draagkracht	77
6.8 Conclusie experimentele bepaling van de draagkracht.....	77
7 Numerieke bepaling van draagkracht	78
7.1 Onzekerheden in de numerieke bepaling van draagkracht	78
7.2 Wat is een FEM analyse.....	79
7.3 Methodologie.....	80
7.4 Model beschrijving	81
7.4.1 Elementen type en mesh grootte.....	81
7.4.2 Randvoorwaarde	81
7.4.3 Schematisering van het materiaalgedrag	82
7.4.4 Model 1: Plasticiteit Proefseries 1A en 1B.....	82
7.4.5 Model 2: Instabiliteit Proefseries 2A en 2B	83
7.5 Vierpuntsbuigproeven- Plastische bezwijken	86
7.5.1 FEM-beschouwing proefserie 1A	86
7.5.2 FEM-beschouwing proefserie 1B	91
7.6 Vierpuntsbuigproeven- Instabiliteit	97
7.6.1 FEM-beschouwing proefseries 2A en 2B: Contactsimulatie	97
7.6.2 FEM-beschouwing proefserie 2A	100
7.6.3 FEM-beschouwing proefserie 2B	102
7.7 Bespreking resultaten numerieke analyses.....	104
7.7.1 Model 1: Plastisch bezwijken	104
7.7.2 Model 2: Bezwijken t.g.v. instabiliteit	105
7.7.3 Invloed van de gemeten horizontale imperfecties op initiële stijfheid en sterkte..	105
7.7.4 Toepasbaarheid FEM methodiek voor parametrische onderzoek.....	109

8 Parametrisch onderzoek.....	110
8.1 Aanpak	110
8.1.1 Onderzoek naar het kipgedrag van een individuele draagstaaf	110
8.1.2 Onderzoek naar het kipgedrag van een persrooster	111
8.1.3 Onderzoek naar de plastische capaciteit van persroosters.....	114
8.2 Modellen	115
8.2.1 Element type en mesh-grootte	115
8.2.2 Schematisering van het materiaalgedrag	115
8.2.3 Toegepaste modellen.....	115
8.3 Parametrisch onderzoek kipinstabiliteit	118
8.3.1 Parametrisch onderzoek naar de kipinstabiliteit van een enkele draagstaaf gesteund door vulstaven	118
8.3.2 Parametrisch onderzoek naar de kipinstabiliteit van een persrooster	124
8.4 Plastische capaciteit in persroosters.....	132
8.5 Bespreking resultaten parametrische onderzoek	134
8.5.1 Conclusie kipgedrag van een enkele draagstaaf gesteund door vulstaven	134
8.5.2 Conclusie kipgedrag van persroosters.....	134
8.5.3 Conclusie plastische capaciteit van persroosters	135
9 Conclusies en aanbevelingen	136
9.1 Conclusies m.b.t. het constructief gedrag van persroosters	136
9.1.1 Invloed van de persroostergeometrie op het constructief gedrag	136
9.1.2 Invloed van het soort belasting op het constructief gedrag	136
9.1.3 Invloed van de persverbinding op het constructief gedrag.....	137
9.2 Toepasbaarheid van een plastische berekeningsmethodiek	138
9.2.1 Numerieke nauwkeurigheid.....	138
9.2.2 De mate van plastische capaciteit in daadwerkelijk geproduceerde persroosters	138
9.3 Aanbevelingen	139
9.3.1 Onderzoek m.b.t. de ontwikkeling van een plastische berekeningsmethodiek	139
9.3.2 Vervolgonderzoek m.b.t. verdere optimalisatie van persroosters.....	141
Referenties	142
Bijlagen.....	143
Bijlagen A: Experimentele bepaling van de draagkracht	144
Bijlagen B: Numerieke bepaling van de draagkracht	155
Bijlagen C: Parametrische onderzoek.....	169

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Een persrooster onderscheidt zich van andere roosters, zoals gedruklaste roosters en perforoosters door de wijze waarop een persrooster wordt gefabriceerd, namelijk door het persen van de vulstaven in geprefabriceerde inkepingen in de draagstaven. De draag- en de vulstaven vervormen plastisch, ‘koud’, t.g.v. het persen en er ontstaat een verbinding op basis van wrijving. Deze verbinding wordt ook wel een persverbinding genoemd. Persroosters worden verzinkt en/of gecoat om corrosie te voorkomen, hierbij wordt het verzinken verreweg het vaakst toegepast.

Persroosters worden zowel op het land als op zee toegepast in verscheidene constructies en toepassingen. Er zijn drie toepassingen aan te duiden, namelijk constructief, architectonisch en functioneel. Hierbij wordt onder constructief verstaan dat het persrooster toegepast wordt om belasting af te dragen. Onder architectonisch wordt verstaan dat het persrooster decoratief wordt toegepast en onder functioneel worden toepassingen verstaan zoals zonwering. In Figuur 1 is een voorbeeld gegeven van een architectonische toepassing.



Figuur 1: Picknicktafel t.p.v. een stopplaats aan de snelweg in de buurt van Ringstad Denemarken

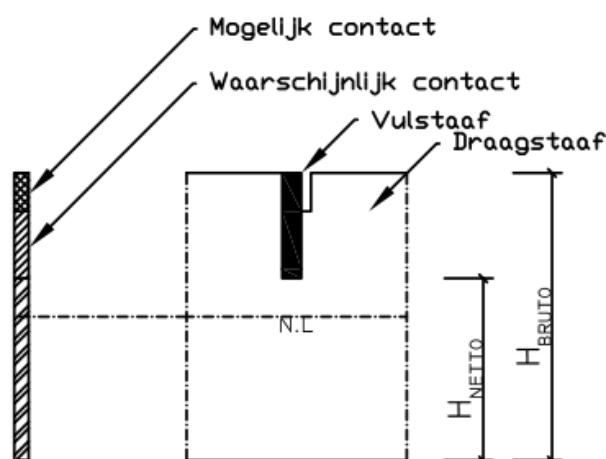
Een persrooster kan ook meerdere toepassingen tegelijkertijd vervullen. Een goed voorbeeld hiervan is te vinden in de Kunsthal te Rotterdam, zie Figuur 2. De persroosters dienen hier zowel een constructieve als architectonische toepassing.



Figuur 2: Toepassing persroosters in de Kunsthal te Rotterdam

Bepalend voor de draagkracht van persroosters zijn de draagstaven. De persverbinding neemt als het ware een hap uit de draagstaaf. Deze hap wordt deels gevuld door de vulstaaf en zinkt, in het geval van verzinken. Het is hierdoor onduidelijk hoe groot de invloed van de persverbinding op de draagkracht is.

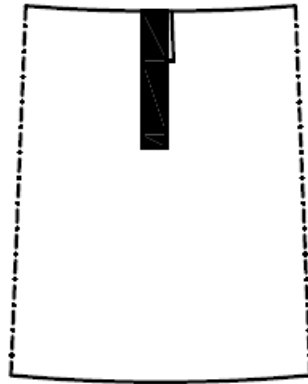
Er kan gesteld worden dat de effectieve draagstaafhoogte, de hoogte waarmee de stijfheid en sterkte berekend worden, tussen H_{bruto} en H_{netto} in ligt, zie Figuur 3. Er kan gesteld worden dat hoe hoger de persverbindingshoogte t.o.v. de draagstaafhoogte en hoe groter het aantal persverbindingen in een draagstaaf, des te groter de invloed van de persverbinding op stijfheid en sterkte.



Figuur 3: Invloed persverbinding op effectieve draagstaafhoogte

Een ander aspect dat invloed heeft op de effectieve draagstaafhoogte is de kromming in de draagstaaf die ontstaat t.g.v. van een moment, zie Figuur 4. Figuur 4 illustreert dat t.g.v. een moment de inkeping in de draagstaaf dichtgedrukt wordt. Hoe groot de kromming hiervoor

dient te zijn is onduidelijk en hangt in ieder geval af van de draagstaafhoogte en de hoogte van de persverbinding. Het dichtdrukken van de persverbinding verhoogt de stijfheid en sterkte van de draagstaaf.



Figuur 4: Dicht drukken van een persverbinding t.g.v. een kromming door een moment

1.2 Probleembeschrijving

Persroosters worden getoetst op [RAL-GZ-638], een norm uitgegeven door het *Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V.* In deze norm worden roosters op basis van de lineair-elasticiteitstheorie getoetst. Door middel van het toepassen van de plasticiteitstheorie kan de rekenkundige sterkte aanzienlijk vergroot worden, waarmee een grote economische winst te behalen is. Een toetsing op basis van de [EN 1993-1-1] waarbij gebruik gemaakt kan worden van de plastische capaciteit is niet mogelijk, om de volgende drie redenen: ten eerste is de doorsnedeclassificatie van een rechthoekige doorsnede niet beschreven. Ten tweede is niet beschreven hoe een geconcentreerde last zich verdeelt over draagstaven buiten het belastingsgebied. Als laatste is het effect van de persverbinding op de stijfheid en sterkte niet behandeld.

1.3 Doelstellingen

De hoofddoelstelling van dit afstudeerwerk is te onderzoeken of een toetsing op basis van de plasticiteitstheorie mogelijk is voor persroosters. Hiervoor dient onderzocht te worden in welke mate er plastische capaciteit in persroosters aanwezig is. De tweede doelstelling is het onderzoeken van het constructieve gedrag van persroosters.

1.4 Onderzoeksmethodiek

De grote diversiteit in afmetingen en eigenschappen, de invloed van de persverbinding en de afwezigheid van beschikbaar vooronderzoek naar het constructief gedrag van persroosters, maakt persroosters een lastig product om te beschouwen. Vanwege deze drie aspecten zijn de twee doelstellingen onderzocht aan de hand van vier beschouwingen in de hierop volgende opsomming:

1. Analytische beschouwing

Vanwege het feit dat er geen beschikbaar vooronderzoek is naar het constructief gedrag van persroosters is, is het constructief gedrag analytisch onderzocht aan de

hand van mogelijke bezwijkmechanismes. De gevonden bezwijkmechanismes dienen vervolgens als basis voor verder experimenteel onderzoek naar de draagkracht van persroosters. Ook is aan de hand van de gevonden bezwijkmechanismes de draagkracht analytisch bepaald voor verschillende draagstaaf afmetingen.

2. *Experimentele bepaling van de draagkracht*

Een experimentele bepaling van de draagkracht is uitgevoerd om inzicht in het constructieve gedrag te verkrijgen en om een numerieke methodiek te kunnen valideren op basis van de proefresultaten. Aan de hand van dit onderzoek is het mogelijk de invloed van de persverbinding op het constructief gedrag te bepalen.

3. *Validatie FEM methodiek aan de hand van de proefresultaten*

Om parametrisch onderzoek uit te kunnen voeren aan de hand van een numerieke methodiek is het noodzakelijk deze methodiek te valideren. Deze validatie is gebaseerd op de proefresultaten.

4. *Een parametrisch onderzoek aan de hand van numerieke methodiek*

Met gebruikmaking van een numerieke methodiek is het parametrisch onderzoek uitgevoerd. In het parametrisch onderzoek is gekeken naar het kipgedrag van zowel een individuele draagstaaf als persroosters. Daarnaast is onderzocht in welke mate er plastische capaciteit aanwezig is in daadwerkelijk geproduceerde persroosters.

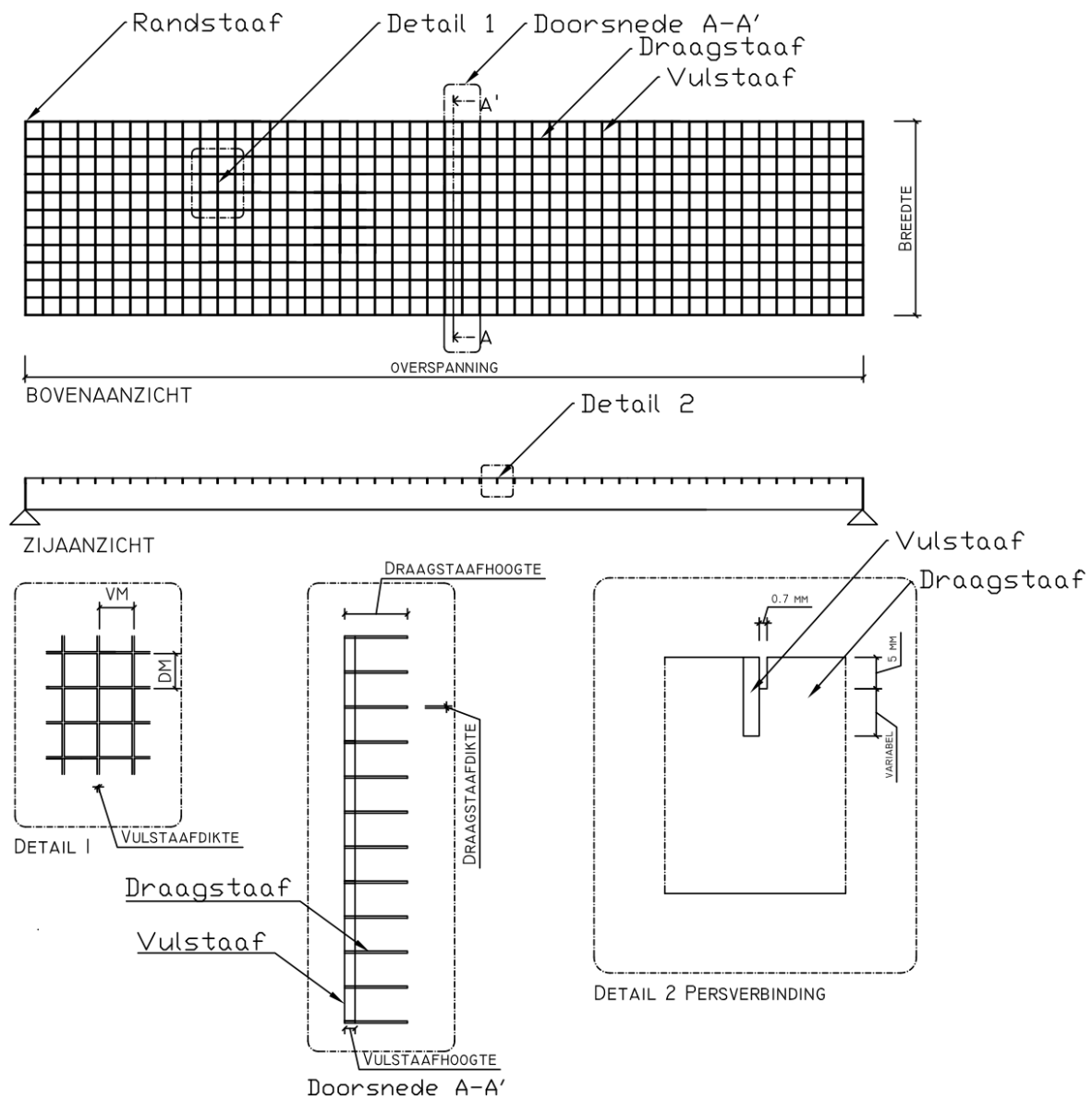
1.5 Rapportopbouw

Het rapport is opgebouwd uit 9 hoofdstukken. In hoofdstuk 2 en 3 zijn het product persroosters en de bestaande berekeningsmethodiek toegelicht. In hoofdstuk 4 is de toename in rekenkundige draagkracht t.g.v. een plastische berekeningsmethode beschreven. In hoofdstuk 5 is de draagkracht bepaald aan de hand van de bezwijkmechanismes. In hoofdstuk 6 is aan de hand van een experimentele bepaling de draagkracht bepaald. In hoofdstuk 7 is met behulp van een numerieke methode een draagkrachtanalyse uitgevoerd. In hoofdstuk 8 staat het parametrisch onderzoek beschreven. Tot slot staan in hoofdstuk 9 de conclusies en aanbevelingen vermeld.

2 Persroosters

2.1 Het product

Een persrooster is een rooster waarbij de draag- en vulstaven in elkaar geperst zijn. Deze verbinding wordt een persverbinding genoemd. In Figuur 5 staat een schematische weergave van een persrooster. Ieder persrooster bestaat uit draagstaven, vulstaven en randstaven. De draagstaven zijn voor de afdracht van krachten naar de opleggingen. De vulstaven hebben als functie om een geconcentreerde last te verdelen over de draagstaven, en ervoor te zorgen dat de draagstaven stabiel blijven. De randstaaf draagt bij aan de vormvastheid van het persrooster. Een randstaaf heeft dezelfde hoogte als de draagstaaf, maar de dikte en het profiel kunnen verschillen.



Figuur 5: Schematische weergave van een persrooster met daarbij de verschillende parameters

Persroosters worden verzinkt én/of gecoat om corrosie te voorkomen. Vooral de zinklaag heeft invloed op het gedrag van het persrooster, omdat deze invloed heeft op het constructieve gedrag van de verbinding tussen draag- en vulstaaf.

2.1.1 Productvarianties

De persroostergeometrie komt tot stand op basis van zes productievevariabelen. Hierdoor is het in theorie mogelijk om oneindig veel verschillende persroosters te produceren. Veel producenten beperken echter het aantal mogelijk combinaties, door van iedere productievevariabele een beperkt aantal te leveren. In onderstaande opsomming staan de zes productievevariabelen weergegeven, zie ook Figuur 5.

- | | |
|-------------------------|----|
| 1. Draagstaafhoogte | DH |
| 2. Draagstaafdikte | DD |
| 3. Vulstaafhoogte | VH |
| 4. Vulstaafdikte | VD |
| 5. Vulstaafmaaswijdte | VM |
| 6. Draagstaafmaaswijdte | DM |

In Tabel 1 zijn voor alle variabele waarde gegeven zoals *Staco Holding b.v.* ze levert. Met al deze variabelen kunnen theoretisch $17 * 4 * 4 * 10 * 10 = 27200$ verschillende persroosters gefabriceerd worden. Het werkelijke aantal is echter kleiner doordat bepaalde combinaties elkaar uit sluiten.

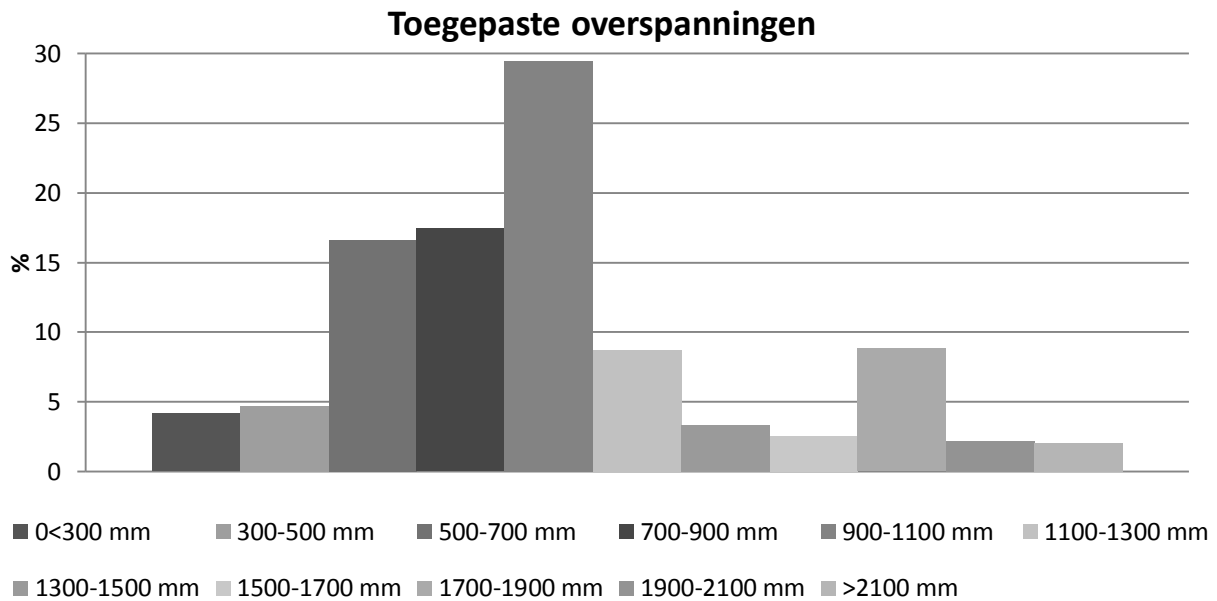
Tabel 1: Mogelijke waarde in mm van iedere productievevariabele

	Mogelijke waarde in mm
Draagstaafhoogte	20,25,30,35,40,45,50,60,70,80,90,100,110,120,130,140,150
Draagstaafdikte	2,3,4,5
Vulstaafhoogte	10,12,14,20
Vulstaafmaaswijdte	11.1, 16.6, 22.2, 33.3, 44.4, 55.5, 66.6, 77.7, 88.8, 99.9
Draagstaafmaaswijdte	11.1, 16.6, 22.2, 33.3, 44.4, 55.5, 66.6, 77.7, 88.8, 99.9

Er is duidelijk sprake van productievariabelen die in meer en mindere mate voorkomen. Uit Tabel 2 blijkt dat draagstaafhoogtes van 25, 30 en 40 mm in meer dan 80% van de gevallen worden toegepast. Hetzelfde kan gesteld worden over een draag-en vulstaafmaaswijdte van 33.3 mm. Aan de hand van Figuur 6 kan gesteld worden dat de meeste overspanningen tussen de 900 en 1100 mm liggen. Op basis van Tabel 2 is bepaald welke persroostergeometrieën relevant zijn voor dit onderzoek.

Tabel 2: Toegepaste productievariabelen in % (Bron: Dejo stuklijst 2013)

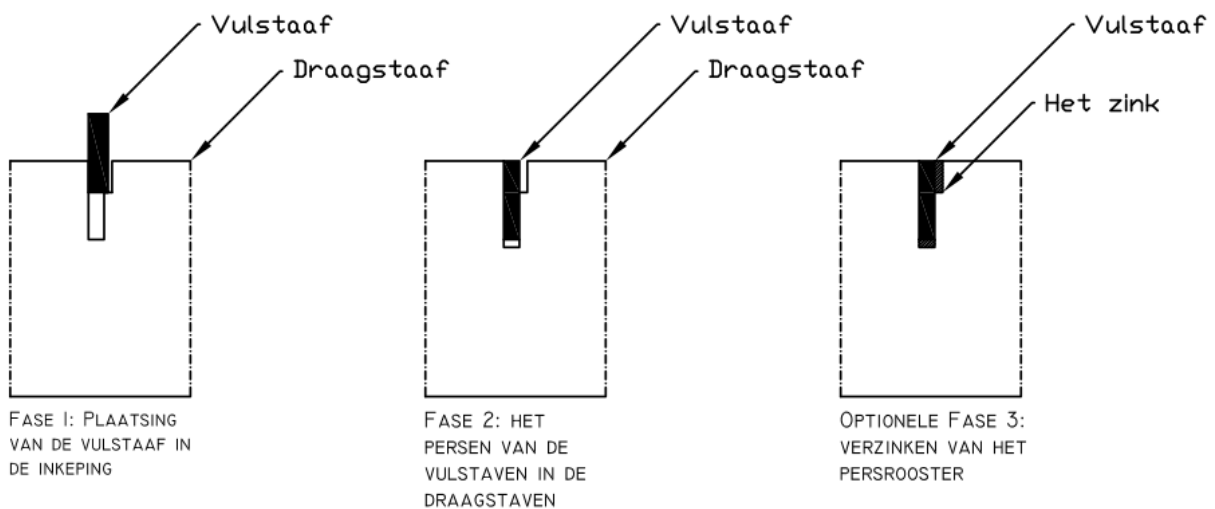
DH mm	%	VM mm	%	DM mm	%	DD mm	%	VH mm	%
20	0.62	11.1	4.1	11.1	2.3	2	56.1	10	99.1
25	12.7	16.6	0.7	16.6	0.2	3	29.9	12	-
30	53.5	22.2	3.3	22.2	2.3	4	3.7	14	-
35	2.53	33.3	81.0	33.3	79.9	5	10.1	20	0.9
40	21.7	44.4	2.5	44.4	4.3				
45	0.11	55.5	0.5	55.5	0.4				
50	5.87	66.6	4.4	66.6	3.3				
60	1.87	77.7	0.07	77.7	-				
70	0.22	88.8	0.06	88.8	0.15				
80	0.46	99.9	3.3	99.9	7.2				
90	0.02								
100	0.15								
110	-								
120	0.15								
130	0.05								
140	0.01								
150	0.02								



Figuur 6: Toegepaste overspanningen in % (Bron: Dejo stuklijst 2013)

2.1.2 Persverbinding

De verbinding tussen de draag- en vulstaaf, de persverbinding, krijgt zijn sterkte uit enerzijds het lokaal plastisch vervormen van zowel de draag- als vulstaaf en anderzijds uit de aanwezigheid van zink in de persverbinding, in het geval van verzinken. In het tot stand komen van de persverbinding zijn altijd twee fases en één optionele fase aan te duiden, zie Figuur 7.



Figuur 7: De drie fases in het tot stand komen van de persverbinding

In Fase 1 worden de vulstaven gepositioneerd in de inkepingen in de draagstaven. Doordat de bovenkant van de inkeping breder is dan de vulstaaf, wordt de vulstaaf op zijn plaats gehouden. In Fase 2 worden de vulstaven in de draagstaven geperst. Zoals Figuur 8 illustreert, blijft er veel ruimte over tussen de draag- en vulstaaf.



Figuur 8: Niet verzinkte persverbinding

Alle sterkte en stijfheid wordt gegenereerd op een beperkt contactoppervlak, in het geval van niet verzinken. In de optionele derde fase wordt het persrooster verzinkt. Door het zinken wordt de ruimte die in de persverbinding aanwezig (deels) opgevuld, zie Figuur 9.



Figuur 9: Doorsnede van de persverbinding na het verzinken

2.1.3 Opleggingen

Persroosters worden tenminste aan weerszijde van de draagstaven opgelegd. Het opleggen van een persrooster op alle zijden komt ook regelmatig voor. Het gebied waarop de oplegging plaatsvindt bestaat uit een randstaaf en plusminus 25 mm lengte van de draafstaaf. Met behulp van kikkers, zie Figuur 10 aan de rechterkant, worden de persroosters gefixeerd aan de opleggingen.

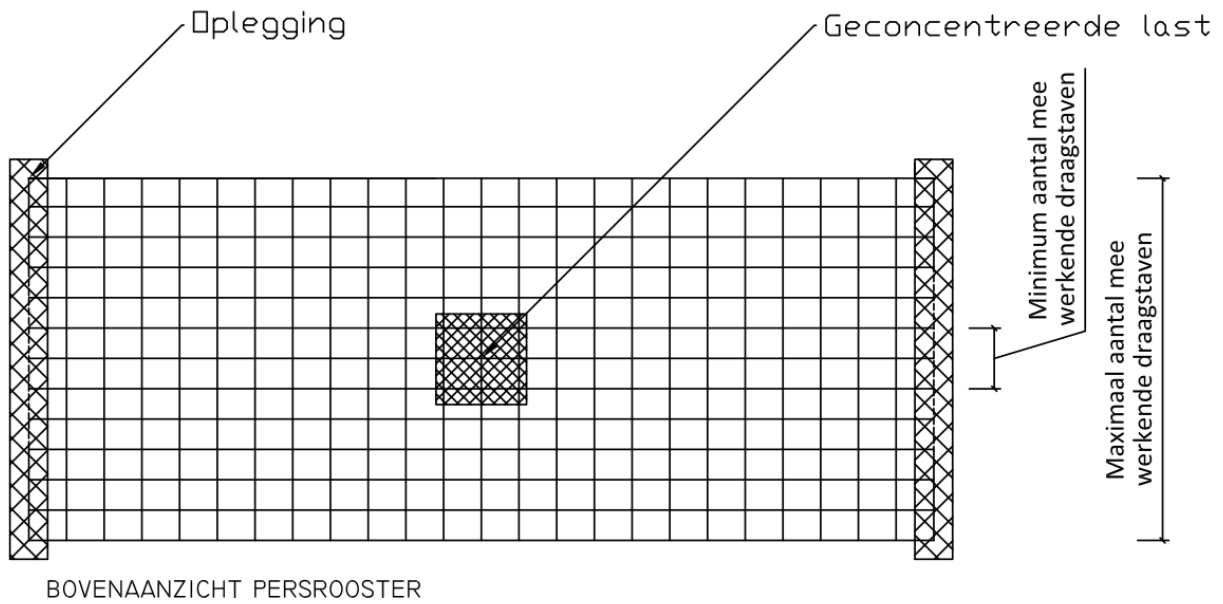


Figuur 10: Opleggingsmethodiek voor persrooster

2.1.4 Krachtswerking

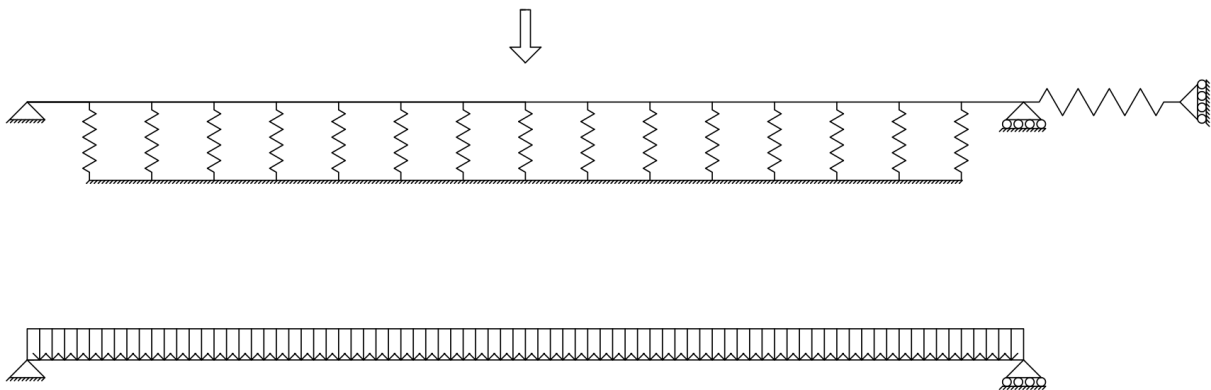
De manier waarop een persrooster kracht afdraagt hangt van veel parameters af. Bepalend hierbij zijn: het aantal opgelegde zijdes, de afmetingen van de draag- en vulstaven en het type belasting. Over het algemeen kan gesteld worden dat de draagstaven de belasting af voeren naar de opleggingen, en de vulstaven een geconcentreerde last verdelen over een aantal draagstaven buiten het belastingsgebied.

Er is onderscheid te maken tussen een verdeelde belasting en een geconcentreerde belasting. Een verdeelde belasting wordt gelijkmatig over de draagstaven verdeeld. De afdracht van een geconcentreerde last is veel complexer door het optreden van herverdeling middels de vulstaven. Zo wordt een geconcentreerde last door een x -aantal draagstaven afgedragen. Hoe groot dit aantal is hangt af van de persroostergeometrie en de breedte haaks op de draagstaafrichting van de geconcentreerde last. Bepalend hierbij is de stijfheidsverhouding tussen de draag- en vulstaven en de vulstaafmaaswijdte. Gesteld kan worden dat het aantal geactiveerde draagstaven ligt tussen aantal direct belaste draagstaven en de totale breedte van het persrooster, zie Figuur 11.



Figuur 11: Krachtsafdracht t.g.v. geconcentreerde last

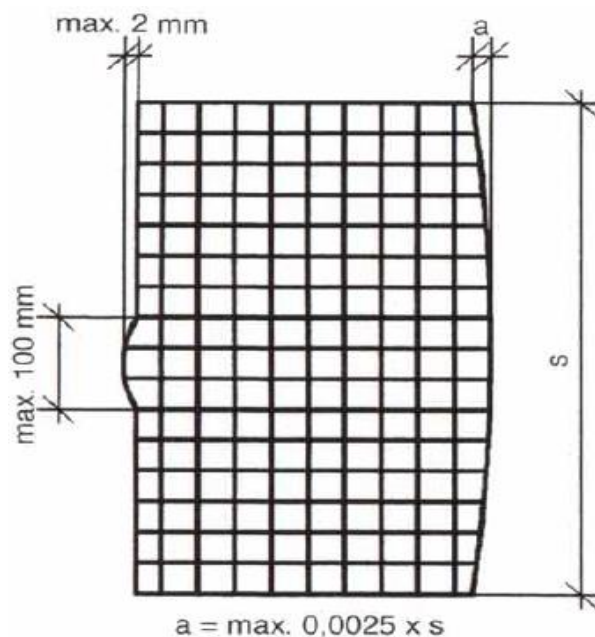
Het soort belasting heeft ook veel invloed op de manier waarop een individuele draagstaaf gezien kan worden. In het geval van een geconcentreerde last op een persroosters waarbij deze last niet over alle draagstaven verdeeld wordt, kan een individuele draagstaaf gezien worden als een ligger op twee steunpunten met veren t.p.v. van de vulstaven, zie het bovenste figuur van Figuur 12. Ook is de horizontale verplaatsing beperkt, omdat de minder belaste draagstaven via de randstaaf deze verplaatsing beperken. In het geval van een verdeelde belasting kan een individuele draagstaaf gezien worden als een ligger op twee steunpunten, zie het onderste figuur van Figuur 12.



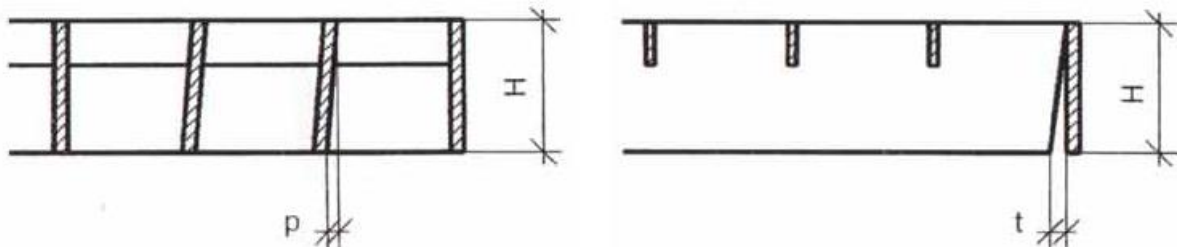
Figuur 12: Mechanica-schema van een draagstaaf aan de hand van het soort belasting. In het bovenste figuur Mechanica-schema van een draagstaaf in het geval van een geconcentreerde last en in het onderste figuur in het geval van een verdeelde belasting.

2.1.5 Productietoleranties

De grootte van de imperfecties zijn gebonden aan een maximum, zoals voorgeschreven is in de [RAL-GZ-638], zie Figuur 13 en Figuur 14. Het stellen van grenzen aan de grootte imperfecties heeft twee redenen. De eerste reden is functioneel van aard. Zo dienen gebruikers niet over defecten te struikelen, en dient het persrooster goed te passen op de opleggingen. Ten tweede is het mogelijk dat te grote imperfecties negatieve effecten hebben op de draagkracht.



Figuur 13: Maximale grootte imperfecties zoals voorgeschreven in de [RAL-GZ-638]



Figuur 14: Maximale grootte imperfecties in de draag- en randstaven zoals voorgeschreven in de [RAL-GZ-638]

Zoals Figuur 13 laat zien is de grootte van de imperfecties gelimiteerd aan 0.0025 keer de breedte of lengte van het persroosters. Voor lokale imperfecties is dit 2 mm op een lengte van maximaal 100 mm. De imperfecties 'p' en 't' in Figuur 14 zijn gelimiteerd tot 3 mm of 0.1 keer de draag- of randstaafhoogte.

De maximaal imperfecties zoals voorgeschreven in de [RAL-GZ-638], zeggen niet per definitie iets over de werkelijk imperfecties in persroosters, omdat iedere producent zijn eigen machines en kwaliteitscontrole heeft.

2.1.6 Toegepaste materialen

Persroosters worden primair gefabriceerd uit staal. De staalsoort *S235* wordt het meest toegepast. Het gebruik van sterkere staalsoorten, zoals *S355*, komt beperkt voor. Ook aluminium wordt toegepast, zij het beperkt, omdat de E-modulus van aluminium aanzienlijk lager is dan van staal. Door deze lagere E-modulus is doorbuiging eerder maatgevend.

2.2 Productieproces

Het productieproces van een persrooster kan worden opgedeeld worden in vier stappen. In stap 1 worden de draagstaven op lengte gesneden en de inkeping voor de persverbinding geponst. In stap 2 worden de vulstaven op lengte gesneden en de verbinding geperst. In stap 3 worden de randstaven aan de draag- en vulstaven gelast. In de laatste stap, stap 4 vindt de corrosiebescherming plaats middels verzinken en/of poedercoaten.

2.2.1 Stap 1: Productie draagstaven.

Rollen plaatstaal zoals in Figuur 15 worden afgewikkeld en recht gebogen, om volgens op de gewenste lengte te worden gesneden. Vervolgens worden in de op lengte gesneden draagstaven inkepingen geponst, zie In

Figuur 16.



Figuur 15: Op draagstaafhoogte gesneden plaatstaal voor de productie van de draagstaven



Figuur 16: Inkepingen in de draagstaven t.b.v. de persverbinding

2.2.2 Stap 2: Productie vulstaaf plus persing

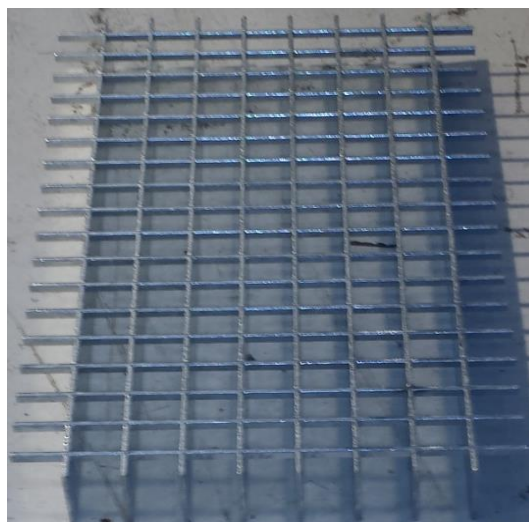
Een machine positioneert de draagstaven op de juiste draagstaafmaaswijdte. In Figuur 17 staat een weergave van zo'n machine.



Figuur 17: Niet volledige geautomatiseerd, ouder type machine, voor het persen van de persverbinding (zonder draagstaven)

De manier waarop de persverbinding tot stand komt heeft iets weg van printen. In een moderne machine, wordt een vulstaaf geplaatst over de inkepingen in de draagstaven, zie ook Figuur 7, en gelijktijdig op lengte gesneden. Vervolgens vindt de persing van de persverbinding plaats. Hierna schuiven de draagstaven één vulstaafmaaswijdte door en wordt het proces herhaald. Dit proces gaat door totdat alle vulstaven in de draagstaven geperst zijn. Het eindproduct van deze stap is een rooster bestaande uit geperste draag- en vulstaven, zie

Figuur 18.



Figuur 18: Persrooster na stap twee van het productieproces

2.2.3 Stap 3: Bevestigen randstaaf

De randstaven worden gepuntlast aan zowel de vul- als de draagstaven. Dit proces kan zowel geautomatiseerd als handmatig uitgevoerd worden, bepalend hierbij is de productie-variëteit. Bij een grote productie-variëteit ligt het meer voor de hand om dit proces handmatig uit te voeren.

2.2.4 Stap 4: Corrosiebescherming

Corrosie vormt een aanzienlijk risico voor de draagkracht van een persrooster. Een persrooster is extra gevoelig voor corrosie, vanwege de grote verhouding tussen oppervlak en volume. Figuur 19 geeft de staat van een verzinkt persrooster weer, na een blootstelling van 20 jaar aan de elementen, in een zilte omgeving.



Figuur 19: Corrosie van een verzinkt persrooster na een blootstelling van 20 jaar aan de elementen

Zoals Figuur 19 illustreert is corrosiebescherming onontbeerlijk. Deze bescherming kan verkregen worden middels thermisch verzinken en/of poedercoaten. Een combinatie van de twee komt ook voor. Van deze twee behandelmethoden wordt verzinken het meest toegepast. Het voordeel van verzinken is dat het de sterkte van de persverbinding vergroot en daarmee de draagkracht. Het voordeel van een poedercoaten is dat het mogelijk is persroosters in verschillende kleuren te verven.

Het verzinken geschiedt in een lang zinkbad waar de persroosters ingehangen worden. Een poedercoating wordt met behulp van elektrische landing aangebracht en vervolgens in een oven uitgebakken.

3 Bestaande berekeningsmethodiek

In dit hoofdstuk is de berekeningsmethodiek volgens de [RAL-GZ-638] in paragraaf 3.1 toegelicht. In paragraaf 3.2 is de plastische berekeningsmethodiek uit EN 1993-1-1 besproken.

3.1 RAL-GZ-638

De [RAL-GZ-638] van het *Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V.* is een standaard van de bedrijfstak. In deze standaard worden roosters op basis van de lineair elasticiteitstheorie getoetst. De toetsing vindt plaats op basis van de draagstaven. De [RAL-GZ-638] onderscheidt twee soorten belastingen, namelijk een verdeelde- en geconcentreerde last.

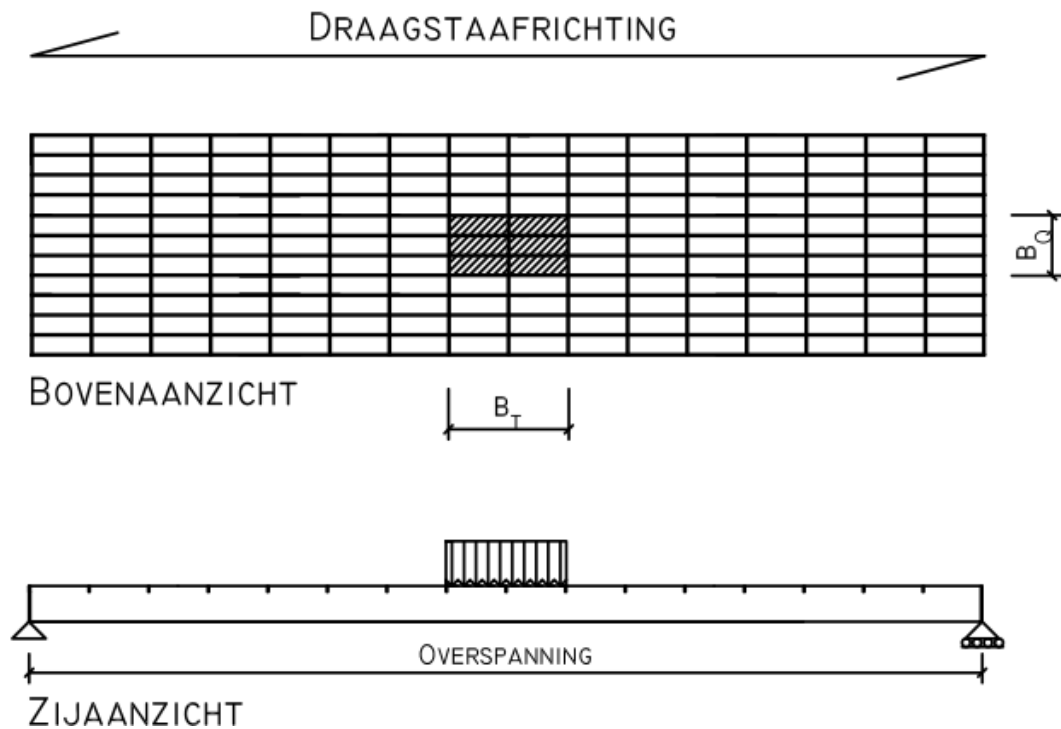
Voor de grootte van de belastingen op vloeren verwijst de [RAL-GZ-638] naar codes van het land van toepassing. Voor belastingen op traptreden wordt er daarentegen wel een belasting voorgeschreven van één of meerdere geconcentreerde lasten van 1.5 kN. Het aantal geconcentreerde lasten hangt af van de lengte van de treden. Belangrijk om te vermelden is dat de belasting t.g.v. eigengewicht buiten beschouwing wordt gelaten.

De [RAL-GZ-638] stelt ook doorbuigingseisen. Het doorbuigingscriterium is gesteld op $1 / 300$ van de overspanning met een maximum waarde van 6 mm voor traptreden. Voor overige toepassingen is er een doorbuigingscriterium van $1 / 200$ van de overspanning gesteld.

In paragrafen 3.1.1 t/m 3.1.3 is de toetsing van een persroosters volgens de [RAL-GZ-638] toegelicht. De gebruikte eenheden in de [RAL-GZ-638] zijn kN/cm^2 , dN , cM. In de voorbeelden zijn deze eenheden aangepast naar Newton en millimeter.

3.1.1 Toetsing op sterkte en vervorming t.g.v. een geconcentreerde last

In deze paragraaf is de toetsing van een persrooster dat belast is door een geconcentreerde last toegelicht, zie Figuur 20.



Figuur 20: Toetsing persrooster aan de hand van de [RAL-GZ-638] met een geconcentreerde belasting

Het rekenkundig moment wordt bepaald aan de hand van formule 3.1. In deze formule is M_k het karakteristieke moment, F_p de geconcentreerde last, B_T is de breedte van de last parallel aan de draagstaafrichting en γ is de veiligheidsfactor. De waarde van deze factor γ bedraagt 1.5.

$$M_d = M_k * \gamma \quad [3.1]$$

$$M_k = \frac{F_p \left(L - \frac{B_T}{2} \right)}{4} \quad [3.2]$$

Het rekenkundig moment M_d zoals berekend aan de hand van formule 3.1 wordt gedragen door, enerzijds het aantal draagstaven waarop de geconcentreerde last staat, en anderzijds een x-aantal draagstaven buiten het belastinggebied. Het totaal aantal dragende draagstaven N , wordt aan de hand van formule 3.3 bepaald. In deze formule is B_Q de lengte van de geconcentreerde last haaks aan de draagstaafrichting, DM de draagstaaftaaswijdte en M is het aantal extra draagstaven die mee werken buiten het belastinggebied.

$$N = \frac{B_Q}{DM} + M \quad [3.3]$$

De grootte van de factor M voor persroosters staat in Tabel 3, in de dikgedrukte rechthoek. De waarde van deze factor hangt af van de draagstaafhoogte.

Tabel 3: Tabel 1 uit [RAL-GZ-638](Herverdelingstabel). In zwart omlijnt de herverdelingswaarde voor persroosters

Tragstabhöhe (mm)	Anzahl „m“ der durch die Lastverteilung der Querstäbe mittragenden Tragstäbe		
	Schweißpressroste Maschenteilung (ca. 34 x 38)	Pressroste Maschenteilung (ca. 33 x 33)	Steckroste Maschenteilung (ca. 33 x 33)
20	2,25	3,33	3,50
25	2,19	3,25	3,38
30	2,13	3,17	3,25
35	2,06	3,08	3,13
40	2,00	3,00	3,00
45	1,94	2,92	2,88
50	1,88	2,83	2,75
55	1,81	2,75	2,63
60	1,75	2,67	2,50
65	1,69	2,58	2,38
70	1,63	2,50	2,25
75	1,56	2,42	2,13
80	1,50	2,33	2,00
85	–	2,25	1,88
90	–	2,17	1,75
95	–	2,08	1,63
100	–	2,00	1,50

Het weerstandsmoment wordt bepaald aan de hand van formule 3.4. In deze formule is DD de draagstaafdikte, DH de draagstaafhoogte, N het aantal meewerkende draagstaven en v is een correctiefactor die de invloed van de persverbinding op de sterkte meeneemt. De grootte van de correctiefactor v is 0.9.

$$W_{exis} = \frac{DD * DH^2}{6} * N * v \quad [3.4]$$

Door middel van het delen van het rekenkundig moment M_d op het weerstandsmoment W_{exis} wordt de spanning in de uiterste vezel bepaald. Deze spanning dient lager of gelijk te zijn dan de vloeigrens, om aan de sterkte-eis te voldoen, zie formule 3.5.

$$\sigma = \frac{M_d}{W_{exis}} \leq f_y \quad [3.5]$$

De doorbuiging t.g.v. een geconcentreerde last wordt berekend aan de hand van formule 3.6. De berekende doorbuiging kan vervolgens getoetst te worden aan de doorbuigingscriterium.

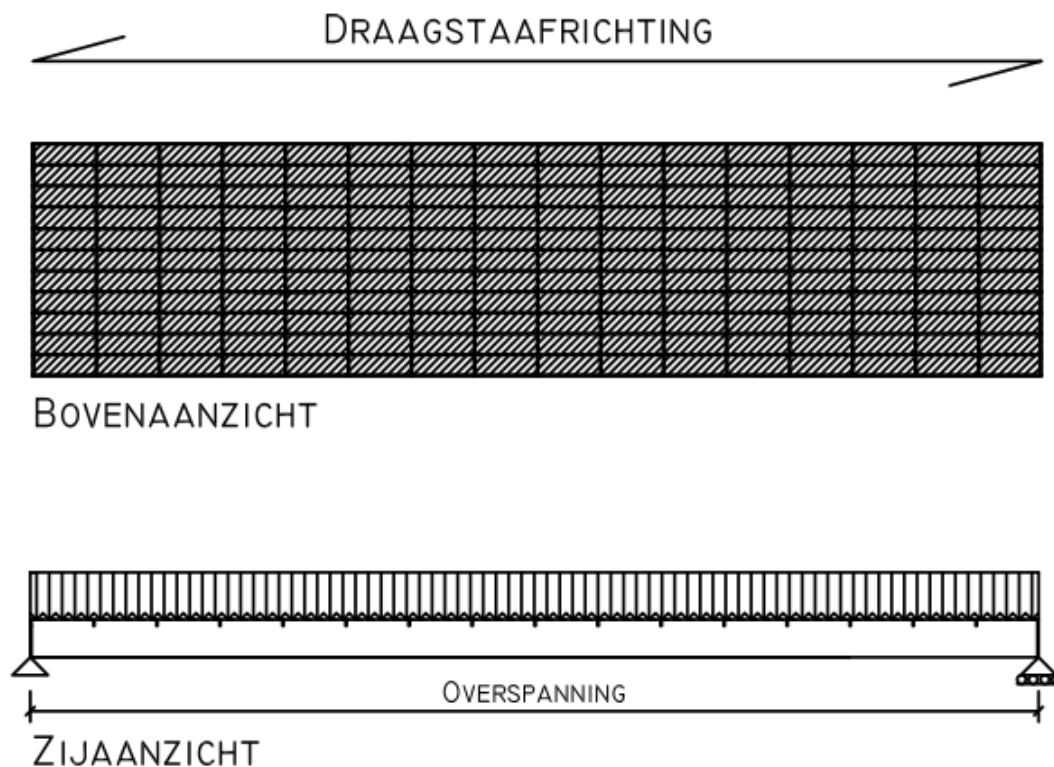
$$f = \frac{F_p}{384 * E * I_{exis}} * 8 * L^3 - 4 * L * B_Q^2 + B_Q^3 \quad [3.6]$$

$$I_{exis} = \frac{DD * DH^3}{12} * N * \nu \quad [3.7]$$

In formule 3.6 is, L de overspanningslengte, E de E-modulus, B_Q de lengte van de last haaks aan de draagstaafrichting, F_p de karakteristieke geconcentreerde last, N het aantal meewerkende draagstaven en ν de correctiefactor voor de invloed van de persverbinding op stijfheid.

3.1.2 Toetsing op sterkte en vervorming t.g.v. een verdeelde belasting

In deze paragraaf is de toetsing van een persrooster dat belast is door een verdeelde belasting op het volledige oppervlak toegelicht, zie Figuur 21.



Figuur 21: Toetsing persrooster aan de hand van de [RAL-GZ-638] met een verdeelde belasting op het volledige oppervlak

De toetsing met betrekking tot sterkte en doorbuiging geschiedt op basis van de toetsing van één draagstaaf. De verdeelde belasting wordt met behulp van formule 3.9 omrekenend naar een momenten t.g.v. een lijnlast op één draagstaaf.

$$M_d = M_k * \gamma \quad [3.8]$$

$$M_k = \frac{F_v * DM * L^2}{8} \quad [3.9]$$

$$W_{exis} = \frac{DD * DH^3}{6} * v \quad [3.10]$$

In formules 3.9 en 3.10 is, L de overspanningslengte, E de E-modulus, F_v de karakteristieke verdeelde belasting, DM de draagstaafmaaswijdte, v de een correctiefactor.

Door rekenwaarde voor het moment M_d te delen op de in formule 3.8 berekend weerstandsmoment wordt de spanning in de uiterste vezel bepaald, zie formule 3.11. De spanning in de uiterste vezel dient lager of gelijk te zijn aan de vloeigrens, om aan de sterkte-eis te voldoen.

$$\sigma = \frac{M_d}{W_{exis}} \leq f_y \quad [3.11]$$

De grootte van de doorbuiging wordt bepaald aan de hand van formule 3.12.

$$f = \frac{5 * F_v * DM * L^4}{384 * E * I_{exis}} \quad [3.12]$$

Waarin:

$$I_{exis} = \frac{DD * DH^3}{12} * v \quad [3.13]$$

In formules 3.12 en 3.13 is, L de overspanningslengte, E de E-modulus, F_v de karakteristieke verdeelde belasting, DM de draagstaafmaaswijdte, v de correctiefactor.

3.1.3 Voorbeeld toetsing sterkte en doorbuiging.

In deze paragraaf staan twee voorbeeldberekeningen van de toetsing volgens de [RAL-GZ-638], van een persrooster, met een geconcentreerde last en een verdeelde last. Het persrooster heeft de volgende specificatie: de draagstaafmaaswijdte bedraagt 33.3 mm, de overspanning en breedte van het persrooster zijn respectievelijk 1000 en 500 mm, de draagstaafhoogte en dikte bedragen respectievelijk 40 en 2 mm en het persrooster is vervaardigd uit staalsoort S235.

In voorbeeld één, zie Figuur 20, is er sprake van een geconcentreerde last van 1500 Newton. Deze last staat op een oppervlak van 100 bij 100 mm. In voorbeeld twee, zie Figuur 21, is er sprake van een verdeelde last van 10 kN/m² over het gehele oppervlak van het persrooster.

Voorbeeld 1 geconcentreerde last: toetsing op sterkte:

$$M_D = \frac{F_p \left(L - \frac{B_T}{2} \right)}{4} * 1.5 = \frac{1500 \left(1000 - \frac{100}{2} \right)}{4} * 1.5 = 534375 \text{ Nmm}$$

$$N = \frac{B_Q}{DM} + M = \frac{100}{33.3} + 3 = 6$$

$$W_{exis} = \frac{DD * DH^2}{6} * N * v = \frac{2 * 40^2}{6} * 6 * 0.9 = 2880 \text{ mm}^3$$

$$\sigma = \frac{M_D}{W_{exis}} = \frac{534375}{2880} = 185.5 \frac{N}{\text{mm}^2} \leq 235$$

$$\sigma = \frac{M_d}{W_{exis}} = \frac{534375}{2880} = 185.5 \frac{N}{\text{mm}^2} \leq 235$$

Voorbeeld 1 geconcentreerde last: toetsing op doorbuiging

$$f = \frac{F_p}{384 * E * I_{exis}} * 8 * L^3 - 4 * L * B_Q^2 + B_Q^3 = \frac{1500}{384 * 210000 * \frac{2 * 40^3}{12} * 6 * 0.9} * (8 * 1000^3 - 4 * 1000 * 100^2 + 100^3) = 2.57 \text{ mm} \leq 5 \text{ mm}$$

Voorbeeld 2 verdeelde last: toetsing op sterkte:

$$M_D = M_k * 1.5 = \frac{F_v * DM * L^2}{8} * 1.5 = \frac{0.01 * 33.3 * 1000^2}{8} = 61875 \text{ Nmm}$$

$$\sigma = \frac{M_D}{W_{exis}} = \frac{61875}{\frac{2 * 40^2}{6} * 1 * 0.9} = 129 \frac{N}{\text{mm}^2} \leq 235$$

Voorbeeld 2 verdeelde last: toetsing op doorbuiging:

$$f = \frac{5 * F_v * DM * L^4}{384 * E * I_{exis}} = \frac{5 * 0.01 * 33.3 * 1000^4}{384 * 210000 * \left(\frac{2 * 40^3}{12} * 1 * 0.9 \right)} = 2.15 \text{ mm} \leq 5 \text{ mm}$$

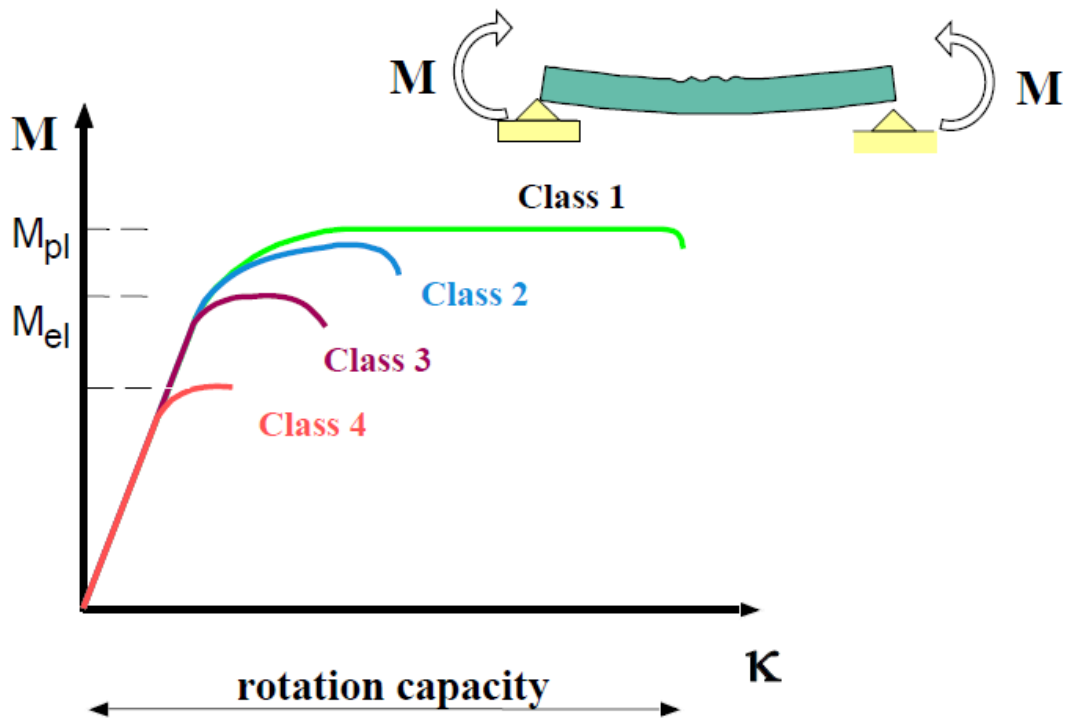
3.1.4 Opmerkingen op de RAL-GZ-638

Aan de hand van de [RAL-GZ-638] is het mogelijk persroosters betrekkelijk eenvoudig te toetsen. Deze eenvoud gaat echter wel ten koste van de nauwkeurigheid. Hierdoor is de [RAL-GZ-638], naar waarschijnlijkheid in veel persroostergeometrieën te conservatief en wellicht zelfs onveilig in andere. In de onderstaande opsomming staan opmerkingen op de [RAL-GZ-638] weergegeven.

- Bezijken t.g.v. instabiliteit wordt niet beschouwd. Het is daardoor mogelijk dat een persrooster volgens de [RAL-GZ-638] voldoet met betrekking tot sterkte, terwijl het persrooster door het optreden van kipinstabiliteit deze sterkte niet bereikt.
- De herverdelingstabel, tabel 1 uit de [RAL-GZ-638] is gebaseerd op een draag- en vulstaafmaaswijdte van 33.3 bij 33.3 mm. Toch wordt deze tabel toegepast op persroosters met alle mogelijk draag-en vulstaafmaaswijdtes.
- De mate van herverdeling van een geconcentreerde last over draagstaven buiten het belastingsgebied is alleen afhankelijk van de draagstaafhoogte. Dit terwijl het aannemelijk is dat de stijfheidsverhouding tussen de draag- en vulstaven en het aantal vulstaven bepalend is voor de mate van herverdeling van een geconcentreerde last.
- De correctiefactor v , die de invloed van de persverbinding op sterkte en stijfheid in beschouwing neemt, is voor iedere draagstaafhoogte constant. Dit terwijl het aannemelijk is dat, de invloed van de persverbinding op stijfheid en sterkte toeneemt naarmate de hoogte van persverbinding groter wordt in relatie tot de draagstaafhoogte, zie ook paragraaf 1.1.
- De correctiefactor v , is alleen gegeven voor verzinken persroosters. Het is daarom niet duidelijk, of en hoe ook niet-verzinkt persrooster berekend kunnen worden hand van de [RAL-GZ-638].

3.2 EN 1993-1-1

[EN 1993-1-1] geeft de mogelijkheid constructies op basis van de plasticiteitstheorie te berekenen. Staalprofielen worden volgens [EN 1993-1-1] in vier verschillende doorsnedeklassen ingedeeld. In Figuur 22 staat een weergave van de relatie tussen het moment en rotatie voor deze vier klassen. Een doorsnedeklasse geeft aan, in welke maten een doorsnede kan roteren, zonder dat er lokale instabiliteit ontstaat. Het verschil tussen een doorsnedeklasse 1 en 2 is, dat een doorsnedeklasse 1 over zodanig veel rotatiecapaciteit beschikt, dat een constructie via het ontstaan van een plastisch scharnier kan gaan herverdelen. De doorsnedeklasse wordt aan de hand van tabel 5.2 van [EN 1993-1-1] bepaald.



Figuur 22: Doorsnedeclassificatie volgens EN 1993-1-1

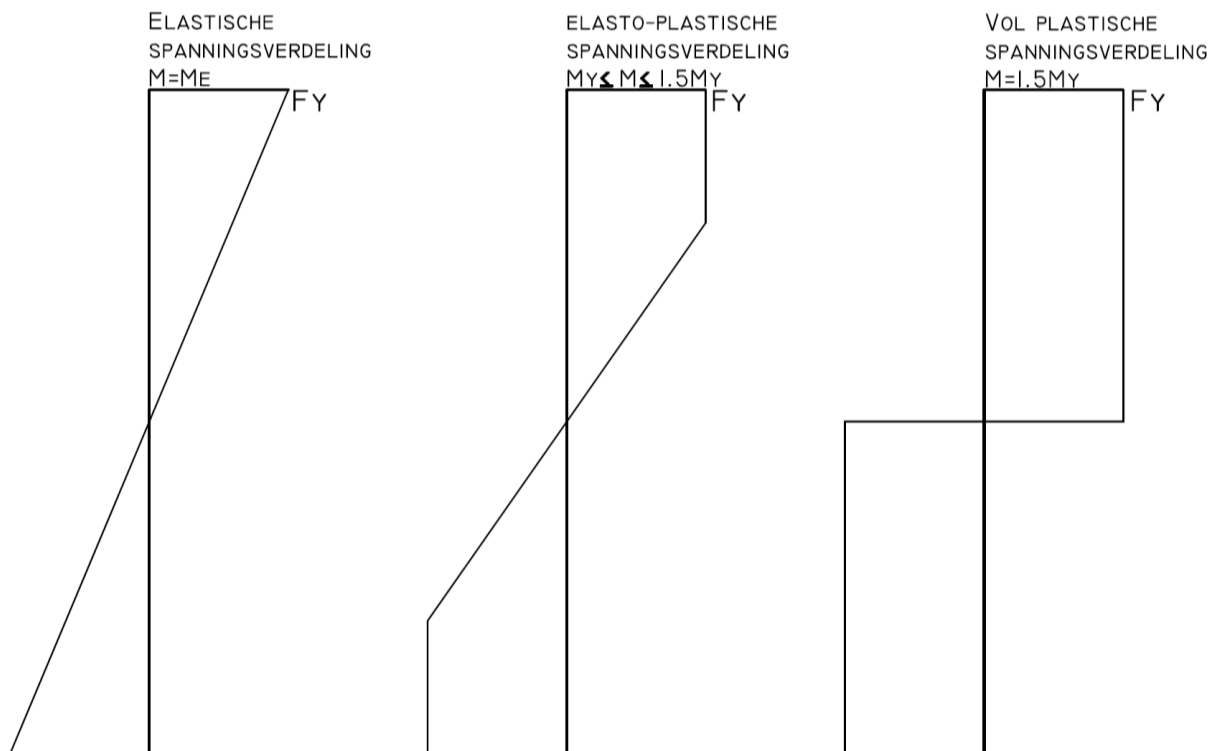
Het toepassen van EN 1993-1-1 op persroosters is om de volgende drie redenen problematisch. Ten eerste wordt een rechthoekige doorsnede niet behandeld in tabel 5.2 van EN 1993-1-1. Hierdoor is het niet mogelijk een draagstaaf in een doorsnedeklasse in te delen. Het is hierdoor niet duidelijk tot welke moment een draagstaaf belast kan worden. Ten tweede is het effect van de persverbinding op de sterkte niet behandeld. En als laatste beschrijft EN 1993-1-1 niet in welke mate een geconcentreerde belasting wordt herverdeeld over draagstaven buiten het belastinggebied.

4 Plasticiteitstheorie in relatie tot lineaire-elasticiteitstheorie

De capaciteitswinst van een plastische berekeningsmethodiek t.o.v. een berekening op basis van lineair elasticiteitstheorie is puur rekenkundig. De grotere rekenkundige draagkracht komt voort uit twee aspecten. Het eerste aspect is dat het interne koppel in de doorsnede groter wordt doordat, een groter deel van de doorsnede geactiveerd wordt. Dit aspect is in paragraaf 4.1 behandeld. Het tweede aspect zit hem in het ontstaan van plastisch scharnieren. Deze scharnieren zorgen ervoor, dat er een herverdeling op kan treden in een constructief element. Door deze herverdeling neemt de draagkracht toe. Dit aspect is in paragraaf 4.2 behandeld.

4.1 Rekenkundige draagkracht t.g.v. plastische spanningsverdeling

De grootte van de toename van de rekenkundige sterkte t.g.v. plastische spanningsverdeling, hangt af van de vorm van de doorsnede. Bij een rechthoekige doorsnede, zoals een draagstaaf, is de toename van de rekenkundige sterkte een factor 1.5. In Figuur 23 staat een weergave van een elastische, elasto-plastische en een vol plastische spanningsverdeling over een rechthoekige doorsnede. Naar mate de doorsnede verder gaat vloeien neemt het interne koppel van de doorsnede toe waardoor de draagkracht groter wordt.

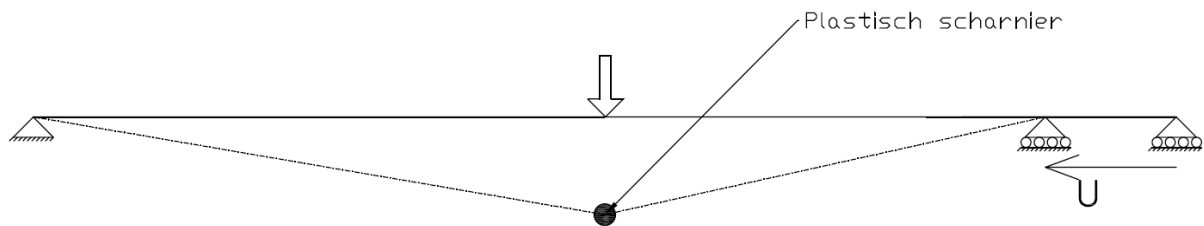


Figuur 23: Elastische(links),elasto-plastische (midden) en vol plastische(rechts) spanningsverdeling over een rechthoekige doorsnede

4.2 Rekenkundige draagkracht t.g.v. herverdeling door het ontstaan van plastische scharnieren

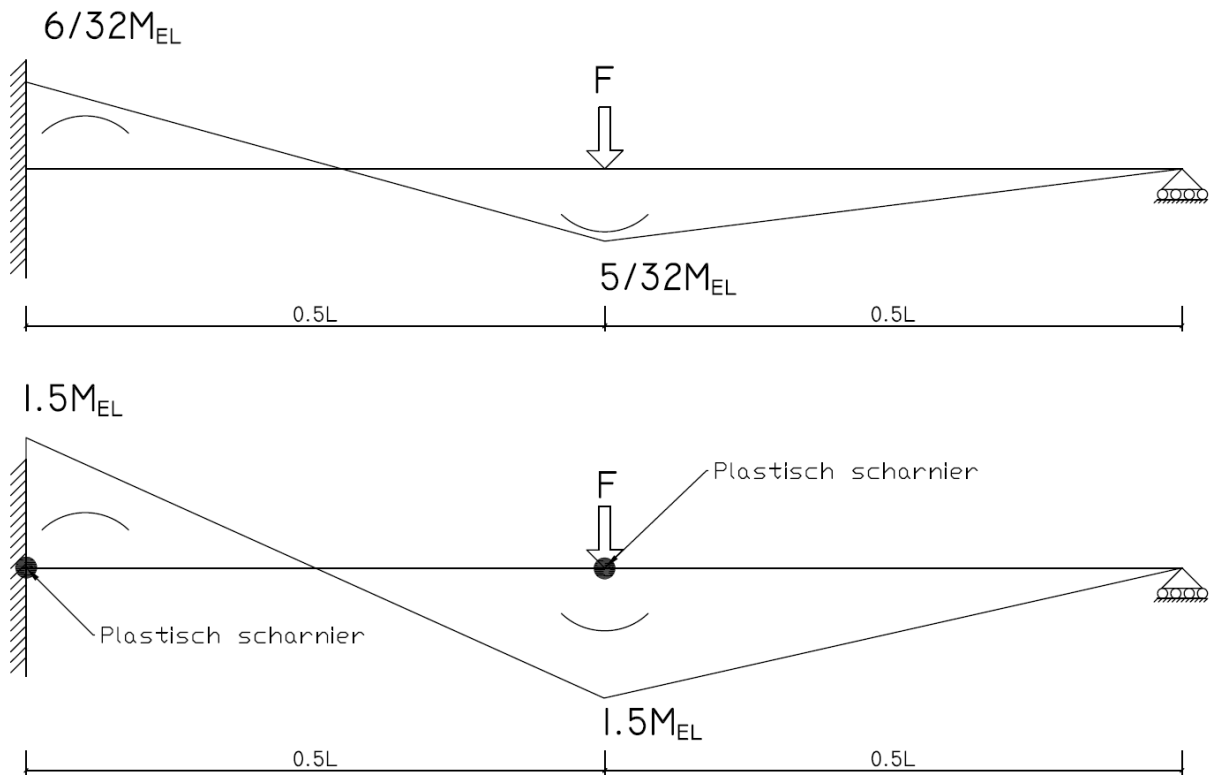
Om een last te kunnen herverdelen door het ontstaan van plastische scharnieren, dient een constructief element te voldoen aan de eisen zoals gesteld in paragraaf 3.2. Een bijkomende eis is dat de constructie statisch onbepaald dient te zijn.

Een plastisch scharnier is een scharnier dat ontstaat in een constructief element t.g.v. het volledig vloeien van de doorsnede, hierdoor is er geen rotatiestijfheid t.p.v. dit scharnier. Wanneer er sprake is van een statisch bepaalde constructie, zie Figuur 24, resulteert dit scharnier direct in een mechanisme, waardoor het constructief element bezwijkt. Hierdoor kan er geen herverdeling van moment plaatsvinden.



Figuur 24: Mechanisme t.g.v. één plastisch scharnier in een statisch bepaalde constructie

Wanneer er sprake is van een statisch onbepaalde constructie, zoals in Figuur 25, resulteert één plastisch scharnier niet in het bezwijken. De reden hiervoor is dat er geen mechanisme in het constructief element kan ontstaan. Door het scharnier verandert de afdracht van de krachten waardoor de belasting herverdeeld wordt. Deze herverdeling verhoogt de sterkte van het constructief element. Hoe groot de toename t.g.v. deze herverdeling is, hangt af constructie en belasting.



Figuur 25: Elastische, boven, en plastische, onder, bewijslast van een statisch onbepaalde constructie

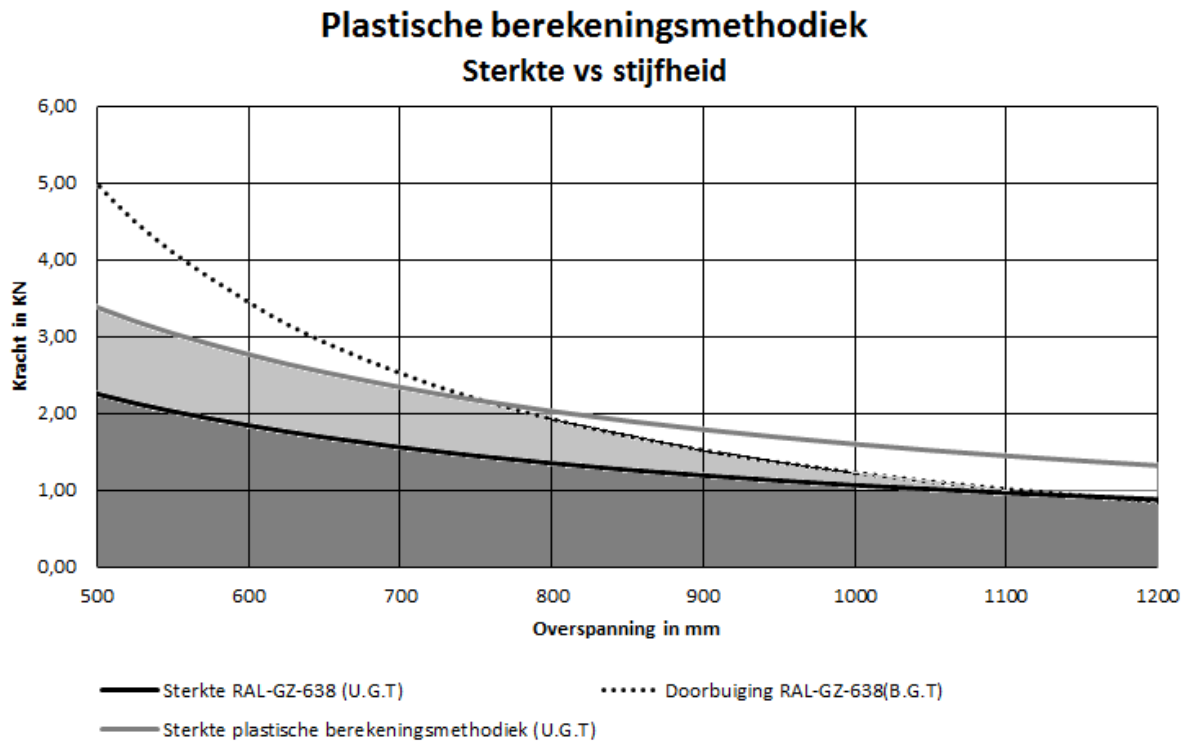
In het geval van een lineair elastische beschouwing is de draagkracht van de ligger in Figuur 25, gelijk aan $\frac{32 M_e}{6 L}$. Het constructief element is enkelvoudig statisch onbepaald. Dit betekent dat voor het ontstaan van een mechanisme twee plastische scharnieren noodzakelijk zijn. Deze scharnieren ontstaan t.p.v. de puntlast en de inklemming. De draagkracht in dit geval is $\frac{9 M_e}{L}$. De toename in de draagkracht t.g.v. een plastische berekeningsmethodiek is $\frac{3 M_e}{L}$, waarvan $\frac{7 M_e}{3 L}$ door de plastische spanningsverdeling en $\frac{2 M_e}{3 L}$ t.g.v. herverdeling.

4.3 Toename van draagkracht in persroosters t.g.v. plasticiteitstheorie

Voor de dimensies van de draagstaven kunnen zowel de sterkte, als doorbuiging maatgevend zijn. Welke van deze twee aspecten de dimensies bepaalt, hangt af van de overspanningslengte, de draagstaafhoogte en het doorbuigingscriterium. Voor korte overspanningen is de sterkte maatgevend, terwijl voor langere overspanningen het doorbuigingscriterium maatgevend is. Het overgangspunt tussen de maatgevende van sterkte enerzijds en doorbuiging anderzijds is zeer bepalend voor de winst die verkregen kan worden uit een plastische berekeningsmethodiek.

Aan de hand van een voorbeeld is de winst die een plastische berekeningsmethodiek oplevert toegelicht. In het voorbeeld is alleen rekening gehouden met de toename van de draagkracht t.g.v. een plastische spanningsverdeling. Het voorbeeld betreft een persrooster wat belast is door een geconcentreerde last op een oppervlak van 100 bij 100 mm, met een draagstaafhoogte van 30 mm en een draag- en vulstaafmaaswijdte van 33.3 mm.

De maximale belasting in U.G.T met een veiligheidsfactor 1.5 en de doorbuiging in B.G.T zijn bepaald aan de hand van de [RAL-GZ-638]. Het doorbuigingscriterium van 1/200 is omgerekend naar een kracht. Op deze manier kunnen twee eisen in één figuur beschouwd worden. Het verloop van deze twee curves is uitgezet in relatie tot de overspanningslengte.



Figuur 26: Draagkracht van een plastische berekeningsmethodiek t.o.v. een lineair elastische berekeningsmethodiek

In Figuur 26 staat het verloop van de sterkte- en doorbuigingseis weergegeven in relatie tot de overspanning. De laagst liggende curve van de sterkte of doorbuiging bepaalt de draagkracht. Het donkergrijze gebied geeft de elastische [RAL-GZ-638] capaciteit aan. Door het toepassen van een plastische berekeningsmethodiek kan de rekenkundige sterkte met een factor 1.5 verhoogd worden t.o.v. een lineair elastisch berekeningsmethodiek. Hierdoor schuift de sterkte lijn omhoog en wordt de rekenkundige sterkte verhoogd. De toename in draagkracht t.g.v. plastische berekeningsmethodiek is weergegeven in het lichtgrijze gearceerde gebied in Figuur 26.

In het geval van persroosters met hogere draagstaafhoogtes dan, 30 mm ligt het punt waarop de sterkte en doorbuigingseis elkaar snijden bij grotere overspanningen. In het geval van persrooster met draagstaafhoogtes van minder dan 30 mm ligt dit snijpunt bij minder grote overspanningen.

Belangrijk om op te merken is dat ook, bij een plastische berekeningsmethodiek de belasting in de bruikbaarheidsgrens toestand in het elastische gebied blijft, mits de veiligheidsfactor gelijk of groter is dan $\alpha = \frac{M_{pl}}{M_{el}}$, in het geval van een draagstaaf is deze verhouding 1.5.

5 Theoretische draagkracht van persroosters

De doelstelling van dit hoofdstuk is het analytisch beschouwen van het constructief gedrag van persroosters. Vanwege het feit dat er geen beschikbaar vooronderzoek naar het constructief gedrag van persroosters is, is het constructief gedrag onderzocht aan de hand van mogelijke bezwijkmechanismes.

In paragraaf 5.1 zijn de bezwijkmechanismes geïdentificeerd. In paragrafen 5.2 tot en met 5.5 staan respectievelijk bezwijken t.g.v. van een mechanisme door het ontstaan van plastische scharnieren in de draagstaven, bezwijken t.g.v. dwarskracht en bezwijken t.g.v. kipinstabiliteit beschreven.

5.1 Bezwijkmechanismes in persrooster

Om de theoretische draagkracht van een persrooster te kunnen bepalen, dient bekend te zijn welke bezwijkmechanismes kunnen optreden. Deze bezwijkmechanismes staan beschreven in de onderstaande opsomming.

- Bezwijken op dwarskracht t.g.v. een geconcentreerde last.
- Bezwijken t.g.v. een mechanisme door het ontstaan van plastische scharnieren in de draagstaven.
- Bezwijken t.g.v. instabiliteit:
 - Lokale kipinstabiliteit in de draag- of vulstaaf.
 - Globale kipinstabiliteit in het gehele persrooster.

Om de bezwijklasten met elkaar te kunnen vergelijken, zijn alle bezwijklasten gerelateerd aan de elastische of plastische momentcapaciteit van een draagstaaf. De plastische momentcapaciteit is bepaald aan de hand van bi-lineair materiaalgedrag.

5.2 Bezwijken t.g.v. een mechanisme t.g.v. plastische scharnieren

Bepalend voor het ontstaan van een mechanisme t.g.v. plastische scharnieren is de graad van statische onbepaaldheid. Wanneer een constructief element statisch bepaald is, zoals in Figuur 24, dan resulteert één plastisch scharnier in een mechanisme. Door dit mechanisme bezwijkt het constructief element.

Wanneer er sprake is van een statisch onbepaalde constructie, zie Figuur 25, zal door het ontstaan van één plastisch scharnier geen mechanisme optreden. Hierdoor kan er t.g.v. dit scharnier een herverdeling van krachten plaatsvinden. Deze herverdeling verhoogt de draagkracht van het constructief element.

Afhankelijk van de verdeling van de belasting over de draagstaven kan het constructief gedrag van draagstaaf getypeerd worden als statisch bepaald of onbepaald. Bepalend hiervoor is de mate waarin de draagstaven in een persrooster gelijkmatig belast zijn. In het geval van een gelijke belasting in alle draagstaven is er sprake van statisch bepaald gedrag. Wanneer de belasting per draagstaaf verschilt is er sprake van statisch onbepaald gedrag. De verdeling van de belasting over de draagstaven is afhankelijk van het type belasting en de

persroostergeometrie. In paragrafen 5.2.1 tot en met 5.2.3 is deze typering nader toegelicht aan de hand van het type belasting.

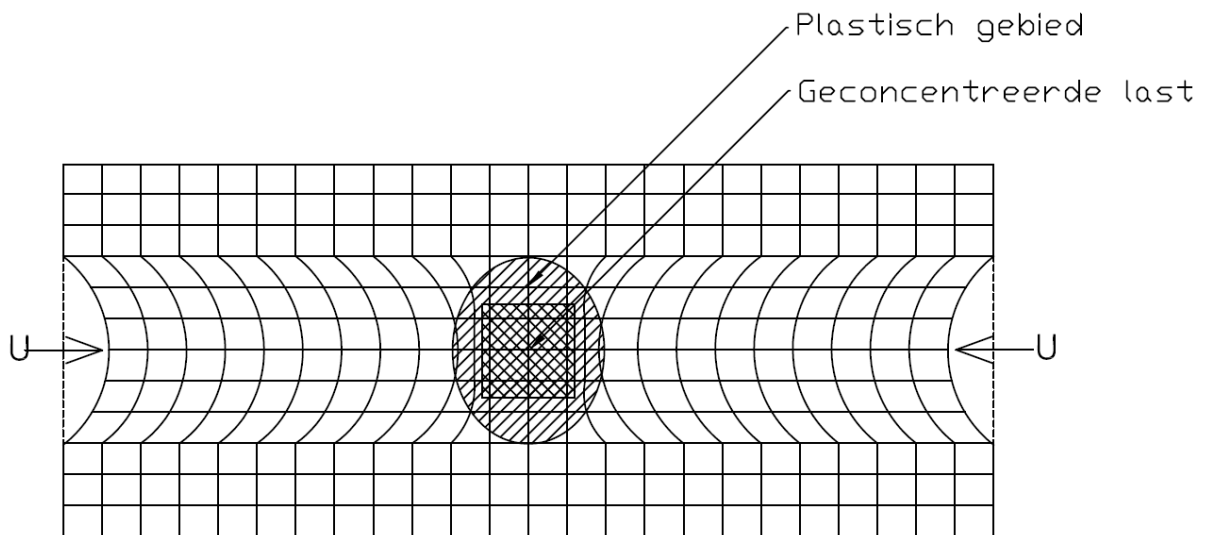
5.2.1 Bezwijken t.g.v. een geconcentreerde last

5.2.1.1 Bezwijken t.g.v. een geconcentreerde puntlast

Er zijn twee scenario's: In het eerste scenario is er sprake van persroosters waarin een geconcentreerde last zeer beperkt over de draagstaven herverdeeld wordt. In het tweede scenario is er sprake van een persrooster waarbij een geconcentreerde last zeer goed over de draagstaven herverdeeld wordt. Deze twee scenario's zijn hieronder toegelicht.

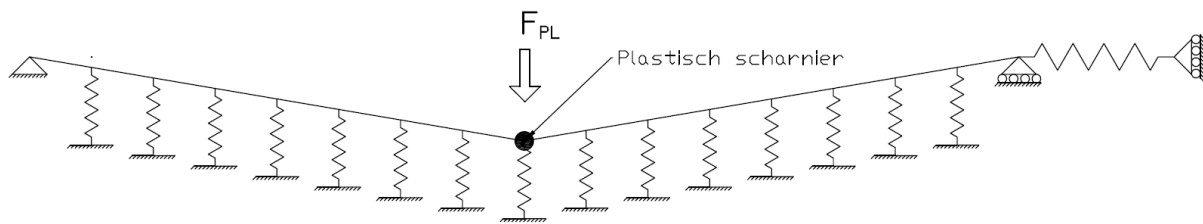
Scenario 1: Persrooster met beperkte herverdelingscapaciteit

De beperkte herverdeling van een geconcentreerde last over de draagstaven buiten het belastingsgebied resulteert in zwaarder en minder zwaar belaste draagstaven. Wanneer de draagstaven die door de geconcentreerde last het meest belast worden gaat vloeien, ontstaat er een plastisch scharnier in deze draagstaven. Door de beperkte herverdeling van de geconcentreerde last treedt dit scharnier niet in alle draagstaven op, zie Figuur 27.



Figuur 27: Bovenaanzicht van een persrooster met een beperkte herverdelingscapaciteit dat belast is door een geconcentreerde last

Zoals Figuur 28 illustreert hebben de draagstaven met de plastisch scharnieren de neiging naar binnen te trekken. De aanwezigheid van draagstaven zonder plastisch scharnieren beperkt via de randstaaf deze verplaatsing. Ook de vulstaven werken het ontstaan van een mechanisme tegen, doordat de vulstaven krachten naar minder belaste draagstaven kunnen afvoeren. De belaste draagstaven kunnen dus opgevat worden als liggers op twee steunpunten, die verend ondersteunt wordt t.p.v. de vulstaven. En waarbij de longitudinale verplaatsing aan beperkt is, zie Figuur 28.

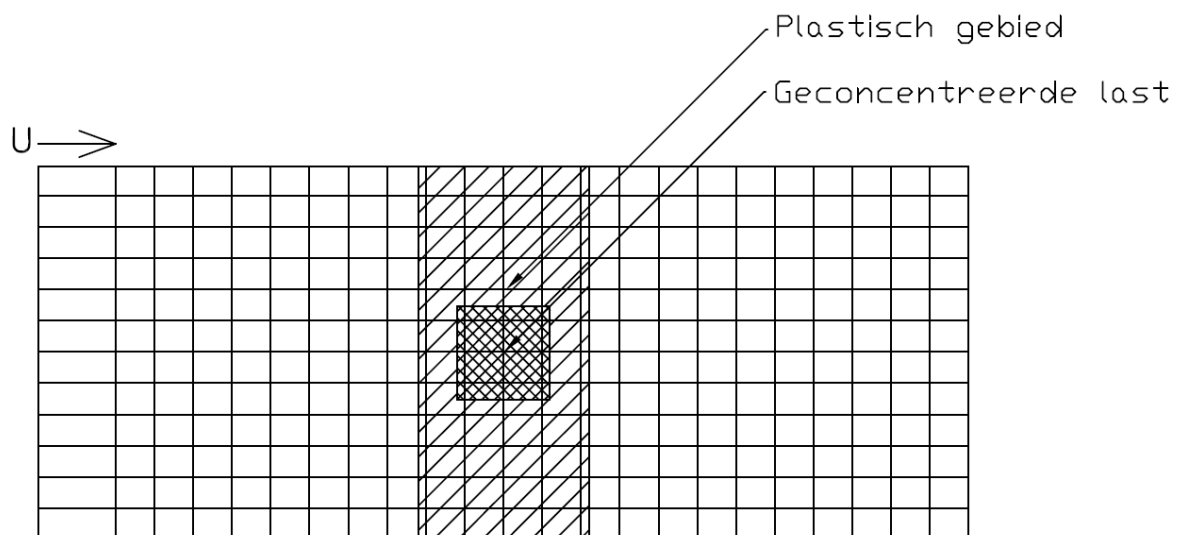


Figuur 28: Mechanica-schema van een draagstaaf in een persrooster met een beperkte herverdelingscapaciteit dat belast is door een geconcentreerde last

Door het beperken van deze longitudinale verplaatsing en de steun van de vulstaven, kan er geen mechanisme in de draagstaven met plastisch scharnieren ontstaat. Het gedrag van de draagstaven met betrekking tot het bezwijken t.g.v. een mechanismes t.g.v. plastische scharnieren kan dus getypeerd worden als statisch onbepaald. Hoe groot de uiteindelijke toename in draagkracht is, is afhankelijk van de persroostergeometrie en de belasting. Gesteld kan worden, dat zolang de horizontale verplaatsing voldoende verhinderd is, er geen bezwijken zal optreden. De plastische draagkracht van dit element is hierdoor meer dan 1.5 keer de elastische draagkracht, uitgaande van een draagstaaf.

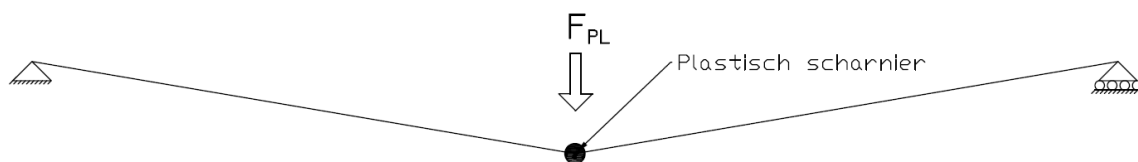
Scenario 2: Persrooster met zeer sterke herverdelingscapaciteit

Door de sterke herverdeling van een geconcentreerde last over de draagstaven is er sprake van een zo goed als gelijke belasting in alle draagstaven. Hierdoor vloeien alle draagstaven in een persrooster gelijktijdig. Het gevolg hiervan is, dat er in iedere draagstaaf gelijktijdig een plastisch scharnier ontstaat. Aangezien de horizontale verplaatsing niet verhinderd is en er geen afdracht via de vulstaven mogelijk is, ontstaat er mechanisme, zie Figuur 29.



Figuur 29: Bovenaanzicht van een persrooster met een sterke herverdeling van een geconcentreerde last

De draagstaven kunnen dus gezien worden als een ligger op twee steun punten, zie Figuur 30. De toename van de draagkracht in dit scenario komt dus alleen voort uit een toename van de momentcapaciteit in de draagstaven t.g.v. een plastisch-spanningsverdeling. De plastische draagkracht van dit element is hierdoor 1.5 keer de elastische draagkracht, uitgaande van een draagstaaf.



Figuur 30: Mechanica-schema van een draagstaaf in een persrooster met een sterke herverdelingscapaciteit dat belast is door een geconcentreerde last

5.2.1.2 Bezwijken t.g.v. een lijnlast

In welke typering de draagstaaf valt, hangt af van de richting van de lijnlast en de persroostergeometrie. In het geval een lijnlast parallel aan de draagstaafrichting, en wanneer er sprake is van een persroostergeometrie met beperkte herverdelingscapaciteit, geldt statisch onbepaald gedrag. De reden hiervoor is dat er sprake is van een verschil in belasting tussen de draagstaven. In het geval van een lijnlast haaks aan de draagstaafrichting, geldt altijd statisch bepaald gedrag, omdat alle draagstaven gelijkmatige belast worden.

5.2.2 Bezwijken t.g.v. een verdeelde last

In het geval van een verdeelde last, kan het gedrag van een draagstaaf getypeerd worden als een statisch bepaald, omdat er sprake is van een gelijke belasting in alle draagstaven.

5.3 Bezwijken t.g.v. van dwarskracht

Dwarskracht resulteert in bezwijken van een constructief element, wanneer de plastische dwarskrachtcapaciteit overschreden wordt. Wanneer er sprake is van interactie tussen dwarskracht en bijvoorbeeld moment, kan dwarskracht ook een rol spelen in het bezwijken. Volgens de volgens [EN 1993-1-1] kan deze interactie van invloed op de draagkracht zijn, wanneer de plastische-dwarskrachtcapaciteit aangesproken wordt tot 50% of meer, het is echter niet duidelijk of dit ook geldt voor rechthoekige doorsnede.

5.3.1 Toegepaste methodiek

De bezwijklast t.g.v. van dwarskracht is vergeleken met vol-plastisch moment van een draagstaaf. De invloed van de dwarskracht is onderzocht aan de hand van de volgende methodiek, zie Figuur 31. Aan de hand van een plastische spanningsverdeling is de momentcapaciteit bepaald, voor verschillende draagstaven. Deze momentcapaciteit is gerelateerd aan een puntlast in het midden van de overspanning. Deze locatie is gekozen omdat, aan de hand van deze positie de momentcapaciteit normaliter getoetst wordt. De hieruit verkregen puntlast is vervolgens beschouwd als een dwarskracht.



Figuur 31: Methodiek voor de bepaling van de relevantie van de dwarskracht op het bezwijken

In de bepaling van de dwarskrachtcapaciteit van een draagstaaf is de bruto draagstaafhoogte, zie 1.1, toegepast. De reden hiervoor is, dat het niet aannemelijk is dat de persverbinding over dwarskrachtcapaciteit beschikt.

Voorbeeld berekening toegepaste methodiek

Om de toegepaste methodiek te verduidelijken is hieronder een voorbeeld gegeven op basis van een draagstaaf met een hoogte en dikte van respectievelijk 60 mm 2 mm en met een overspanning van 700 mm. De staalsoort betreft een S235.

Bepaling momentcapaciteit:

$$M_{pl} = \frac{H_{bruto}^2 * B}{4} * f_y = \frac{60^2 * 2}{4} * 235 = 423.000 \text{ Nmm}$$

Relatering momentcapaciteit aan een puntlast:

$$F_p = \frac{4 * M_p}{L} = \frac{4 * 423.000}{700} = 2.417 \text{ kN}$$

Bepaling dwarskrachtcapaciteit:

$$V_p = H_{netto} * B * \frac{f_y}{\sqrt{3}} = 50 * 2 * \frac{235}{\sqrt{3}} = 13.567 \text{ kN}$$

Puntlast als dwarskracht:

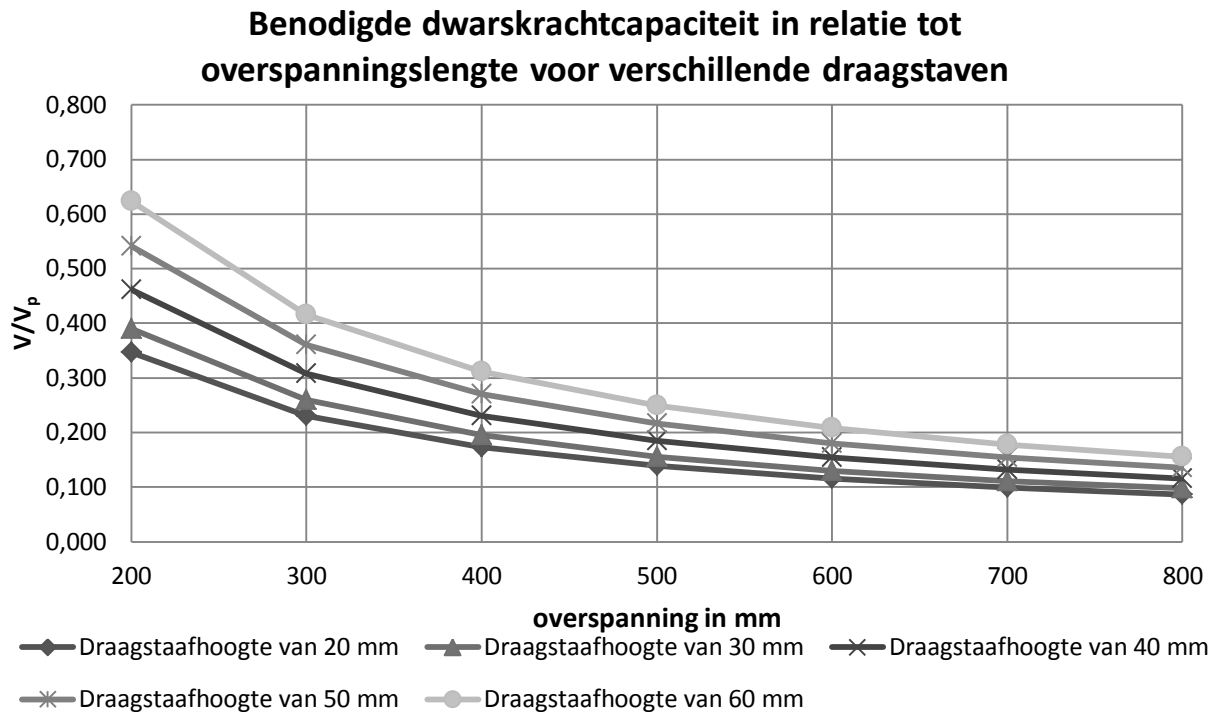
$$F_p = V$$

Dwarskracht t.g.v. een puntlast gedeeld door dwarskrachtcapaciteit:

$$\frac{V}{V_p} = \frac{2.417}{13.567} = 0.178$$

5.3.2 Bezijken t.g.v. dwarskracht voor verschillende draagstaven

In Figuur 32 staat een weergave van het effect van dwarskracht op draagstaven met draagstaafhoogtes van 20, 30, 40, 50 en 60 mm, uitgaande van een vulstaafhoogte van 10 mm in relatie tot de overspanningslengte.



Figuur 32: Benodigde dwarskrachtcapaciteit, in relatie tot overspanningslengte voor verschillende draagstaven

Uit Figuur 32 valt op te maken dat, hoe hoger de draagstaaf en hoe korter de overspanning, des te dominanter bezijken t.g.v. dwarskracht. Deze invloed neemt snel af naarmate de overspanning langer wordt. Bij geen van de beschouwde draagstaven wordt de dwarskrachtcapaciteit overschreden in het beschouwde overspanningsgebied. Figuur 32 illustreert ook, dat bij overspanningen van 300 mm of meer de dwarskrachtcapaciteit voor geen van de beschouwde draagstaven voor meer dan 50% aangesproken wordt. Voor overspanningen van minder dan 200 mm zal de dwarskrachtcapaciteit op gegeven moment overschreden worden. Deze kleine overspanning zijn beperkt relevant, omdat deze overspanningen maar zeer beperkt toegepast worden, zie Figuur 6.

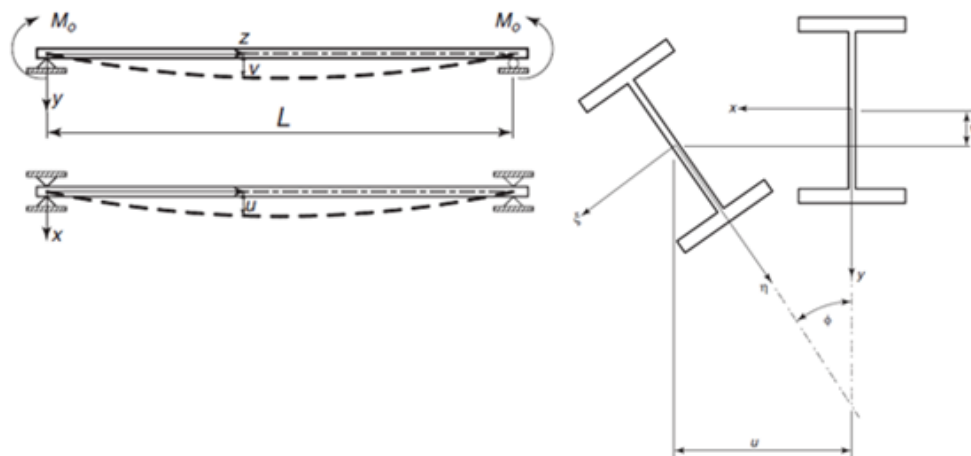
Aan de hand van de toegepaste methodiek kan dus gesteld worden, dat bezijken t.g.v. dwarskracht alleen voor korte overspanningen met hoge draagstaven een rol kan spelen. Deze hoge draagstaven en korte overspanningen komen maar zeer beperkt voor in persroosters, zie Figuur 6 en Tabel 2. Er kan dus geconcludeerd worden dat bezijken t.g.v. van de dwarskracht zo goed als geen rol speelt in persroosters.

5.4 Bezijken t.g.v. kipinstabiliteit

In paragraaf 5.4.1 is kipinstabiliteit toegelicht. In 5.4.2 zijn de verschijningsvormen van kipinstabiliteit in persrooster behandeld. En in paragraaf 5.4.3 is het kiplast van een draagstaaf berekend aan de hand van twee rekenmodellen.

5.4.1 Toelichting kipinstabiliteit

Kipinstabiliteit is net als knik een instabiliteitsverschijnsel dat ontstaat t.g.v. een drukspanning. In het geval van kipinstabiliteit wordt het gedrukte deel van de doorsnede instabiel t.g.v. een moment in het vlak. Wanneer een doorsnede kipt, treedt buiging in en uit het vlak tegelijkertijd op met wringing van de doorsnede^[1], zie Figuur 33.



Figuur 33: Weergave kipinstabiliteit Bron: Theodore V. Galambos-Guide to stability design criteria for metal structures(2008)

Het moment waarop kipinstabiliteit optreedt wordt het *kiplast* of *kiplast* genoemd. De grootte van dit moment hangt af van verschillende parameters zoals: het momentverloop, het aangrijppunt van de belasting, de torsiestijfheid van de doorsnede en de niet-gesteunde lengte. Het kiplast kan zowel analytisch als met een eindig-elementenmethode bepaald worden. Het resultaat van beide methode wordt sterk beïnvloed door het toegepaste rekenmodel.

Een analytische bepaling van het kiplast berust op het oplossen van twee differentiaalvergelijkingen, zie formules 5.4.1 en 5.4.2^[3]

$$EIu'' + M_0\phi = 0 \quad [5.4.1]$$

$$EC_w\phi''' - GJ\phi' + M_0u' = 0 \quad [5.4.2]$$

In formules 5.4.1 en 5.4.2 is, M_0 is het moment in het vlak, E de E-modulus, G de Schuifmodulus, u'' is de tweede afgeleiden van de horizontale verplaatsing, ϕ' de eerst afgeleiden van de rotatie, J St. Venant's torsiestijfheid, I het traagheidsmoment om de zwakke as en C_w de welvingsconstante.

Om tot een gesloten vergelijking te komen dienen de twee differentiaalvergelijkingen in formules 5.4.1 en 5.4.2 aan de hand van randvoorwaarden opgelost te worden. In formules

5.4.3 en 5.4.4 staat het resultaat van het oplossen van deze twee differentiaalvergelijkingen voor en ligger onder de voorwaarden, dat de ligger zijdelings gesteund is en niet kan torderen t.p.v. de opleggingen^[1].

$$M_{cr} = \frac{\pi}{L} * \sqrt{EIGJ} * \sqrt{1+W^2} \quad [5.4.3]$$

$$W = \frac{\pi}{L} \sqrt{\frac{EC_w}{GJ}} \quad [5.4.4]$$

Aangezien de wevingsconstante C_w voor een rechthoekige doorsnede 0 is^[1]. Kan in het geval van rechthoekige doorsnede vergelijking 5.4.3 vereenvoudigd worden tot formule [5.4.5].

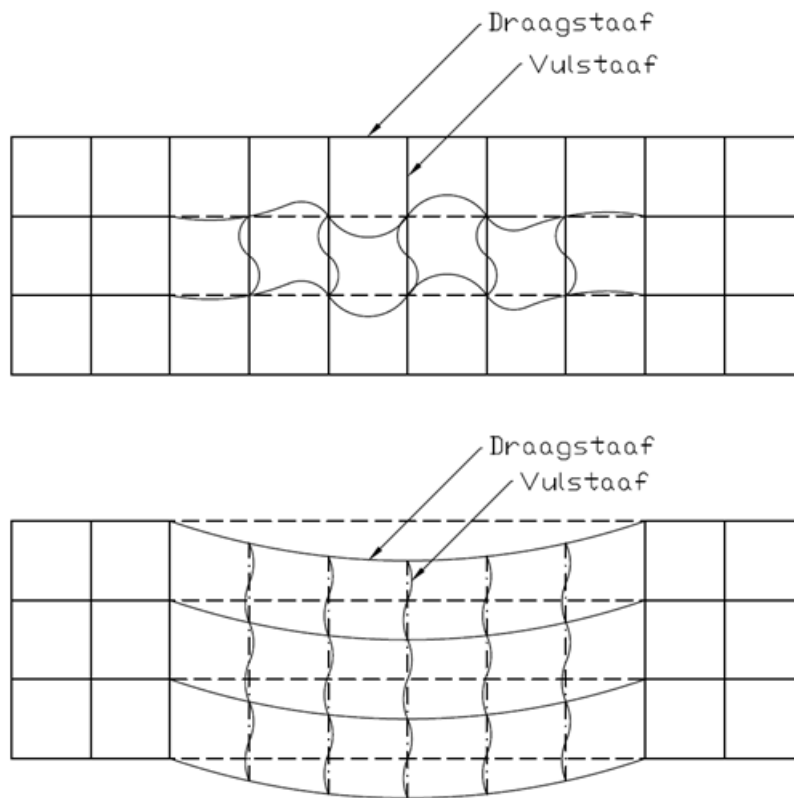
$$M_{cr} = \frac{\pi}{L} * \sqrt{EIGJ} \quad [5.4.5]$$

5.4.2 Lokale-en globale kipinstabiliteit in persroosters

Kipinstabiliteit heeft twee mogelijke verschijningsvormen in persroosters. Deze twee verschijningsvormen worden gedefinieerd als *lokale-kipinstabiliteit*, zie het bovenste figuur van Figuur 34 en *globale-kipinstabiliteit*, zie het onderste figuur van Figuur 34. Welke vorm van kipinstabiliteit optreedt wordt bepaald door de persroostergeometrie en de belasting.

Lokale-kipinstabiliteit is gedefinieerd als een vorm van kipinstabiliteit, waarbij de snijpunten tussen de draag- en vulstaven niet verplaatsen. De draagstaven kippen dus tussen de vulstaven in. Hierdoor kunnen de vulstaven opgevat worden als kipsteunen. *Lokale-kipinstabiliteit* treedt op in persroosters met voldoende laterale stijfheid, om een globale vorm van kipinstabiliteit te verhinderen, denk hierbij aan een oneindig breed persrooster.

Globale-kipinstabiliteit is gedefinieerd als een vorm van kipinstabiliteit, waarbij de snijpunten tussen de draag- en vulstaven verplaatsen. Dit betekent dat alle draagstaven over de breedte van een persrooster, op een bepaald punt tegelijkertijd kippen. Deze vorm van kipinstabiliteit treedt op in smal persrooster, waarbij er onvoldoende laterale stijfheid is, voor *lokale-kipinstabiliteit*, denk hierbij aan een persrooster bestaande uit twee draagstaven.



Figuur 34: Kipgedrag van persroosters, lokale kipinstabiliteit in het bovenste figuur en globale kipinstabiliteit in het onderste figuur.

Lokale-kipinstabiliteit is analytisch vrij eenvoudig te beschouwen, doordat de vulstaven werken als kipsteunen. Deze kipsteunen verkrijgen hun steunende werking uit de minder zwaar belaste draagstaven. Bij *globale-kipinstabiliteit* is dit niet het geval, waardoor een analytische beschouwing veel complexer is, *globale-kipinstabiliteit* is daarom beschouwd aan de hand van FEM-analyses in hoofdstuk 8.

5.4.3 Kipmoment van een draagstaaf

Lokale-kipinstabiliteit van een draagstaaf is onderzocht aan de hand van twee rekenmodellen. In paragraaf 5.4.4.2 aan de hand van een geometrisch en fysisch lineaire rekenmodel, en in paragraaf 5.4.4.3 aan de hand van geometrisch lineair en fysisch niet lineair rekenmodel.

5.4.3.1 Rekenmodellen

Het berekende kipmoment wordt sterk beïnvloed door het toegepaste rekenmodel. In de onderstaande opsomming staan vier rekenmodellen vermeldt.

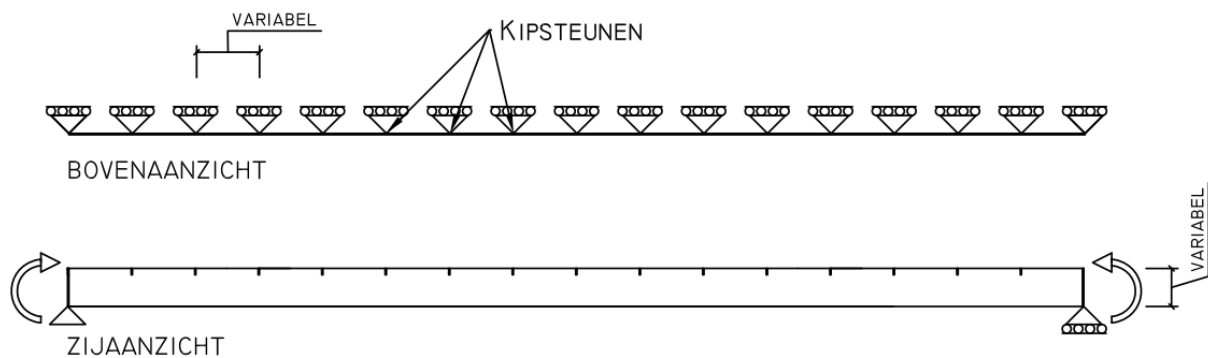
- Eerste-orde elastisch: Geometrisch en fysisch lineair
- Eerste-orde plastisch: Geometrisch lineair en fysisch niet lineair
- Tweede-orde elastisch: Geometrisch niet lineair en fysisch lineair
- Tweede-orde elastisch-plastisch: Geometrisch en fysisch niet lineair

In een geometrische lineaire analyse wordt geen rekening gehouden met tweede orde effecten. Zeker bij grote verplaatsingen zijn deze effecten van invloed. Een geometrische niet lineair analyse houdt hier wel rekening mee. Een fysisch lineaire analyse gaat uit van lineair

materiaaleigenschappen. Veranderingen in de materiaaleigenschappen t.g.v. rek of temperatuur worden niet beschouwd. In een fysisch niet lineaire analyse kunnen dit soort aspecten wel beschouwd worden. De meest nauwkeurige bepaling van de kiplast geschiedt aan de hand van tweede-orde elastisch-plastisch rekenmodel.

5.4.3.1 Methodologie

Het effect van de vulstaafmaaswijdte, de draagstaafhoogte en-dikte op het kipmoment is onderzocht, de vulstaven zijn hierbij beschouwd als kipsteunen. De effectieve lengte is dus gelijk gesteld aan de vulstaafmaaswijdte. Het kipmoment M_{cr} en M_{kip} is afgezet tegen het elastisch-moment M_{el} of het plastisch-moment M_{pl} . Beide analyses zijn gebaseerd op een scharnierend opgelegd draagstaaf die belast wordt door een constant moment, zie Figuur 35.



Figuur 35: Draagstaaf model

Beschouwing op basis van geometrisch en fysisch lineaire rekenmodel

Een geometrisch en fysisch lineaire beschouwing geeft een bovengrensbepaling van het kipmoment. In deze beschouwing is gebruik gemaakt van formule 5.4.6. Voor de afleiding van deze formule, zie paragraaf 5.4.

$$M_{cr} = \frac{\pi}{VM} * \sqrt{EIGJ} \quad [5.4.6]$$

Het kipmoment is voor verschillende draagstaven bepaald. Het verkregen kipmoment is vervolgens gedeeld op het elastisch moment en afgezet tegen de vulstaafmaaswijdte.

Voorbeeld berekening

Om de toegepaste methodiek te verduidelijken is hieronder een voorbeeld gegeven op basis van een draagstaaf met een hoogte en dikte van respectievelijk 60 en 2 mm. De staalsoort betreft een S235.

Bepaling elastisch moment:

$$M_e = \frac{DH_{bruto}^2 * DD}{6} * f_y = \frac{60^2 * 2}{6} * 235 = 282000 \text{ Nmm}$$

Berekening St. Venant's torsiestijfheid:

$$J = \frac{DH_{bruto} * DD^3}{3} = \frac{60 * 2^3}{3} = 160 mm^4$$

Berekening traagheidsmoment om de zwakke as:

$$I = \frac{DH_{bruto} * DD^3}{12} = \frac{60 * 2^3}{12} = 40 mm^4$$

Berekening kipmoment:

$$M_{cr} = \left(\frac{\pi}{VM} \right) * \sqrt[3]{EIGJ} = \left(\frac{\pi}{100} \right) * \sqrt[3]{210.000 * 40 * 80850 * 160} = 326317 Nmm$$

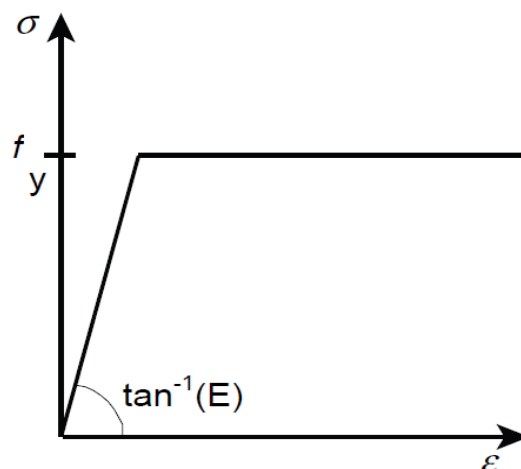
Kipmoment gedeeld op het elastisch moment:

$$\frac{M_{cr}}{M_{el}} = \frac{326317}{282000} = 1.16$$

Beschouwing op basis van geometrisch lineair en niet fysisch lineair rekenmodel

Het vloeien van de doorsnede heeft veel invloed op het kipmoment, omdat zodra de doorsnede gaat vloeien, de torsiestijfheid van de doorsnede vermindert. Aan de hand van een geometrisch-lineair en fysisch niet-lineair rekenmodel is het mogelijk dit effect te beschouwen. Geometrische niet-lineaire aspecten worden buiten beschouwing gelaten, waardoor er sprake is van een bovengrensbepaling.

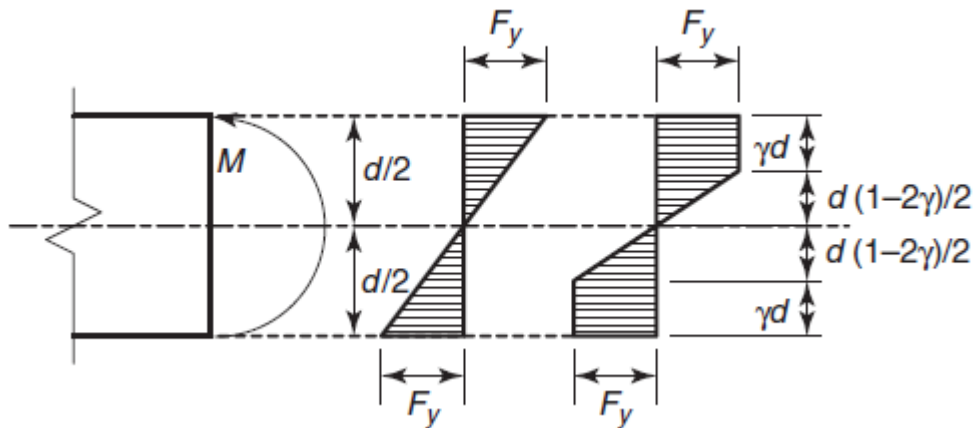
De toegepaste methode komt uit het boek *Structural Stability of Steel: Concepts and Applications for Structural Engineers* van Theodore V. Galambos hoofdstuk 6 paragraaf 7^[1]. De hoofdlijnen van deze afleiding staan hieronder weergegeven. Voor de volledige afleiding wordt er verwezen naar de paragraaf uit het betreffende boek.



Figuur 36: Bi-lineair materiaalgedrag

De methode gaat uit van bi-lineair materiaalgedrag, zie

Figuur 36. De invloed van het vloeien van de doorsnede op het kipmoment is beschouwd door het traagheidsmoment I en torsiestijfheid J in formule 5.4.6 afhankelijk te maken van de mate van vloeien van de doorsnede, zie Figuur 37.



Figuur 37: Weergave spanningsverloop: Bron Theodore V. Galambos- *Structural Stability of Steel: Concepts and Applications for Structural Engineers*

De method resulteert in één vergelijking voor het elastisch gebied, zie formule 5.4.8 en één vergelijking voor het plastisch gebied, zie formule 5.4.9. De vergelijking van het elastisch gebied geeft hetzelfde resultaat als benadering 1.

Het elastische gebied:

$$\frac{VM}{DD} = 1.3 \left(\frac{E}{f_y} \right) * \left(\frac{DD}{DH} \right) * \left(\frac{1}{\frac{M_{cr}}{M_{pl}}} \right) \quad \text{wanneer } \frac{M_{cr}}{M_p} \leq \frac{2}{3} \quad [5.4.8]$$

Het plastische gebied:

$$\frac{VM}{DD} = 1.3 \left(\frac{E}{f_y} \right) * \left(\frac{DD}{DH} \right) * \left(\frac{\sqrt{3 - 3 \frac{M_{kip}}{M_{pl}}}}{\frac{M_{kip}}{M_{pl}}} \right) \quad \text{wanneer } 1 \geq \frac{M_{kip}}{M_p} > \frac{2}{3} \quad [5.4.9]$$

In de formules 5.4.8 tot en met 5.4.9 is DD de draagstaafdikte, DH de draagstaafhoogte, E de E-modulus, f_y de vloeigrens, M_{pl} het vol plastisch moment aan de hand van bi-lineair materiaalgedrag, M_{cr} het kritisch-kipmoment, M_{kip} het kipmoment waarin plasticiteit beschouwd is en VM de vulstaafmaaswijdte.

Voorbeeld berekening

Om de toegepaste methodiek te verduidelijken zijn hieronder twee voorbeelden gegeven op basis van een draagstaaf van 60 mm hoog en 2 mm dik met een vulstaafmaaswijdte van 33.3 en 100 mm. Het staal betreft een S235.

Voor het elastisch gebied:

$$\frac{VM}{DD} = 1.3 \left(\frac{E}{f_y} \right) * \left(\frac{DD}{DH} \right) * \left(\frac{1}{\frac{M_{cr}}{M_{pl}}} \right) \Rightarrow \frac{33}{2} = 1.3 \left(\frac{210.000}{235} \right) * \left(\frac{2}{60} \right) * \left(\frac{1}{\frac{M_{cr}}{M_{pl}}} \right)$$

$$\frac{33}{2} = 38.723 * \left(\frac{1}{\frac{M_{cr}}{M_{pl}}} \right) \Rightarrow \frac{M_{cr}}{M_{pl}} = 0.745$$

Voor het plastisch gebied:

$$\frac{VM}{DD} = 1.3 \left(\frac{E}{f_y} \right) * \left(\frac{DD}{DH} \right) * \left(\frac{\sqrt{3 - 3 \frac{M_{kip}}{M_{pl}}}}{\frac{M_{kip}}{M_{pl}}} \right) \Rightarrow \frac{100}{2} = 1.3 \left(\frac{210.000}{235} \right) * \left(\frac{2}{100} \right) * \left(\frac{\sqrt{3 - 3 \frac{M_{cr}}{M_{pl}}}}{\frac{M_{cr}}{M_{pl}}} \right)$$

$$\frac{100}{2} = 38.72 * \left(\frac{\sqrt{3 - 3 \frac{M_{kip}}{M_{pl}}}}{\frac{M_{kip}}{M_{pl}}} \right) \Rightarrow \frac{M_{kip}}{M_{pl}} = 0.465$$

5.4.3.2 Kipmoment van een draagstaaf op basis van een geometrisch en fysisch lineair rekenmodel

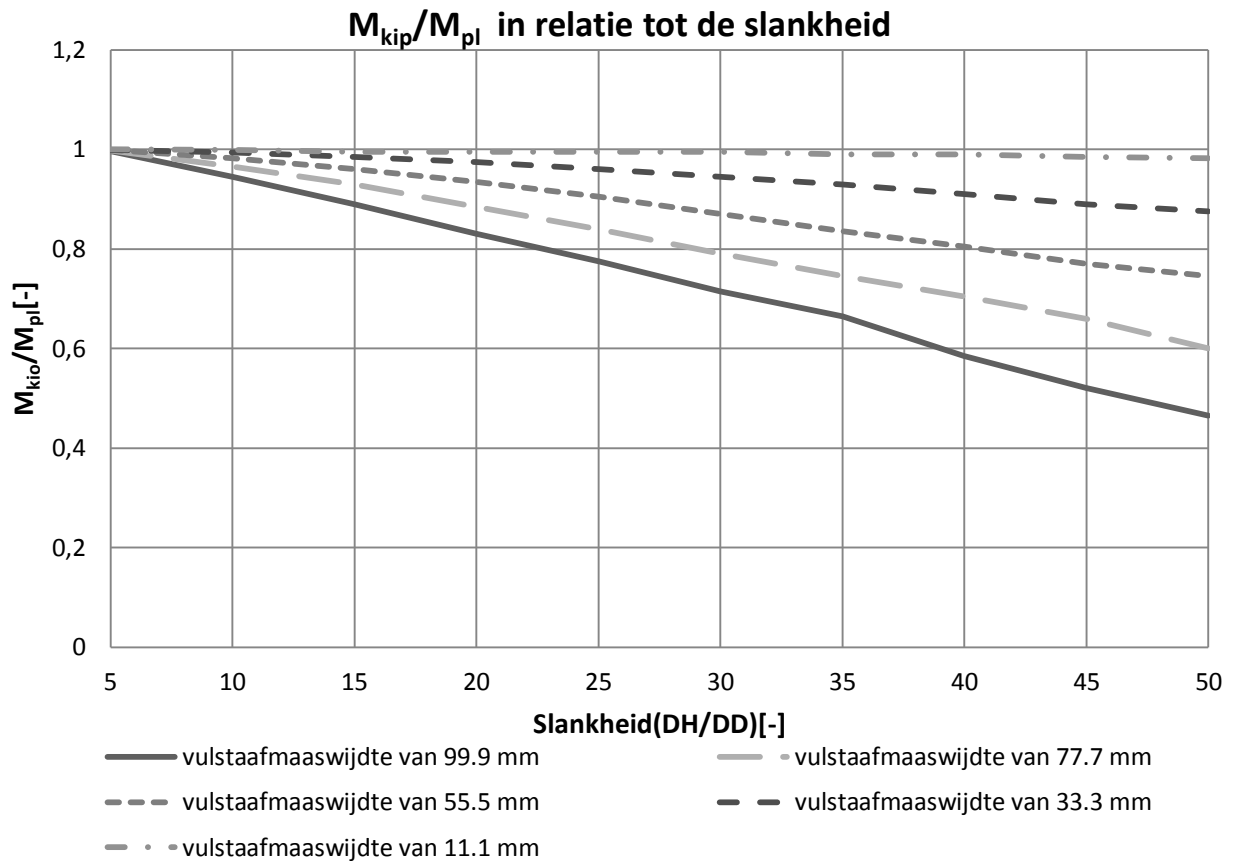
In Tabel 4 staat de verhouding tussen het kritisch-kipmoment en het elastisch moment weergegeven voor verschillende draagstaven. Uit deze tabel wordt duidelijk dat de slankheid(DH/DD) en de vulstaafmaaswijdte grote invloed hebben op het kipmoment. Uit deze tabel valt ook op te maken dat de verhouding tussen het kipmoment en elastisch moment, voor alle beschouwde draagstaven, op de draagstaaf met een hoogte van 100 mm en een dikte van 2 mm na, hoger ligt dan 1. Dit zegt echter weinig over het wel of niet optreden van kipinstabiliteit, omdat er sprake is van een bovengrensbepaling. Voor draagstaven waarbij de verhouding kleiner is dan 1 kan daarentegen, wel gesteld worden, dat kipinstabiliteit optreedt voordat het elastisch moment bereikt wordt.

Tabel 4: M_{cr}/M_{el} in relatie tot vulstaafmaaswijdte en draagstaaf afmetingen(hoogteXdikte)

	Draagstaaf afmetingen hoogte X dikte						
Vulstaafmaaswijdte	20x2	40x2	40x5	60x2	60x5	100x2	100x5
11.1	31.4	15.7	98.0	10.5	65.4	6.3	39.2
33.3	10.5	5.2	32.7	3.5	21.8	2.1	13.1
55.5	6.3	3.1	19.6	2.1	13.1	1.3	7.8
77.7	4.5	2.2	14.0	1.5	9.3	0.9	5.6
99.9	3.5	1.7	10.9	1.2	7.3	0.7	4.4

5.4.3.3 Kipmoment van een draagstaaf op basis van een geometrisch lineair en fysisch niet lineair rekenmodel

In Figuur 38 staat de verhouding tussen het kipmoment M_{kip} en het plastisch moment M_{pl} in relatie tot de slankheid (DH/DD) voor verschillende vulstaafmaaswijdtes, namelijk 11.1, 33.3, 55.5, 77.7, 99.9 mm weergegeven.



Figuur 38: Relatie tussen M_{kip}/M_{pl} en de slankheid(DH/DD) voor 6 verschillende vulstaafmaaswijdtes

Figuur 38 illustreert de invloed van de vulstaafmaaswijdte en de slankheid(DH/DD) op het kipmoment. Hierbij valt op te maken dat vulstaafmaaswijdtes van 33.3 mm en slankheden van 10 of minder zo goed als ongevoelig zijn voor lokale-kipinstabiliteit.

5.4.4 Conclusie kipinstabiliteit in persroosters

Er zijn twee vormen van kipinstabiliteit in persroosters, namelijk *lokale-* en *globale-kipinstabiliteit*. Welke vorm van kipinstabiliteit optreedt hangt af de persroostergeometrie en de belasting. Het kippmoment met betrekking tot *lokale-kipinstabiliteit* wordt sterk beïnvloed door de slankheid van de draagstaven en de vulstaafmaaswijdte. Gezien de aanzienlijk hogere slankheid van de draagstaven t.o.v. de vulstaven is het optreden van kipinstabiliteit in de vulstaven minder waarschijnlijk.

De geometrisch en fysisch lineaire benadering toont aan, dat voor draagstaven met hoge slankheden en grote vulstaafmaaswijdtes, *lokale kipinstabiliteit* kan optreden in het elastische gebied. Aan de hand van deze bovengrensbenadering voor het kippmoment kan dus geconcludeerd worden dat, kipinstabiliteit een rol speelt in persroosters.

De meer waarheidsgetrouwe geometrische lineaire en fysisch niet-lineaire benadering illustreert dat *lokale-kipinstabiliteit* bij veel toegepaste draagstaven en vulstaafmaaswijdtes geen rol van betekenis speelt, zie Tabel 2. Belangrijk om bij deze conclusie op te merken, is dat in deze analytische benadering van het kippmoment, geometrische niet-lineaire aspecten en de invloed van imperfecties buiten beschouwing gelaten zijn. Deze twee aspecten zullen het verkregen kippmoment reduceren. Ook dient benadrukt te worden dat deze conclusie niet van toepassing is op kipinstabiliteit in persrooster in algemene zin, omdat *globale-kipinstabiliteit* niet beschouwd is.

5.5 Conclusie bezwijkmechanismes

Het type bezwijkmechanisme dat optreedt, hangt af van factoren zoals: type belasting, overspanning, draag- en vulstaafmaaswijdte en de slankheid(DH/DD) van de draagstaven.

Van de drie beschouwde bezwijkmechanismes kan gesteld worden dat, bezwijken t.g.v. dwarskracht een zeer beperkte rol speelt. Deze vorm van bezwijken is namelijk alleen relevant voor persroosters met zeer korte overspanningen, kleiner dan 200 mm. Deze zeer korte overspanningen worden maar zeer beperkt toegepast.

Bezwijken door een mechanische t.g.v. van plastische scharnieren in de draagstaven en bezwijken t.g.v. kipinstabiliteit spelen beide een rol. Welke van deze twee bezwijkmechanismes domineert, is aan de hand van de toegepaste analytische beschouwingen, om verschillende redenen lastig te bepalen. Zo is *globale-kipinstabiliteit* van het persrooster niet beschouwd ook zijn geometrische niet-lineariteiten niet meegenomen in de bepaling van het kippmoment. In het algemeen kan echter wel gesteld worden dat bij hoge draagstaafslankheden en grote vulstaafmaaswijdtes kipinstabiliteit dominant is. Terwijl bij lagere draagstaafslankheden en kleine vulstaafmaaswijdtes bezwijken door een mechanische t.g.v. van plastische scharnieren in de draagstaven domineert.

6 Experimentele bepaling van de draagkracht

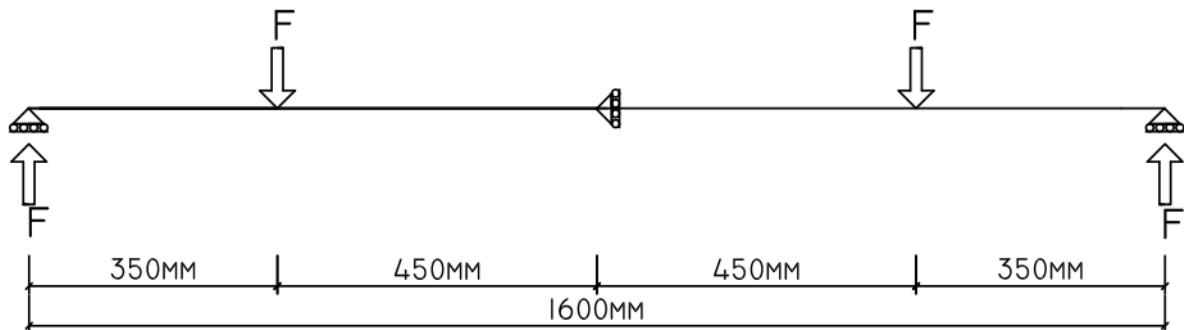
Een experimentele bepaling van de draagkracht, geeft inzicht in het constructieve gedrag, en geeft de mogelijkheid om een eindig-elementen model te valideren.

Gezien het groot aantal mogelijke persroostergeometrieën is de experimentele bepaling van de draagkracht, gericht op vier proefseries. Drie proefseries zijn gericht op bezwijkmechanismes, namelijk bezwijken door een mechanisme t.g.v. plastische scharnieren in de draagstaven, *proefserie 1A*, bezwijken t.g.v. lokale-kipinstabiliteit, *proefserie 2A*, en bezwijken t.g.v. globale-kipinstabiliteit, *proefserie 2B*. Het constructief gedrag van veel voorkomende persroostergeometrie is met behulp van *proefserie 1B* onderzocht.

De opbouw van dit hoofdstuk is als volgt: In paragraaf 6.1 zijn de proef en opstelling behandeld, in paragraaf 6.2 zijn de proefstukken beschreven, in paragraaf 6.3 zijn de gemeten horizontale imperfecties beschreven, in paragrafen 6.4 t/m 6.6 zijn de proefresultaten weergegeven en in paragraaf 6.7 zijn de resultaten van de proeven besproken.

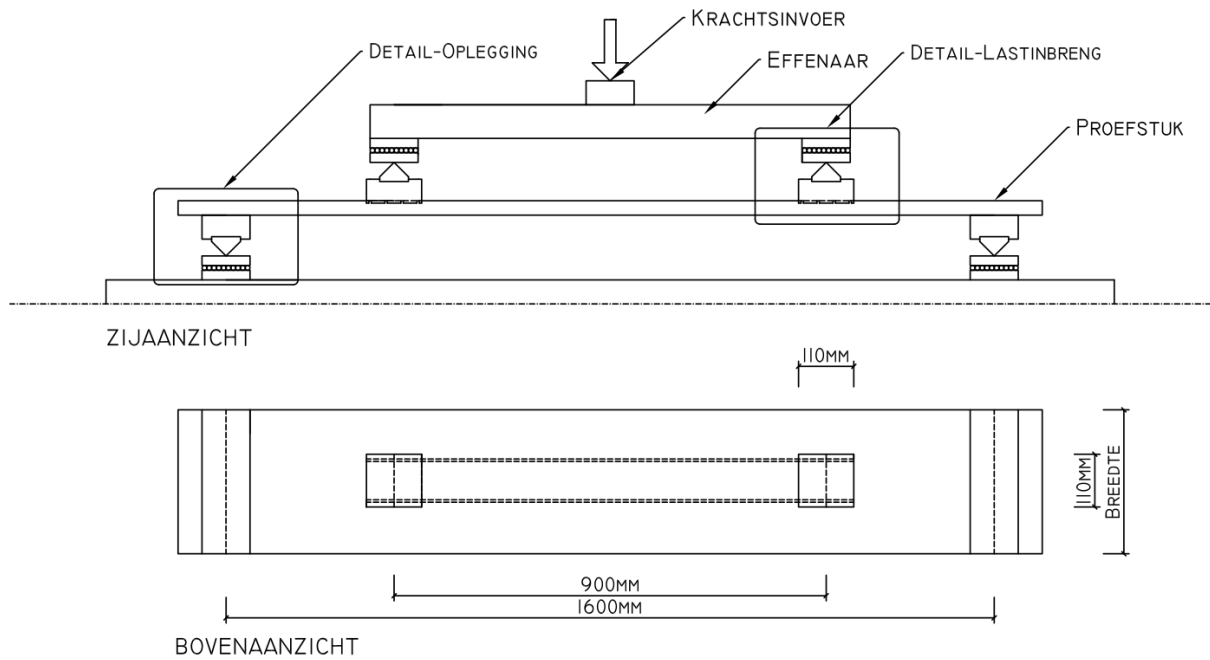
6.1 Beschrijving proef en opstelling

De beproeving heeft plaats gevonden aan de hand van een vierpuntsbuigproef. Er is gekozen voor een vierpuntsbuigproef omdat, het gebied waar bezwijken optreedt duidelijk gedefinieerd is. De afstand tussen de twee puntslasten en de afstand tussen de opleggingen en de punten waar de last ingebracht wordt, bedragen respectievelijk 900 en 350 mm, zie Figuur 39.



Figuur 39: Mechanica-schema proefopstelling

Figuur 40 is een schematische weergave van de opbouw van de proefopstelling. De kracht op de proefstukken is aangebracht middels een vijzel. Deze kracht is vervolgens via een evenaar verspreid op twee punten. Zowel bij de opleggingen als bij de punten waar de belasting is ingebracht zijn scharnieren geplaatst.



Figuur 40: Schematisch boven-en zijaanzicht van proefopstelling

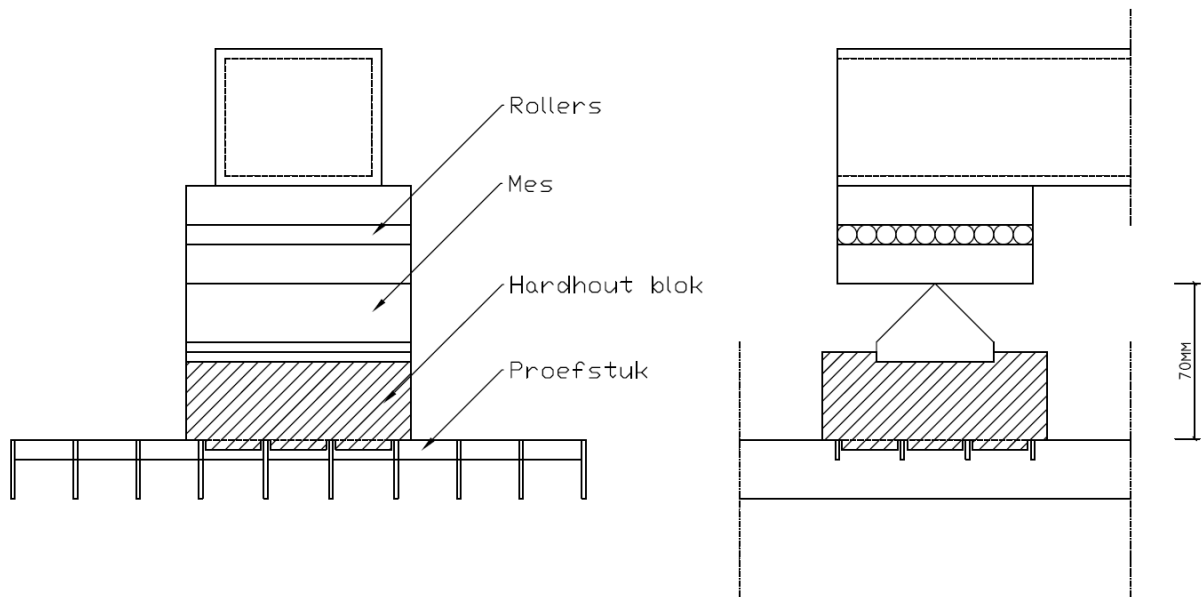
De maximale breedte van de proefstukken worden beperkt door de breedte van de drukbank, zie Figuur 41. Zoals te zien is in dit figuur zijn er ook steunen aangebracht aan de zijkanten van de proefstukken. Deze steunen zijn bedoeld om de maximale zijdelingse verplaatsing van de proefstukken te beperken, dit ter bescherming van de vijzen die horizontale verplaatsingen t.g.v. globale kipinstabiliteit niet kan volgen. Deze steunen raken de proefstukken niet en hebben daardoor ook geen invloed op de proefresultaten.



Figuur 41: Weergave gebruikte drukbank met daarin een proefstuk

6.1.1 Lastinleiding

De twee geconcentreerde lasten worden verdelen over een gebied van 110 bij 110 mm. Hierdoor is er bij ieder proefstuk sprake van een belasting op vier draagstaven, zie Tabel 6. Het aantal vulstaven dat belast wordt wisselt per proefserie. De last is ingeleid met behulp van hardhouten blokken. De relatief lage E-modulus van het hout, in vergelijking met dat van staal, zorgt ervoor dat de last gelijkmatig verdeeld wordt over de draag- en vulstaven. De houten blokken scharnieren om één punt. Hierdoor kunnen de blokken de vervorming van de proefstukken volgen, zie Figuur 42.

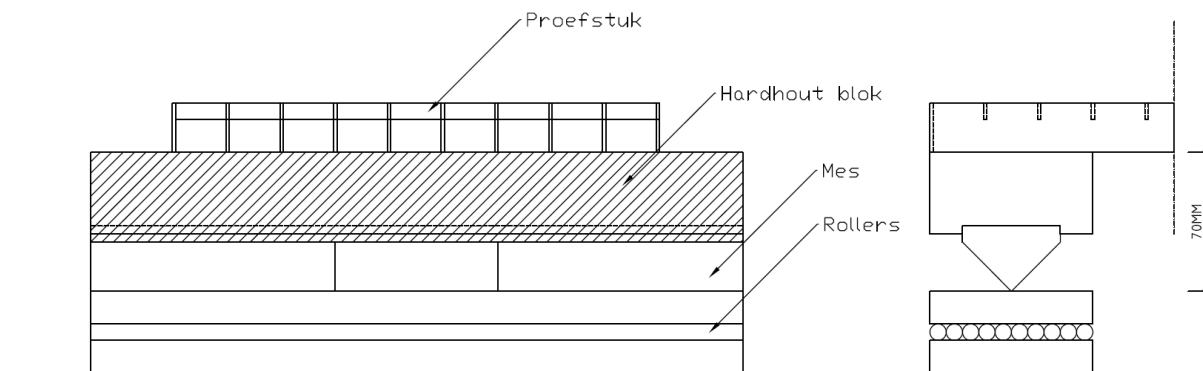


Figuur 42: Schematisch weergaven van de last-inleidingsblokken en de scharnieren

6.1.2 Opleggingen

De proefstukken zijn op twee punten scharnierend opgelegd. De lengte en breedte van de opleggingen bedragen respectievelijk 100 mm en de volle breedte van het proefstuk, zie Figuur 43. Voor de opleggingen is gebruik gemaakt van hetzelfde hardhout als de blokken die de last inleiden.

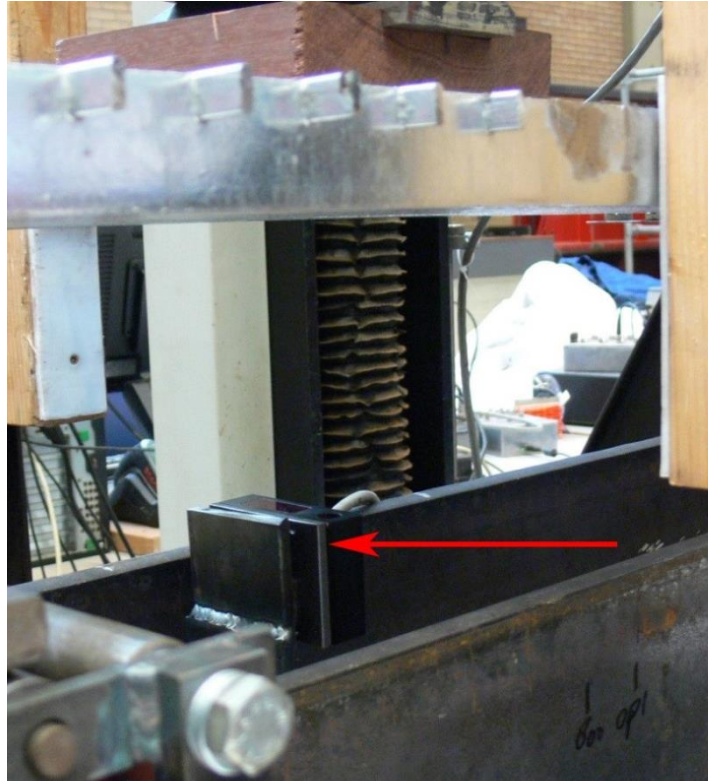
De scharnieren bij de oplegging zijn in opzet hetzelfde als de scharnieren bij de lastinleiding. De scharnieren zijn in het midden van de oplegging geplaatst en lopen over de gehele breedte van het proefstuk. Het mes dat het scharnier vormt is op het blok bevestigd door middel van een kamer, zie Figuur 43.



Figuur 43: Schematisch weergaven van de opleggingen en de scharnieren

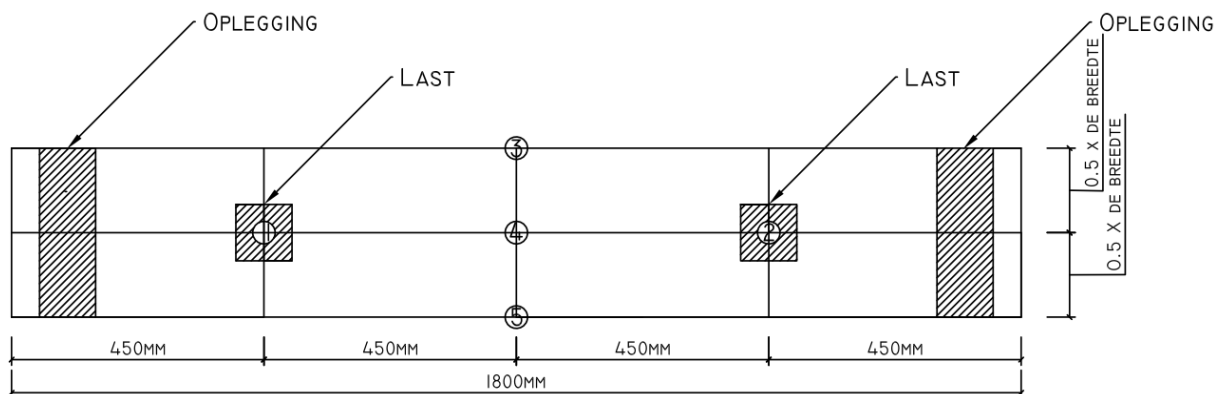
6.1.3 Instrumentatie

De verplaatsingen zijn met behulp van 4 lasers gemeten. In Figuur 44 staat een weergave van één van de lasers. De lasers zijn gericht op witte vlakken, deze vlakken zijn met behulp van mageneten aan de proefstukken bevestigd. De lasers zijn bevestigd op de bank zelf. Deze manier van plaatsen is mogelijk, omdat de stijfheid van de bank in vergelijking met de stijfheid van de proefstukken veel groter is.



Figuur 44: Weergave laser

In Figuur 45 staat een overzicht van de meetpunten. De toegepaste meetpunten wisselen per proefstuk, op meetpunten 1 en 2 na. De reden hiervoor is dat door de aanwezigheid van 4 lasers het niet mogelijk is, om in alle vijf de meetpunten tegelijkertijd te meten.



Figuur 45: Weergave van de 5 meetlocaties

Gezien de symmetrie meten meetpunten 1 en 2 en meetpunten 4 en 5 het zelfde. In het rapport zijn de meetpunten vervolgens met de volgende namen aangeduid: Meetpunten 1 en 2 worden aangeduid met *meetlocatie-last*. Meetpunten 3 en 5 met *meetlocatie-rand* en meetpunten 4 met *meetlocatie-midden*. In bijlagen A staat weergave van de toegepaste meetpunten per proefstuk.

6.1.4 Meetnauwkeurigheid

Om de proefresultaten goed te kunnen beoordelen is de nauwkeurigheid van de opstelling onderzocht, aan de hand van een testproef. Onnauwkeurigheden komen voort uit positioneringsfouten en meetonnauwkeurigheden. Het identificeren van deze aspecten, maakt het mogelijk de effecten daarvan te beperken. In de onderstaande opsomming staan deze aspecten vermeld.

- Fout in de positionering van de opleggingen en de lastinleiding.
- Fout in de positionering van de lasers.
- Meetfout bij grote verplaatsingen t.g.v. het roteren van de vlakken waar de laser op gericht staan.
- Meettoleranties in de lasers en drukdoos.

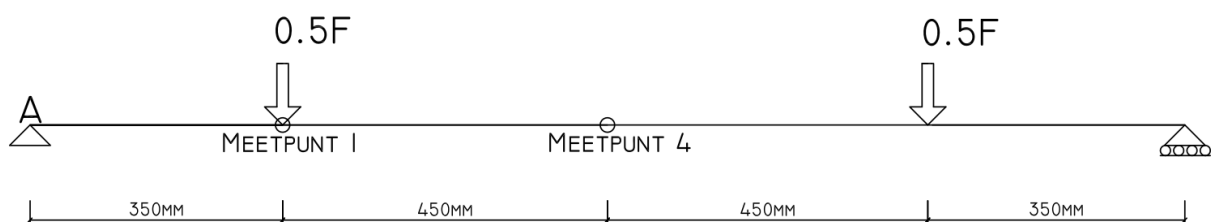
6.1.4.1 Testproef

De nauwkeurigheid van de testopstelling is onderzocht op een stuk stripstaal van $100 \times 15 \text{ mm}^2$. Er is een stuk stripstaal toegepast, omdat de afmetingen nauwkeurig te bepalen zijn.



Figuur 46: Testproef

De opstelling heeft het mechanica-schema zoals besproken in *paragraaf 6.1*, zie *Figuur 39*. In het midden van de overspanning en t.p.v. de inlast-inleiding zijn de verplaatsingen gemeten, meetpunten 1 en 4, zie *Figuur 45*. De verkregen initiële stijfheid uit de testproef, is vergeleken met de initiële stijfheid uit een analytische berekening. Deze analytische berekening is op basis van twee methoden tot stand gekomen, zie *Figuur 47*. De eerste methode maakt gebruik van de zakking in meetpunt 1 en de vaste oplegging in punt A. De tweede methode maakt gebruik van de relatieve verplaatsing tussen meetpunten 1 en 4.



Figuur 47: Methode 1 en 2 voor het bepalen van de theoretische initiële stijfheid van een proefstuk

De eerste methode laat een initiële stijfheid zien die ongeveer 6.5% hoger ligt dan dat de initiële stijfheid uit de testproef. Methode 2 komt uit op een kleiner verschil, en komt 2.5% te hoog uit. Het verschil tussen methode 1 en 2 is niet eenduidig te verklaren. Aspecten als dwarskracht vervorming zijn in ieder geval niet afdoende.

Er is een verschil tussen de analytische modellen en de testproef. Bij dit verschil speelt de E-modulus mogelijke een rol. De E-modulus van staal is aangenomen op 210.000 N/mm^2 . Deze waarde is voor staal echter niet geheel constant en kan afhankelijk van de chemische samenstelling variëren. Om uit te sluiten dat de discrepantie voort kwam uit onnauwkeurigheden van de lasers en drukdoos, zijn deze sensoren onderzocht. Dit onderzoek heeft geen afwijkingen geconstateerd.

6.2 Beschouwde proefstukken

Vier verschillende proefseries zijn beschouwd. Het aantal proefstukken wisselt per serie, zie Tabel 5. De proefstukken zijn analoog op de draagstaafhoogte en -dikte, vulstaafmaaswijdte en aantal draagstaven na. Middels het variëren van de vier net genoemde parameters zijn de proefstukken tot stand gekomen, zie Tabel 6.

Tabel 5: Proefseries en proefstukken

Proefserie	Aantal verzinkte proefstukken	Aantal niet-verzinkte proefstukken
1A	2	0
1B	3	2
2A	3	2
2B	2	2

Proefserie 1A bestaat louter uit verzinkte proefstukken, terwijl proefseries 1B, 2A en 2B zowel uit niet-verzinkte als verzinkte proefstukken bestaan. De reden om ook niet-verzinkte proefstukken te beproeven is tweeledig. Ten eerste illustreert het, het effect van het verzinken op de stijfheid en sterkte. Ten tweede geeft het extra handvaten om het eindig element-model te valideren.

Tabel 6: Eigenschappen proefseries in mm. Met een *aangegeven wanneer er sprake is van een gemeten waarde

	proefserie 1A	proefserie 1B	proefserie 2A	proefserie 2B
Draagstaafhoogte(mm)	29.3*	29.3*	59.3*	59.3*
Draagstaafdikte(mm)	5.00*	1.97*	1.95*	1.95*
Vulstaafhoogte(mm)	10.0*	10.0*	10.0*	10.0*
Vulstaafdikte(mm)	3	2	2	2
Maaswijdte draagstaven(mm)	33.3	33.3	33.3	33.3
Maaswijdte vulstaven(mm)	33.3	33.3	99.9	99.9
Lengte (mm)	1800	1800	1800	1800
Breedte (mm)	300	300	300	366

Iedere proefserie heeft zijn eigen specifieke doel. Met behulp van proefserie 1A is het bezwijken door mechanisme t.g.v. plastisch scharnieren in de draagstaven onderzocht. Om deze reden heeft proefserie 1A gedrongen draagstaven met een verhouding tussen de draagstaafhoogte en-dikte van 30/5. Met behulp van proefserie 1B het gedrag van een veel

voorkomende persroostergeometrie onderzocht. Deze configuratie is bepaald aan de hand van de stuklijst die aangeleverd is door *Staco Holding b.v.*, zie Tabel 2.

Aan de hand van proefseries 2A en 2B zijn respectievelijk *globale en lokale-kipinstabiliteit* onderzocht. Het optreden van kipinstabiliteit wordt gefaciliteerd door de aanwezigheid van hele slanke draagstaven en een grote vulstaafmaaswijdte. Proefseries 2A en 2B zijn analoog, op het aantal draagstaven na. Door de twee extra draagstaven in *proefserie 2B* treedt kipinstabiliteit eerder lokaal dan globaal op.

Alle proefstukken zijn ontdaan van de twee randstaven parallel aan de draagstaafrichting. Dit maakt het mogelijk om zuiver het gedrag van het persrooster zelf te onderzoeken. De twee randstaven parallel aan de vulstaafrichting zijn niet verwijderd, dit om het proefstuk zijdelings te kunnen steunen t.p.v. de opleggingen.

6.2.1 Materiaaleigenschappen

Om de proefresultaten numeriek te kunnen valideren en om commentaar te kunnen geven op de proefresultaten, dienen materiaaleigenschappen, zoals de vloeigrens en treksterkte bekend te zijn. De materiaaleigenschappen zijn bepaald aan de hand van trekproeven die door een extern bedrijf uitgevoerd zijn, zie bijlagen A voor de testresultaten.

De spreiding in de resultaten van de trekproeven is onderzocht door twee trekproeven op één batch draagstaven uit te voeren. Het verschil in vloeigrens en treksterkte tussen deze twee proeven kwam respectievelijk uit op 7 en 11 %. Dit verschil kan zowel veroorzaakt zijn door een verloop van materiaaleigenschappen in de batch, als door proefonnauwkeurigheden. Hierover valt verder geen uitsluitsels te geven.

Tabel 7: Materiaaleigenschappen, 0.2% rek, UTS en Breukrek van de draag- en vulstaven.

	0.2% rek(N/mm ²)	UTS(N/mm ²)	Breukrek(%)
Draagstaven proefserie 1A:	291	366	39
Draagstaven proefseries 1B	315	378	23
Draagstaven proefseries 2A en 2B	260	354	22
Vulstaven proefseries 1A	574	588	4.5
Vulstaven proefseries 1B, 2A en 2B	605	620	5

In Tabel 7 staan de gevonden materiaaleigenschappen weergegeven. Het gebruikte staal is S235, deze staalsoort dient een vloeigrens te hebben van tenminste 235 N/mm². De materiaaleigenschappen die voort gekomen zijn uit de trekproeven zijn wezenlijk anders dan volgens de specificaties. Iets wat op zichzelf niet vreemd is. Wat wel opvalt is het aanzienlijke verschil tussen de materiaaleigenschappen van de draag- en vulstaven. Zo is de 0.2% reksterkte bij de vulstaven bijna twee keer zo hoog als bij de draagstaven. Dit kan worden verklaard doordat, de vulstaven m.b.v. koudvormen vervaardigd zijn, uit uitgerold draadstaal. Door het koudvormen tijdens dit proces neemt de 0.2% rekspanning toe, waardoor het verschil tussen de 0.2% rek en de treksterkte kleiner wordt. Ook wordt de breukrek aanzienlijk verlaagd.

6.3 Geometrische imperfecties in de draagstaven

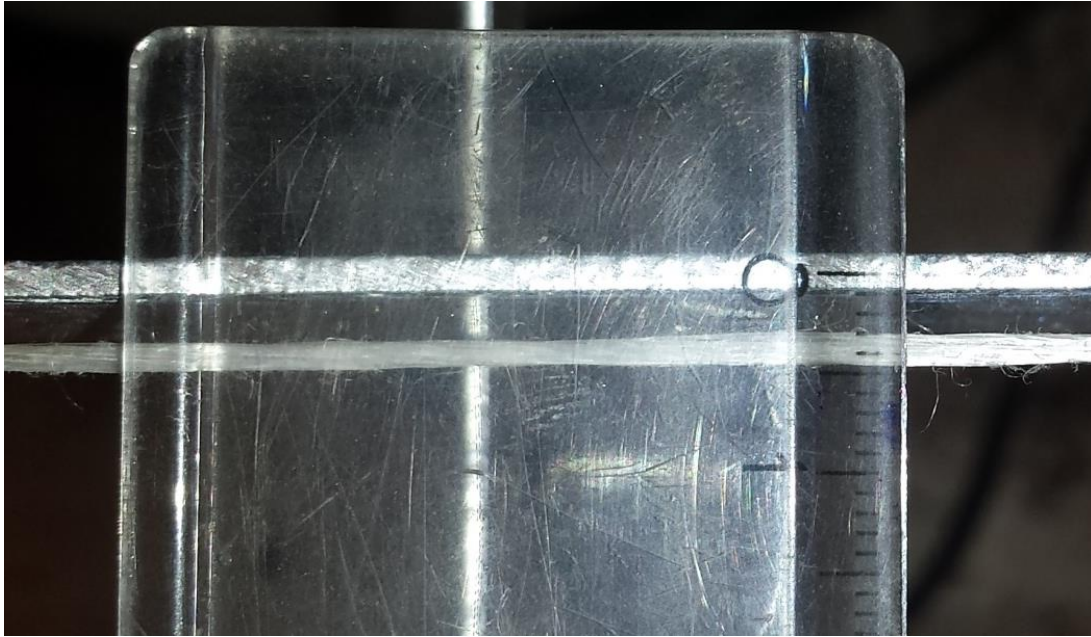
Het meten van de imperfecties is noodzakelijk om, ten eerste, een numeriek model te kunnen valideren, en ten tweede om de gevoeligheid van imperfecties op de stijfheid en sterkte te kunnen bepalen.

De grootte van de horizontale imperfectie en de bijbehorende locatie is, zowel aan de bovenkant als de onderkant van iedere draagstaaf gemeten. In bijlage A staan deze gegevens voor ieder proefstuk weergegeven.

De meting heeft plaats gevonden middels het spannen van een touw over de draagstaven, zie Figuur 48. De snijpunten tussen de draaf- en randstaven aan de twee zijde van de proefstukken zijn gebruikt als vaste punten. Tussen deze twee punten is er sprake van een rechte lijn. In het geval van een proefstuk met draagstaven zonder horizontale imperfecties zou deze draagstaven deze lijn moeten volgen. Door het verloop van de draagstaaf te vergelijken met deze rechte lijn kan bekeken worden in welke mate de draagstaven horizontale afwijkingen vertonen.



Figuur 48: Spannen van een touw t.b.v. het meten van de horizontale imperfecties



Figuur 49: Weergaven horizontale imperfectie in een draagstaaf

6.3.1 Grootte en locatie van de imperfecties

De horizontale imperfecties in de draagstaven van proefseries *1A* en *1B* zijn zodanig klein, dat verondersteld wordt dat deze buiten beschouwing kunnen blijven. Voor proefseries *2A* en *2B* is het een ander verhaal. De gemiddelde horizontale imperfecties in de draagstaven liggen tussen de 1.6 en de 4.4 mm, zie Tabel 8.

Tabel 8: Gemiddelde horizontale imperfectie per proefserie in mm, in de draagstaven van proefseries *2A* en *2B*

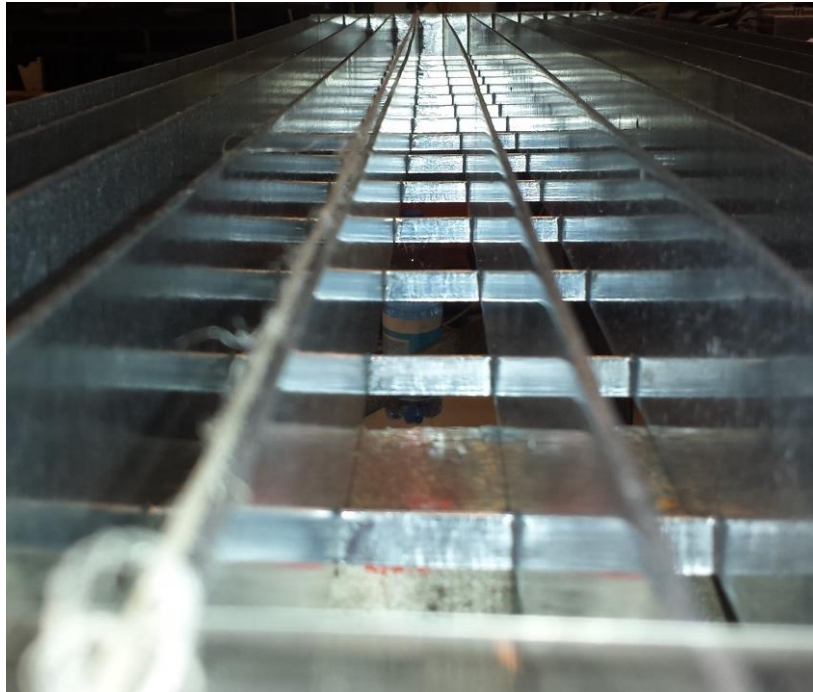
	Proefserie 2A		Proefserie 2B	
	Verzinkt	Niet verzinkt	Verzinkt	Niet verzinkt
Bovenkant draagstaaf	2.3	2.1	4.2	2.2
Onderkant draagstaaf	2.5	1.6	4.4	2.2

Alle persroosters uit proefseries *2A* en *2B* zijn vervaardigd uit dezelfde draag- en vulstaven, en achter elkaar geperst. Toch zijn de imperfecties in beide proefseries wezenlijk anders. Gemiddeld genomen zijn de horizontale imperfecties in *proefserie 2B* ongeveer 1.5 keer groter dan in *proefserie 2A*.

Wat betreft de locatie van de horizontale imperfecties valt op dat de maximale grootte vaak in de buurt van het midden van de overspanning ligt. Ook hebben zo goed als alle horizontale imperfecties in hetzelfde proefstuk een zelfde richting.

6.3.2 Vorm imperfecties

De vorm van de gevonden imperfecties kunnen het beste getypeerd worden als ‘globale’ imperfecties zoals weergegeven is in het onderste figuur van Figuur 34. In Figuur 50 is deze vorm van de imperfecties in een proefstuk goed zichtbaar.



Figuur 50: Vorm imperfectie in een verzinkt proefstuk uit proefserie 2B

De aanwezigheid van dit type imperfectie valt te verklaren uit de productiemethode. Het plaatstaal voor de draagstaven wordt aangeleverd op rollen. Om de draagstaven recht te buigen, worden ze plastisch vervormd. De grootte van deze vervorming luistert vrij nauw, en dient aangepast te worden naar mate de rol plaatstaal afrolt, omdat de kromming immers steeds groter wordt.

6.3.3 Invloed van het verzinken op grootte van de imperfecties

Gemiddeld genomen heeft het verzinken duidelijk invloed op de grootte van de imperfecties. Deze invloed is te verklaren uit het feit dat proefseries 2A en 2B beide vrij slanke draagstaven hebben. Door deze hoge slankheid hebben de proefstukken de neiging om krom te trekken nadat deze verzinkt zijn.

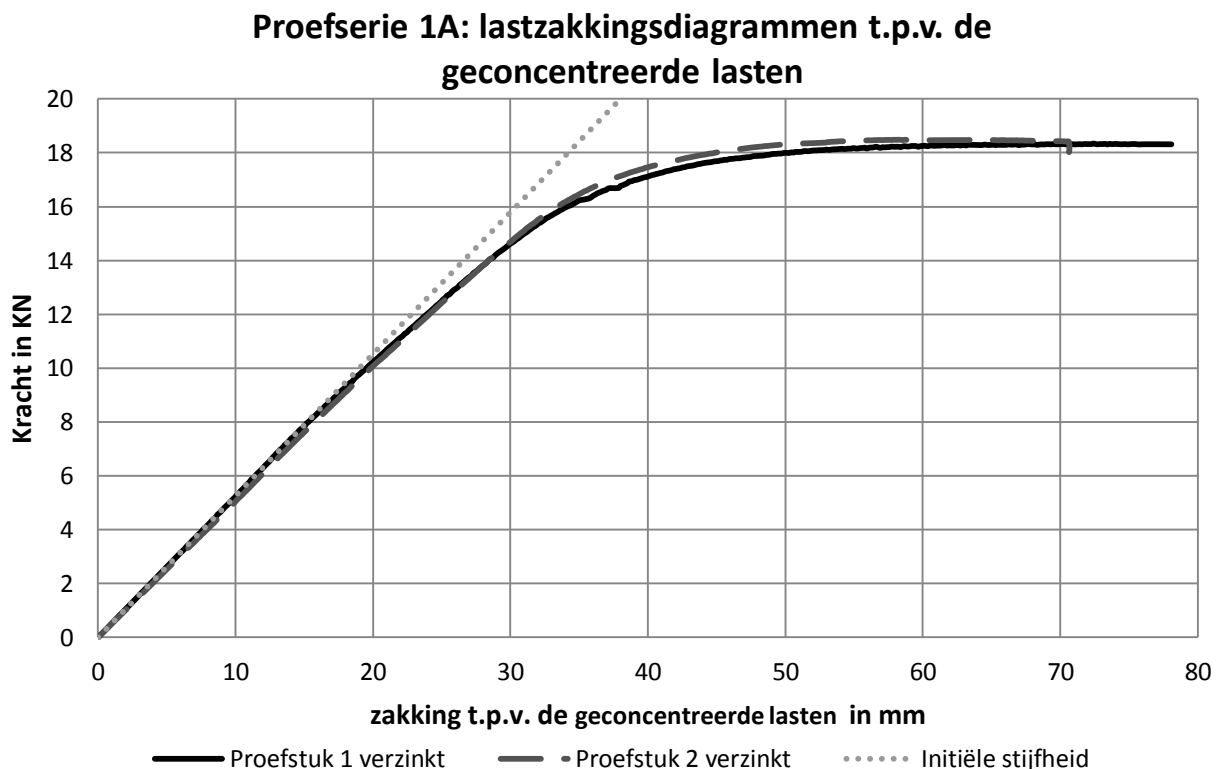
De grootte van het effect van verzinken wisselt per proefserie. Bij *proefserie 2A* zijn de imperfecties van de verzinkte proefstukken ongeveer 10 % groter dan bij de niet-verzinkte proefstukken. Bij proefstukken uit proefserie 2B is er een duidelijk groter verschil, zo is er sprake van een verdubbeling van de horizontale imperfecties. Een mogelijke verklaring hiervoor is, dat *proefserie 2A* na het verzinken nog gesteld is. Het stellen vindt plaats wanneer de vervorming t.g.v. het verzinkte te groot is. Tijdens het stellen wordt imperfecties plastisch terug vervormd tot een acceptabel niveau.

6.4 Vierpuntsbuigproeven- Plastische bezwijken

6.4.1 Proefserie 1A

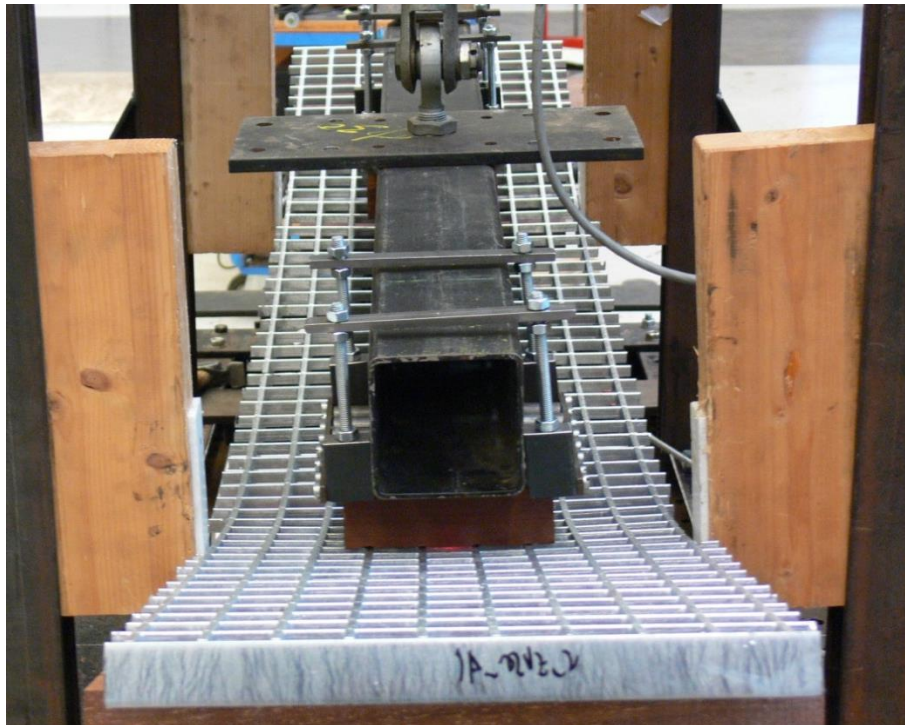
Zowel de verzinkte als niet-verzinkte proefstukken lieten een aanzienlijk vervormingscapaciteit zien, zie Figuur 52 en Figuur 53. Het bezwijken trad op t.g.v. een mechanisme door het ontstaan van plastische scharnieren in de draagstaven, zie Figuur 54.

In Figuur 51 zijn de lastzakkingsdiagrammen t.p.v. de geconcentreerde lasten van de twee proefstukken van *proefserie 1A* geplot. Ook is een raaklijn met de initiële stijfheid van de proefstukken geplot in dit figuur. Deze raaklijn is bepaald op basis van de gemiddelde initiële stijfheid van de twee zakkingsdiagrammen van *proefserie 1A*.



Figuur 51: Last-zakkingsdiagram van de twee proefstukken van proefserie 1A, t.p.v. de geconcentreerde lasten

Figuur 51 illustreert dat de twee lastzakkingsdiagrammen zo goed als identiek zijn. De raaklijn in Figuur 51 laat zien dat de overgang tussen elastisch en plastisch gedrag in eerste instantie vrij geleidelijk verloopt. De initiële stijfheid is gemiddeld 0,5 kN/mm t.p.v. de geconcentreerde lasten. Bij een belasting van ongeveer 9 kN begint de stijfheid van de proefstukken af te wijken van de initiële stijfheid. Bij een belasting van 13 kN neemt de stijfheid vervolgens snel af, en gaan de proefstukken zich duidelijk elasto-plastisch gedragen. De maximale belasting van iets meer dan 18 kN wordt gehaald bij een verplaatsing van ongeveer 50 mm t.p.v. de geconcentreerde lasten.

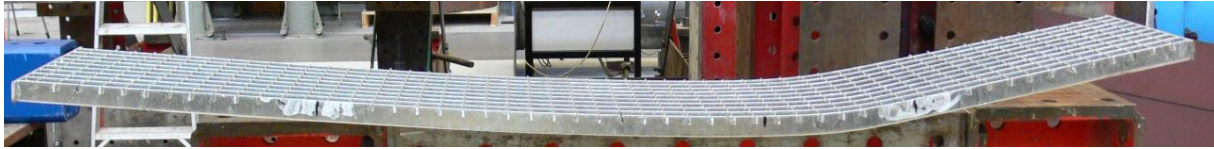


Figuur 52: Vervorming t.g.v. een belasting 18 kN in een proefstuk van serie 1A



Figuur 53: Kromming draagstaven in proefserie 1A

Het verlies van stijfheid, zoals zichtbaar is in het lastzakkingsdiagram ontstaat t.g.v. het vloeien van de doorsneden van de draagstaven. Het totaal verlies aan stijfheid boven een verplaatsing van 50 mm t.p.v. van de geconcentreerde lasten komt voort uit het ontstaan van plastische scharnieren in de draagstaven t.p.v. één van de geconcentreerde lasten. Deze scharnieren zijn na het ontlasten duidelijk zichtbaar in Figuur 54, als een gebied waar de kromming zich geconcentreerd heeft.



Figuur 54: Blijvende vervorming na ontlasten

6.4.1.1 Spreiding in initiële stijfheid en maximale belasting

In Tabel 9 staan de initiële stijfheid en maximale belasting van ieder proefstuk weergegeven. Duidelijk uit Tabel 9 is dat de verschillen in initiële stijfheid en maximale belasting tussen de twee proefstukken beperkt zijn.

Tabel 9: Initiële stijfheid en maximale belasting per proefstuk voor proefserie 1A

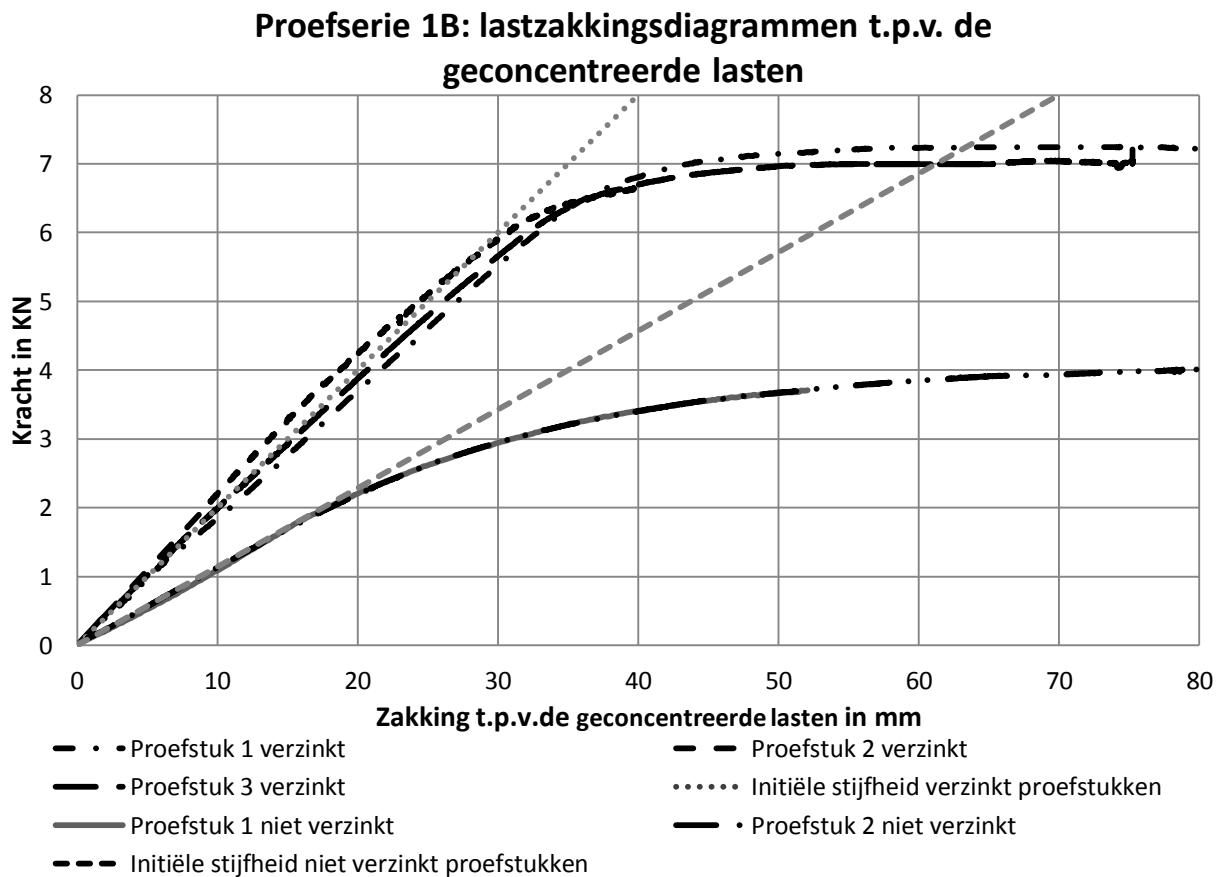
	Initiële stijfheid meetlocatie last(kN/mm)	initiële stijfheid meetlocatie midden(kN/mm)	initiële stijfheid meetlocatie rand (kN/mm)	maximale belasting (kN)
Proefstuk 1 verzinkt	0.53	-	0.35	18.3
Proefstuk 2 verzinkt	0.51	-	0.35	18.5

6.5 Vierpuntsbuigproeven- veel voorkomende persroostergeometrie

6.5.1 Proefserie 1B

Zowel de verzinkte als niet-verzinkte proefstukken lieten een aanzienlijk vervormingscapaciteit zien, zie Figuur 56 en Figuur 57. Het bezwijken trad op t.g.v. een mechanisme door het ontstaan van plastische scharnieren in de draagstaven, zie Figuur 57.

In Figuur 55 zijn de lastzakkingsdiagrammen t.p.v. de geconcentreerde lasten van de vijf proefstukken van *proefserie 1B* geplot. Ook zijn twee raaklijnen met de initiële stijfheid van de verzinkte en niet-verzinkte proefstukken geplot in dit figuur. Deze raaklijnen zijn bepaald op basis van de gemiddelde initiële stijfheid van de zakkingsdiagrammen van *proefserie 1B*. Vanwege praktische reden is *Proefstuk 2 verzinkt*, beproeft tot een verplaatsing van 35 mm t.p.v. de geconcentreerde lasten.



Figuur 55: Last-zakkingsdiagram van de drie verzinkte en van de twee niet-verzinkte proefstukken van proefserie 1B, t.p.v. de geconcentreerde lasten

Figuur 55 illustreert dat de drie lastzakkingsdiagrammen van de verzinkte proefstukken een vergelijkbare vorm hebben, maar niet geheel identiek zijn, zoals bij de niet-verzinkte proefstukken. De verzinkte en niet-verzinkte proefstukken laten respectievelijk een initiële stijfheid zien van gemiddeld 0.2 en 0.1 kN/mm t.p.v. de geconcentreerde lasten. Het lineaire traject houdt voor de verzinkte en niet-verzinkte proefstukken respectievelijk op bij, 5.0 en 2.3 kN. De maximale belasting van 7.1 en 4.0 kN wordt respectievelijk gehaald bij een verplaatsing van 50 en 80 mm t.p.v. de geconcentreerde lasten.

Duidelijk uit Figuur 55 is dat het verzinken niet alleen grote invloed heeft op sterkte en stijfheid, maar ook op het verloop van het lastzakkingsdiagram. De verzinkte proefstukken laten een duidelijk horizontaal plateau zien, terwijl bij de niet-verzinkte proefstukken er sprake lijkt te zijn van een versterkingstraject.



Figuur 56: Vervorming van een verzinkt proefstuk van proefserie 1B t.g.v. een belasting 7 kN

Het ontstaan van het plastisch scharnier verloop vergelijkbaar met *proefserie 1A*. Zo ontstonden er plastische scharnieren in de draagstaven in de buurt van de lastinleiding. Deze plastische scharnieren zijn duidelijk zichtbaar in Figuur 57.



Figuur 57: Blijvende vervorming na ontlasten van een verzinkt proefstuk van proefserie 1B

6.5.1.1 Spreiding in initiële stijfheid en maximale belasting.

In Tabel 10 staan de initiële stijfheid en maximale belasting van ieder proefstuk weergegeven. Uit deze tabel blijkt dat *proefstuk 2 verzinkt* een afwijkende initiële stijfheid heeft t.o.v. de twee andere verzinkte proefstukken. De reden voor deze afwijking is niet geheel duidelijk. De initiële stijfheid van twee niet-verzinkte proefstukken is zo goed als analoog.

Tabel 10: Initiële stijfheid in kN/mm en maximale belasting in kN per proefstuk voor proefserie 1B

	initiële stijfheid meetlocatie last (kN/mm)	initiële stijfheid meetlocatie midden (kN/mm)	initiële stijfheid meetlocatie rand (kN/mm)	maximale belasting (kN)
Proefstuk 1 verzinkt	0.20	0.13	0.14	7
Proefstuk 2 verzinkt	0.23	-	0.15	-
Proefstuk 3 verzinkt	0.20	-	0.14	7.1
Proefstuk 1 niet verzinkt	0.12	0.08	0.08	4
Proefstuk 2 niet verzinkt	0.11	-	0.08	4

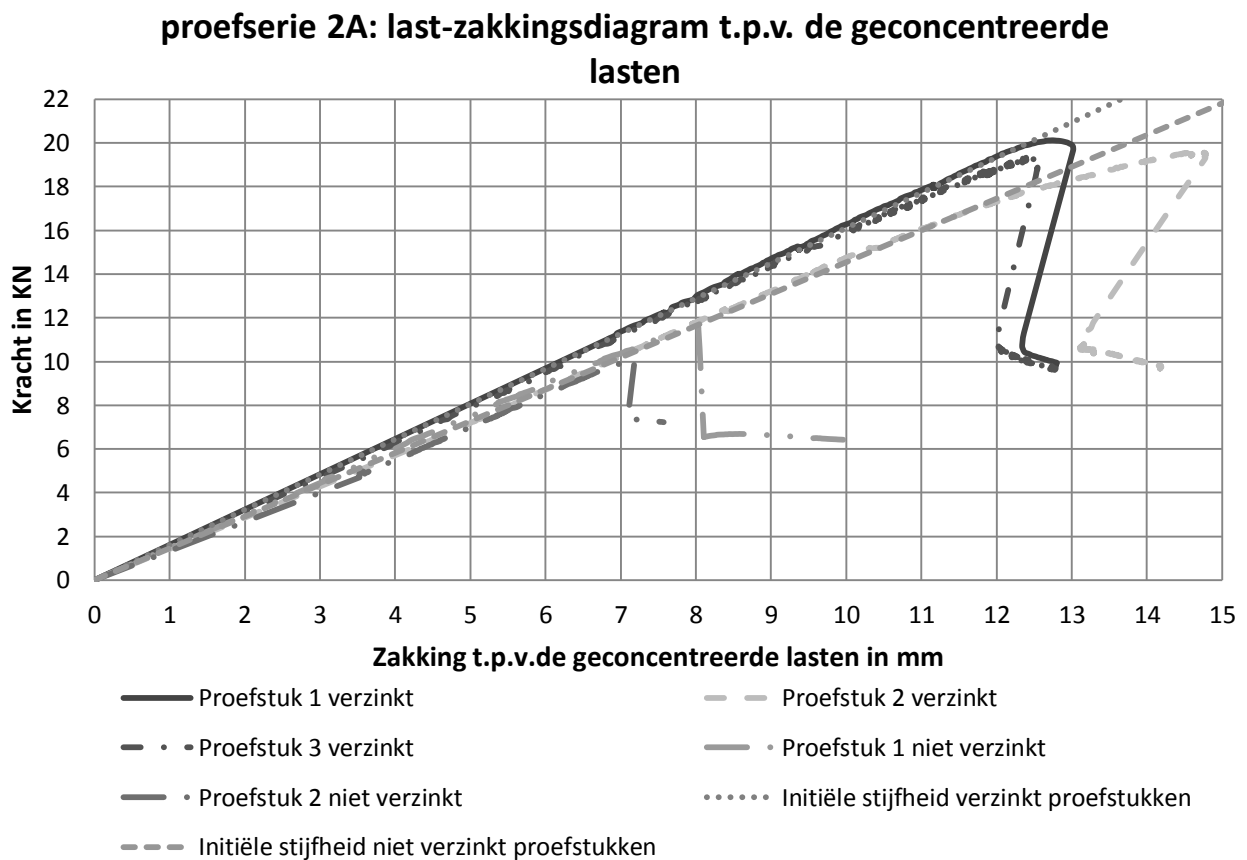
Doordat *proefstuk 2 verzinkt* niet tot bezwijken beproefd is, kan de maximale belasting niet worden bepaald. Het is voor de twee niet-verzinkte proefstukken niet geheel correct om van een maximale belasting te spreken, aangezien er sprake is van een verstevigingstraject. Wel kan gesteld worden dat de belasting bij een zakking van 80 mm t.p.v. de geconcentreerde lasten uitkomt op 4 kN voor beide proefstukken.

6.6 Vierpuntsbuijproeven- Instabiliteit

6.6.1 Proefserie 2A

Zowel de verzinkte als niet-verzinkte proefstukken lieten in vergelijking met proefseries *1A* en *1B* een beperkte vervormingscapaciteit zien. Het bezwijken trad op t.g.v. van *globale-kipinstabiliteit*, zie Figuur 59 en Figuur 60.

In Figuur 58 zijn de lastzakkingsdiagrammen t.p.v. de geconcentreerde lasten van de vijf proefstukken van *proefserie 2A* geplot. Ook zijn twee raaklijnen met de initiële stijfheid van de verzinkte en niet-verzinkte proefstukken geplot in dit figuur. Deze raaklijnen zijn bepaald op basis van de gemiddelde initiële stijfheid van de zakkingsdiagrammen van *proefserie 2A*.

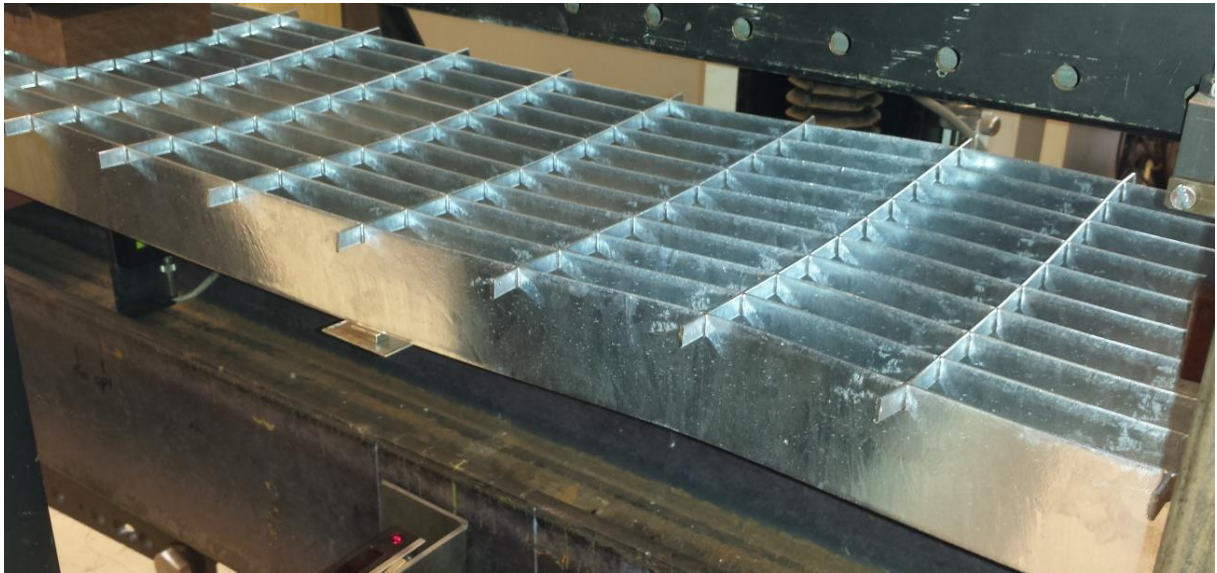


Figuur 58: Last-zakkingsdiagrammen t.p.v. de geconcentreerde lasten van drie verzinkte en 2 niet-verzinkte proefstukken van proefserie 2A

Figuur 58 illustreert dat de drie lastzakkingsdiagrammen van de verzinkte proefstukken een vergelijkbare vorm hebben, maar niet geheel identiek zijn. Hierbij valt vooral op dat *proefstuk 2 verzinkt* afwijkt.

De verzinkte- en niet-verzinkte proefstukken laten respectievelijk een gemiddelde initiële stijfheid zien van 1.5 en 1.4 kN/mm, t.p.v. de geconcentreerde lasten. Figuur 58 laat ook zien dat er sprake is van zo goed als lineair gedrag, voor zowel de verzinkte als niet-verzinkte proefstukken, tot op het punt van bezwijken. De verzinkte en niet-verzinkte proefstukken bezweken respectievelijk op een gemiddelde belasting van 19.7 en 10.8 kN. Na het optreden

van instabiliteit valt de belasting in één keer met ongeveer 50% terug, bij de verzinkte proefstukken. Dit instabiliteitsgedrag ontstaat doordat alle draagstaven gelijktijdig instabiel worden. In Figuur 59 en in Figuur 60 staat een weergave van dit fenomeen. De lengte waarop instabiliteiten optreden ligt tussen de 300 a 400 mm. Bij de niet-verzinkte proefstukken is dit gebied wat groter.



Figuur 59: Bezwijkvorm verzinkt proefstuk proefserie 2A,



Figuur 60: Bezwijkvorm niet-verzinkt proefstuk proefserie 2A

6.6.1.1 Spreiding in initiële stijfheid en maximale belasting

In Tabel 11 staan de initiële stijfheid en maximale belasting van ieder proefstuk weergegeven. Uit deze tabel valt op dat *proefstuk 2 verzinkt* een lagere initiële stijfheid heeft in beide gemeten meetlocaties, t.o.v. verzinkte proefstukken 1 en 3. Het is moeilijk hiervoor een verklaring te vinden. Het proefstuk vertoonde geen opvallende afwijkingen in geometrie, zie bijlagen A. Ook zijn proefonnauwkeurigheden niet waarschijnlijk omdat voor alle gemeten punten er sprake was van een aanzienlijk lagere initiële stijfheid, ook was de maximale belasting in lijn met de andere proefstukken.

Tabel 11: Initiële stijfheid in kN/mm en maximale belasting in kN per proefstuk voor proefserie 2A

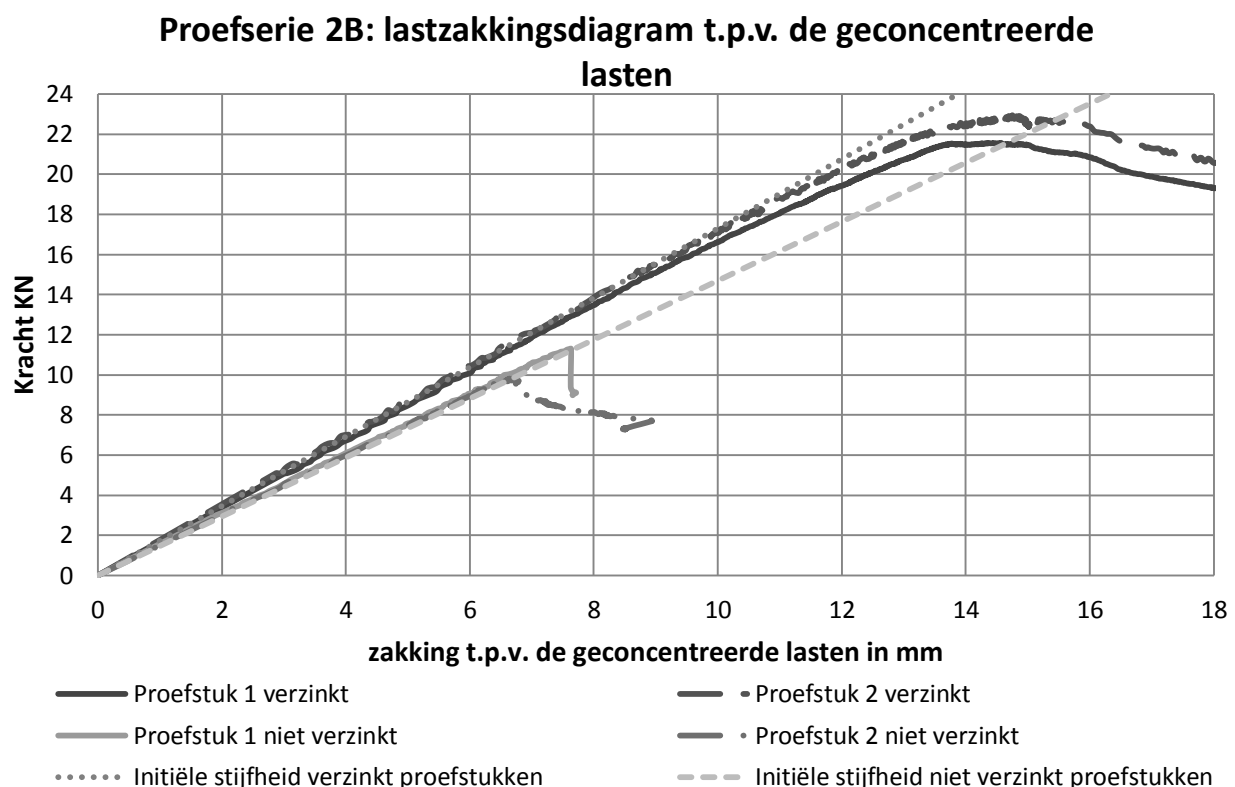
	initiële stijfheid Meetlocatie last(kN/mm)	initiële stijfheid Meetlocatie Midden(kN/mm)	initiële stijfheid Meetlocatie rand(kN/mm)	maximale belasting (kN)
Proefstuk 1 verzinkt	1.61	-	1.49	20.1
Proefstuk 2 verzinkt	1.43	-	1.01	19.6
Proefstuk 3 verzinkt	1.56	1.27	1.56	19.3
Proefstuk 4 niet verzinkt	1.48	1.01	1.35	11.5
Proefstuk 5 niet verzinkt	1.33	1.03	1.39	10.1

6.6.2 Proefserie 2B

Zowel de verzinkte als niet verzinkte proefstukken lieten in vergelijking met proefseries 1A en 1B een beperkte vervormingscapaciteit zien. Het bezwijken trad op t.g.v. van *lokale-kipinstabiliteit*, bij de verzinkte proefstukken en *globale-kipinstabiliteit* bij de niet-verzinkte proefstukken, zie Figuur 62 en

Figuur 63.

In Figuur 61 zijn de lastzakkingsdiagrammen t.p.v. de geconcentreerde lasten van de vier proefstukken van proefserie 2B geplot. Ook zijn twee raaklijnen met de initiële stijfheid van de verzinkte en niet-verzinkte proefstukken geplot in dit figuur. Deze raaklijnen zijn bepaald op basis van de gemiddelde initiële stijfheid van de zakkingsdiagrammen van *proefserie 2B*.



Figuur 61: Last-zakkingsdiagram t.p.v. de geconcentreerde lasten van twee verzinkte en twee niet-verzinkte proefstukken van proefserie 2B

Figuur 61 illustreert dat de twee lastzakkingsdiagrammen van de verzinkte proefstukken een vergelijkbare vorm hebben, maar niet geheel identiek zijn. De verzinkte en niet-verzinkte proefstukken hebben respectievelijk een initiële stijfheid van gemiddeld 1.7 en 1.5 kN/mm t.p.v. de geconcentreerde lasten. De raaklijnen in Figuur 61 laten zien dat de verzinkte proefstukken tot een belasting van ongeveer 18 kN lineair gedrag vertonen. De verzinkte en niet-verzinkte proefstukken bezweken respectievelijk op een gemiddelde belasting van 22.3 en 10.6 kN.

Na het instabiel worden van de verzinkte proefstukken loopt de belasting in vergelijking met *proefserie 2A* geleidelijk terug. Dit laat zich verklaren door het optreden van *lokale* in plaats

van *globale-kipinstabiliteit*, zie Figuur 62. Bij deze vorm van instabiliteit kan een deel van de last herverdeeld worden over niet instabiel geworden draagstaven, hetgeen wat resulteert in minder agressief gedrag.

De niet-verzinkte proefstukken laten analoog aan *proefserie 2A globale-kipinstabiliteit* zien, zie

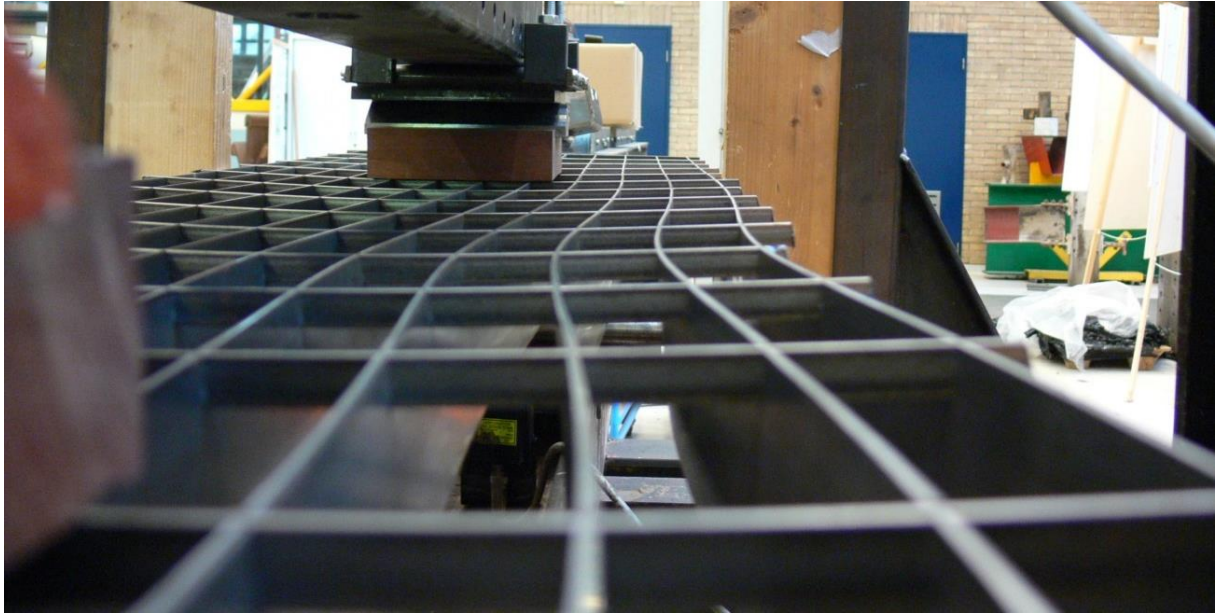
Figuur 63 en *Figuur 64*. De daling van de last, na het optreden van instabiliteit is echter wel minder groot dan bij *proefserie 2A*.



Figuur 62: Lokale-kipinstabiliteit in de verzinkte proefstukken van proefserie 2B



Figuur 63: Globale-kipinstabiliteit in de niet-verzinkte proefstukken van proefserie 2B



Figuur 64: Globale-kipinstabiliteit in de niet-verzinkte proefstukken van proefserie 2B

6.6.2.1 Spreiding in initiële stijfheid en maximale belasting

In Tabel 12 staan de initiële stijfheid en maximale belasting van ieder proefstuk weergegeven. Zoals zichtbaar is Tabel 12 is de spreiding in initiële stijfheid, tussen de verzinkte proefstukken en niet-verzinkte proefstukken onderling beperkt.

Tabel 12: Initiële stijfheid in kN/mm en maximale belasting in kN per proefstuk voor proefserie 2B

	initiële stijfheid Meetlocatie last (kN/mm)	initiële stijfheid Meetlocatie Midden (kN/mm)	initiële stijfheid Meetlocatie rand (kN/mm)	maximale belasting (kN)
Proefstuk 1 verzinkt	1.69	1.16	2.49	21.6
Proefstuk 2 verzinkt	1.78		2.41	22.9
Proefstuk 1 niet verzinkt	1.47	0.98	2.34	11.3
Proefstuk 2 niet verzinkt	1.43		2.11	9.8

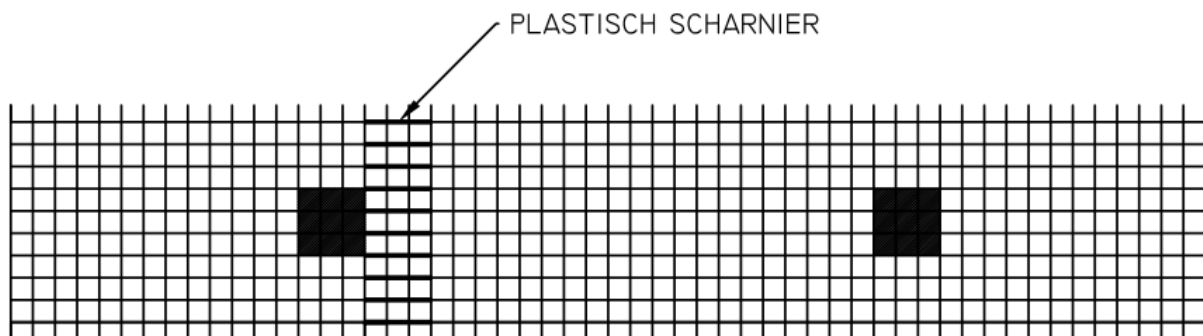
6.7 Bespreking proefresultaten

In paragraaf 6.7.1 tot en met 6.7.8 zijn verschillende aspecten behandeld op basis van onderwerp.

6.7.1 Beschrijving gevonden bezwijkmechanismes

De vierproefseries hebben drie verschillende bezwijkmechanismes aan het licht gebracht. De proefstukken van proefseries *1A* en *1B* bezweken t.g.v. een plastisch scharnier over de gehele breedte. De proefstukken van proefseries *2A* en *2B* bezweken t.g.v. van instabiliteit. Hierbij was er sprake van *globale-kipinstabiliteit* bij *proefserie 2A* en bij de niet-verzinkte proefstukken van *proefserie 2B*. *Lokale-kipinstabiliteit* trad op bij de verzinkte proefstukken van *proefserie 2B*.

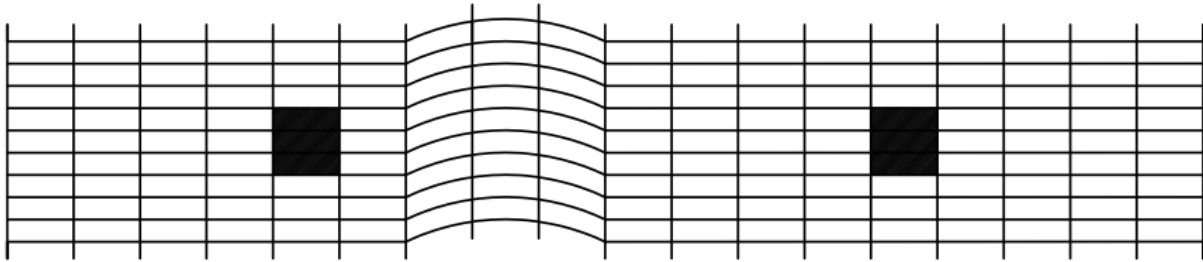
Ieder van de drie bezwijkmechanismes heeft zijn eigen kenmerken. Bij bezwijken t.g.v. plastische scharnieren, zie Figuur 65, is er sprake van een aanzienlijke vervormingscapaciteit. De plastische scharnieren in de draagstaven zijn duidelijk zichtbaar in het lastzakkingsdiagram. De plastische scharnieren vormen zich geleidelijk naarmate de vervorming toeneemt. Wat opvalt uit de lastzakkingsdiagrammen van de verzinkte proefstukken van proefserie *1A* en *1B*, is dat het plastische scharnier resulteert in een totaal verlies van stijfheid. Terwijl er bij de niet-verzinkte proefstukken sprake is van een versterkingstraject.



Figuur 65: Waargenomen plastische scharnieren

De plastische scharnieren traden in alle proefstukken op in de buurt van één de geconcentreerde lasten. Dit kan verklaard worden door lokale piekspanningen t.p.v. de geconcentreerde lasten. Deze lokale piekspanningen zorgen ervoor dat de draagstaven t.p.v. de geconcentreerde lasten als eerst gaan vloeien. Door het verlies van stijfheid worden de draagstaven aan weerskanten van deze draagstaven extra belast. Deze extra belasting resulteert ook hier in het vloeien van de draagstaven, waardoor het scharnier zich over de breedte uitbreidt.

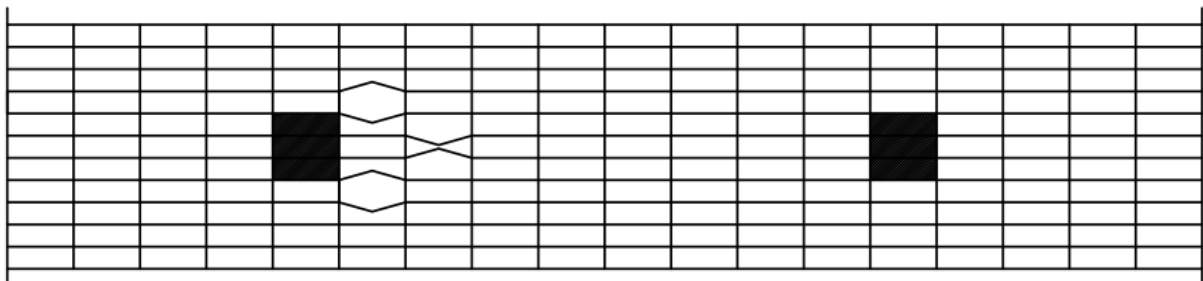
Globale-kipinstabiliteit, zie Figuur 66, kan aan de hand van het lastzakkingsdiagram duidelijk getypeerd worden als een instabiliteitsfenomeen. Dit instabiliteitsfenomeen ontstaat doordat, alle draagstaven gelijktijdig instabiel worden, waardoor de last niet herverdeeld kan worden.



Figuur 66: Waargenomen globale kipvorm

Het gebied waarop *Globale-kipinstabiliteit* optreedt in de proefstukken ligt tussen de 300 en 400 mm. *Globale-kipinstabiliteit*, trad niet specifiek op in de buurt van de geconcentreerde lasten. Hieruit kan geconcludeerd worden dat is *globale-kipinstabiliteit* niet gevoelig voor lokale spanningsconcentraties t.p.v. de geconcentreerde lasten.

Lokale-kipinstabiliteit, zie Figuur 67, is aan de hand van het lastzakkingsdiagram minder duidelijk te typeren als een instabiliteitsvorm, dan *globale-kipinstabiliteit*. Dit heeft te maken met het minder agressieve instabiliteitsgedrag. Dit gedrag is minder agressief omdat, niet alle draagstaven instabiel worden waardoor de last deels herverdeeld kan worden over niet gekipte draagstaven.



Figuur 67: Waargenomen lokale kipvorm

Lokale-kipinstabiliteit trad altijd op in de buurt van de geconcentreerde lasten. Dit kan verklaard worden doordat dit fenomeen beïnvloed wordt door lokale spanningen. Door deze lokale spanningen zijn de draagstaven in de buurt van de geconcentreerde lasten eerder geneigd instabiliteit te vertonen. Uit Figuur 67 valt op dat de draagstaven in het midden van de puntlast niet instabiel worden. De reden hiervoor is de dubbel kromming, zie ook paragraaf 6.7.2, in de proefstukken. Door deze kromming maken de last-inleidingsblokken alleen aan de randen contact.

6.7.2 Relatie tussen de initiële stijfheden van de drie meetlocaties

In Tabel 13 staan voor proefseries 1B, 2A en 2B de onderlinge relatie tussen de gemiddelde initiële stijfheden in de drie meetlocaties weergegeven. In deze tabel is de initiële stijfheid t.p.v. de geconcentreerde last gelijk gesteld aan 1. De initiële stijfheid in *meetlocatie-midden* en in *meetlocatie-rand* zijn aan deze stijfheid gerelateerd.

Tabel 13: Relatie tussen de initiële stijfheden van de 3 gemeten meetlocaties. De stijfheid t.p.v. de geconcentreerde lasten is gelijk gesteld aan 1

		<i>Meetlocatie last(-)</i>	<i>Meetlocatie last(-)</i>	<i>Meetlocatie last(-)</i>
Proefserie 1B	Verzinkt	1	0.69	0.69
	Niet verzinkt	1	0.69	0.68
Proefserie 2A	Verzinkt	1	0.69	0.93
	Niet verzinkt	1	0.68	0.91
Proefserie 2B	Verzinkt	1	0.69	1.37
	Niet verzinkt	1	0.67	1.44

Door middel van het vergelijken van de initiële stijfheid van *meetlocatie-midden* en *meetlocatie-rand*, kan bepaald worden in welke mate de lasten over de breedte van de proefstukken verdeeld wordt.

Bij *proefserie 1B* zijn de stijfheden t.p.v. *meetlocatie-midden* en *rand*, voor zowel de verzinkte als niet-verzinkte proefstukken zo goed als gelijk. Dit illustreert dat de proefstukken van *proefserie 1B* goed instaat zijn de twee geconcentreerde lasten, over de breedte van het persrooster te verdelen. Door deze herverdeling is de kromming in de richting haaks op de overspanningsrichting beperkt.

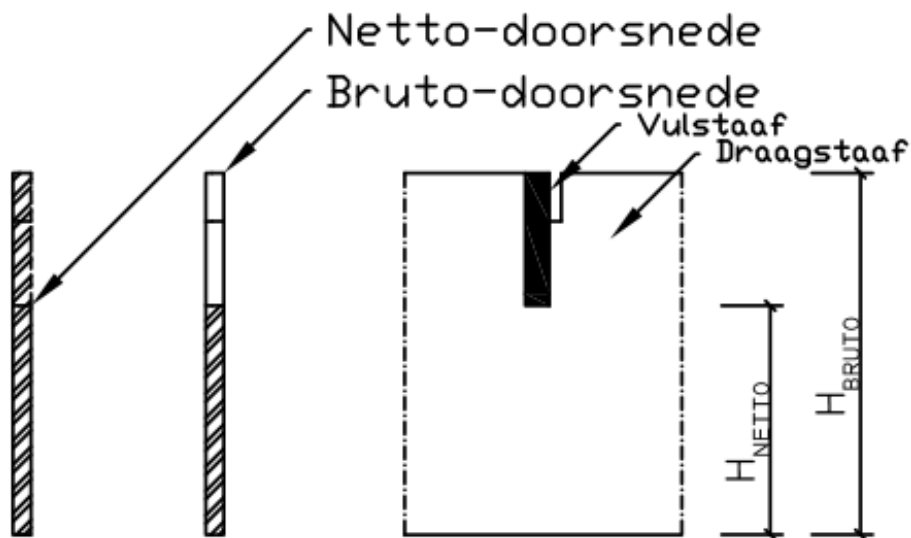
Bij proefseries 2A en 2B is er duidelijk een verschil in stijfheid tussen *meetlocatie-midden* en *meetlocatie-rand*. Bij *proefserie 2B* is dit verschil het grootst. *Proefserie 2A* herverdeelt de twee geconcentreerde lasten dus beter dan *proefserie 2B*. Door deze beperkte herverdeling, is er sprake van zowel, een kromming in de richting haaks op de overspanningsrichting als in de overspanningsrichting zelf.

Tabel 13 laat ook zien dat het verzinken van de proefstukken geen duidelijke invloed heeft op de verdeling van de last over de draagstaven. Dit blijkt uit het feit dat de relatie tussen de initiële stijfheid van de drie *meetlocaties*, voor verzinkte en niet-verzinkte proefstukken zo goed als gelijk is.

6.7.3 Invloed van de persverbinding op initiële stijfheid en sterkte

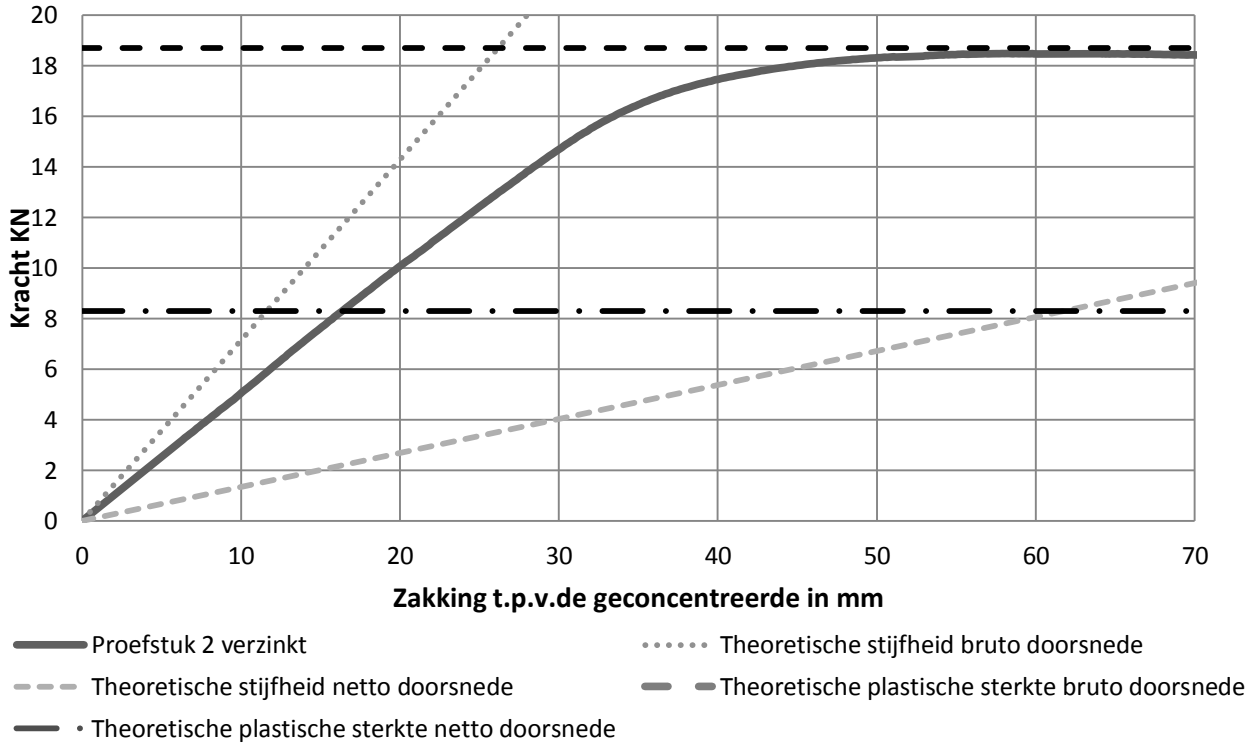
Uit paragraaf 6.7.2 blijkt dat er sprake is van een goede herverdeling van de geconcentreerde lasten over de breedte, bij proefseries *IA* en *IB*. Dit maakt het mogelijk om de initiële stijfheid en sterkte van de proefstukken in relatie te plaatsen tot de theoretische stijfheid en plastische sterkte.

De theoretische initiële stijfheid en plastische sterkte zijn analytisch bepaald. Deze sterkte en stijfheid zijn gebaseerd op de bruto- en netto-doorsnede van de draagstaven. Met de bruto doorsnede wordt de volledige doorsnede van de draagstaven bedoeld, en met netto doorsnede de volledige doorsnede minus de doorsnede van de persverbinding, zie Figuur 68.

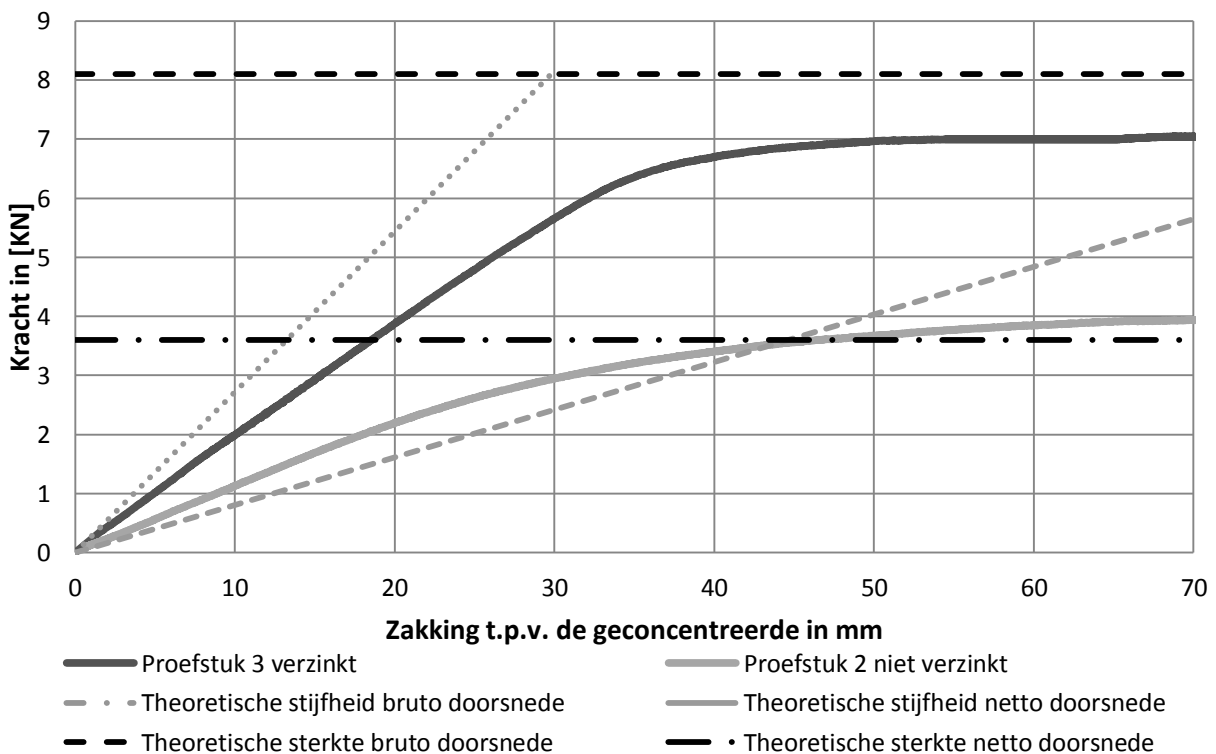


Figuur 68: Definitie bruto en netto doorsnede

In Figuur 69 en Figuur 70 zijn de lastzakkingsdiagrammen van respectievelijk proefseries *IA* en *IB*, afgezet tegen de theoretische initiële stijfheid en plastische sterkte, van zowel de bruto- als netto-doorsnede. Omwille van de leesbaarheid is er enkel één lastzakkingsdiagram per proefserie geplot.



Figuur 69: Initiële stijfheid en sterkte van de proefstukken van proefserie 1A in relatie tot de theoretische stijfheid en sterkte op basis van de bruto en netto doorsnede.



Figuur 70: Initiële stijfheid en sterkte van de proefstukken van proefserie 1B in relatie tot de theoretische stijfheid en sterkte op basis van de bruto en netto doorsnede.

Figuur 69 en Figuur 70 laten zien dat, de initiële stijfheid van de verzinkte proefstukken van proefseries *IA* en *IB* dichter ligt bij de initiële stijfheid van de bruto doorsnede, dan van de netto doorsnede. De initiële stijfheid op basis van de bruto doorsnede wordt door de verzinkte proefstukken van proefseries *IA* en *IB* beide benaderend tot een factor van ongeveer 0.76. De effectieve draagstaafhoogte komt daarmee uit op 27.4 mm i.p.v. 30 mm.

De initiële stijfheid van de niet-verzinkte proefstukken van *proefserie IB* ligt daarentegen dichter bij de stijfheid van de netto doorsnede. De initiële stijfheid op basis van de bruto doorsnede wordt door de niet-verzinkte proefstukken van *proefserie IB*, benaderd tot factor van ongeveer 0.43. De effectieve draagstaafhoogte komt daarmee uit op 22.6 mm i.p.v. 30 mm.

De theoretische plastische sterkte op basis van een bruto doorsnede, wordt door de verzinkte proefstukken van proefseries *IA* en *IB* respectievelijk benaderd tot factor van 0.99 en 0.88. De effectieve draagstaafhoogte komt daarmee uit op 29.8 en 28 mm i.p.v. 30 mm. De niet-verzinkte proefstukken van *proefserie IB* benaderen de theoretische plastische sterkte op basis van een bruto doorsnede tot factor van ongeveer 0.49. De effectieve draagstaafhoogte komt daarmee uit op 21.1 mm i.p.v. 30 mm.

De bovenstaande resultaten tonen aan dat de persverbinding op de initiële stijfheid een grotere invloed heeft dan op sterkte. Ook kan gesteld worden dat in de niet-verzinkte persverbinding zo goed als geen krachtsoverdracht in de draagstaafrichting mogelijk is.

De verzinkte proefstukken van *proefserie IA* benaderen het theoretische vol-plastische moment beter dan de verzinkte proefstukken van *proefserie IB*. Een verklaring voor dit feit zou kunnen zijn dat, door grotere draagstaafdikte het zink in de persverbinding meer opgesloten zit. Hierdoor zou er sprake kunnen zijn van een sterkere drie-assige spanning. Ook is het mogelijk dat dit feit veroorzaakt wordt door spreiding in materiaaleigenschappen, zie paragraaf 6.2.1.

6.7.4 Stijfheid en sterkte van de proefstukken in relatie tot de [RAL-GZ-638]

In *Tabel 14* staan de gemiddelde initiële stijfheden en sterktes van de proefseries, in relatie tot de stijfheden en sterktes volgens de [RAL-GZ-638] weergegeven, op basis van de gemeten vloeigrens.

Tabel 14: Stijfheid en sterkte van de proefseries, in relatie tot de [RAL-GZ-638] op basis van de gemeten vloeigrens

	Proefserie 1A	Proefserie 1B		Proefserie 2A		Proefserie 2B	
	verzinkt	verzinkt	Niet verzinkt	verzinkt	Niet verzinkt	verzinkt	Niet verzinkt
Sterkte [kN] RAL-GZ-638	7	3	-	10.7	-	10.7	-
Stijfheid [kN/mm] RAL-GZ-638	0.29	0.1	-	0.9	-	0.9	-
Elastische sterkte[kN] proefstukken	9-10	5-6	2.6	-	-	18-20	-
Sterkte [kN] proefstukken	18.7	7.1	4,0	19.7	10.8	22.3	10.6
Stijfheid [kN/mm] proefstukken	0.5	0.2	0.12	1.6	1.5	1.7	1.5

Tabel 14 laat zien dat de verzinkte proefstukken in alle gevallen een grotere sterkte hebben dan, de karakteristieke [RAL-GZ-638] sterkte. Hetzelfde kan over de initiële stijfheid gezegd worden. Ook de niet-verzinkte proefstukken laten een grotere initiële stijfheid en sterkte zien, zij het wel dat het verschil met de [RAL-GZ-638] minder groot is.

De hogere sterkte kan enerzijds verklaard worden door de betere herverdeling van de geconcentreerde lasten over de draagstaven, en anderzijds uit plastisch-materiaalgedrag. De hogere initiële stijfheid laat zich daarentegen alleen verklaren uit een betere herverdeling van de geconcentreerde lasten over de draagstaven.

De proefresultaten laten zien dat er sprake is van een aanzienlijke betere herverdeling dan volgens de [RAL-GZ-638]. Bij de opmerking, dient echter wel aangetekend te worden dat, de last-inleidingsblokken op een andere manier de last inleiden dan de [RAL-GZ-638]. De aanwezigheid van deze blokken zorgt voor een betere herverdeling van de lasten over de draagstaven, en verhoogt daarmee de stijfheid.

6.7.5 Invloed van het verzinken op de stijfheid en sterkte

Uit de proefresultaten blijkt dat het verzinken van de proefstukken, de sterkte en de stijfheid aanzienlijk verhoogt. Men zou kunnen stellen dat het zink gezien kan worden als een constructieve verflaag. De bijdragen van deze constructieve verf aan de stijfheid en sterkte is zodanig groot, dat het verzinken van uit constructief oogpunt zeer wenselijk is. De invloed van het verzinken op het constructief gedrag, valt terug te herleiden naar de werking van de persverbinding.

De grootte van de invloed van het verzinken op de stijfheid en sterkte wisselt per proefserie. Bij *proefserie 1B* neemt door verzinken, de initiële stijfheid en sterkte respectievelijk toe met een factor van 1.80 en 1.90. Bij *proefserie 2A* is dit respectievelijk een factor van 1.1 en 1.80 en bij *proefserie 2B* is dit respectievelijk een factor van 1.20 en 2.1. De invloed van het verzinken op de initiële stijfheid is voor *proefserie 1B* groter dan *2A* en *2B*, omdat bij *proefserie 1B* de verhouding tussen de hoogte van de persverbinding en de draagstaafhoogte groter is, zie ook paragraaf 1.1.

6.7.6 Invloed van de persverbinding op het constructief gedrag

De persverbinding heeft een aanzienlijke invloed op het constructief gedrag. Deze invloed hangt nauw samen met de bezwijkvorm die optreedt, en de hoogte van de draagstaven t.o.v. de hoogte van de persverbinding. Zo is er duidelijk onderscheid te maken tussen bezwijken t.g.v. een mechanisme t.g.v. plastisch scharnieren en bezwijken t.g.v. instabiliteiten.

6.7.6.1 Invloed persverbinding op het constructief gedrag in het geval van plastisch bezwijken

De persverbinding beïnvloedt de stijfheid en sterkte, doordat het de krachtsoverdracht in het bovenste deel van de draagstaaf bemoeilijkt. Het gevolg hiervan is dat de bovenkant van de doorsnede van de draagstaven minder geactiveerd kan worden. De grootte van deze invloed wordt door twee aspecten bepaald. Het eerste aspect is het wel- of niet-verzinken, zo kwamen de niet-verzinkte proefstukken uit op aanzienlijk lagere sterkte dan de verzinkte proefstukken. De reden hiervoor is dat er via het zink in de persverbinding krachtsoverdracht mogelijk is. Het tweede aspect is de verhouding van de draagstaafhoogte t.o.v. de persverbindingshoogte, zie ook paragraaf 1.1. Hoe groter de hoogte van persverbinding t.o.v. van de draagstaafhoogte, des te groter de invloed van de persverbinding.

In paragraaf 1.1 is gesteld dat het mogelijk is dat de persverbinding dicht gedrukt wordt t.g.v. een kromming in de draagstaven. Uit de lastzakkingsdiagrammen van proefseries *1A* en *1B* valt dit fenomeen echter niet op te maken. Zelfs het ontstaan van een plastisch scharnier resulteert niet in voldoende kromming om de persverbinding dicht te drukken. Het is waarschijnlijk dat bij een nog grotere kromming de persverbinding als nog dicht gedrukt wordt. De bijbehorende vervormingen zijn echter zo groot, dat gesteld kan worden dat het dicht drukken van de persverbinding geen rol speelt in het constructief gedrag van een persrooster met dit type persverbinding.

6.7.6.2 Invloed persverbinding op het constructief gedrag in het geval van instabiliteit

De persverbinding beïnvloedt de stijfheid op de zelfde manier als in het geval van plastisch bezwijken. De sterkte wordt echter primair beïnvloed doordat, de persverbinding invloed heeft op de laterale stijfheid. Deze stijfheid komt deels voort uit een soort vierendeelwerking. Bij deze vierendeelwerking speelt de stijfheid van de verbinding tussen de draag en-vulstaven, om de zwakke as van de vulstaven een belangrijke rol. Wanneer de persverbinding niet verzinkt is, is deze stijfheid heel beperkt. Hierdoor worden de draagstaven minder gesteund tegen instabiliteiten en is het persrooster eerder geneigd tot *globale-kipinstabiliteit*. Dit fenomeen is duidelijk zichtbaar in *proefserie 2B*. In deze proefserie bezweken de verzinkte proefstukken t.g.v. *lokale-kipinstabiliteit* terwijl de niet-verzinkte proefstukken bezweken t.g.v. *globale-kipinstabiliteit* op een veel lagere belasting.

6.7.7 Invloed van de imperfecties op de draagkracht

Gezien het beperkt aantal uitgevoerde proeven per proefserie, is het niet mogelijk een statistisch onderbouwde uitspraak te doen over de invloed van de imperfecties op de draagkracht. Uit de proefresultaten valt echter wel op te maken dat er niet sprake is van een eenduidige relatie. Dit komt duidelijk naar voren uit de vergelijking van twee proefstukken uit *proefserie 2A*. *Proefstuk 1 en 3* van deze proefserie bereikte respectievelijk een maximale belasting van 20.1 en 19.3 kN. Dit terwijl de horizontale imperfecties in de draagstaven van *proefstuk 1 en 3* respectievelijk gemiddeld 3.3 mm en 1.5 mm bedroegen.

6.8 Conclusie experimentele bepaling van de draagkracht

Uit de proeven komen de drie onderzochten bezwijkvormen duidelijk naar voren. Ook laten de proeven zien dat er duidelijk sprake is van plastische-capaciteit bij proefserie 1B-de normale persroostergeometrie.

De verkregen maximale belastingen zijn vrij constant binnen een proefserie. Dit is relevant omdat dit gezien kan worden als voorwaarde voor het kunnen toepassen van plastische berekeningsmethodiek.

7 Numerieke bepaling van draagkracht

De doelstelling van dit hoofdstuk is om aan te tonen dat m.b.v. een numerieke methodiek het mogelijk is de draagkracht van persrooster te bepalen. Deze doelstelling is onderzocht, door middel van het bepalen van de numerieke draagkracht van de alle verzinkte proefstukken van de proefseries en de niet-verzinkte proefstukken van *proefserie 1B*. Deze bepaling heeft plaatsgevonden aan de hand van twee soorten FEM modellen en twee type beschouwingen. In de eerst beschouwing is de invloed van de persverbinding op stijfheid en sterkte niet beschouwd. In de tweede beschouwing is deze invloed wel beschouwd. De precisie van de FEM beschouwingen is beoordeeld aan de hand van de lastzakingsdiagrammen en de verkregen bezwijkvormen.

De opbouw van dit hoofdstuk is als volgt: In paragraaf 7.1 zijn de onzekerheden in de numerieke bepaling van draagkracht behandeld, in paragraaf 7.2 is de werking van de FEM methodiek toegelicht, in paragraaf 7.3 is de toegepaste methodologie toegelicht, in paragraaf 7.4 zijn de modellen toegelicht, in paragraaf 7.5 staan de FEM beschouwingen van proefseries *1A en 1B*, in paragraaf 7.7 staan de FEM beschouwingen van proefseries *2A en 2B* en in paragraaf 7.7 zijn de resultaten besproken.

7.1 Onzekerheden in de numerieke bepaling van draagkracht

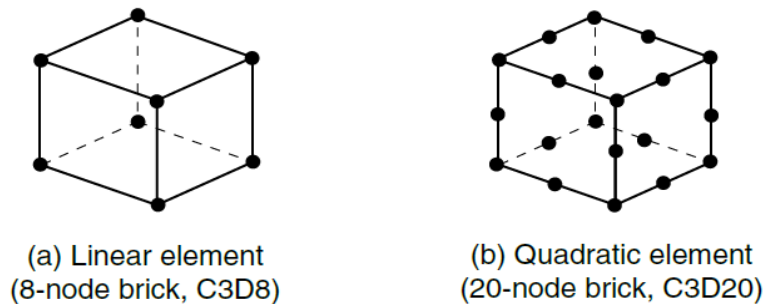
Er is sprake van zowel modelon nauwkeurigheden als meeton nauwkeurigheden. Modelon nauwkeurigheden komen onder andere voort uit de schematisering: van de persverbinding, de materiaaleigenschappen, de belasting en de opleggingen. Een andere bron van modelon nauwkeurigheden is het wel of niet beschouwen van bepaalde aspecten, zoals restspanningen en tweede-orde effecten. Onder meeton nauwkeurigheden vallen aspecten als onnauwkeurigheden in de gemeten waarde zoals verplaatsingen, krachten en onzekerheden in materiaaleigenschappen, zie paragraaf 6.1.1.

7.2 Wat is een FEM analyse

FEM, *finite element method of eindige elementen methode* in het Nederlands is numerieke methode, voor het analyse van het gedrag van constructies. Een FEM analyse werkt door middel van het opdelen van een constructie in een eindig aantal elementen. Hierbij kunnen verschillende type elementen toegepast worden. Veel voorkomende elementen zijn schaal, zie Figuur 71, en volume-elementen, zie Figuur 72.



Figuur 71: Lineaire (links) en kwadratische(rechts) schaal-elementen Bron: ABAQUS manual



Figuur 72: Lineaire (links) en kwadratische(rechts) volumeelementen Bron: ABAQUS manual

Een element is opgebouwd uit een aantal knopen. In lineaire elementen zijn deze knopen alleen te vinden in de hoekpunten, zie Figuur 71 en Figuur 72 links. Bij kwadratische elementen worden er ook een knoop tussen deze twee randknopen aangebracht, zie Figuur 71 en Figuur 72 links.

Iedere knoop in een element heeft een aantal vrijheidsgraden. Aan de hand van vrijheidsgraden wordt er een stijfheidsmatrix opgesteld. Deze stijfheidsmatrix koppelt de verplaatsingen aan de krachten. De stijfheidsmatrix wordt met behulp van de randvoorwaarde opgelost. Hoe groter het aantal vrijheidsgraden, des te langer de rekentijd.

Dit onderzoek is uitgevoerd met behulp van het FEM pakket ABAQUS. In dit onderzoek zijn twee soorten FEM analyse toegepast, namelijk: een lineaire en een niet-lineaire analyse. Deze analyse staat hieronder nader beschreven

Lineaire analyse

Een lineaire analyse is een eerste orde-elastisch rekenmodel, zie ook paragraaf 5.4. In een lineaire analyse wordt de stijfheidsmatrix maar één keer opgesteld en opgelost. Aspecten zoals niet-lineair materiaalgedrag en geometrische niet lineariteit kunnen hierdoor niet beschouwd worden.

Niet-lineaire analyse

Een niet-lineaire analyse kan afhankelijk van de aspecten die meegenomen worden, beschouwd worden als een eerste-orde plastisch, tweede-orde elastisch of tweede-orde elastisch-plastisch rekenmodel, zie ook paragraaf 5.4. In een niet-lineaire FEM analyse wordt de stijfheidsmatrix meer dan één een keer opgesteld en opgelost. Hierdoor is het mogelijk de analyse bij de sturen. Hierdoor kunnen veranderingen in geometrie t.g.v. verplaatsingen en veranderingen in materiaaleigenschappen t.g.v. rek beschouwd worden.

In dit onderzoek zijn twee soorten niet-lineaire analyse toegepast, namelijk een *static general* en een *static riks*. *Static general analyse*, zie ABAQUS manual, is toegepast in het geval van plastische bezwijken. Een *static Riks analyse*, zie ABAQUS manual, is toegepast om het instabiliteitsgedrag te beschouwen. Een *static Riks analyse* maakt gebruik van een wat afwijkend oplosmethoden. Zowel de kracht als de verplaatsing worden tegelijkertijd opgelost, met behulp van *arc length control*.

7.3 Methodologie

Het gedrag van de proefstukken is gemodelleerd aan de hand van twee soorten modellen. Het eerste model is gericht op plastisch bezwijken, en is toegepast op de proefseries *1A* en *1B*, zie 7.4.4. Het tweede model is gericht op instabiliteit, en is toegepast op proefseries *2A* en *2B*, zie 7.4.5.

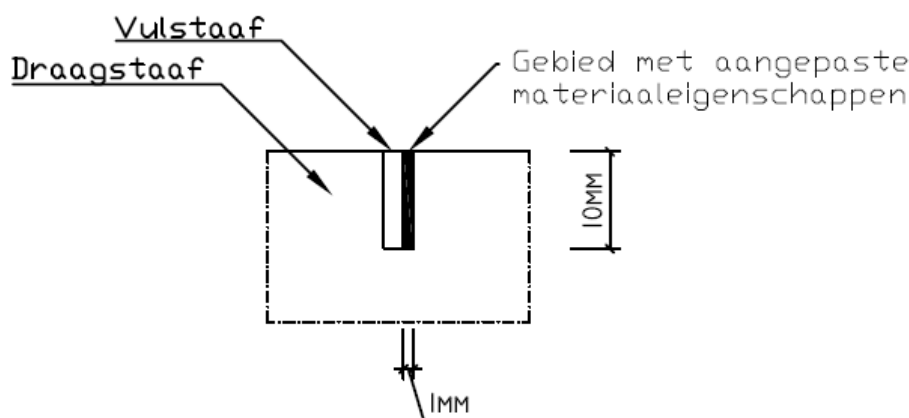
Bij proefseries *1A* en *1B* heeft de persverbinding veel invloed op de initiële stijfheid en sterkte, zie paragraaf 6.7.3. Deze twee proefseries zijn daarom aan de hand van twee soorten FEM benaderingen gemodelleerd. In de *eerste FEM benadering* is de invloed van de persverbinding op de stijfheid en sterkte buiten beschouwing gelaten. In de *tweede FEM benadering* is deze invloed wel beschouwd. Voor proefseries *2A* en *2B* is de invloed van de persverbinding op de initiële stijfheid en sterkte in het geval van verzinken beperkt, zie paragraaf 6.7.3. Om deze reden is de invloed van de persverbinding in deze analyse buiten beschouwing gelaten. De twee net genoemde FEM benaderingen staan hier onder nader toelicht.

FEM benadering 1: Invloed persverbinding niet beschouwd

De invloed van de persverbinding op initiële stijfheid en sterkte is buiten beschouwing gelaten. De draagstaven zijn gemodelleerd op basis van de bruto doorsnede, zie paragraaf 6.7.3.

FEM benadering 2: Invloed persverbinding beschouwd.

De invloed van de persverbinding op initiële stijfheid en sterkte is meegenomen aan de hand van een analogie. In de FEM modellen zijn de gebieden gedefinieerd in de draagstaven, zie Figuur 73. Per persverbinding is zo'n gebied gedefinieerd. Deze gebieden hebben een hoogte die gelijk is aan de vulstaafhoogte en een breedte van 1 mm. De breedte van 1 mm is gekozen t.b.v. het verkrijgen van een goede mesh.



Figuur 73: In zwart het gebied met aangepaste eigenschappen

De correlatie tussen de proefresultaten en de FEM analyses is tot stand gebracht met behulp van curve fitting, middels het spelen met verbindingseigenschappen, als de vloeigrens en E-modulus van het zwart gearceerde gebied in Figuur 73. De E-modulus beïnvloedt de stijfheid en de vloeigrens de sterkte. Doordat er sprake is van een schematisering van de persverbinding, hebben de verkregen eigenschappen van deze gebieden geen fysische betekenis meer.

7.4 Model beschrijving

7.4.1 Elementen type en mesh grootte

De persroosters zijn gemodelleerd op basis van kwadratische schaal elementen. In ABAQUS is het element type S8R, een 8-knoops schaallement met 6 vrijheidsgraden in elke knoop, toegepast. De mesh van de modellen is te vinden in bijlagen C.

7.4.2 Randvoorwaarde

Voor het verkrijgen van een goede correlatie, dienen de randvoorwaarden in de FEM modellen, zo veel mogelijk identiek te zijn aan de randvoorwaarden in de proefsopstelling. Om deze reden zijn ook de opleggingen in FEM modellen gemoduleerd, hierbij zijn de scharnieren op de zelfde afstanden geplaatst zoals in de proeven, zie ook Figuur 42 en Figuur 43.

Uit de proefresultaten blijkt, dat er bij proefseries 2A en 2B duidelijk sprake is van een kromming in de richting haaks op de draagstaafrichting. Deze kromming verstoort het contact tussen proefstuk en randvoorwaarde. Dit maakt een contactsimulatie onontbeerlijk voor het bepalen van realistische randvoorwaarde. Deze contactsimulatie is uitgevoerd in paragraaf 7.6.1. Vervolgens zijn de gebieden waar er sprake is van contact met behulp van een Tie Constraint aan elkaar vast gelegd. Een *Tie Constraint* kan gezien worden als soort lijmverbinding, wat er voor zorgt dat de verplaatsingen van de twee aan elkaar gekoppelde oppervlakte gelijk aan elkaar zijn.

Bij proefseries 1A en 1B was er geen sprake van een duidelijke kromming in de richting haaks op de draagstaafrichting. Er kan dus van uitgegaan worden dat over de gehele breedte van de

opleggingen sprake is van contact. Dit contact is geschematiseerd, door over de gehele breedte van het model t.p.v. de opleggingen een *Tie constraint* aan te brengen.

In alle modellen is de belasting aangebracht op de vierhoekpunten waar het blok en proefstuk contact maakt. Deze aanpak is gekozen aan de hand van uitgevoerde contactsimulaties, zie paragraaf 7.6.1.

7.4.3 Schematisering van het materiaalgedrag

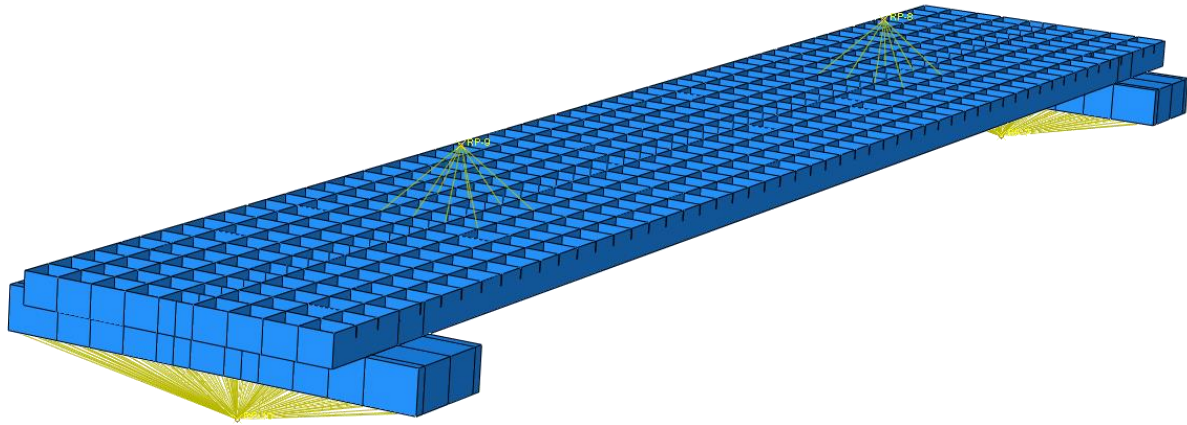
De toegepaste de materiaaleigenschappen van de draag- en vulstaven zijn analoog aan de waarde uit de materiaalproeven, zie paragraaf 6.3. Het spanningsrekdiagram is geschematiseerd met behulp van de [DNV-RP-C208]. Deze Noorse offshore code is toegepast omdat het een waarheidsgetrouwe representatie geeft van het werkelijke spanningsrekdiagram aan de hand van enkele gemeten waarde. Het spanningsrekdiagram van de geschematiseerde persverbinding is bi-lineair. In bijlage C staan de toegepaste spanningsrekdiagrammen weergegeven.

7.4.4 Model 1: Plasticiteit Proefseries 1A en 1B

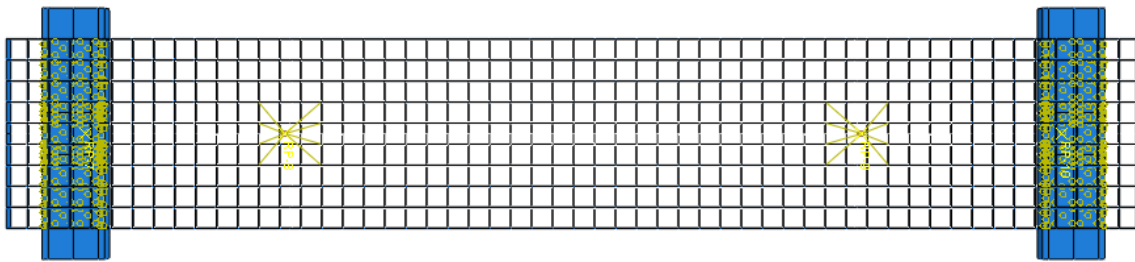
Dit model is gericht op bezwijken t.g.v. mechanisme door het ontstaan van plastisch scharnieren in de draagstaven. De analyse is uitgevoerd op basis van geometrisch en fysisch niet-lineair rekenmodel, aan de hand van een *static general analyse*. De draag- en vulstaven zijn monolithisch verbonden.

7.4.4.1 Modelschematisering

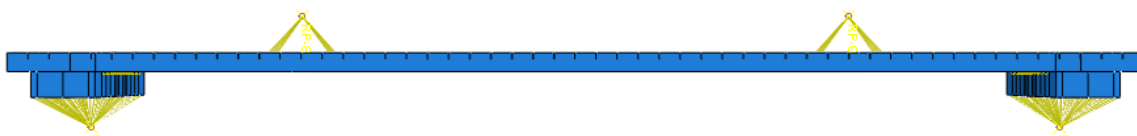
In Figuur 74 staat een globale weergave van gebruikte model. En in figuren 75 en 76 staat respectievelijk het boven-en zijaanzicht van het model. Voor de modelgeometrie, zie paragraaf 6.3 proefseries 1A en 1B. Model 1A en 1B zijn analoog, op de dikte van de draagen vulstaven na.



Figuur 74: Model 1: Serie 1A en 1B-Model overzicht



Figuur 75: Model 1: Serie 1A en 1B-Bovenaanzicht



Figuur 76: Model 1: Serie 1A en 1B -Zijaanzicht Model

7.4.5 Model 2: Instabiliteit Proefseries 2A en 2B

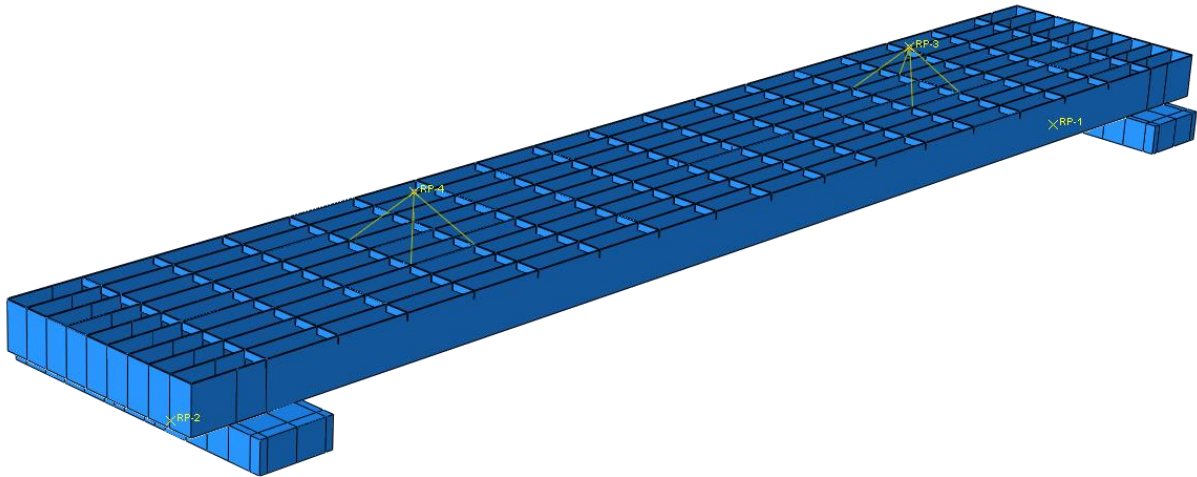
Dit model is gericht op bezwijken t.g.v. instabiliteit. De analyse is uitgevoerd aan de hand van geometrisch en fysisch niet lineaire rekenmodel, aan de hand van een *Riks analyse*. De draagen vulstaven zijn monolithisch verbonden.

7.4.5.1 Model schematisering

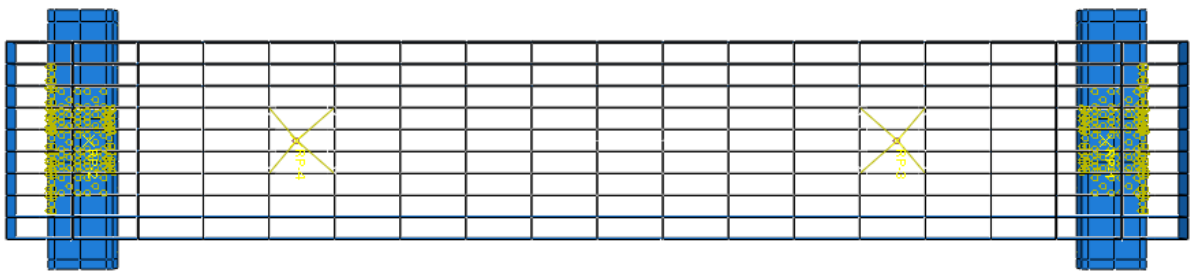
In Figuur 77 staat een globale weergave van het gebruikte model voor *FEM beschouwing proefserie 2A*. In figuren 78 en 79 staan respectievelijk het boven-en zijaanzicht van het model. Voor de modelgeometrie, zie 6.3 *proefserie 2A*.

In Figuur 80 staat een globale weergave van gebruikte model voor *FEM* beschouwing proefserie 2B. In figuren 81 en 82 staan respectievelijk het boven en-zijaanzicht van het model. Voor de modelgeometrie, zie 6.3 proefserie 2B.

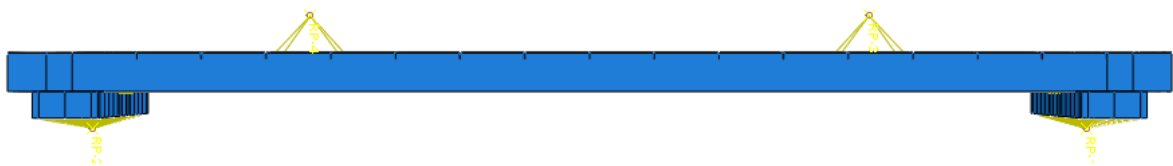
Model schematisering proefserie 2A



Figuur 77: Model 2: Serie 2A-Model overzicht



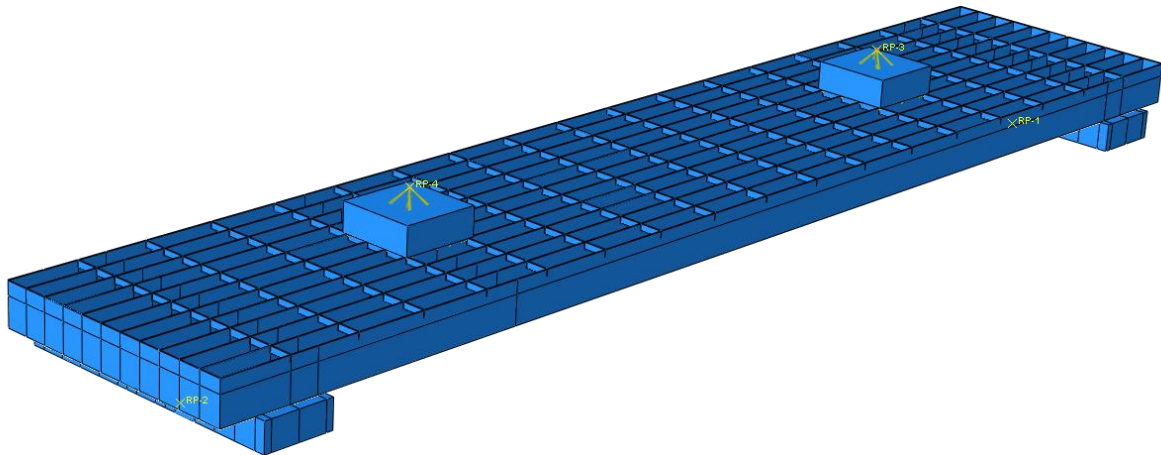
Figuur 78: Model 2: Serie 2A-Bovenaanzicht



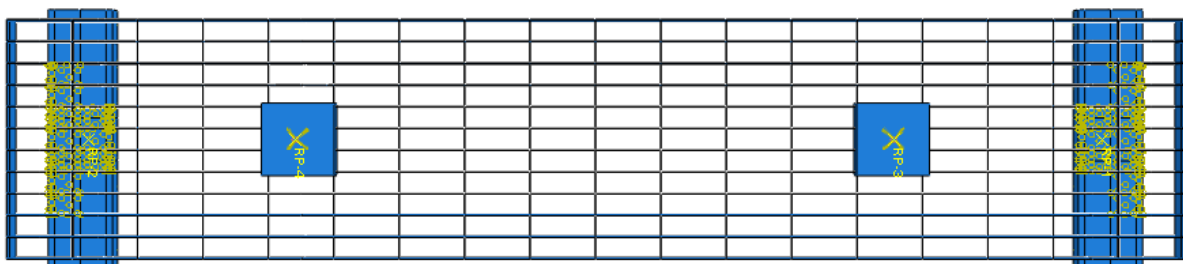
Figuur 79: Model2: Serie 2A -Zijaanzicht

Model schematisering proefserie 2B

Zoals blijkt uit Figuur 80 zijn in tegenstelling tot *model 2A* de last-inleidingblokken toegevoegd. Deze blokken zijn toegevoegd om er voor te zorgen dat *lokale kipinstabiliteit* niet kan optreden t.p.v. de last-inleidingspunten. De blokken zijn met behulp van een *Tie constraint* bevestigd op het model. Deze blokken hebben een zodanig lage E-modulus dat er geen noemenswaardige stijfheid aan het model toevoegt wordt.



Figuur 80: Model 2: Serie 2B-Model overzicht



Figuur 81: Model 2: Serie 2B-Bovenaanzicht



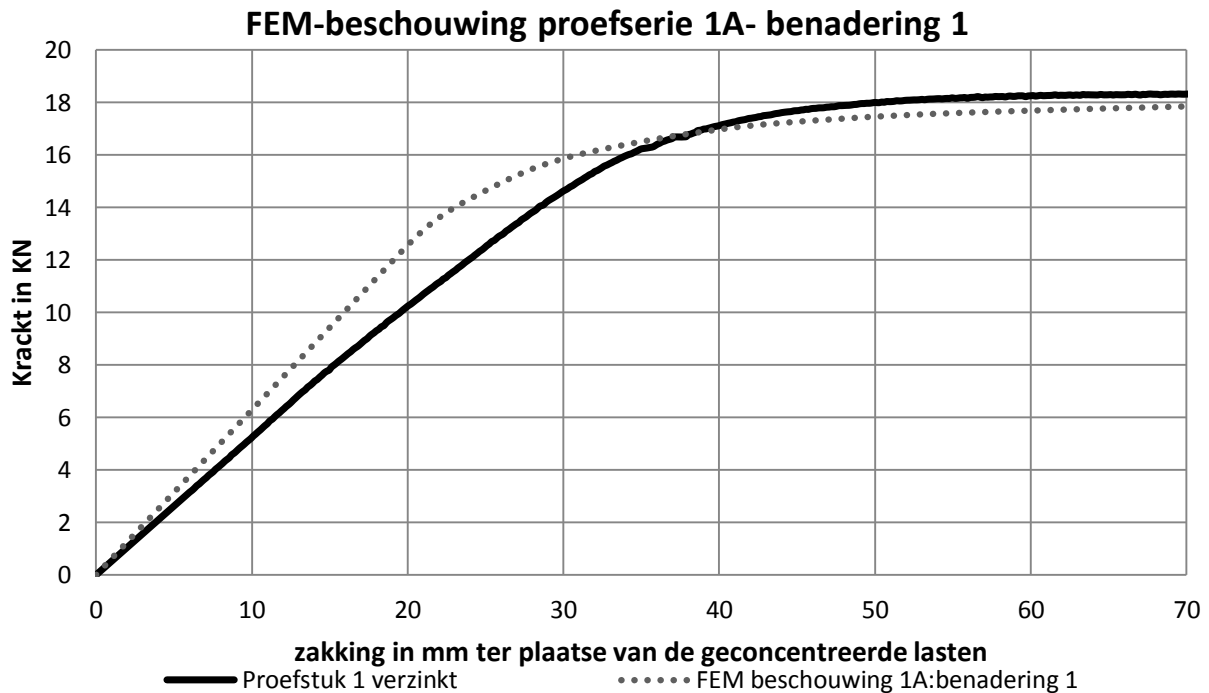
Figuur 82: Model 2: Serie 2B-Zijaanzicht

7.5 Vierpuntsbuigproeven- Plastische bezwijken

7.5.1 FEM-beschouwing proefserie 1A

Benadering 1: Invloed persverbinding op stijfheid en sterkte niet beschouwd

In Figuur 83 staat het lastzakkingsdiagram dat verkregen is aan de hand van *FEM-benadering 1*, in relatie tot de proefresultaten van *proefserie 1A* weergegeven. Omwille van de leesbaarheid is er enkel één lastzakkingsdiagram van *proefserie 1A* geplot.



Figuur 83: FEM- beschouwing 1A- benadering 1: Model met massieve vul- en draagstaven in relatie tot de proefresultaten van proefserie 1A

Uit Figuur 83 blijkt dat deze benadering zoals verwacht in een te hoge initiële stijfheid resulteert, zie ook paragraaf 6.7.3. Zo komt de initiële stijfheid t.p.v. de geconcentreerde lasten uit op 0.63 kN/mm in plaats van 0.52 kN/mm. De draagkracht komt aan de hand van deze benadering lager uit dan bij de proevenstukken, zie ook paragraaf 6.5.1. Dit is opvallend omdat de invloed van de persverbinding op de sterkte niet beschouwd is. Zo is de draagkracht bij een verplaatsing van 70 mm t.p.v. de geconcentreerde lasten 18 kN in plaats van 18.4 kN.

Ook blijkt uit Figuur 83 dat de vorm van het lastzakkingsdiagram uit deze benadering afwijkt van het lastzakkingsdiagram dat verkregen is uit de beproeving. Hierbij valt op dat de overgang van elastisch naar elasto-plastisch gedrag in deze FEM benadering veel duidelijker zichtbaar is.

In Tabel 15 staan de gemeten initiële stijfheden in de twee meetlocaties, zie paragraaf 6.1.1, afgezet tegen de initiële stijfheden die verkregen zijn uit deze FEM benadering. Tabel 15 laat zien dat deze benadering voor de tweede meetlocaties in een afwijking van minder dan 20% resulteert.

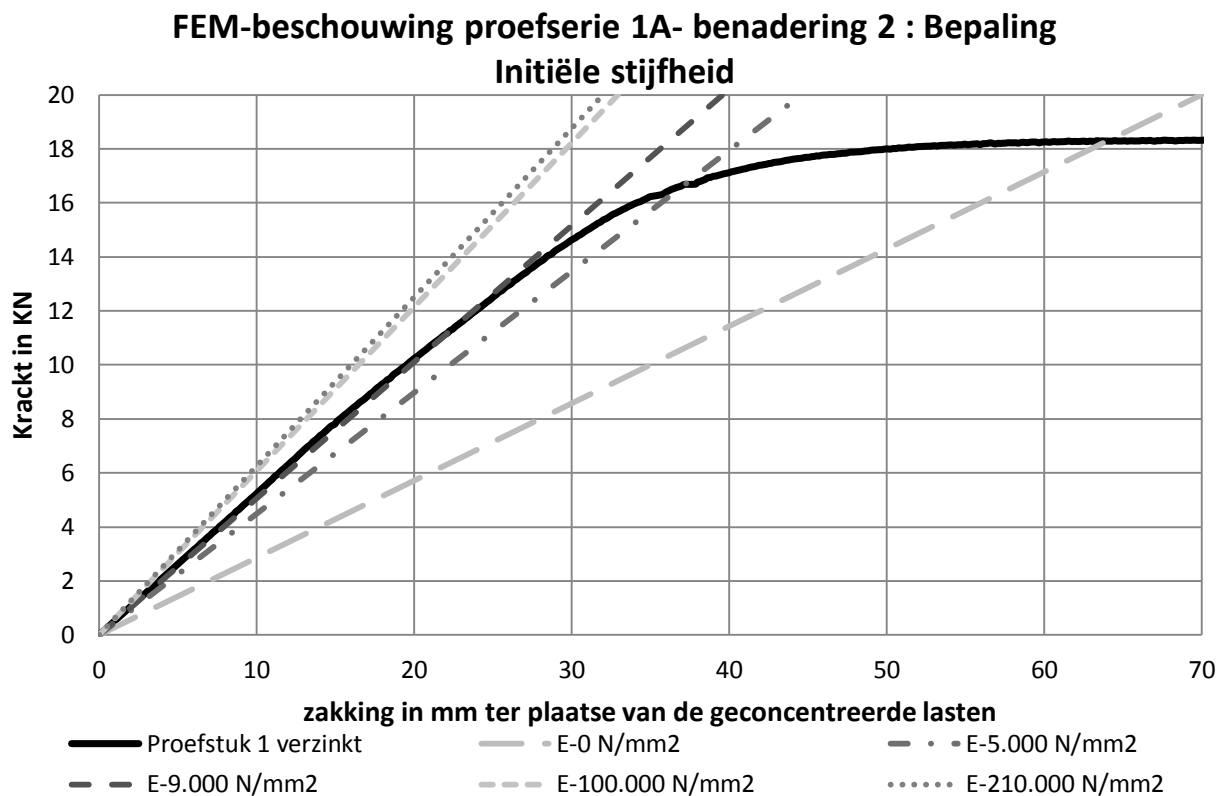
Tabel 15 Initiële-stijfheid in kN/mm van de proefstukken van proefserie 1A, in relatie tot de initiële stijfheid uit FEM-benadering 1

	<i>Meetlocatie last</i>	<i>Meetlocatie rand</i>
Initiële stijfheid(kN/mm) Proefresultaten verzinkte proefstukken	0.52	0.35
Initiële stijfheid(kN/mm) FEM benadering 1	0.63	0.43
Afwijking FEM benadering 1 in % t.o.v. proefresultaten	17	19

Benadering 2: Invloed persverbinding op stijfheid en sterkte beschouwd

Bepaling initiële-stijfheid: E-modulus geschematiseerde persverbinding

In Figuur 84 is één lastzakkingsdiagram van *proefserie 1A* weergegeven in relatie tot initiële stijfheid van zes benaderingen, op basis van verschillende E-moduli, namelijk 0, 5.000, 9.000, 100.000 en 210.000 N/mm² voor de geschematiseerde persverbinding.

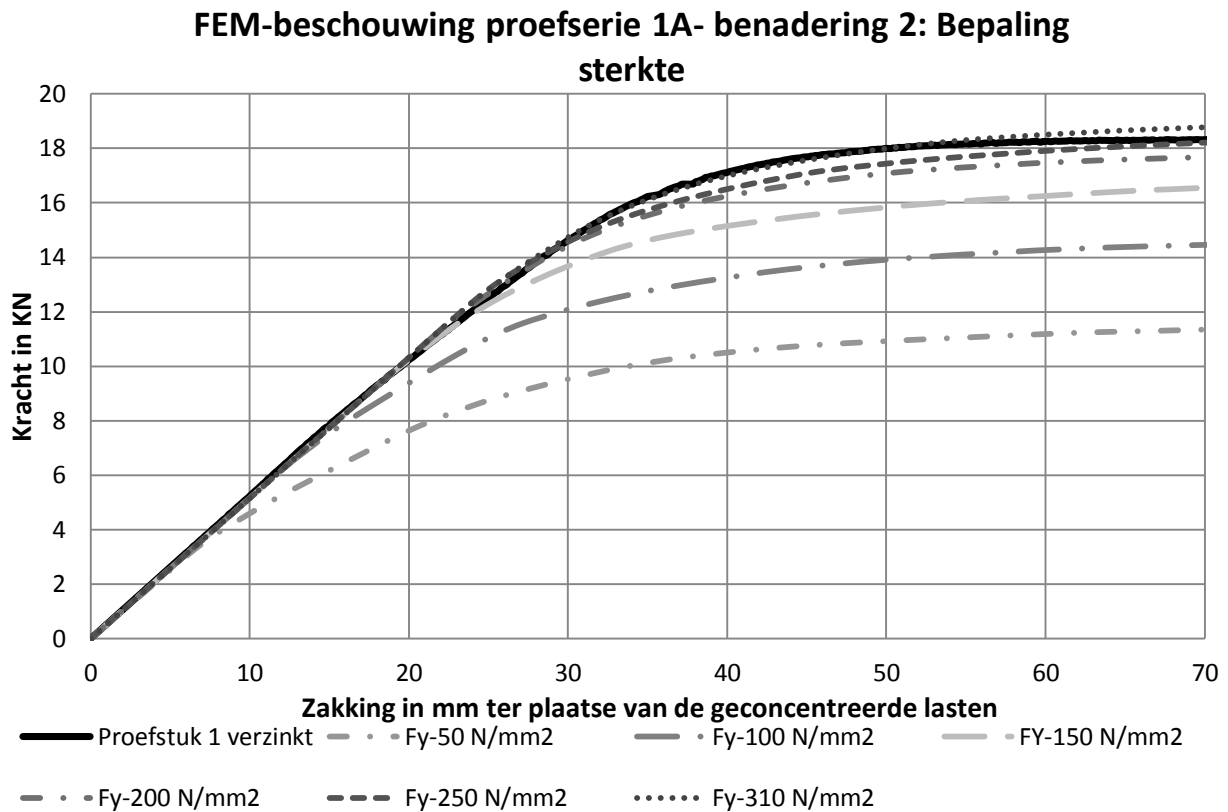


Figuur 84: FEM-beschouwing 1A- benadering 2: Initiële stijfheid t.p.v. de geconcentreerde lasten voor verschillende stijfheden van de geschematiseerde persverbinding in relatie tot de proefresultaten

Uit Figuur 84 blijkt de grote invloed van de E-modulus van de geschematiseerde persverbinding op de initiële stijfheid van het model als geheel. Uit dit figuur blijkt dat de gevonden E-modulus van 9000 N/mm² van de geschematiseerde persverbinding een initiële stijfheid genereert die overeenkomstig is met de proefresultaten.

Bepaling sterkte: Vloegrens van de geschematiseerde persverbinding

In Figuur 85 is zijn de proefresultaten van *proefserie 1A* weergegeven in relatie tot zes benaderingen op basis van een E-modulus van 9000 N/mm^2 en met de volgende vloegrenzen namelijk: 50, 100, 150, 200, 250, 300 en 310 N/mm^2 van de geschematiseerde persverbinding. Omwille van de leesbaarheid is er enkel één lastzakkingsdiagram van *proefserie 1A* geplot.



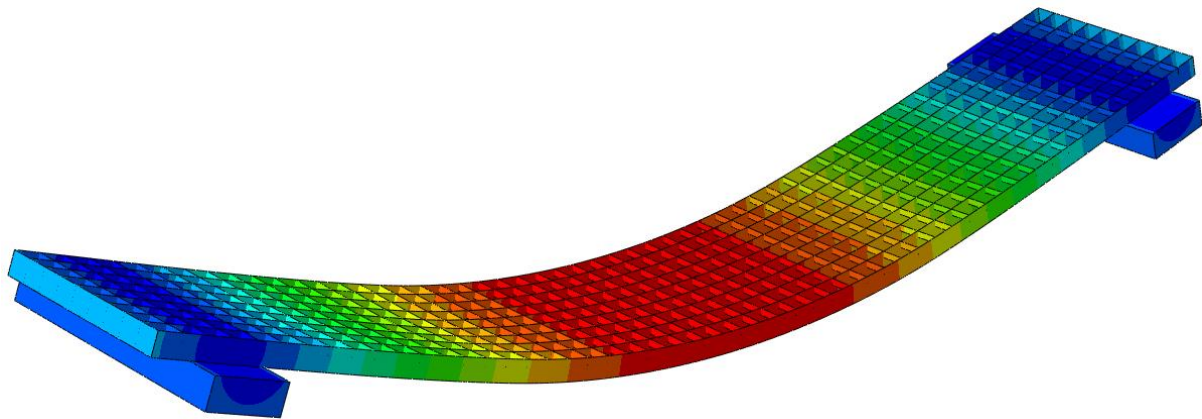
Figuur 85: FEM- beschouwing 1A- benadering 2:bepaling sterkte- lastzakkingsdiagrammen t.p.v. de geconcentreerde lasten op basis van verschillende vloegrenzen, namelijk 50,100,150,200, 250,300 en 310 N/mm^2 , van de geschematiseerde persverbinding, in relatie tot de proefresultaten van proefserie 1A

Uit Figuur 85 blijkt dat de beste correlatie tussen de proefresultaten en deze FEM benadering bereikt wordt op basis van een vloegrens van 310 N/mm^2 en een E-modulus 9000 N/mm^2 van de geschematiseerde persverbinding. Zowel de initiële stijfheid als de sterkte worden goed benaderd. Ook de overgang van elastisch naar elasto-plastisch gedrag wordt duidelijk beter benaderd dan op basis *FEM benadering 1*.

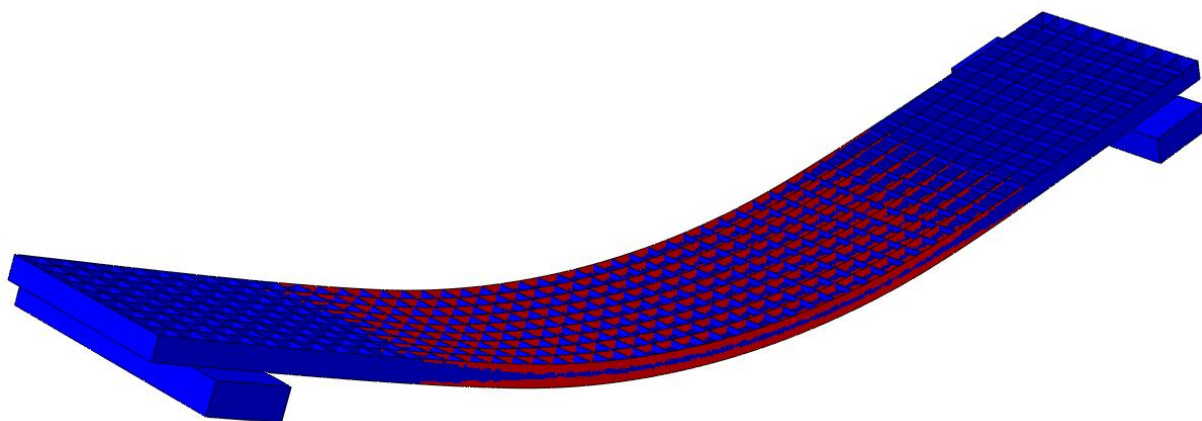
Opmerkelijk is dat de benodigde vloegrens van de geschematiseerde persverbinding hoger is dan de vloegrens van het staal van de draagstaven. Dit ligt in de lijn der verwachtingen aangezien dat, op basis van *FEM benadering 1* de draagkracht van de proefstukken niet bereikt kon worden.

Bezwijkvorm

In Figuur 86 staat de weergave van de vervorming die optreedt bij een zakkings van 70 mm t.p.v. van de geconcentreerde lasten. In dit figuur zijn geen plastische scharnieren zichtbaar in de draagstaven; wel kan gesteld worden dat er geen sprake is van instabiliteit. Uit Figuur 87 blijkt dat de draagstaven vloeien. Het verlies van stijfheid zoals zichtbaar is in het lastzakkingsdiagram, komt dus voort uit het plastisch gedrag van de draagstaven. Er is dus sprake van plastisch bezwijken zonder dat er duidelijk een plastisch scharnier ontstaat.



Figuur 86: Verplaatsing bij 70 mm t.p.v. de geconcentreerde lasten bij FEM beschouwing 1A, schaalfactor 1.4

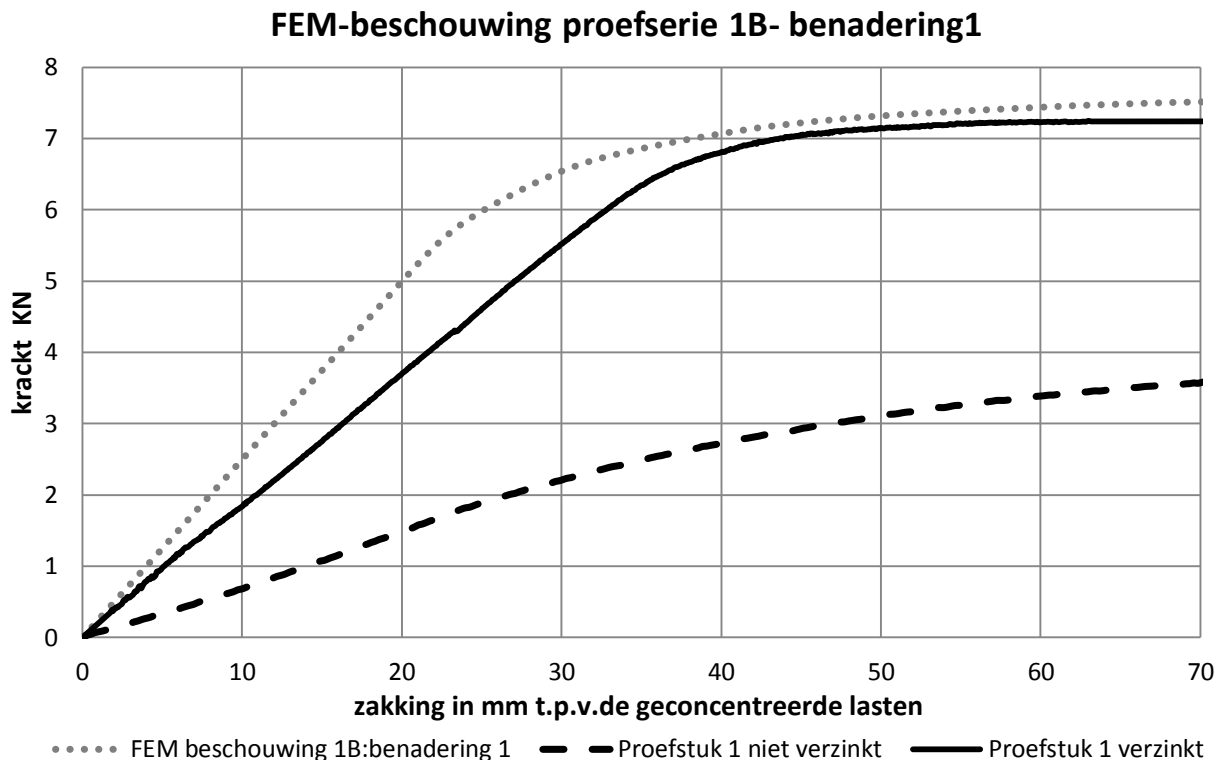


Figuur 87: Weergaven AC-Yield. In rood gebieden waar er sprake is van vloeien

7.5.2 FEM-beschouwing proefserie 1B

Benadering 1: Invloed persverbinding op stijfheid en sterkte niet beschouwd

In Figuur 88 staat het lastzakkingsdiagram dat verkregen is aan de hand van *FEM-benadering 1* in relatie tot de proefresultaten van *proefserie 1B* weergegeven. Omwille van de leesbaarheid is er enkel één lastzakkingsdiagram van *proefserie 1B* geplot.



Figuur 88: FEM- beschouwing 1B- benadering 1: Model met massieve vul- en draagstaven in relatie tot de proefresultaten van proefserie 1B

Uit Figuur 88 blijkt dat *FEM benadering 1*, een vrij nauwkeurige benadering van de draagkracht, en een redelijke benadering van de initiële stijfheid voor verzinkte proefstukken geeft. Zo komt de initiële stijfheid t.p.v. de geconcentreerde lasten uit op 0.25 kN/mm in plaats van 0.21 kN/mm. De draagkracht bij zakking van 70 mm t.p.v. de geconcentreerde lasten komt uit op 7.5 kN in plaats van 7.1 kN. In tegenstelling tot *FEM-beschouwing 1A: benadering 1* wordt de draagkracht overschat. Het lastzakkingsdiagram laat analoog aan *FEM-beschouwing 1A: benadering 1* een ander overgang tussen elastisch en elasto-plastisch gedrag zien.

Uit Figuur 88 blijkt dat aan de hand van deze benadering het niet mogelijk is om de initiële stijfheid en draagkracht van de niet-verzinkte proefstukken met enige redelijke nauwkeurigheid te bepalen. Zowel de initiële stijfheid als sterkte worden ruwweg twee keer te hoog in geschat.

In Tabel 16 staan de initiële stijfheden uit de beproeving, in de drie meetlocaties, zie 6.1.3, afgezet tegen de initiële stijfheden aan de hand van deze FEM benadering. Tabel 16 laat zien dat deze FEM benadering voor alle drie de meetlocaties een vergelijkbaar afwijking geeft. Voor respectievelijk de verzinkte en niet proefstukken ligt deze afwijking tussen de 14 en 19 procent en tussen de 52 en 54 procent.

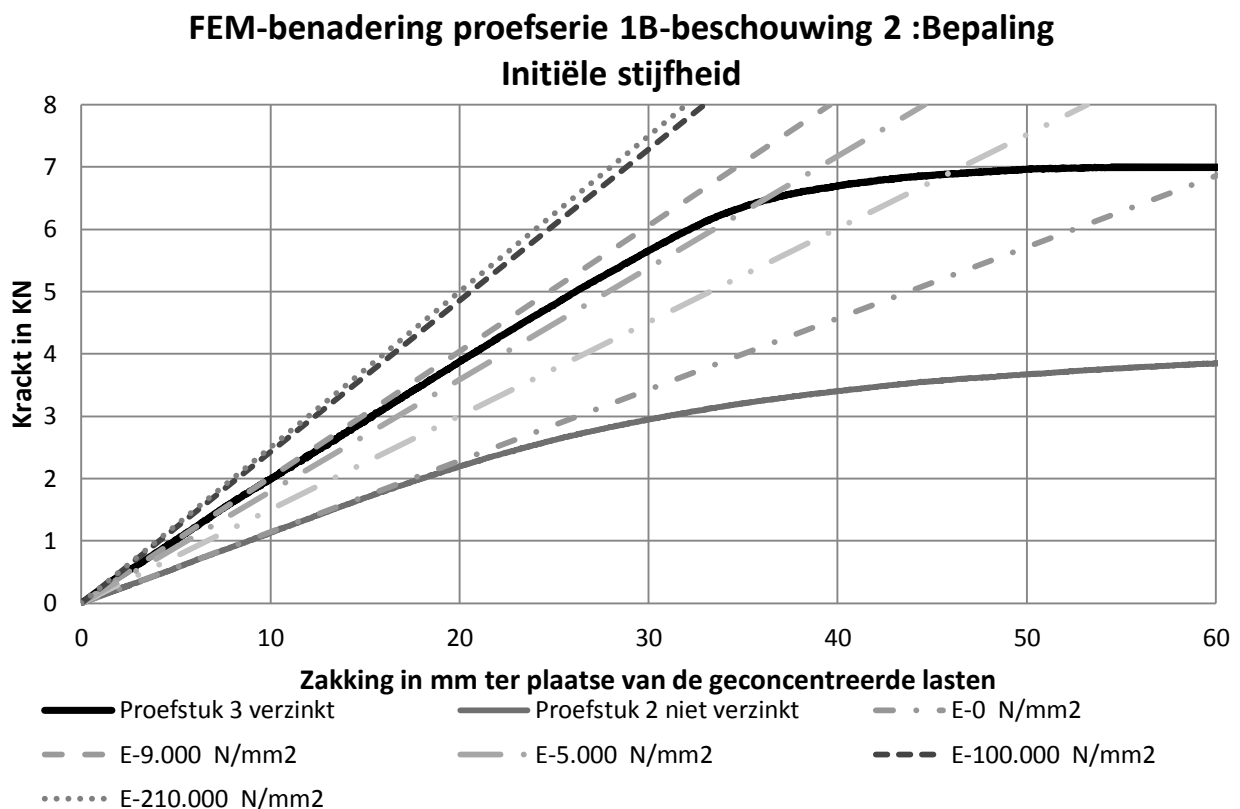
Tabel 16: Initiële stijfheid in kN/mm van de proefstukken van proefserie 1B, in relatie tot de initiële stijfheid uit FEM-benadering 1

	<i>Meetlocatie last</i>	<i>Meetlocatie midden</i>	<i>Meetlocatie rand</i>
Initiële stijfheid(kN/mm) Proefresultaten verzinkte proefstukken	0.21	0.14	0.14
Initiële stijfheid(kN/mm) Proefresultaten niet verzinkt proefstukken	0.12	0.08	0.08
Initiële stijfheid(kN/mm) FEM-benadering 1	0.25	0.17	0.17
Afwijking FEM-benadering 1 in % t.o.v. proefresultaten van de verzinkte proefstukken	18	19	14
Afwijking FEM-benadering 1 in % t.o.v. proefresultaten van de niet-verzinkte proefstukken	54	53	52

Benadering 2: Invloed persverbinding op stijfheid en sterkte beschouwd

Bepaling initiële stijfheid: E-modulus geschematiseerde persverbinding

In Figuur 89 zijn zowel de verzinkte als niet-verzinkte lastzakkingsdiagrammen van *proefserie 1B* weergegeven in relatie tot de initiële stijfheid van zes benaderingen, op basis van verschillende E-moduli, namelijk: 0, 2,000, 5,000, 9,000, 50,000 en 210,000 N/mm² voor de geschematiseerde persverbinding.

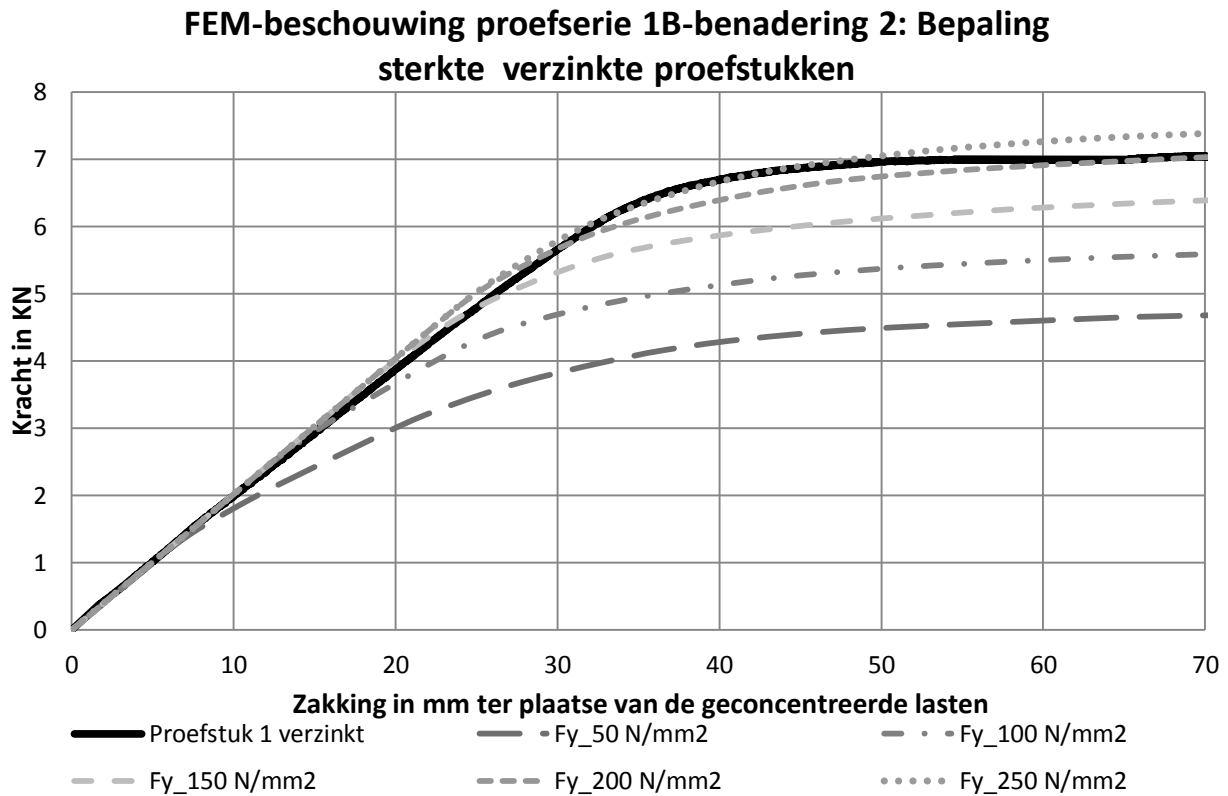


Figuur 89: Initiële stijfheid t.p.v. de geconcentreerde last en voor verschillende stijfheden van de geschematiseerde persverbinding voor de verzinkte proefstukken van serie 1B

Uit Figuur 89 blijkt dat een E-modulus van 9000 N/mm² van de geschematiseerde persverbinding resulteert in de beste benadering van de initiële stijfheid van de verzinkte proefstukken. Voor de niet-verzinkte proefstukken resulteert een E-modulus van 0 N/mm² van de geschematiseerde persverbinding in de beste benadering van de initiële-stijfheid. Deze waarde van 0 N/mm² is veel zeggend omdat deze waarde de grote invloed van persverbinding op de stijfheid illustreert. Deze constatering is in lijn met wat geconstateerd is in paragraaf 6.7.3.

Bepaling sterkte: Vloiegrens van de geschematiseerde persverbinding

In Figuur 90 zijn de proefresultaten van de verzinkte proefstukken van *proefserie 1B* weergegeven in relatie tot zes benaderingen op basis van een E-modulus van $9,000 \text{ N/mm}^2$, en de volgende vloiegrenzen, namelijk: 50, 100, 150, 200, 250 N/mm^2 van de geschematiseerde persverbinding. Omwille van de leesbaarheid is er enkel één lastzakkingsdiagram van een verzinkt proefstuk van *proefserie 1B* geplot.

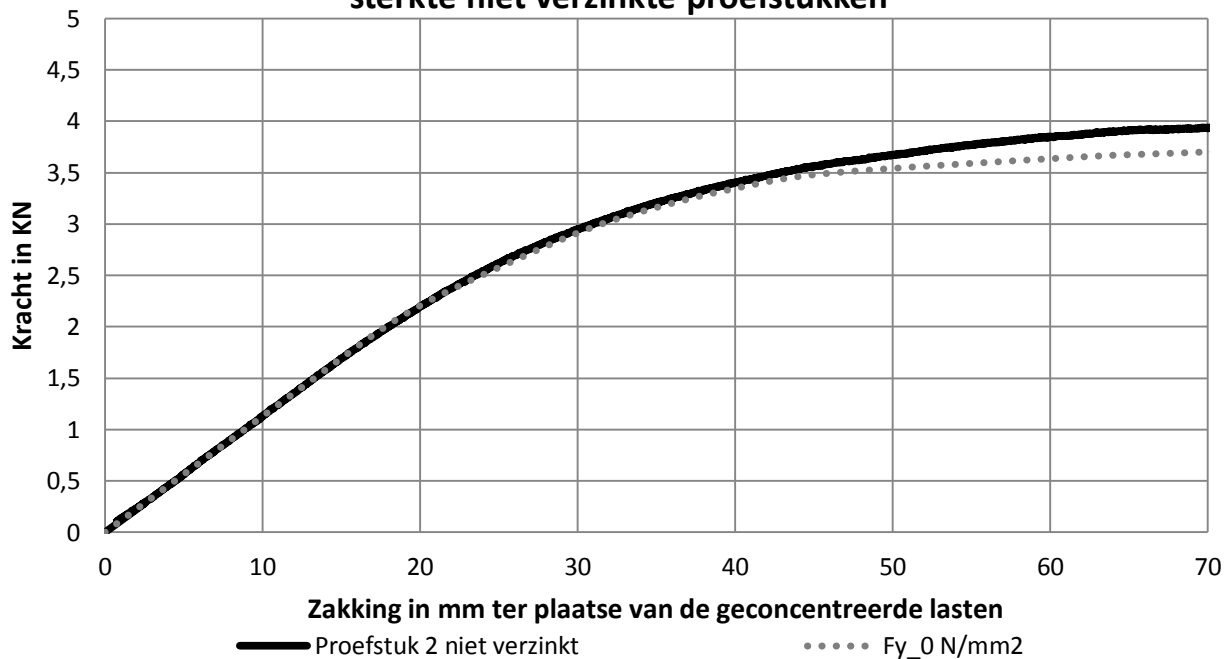


Figuur 90: FEM- beschouwing 1B- benadering2:Bepaling sterkte- lastzakkingsdiagrammen t.p.v. de geconcentreerde lasten op basis van verschillende vloiegrenzen, namelijk 50,100,150,200, 250 N/mm^2 , van de geschematiseerde persverbinding, in relatie tot de proefresultaten

Uit Figuur 90 blijkt dat de beste correlatie tussen *FEM benadering 2* en de proefresultaten van de verzinkte proefstukken van *proefserie 1B* bereikt wordt op basis van een vloiegrens van 250 N/mm^2 en E-modulus van 9000 N/mm^2 van de geschematiseerde persverbinding. De overgang van elastisch naar elasto-plastisch gedrag wordt duidelijk beter benaderd dan in *FEM-beschouwing 1B:benadering 1*.

In Figuur 91 zijn de proefresultaten van de niet-verzinkte proefstukken van *proefserie 1B* weergegeven in relatie tot een benadering op basis van een E-modulus van 0 N/mm^2 en de vloiegrens van 0 N/mm^2 van de geschematiseerde persverbinding. Omwille van de leesbaarheid is er enkel één lastzakkingsdiagram van een niet-verzinkt proefstuk van *proefserie 1B* geplot.

FEM-beschouwing proefserie 1B-benadering 2: Bepaling sterkte niet verzinkte proefstukken

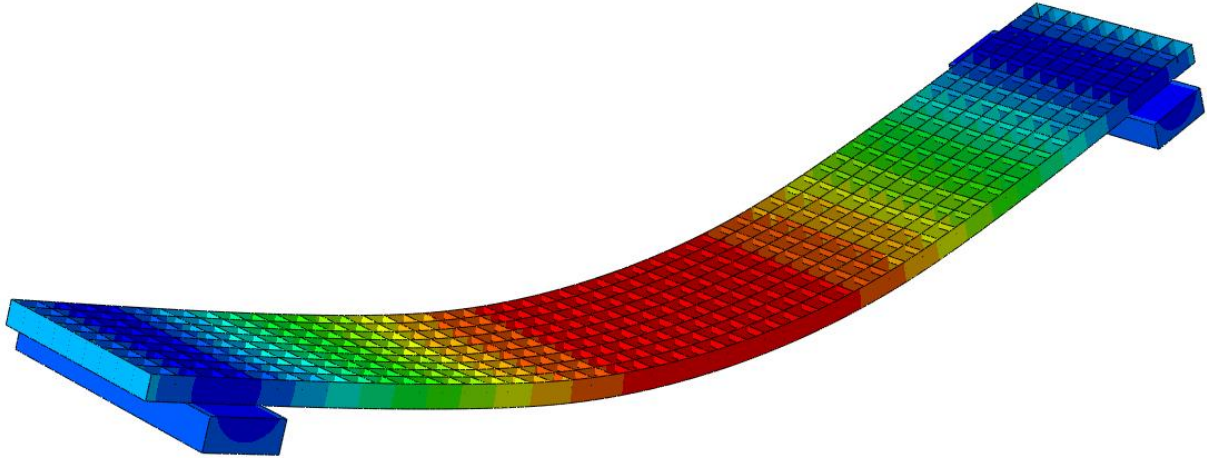


Figuur 91: Initiële stijfheid t.p.v. de geconcentreerde last en voor verschillende stijfheden van de geschematiseerde persverbinding voor de niet-verzinkte proefstukken van serie 1B

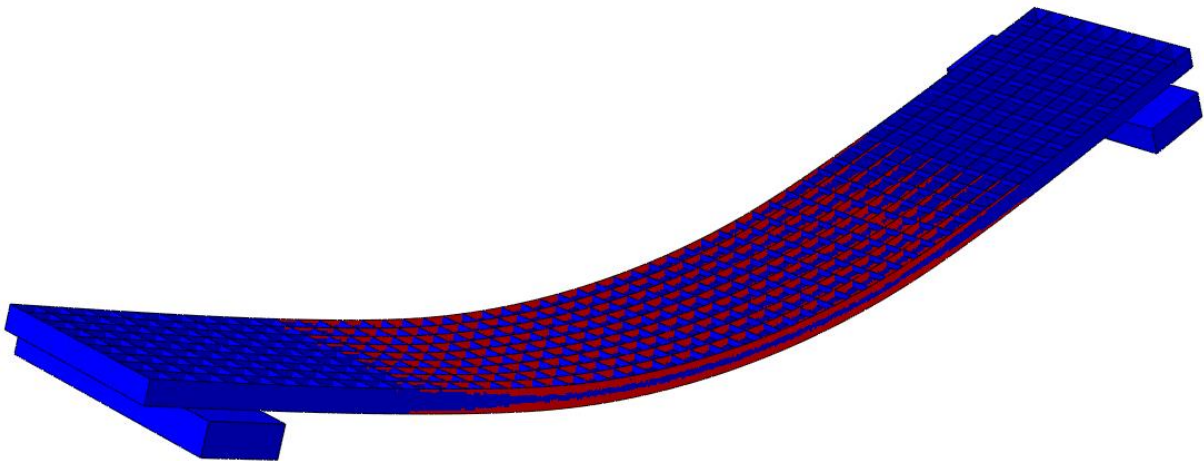
Uit Figuur 91 blijkt dat een benadering op basis van een vloeigrens 0 N/mm^2 van de geschematiseerde persverbinding een goede correlatie geeft met de proefresultaten van de niet-verzinkte proefstukken. Zo wordt de overgang van elastisch naar elasto-plastisch gedrag goed benaderd. Voor zakkingen groter dan van 40 mm t.p.v. de geconcentreerde lasten is er sprake van een toenemende afwijking. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat bij een toenemende kromming in de draagstaven de persverbinding deels dicht gedrukt wordt, zie ook paragraaf 1.1. Hierdoor neemt het contactoppervlak tussen vul- en draagstaven in de persverbinding toe, wat resulteert in groter worden stijfheid en sterkte. Dit gedrag kan niet worden nagebootst door middel van het aanpassen van de vloeigrens van de geschematiseerde persverbinding, omdat de E-modulus van deze verbinding 0 N/mm^2 is.

Bezwijkvorm

Uit Figuur 92 en Figuur 93 blijkt een beeld dat analoog is aan *FEM-beschouwing 1A*. Wederom is er sprake van een niet gelokaliseerde plastische scharnieren in de draagstaven, terwijl er wel sprake is van het vloeien van de draagstaven.



Figuur 92: Verplaatsing bij 70 mm t.p.v. de geconcentreerde lasten bij FEM model, schaalfactor 1.4



Figuur 93: Weergaven AC-Yield. In rood gebieden waar er sprake is van vloeien

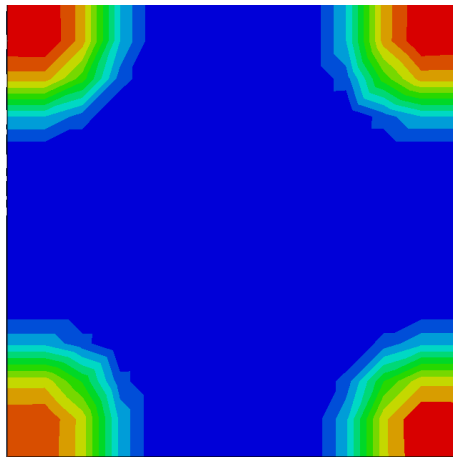
7.6 Vierpuntsbuigproeven- Instabiliteit

7.6.1 FEM-beschouwing proefseries 2A en 2B: Contactsimulatie

De contactgebieden tussen de proefstukken en zowel de last-inleidingsblokken als opleggingen zijn bepaald. In deze analyses is de invloed van de persverbinding buiten beschouwing gelaten. Belangrijk om op te merken is dat de exacte contacteigenschappen onbekend zijn. Deze contactsimulatie dient dus als een ruwe benadering beschouwd te worden.

7.6.1.1 Contact tussen proefstuk en last-inleidingsblokken

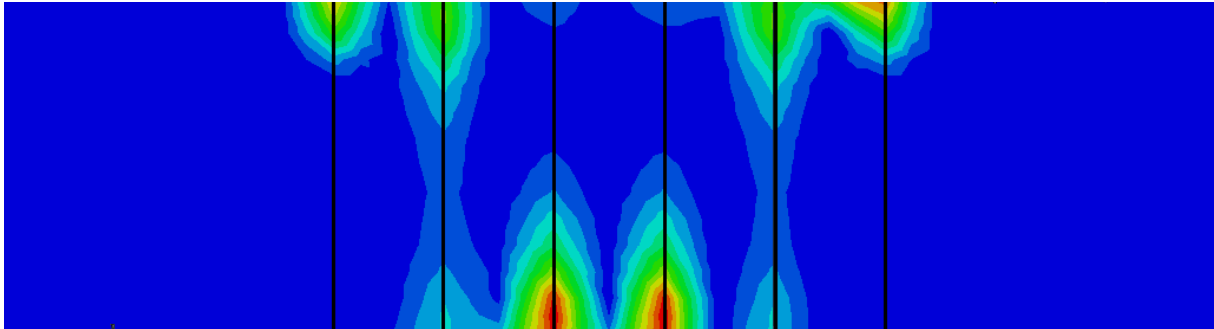
Figuur 94 geeft de contactstress weer in de last-inleidingsblokken. In de niet-donkerblauwe gebieden is er sprake van contact. Figuur 94 laat zien dat er contact gemaakt wordt op de vier hoekpunten van de last-inleidingsblokken. Voor zowel proefseries 2A als 2B zijn de gebieden waar contact gemaakt wordt het zelfde. Het is aannemelijk dat bij proefseries 1A en 1B op een vergelijkbare manier contact gemaakt wordt.



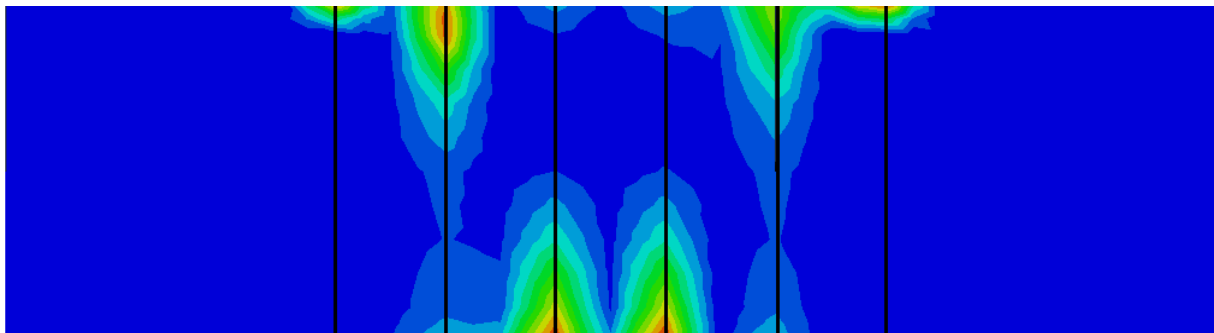
Figuur 94: Contactstress t.p.v. de last-inleidingsblokken voor proefseries 2A en 2B

7.6.1.2 Contact tussen de opleggingen en proefstukken

Figuur 95 en Figuur 96 geven de contactstress in de opleggingsblokken van respectievelijk proefseries 2A en 2B weer. In de niet-donkerblauwe gebieden is er sprake van contact. Deze figuren laat zien dat er primair contact gemaakt wordt op vier middelste draagstaven. De twee draagstaven aan weerskante van deze vier draagstaven maken alleen met een deel van de opleggingen contact.

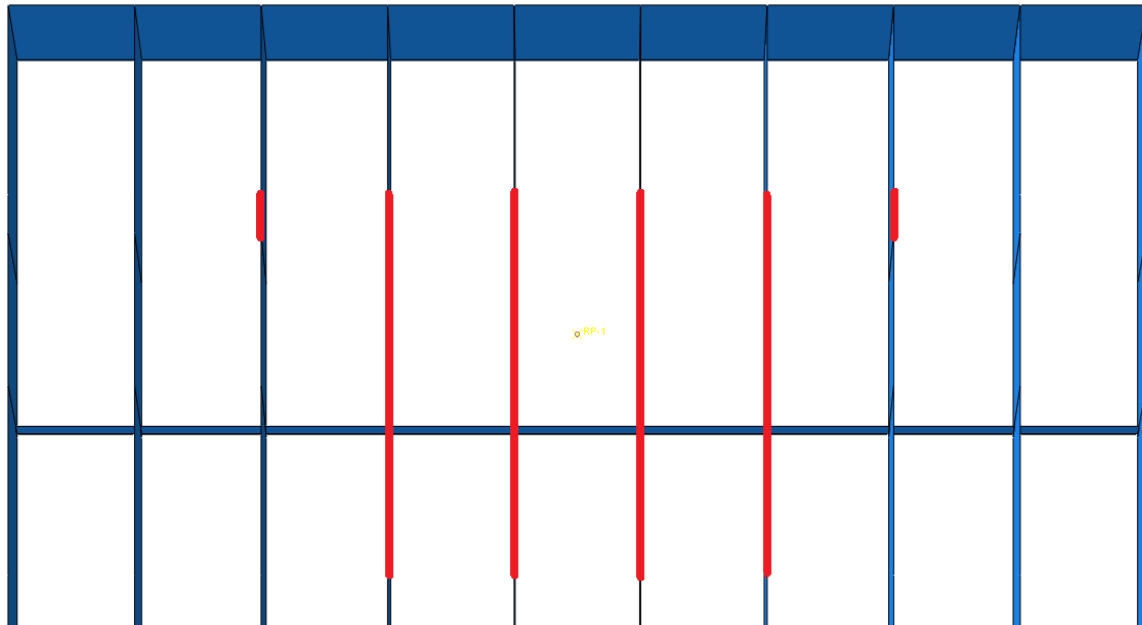


Figuur 95: Contactstress t.p.v. de oplegging voor FEM-benadering 2A. In zwart de positie van de draagstaven

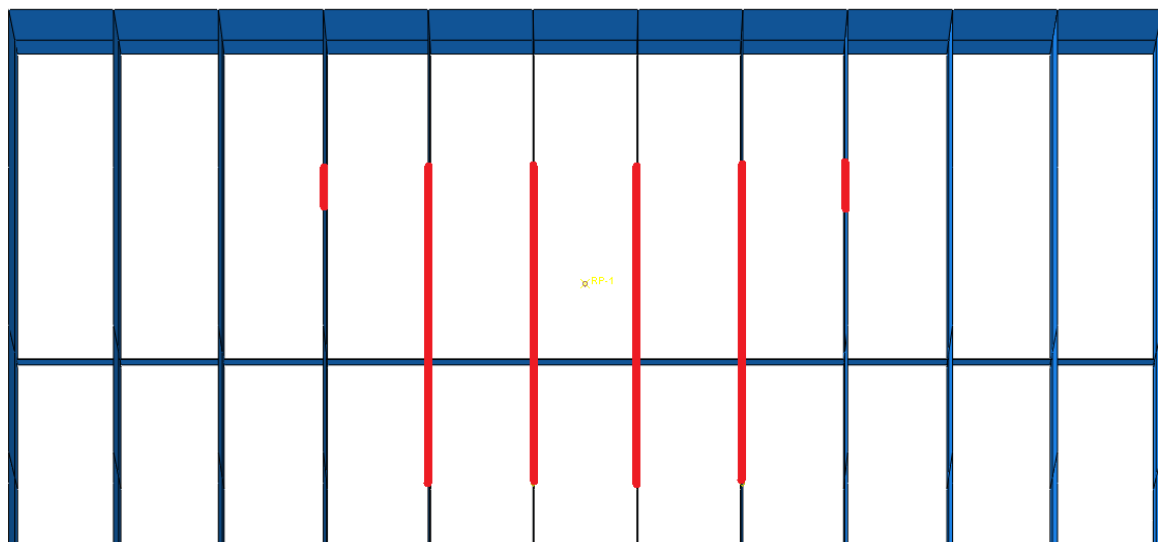


Figuur 96: Contactstress t.p.v. de oplegging voor FEM-benadering 2B. In zwart de positie van de draagstaven.

Het contact tussen de opleggingen de modellen is geschematiseerd door alleen gebieden waar er contact gemaakt wordt met behulp van een *Tie constraint* aan elkaar vast te leggen. In Figuur 97 en Figuur 98 staat respectievelijk een weergave van de vastgelegde delen van de draagstaven voor FEM-beschouwingen 2A en 2B.



Figuur 97: *Tie constraint t.p.v. de opleggingen in FEM-beschouwing 2A. In rood welke delen van de draagstaven aan de opleggingen gekoppeld zijn*

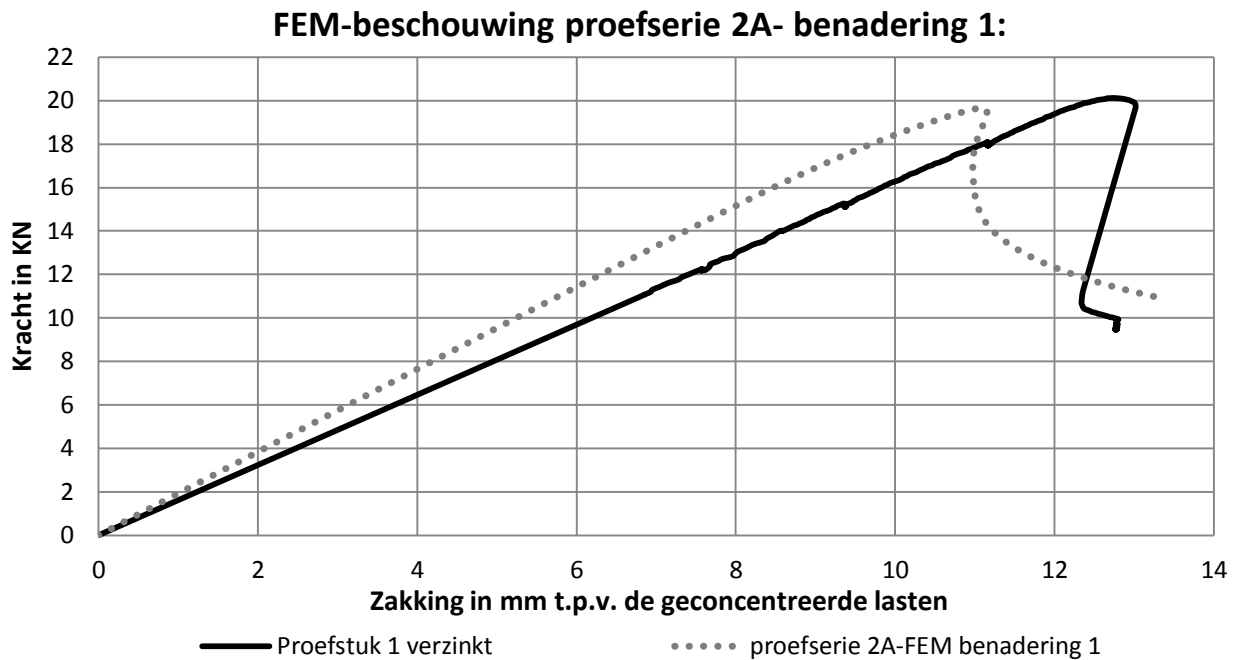


Figuur 98: *Tie constraint t.p.v. de opleggingen in FEM-beschouwing 2B. In rood welke delen van de draagstaven aan de opleggingen gekoppeld zijn*

7.6.2 FEM-beschouwing proefserie 2A

Benadering 1: Invloed persverbinding op stijfheid en sterkte niet beschouwd

In Figuur 99 staat het lastzakkingsdiagram op basis van *FEM benadering 1*, in relatie tot de proefresultaten van de verzinkte proefstukken van *proefserie 2A* weergegeven. Omwille van de leesbaarheid is er enkel één lastzakkingsdiagram van een verzinkte proefstuk van *proefserie 2A* geplott.



Figuur 99: FEM- beschouwing 2A- benadering 1: model met massieve vul- en draagstaven in relatie tot de proefresultaten van proefserie 2A

Figuur 99 laat zien dat deze benadering de draagkracht goed benaderend. Zo komt de maximale belasting uit op 19.6 kN in plaats van 20.1 kN. De benadering van initiële stijfheid is minder accuraat. Zo komt de initiële stijfheid t.p.v. de geconcentreerde lasten uit op 1.9 kN/mm in plaats van 1.6 kN/mm. De vorm van het lastzakkingsdiagram komt goed overeen met de proefresultaten tot punt waarop instabiliteit optreedt.

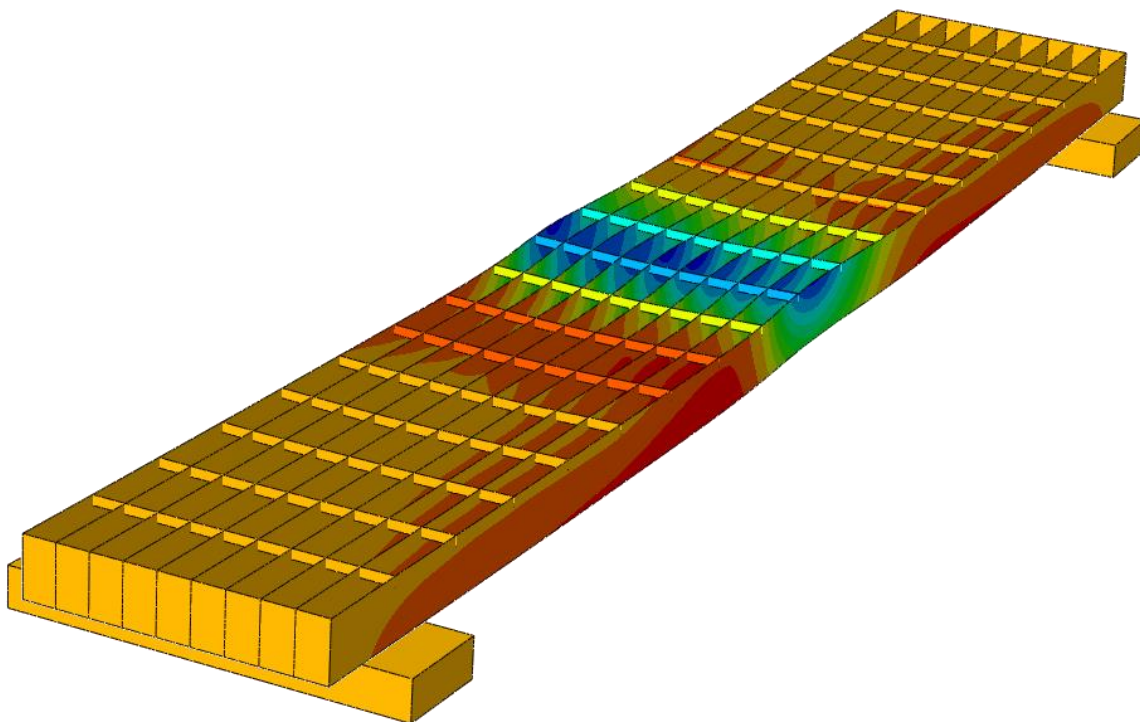
In Tabel 17 zijn de afwijkingen in initiële stijfheid tussen *FEM-benadering 1* en de gemiddelde initiële stijfheden uit de proefresultaten op de verzinkte proefstukken in procenten weergegeven voor de drie meetlocaties. Uit Tabel 17 blijkt dat er sprake is van een wisselende afwijking per meetlocatie. Dit feit kan mogelijk verklaard worden uit onduidelijkheden in de randvoorwaarde, zie paragraaf 7.6.1.

Tabel 17: Initiële stijfheid in kN/mm van de proefstukken van proefserie 2A, in relatie tot de initiële stijfheid uit *FEM-benadering 1*

	<i>Meetlocatie last</i>	<i>Meetlocatie midden</i>	<i>Meetlocatie rand</i>
Initiële stijfheid(kN/mm) Proefresultaten verzinkte proefstukken	1.6	1.3	1.6
Initiële stijfheid(kN/mm) FEM-benadering 1	1.9	1.3	1.7
Afwijking FEM-benadering 1 in % t.o.v. proefresultaten van de verzinkte proefstukken	18.1	-1.7	11.2

Bezwijkvorm

Figuur 100 laat zien dat bezwijken net zoals bij de proeven op treedt t.g.v. globale kipinstabiliteit. Zowel de locatie waar deze instabiliteit optreedt en de grootte van het gebied komen goed overeen met de proefresultaten.

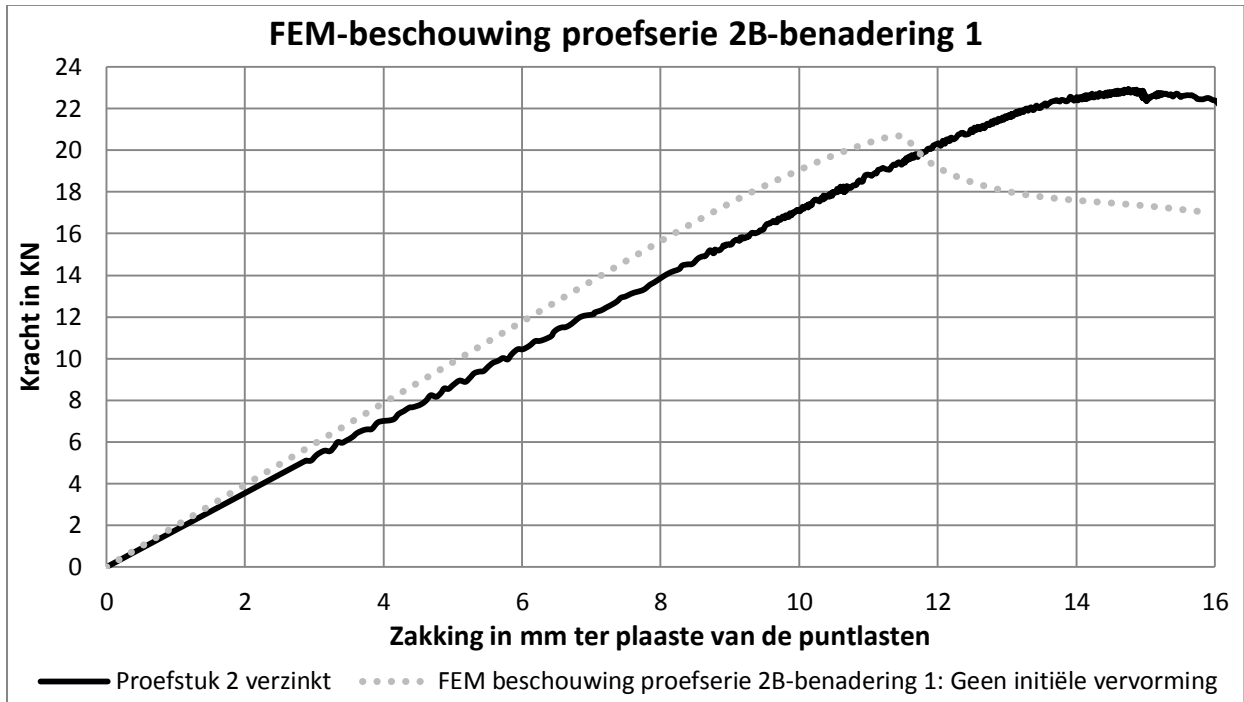


Figuur 100: Weergave bezwijkvorm FEM-beschouwing 2A benadering 1

7.6.3 FEM-beschouwing proefserie 2B

Benadering 1: Invloed persverbinding op stijfheid en sterkte niet beschouwd

In Figuur 101 staat het lastzakkingsdiagram wat verkregen op van *FEM benadering 1*, in relatie tot de proefresultaten van de verzinkte proefstukken van *proefserie 2B* weergegeven. Omwille van de leesbaarheid is er enkel één lastzakkingsdiagram van een verzinkte proefstuk van *proefserie 2B* geplot.



Figuur 101: FEM- beschouwing 2B- benadering 1: Model met massieve vul- en draagstaven in relatie tot de proefresultaten van proefserie 2B

Figuur 101 laat zien dat op basis van benadering 1 een redelijke benadering van zowel de initiële stijfheid als draagkracht verkregen wordt. De maximale belasting komt uit op 20.7 kN in plaats van 22.3 kN in de proefresultaten. Dit verschil is enigszins groter dan bij *FEM-benadering 2A*. De initiële stijfheid t.p.v. de geconcentreerde lasten komt uit op 2.0 kN/mm in plaats van 1.7 kN/mm. De vorm van het lastzakkingsdiagram komt goed overeen met de proefresultaten tot punt waarop instabiliteit optreedt.

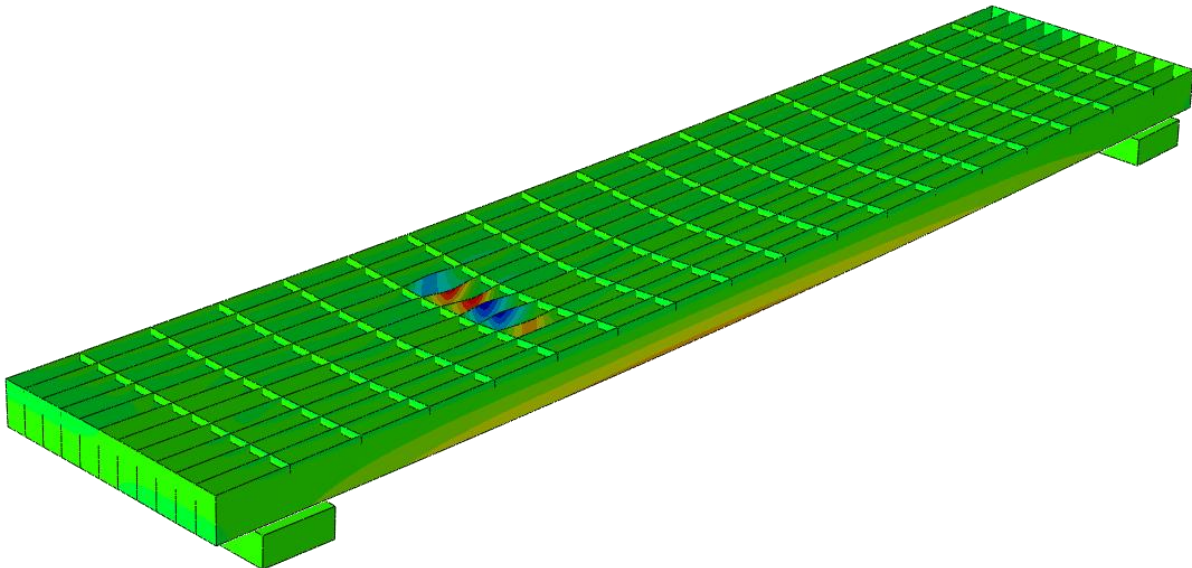
In Tabel 18 zijn de afwijkingen in initiële stijfheid tussen de *FEM benadering 1* en de gemiddelde initiële stijfheden uit de proefresultaten op de verzinkte proefstukken in procenten weergegeven voor de drie meetlocaties. Uit deze tabel blijkt dat de verschil tussen de initiële stijfheid van de proefstukken en van *FEM-benadering 2B*, in tegenstelling tot *FEM-benadering 2A* redelijk constant is voor iedere meetlocatie, ook is de maximale afwijking tussen de proefresultaten en *FEM-benadering 2B* enigszins kleiner.

Tabel 18: *Initiële-stijfheid in kN/mm van de proefstukken van proefserie 2B, in relatie tot de initiële-stijfheid uit FEM-benadering 1*

	<i>Meetlocatie last</i>	<i>Meetlocatie midden</i>	<i>Meetlocatie rand</i>
Initiële stijfheid(kN/mm) Proefresultaten verzinkte proefstukken	1.7	1.2	2.4
Initiële stijfheid(kN/mm) FEM-benadering 1	2.0	1.3	2.6
Afwijking FEM-benadering 1 in % t.o.v. proefresultaten van de verzinkte proefstukken	13.6	12.3	10.8

Bezwijkvorm

Figuur 102 laat zien dat bezwijken net zoals bij de proefstukken op treedt t.g.v. *lokale kipinstabiliteit*. Zowel de locatie waar deze instabiliteit optreedt en de grote van het gebied komen goed overeen met de proefresultaten.



Figuur 102: *Weergave bezwijkvorm FEM-beschouwing 2B benadering 1*

7.7 Bespreking resultaten numerieke analyses

7.7.1 Model 1: Plastisch bezwijken

Aan de hand van *FEM benadering 1* kan de initiële stijfheid en de draagkracht van de verzinkte proefstukken met een marge van ongeveer 10% benaderd worden. Wat opvalt is dat deze benadering, voor *proefserie IA* een onderschatting van de draagkracht geeft, terwijl dit voor *proefserie IB* niet het geval is. Een mogelijke verklaring hiervoor is spreiding in materiaaleigenschappen, zie paragraaf 6.2.1.

FEM benadering 1 is niet toepasbaar op de niet-verzinkte proefstukken van *proefserie IB*, vanwege de aanzienlijke overschatting van zowel de initiële stijfheid als draagkracht. Aan de hand van *FEM benadering 2* waarbij de invloed van de persverbinding wel beschouwd is, is het mogelijk zowel de initiële stijfheid als sterkte van de niet-verzinkte proefstukken van *proefserie IB* nauwkeurig te benaderen.

Het toepassen van *FEM benadering 2* op de verzinkte proefstukken maakt het mogelijk om vooral de initiële stijfheid nauwkeuriger te benaderen. Ook de overgang tussen elastische en elasto-plastisch gedrag wordt beter benaderd. Het horizontaal traject zoals waargenomen in de last-zakkingsdiagrammen van de verzinkte proefstukken van proefseries *IA en IB*, zie Figuur 51 en Figuur 55, is met behulp van de toegepaste methodiek niet te verkrijgen.

De benodigde materiaaleigenschappen van de geschematiseerde persverbinding waren voor het verkrijgen van een goede correlatie tussen de FEM benadering 2 en de proefresultaten, bij FEM beschouwing serie *IA en IB* vrij extreem. Hierbij viel op dat de benodigde vloeigrens hoog is en de benodigde E-modulus laag. De hoge vloeigrens kan mogelijk verklaard worden door een spreiding in materiaaleigenschappen, zie paragraaf 6.3. De lage E-modulus kan mogelijk verklaard worden door de grote gevoeligheid van de E-modulus van de geschematiseerde persverbinding op de initiële stijfheid, zoals Figuur 84 en Figuur 88 illustreren. Ook dient niet vergeten te worden dat er sprake is van een schematisering van de persverbinding.

In beide analyse kwam de bezwijkvorm goed overeen met de waargenomen bezwijkvorm tijdens de proeven. De plastische scharnieren in de draagstaven was in tegenstelling tot de proeven niet gelokaliseerd in één punt. Hiervoor zijn twee mogelijke verklaringen. Ten eerste is er bij de toegepaste modellen geen sprake van lokale zwaktes t.g.v. wisseling in materiaaleigenschappen. Ten tweede kan het gedrag van de persverbinding een rol spelen bij het tot stand komen van het scharnier.

7.7.2 Model 2: Bezwijken t.g.v. instabiliteit

Aan de hand van *FEM benadering 1* kan de initiële-stijfheid en de draagkracht van de verzinkte proefstukken met een marge van ongeveer 10% bepaald worden. Wat opviel was dat bij *FEM beschouwing serie 2A* de bewijslast binnen een marge van 2.5 % benaderd wordt, terwijl bij *FEM beschouwing serie 2B* er sprake is van een marge van 10%. Wat betreft de initiële stijfheid is er een minder goede correlatie. Zo resulteert *FEM benadering 1* in een ongeveer 20% te hoge initiële stijfheid. Deze te hoge initiële stijfheid kan deels verklaard worden door het feit dat de invloed van de persverbinding niet beschouwd. Zoals paragraaf 6.6 laat zien is de invloed van de persverbinding op de initiële stijfheid echter beperkt. Een andere mogelijke verklaring is de onduidelijkheden in de randvoorwaarde.

Het verschil in bezwijkmechanisme tussen proefseries 2A en 2B komt duidelijk in de FEM beschouwing naar voren. De toegepaste FEM beschouwingen zijn dus in staat de bezwijkvorm van de verzinkte proefstukken te bepalen op basis van monolithische verbinding tussen de draag- en vulstaven.

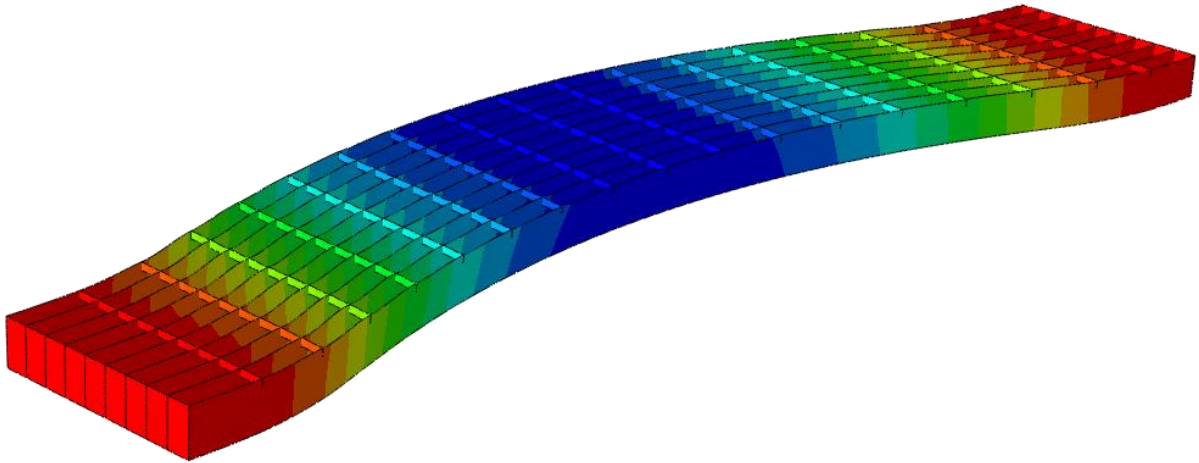
Na het optreden van instabiliteit neemt de nauwkeurigheid van de FEM benadering af. Dit is voor het bepalen van de initiële stijfheid en draagkracht geen probleem. De nauwkeurigheid in dit traject zou mogelijk verbeter kunnen worden door het toepassen van een expliciete FEM analyse.

7.7.3 Invloed van de gemeten horizontale imperfecties op initiële stijfheid en sterkte

De Invloed van de imperfecties op initiële stijfheid en sterkte zijn onderzocht door middel van het importeren van een initiële vervorming. De vervorming is tot stand gekomen door middel van het aanbrengen van een verdeelde belasting in de richting van de zwakke as van de draagstaven, zie bijlagen C. Deze vervorming heeft een vergelijkbare vorm en maximale grootte als de horizontale imperfecties, zie paragraaf 6.3.

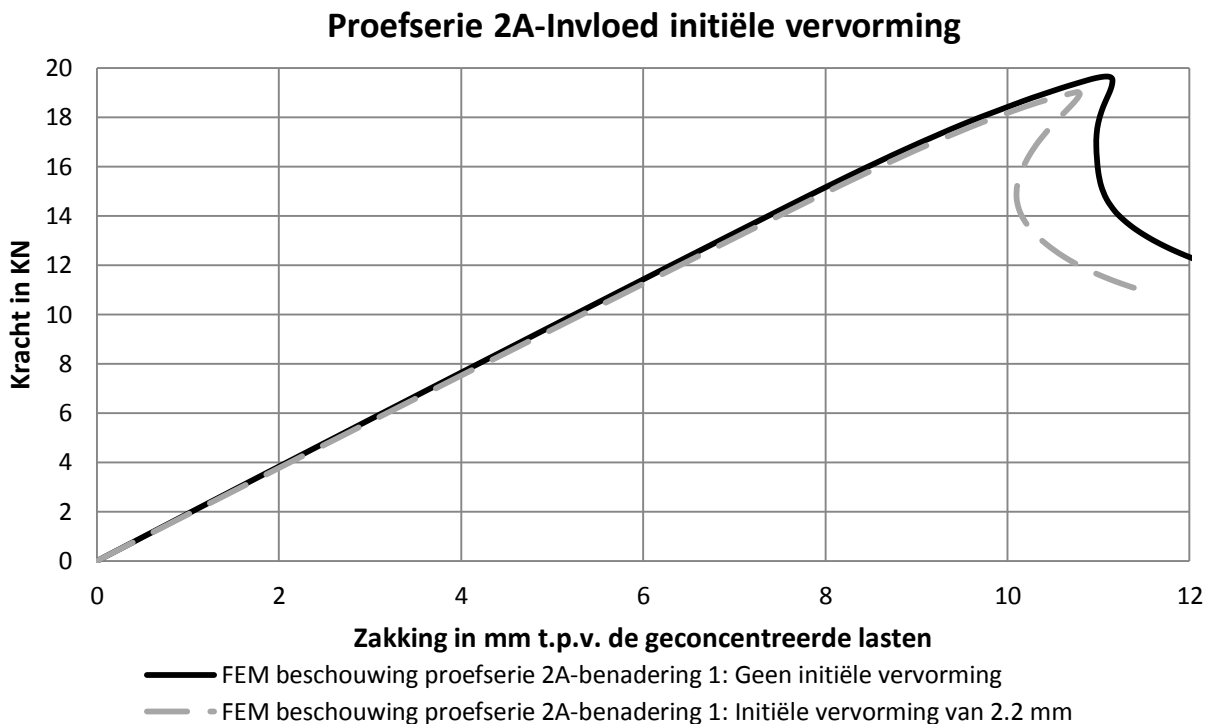
7.7.3.1 Proefserie 2A: Invloed gemeten horizontale imperfecties op initiële stijfheid en sterkte

Uit een analyse van de imperfecties in de proefstukken bleek er dat sprake is van een gemiddelde horizontale imperfectie van 2.2 mm in de draagstaven, zie paragraaf 6.3. In Figuur 103 staat een weergave van de geïmporteerde vervorming die deze horizontale imperfecties naboots.



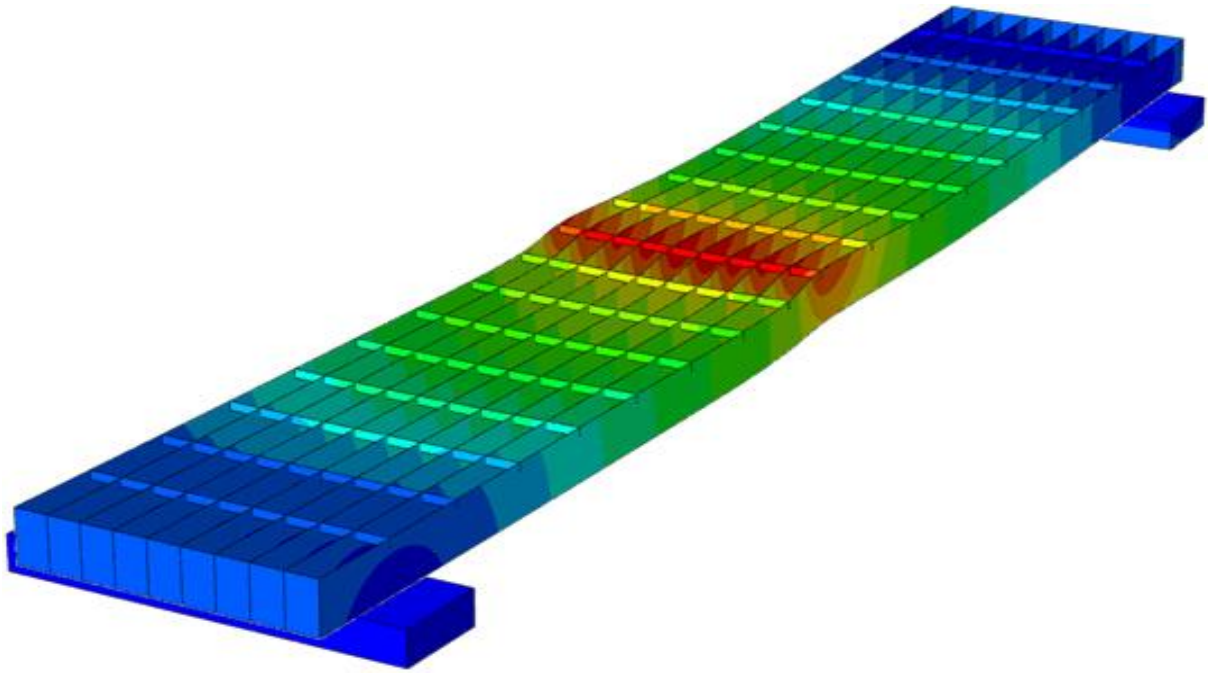
Figuur 103: Ingevoerde initiële vervorming voor de FEM beschouwing van proefserie 2A, schaalfactor 90.

In Figuur 104 staan de lastzakkingsdiagrammen van *FEM benadering 1* zonder initiële vervorming en *FEM benadering 1* met initiële vervorming weergegeven. Duidelijk uit dit figuur is dat de invloed van een initiële vervorming op de draagkracht en initiële stijfheid net zoals bij de proeven heel beperkt is.



Figuur 104: Invloed imperfecties op stijfheid en sterkte op basis van gemeten imperfectie van 2.2 mm

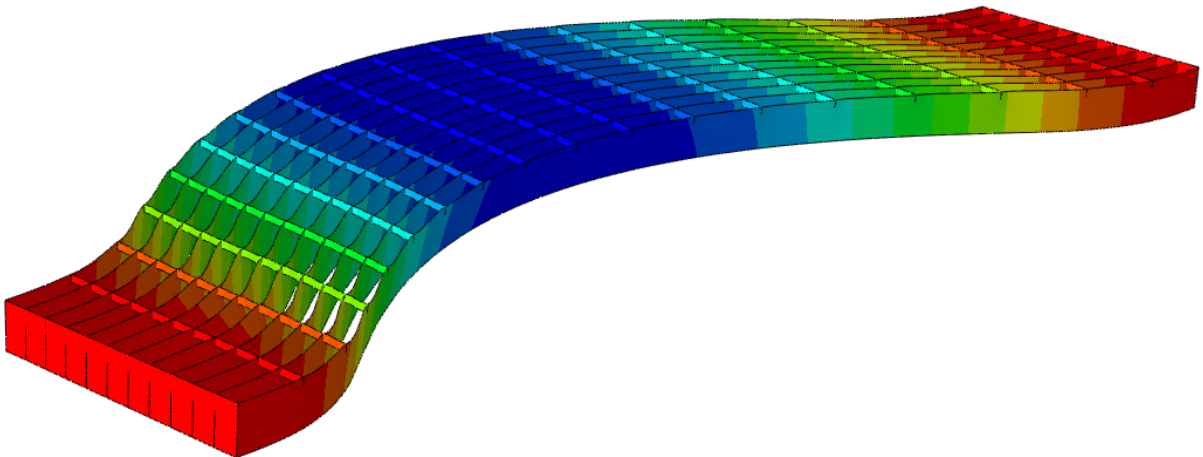
De belasting waarop instabiliteit optreedt is 0.7 kN lager bij een benadering met een initiële vervorming van 2.2 mm dan, bij het benadering zonder een initiële vervorming. De initiële stijfheid wordt niet merkbaar beïnvloed. Zoals Figuur 108 illustreert heeft de initiële vervorming geen invloed op het bezwijkmechanisme dat optreedt.



Figuur 105: Bezwijkvorm op basis van een initiële vervorming van 2.2 mm

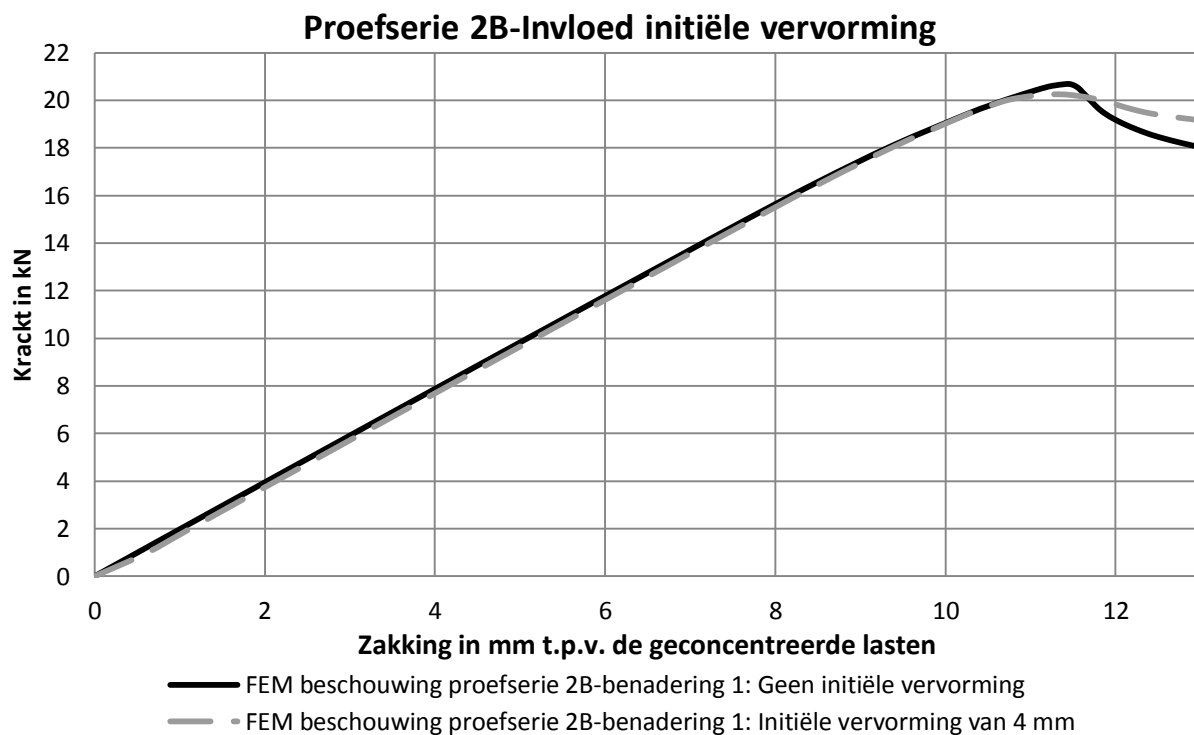
7.7.3.2 Proefserie 2B: Invloed gemeten horizontale imperfecties op initiële stijfheid en sterkte

Een analyse van de imperfecties in de proefstukken liet zien dat sprake is van een gemiddelde horizontale van imperfectie van 4 mm in de draagstaven, zie paragraaf 6.3. In Figuur 106 staat een weergave van de geïmporteerde vervorming die deze horizontale imperfecties naboots.



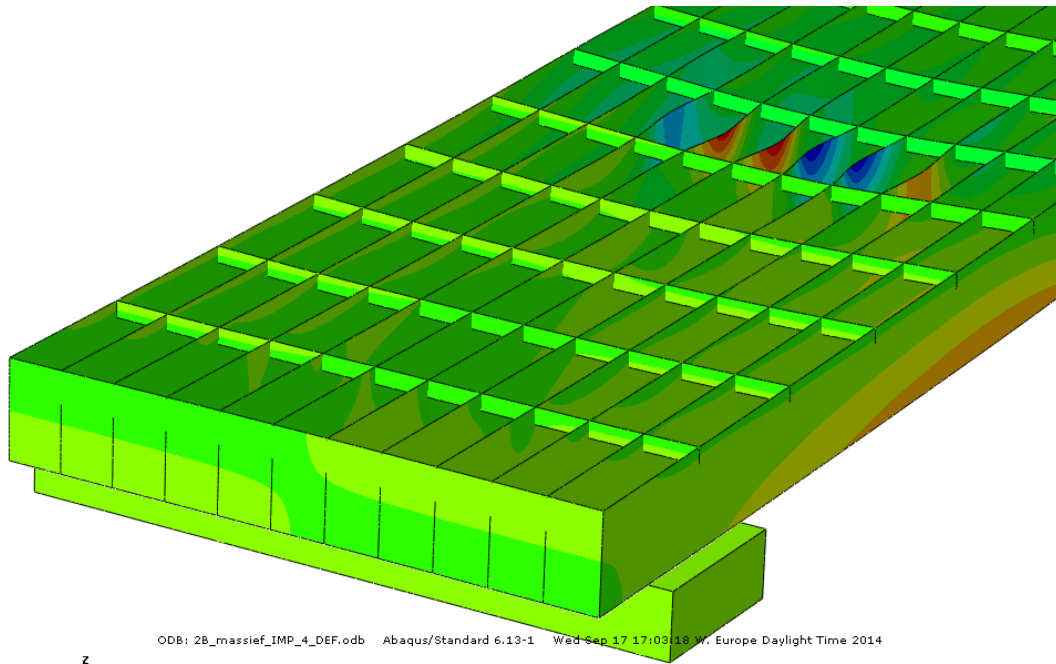
Figuur 106: Ingevoerde initiële vervorming voor de FEM beschouwing van proefserie 2B, schaalfactor 90.

In Figuur 107 staan de lastzakkingsdiagrammen van *FEM benadering 1* zonder initiële vervorming en *FEM benadering 1* met initiële vervorming weergegeven. Duidelijk uit dit figuur is dat de invloed van een initiële vervorming op de draagkracht en initiële stijfheid net zoals bij de proeven heel beperkt is.



Figuur 107: Invloed imperfecties op stijfheid en sterkte op basis van gemeten imperfecties van 4 mm

De maximale belasting komt marginaal lager uit. Zo daalt de maximale belasting met ongeveer 0.3 kN. De initiële stijfheid wordt niet beïnvloed door de geïmponeerde initiële vervorming. De geïmponeerde initiële vervorming heeft wel invloed op het verloop na het instabiel worden. Zoals Figuur 108 illustreert heeft de geïmponeerde initiële vervorming geen invloed op het bezwijkmechanisme dat optreedt



Figuur 108: Instabiliteitsvorm bij proefserie 2B met een imperfectie van 4 mm

7.7.3.1 Conclusie invloed initiële vervorming op initiële stijfheid en sterkte

Uit de FEM beschouwingen blijkt dat horizontale imperfecties van de draagstaven geen invloed hebben op de initiële stijfheid en een beperkte invloed op de sterkte. Deze bevinding is in lijn met de proefresultaten, zie paragraaf 6.7.6. Bij *FEM beschouwing proefserie 2B* is de invloed beperkter dan bij *FEM beschouwing proefserie 2A*, terwijl de initiële vervorming ongeveer twee keer zo groot is. Een verklaring hiervoor is dat de geïmporteerd initiële vervorming qua vorm lijkt op een globale eigenvorm van *proefserie 2A*.

7.7.4 Toepasbaarheid FEM methodiek voor parametrische onderzoek

Belangrijk voor de toepasbaarheid van een FEM methodiek is de nauwkeurigheid. *FEM benadering 1* liet zien dat voor verzinkte persroosters het aan de hand van een model op basis van de bruto draagstaafhoogte, mogelijk is om de sterkte binnen een marge van 10 % en de initiële stijfheid binnen een marge van ongeveer 20 % te bepalen. Het is aannemelijk dat hoe, hoger de draagstaafhoogte t.o.v. de persverbindingshoogte des te nauwkeuriger deze benadering, zie ook paragraaf 1.1. De reden hiervoor is dat de invloed van de persverbinding op stijfheid en draagkracht afneemt. Ook blijkt uit de FEM benaderingen dat het niet noodzakelijk is om de invloed van horizontale imperfecties meenemen in de bepaling van de draagkracht.

FEM benadering 2 laat zien dat door middel van het meenemen van het effect van de persverbinding stijfheid en sterkte. Het mogelijk is een nauwkeurigere benadering te verkrijgen van de initiële stijfheid en sterkte. Vanwege het feit dat de eigenschappen van de geschematiseerde persverbinding niet constant blijken te zijn kan dit effect niet toegepast worden in een parametrisch onderzoek.

8 Parametrisch onderzoek

In het parametrisch onderzoek is gekeken naar het kippinggedrag van zowel een individuele draagstaaf als een persrooster. Daarnaast is gekeken in welke mate plastische capaciteit aanwezig is in persroosters. In het onderzoek naar het kippinggedrag is het volgende beschouwd: de invloed van de vulstaven, de invloed van het aantal draagstaven, de invloed van het typen belasting, de invloed van de draagstaafhoogte en -dikte, en de invloed van de vulstaafdikte.

De opbouw van dit hoofdstuk is als volgt: in paragraaf 8.1 is de aanpak beschreven, in paragraaf 8.2 zijn de modellen weergegeven, in paragraaf 8.3 en 8.4 zijn respectievelijk het gedrag van een individuele draagstaaf en het gedrag van een persrooster onderzocht. Vervolgens zijn in paragraaf 8.5 de conclusies besproken.

8.1 Aanpak

Het parametrisch onderzoek heeft plaats gevonden aan de hand van twee type modellen. Met behulp van de eerste modelserie is het kippinggedrag van een draagstaaf onderzocht. Met behulp van de tweede modelserie is het kippinggedrag van een geheel persrooster onderzocht. Met een model uit de tweede modelserie waarbij er sprake is van een gelijke belasting op alle draagstaven is onderzocht in hoeverre er sprake is van plastische capaciteit in persroosters.

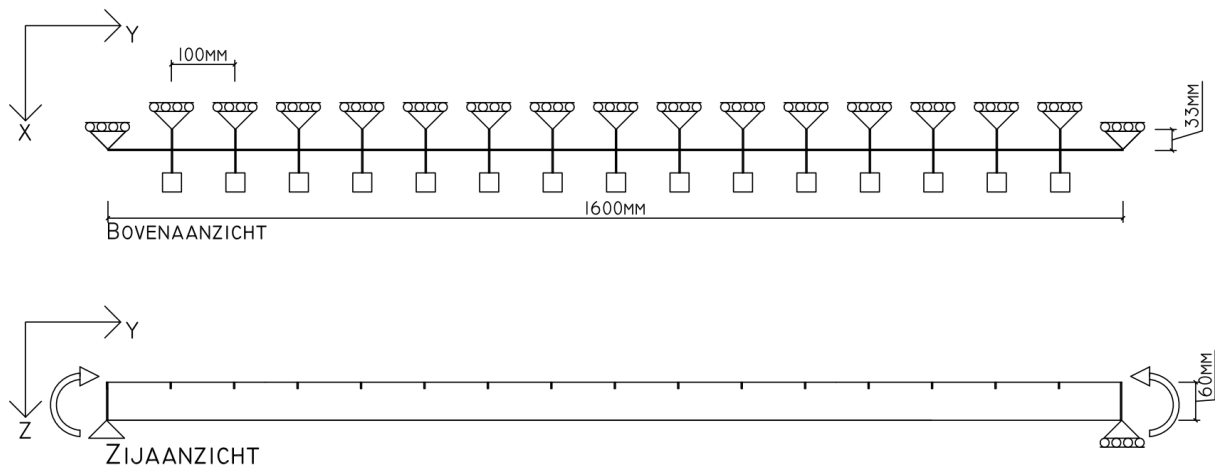
Het kippinggedrag is onderzocht aan de hand een geometrisch- en fysisch lineair rekenmodel. Hierbij is er gebruik gemaakt van een *buckle linear perturbation* analyse in het FEM programma ABAQUS. Deze analyse genereert een aantal eigenwaarde en eigenvormen. Hierbij is geen rekening gehouden met plasticiteit.

De mate waarin plastische capaciteit aanwezig is in persroosters is onderzocht aan de hand van een geometrisch en fysisch niet-lineair rekenmodel. Hierbij is er gebruik gemaakt van een *static Riks analyse* in het FEM programma ABAQUS. Met behulp van deze analyse kunnen de effecten van plasticiteit en instabiliteit op de bezwijklast beschouwd worden.

8.1.1 Onderzoek naar het kippinggedrag van een individuele draagstaaf

De analyse is uitgevoerd op basis van een model dat bestaat uit een draagstaaf die lateraal gesteund wordt door de vulstaven, zie Figuur 109. Het kritisch-kipmoment M_{cr} is vergeleken met het elastische moment M_{el} . Aan de hand van deze analyse is de invloed laterale stijfheid en de rotatieweerstand van de vulstaven op het kippinggedrag onderzocht.

Het model, zie Figuur 109, betreft een draagstaaf met een overspanning van 1600 mm en een draagstaafhoogte- en dikte van respectievelijk 60 en 2 mm. Om de 100 mm zijn vulstaven aangebracht. De belasting is aangebracht in de vorm van een constant moment op de twee kopse kanten. Ter plaatse van de opleggingen is de zijdelingsverplaatsing verhinderd.



Figuur 109: Modeltype 1: Draagstaaf model

Met behulp van de vulstaven zijn de randvoorwaarden gesimuleerd. Door middel van het scheiden van de laterale-steunfunctie en de rotatiefunctie is het mogelijk ieder van deze effecten apart en in combinatie te beschouwen.

De bovenste rij vulstaven, in Figuur 109, zitten in de x richting vast. Hierdoor simuleren deze vulstaven de laterale steun die de draagstaaf ontvangt van de niet direct belaste draagstaven, wanneer het onderdeel zou uitmaken van een persrooster. Middels het aanpassen van de E-modulus van deze vulstaven kan de stijfheid van de steun gevarieerd worden. Deze E-modulus is omgerekend naar een veerstijfheid.

De rotatievrijheid van de onderste rij vulstaven, in Figuur 109, kunnen zowel om de y als de z as verhinderd worden. Hierdoor is het mogelijk de invloed van rotatiestijfheid van de vulstaven om de y en z as op het kippmoment te bepalen, middels het variëren van de randvoorwaarde. Omdat er sprake is van enkel één rij vulstaven in plaats van twee, zoals in persrooster. Is om er voor te zorgen dat de EI van de vulstaven correct wordt gesimuleerd. Een E-modulus van 420.000 N/mm^2 voor deze vulstaven toegepast.

Definitie elastische moment M_{el}

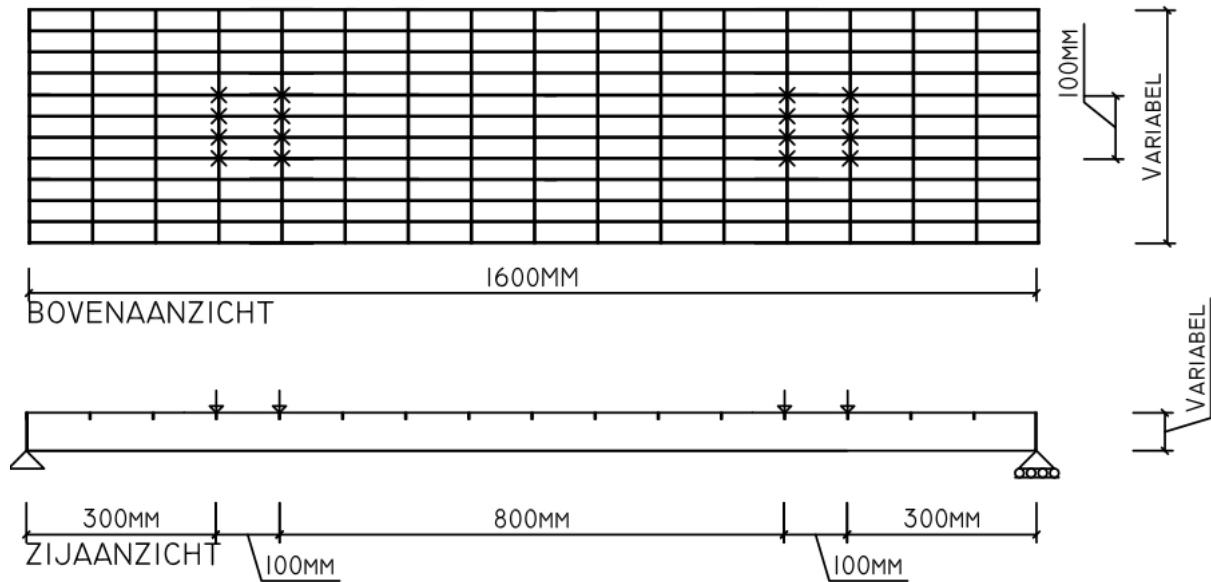
Het moment M_{el} is gebaseerd op een moment dat resulteert in het bereiken van de vloeigrens in een draagstaaf met een bruto draagstaafhoogte, zie paragraaf 1.1. Het moment M_{el} is bepaald aan de hand van een *linear perturbation analyse* in het FEM programma ABAQUS.

8.1.2 Onderzoek naar het kippedrag van een persrooster

De analyse is uitgevoerd op een persrooster model met drie verschillende soorten belastingen, namelijk: geconcentreerde belasting, verdeelde belasting en een lijnlast haaks aan de draagstaafrichting, zie Figuur 110, Figuur 111 en Figuur 112. De kiplast is vergeleken met de belasting F_{el} . Aan de hand van deze analyse is de invloed van het aantal draagstaven, de invloed van verschillende typen belastingen, de invloed van de draagstaafhoogte en -dikte, en de invloed van de vulstaafdikte op het kippedrag onderzocht.

Persrooster met twee geconcentreerde lasten van 100 bij 100 mm

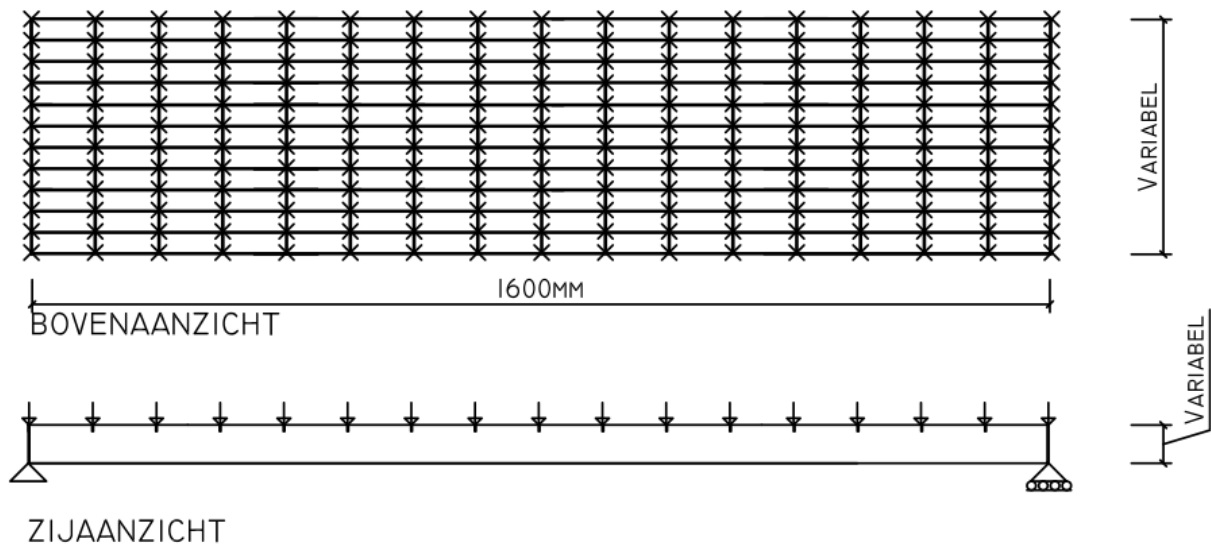
Het model, zie Figuur 110, heeft een vul- en draagstaafmaaswijdte van respectievelijk 100 en 33.3 mm en een vulstaafhoogte van 10 mm. Het aantal draagstaven, de vulstaafdikte en de draagstaafhoogte- en dikte zijn variabel. De twee geconcentreerde lasten zijn geïntroduceerd op een gebied van 100 bij 100 mm, en ingevoerd als een serie van 8 puntlasten, op de snijpunten van de draag- en vulstaven.



Figuur 110: Modeltype 2: Persrooster met twee geconcentreerde lasten en variabel aantal draagstaven

Persrooster met een verdeelde belast

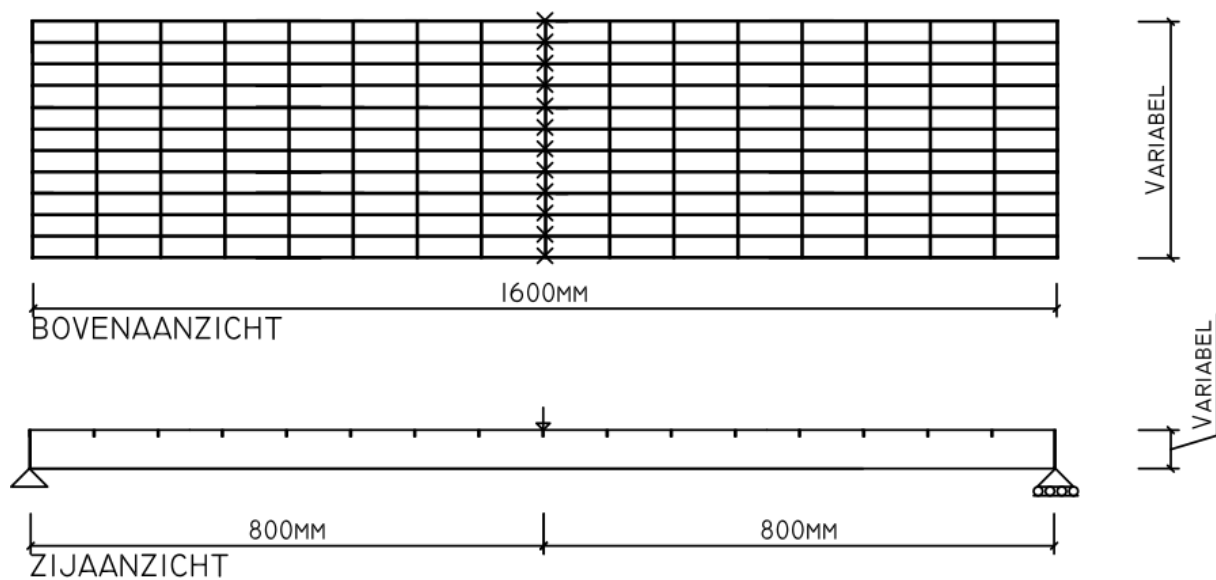
Het model, zie Figuur 111, heeft een vul- en draagstaafmaaswijdte van respectievelijk 100 en 33.3 mm, de draagstaafdikte bedraagt 2 mm en de vulstaafhoogte en -dikte zijn respectievelijk 10 en 2 mm. Het aantal draagstaven, en de draagstaafhoogte zijn variabel. De verdeelde belasting is ingevoerd middels een lijnbelastingen op de draagstaven.



Figuur 111: Modeltype 2: Persrooster met een verdeelde belasting en variabel aantal draagstaven

Persrooster met een lijnbelasting haaks op de draagstaafrichting

Het model, zie Figuur 112, heeft een vul- en draagstaafmaaswijdte van respectievelijk 100 en 33.3 mm, de draagstaafdikte bedraagt 2 mm en de vulstaafhoogte en -dikte zijn respectievelijk 10 en 2 mm. De lijnlast is als een serie van puntlasten op de snijpunten van de draag- en vulstaven geïntroduceerd.



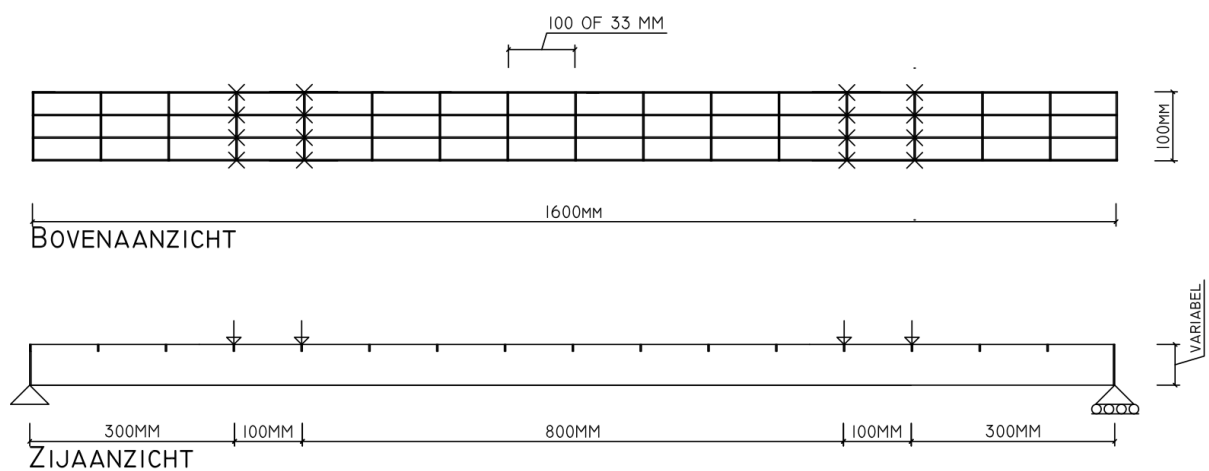
Figuur 112: Modeltype 2: Persrooster met een lijnlast haaks op de draagstaafrichting en variabel aantal draagstaven

Definitie belasting F_{el}

De belasting F_{el} is gebaseerd op de belasting die resulteert in het bereiken van de vloei grens in de draagstaven van het toegepaste model. De draagstaven zijn gemoduleerd op basis van de bruto draagstaafhoogte, zie paragraaf 1.1. In het geval van een geconcentreerde last speelt in de grootte van de belasting F_{el} herverdeling een rol. De belasting F_{pl} is bepaald aan de hand van een *linear perturbation analyse* in het FEM programma ABAQUS.

8.1.3 Onderzoek naar de plastische capaciteit van persroosters

De bezwijklast, F_b is vergeleken met vol de plastische belasting F_{pl} . Vanwege de grote variatie in rooster- en staafafmetingen is het niet mogelijk om elk rooster te simuleren in een FEM-model. Het onderzoek naar de aanwezigheid van plastische capaciteit heeft zich gericht op gangbare roosterspecificaties, zie Tabel 2. Het onderzoek is uitgevoerd aan de hand van een model dat belast is met twee lijn lasten over de gehele breedte, zie Figuur 113. Hierdoor is er geen sprake van herverdeling en zijn alle draagstaven gelijk belast. De breedte van het model is zeer smal voor een persrooster. De reden hiervoor is dat de breedte van het persrooster invloed heeft op bezwijken t.g.v. instabiliteit. Hoe smaller het persrooster, des te lager de laterale stijfheid en de kiplast.



Figuur 113: Modeltype 2: Persrooster met gelijk belasten draagstaven

De invloed van de lengte is niet beschouwd. Het is niet waarschijnlijk dat dit van invloed is omdat, de lengte waarover waarop *globale-kipinstabiliteit* optreedt 300 a 400 mm is. De lengte met een constant moment in het model is 800 mm. Met behulp van dit model kan dus een ondergrensbenadering van de plastische capaciteit bepaald worden.

Definitie belasting F_{pl}

De belasting F_{pl} is gebaseerd op de belasting die resulteert in het volledig vloeien van alle draagstaven. De draagstaven zijn gemoduleerd op basis van de bruto draagstaafhoogte, zie paragraaf 1.1. De belasting F_{pl} is bepaald aan de hand van een *static general analyse* in het FEM programma ABAQUS.

8.2 Modellen

8.2.1 Element type en mesh-grootte

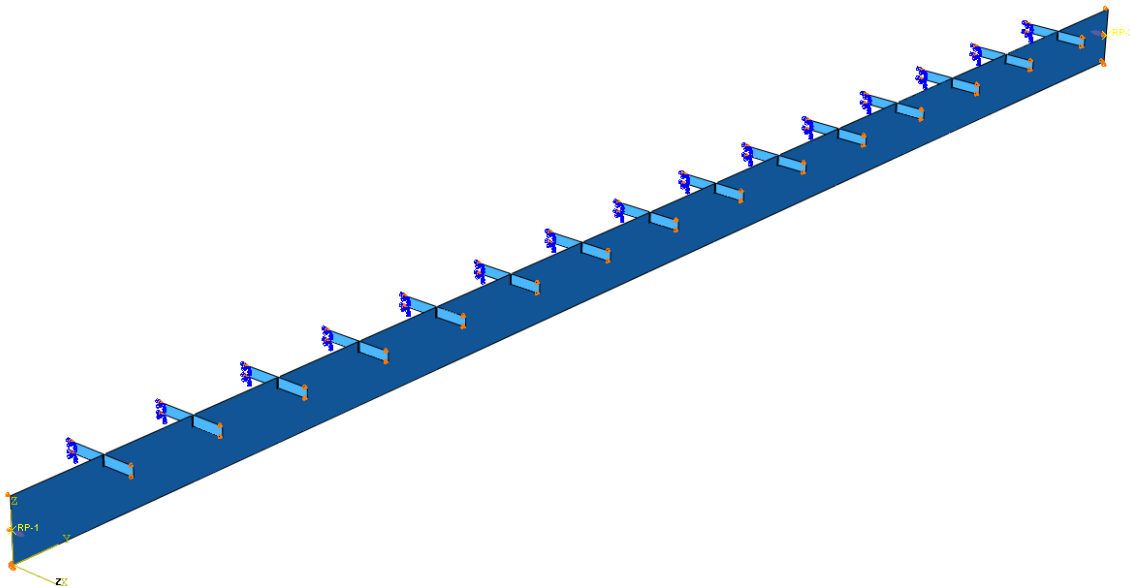
De persroosters zijn gemodelleerd op basis van kwadratische schaal elementen. In ABAQUS is het element type S8R, een 8-knoops schaalement met 6 vrijheidsgraden in elke knoop, toegepast. De mesh van de modellen is te vinden in bijlagen C.

8.2.2 Schematisering van het materiaalgedrag

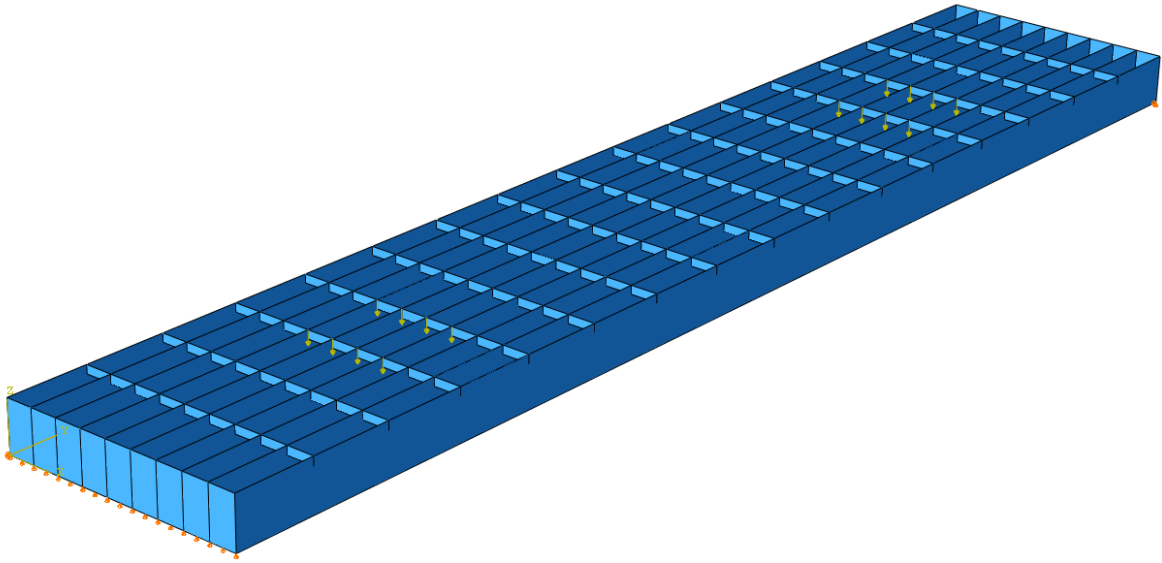
Er is gebruik gemaakt van de materiaaleigenschappen van de staalsoort S235. De toegepaste spanningsrekdiagrammen zijn bi-lineair. In bijlagen C staan de toegepaste diagrammen weergegeven.

8.2.3 Toegepaste modellen

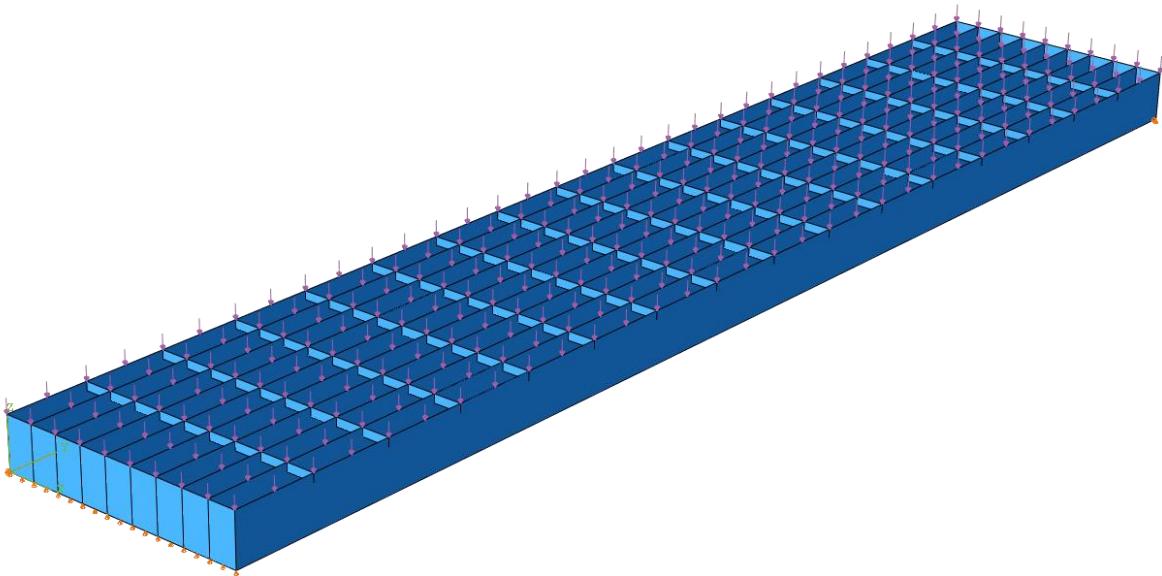
In de modellen zijn de verbindingen tussen de draag- en vulstaven monolithisch tot stand gekomen. Ook zijn in de persroostermodellen de randstaven parallel aan de draagstaafrichting niet gemodelleerd. De draagstaven zijn gemodelleerd op basis van de bruto draagstaafhoogte, zie paragraaf 1.1. In Figuur 114, Figuur 115, Figuur 116, Figuur 117 en Figuur 118 staat een weergaven van de modellen in ABAQUS.



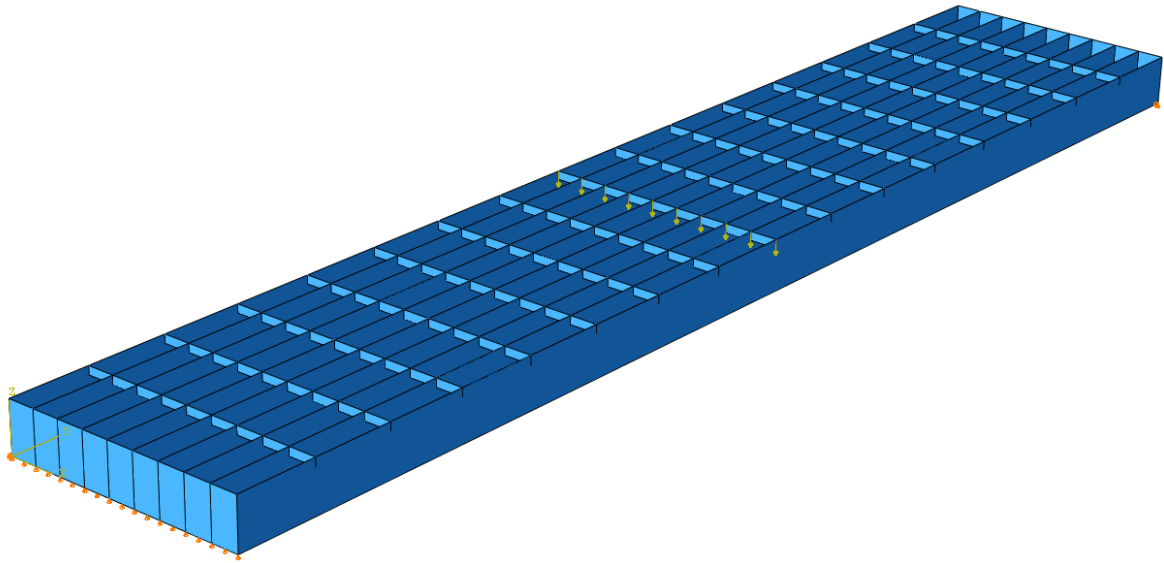
Figuur 114: Draagstaafmodel



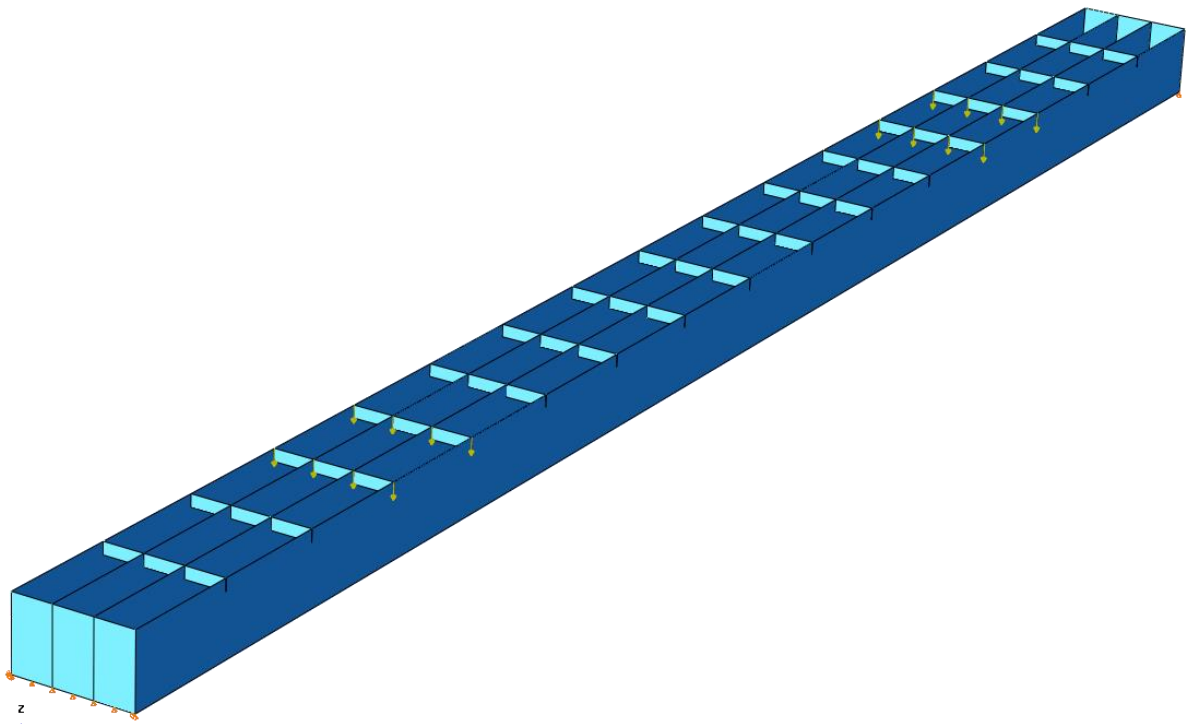
Figuur 115: Model 2: Persrooster model met twee geconcentreerde lasten



Figuur 116: Model 2: Persrooster model met verdeelde belasting



Figuur 117: Model 2: Persrooster model lijnlast haaks op de draagstaafrichting



Figuur 118: Model 2: Persrooster met een constant moment en een vulstaafmaaswijdte van 100 mm

8.3 Parametrisch onderzoek kipinstabiliteit

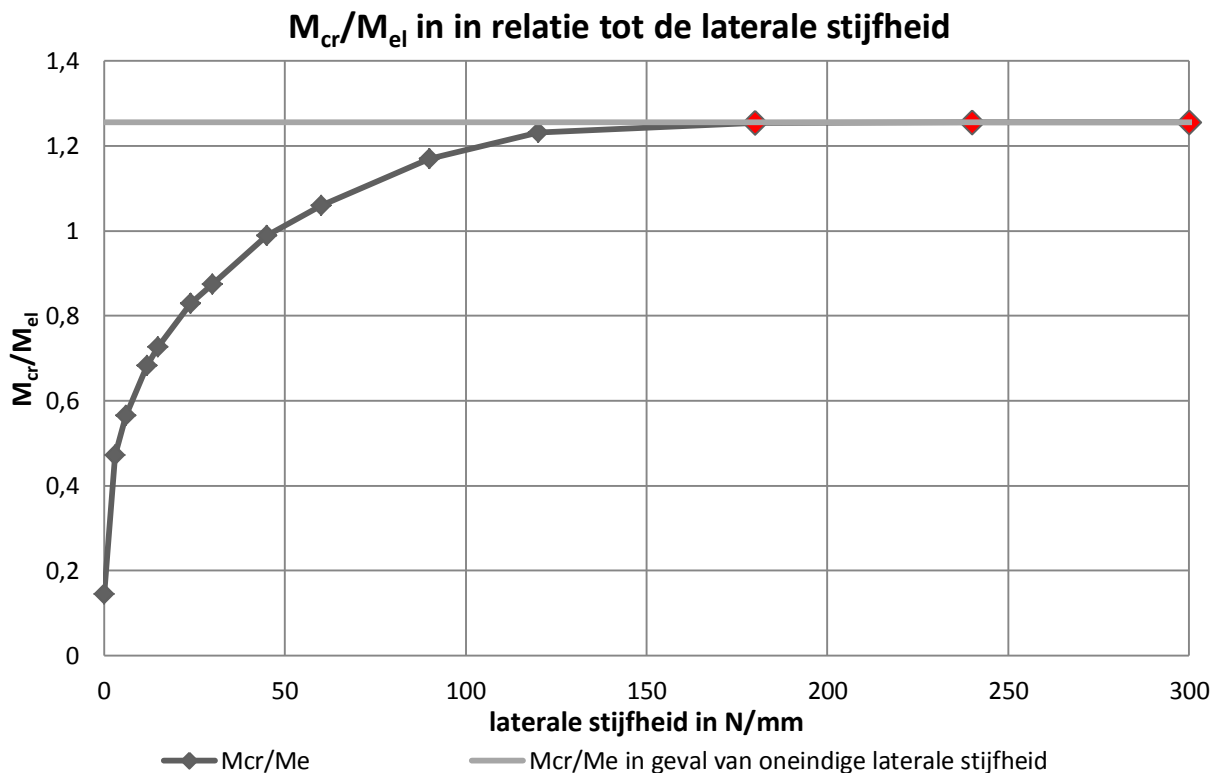
8.3.1 Parametrisch onderzoek naar de kipinstabiliteit van een enkele draagstaaf gesteund door vulstaven

Dit onderzoek is uitgevoerd aan de hand van Modeltype 1: Draagstaaf model, zie Figuur 109. Het kippedrag is beschouwd in relatie tot de laterale stijfheid en rotatieweerstand van de vulstaven. Deze relatie is onderzocht voor de volgende gevallen:

- Alleen laterale steun
- Laterale steun en rotatieweerstand van de vulstaven
 - Laterale steun en rotatieweerstand om zowel de y als z as
 - Laterale steun en rotatieweerstand om de y as
 - Laterale steun en rotatieweerstand om de z as

8.3.1.1 Kippedrag in relatie tot de laterale stijfheid

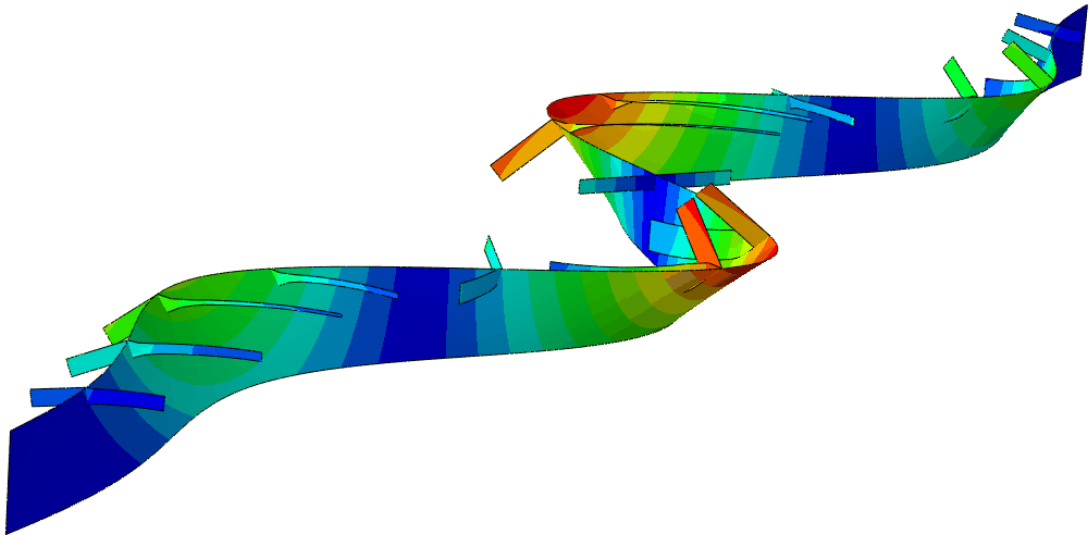
In Figuur 119 staat de verhouding tussen het kritisch-kipmoment M_{cr} en elastisch moment M_{el} in relatie tot de laterale stijfheid van de kipsteunen weergegeven. Ook weergegeven in dit figuur is de verhouding tussen het kritisch-kipmoment M_{cr} en elastisch moment M_{el} in het geval van een oneindige laterale stijfheid in de vulstaven.



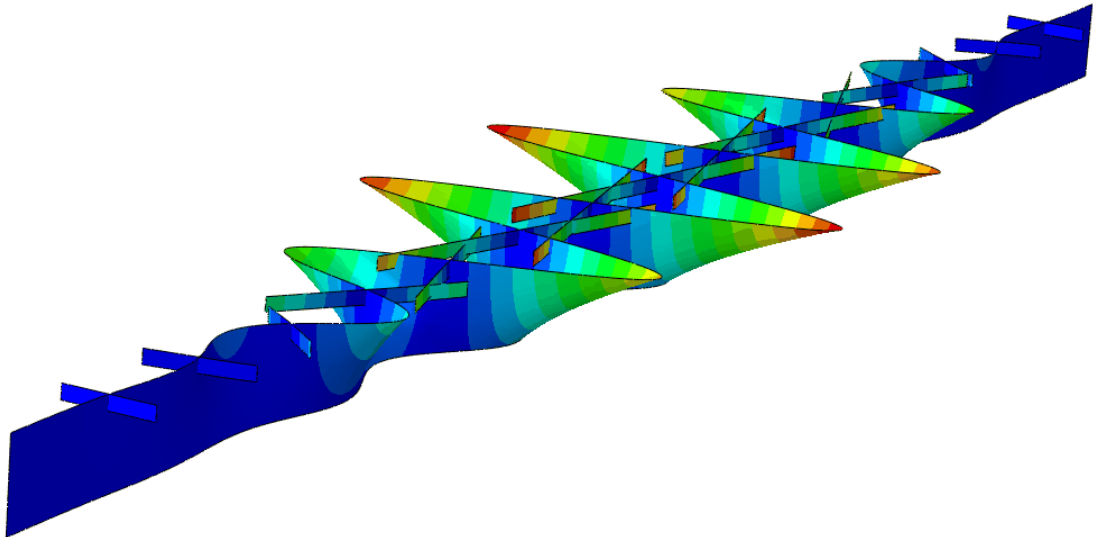
Figuur 119: Verhouding M_{cr}/M_{el} in relatie tot de laterale stijfheid van de kipsteunen. In rood wanneer er sprake is van lokale-kipinstabiliteit en in zwart wanneer er sprake is van globale-kipinstabiliteit.

Figuur 119 laat zien dat naarmate de laterale stijfheid toeneemt de verhouding tussen het kritisch-kipmoment en het elastische moment, naar een limiet toeloopt. Hierdoor is de invloed van de laterale stijfheid op het kritisch-kipmoment verwaarloosbaar boven een bepaalde

kritische veerstijfheid, in dit geval 180 N/mm. Dit punt valt samen met de overgang van *globale naar lokale-kipinstabiliteit*. Dat deze overgang invloed heeft is te verklaren uit het feit dat de kiplengte bij *globale-kipinstabiliteit*, zie Figuur 120, groter is dan de vulstaafmaaswijdte en bij *lokale-kipinstabiliteit*, zie Figuur 121, nooit groter dan deze maaswijdte.



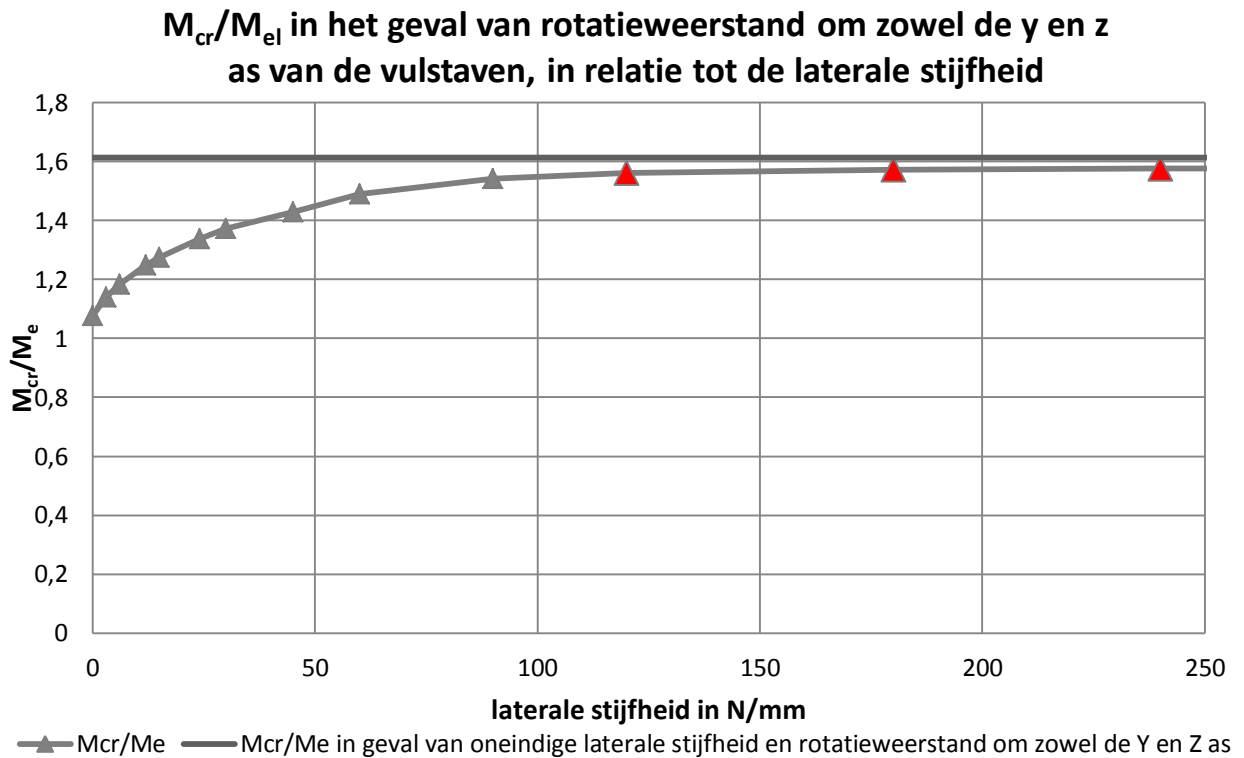
Figuur 120: Globale-kipinstabiliteit bij een laterale stijfheid van de kipsteunen van 90 N/mm



Figuur 121: Lokale-kipinstabiliteit bij een laterale stijfheid van de kipsteun van 180 N/mm of hoger

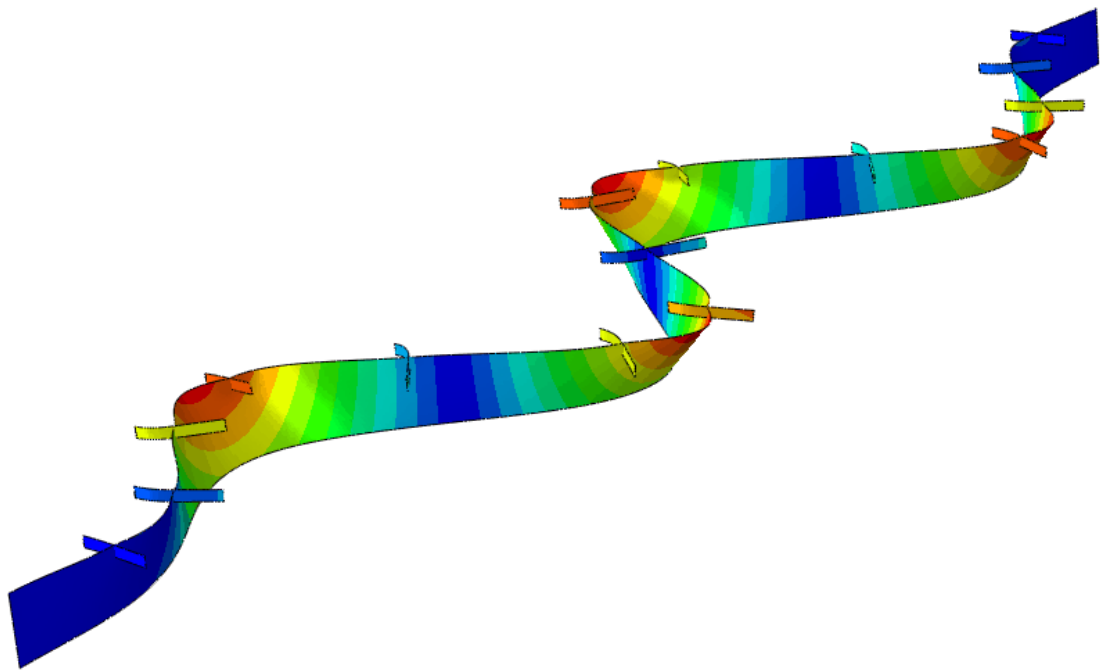
8.3.1.1 Kipgedrag in het geval van rotatieweerstand om zowel de y als z as van de vulstaven, in relatie tot de laterale stijfheid.

In Figuur 122 staat de verhouding tussen het kritisch-kipmoment M_{cr} en elastisch moment M_{el} weergegeven in het geval van rotatieweerstand om zowel de y en z as van de vulstaven, zie Figuur 109, in relatie tot de laterale stijfheid. Ook weergegeven in dit figuur is de verhouding tussen het kritisch-kipmoment M_{cr} en elastisch-moment M_{el} in het geval van oneindige laterale stijfheid in de kipsteunen en rotatieweerstand om zowel de y en z as van de vulstaven.



Figuur 122: Verhouding M_{cr}/M_{el} in relatie tot de laterale stijfheid bij aanwezigheid van een rotatie steun om de Y en Z as van de vulstaven. In rood wanneer er sprake is van lokale-kipinstabiliteit en in zwart wanneer er sprake is van globale-kipinstabiliteit

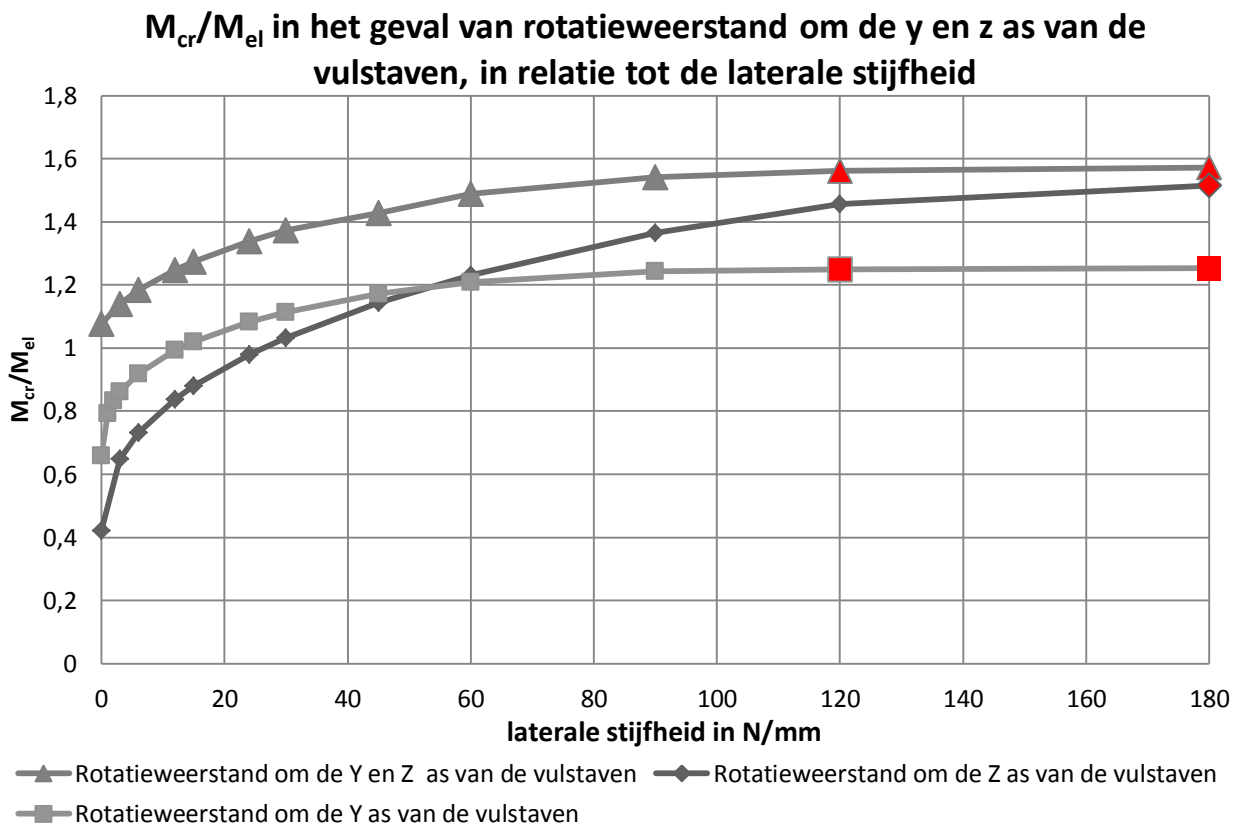
Vergeleken met het kipgedrag in het geval van alleen laterale steun, zie Figuur 119, vallen er drie dingen op in Figuur 122. Ten eerste komt de waarde waar naartoe M_{cr}/M_{el} loopt 0.3 hoger dan in het geval van alleen laterale steun. Ten tweede is de relatie tussen de laterale stijfheid en de verhouding M_{cr}/M_{el} wezenlijk anders. Zo is de verhouding tussen M_{cr}/M_{el} 1.05 bij het ontbreken van laterale steun in plaats van 0.17. Ten derde vindt de overgang van *globale-kipinstabiliteit* naar *lokale-kipinstabiliteit* plaats bij een laterale stijfheid van 120 i.p.v. 180 N/mm. Een verklaring voor de drie geplaatste aspecten is dat de vulstaven ook vervormen, zie Figuur 123.



Figuur 123: Globale-kipinstabiliteit bij een rotatieweerstand om de Y en Z as van de vulstaven

8.2.2.2 Kipgedrag in het geval van rotatieweerstand om de y en z as van de vulstaven, in relatie tot de laterale stijfheid.

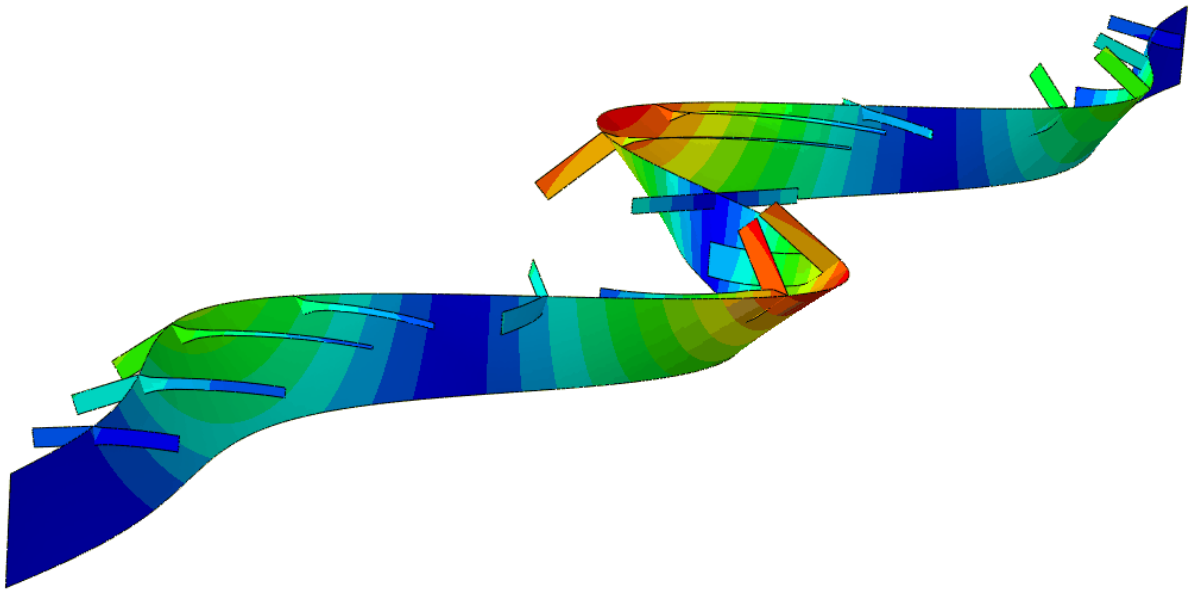
In Figuur 124 staat de verhouding tussen het kritisch-kipmoment M_{cr} en elastisch moment M_{el} weergegeven voor twee gevallen, in relatie tot de laterale stijfheid. In het eerste geval is sprake van een constante rotatieweerstand om de y as van de vulstaven en in het tweede geval een constante rotatieweerstand om de z as van de vulstaven. Ook weergegeven in dit figuur is de verhouding tussen het kritisch-kipmoment M_{cr} en elastisch moment M_{el} in het geval constante rotatieweerstand om zowel de y en z as.



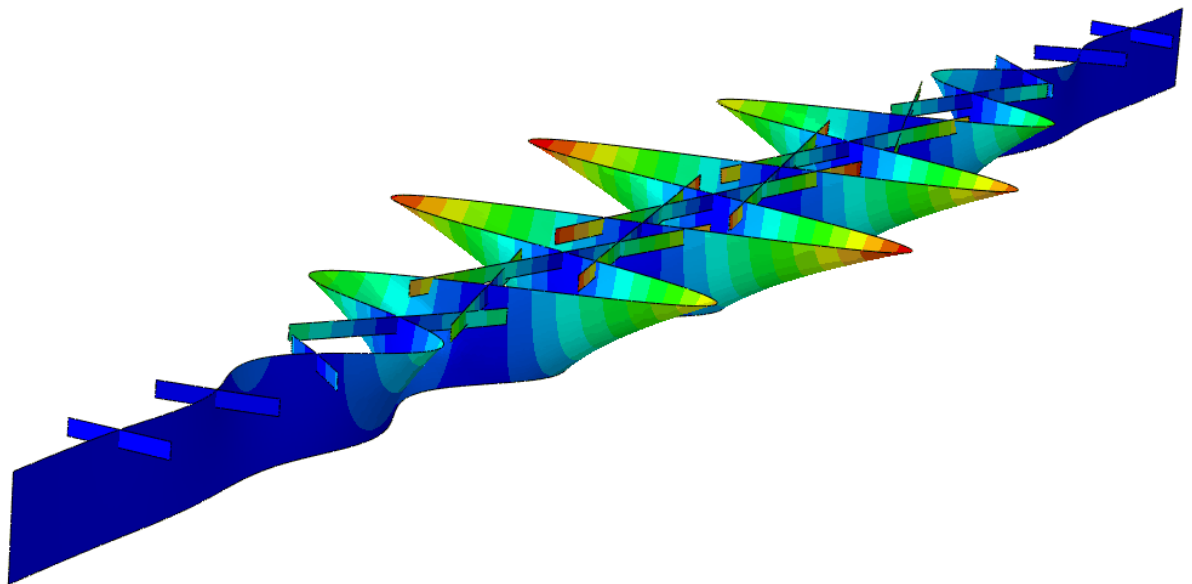
Figuur 124: Verhouding M_{cr}/M_{el} in het geval van rotatieweerstand om de y en z as van de vulstaven, in relatie tot de stijfheid laterale stijfheid. In rood wanneer er sprake is van lokale-kipinstabiliteit en in zwart wanneer er sprake is van globale-kipinstabiliteit.

Uit Figuur 124 blijkt dat de rotatieweerstand om de y as bij een laterale stijfheid die kleiner is dan 60 N/mm meer invloed dan een rotatieweerstand om de z as. Dit fenomeen kan verklaard worden aan de hand van de instabiliteitsvorm die optreedt. De reden hiervoor is dat er bij *globale-kipinstabiliteit* t.p.v. het punt waar de vulstaaf de draagstaaf snijdt, sprake is van een rotatie om de y as, zie Figuur 125. Door het tegenwerken van deze rotatie neemt het kipmoment toe. In de stijfheid om de y as speelt de vulstaafhoogte een belangrijke rol.

Bij *lokale-kipinstabiliteit* heeft de rotatieweerstand om de z as van de vulstaven de meeste invloed. Dit komt voort uit het feit dat er bij *lokale-kipinstabiliteit* sprake is van een rotatie om deze as t.p.v. het punt waar de vulstaaf de draagstaaf snijdt, zie Figuur 126. In de stijfheid om de y as speelt de vulstaafdikte een belangrijke rol.



Figuur 125: Globaal-kipinstabiliteit in een model met alleen laterale steun



Figuur 126: Lokale kipinstabiliteit bij oneindig stijve laterale steun

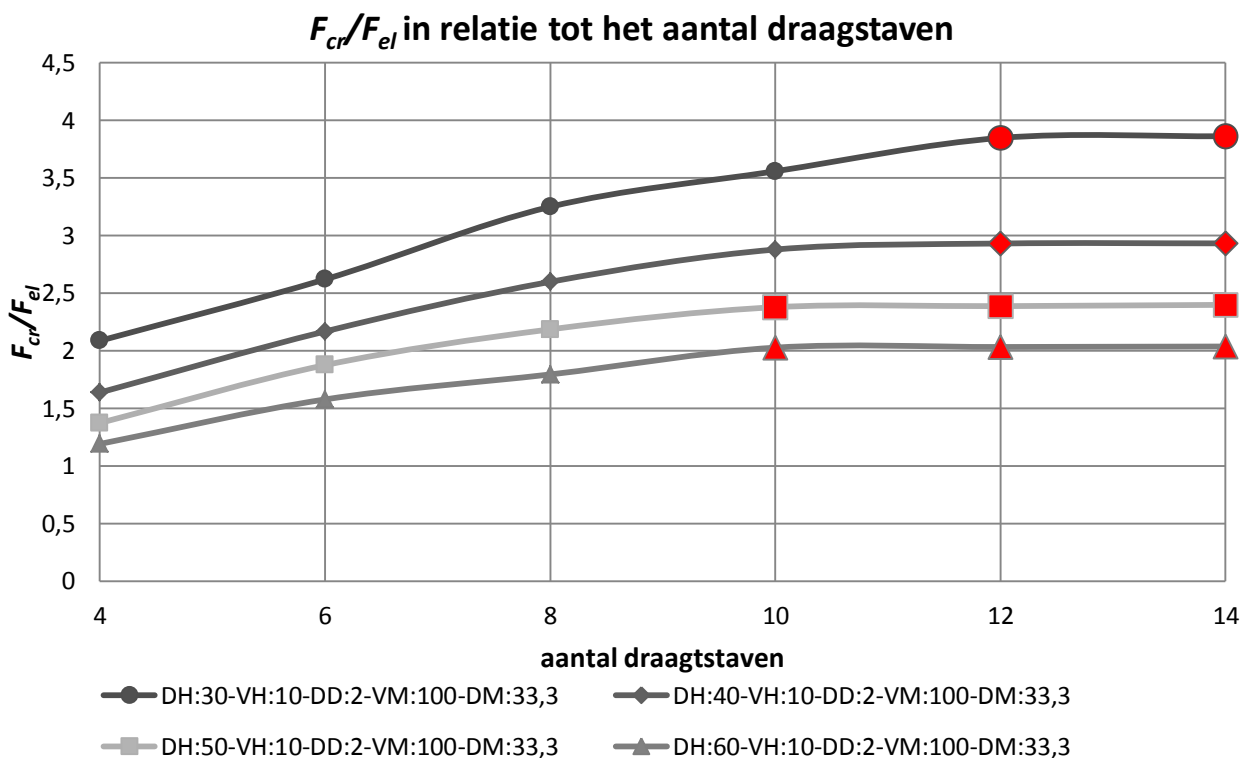
8.3.2 Parametrisch onderzoek naar de kipinstabiliteit van een persrooster

Dit onderzoek heeft plaats gevonden aan de hand van de persroostermodellen, zie paragraaf 8.1.2. Het kippedrag is beschouwd in relatie tot aantal draagstaven. In deze beschouwing is het volgende onderzocht:

- Kippedrag in het geval van een geconcentreerde last
 - Invloed van het aantal draagstaven
 - Invloed draagstaafdikte
 - Invloed vulstaafdikte
- Kippedrag in geval van een verdeelde last
- Kippedrag in het geval van een lijnlast haaks op draagstafrichting

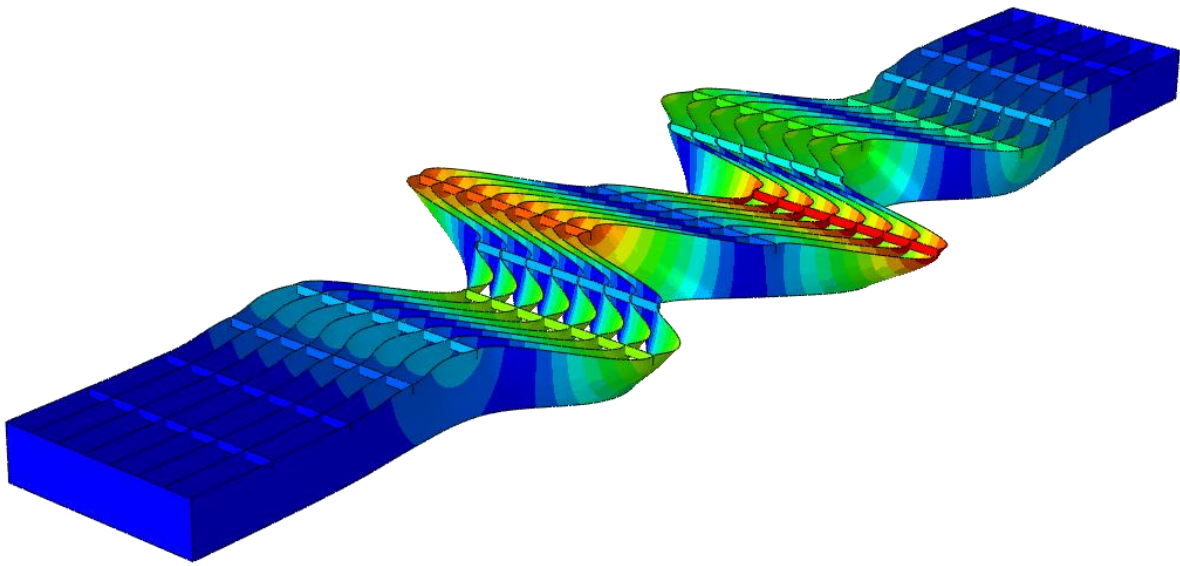
8.3.2.1 Kippedrag van een persrooster dat belast is door twee geconcentreerde lasten van 100 bij 100 mm, in relatie tot het aantal draagstaven

In Figuur 127 staat de verhouding tussen de kritische-kiplast F_{cr} en de elastische belasting F_{el} , in relatie tot het aantal draagstaven weergegeven voor vier verschillende persroostergeometrieën, met draagstaafhoogtes van 30, 40, 50 en 60 mm. Deze beschouwing heeft plaatsgevonden aan de hand van Model 2: Persrooster met een geconcentreerde last, zie Figuur 110.



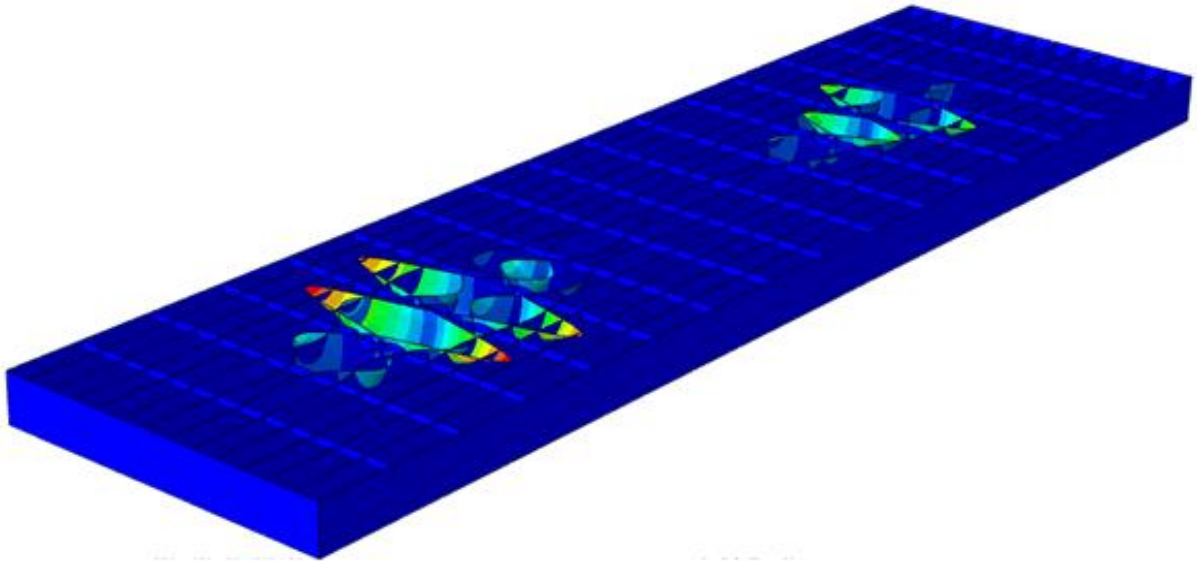
Figuur 127: Verhouding F_{cr}/F_{el} t.g.v. een geconcentreerde last in relatie tot het aantal draagstaven. In rood wanneer er sprake is van lokale-kipinstabiliteit en in zwart wanneer er sprake is van globale-kipinstabiliteit

Figuur 127 laat zien dat naarmate het aantal draagstaven toeneemt, de verhouding tussen de kritische-kiplast en de elastische belasting naar een limiet toeloopt. Dit punt ligt voor de persroostergeometrieën met draagstaafhoogtes 50 en 60 mm op 10 draagstaven en voor persroostergeometrieën met draagstaafhoogtes van 30 en 40 mm op 12 draagstaven. Dit fenomeen kan verklaard worden doordat het aantal niet belaste draagstaven toeneemt, hierdoor wordt de laterale steun die de belaste draagstaven ontvangen van de niet belaste draagstaven steeds groter. Hierdoor is ontstaan er een overgang tussen *globale*, zie Figuur 128 en *lokale-kipinstabiliteit*, zie Figuur 129. Het zelfde fenomeen was zichtbaar in de beschouwing van een draagstaaf.



Figuur 128: Globale-kipinstabiliteit in een persrooster met twee geconcentreerde lasten van 100 bij 100 mm^2

Bij *globale-kipinstabiliteit* wordt de kiplast bepaald door de laterale stijfheid van het gehele rooster. Extra draagstaven voegen hierbij stijfheid toe. Deze hogere stijfheid zorgt ervoor dat *globale kipinstabiliteit* meer tegengewerkt wordt, waardoor de kiplast toeneemt.

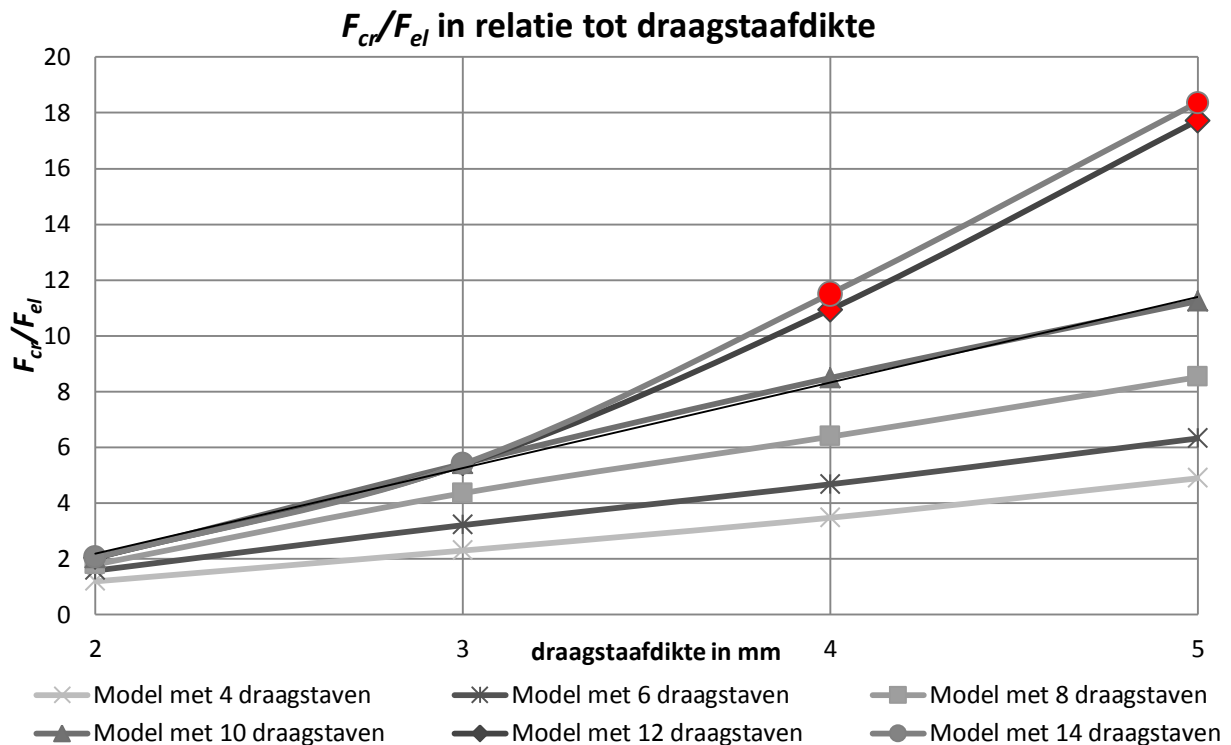


Figuur 129: Lokale-kipinstabiliteit in een persrooster met twee geconcentreerde lasten van 100 bij 100 mm²

Bij *lokale-kipinstabiliteit* is er voldoende laterale stijfheid in het persrooster om *globale-kipinstabiliteit* niet te laten optreden. De kiplast wordt bepaald door de kipegevoeligheid van de meest belaste draagstaven. Meer laterale stijfheid, door het toevoegen van extra draagstaven kan hierdoor de kiplast niet toelaten nemen.

8.3.2.2 Kipgedrag van een persrooster dat belast is door twee geconcentreerde lasten van 100 bij 100 mm², in relatie tot de draagstaafdikte.

In Figuur 130 staat de verhouding tussen de kritische-kiplast F_{cr} en de elastische belasting F_{el} in relatie tot de draagstaafdikte weergegeven. Deze beschouwing heeft plaatsgevonden aan de hand van Modeltype 2: Een persrooster met twee geconcentreerde lasten, zie Figuur 110. Het toegepaste model heeft de volgende geometrie: De draagstaafhoogte bedraagt 60 mm, de vulstaafhoogte en -dikte bedragen respectievelijk 10 en 2 mm en de vul- en draagstaafmaaswijdte bedragen respectievelijk 100 en 33.3 mm.



Figuur 130: Verhouding F_{cr}/F_{el} in relatie tot draagstaafdikte voor persroosters met 4, 6, 8, 10, 12 en 14 draagstaven. In rood wanneer er sprake is van lokale-kipinstabiliteit en in zwart wanneer er sprake is van globale-kipinstabiliteit.

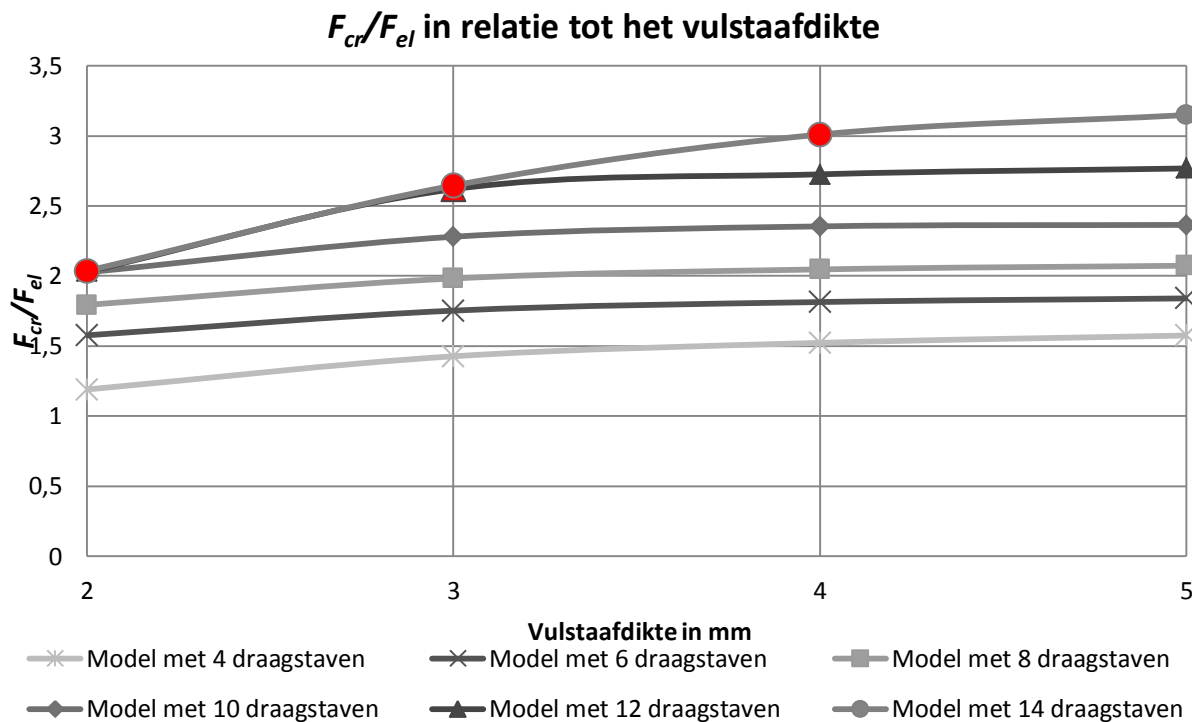
Uit Figuur 130 blijkt dat de verhouding tussen F_{cr}/F_{el} groter wordt naar mate de draagstavendikte toeneemt. De relatie tussen de verhouding F_{cr}/F_{el} en de draagstaafdikte is zo goed als lineaire voor persrooster modellen met 10 draagstaven of minder. Bij de twee persroosters modellen met 12 en 14 draagstaven is een ander verloop zichtbaar. Boven een draagstaafdikte van 3 mm neemt de verhouding F_{cr}/F_{el} sneller toe dan bij de andere modellen. Dit fenomeen heeft te maken met de kipvorm die optreedt.

Bij de persrooster modellen met 4 t/m 10 draagstaven is er sprake van *globale-kipinstabiliteit* bij ieder van de beschouwde draagstaafdiktes. In het geval van *globale-kipinstabiliteit* heeft de draagstaafdikte betrekkelijk weinig invloed op de kiplast. Dit kan verklaard worden doordat een toenemende draagstaafdikte de laterale stijfheid van een persrooster maar in beperkte mate doet toenemen.

Bij *lokale-kipinstabiliteit* is de invloed van de draagstaafdikte op de verhouding tussen F_{cr}/F_{el} veel groter. Dit kan verklaard worden doordat slankheid(DH/DD) van de draagstaven afneemt naarmate de draagstaafdikte toeneemt. De slankheid(DH/DD) van de draagstaven is bepalend voor de kiplast in het geval van *lokale-kipinstabiliteit*, zie ook paragraaf 5.4.

8.3.2.3 Kipgedrag van een persrooster dat belast is door twee geconcentreerde lasten van 100 bij 100 mm², in relatie tot het de vulstaafdikte

Figuur 131 staat de verhouding tussen de kritische-kiplast F_{cr} en de elastische belasting F_{el} in relatie tot de vulstaafstaafdikte weergegeven. Deze beschouwing heeft plaatsgevonden aan de hand van Modeltype 2: Een persrooster met twee geconcentreerde lasten, zie Figuur 110. Het toegepaste model heeft de volgende geometrie: De draagstaafhoogte en -dikte bedragen respectievelijk 60 en 2 mm, de vulstaafhoogte bedraagt 10 mm en de vul- en draagstaafmaaswijdten bedragen respectievelijk 100 en 33.3 mm.



Figuur 131: Verhouding F_{cr}/F_{el} in relatie tot het vulstaafdikte voor persroosters met 4, 6, 8, 10, 12 en 14 draagstaven.. In rood wanneer er sprake is van lokale-kipinstabiliteit en in zwart wanneer er sprake is van globale-kipinstabiliteit.

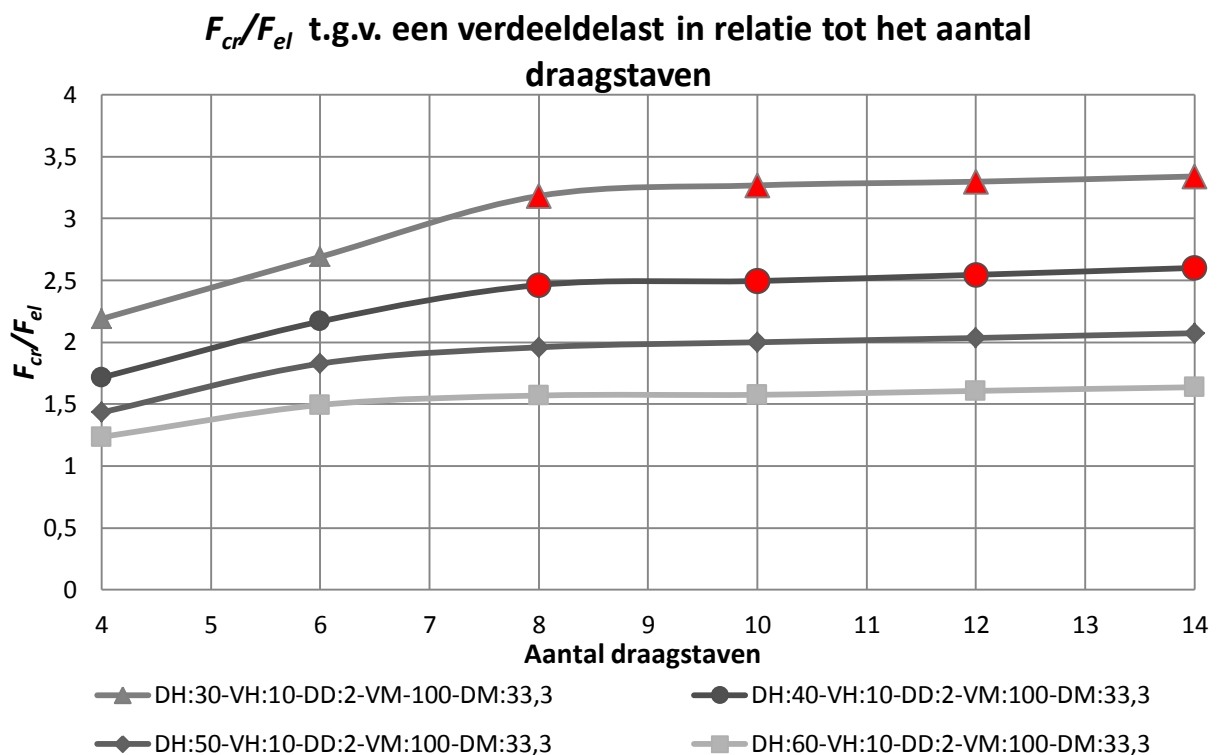
Uit Figuur 131 blijkt dat hoe dikker de vulstaaf, des te groter de verhouding F_{cr}/F_{el} . De verklaring hiervoor is dat hoe, dikker de vulstaaf hoe hoger de stijfheid van de vulstaven en hoe groter de steun die de vulstaven geven aan de belaste draagstaven, zie ook paragraaf 8.2.2. De bezwijkvorm is ook van invloed op de verhouding F_{cr}/F_{el} . Bij de modellen met van 10 t/m 14 draagstaven treedt er *lokale-kipinstabiliteit* bij een vulstaafdikte van 2 mm op. De verhouding F_{cr}/F_{el} is hierdoor voor deze drie modellen gelijk.

Bij een persroostermodel met 14 draagstaven treedt *lokale-kipinstabiliteit* op bij vulstaafdiktes van 2 t/m 4 mm. Zichtbaar is dat de verhouding F_{cr}/F_{el} hier sneller toeneemt dan bij de

modellen waarbij *globale-kipinstabiliteit* optreedt. Dit toont aan dat de invloed van de vulstaafdikte op de verhouding F_{cr}/F_{el} groter is bij *lokale-kipinstabiliteit* dan bij *globale-kipinstabiliteit*. Dit fenomeen is ook geconstateerd bij de beschouwing van een enkele draagstaaf, zie paragraaf 8.2.1.

8.3.2.6 Kipgedrag van een persrooster dat belast is door een verdeelde belasting op het gehele oppervlak, in relatie tot het aantal draagstaven

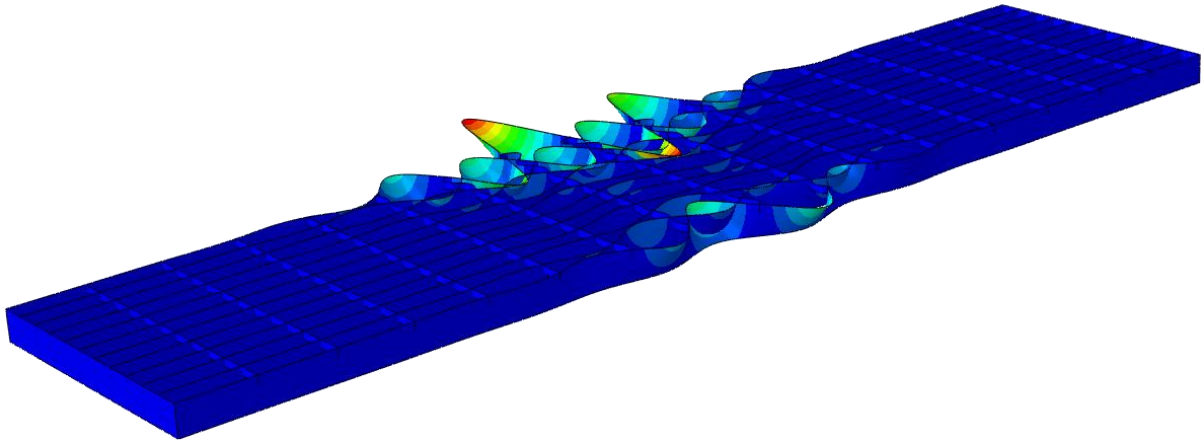
In Figuur 132 staat de verhouding tussen de kritische-kiplast F_{cr} en de elastisch belasting F_{el} in relatie tot het aantal draagstaven weergegeven voor vier verschillende persroostergeometrieën, met draagstaafhoogtes van 30, 40, 50 en 60 mm. Deze beschouwing heeft plaatsgevonden aan de hand van Modeltype 2: Een persrooster met een verdeelde last over het gehele oppervlak, zie Figuur 111.



Figuur 132: Verhouding F_{cr}/F_{el} t.g.v. een verdeelde last in relatie tot het aantal draagstaven. In rood wanneer er sprake is van lokale-kipinstabiliteit en in zwart wanneer er sprake is van globale-kipinstabiliteit.

Uit Figuur 132 blijkt dat de verhouding F_{cr}/F_{el} van de twee modellen met draaghoogtes van 50 en 60 mm beperkt afhankelijk van de het aantal draagstaven is. Dit in tegenstelling tot de twee modellen met draaghoogtes van 30 en 40 mm. Dit kan verklaard worden doordat bij deze modellen sprake is van een overgang van *globale* naar *lokale-kipinstabiliteit*. Dat er sprake is van deze overgang is opmerkelijk omdat de draagstaven gelijkmatig belast worden. Het is hierdoor te verwachten dat er altijd *globale-kipinstabiliteit* optreedt.

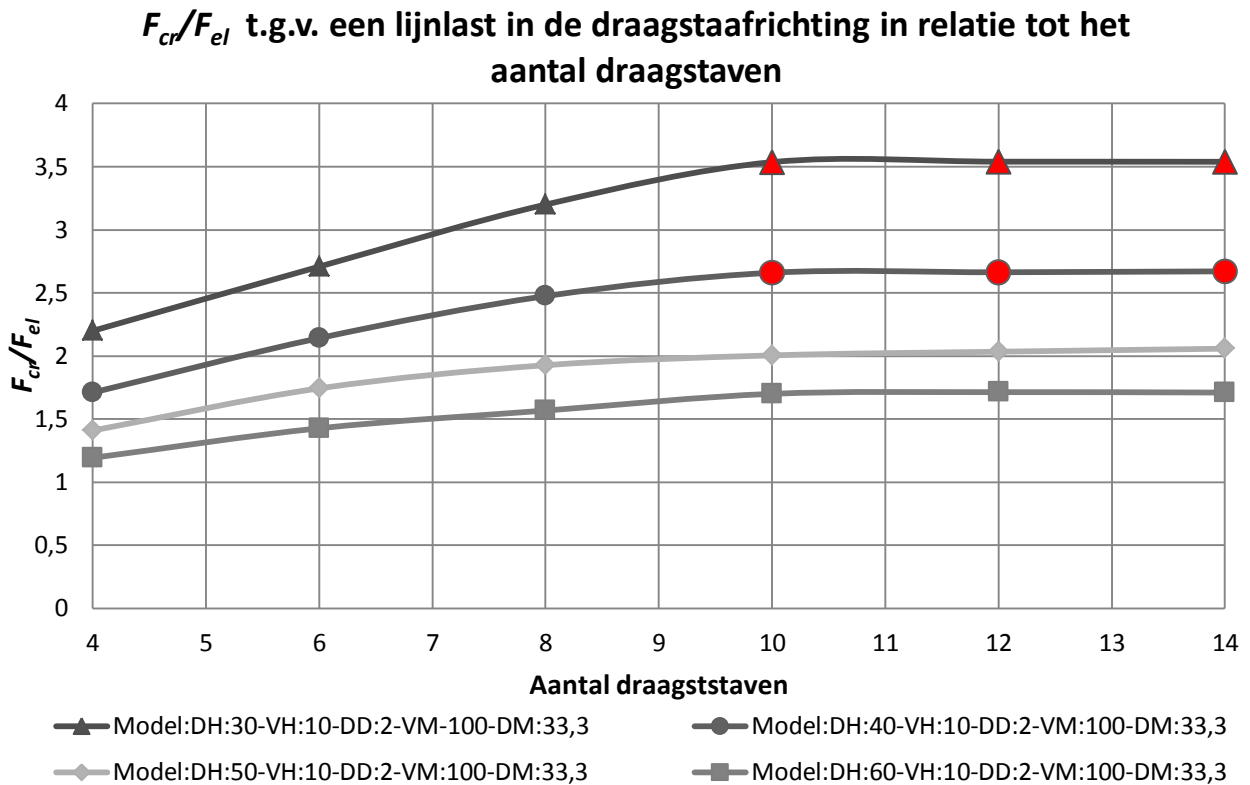
Figuur 133 laat zien dat *lokale-kipinstabiliteit* optreedt in de buitenste twee draagstaven, het instabiliteitsfenomeen manifesteert zich op een ander locatie dan bij de modellen met de twee geconcentreerde lasten, zie Figuur 129. Een verklaring voor deze locatie is dat de twee buitenste draagstaven maar aan één zijde gesteund worden door de vulstaven.



Figuur 133: Lokale-kipinstabiliteit in een persrooster met een verdeelde belasting

8.3.2.2 Kipgedrag van een persrooster dat belast is door een lijnlast haaks op de draagstaafrichting, in relatie tot het aantal draagstaven

In Figuur 134 staat de verhouding tussen de kritische-kiplast F_{cr} en de elastisch belasting F_{el} in relatie tot het aantal draagstaven weergegeven voor vier verschillende persroostergeometrieën, met draagstaafhoogtes van 30, 40, 50 en 60 mm. Deze beschouwing heeft plaats gevonden aan de hand van Modeltype 2: Een persrooster met een lijnlast, zie Figuur 112.

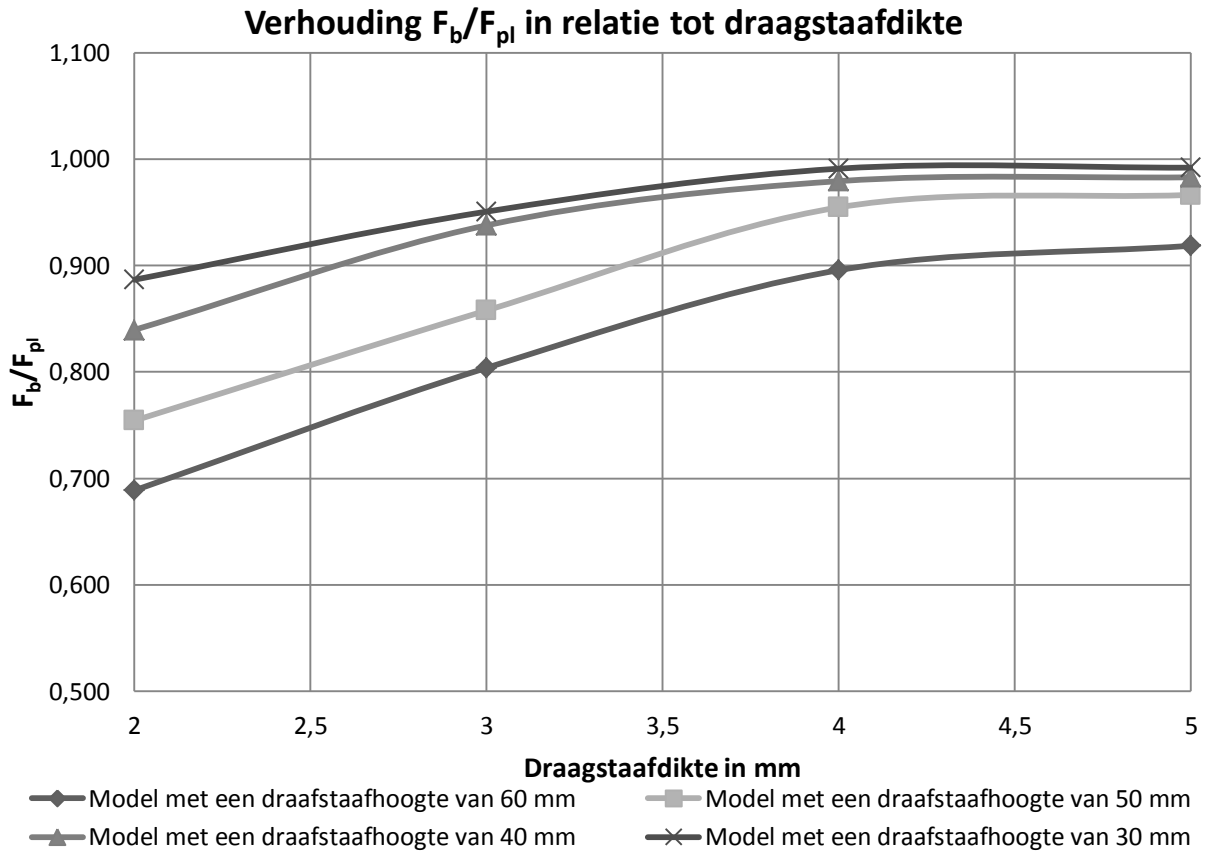


Figuur 134: Verhouding F_{cr}/F_{el} t.g.v. een lijnlast haaks op de draagstaafrichting, in relatie tot het aantal draagstaven. In rood wanneer er sprake is van lokale-kipinstabiliteit en in zwart wanneer er sprake is van globale-kipinstabiliteit.

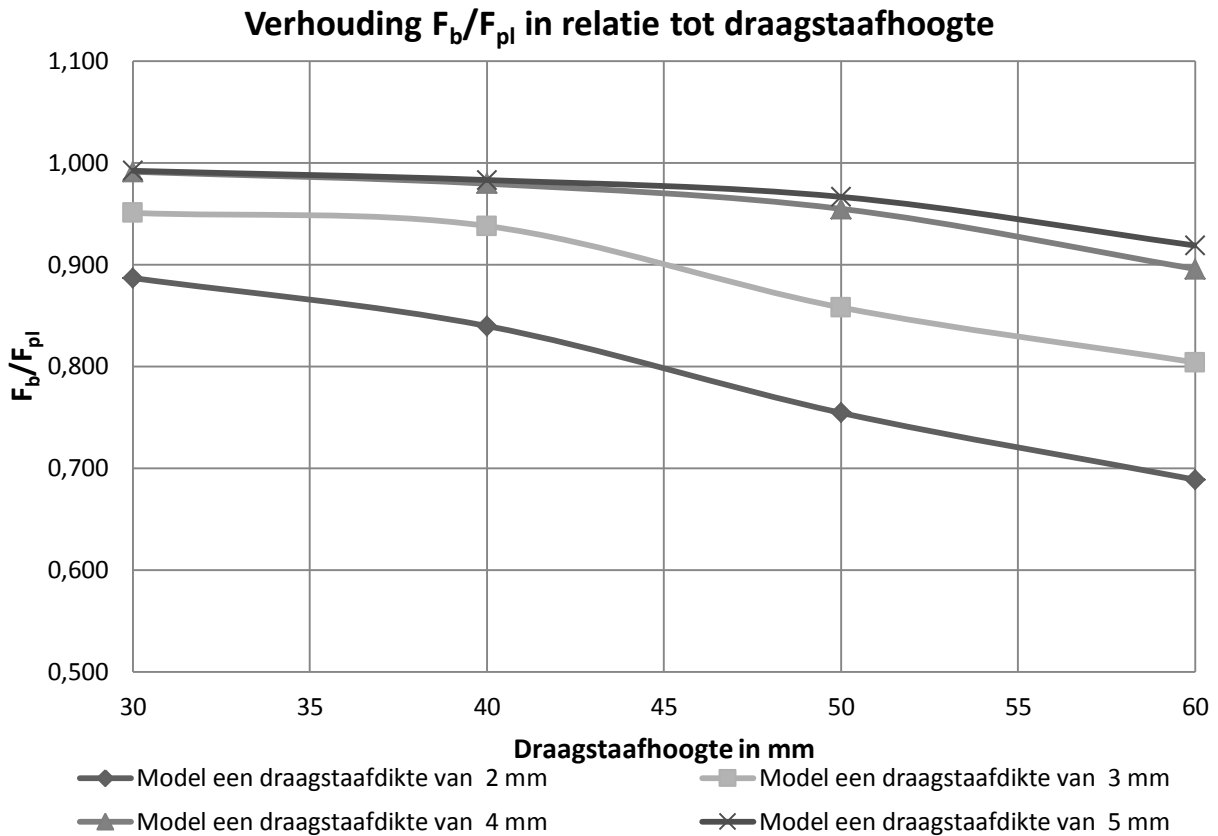
De relatie tussen de verhouding F_{cr}/F_{el} en het aantal draagstaven is vergelijkbaar met de relatie zoals gevonden bij een verdeelde belasting. Ook is er sprake van een overgang van globale naar lokale-kipinstabiliteit bij de modellen met draagstaafhoogtes van 30 en 40 mm. De locatie waar lokale-kipinstabiliteit, zie Figuur 133, optreedt is analoog aan de locatie in het geval van een verdeelde belasting.

8.4 Plastische capaciteit in persroosters

In Figuur 135 en Figuur 136 staat de verhouding de bezwijklast F_b en plastische last F_{pl} in relatie tot respectievelijk draagstaafhoogte en -dikte weergegeven voor vier verschillende persroostergeometrieën, met draagstaafhoogtes van 30, 40, 50 en 60 mm. Deze beschouwing heeft plaats gevonden aan de hand van Modeltype 2: Een persroosters met een vaste breedte en twee lijnlasten, zie Figuur 113. In dit model zijn alle draagstaven even zwaarbelast.



Figuur 135: Verhouding F_b/F_{pl} voor vier verschillende persroostergeometrieën, met draagstaafhoogtes van 30, 40, 50 en 60 mm, in relatie tot draagstaafdikte



Figuur 136: Verhouding F_b/F_{pl} voor vier verschillende persroostergeometrieën, met draagstaafhoogtes van 30, 40, 50 en 60 mm, in relatie tot draagstaafhoogte

Uit Figuur 135 en Figuur 136 blijkt dat hoe, groter de draagstaafdikte en hoe kleiner de draagstaafhoogte, des te dichter het vol plastische moment benaderd wordt. Uit de figuren blijkt dat persroosters met draagstaafhoogtes van respectievelijk 30 en 40 mm en met draagstaafdiktes van respectievelijk 4 en 5 mm, het vol plastische moment tot bijna 100% benaderen.

Aan de hand van een model met een vul- en draagstaafmaaswijdte van 33.3 mm en draagstaafhoogte en -dikte van 60 bij 2 mm, zie bijlage C blijkt dat de verhouding F_b/F_{pl} gelijk is aan 0.96. Dit betekent dat het vol plastische moment tot 96% benaderd wordt. In het geval van een vulstaafmaaswijdte van 100 mm is deze waarde van 0.69, zie Figuur 135. Dit illustreert het effect van de vulstaafmaaswijdte op de bezwijklast.

Er kan gesteld worden dat hoe, gedrongener de draagstaven en hoe, kleiner de vulstaaf- en draagstaafmaaswijdte, des te dichter het vol plastische moment benaderd kan worden. Dit betekent dat voor persroosters een vul- en draagstaafmaaswijdte van 33.3 mm en met draagstaafhoogtes van 60 mm of minder en met draagstaafdiktes van 2 mm of meer het vol plastische moment tot 96% of meer benaderd kan worden.

8.5 Bespreking resultaten parametrische onderzoek

In het constructief gedrag van persroosters is de soort kipinstabiliteit, namelijk *globaal* of *lokaal* een zeer bepalende factor. Het soort kipinstabiliteit wat optreedt hangt van twee variabelen af, namelijk persroostergeometrie en belasting type.

8.5.1 Conclusie kipgedrag van een enkele draagstaaf gesteund door vulstaven

Er zijn twee aspecten aan te wijzen die invloed hebben op de kiplast van een draagstaaf. Ten eerste de kiplengte, deze lengte wordt primair beïnvloed door de laterale stijfheid. In een persrooster komt deze stijfheid voort uit de niet direct belaste draagstaven. Boven een bepaalde kritische stijfheid is deze stijfheid niet meer van invloed op het kipmoment. Dit heeft te maken met de overgang van *globale* naar *lokale-kipinstabiliteit*, omdat bij *lokale-kipinstabiliteit* de kiplengte niet meer gereduceerd kan worden door een hogere laterale stijfheid.

Het tweede aspect is de rotatieweerstand in de vulstaven. Deze weerstand verhoogt het kipmoment doordat de vulstaaf mee moet vervormen. Niet iedere rotatieweerstand om ieder as heeft de zelfde invloed. Deze invloed hangt sterk af van welke vorm van kipinstabiliteit er optreedt. Bij *lokale-kipinstabiliteit* is vulstaafdikte het meest van invloed op het kipmoment, en bij *globale-kipinstabiliteit* de vulstaafhoogte.

8.5.2 Conclusie kipgedrag van persroosters

8.5.2.1 Invloed van het type belasting op het kipgedrag

Het kipgedrag van een persrooster wordt mede bepaald door het soortbelasting. Het kipgedrag t.g.v. een geconcentreerde last is complexer dan het gedrag in het geval van een verdeelde of een lijnlast haaks op de draagstaven. In het geval van een geconcentreerde last is er een aantal draagstaven waarop de kiplast niet verder toeneemt bij. Dit punt wordt bereikt wanneer er sprake is van een overgang van *globale* naar *lokale-kipinstabiliteit*. Bij deze overgang speelt de laterale stijfheid in het persrooster een belangrijke rol.

Het kipgedrag t.g.v. een verdeelde en last haaks op de draagstaafrichting is analoog. Twee modellen met draagstaafhoogtes van 50 en 60 mm laten geen overgang van *globale* naar *lokale-kipinstabiliteit* zien. Dit in tegenstelling tot de modellen draagstaafhoogtes van 30 en 40 mm. De *lokale-kipinstabiliteit* ontstond t.p.v. de twee buitenste draagstaven, zie Figuur 133. In de praktijk is het maar zeer de vraag of hier instabiliteit kan optreden omdat de twee buitenste draagstaven gesteund worden door de randstaven, zie Figuur 5.

8.5.2.1 Invloed van het aantal draagstaven op het kipgedrag

In het algemeen kan gesteld worden dat hoe, meer draagstaven, des te hoger de kiplast. Dit heeft te maken met dat het aantal draagstaven invloed heeft op de laterale stijfheid in een persrooster. Bepalend voor de invloed is de vorm van kipinstabiliteit die optreedt. Bij *globale-kipinstabiliteit* is de invloed veel groter dan bij *lokale-kipinstabiliteit*, omdat *globale-kipinstabiliteit* beïnvloed wordt door de laterale stijfheid in een persrooster. In persroosters komt deze stijfheid van de niet direct belaste draagstaven die steun kunnen geven aan de direct belaste draagstaven.

8.5.2.1 Invloed van de slankheid(DH/DD) van de draagstaven op het kipgedrag

De slankheid van de draagstaven speelt een aanzienlijke rol in de grootte van de kiplast. Hoe slanker, de draagstaaf des te lager de kiplast. Bepalend voor de uiteindelijke invloed is het soort kipinstabiliteit. Bij *lokale-kipinstabiliteit* is de invloed van de slankheid van de draagstaven, op de kiplast veel groter dan bij *globale-kipinstabiliteit*.

8.5.2.1 Invloed vulstaafdikte op het kipgedrag

In het algemeen kan gesteld worden dat hoe dikker de vulstaven des te hoger de kiplast. Bepalend voor de uiteindelijke invloed is de vorm van kipinstabiliteit die optreedt. De vulstaafdikte heeft in het geval van *lokale-kipinstabiliteit* meer invloed op de kiplast dan bij *globale-kipinstabiliteit*.

8.5.3 Conclusie plastische capaciteit van persroosters

Bepalend voor de plastische capaciteit van persroosters is het uitblijven van kipinstabiliteit. Hierbij spelen de slankheid van de draagstaven en de vulstaafmaaswijdte een rol. Het soort kipinstabiliteit wat optreedt heeft hierbij ook invloed omdat dit aspect invloed heeft op de kiplast.

Er kan gesteld worden dat voor persroosters met vul- en draagstaafmaaswijdtes van 33.3 mm en draagstaafhoogtes van 60 mm of minder sprake is van aanzienlijke plastische capaciteit. Het zelfde geldt voor persroosters met draagstaafhoogtes van 30 mm of minder en draagstaafdiktes van meer dan 4 mm.

9 Conclusies en aanbevelingen

Dit onderzoek is toegespitst op twee doelstellingen. De eerste doelstelling is het onderzoeken van het constructief gedrag van persroosters. De tweede doelstelling is te bepalen in hoeverre een plastische berekeningsmethodiek toegepast kan worden op persroosters. Deze twee doelstellingen zijn respectievelijk in paragraaf 9.1 en 9.2 behandeld. De aanbevelingen voor vervolgonderzoek staan in paragraaf 9.3 beschreven.

9.1 Conclusies m.b.t. het constructief gedrag van persroosters

Er zijn drie bezwijkmechanismes die in persroosters voorkomen. De eerste twee bezwijkmechanismes zijn vormen van instabiliteit, namelijk: *globale-kipinstabiliteit*, zie het onderste figuur van Figuur 34 en *lokale-kipinstabiliteit*, zie het bovenste figuur van Figuur 34. Het derde bezwijkmechanisme is bezwijken t.g.v. een mechanisme veroorzaakt door het ontstaan van plastische scharnieren in de draagstaven, zie paragraaf 5.2. Welk bezwijkmechanisme optreedt wordt bepaald door drie aspecten. Het eerste aspect is de persroostergeometrie. Het tweede aspect is het soort belasting: een geconcentreerde of verdeelde last. Het laatste aspect is de werking van de persverbinding. Hierbij speelt vooral het wel- of niet-verzinken een rol. Voor het bepalen van het constructief gedrag van een individueel persrooster dienen al deze drie aspecten beschouwd te worden. Vanwege de grote diversiteit in persroostergeometrieën is het constructief gedrag van persroosters heel divers.

In paragraaf 9.1.1 is de invloed van de persroostergeometrie op het constructief gedrag besproken, in paragraaf 9.1.2 is de invloed het soort belasting op het constructief gedrag besproken en in paragraaf 9.1.3 is de invloed van de persverbinding op het constructief gedrag behandeld.

9.1.1 Invloed van de persroostergeometrie op het constructief gedrag

Over het algemeen kan gesteld worden dat *globale en lokale-kipinstabiliteit* optreden bij persroosters met slanke draagstaven en grote vulstaafmaaswijdtes. Bij voldoende laterale stijfheid van een persrooster treedt er *lokale* i.p.v. *globale-kipinstabiliteit* op. Deze laterale stijfheid komt voort uit de niet-belaste draagstaven. Bezwijken t.g.v. een mechanisme door het ontstaan van plastische scharnieren in de draagstaven treedt op in persroosters met gedrongen draagstaven en kleine vulstaafmaaswijdtes. Het is niet mogelijk om een concrete draagstaafslankheid(DH/DD) en vulstaafmaaswijdte te benoemen waarbij de overgang tussen bezwijken t.g.v. instabiliteit en bezwijken t.g.v. een mechanisme optreedt. De reden hiervoor is dat de gehele persroostergeometrie bij deze overgang een rol speelt.

9.1.2 Invloed van het soort belasting op het constructief gedrag

De invloed het soort belasting: geconcentreerde of verdeelde last, op het constructief gedrag valt terug te herleiden naar de mate waarin de draagstaven in een persrooster gelijk-belast worden.

Het soort belasting heeft invloed op het constructief gedrag van een draagstaaf wanneer er bezwijken t.g.v. een mechanisme door het ontstaan van plastische scharnieren optreedt in een persrooster. Dit heeft te maken met de statisch bepaaldheid van een draagstaaf. Bij een verdeelde last is er altijd sprake van een gelijke belasting in alle draagstaven. In dit geval is

een draagstaaf statisch bepaald omdat de last niet herverdeeld kan worden over minder belaste draagstaven. Bij een geconcentreerde last bij een persroostergeometrie met een beperkte herverdelingscapaciteit is er sprake van een niet-gelijke belasting in alle draagstaven. In dit geval is een draagstaaf statisch onbepaald, omdat de last herverdeeld kan worden over minder belaste draagstaven.

Het soort belasting heeft ook invloed op het soort instabiliteit wat op treedt wanneer er sprake is van bezwijken t.g.v. instabiliteit. Bij een gelijke belasting in alle draagstaven in een persrooster treedt er in bijna alle persroosters *globale* i.p.v. *lokale-kipinstabiliteit* op. In het geval van niet-gelijk belaste draagstaven kan er zowel *globale*-als *lokale-kipinstabiliteit* optreden. Bepalend hierbij is de laterale stijfheid van de niet-belaste draagstaven van het betreffende persrooster.

9.1.3 Invloed van de persverbinding op het constructief gedrag

In de onderstaande opsomming is de invloed van de persverbinding op het constructief gedrag puntsgewijs toegelicht.

1. Invloed van de persverbinding op initiële stijfheid en sterkte.

De krachtsoverdracht in het bovenste deel van de draagstaaf wordt bemoeilijkt door de persverbinding, omdat er maar beperkt contact tussen de vul- en draagstaven is. De effectieve draagstaafhoogte ligt dus altijd lager dan de bruto draagstaafhoogte maar wel hoger dan de netto draagstaafhoogte, zie paragraaf 6.7.3.

Bij de grootte van de effectieve draagstaafhoogte spelen drie aspecten een rol. Het eerste aspect is de hoogte van de persverbinding t.o.v. de draagstaafhoogte, hoe groter de hoogte van de persverbinding t.o.v. de draagstaafhoogte des te lager de effectieve draagstaafhoogte. Het tweede aspect is het aantal persverbindingen in een draagstaaf, hoe groter het aantal persverbindingen des te lager de effectieve draagstaafhoogte. Het derde aspect is het wel- of niet-verzinken. Het verzinken verhoogt effectieve draagstaafhoogte. De reden hiervoor is dat het zink ruimtes opvult die aanwezig zijn tussen de draag- en vulstaven in de persverbinding. Hierdoor is er een betere krachtsoverdracht in deze verbinding mogelijk. Deze invloed is zo groot dat het verzinken de draagkracht kan verdubbelen, zie paragraaf 6.7.3. Men kan het zink dus beschouwen als een constructieve verflaag.

2. Dichtdrukken van de persverbinding t.g.v. een kromming van de draagstaaf

De persverbinding wordt niet dichtgedrukt t.g.v. een kromming van de draagstaaf, bij acceptabele vervormingen van een persrooster. Het is aannemelijk dat er een kromming van de draagstaaf is waarbij de persverbinding uiteindelijk wel dichtgedrukt wordt.

3. Invloed van het verzinken op het instabiliteitsgedrag

Het wel- of niet-verzinken heeft invloed op het soort instabiliteit dat optreedt. De reden hiervoor is dat de persverbinding invloed heeft op de laterale stijfheid van een persrooster. Deze stijfheid komt deels voort uit een soort vierendeelwerking. Bij deze

vierendeelwerking speelt de stijfheid van de verbinding tussen de draag- en vulstaven, om de zwakke as van de vulstaven een belangrijke rol. Bij niet-verzinkte persroosters is de stijfheid van deze verbinding beperkt. Hierdoor worden de draagstaven minder gesteund tegen instabiliteiten en is het persrooster eerder geneigd tot *globale* i.p.v. *lokale-kipinstabiliteit*.

Bij de zojuist genoemde conclusies dient aangetekend te worden dat het onderzoek is uitgevoerd op persroosters van *Staco Holding b.v.*. Het is mogelijk dat voor persroosters van een andere producenten de persverbinding anders in elkaar steekt. Hierdoor kan de invloed van de persverbinding op het constructief gedrag enigszins anders zijn. Ook is de invloed van vermoeiing, productietoleranties en corrosie van de persverbinding op het constructief gedrag niet beschouwd.

9.2 Toepasbaarheid van een plastische berekeningsmethodiek

Bepalend voor de toepasbaarheid van een plastische berekeningsmethodiek is de aanwezigheid van plastische capaciteit in persroosters. De plastische capaciteit hangt sterk af van de persroostergeometrie. Bepalend hierbij is de weerstand tegen kipinstabiliteit. Over het algemeen kan gesteld worden, dat hoe gedrongener de draagstaven en hoe kleiner de vul- en draagstaafmaaswijdtes in een persrooster des te groter de plastische capaciteit.

De plastische capaciteit van persroosters is onderzocht aan de hand van een FEM methodiek. De precisie van deze methodiek staat beschreven in paragraaf 9.2.1. De conclusie m.b.t. de toepasbaarheid van een plastische berekeningsmethodiek staat beschreven in paragraaf 9.2.2.

9.2.1 Numerieke nauwkeurigheid

Het hoofdstuk *numerieke bepaling van de draagkracht* toont aan dat de bezwijklast binnen een marge van ongeveer 10% bepaald kan worden voor verzinkte persroosters op basis van FEM modellen met bruto draagstaafhoogtes. Deze methodiek is daarentegen niet toepasbaar op niet-verzinkte persroosters. Om de draagkracht te bepalen van niet-verzinkte persroosters dient de invloed van de persverbinding op stijfheid en sterkte beschouwd te worden. Het is dus mogelijk om aan de hand van een numerieke methodiek de draagkracht van verzinkte persroosters met een goede nauwkeurigheid te berekenen. Bij deze conclusie dient aangetekend te worden dat persroosters met draagstaafhoogtes van minder dan 30 mm niet beproeft zijn. Hoe groter de hoogte van de persverbinding t.o.v. de draagstaafhoogte, des te groter de invloed van de persverbinding op de sterkte, zie paragraaf 1.1. Het is hierdoor aannemelijk dat de nauwkeurigheid van de toegepaste FEM methodiek afneemt naarmate de hoogte van de persverbinding groter wordt t.o.v. de draagstaafhoogte. Voorts is het niet bekend in hoeverre het gedrag van de persverbinding constant is. Hierbij spelen productietoleranties in het persen van de persverbinding en het verzinken een rol.

9.2.2 De mate van plastische capaciteit in daadwerkelijk geproduceerde persroosters

Met behulp van de FEM-modellen is op basis van een stuklijst zie Tabel 2, een schatting gemaakt in hoeverre plastische capaciteit aanwezig is in daadwerkelijk geproduceerde persroosters. Uit deze analyse blijkt dat in 72% van de geleverde persroosters de plastische

capaciteit in een draagstaaf benaderd kan worden tot 96% of meer. Dit wil echter niet zeggen dat in 72% van de geproduceerde persroosters de plastische capaciteit daadwerkelijk benut kan worden. De afmetingen van de draagstaven kunnen namelijk zowel door doorbuiging of door sterkte bepaald worden. Hierbij spelen de draagstaafhoogte en overspanningslengte rol, zie paragraaf 4.4. Wanneer doorbuiging maatgevend is, heeft een plastische berekeningsmethodiek geen toegevoegde waarde, omdat deze alleen de rekenkundige sterkte vergroot.

9.3 Aanbevelingen

Op basis van dit onderzoek is het nog niet mogelijk om een plastische berekeningsmethodiek toe te passen op persroosters. De proeven hebben namelijk laten zien dat de persverbinding een aanzienlijke invloed kan hebben op de plastische sterkte. Het is onduidelijk of en hoe de sterkte van de persverbinding beïnvloed wordt door vermoeiing, corrosie en productietoleranties.

In paragraaf 9.3.1 is het vervolgonderzoek beschreven dat noodzakelijk is voor de ontwikkeling van een plastische berekeningsmethodiek en in paragraaf 9.3.2 is het vervolgonderzoek m.b.t. het verder optimaliseren van persroosters beschreven.

9.3.1 Onderzoek m.b.t. de ontwikkeling van een plastische berekeningsmethodiek

In de onderstaande opsomming staan de drie vervolgonderzoeken die voor het ontwikkelen van een plastische berekeningsmethodiek nodig zijn toegelicht.

1. Onderzoek naar de werking van de persverbinding

De centrale vraag in dit vervolgonderzoek is de mate waarin de volledige hoogte van de draagstaaf bijdraagt aan de momentcapaciteit en welke parameters hierin een rol spelen. De mate waarin de volledige hoogte van de draagstaaf bijdraagt aan de momentcapaciteit is afhankelijk van de wijze waarop de ruimtes in de persverbinding gevuld worden.

De persverbinding ontleent zijn stijfheid en sterkte aan het contact t.g.v. het 'koudvervormen' van de vul- en draagstaaf en aan het verzinken. De tweede vraag is hoe groot de bijgedragen van ieder van deze twee aspecten aan stijfheid en sterkte van de persverbinding zijn.

Bij de twee net genoemde vragen speelt de invloed van productietoleranties een rol. Zo spelen bij het contact dat ontstaat t.g.v. het koudvervormen de breedte van de inkeping en de dikte van de vulstaaf een rol. Ook speelt bij de invloed van het verzinken zowel de procedure, als de chemische samenstelling van het zinkbad een rol. Hierdoor is het de vraag hoe stabiel de eigenschappen van de persverbinding zijn over persroosters met verschillende productiedata.

Dit onderzoek zou uitgevoerd kunnen worden middels het beproeven van persroosters met een last over de gehele breedte, hierdoor speelt de herverdeling geen rol. Door middel van het vergelijken van de stijfheid en sterkte van de proefstukken met de stijfheid en sterkte van een analytische- of FEM oplossing kan de invloed van de persverbinding op initiële stijfheid en sterkte bepaald worden. Hierdoor is mogelijk om de invloed van de draagstaafdikte en productietolerantie, op de werking van de persverbinding te onderzoeken.

2. Onderzoek naar de invloed van vermoeiing en corrosie

Het is aannemelijk dat er na verloop van tijd vermoeiing en corrosie optreedt in persroosters. Vermoeiing ontstaat t.g.v. spanningswisselingen door belastingcycli. In de grootte van de spanningswisselingen speelt de persverbinding waarschijnlijk een belangrijke rol. Er zijn twee soorten vermoeiing^[12], namelijk: *low* en *high cycle fatigue*. *Low cycle fatigue* is vermoeiing die ontstaat t.g.v. een beperkt aantal belastingswisselingen waarbij de spanningswisselingen optreden in het plastisch gebied. *High cycle fatigue* is vermoeiing die ontstaat t.g.v. een groot aantal belastingswisselingen waarbij de spanningswisselingen optreden in het elastisch gebied. Het optreden van *high cycle fatigue* in persroosters is minder voor de hand liggend dan *low cycle fatigue*. Hiervoor zijn twee redenen aan te wijzen. Ten eerste zijn ervoor het optreden van *high cycle fatigue* een groot aantal belastingswisselingen noodzakelijk. Ten tweede is het optreden van *low cycle fatigue* waarschijnlijker vanwege de aanwezigheid van restspanningen t.g.v. het persen van de persverbinding. Het is aannemelijk dat deze restspanningen gelijk zijn aan de vloeigrens. Ook is er mogelijk dat er spanningsconcentraties t.g.v. de geometrie van de persverbinding ontstaan.

Een ander aspect is de corrosiegevoeligheid. Zoals zichtbaar is in Figuur 9, kan de zinklaag na verloop van tijd corroderen. Door het corroderen wordt de draagkracht aangetast. Hierbij kunnen zowel de draag- en vulstaven als de persverbinding aangetast worden.

De centrale vraag in dit vervolgonderzoek is hoeverre vermoeiing en corrosie een rol spelen in persroosters. De belasting- en spanningswisselingen kunnen met behulp van een FEM methode in kaart gebracht worden. Ook is mogelijk vermoeiingsproeven uit te voeren en aan de hand van deze proeven de gevoeligheid voor vermoeiing te bepalen. De corrosiegevoeligheid kan aan de hand van een literatuuronderzoek onderzocht worden. Ook is het mogelijk persroosters met corrosie te beproeven

3. Uitgebreid parametrisch onderzoek

Aan de hand van een parametrisch onderzoek is het mogelijk de invloed van de persroostergeometrie op de plastische capaciteit te vangen in ontwerptabellen. In de plastische capaciteit dient de invloed van productietoleranties, vermoeiing en corrosie beschouwd te worden. Zoals uit het parametrisch onderzoek bleek is de draagkracht afhankelijk van de totale persroostergeometrie. Het doel van dit onderzoek is daarom dan ook om de plastische capaciteit afhankelijk te maken van de gehele persroostergeometrie, in plaats van alleen de draagstaafhoogte- en dikte en de draagstaafwijdte.

9.3.2 Vervolgonderzoek m.b.t. verdere optimalisatie van persroosters

Er zijn twee vervolgonderzoeken aan te wijzen m.b.t. het verder optimaliseren van persroosters. Het eerste onderzoek betreft een onderzoek naar de herverdeling van een geconcentreerde last over de draagstaven. Het tweede vervolgonderzoek betreft het herontwerpen van de persverbinding.

1. Onderzoek naar de herverdeling van een geconcentreerde last over de draagstaven buiten het belastingsgebied

Tabel 1 van de [RAL-GZ-638] geeft aan in welke mate een geconcentreerde last zich verdeelt over draagstaven buiten het belastingsgebied. De proefresultaten suggereren dat deze tabel in veel gevallen te conservatief is. Het kunnen aantonen van een betere herverdeling dan volgens de [RAL-GZ-638] heeft veel economisch potentieel. Een betere herverdeling verhoogt namelijk zowel de stijfheid als de sterkte wanneer er sprake is een geconcentreerde last. In de praktijk is dit type belasting vooral bepalend voor de dimensies van de draagstaven, zie ook paragraaf 3.3. Door de betere herverdeling is er bij iedere overspanning sprake van een toename in draagkracht.

Het doel van dit vervolgonderzoek is om de herverdelingstabel van de [RAL-GZ-638] afhankelijk te maken van meer dan alleen de draagstaafhoogte. Het is waarschijnlijk dat alle productievariabelen, zie Tabel 1, een rol spelen in de herverdeling van een geconcentreerde last. Om dit onderzoek te kunnen uitvoeren is meer begrip van de werking van de persverbinding wenselijk, maar waarschijnlijk niet noodzakelijk. Het is aantrekkelijk om dit onderzoek tegelijkertijd uit te voeren met ontwikkeling van een plastische berekeningsmethodiek, omdat in beiden onderzoeken de invloed van de persroostergeometrie op de draagkracht beschouwd dient te worden.

2. Onderzoek naar een effectievere persverbinding

De persverbinding reduceert de stijfheid en de sterkte van een draagstaaf. De persverbinding functioneert vooral slecht wanneer een persrooster niet verzinkt wordt, omdat er maar beperkt sprake is van contact tussen de draag- en vulstaaf in de persverbinding.

Door een herontwerp van de persverbinding is het mogelijk het contact tussen de draag- en vulstaaf in de persverbinding te vergroten. Hierdoor wordt de effectieve draagstaafhoogte groter, waardoor de draagkracht toeneemt. Een bijkomend voordeel van een grotere effectieve draagstaafhoogte is dat het mogelijk wordt om niet- verzinkte persroosters op een grotere schaal toe te passen. Dit is aantrekkelijk voor bijvoorbeeld persroosters die uit roestvrij- of weervast staal gefabriceerd zijn, omdat het verzinken in het geval van deze staalkwaliteiten niet noodzakelijk is.

In het herontwerp dient er rekening gehouden te worden met de produceerbaarheid van de persverbinding. Vooral de vorm van de inkeping in de draagstaven speelt hierbij een belangrijke rol. Het is aannemelijk dat er een evenwicht tussen constructieve effectiviteit en produceerbaarheid gevonden dient te worden.

- [1] Theodore V. Galambos- Guide to stability design criteria for metal structures, John Wiley & Sons, NEW YORK ISBN 90-8578-034-9 (2008)
- [2] Kirby, P.A. - Design for structural stability, Crosby Lockwood Staples, London ISBN 0258970634 (1979)
- [3] S. Timoshenko - Theory of elastic stability, McGRAW-HILL BOOK COMPANY Inc, NEW YORK AND LONDON (1936)
- [4] Jan Belis - Kipsterkte van monolithische en gelamineerde glazen liggers ISBN 90-8578-034-9 (2005-2006)
- [5] Salvadori, M.G. lateral buckling of I beams, Transactions of American Society of civil Engineers, vol. 120, paper 2773, pp, 1165-1177 (1955)
- [6] Chen, W.F - Stability design of steel frames CRC Press, BOSTON LONDEN Inc ISBN 0-8493-8606-3 (1991)
- [7] Eurocode 3 - Design of Steel Structures - Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings. (2011)- European Committee for Standardization.
- [8] RAL-GZ-638 - Gitterroste (2008) - DEUTSCHES INSTITUT FÜR GÜTESICHERUNG UND KENNZEICHNUNG E.V.
- [9] DNV-RP-C208 - Determination of Structural Capacity by Non-linear FE analysis Methods (juni 2013) - DET NORSKE VERITAS AS
- [10] Nethercot, D.A. and Rockey, K.C. - A unified approach to the elastic lateral buckling of beams, The Structural Engineer, 49,7;321-330 (1972)
- [11] Kirby, P.A. and Nethercot, D.A. - Design for Structural Stability, Constrado Monographs, Granada Publishing, Suffolk
- [12] Lalanne, C. Fatigue Damage. ISTE - Wiley. ISBN 978-1-84821-125-4. (2009).

Bijlagen

De bijlagen zijn als volgt ingedeeld. Bijlage A bevatte de bijlagen die behoren tot het hoofdstuk experimentele bepaling van de draagkracht, in bijlage B staan de bijlagen die behoren tot het hoofdstuk numerieke bepaling van de draagkracht en in bijlage C staan de bijlagen die behoren tot het hoofdstuk parametrische onderzoek.

Bijlagen A: Experimentele bepaling van de draagkracht

Materiaaltesten draag- en vulstaven

Exova B.V.
Hofweg 5
3208 LE SPIJKENISSE

T: 0181 617144
F: 0181 625190
E: spijkennis@exova.com
W: www.exova.com



Test Certificate

Staco Holding B.V.
Molenweg 1
5953 JR Reuver

REF No S 402135 : Issue 1
Page 1 of 1
Ord No 306957
Date Tested 28/07/14
Date Reported 28/07/14

Attn: Dhr. B. van Reekum

Item - Plate t= 5mm
Material C-Steel
L520 B60 D2 D1

Specification - Client Requirement

Tensile Test - ISO 6892-1:2009 B								
	Dimensions [mm]	Area [mm ²]	GL [mm]	0.20%PS [N/mm ²]	UTS [N/mm ²]	%E1	%RA	Comments
001:Parent	4.780x 10.16	48.56	39.37	291	366	29.5	N/A	Ni1

Certificate Comments

----- End of Text -----

Tested by Exova, Spijkenisse

Auth. by Lab. Manager
Exova B.V.

This document may not be reproduced other than in full, except with the prior written approval of the issuing laboratory.
These results pertain only to the item(s) tested as sampled by the client unless otherwise indicated.
The contents of this report are governed by the terms and conditions overleaf.
Registered Office Exova B.V. Kapellein Nemostraat 12, 7821 AC Emmen, P.O. Box 2165, 7801 CD Emmen, The Netherlands. Chamber of Commerce, Meppel 04024766



Figuur 137: Materiaaltest draagstaven proefserie 1A

Exova B.V.
Hofweg 5
3208 LE SPIJKENISSE

T: 0181 617144
F: 0181 625190
E: spijkennisse@exova.com
W: www.exova.com



Test Certificate

TU Delft
Faculteit CiTG / Bouw GCC
Stevinweg 1
Gebouwnummer 23
2628 CN Delft

REF No S 401482 : Issue 1
Page 1 of 1
Ord No -
Date Tested 03/06/14
Date Reported 03/06/14

Attn: De heer A.C. Riemslag

Item - Plate t= 1,6mm
Material C-steel
Sample N° 2

Specification - Client Requirement

CONCEPT

Tensile Test - ISO 6892-1:2009 B									
	Dimensions [mm]		Area [mm ²]	GL [mm]	0.20%PS [N/mm ²]	UTS [N/mm ²]	%E1	%RA	Comments
001:Parent	1.810x	6.06	10.97	40.00	574	588	4.5	N/A	Nil

Certificate Comments

----- End of Text -----

Tested by Exova, Spijkenisse

.....
Auth. by Lab. Manager
Exova B.V.

This document may not be reproduced other than in full, except with the prior written approval of the issuing laboratory.
These results pertain only to the item(s) tested as sampled by the client unless otherwise indicated.
The contents of this report are governed by the terms and conditions overleaf.
Registered Office Exova B.V. Kapitein Nemostraat 12, 7821 AC Emmen, P.O. Box 2185, 7801 CD Emmen, The Netherlands. Chamber of Commerce, Meppel 04024766



Figuur 138: Materiaaltest vulstaven proefserie 1B, 2A en 2B



Test Certificate

TU Delft
 Faculteit CiTG / Bouw GCC
 Stevinweg 1
 Gebouwnummer 23
 2628 CN Delft

REF No S 401481 : Issue 1
 Page 1 of 1
 Ord No -
 Date Tested 03/06/14
 Date Reported 03/06/14

Attn: De heer A.C. Riemsdag

Item - Plate t= 2mm
 Material C-steel
 Sample N° 1

Specification - Client Requirement

CONCEPT

Tensile Test - ISO 6892-1:2009 B								
	Dimensions [mm]	Area [mm ²]	GL [mm]	0.20%PS [N/mm ²]	UTS [N/mm ²]	%E1	%RA	Comments
001:Parent	2.850x 6.06	17.27	40.00	605	620	5.0	N/A	Nil

Certificate Comments

----- End of Text -----

Tested by Exova, Spijkenisse

.....
 Auth. by Lab. Manager
 Exova B.V.



Figuur 139: Materiaaltest vulstaven proefserie 1A

Exova B.V.
Hofweg 5
3208 LE SPIJKENISSE

T: 0181 617144
F: 0181 625190
E: spijkennis@exova.com
W: www.exova.com



Test Certificate

TU Delft
Faculteit CiTG / Bouw GCC
Stevinweg 1
Gebouwnummer 23
2628 CN Delft

REF No S 401485 : Issue 1
Page 1 of 1
Ord No -
Date Tested 03/06/14
Date Reported 03/06/14

Attn: De heer A.C. Riemsdijk

Item - Plate t= 2mm
Material C-steel
Specification - Client Requirement

CONCEPT

Tensile Test - ISO 6892-1: 2009 B								
	Dimensions [mm]	Area [mm ²]	GL [mm]	0.20%PS [N/mm ²]	UTS [N/mm ²]	%E1	%RA	Comments
001:Parent	1.360x 8.09	11.00	30.00	315	378	23.0	N/A	Nil

Certificate Comments

----- End of Text -----

Tested by Exova, Spijkenisse

.....
Auth. by Lab. Manager
Exova B.V.

This document may not be reproduced other than in full, except with the prior written approval of the issuing laboratory.
These results pertain only to the item(s) tested as sampled by the client unless otherwise indicated.
The contents of this report are governed by the terms and conditions overleaf
Registered Office: Exova B.V. Kapitein Nemostraat 12, 7821 AC Emmen, P.O. Box 2165, 7801 CD Emmen, The Netherlands Chamber of Commerce, Meppel 04024766



Figuur 140: Eerste materiaaltest draagstaven proefserie 1B

Exova B.V.
Hofweg 5
3208 LE SPIJKENISSE

T: 0181 617144
F: 0181 625190
E: spijkennis@exova.com
W: www.exova.com



Test Certificate

Staco Holding B.V.
Molenweg 1
5953 JR Reuver

REF No S 402136 : Issue 1
Page 1 of 1
Ord No 306957
Date Tested 28/07/14
Date Reported 28/07/14

Attn: Dhr. B. van Reekum

Item - Plate t= 5mm
Material L520 B60 D4 D2 C-Steel
Specification - Client Requirement

Tensile Test - ISO 6892-1: 2009 B								
	Dimensions [mm]	Area [mm ²]	GL [mm]	0.20%PS [N/mm ²]	UTS [N/mm ²]	%E1	%RA	Comments
001:Parent	1.870x 10.09	18.87	40.00	294	346	18.0	N/A	Ni1

Certificate Comments

----- End of Text -----

Tested by Exova, Spijkenisse

Exova
Testing. Advising. Assuring.
G.V. Tokarenko

.....
Auth. by Lab. Manager
Exova B.V.

This document may not be reproduced other than in full, except with the prior written approval of the issuing laboratory.
These results pertain only to the item(s) tested as sampled by the client unless otherwise indicated.
The contents of this report are governed by the terms and conditions overleaf
Registered Office Exova B.V. Kapitein Nemostraat 12, 7821 AC Emmen, P.O. Box 2165, 7801 CD Emmen, The Netherlands. Chamber of Commerce, Meppel 04024768



Figuur 141: Tweede materiaaltest draagstaven proefserie 1B

Exova B.V.
Hofweg 5
3208 LE SPIJKENISSE

T: 0181 617144
F: 0181 625190
E: spijkennisse@exova.com
W: www.exova.com



Test Certificate

TU Delft
Faculteit CiTG / Bouw GCC
Stevinweg 1
Gebouwnummer 23
2628 CN Delft

REF No S 401483 : Issue 1
Page 1 of 1
Ord No -
Date Tested 03/06/14
Date Reported 03/06/14

Attn: De heer A.C. Riemslag

Item

- Plate t= 2mm
Material

C-steel

CONCEPT

Specification - Client Requirement

Tensile Test - ISO 6892-1:2009 B								
	Dimensions [mm]	Area [mm ²]	GL [mm]	0.20%PS [N/mm ²]	UTS [N/mm ²]	%E1	%RA	Comments
001:Parent	1.490x 8.23	12.26	30.00	260	354	22.0	N/A	Nil

Certificate Comments

----- End of Text -----

Tested by Exova, Spijkenisse

.....
Auth. by Lab. Manager
Exova B.V.

This document may not be reproduced other than in full, except with the prior written approval of the issuing laboratory.
These results pertain only to the item(s) tested as sampled by the client unless otherwise indicated.
The contents of this report are governed by the terms and conditions overleaf.
Registered Office: Exova B.V. Kapitein Nemostraat 12, 7821 AC Emmen, P.O. Box 2185, 7801 CD Emmen, The Netherlands. Chamber of Commerce, Meppel 04024786



Figuur 142: Materiaaltest draagstaven proefserie 2A en 2B

Toegepaste meetpunten per proefstuk

In Tabel 19 staan de meetpunten, zie Figuur 45, voor ieder proefstuk weergegeven.

Tabel 19: Meetpunten proefstukken. VZ staat voor verzinkt en NVZ staat voor niet verzinkt

Proefserie 1A		Proefserie 1B		Proefserie 2A		Proefserie 2B	
proefstuk	meetpunten	proefstuk	meetpunten	proefstuk	meetpunten	proefstuk	meetpunten
1A_VZ_1	1,2,3,5	1B_VZ_1	1,2,4,5	2A_VZ_1	1,2,4,5	2B_VZ_1	1,2,3,4
1A_VZ_2	1,2,3,5	1B_VZ_2	1,2,3,5	2A_VZ_2	1,2,3,5	2B_VZ_2	1,2,3,5
		1B_VZ_3	1,2,3,5	2A_VZ_3	1,2,4,5	2B_NVZ_1	1,2,3,5
		1B_NVZ_1	1,2,4,5	2A_NVZ_1	1,2,4,5	2B_NVZ_2	1,2,3,5
		1B_NVZ_2	1,2,3,5	2A_NVZ_2	1,2,4,5		

Gemeten imperfecties in proefstukken van proefserie 2A en 2B

In Tabel 20 tot en met Tabel 28 staan voor iedere van de proefstukken van proefseries 2A en 2B de gemeten horizontale imperfecties weergegeven. De horizontale imperfecties zijn per draagstaaf (A t/m J of L) geregistreerd voor zowel de boven als onderkant. Ook de locatie van de maximale imperfecties in de draagstaven zijn vastgelegd. Deze locatie is bepaald vanaf de randstaven die in de vulstaafrichting lopen.

Tabel 20: Horizontale imperfecties, aan de onder- en bovenkant van de draafstaven in mm, in verzinkt proefstuk 1 van proefserie 2A.

2A_VZ_1										
BOVEN										
Draagstaaf	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Maximale imperfectie(mm)	-3.5	-3.5	-3.5	-3.5	-3	-3.5	-3	-2.5	-2.5	-2.5
Locatie	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
ONDER										
draagstaaf	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
maximale imperfectie(mm)	-3.5	-4	-3.5	-4	-4	-3.5	-3.5	-4	-3.5	-3
locatie	0.5	0.5	0.4	0.5	0.35	0.5	0.5	0.5	0.5	0.3

Tabel 21: Horizontale imperfecties, aan de onder- en bovenkant van de draafstaven in mm, in verzinkt proefstuk 2 van proefserie 2A.

2A_VZ_2										
BOVEN										
Draagstaaf	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Maximale imperfectie(mm)	-3	-3	-2	-2.5	-2	-2.5	-2.5	-2	-2	-2
Locatie	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
ONDER										
draagstaaf	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
maximale imperfectie(mm)	-3	-2.5	-2.5	-2.5	-2	-2.5	-2	-2	-2	-2
locatie	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

Tabel 22: Horizontale imperfecties, aan de onder- en bovenkant van de draafstaven in mm, in verzinkt proefstuk 3 van proefserie 2A.

2A_VZ_3										
BOVEN										
Draagstaaf	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Maximale imperfectie(mm)	-2	-2	-1.5	-1.5	-1.5	-1.5	-1.5	-1	-1	-1
Locatie	0.5	0.67	0.67	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
ONDER										
draagstaaf	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
maximale imperfectie(mm)	-3.5	-4	-3.5	-4	-4	-3.5	-3.5	-4	-3.5	-3
locatie	0.5	0.5	0.4	0.5	0.35	0.5	0.5	0.5	0.5	0.3

Tabel 23: Horizontale imperfecties, aan de onder- en bovenkant van de draafstaven in mm, in niet-verzinkt proefstuk 1 van proefserie 2A.

2A_NVZ_1										
BOVEN										
Draagstaaf	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Maximale imperfectie(mm)	1.5	2	2	2	2	2	2	1	2	2
Locatie	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
ONDER										
draagstaaf	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
maximale imperfectie(mm)	2	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	0.5	1.5
locatie	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

Tabel 24: Horizontale imperfecties, aan de onder- en bovenkant van de draafstaven in mm, in niet-verzinkt proefstuk 2 van proefserie 2A.

2A_NVZ_2										
BOVEN										
Draagstaaf	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Maximale imperfectie(mm)	1.5	2	2	2	2	2	2.5	3	4	3
Locatie	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
ONDER										
draagstaaf	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
maximale imperfectie(mm)	1.5	1.5	1.5	1.5	2.5	1.5	1.5	1.5	2	2
locatie	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6

Tabel 25: Horizontale imperfecties, aan de onder- en bovenkant van de draafstaven in mm, in verzinkt proefstuk 1 van proefserie 2b.

2B_VZ_1										
BOVEN										
Draagstaaf	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Maximale imperfectie(mm)	3	3.5	3	2.5	3.5	3	3	3.5	3	3
Locatie	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
ONDER										
draagstaaf	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
maximale imperfectie(mm)	3	3	3	3	3.5	3.5	3.5	4.5	3	3
locatie	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

Tabel 26: Horizontale imperfecties, aan de onder- en bovenkant van de draafstaven in mm, in verzinkt proefstuk 2 van proefserie 2Ab

2B_VZ_2										
BOVEN										
Draagstaaf	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Maximale imperfectie(mm)	4	4	4	4	4	4	4	4	4.5	4
Locatie	0.5	0.5	0.5	0.3	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
ONDER										
draagstaaf	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
maximale imperfectie(mm)	3.5	4	4	4	4	4.5	4.5	4	4.5	4
locatie	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

Tabel 27: Horizontale imperfecties, aan de onder- en bovenkant van de draafstaven in mm, in niet-verzinkt proefstuk 1 van proefserie 2b.

2B_NVZ_1										
BOVEN										
Draagstaaf	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Maximale imperfectie(mm)	1	1	2.5	1	2	2	2	1	2	2
Locatie	0.5	0.6	0.3	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
ONDER										
draagstaaf	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
maximale imperfectie(mm)	1.5	1.5	1	2	1.5	2	2	2.5	2	1.5
locatie	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3

Tabel 28: Horizontale imperfecties, aan de onder- en bovenkant van de draafstaven in mm, in niet-verzinkt proefstuk 2 van proefserie 2b.

2B_NVZ_2										
BOVEN										
Draagstaaf	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Maximale imperfectie(mm)	2	2	2	2.5	1.5	2.5	2	1.5	2	2
Locatie	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5
ONDER										
draagstaaf	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
maximale imperfectie	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
locatie	0.5	0.3	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5

Bepaling element type en mesh grootte t.b.v. de FEM analyses

In deze bijlagen is er onderzocht welk(en) soort(en) element(en) en mesh grootte toe te passen.

Schaal elementen(Shells)

Schaal elementen worden toegepast voor situaties waarin de dikte van het te modelleren onderdeel veel kleiner is dan de overige dimensies. Door het gebruiken van schaal elementen wordt het gedrag wat zich in de dikte richting afspeelt verwaarloost. Schaal elementen kunnen verschillend aantal knopen en vrijheidsgraden hebben. In deze bijlagen wordt er gekeken naar 2 soorten schaal elementen namelijk een S4R met 4 knopen(lineair) en een S8R met 8 knopen(kwadratisch). Beiden element types hebben 6 vrijheidsgraden per knoop.



Figuur 143: Weergave lineaire en kwadratische schaal elementen

Volume element(Solid)

Een volume element worden toegepast voor situaties waarin de in alle drie de richtingen van belang zijn. Hierdoor generen volume elementen veel informatie. Het gebruik van volume elementen ligt niet voor de hand ligt voor het modelleren van persrooster.

Acceptabele foutmarge

Een FE Model is altijd een benadering van de werkelijkheid. De vraag is met welke precisie dient deze werkelijkheid benaderd te worden. Hierin spelen praktische aspecten zoals rekentijd een belangrijke rol. In dit geval wordt een fout van 1% of minder als acceptabel beschouwd.

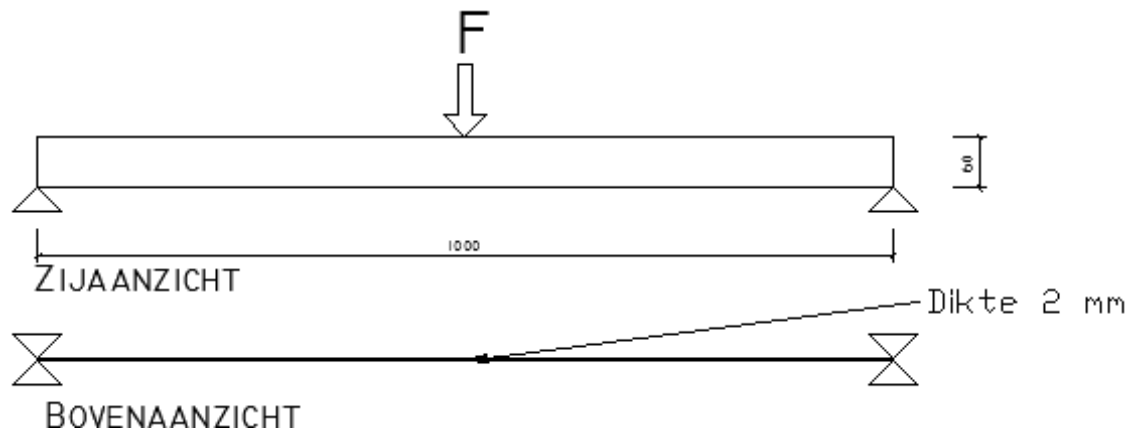
De vraag is nog steeds wat is dan de werkelijkheid? Een mogelijkheid is om de werkelijkheid aan te nemen als het resultaat van een analytische methode. Dit is echter niet altijd even handig, zo kan het zo zijn dat er geen geschikte analytische methoden is.

Ook dient er gerealiseerd worden dat een analytische methode vaak een versimpeling van de werkelijkheid is. Uiteindelijk is het meest praktisch om een hoge resolutie FEM te beschouwen als de werkelijkheid. Dat betekent niet dat er niet gekeken wordt naar de resultaten die voort komen uit analytische methoden. Deze resultaten worden namelijk gebruikt om de FE modellen in perspectief te plaatsen.

Buiging spanning en kipinstabiliteit

De nauwkeurigheid van de analyse is gerelateerd aan het aantal elementen over de hoogte. De reden hiervoor is dat dit het mogelijk maakt om een concrete richtlijn te geven over welke element dichtheid toe te passen.

Zowel buiging als kip wordt onderzocht aan de hand van het zelfde simpele model. Het betreft hier een ligger op twee steunpunten die statisch is opgelegd. Ten plaatse van de twee opleggingen is een gaffelsteun aangebracht. De hoogte van de ligger is 60 mm en dikte 2 mm zie figuur 1.



Figuur 144: Testmodel werking element type en mesh grote

Spanning, doorbuiging en kip

Op de ligger wordt een puntlast in het midden van de overspanning geplaatst van 1128 Newton. Deze kracht resulteert in het bereiken van de vloeigrens in de uiterste vezel, de doorbuiging bedraagt bij deze belasting 3.108 mm. Zie formules 1 en 2

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{0,25 * 1128 * 1000}{1200} = 235 \frac{N}{mm^2} \quad [1]$$

$$u = \frac{F * L^3}{48 * EI} = \frac{1128 * 1000^3}{48 * 210000 * 36000} = 3,108 \text{ mm} \quad [2]$$

1.7 Resultaten buiging en kip

1.7.1. Aantal elementen en knopen

Zoals eerder gesteld wordt er gekeken naar lineaire en kwadratische schaal elementen. Zoals eerder gesteld wordt de nauwkeurigheid bepaald op basis van het aantal elementen over de hoogte. Een weergaven van de in beschouwing genomen schaal elementen en dichtheden staat hieronder weergegeven.

Tabel 29: Aantal elementen

Aantal element en over de hoogte	Lineaire elementen		Kwadratische elementen	
	Totaal Aantal elementen	Aantal knopen	Totaal Aantal elementen	Aantal knopen
1	17	36	17	88
2	68	105	68	277
3	150	204	-	-
4	268	340	268	947
5	420	510	-	-
6	600	707	-	-
8	1008	1143	-	-
9	1350	1510	1350	4369
20	-	-	6680	20749
25	10425	10868	10425	32160

1.7.2 Invloed type en aantal elementen over de hoogte op de nauwkeurigheid

Hieronder staat een weergaven van de gevonden resultaten op basis van een de mesh fijnheid en het soort element. In de tabel worden de spanningen, doorbuiging en de eerste drie positieve eigenwaardes gepresenteerd.

Tabel 30: Invloed type en aantal elementen over de hoogte

Aantal elementen over de hoogte	Lineaire elementen			Kwadratische elementen		
	Sigma max	zakking	Eigw1	Sigma max	zakking	Eigw1
1	6	784	0.149	229.8	3.15	0.149
2	151.8	4.21	0.149	230.2	3.15	0.148
3	171	3.55	-	-	-	-
4	183.3	3.37	0.149	231.6	3.16	0.148
6	197.5	3.255	-	-	-	-
8	208.1	3.216	-	-	-	-
10	210.1	3.199	-	232.5	3.16	-
20	-	-	-	232.5	3.17	0.148
25	223.1	3.18	-	232.5	3.17	-

Conclusie element keuze persroosters

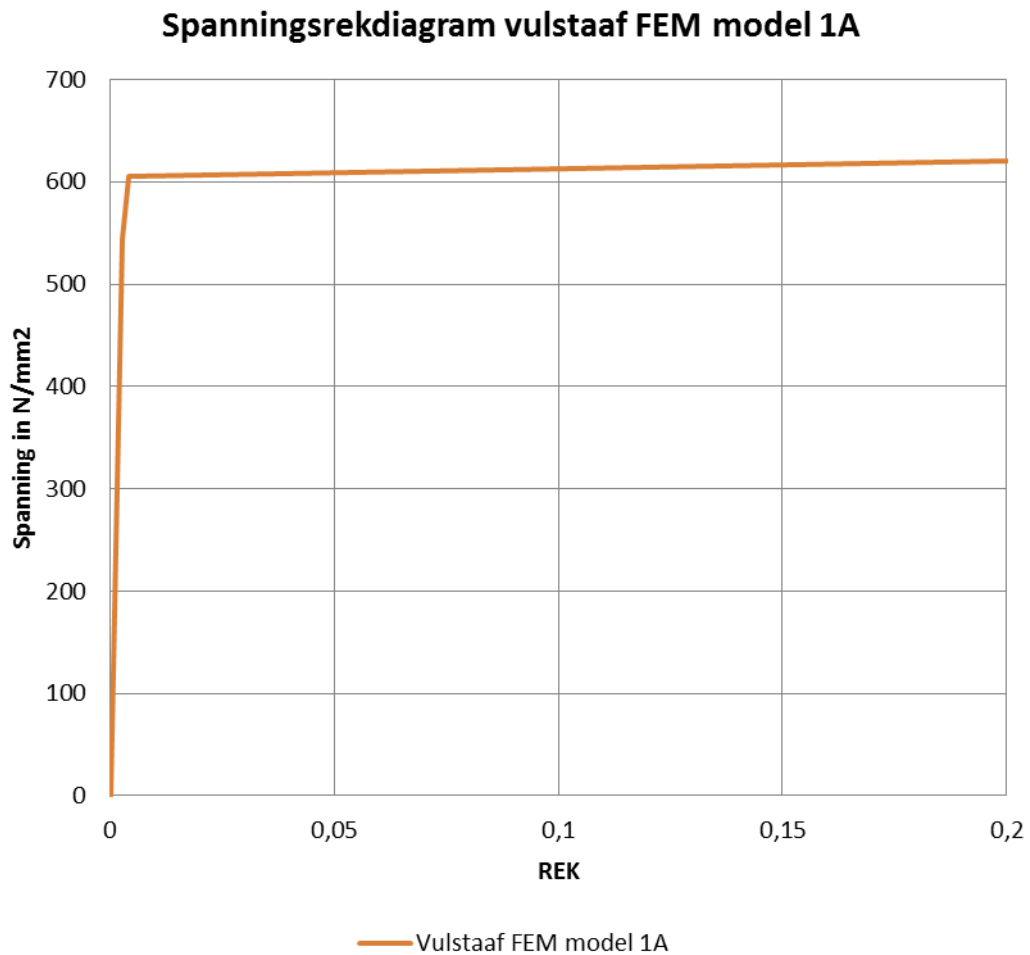
Een mesh bestaande uit 1 kwadratische element over de hoogte, benaderd het resultaat met een foutmarge van iets minder dan 1%. Het gebruik van lineaire element soorten geeft een aanzienlijk minder goed resultaat dan kwadratische elementen.

Spanningsrek diagrammen FEM analyse proefstukken.

In deze bijlagen staan de spanningsrekdiagrammen weergegeven die toegepast zijn in hoofdstuk 7

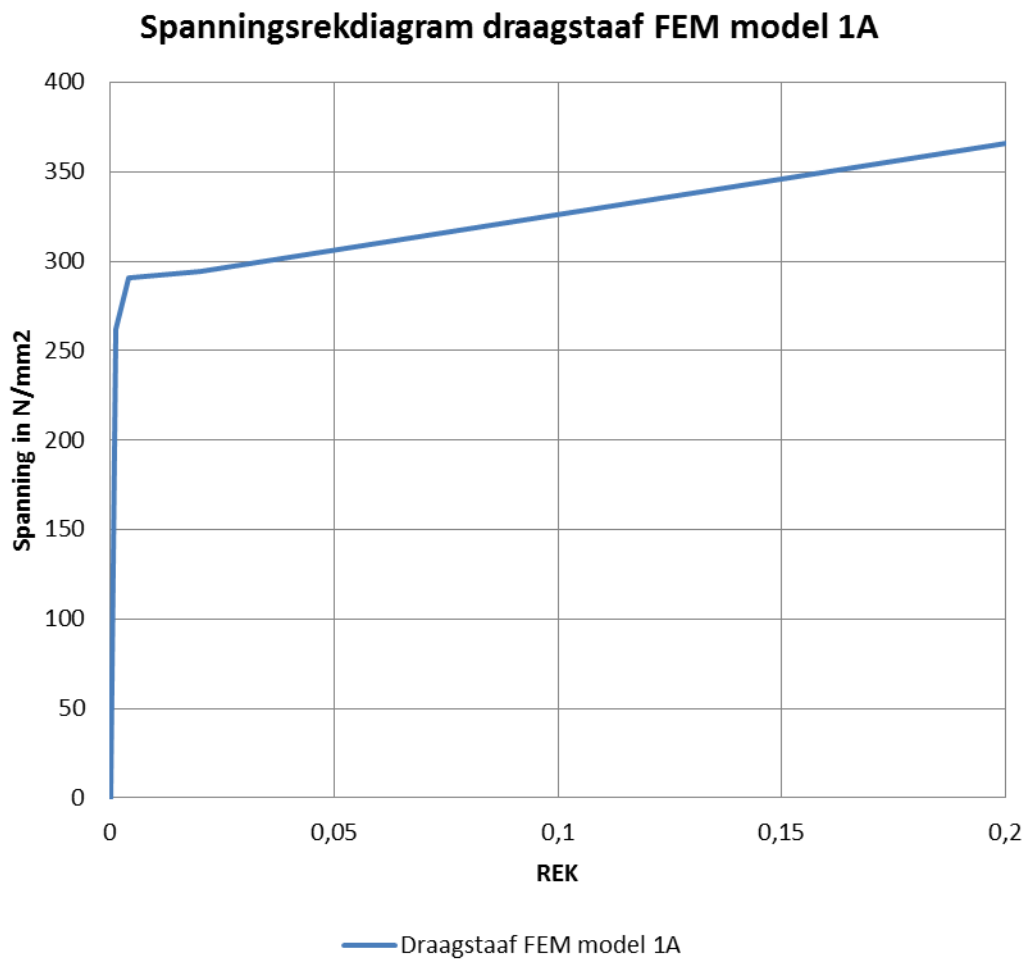
Spanningsrekdiagrammen FEM beschouwing serie 1A

Spanningsrekdiagram vulstaaf



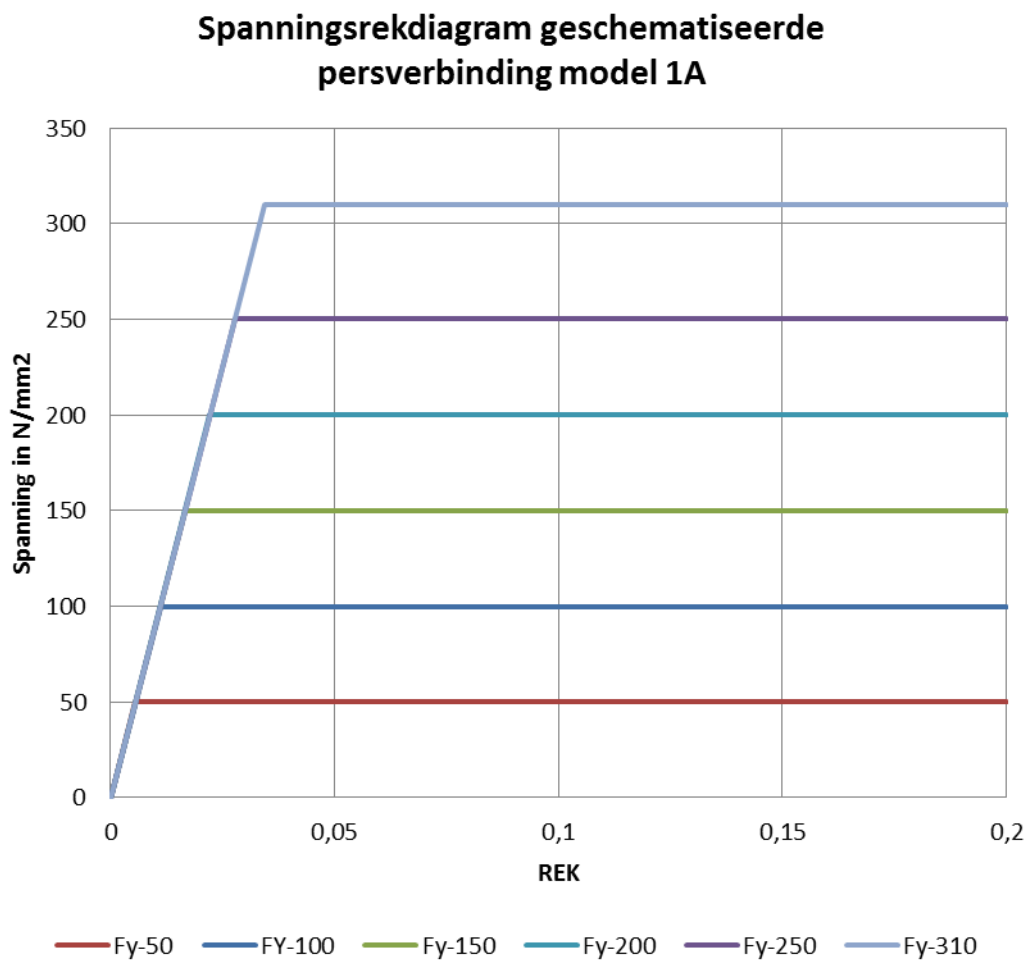
Figuur 145: Spanningsrekdiagram model 1A vulstaaf

Spanningsrekdiagram draagstaaf



Figuur 146: Spanningsrekdiagram draagstaaf model 1A

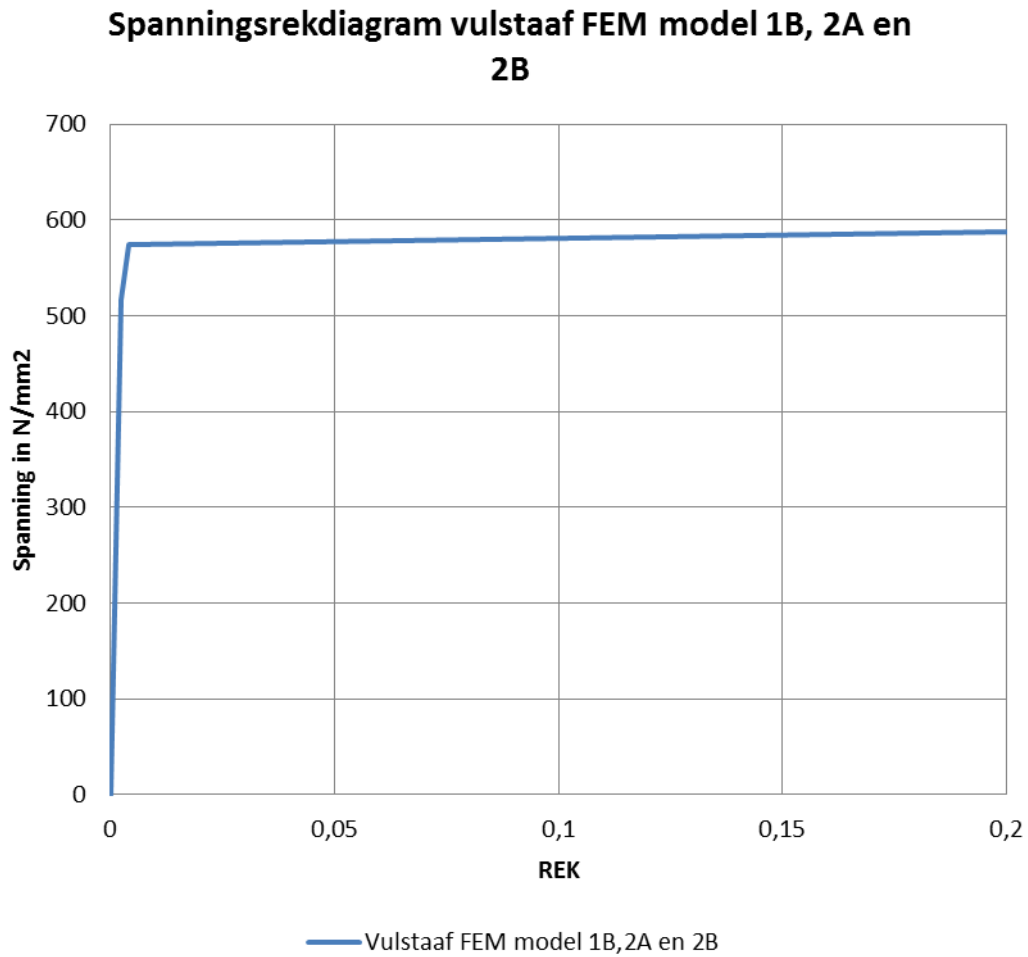
Spanningsrekdiagram van de geschematiseerde persverbinding



Figuur 147: Spanningsrekdiagrammen van de verbinding voor model 1A

Spanningsrekdiagrammen FEM beschouwing serie 1B

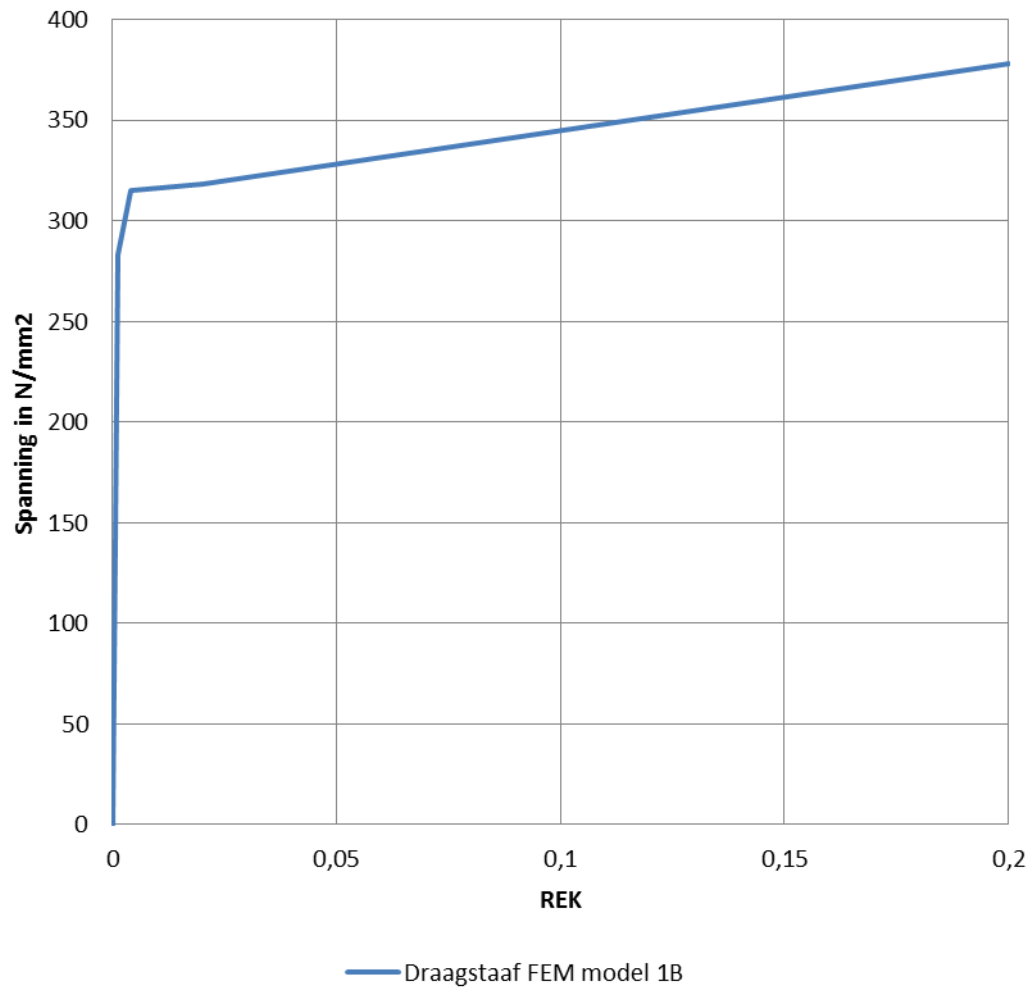
Spanningsrekdiagram vulstaaf



Figuur 148: Spanningsrekdiagram vulstaaf modellen 1B, 2A en 2B

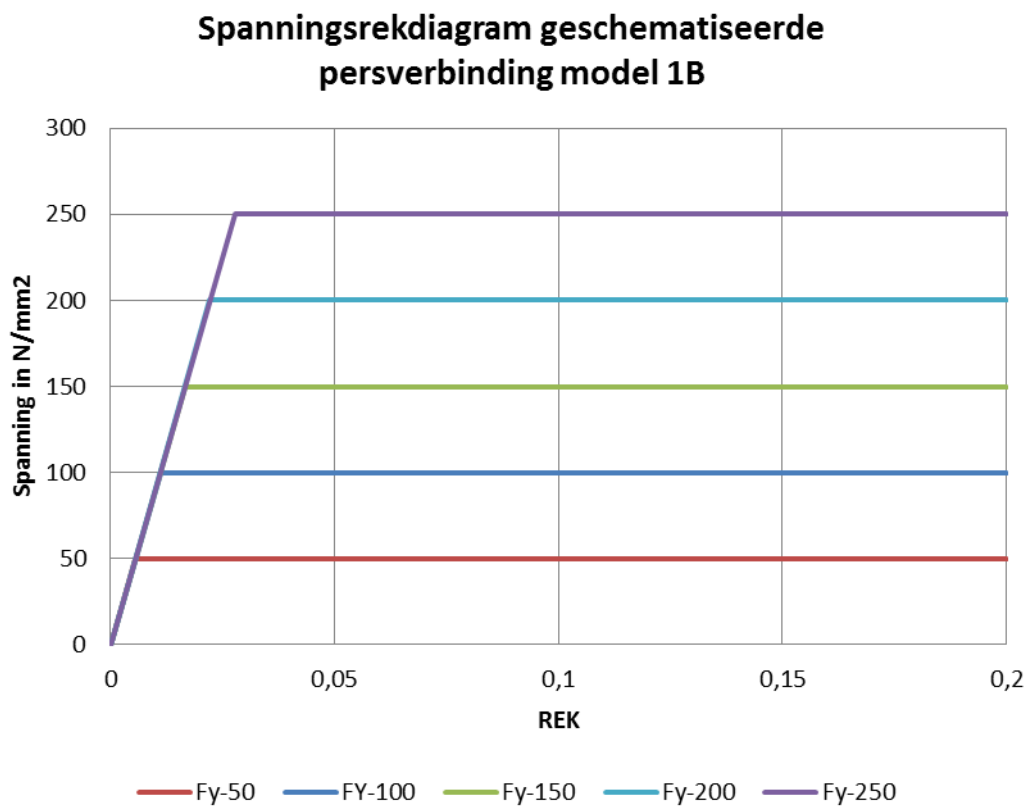
Spanningsrekdiagram draagstaaf

Spanningsrekdiagram draagstaaf FEM model 1B



Figuur 149: Spanningsrekdiagram draagstaaf model 1B

Spanningsrekdiagram van de geschematiseerde persverbinding



Figuur 150: Spanningsrekdiagrammen voor de verbinding van model 1B

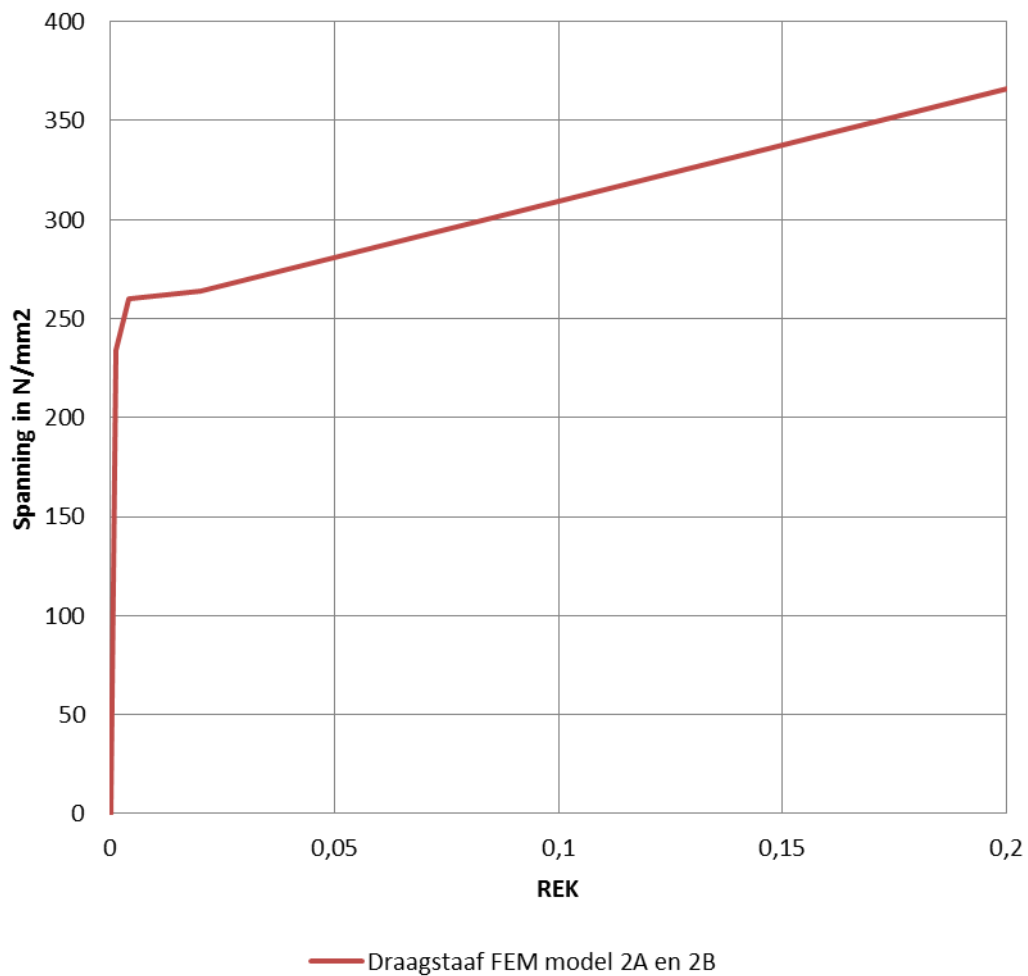
Spanningsrekdiagrammen FEM beschouwing serie 2A

Spanningsrekdiagram vulstaaf

Zie spanningsrekdiagram 1B

Spanningsrekdiagram draagstaaf

Spanningsrekdiagram draagstaaf FEM model 2A en 2B



Figuur 151: Spanningsrekdiagram draagstaaf model 2A en 2B

Spanningsrekdiagrammen FEM beschouwing serie 2B

Spanningsrekdiagram vulstaaf

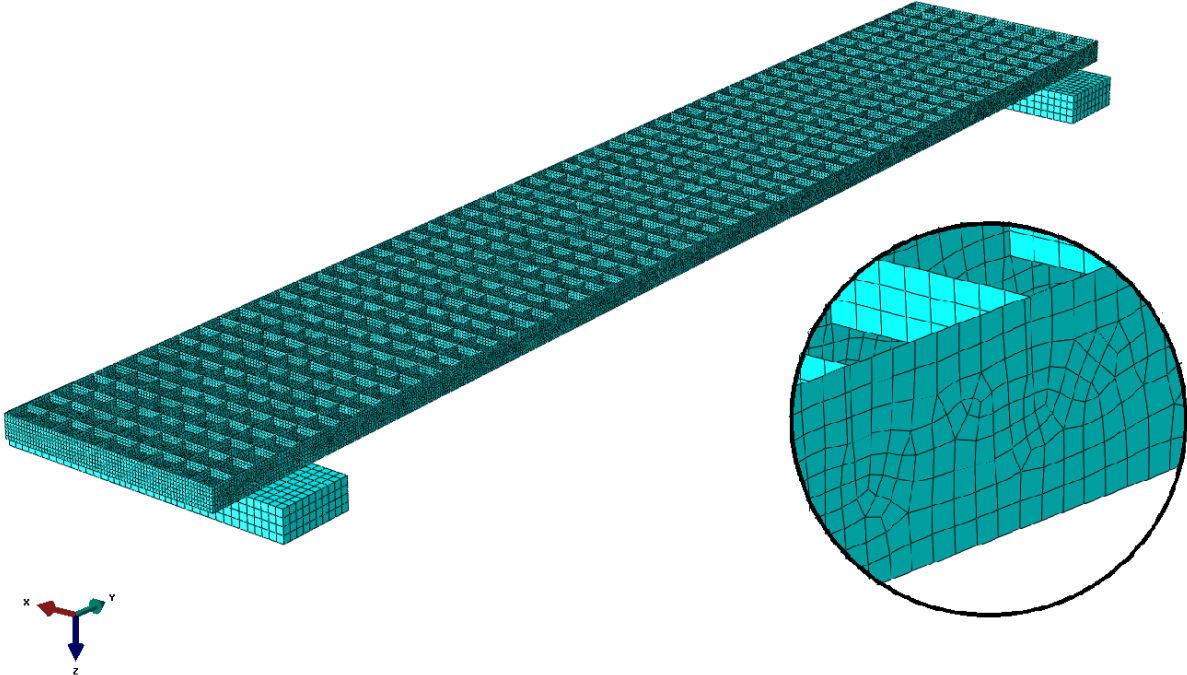
Zie spanningsrekdiagram 1B

Spanningsrekdiagram draagstaaf

Zie spanningsrekdiagram 2A

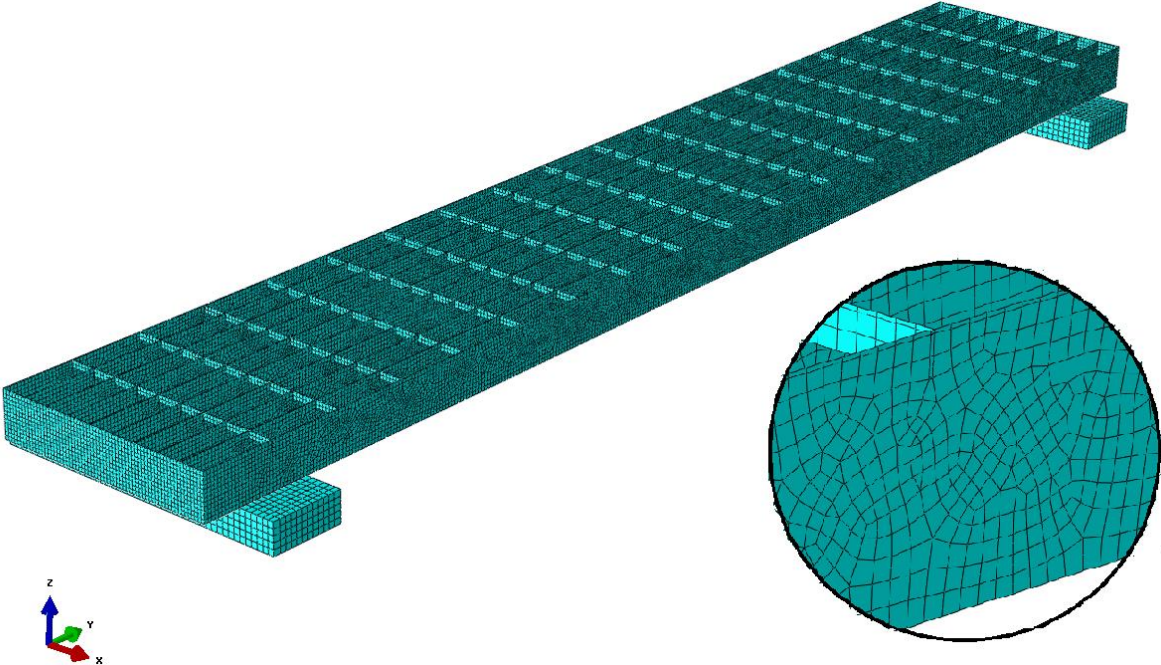
Weergaven mesh voor de modellen van series 1A, 1B, 2A en 2B

Modelserie 1A en 1B



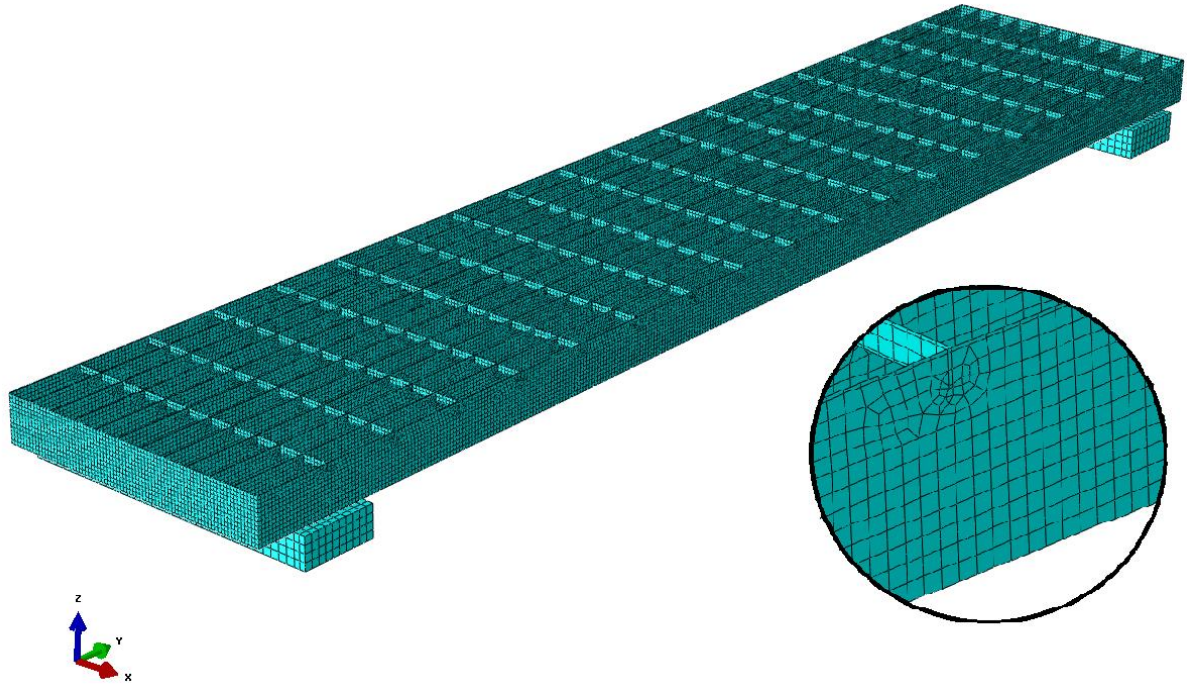
Figuur 152: Mesh model proefseries 1A en 1B mesh

Modelserie 2A



Figuur 153: Mesh model proefseries 2A

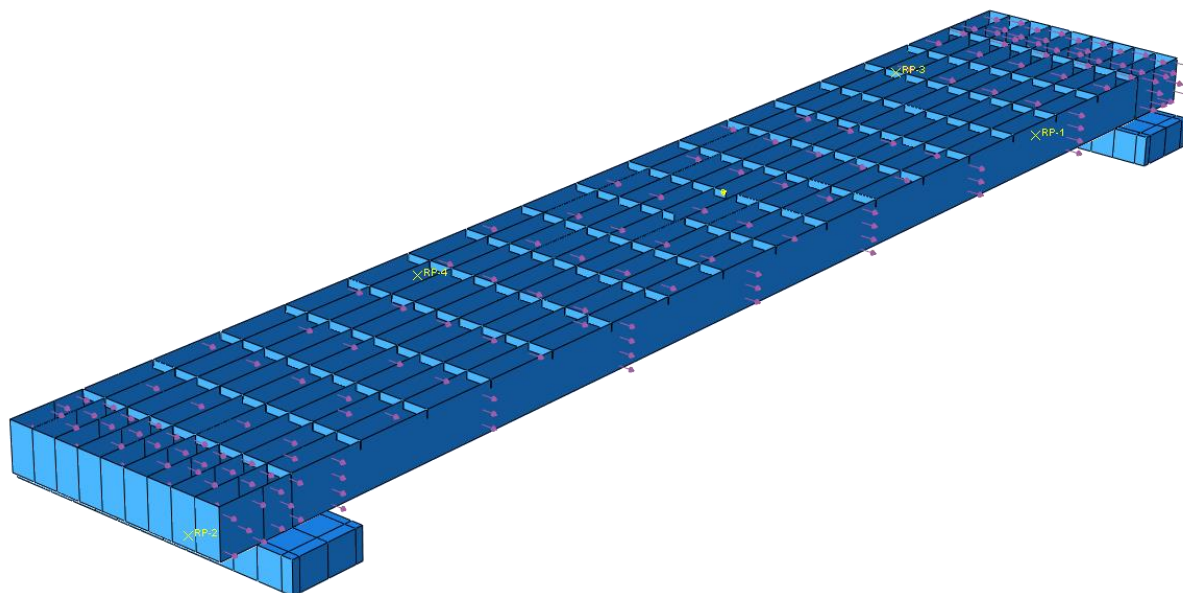
Modelserie 2B



Figuur 154: Mesh model proefserie 2B

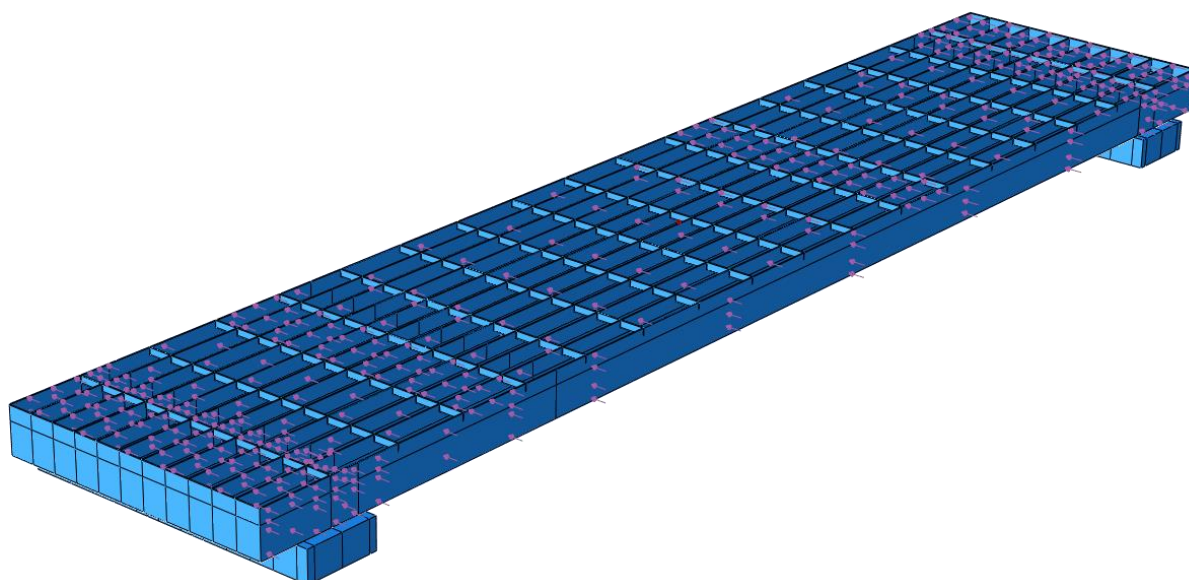
Tot standkoming initiële vervorming t.b.v. de bepaling van de invloed van imperfecties

Modelserie 2A



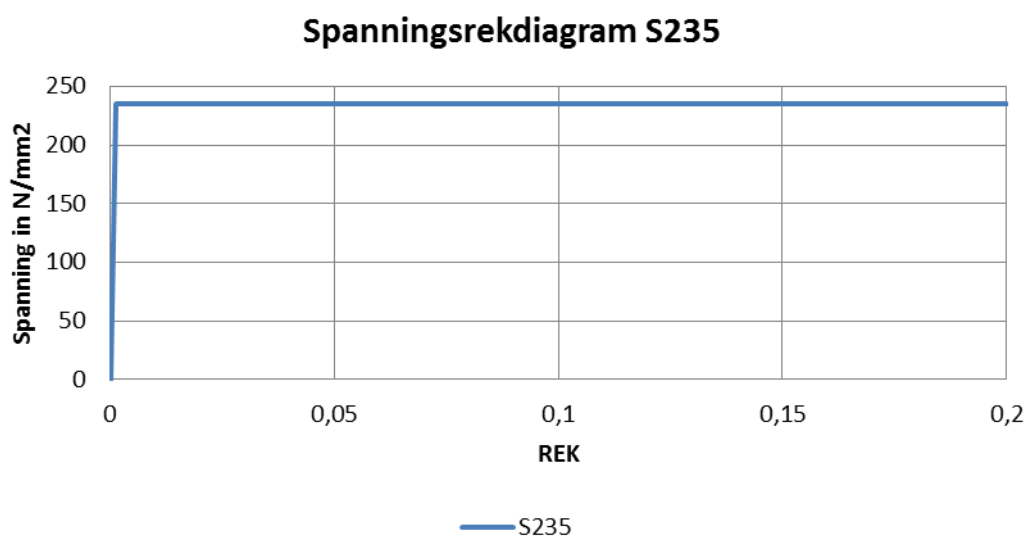
Figuur 155: Totstandkoming imperfecties van serie 2A t.b.v. de FEM beschouwing

Modelserie 2B



Figuur 156: Totstandkoming imperfecties van serie 2A t.b.v. de FEM beschouwing

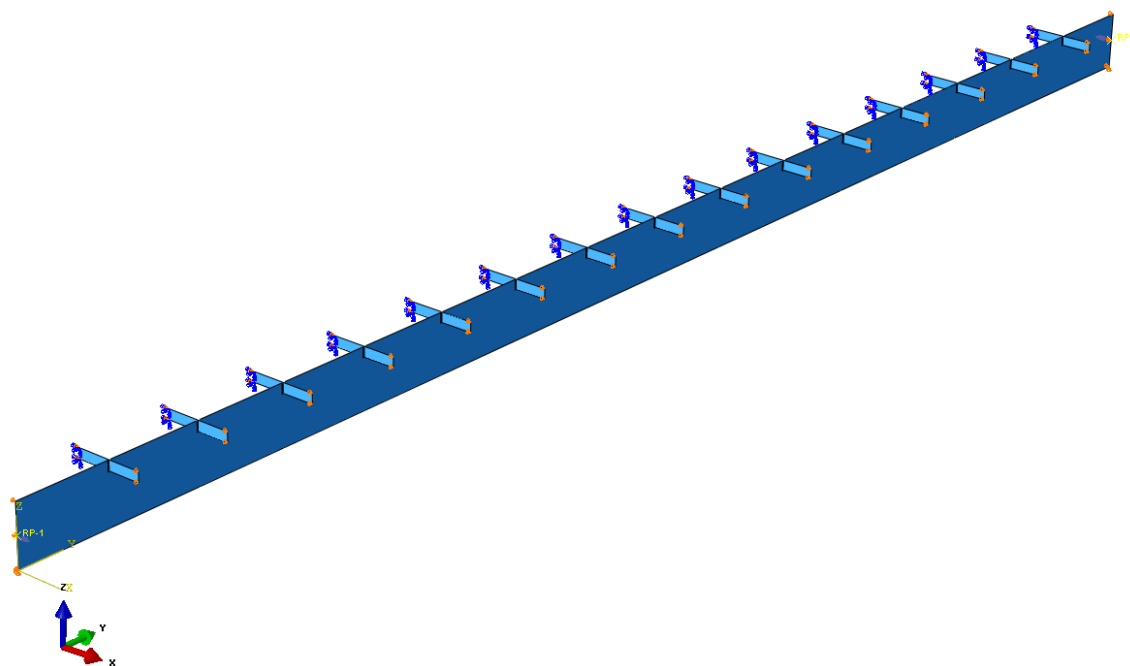
Spanningsrekdiagram S235



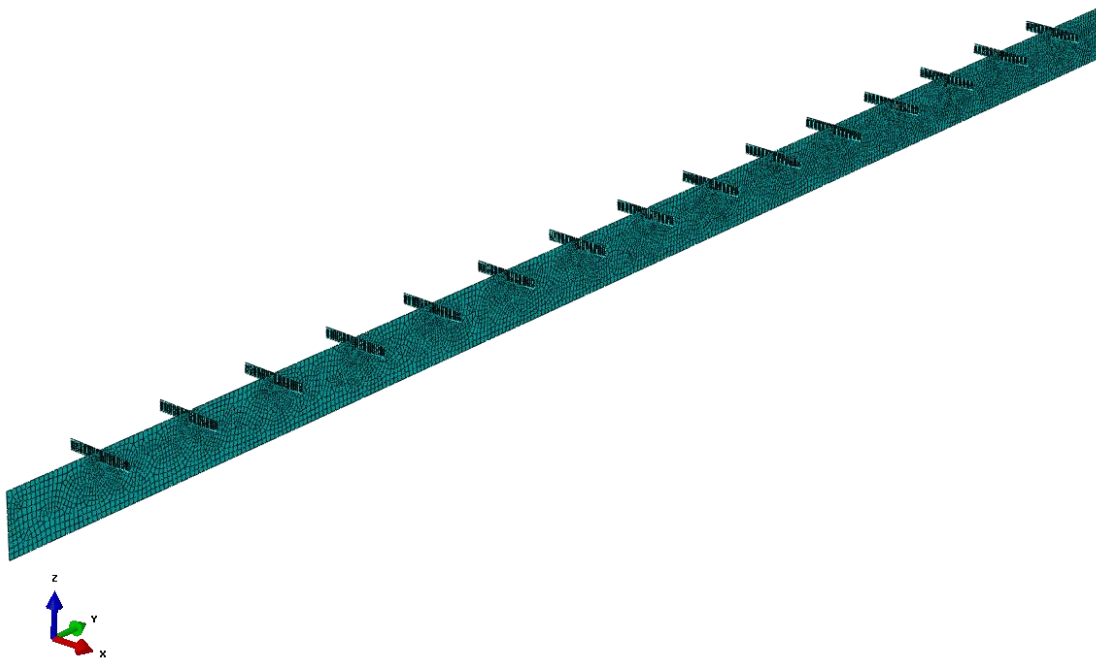
Figuur 157: Toegepast spanningsrekdiagram S235

Weergaven modellen

Model 1: Draagstaafmodel



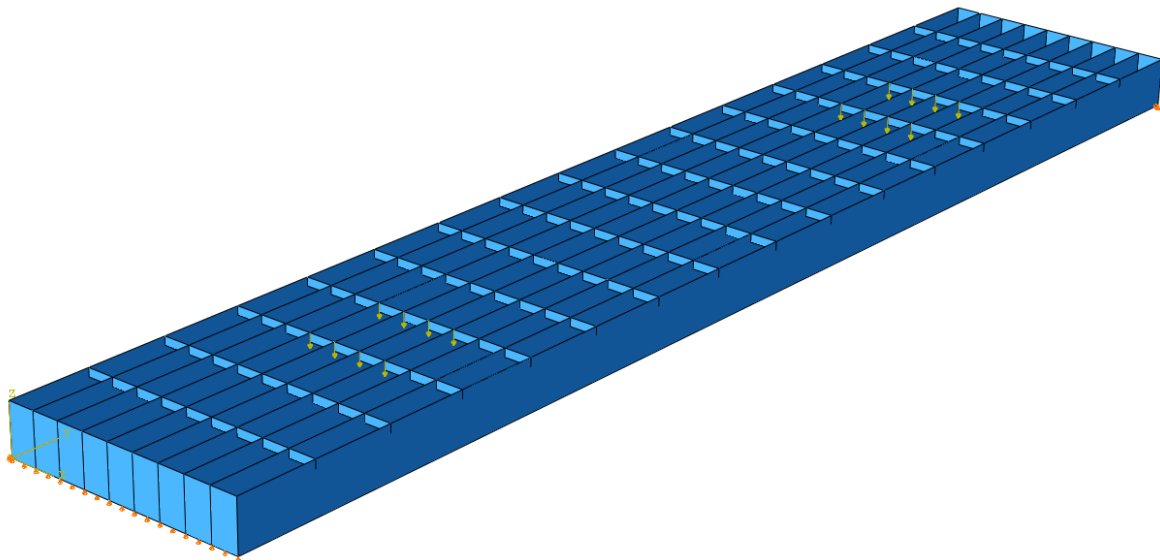
Figuur 158: Draagstaafmodel met randvoorwaarde



Figuur 159: Draagstaafmodel Mesh

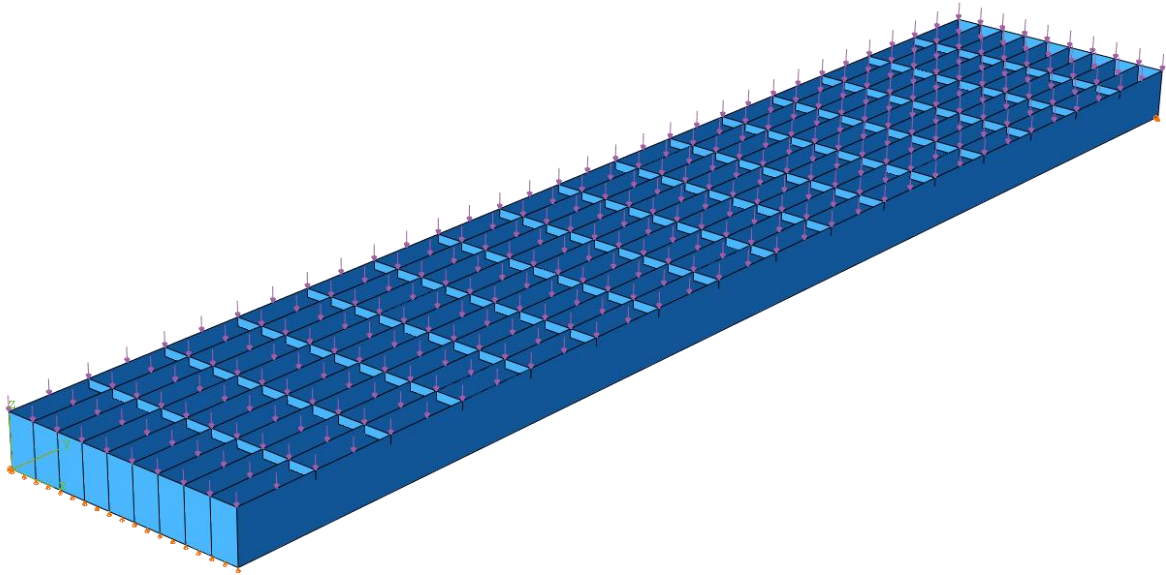
Model 2: Persrooster modellen

Model 2: Persrooster model met twee geconcentreerde lasten



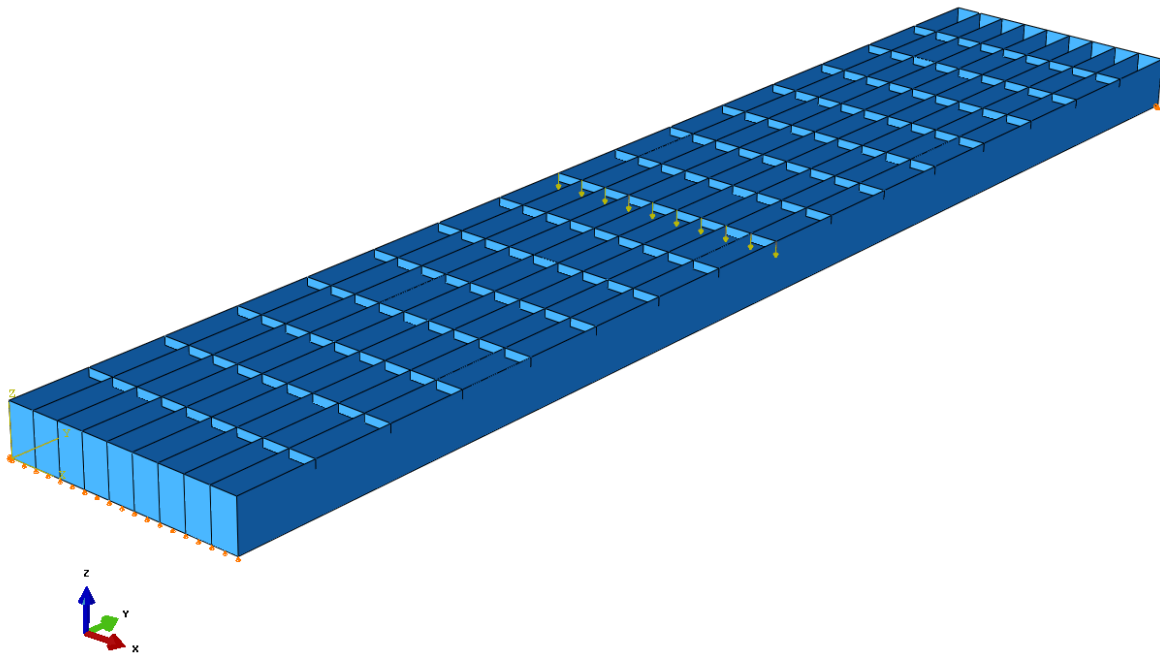
Figuur 160: Model 2: Persrooster model met twee geconcentreerde lasten

Model 2: Persrooster model met een verdeelde belasting

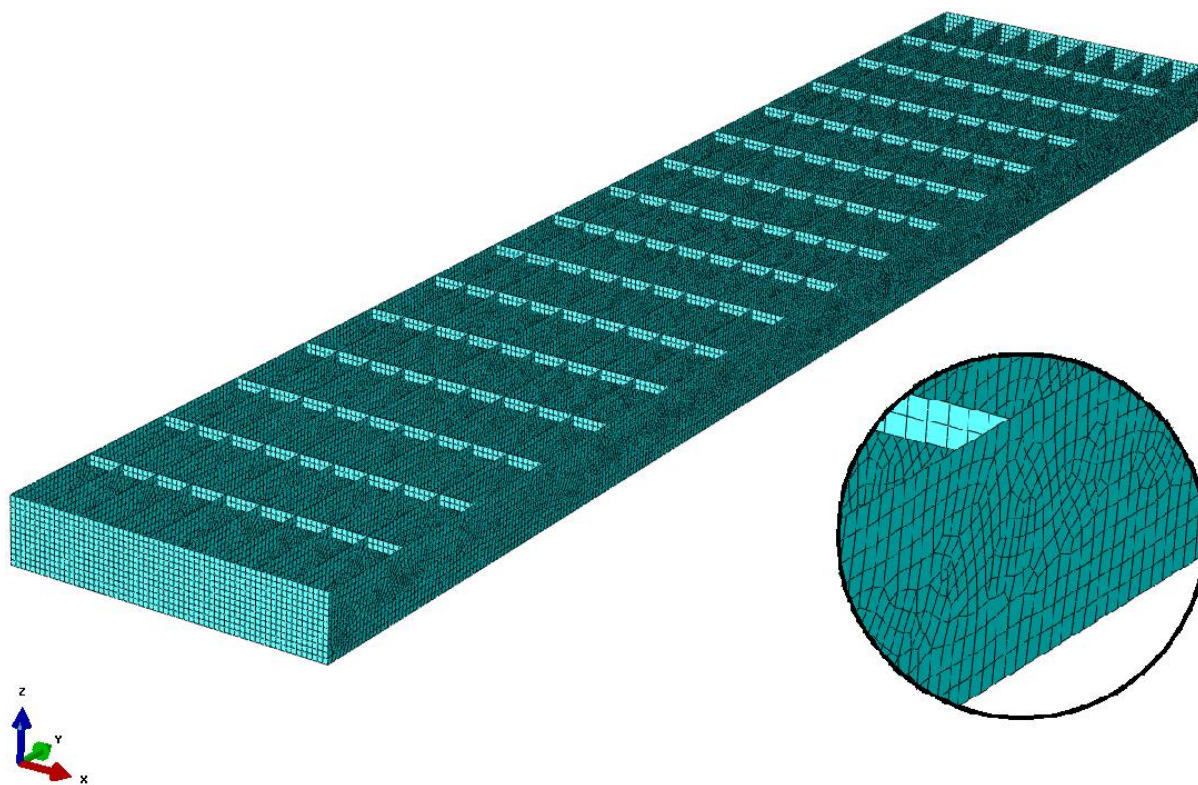


Figuur 161: Model 2: Persrooster model met verdeelde belasting

Model 2: Persrooster model met een lijnlast haaks op de draagstaafrichting

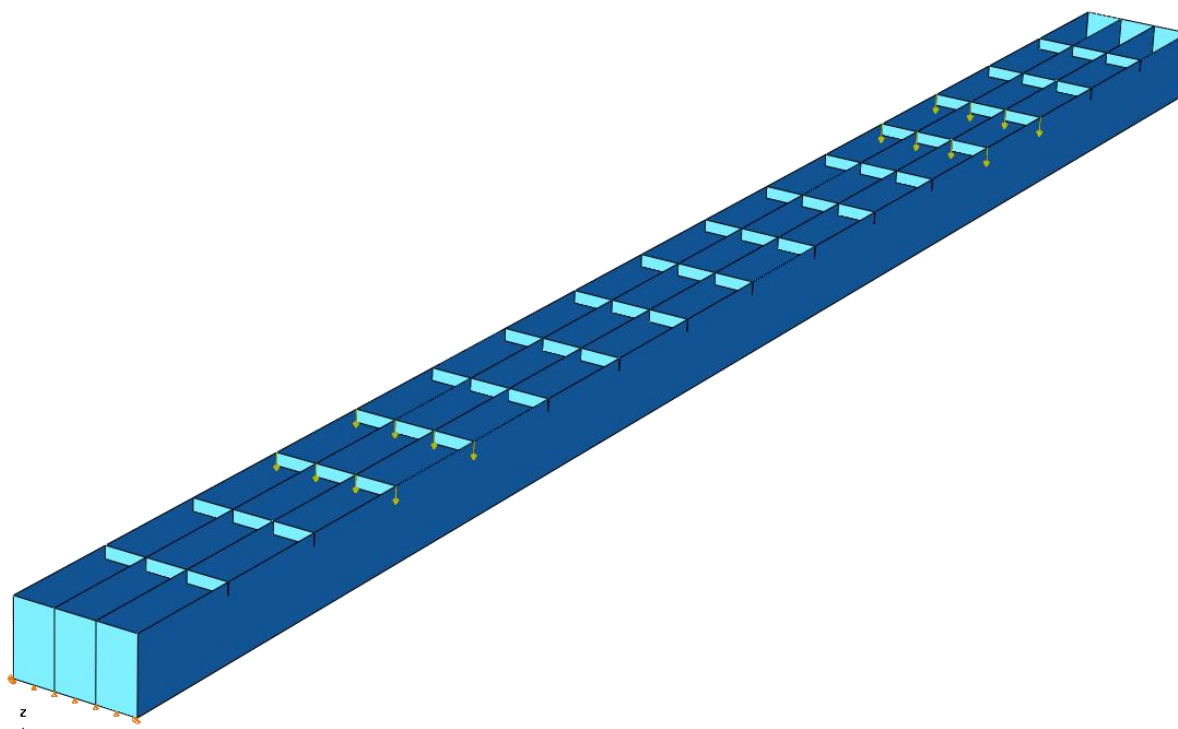


Figuur 162: Model 2: Persrooster model lijnlast haaks op de draagstaafrichting



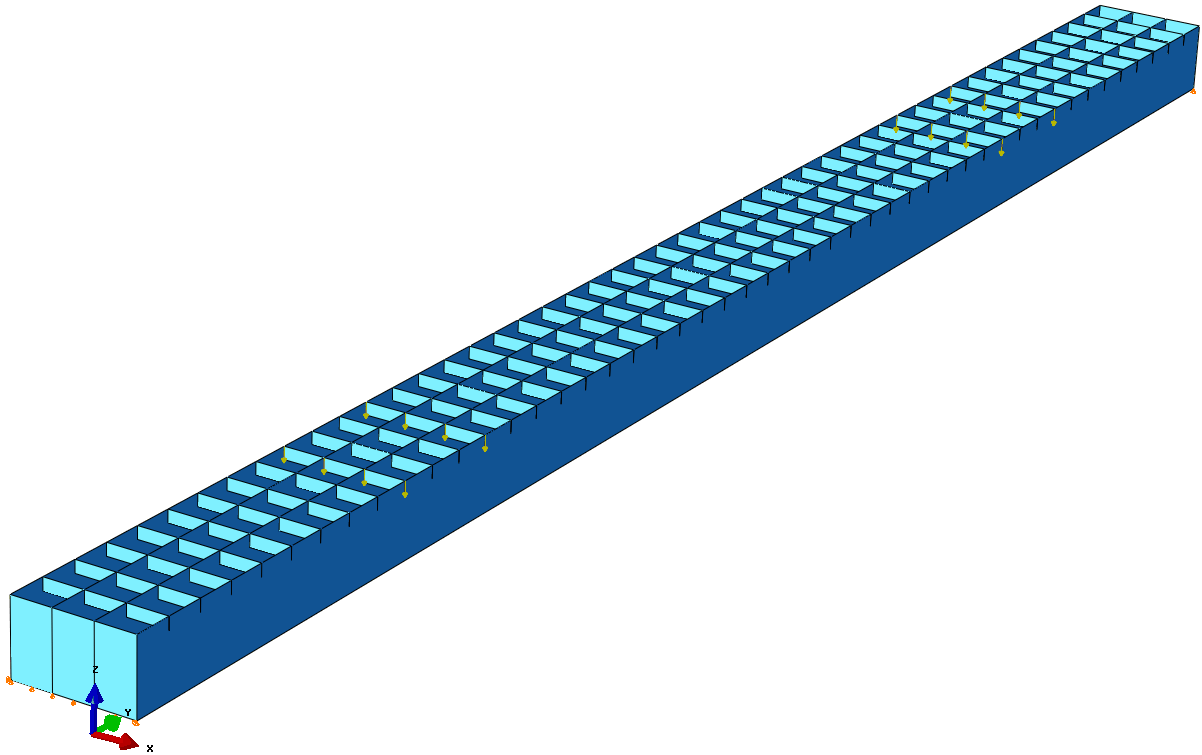
Figuur 163: Model 2: Persrooster mesh

Model 2: Persrooster model met een vulstaafmaaswijdte van 100 mm, twee lijnlasten en vaste breedte

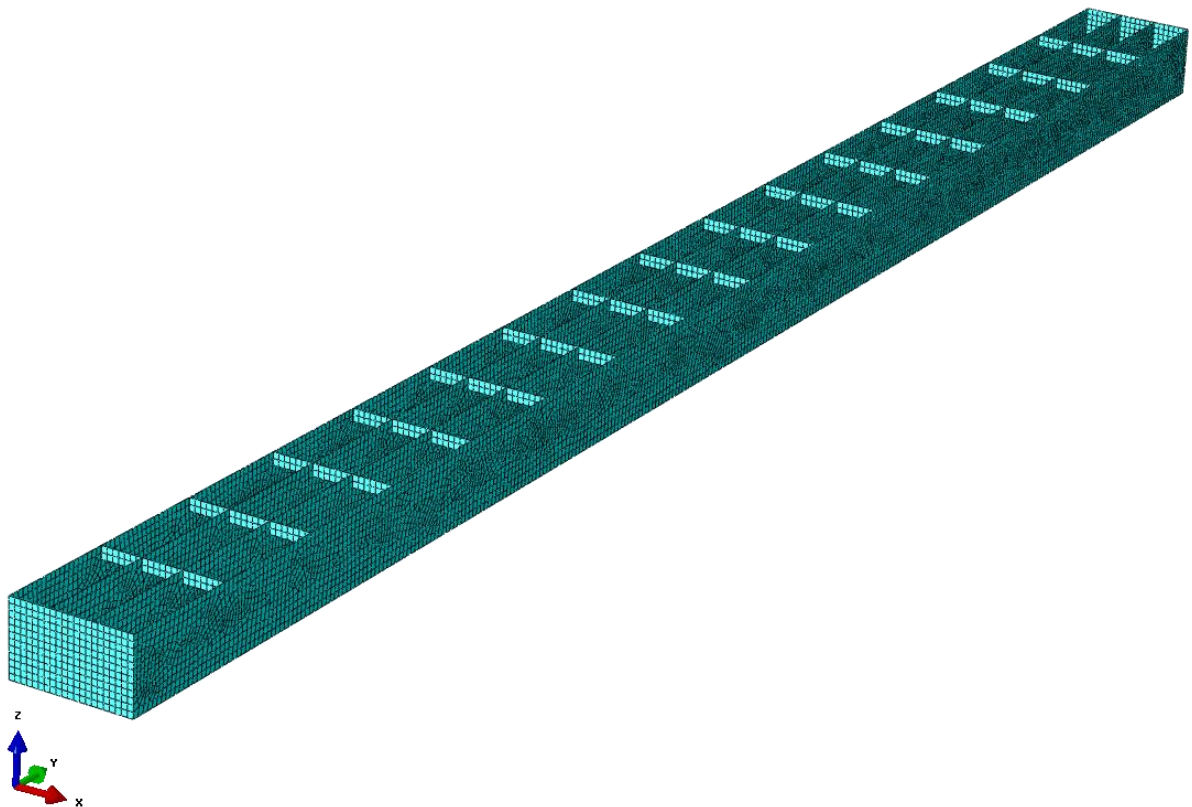


Figuur 164: Model 2: Persrooster met een constant moment en een vulstaafmaaswijdte van 100 mm

Model 2: Persrooster model met een vulstaafmaaswijdte van 33.3 mm, twee lijnlasten en vaste breedte



Figuur 165: Model 2: Persrooster met een constant moment en een vulstaafmaaswijdte van 33 mm



Figuur 166: Model 2: Persrooster strook model mesh