

2020 • 2021

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen
master in de industriële wetenschappen: elektromechanica

Masterthesis

Ontwikkeling en validatie van een innoverende stabilisatorstang
met progressieve stijfheid

PROMOTOR :

Prof. dr. ir. Elke DECKERS

PROMOTOR :

Dhr. Jan STROOBANTS

Bert Houben, Jarne Vanherck

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: elektromechanica

Gezamenlijke opleiding UHasselt en KU Leuven



2020 • 2021

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen
master in de industriële wetenschappen: elektromechanica

Masterthesis

Ontwikkeling en validatie van een innoverende stabilisatorstang
met progressieve stijfheid

PROMOTOR :

Prof. dr. ir. Elke DECKERS

PROMOTOR :

Dhr. Jan STROOBANTS

Bert Houben, Jarne Vanherck

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: elektromechanica



KU LEUVEN

Woord vooraf

Deze voorgestelde thesis *Ontwerp en validatie van een innoverende stabilisatorstang met progressieve stijfheid* is het resultaat van maanden onderzoek in het kader van de masterproef. Tevens vormt dit finaal project het sluitstuk voor onze opleiding tot industrieel ingenieur elektromechanica aan de UHasselt en de KULeuven.

We hebben dit onderwerp gekozen omdat we op zoek waren naar onderzoeksgericht project waarbij niet alleen het mechanisch ontwerp centraal staat, maar ook de modellering en validatie. De thesis heeft ons veel nieuwe aspecten bijgebracht omtrent het uitvoeren van onderzoek. We heb namelijk geleerd hoe je onderzoek op de juiste manier aanpakt, onderzoek opbreekt in relevante deeltaken en haalbare doelstellingen vooropzet. Deze thesis is een belangrijke hoeksteen voor onze verdere carrière als industrieel ingenieur.

Onder het motto “Never change a winning team”, hebben we na onze geslaagde bachelorproef gekozen om deze masterthesis samen tot een goed einde te brengen. Na de afgelopen 2 jaar alle projecten en labo’s samen hebben uitgevoerd, kunnen we wel zeggen dat we goed op elkaar ingespeeld zijn. De kunst is om ieder datgene te laten doen waar hij goed in is, zodat we mekaar aanvullen en een hecht team vormen!

In het begin van onze samenwerking was het nog wat zoeken naar het juiste tijdschema voor ons beide. Dit was niet eenvoudig mits de ene een ochtendmens is (Jarne) en de andere liever in de avond werkt (Bert). Uiteindelijk zijn we tot een compromis gekomen, elke weekdag van 10u tot 17u, met de uitzondering van lesmomenten, hebben we online meetings gehouden. Urenlang gesprekken gevoerd, urenlang schermen gedeeld, urenlang op die vervloekte bureaustoel gezeten. Maar uiteindelijk willen we elkaar graag bedanken om dit project samen tot een goed einde te volbrengen!

Graag bedanken wij de personen die deze masterthesis mogelijk gemaakt hebben en ons hierbij begeleid hebben. Allereerst willen wij Ir. Jan Stroobants, de externe promotor vanuit Flanders Make , bedanken voor de bereikbaarheid en vlotte begeleiding van dit project.

Prof. Dr. Ir. Elke Deckers, de interne promotor vanuit KULeuven voor het delen van vakkennis omtrent modelering en stijfheden. Onze promotoren stonden altijd voor ons klaar en konden steeds terecht met zowel onze theoretische als praktische vragen.

Daarnaast willen we ook graag Dhr. Simon-Pierre Verpoort bedanken voor de snelle realisatie van de testopstelling, hierdoor is deze masterthesis tijdig afgerond

Ook willen we alle docenten bedanken die onze vragen in de loop van het project hebben beantwoord.

Tot slot willen we nog onze naasten in het bijzonder bedanken die ons doorheen onze volledige studies hebben bijgestaan.

De gezamenlijke opleiding industrieel ingenieur is een
initiatief van UHasselt en KU Leuven.



Inhoudsopgave

1	Inleiding.....	17
1.1	Situering.....	17
1.2	Probleemstelling.....	19
1.3	Doelstellingen.....	20
1.4	Methode.....	21
2	Literatuurstudie.....	23
2.1	Inleiding.....	23
2.2	Stabilisatorstang.....	24
2.2.1	Functie.....	24
2.2.2	Werkingsprincipe.....	25
2.2.3	Constructie/ onderdelen.....	26
2.2.4	Basisbegrippen: stijfheid van een stabilisatorstang.....	27
2.2.5	Wat zijn de parameters die de rolstijfheid kunnen bepalen.....	27
2.2.6	Wat is progressieve stijfheid.....	28
2.2.1	Serie en parallelschakeling stijfheden (veren).....	28
2.2.2	Materiaalgebruik.....	29
2.2.3	Productie stabilisator stang.....	30
2.3	Analytisch model voor een volledige stabilisatorstang.....	31
2.4	State of the Art.....	33
2.4.1	Passief.....	34
2.4.2	Actief.....	45
3	Concepten voor realisatie van progressieve stijfheid voor het rolgedrag van een personenwagen	51
3.1	End link.....	51
3.1.1	End link – rubber.....	52
3.1.2	End link – veren.....	53
3.1.3	End link – schotelveren.....	54
3.1.4	End link – ‘machined’ drukveer.....	55
3.1.5	End link - magneten.....	56
3.2	Bladed sway bar.....	57
3.3	Centraal deel.....	58
3.3.1	Centraal deel – Spiraal torsieveer.....	58
3.3.2	Centraal deel – ‘machined’ progressieve torsie veer.....	59

3.4	Armlengte	60
4	Conceptkeuze op basis van analytisch model	61
4.1	Inleiding.....	61
4.2	Conventionele stabilisatorstang.....	62
4.2.1	Opbouw	62
4.2.2	Resultaten	64
4.3	Concept: End link- dual rate.....	66
4.3.1	Opbouw	66
4.4	Concept: End link – ‘machined’ drukveer	70
4.4.1	Opbouw	70
4.4.2	Resultaten	71
4.5	Concept: End link- schotelveren.....	75
4.5.1	Opbouw	75
4.5.2	Resultaten	76
4.6	Concept: Bladed sway bar	78
4.6.1	Opbouw	78
4.6.2	Resultaten	80
4.7	Concept: Centraal deel.....	81
4.7.1	Opbouw	81
4.7.2	Resultaten	83
4.8	Besluit en keuze concept.....	84
5	Gedetailleerd ontwerp van het concept “End link – schotelveren”	87
5.1	Ontwerptool voor schotelveren in een End link.....	87
5.1.1	Uitleg.....	87
5.1.2	Gebruiksaanwijzing.....	93
5.2	Ontwerp testopstelling.....	94
5.2.1	Progressieve stapeling van schotelveren	94
5.2.2	Dimensioneren schotelveren	96
5.2.3	Uitwijkingsbegrenzer schotelveren.....	100
5.2.4	Opstellen flexibel test concept.....	102
6	Validatie op componentniveau	103
6.1	Testopstelling.....	103
6.2	Resultaten	104
6.2.1	Schotelveerkarakteristiek opgemeten voor 5 cycli.....	106

6.2.2	Testresultaten: Indrukking externe begrenzer zonder schotelveren.....	108
6.2.3	Testresultaten: interne/externe/geen begrenzer D14 A-S1:10_S2:6.....	109
6.2.4	Testresultaat: interne begrenzer D12,5 A – S1:8_S2:0.....	111
6.2.5	Testresultaat: interne begrenzer D12,5 A – S1:0_S2:5.....	112
6.2.6	Testresultaat: interne begrenzer D12,5 A – S1:8_S2:5.....	113
6.2.7	Testresultaten: interne begrenzer D14 A-S1:9_S2:4.....	115
6.2.8	Testresultaten: interne begrenzer D16 B-S1:6_S2:3.....	116
6.2.9	Testresultaten: interne begrenzer D16 B-S1:4_S2:5.....	118
6.2.10	Testresultaten: interne begrenzer D16 C-S1:3_S2:2.....	119
6.3	Conclusie validatie	121
7	Korte bespreking CAD model: Prototype	123
8	Conclusie.....	125
8.1	Algemene conclusie	125
8.2	Toekomstig onderzoek.....	127
	Referentielijst	129
	Appendix A: Patentenlijst.....	133

De gezamenlijke opleiding industrieel ingenieur is een
initiatief van UHasselt en KU Leuven.



Lijst van de tabellen

Tabel 1: Parameters ARB	62
Tabel 2: Traagheidsmomenten	63
Tabel 3: Materiaaleigenschappen	63
Tabel 4: Kracht gegevens	63
Tabel 5: Berekeningen uitwijkingen, hoekverdraaiing en stijfheden	63
Tabel 6: Berekende stijfheden	63
Tabel 7: Resultaat van de totale verplaatsing/stijfheid	64
Tabel 8: Gegevenstabel schotelveren	75
Tabel 9: Overzichtelijke tabel-schotelveren	75
Tabel 10: Stijfheden verschillende delen	76
Tabel 11: Resultaten- schotelveren 75%.....	76
Tabel 12: Berekening oppervlakte traagheidsmoment - bladed sway bar.....	78
Tabel 13: Stijfheid i.f.v. hoekverdraaiing.....	79
Tabel 14: Resultaten tabel- concept bladed sway bar.....	80
Tabel 15: Stijfheden aparte delen	81
Tabel 16: Stijfheden nodig ter berekening van de totale stijfheid	82
Tabel 17: Invultabel, voor de verandering in stijfheid weer te geven.....	82
Tabel 18: In te vullen stijfheidsparameters.....	82
Tabel 19: Resultaat concept- centraal deel	82
Tabel 20: Schotelverentabel - 75%.....	88
Tabel 21: Resultatentabel- schotelveren 75%.....	89
Tabel 22: Schotelverentabel - interne uitwijkingbegrenzers.....	91
Tabel 23: Schotelverentabel- testconcept	92
Tabel 24: Gegevenstabel schotelveren 2	93
Tabel 25: Schotelverentabel gebruiksaanwijziging	93
Tabel 26: Tabel voor het invullen van K concept.....	93
Tabel 27: Vergelijking verschillende schotelveerklasse	98
Tabel 28: Keuze te testen schotelveren	99
Tabel 29: Overzicht mogelijke schotelveren	104
Tabel 30: Vergelijkingstabel	111
Tabel 31: Vergelijking stijfheden 2.....	112

De gezamenlijke opleiding industrieel ingenieur is een
initiatief van UHasselt en KU Leuven.



Lijst van de figuren

Figuur 1: Rolbeweging in een bocht [4].....	18
Figuur 2: Voorstelling stabilisatorstang [5].....	18
Figuur 3: Voorstelling progressieve stijfheid	20
Figuur 4: Voorstelling stabilisatorstang bij het nemen van een bocht naar links [5].....	25
Figuur 5: Voorstelling componenten [9,p.2].....	26
Figuur 6: Grafische voorstelling progressieve stijfheid	28
Figuur 8: Serieschakeling van veren [12, p.14].....	29
Figuur 7: Parallelschakeling van veren [12, p.14]	29
Figuur 9: Productieproces stabilisatorstang [14, p. 2].....	30
Figuur 10: Schematische voorstelling dimensies stabilisatorstang [15, p. 1].....	31
Figuur 11: Voorstelling buiging [16]	32
Figuur 12: Adjustable anti-roll bar [17]	34
Figuur 13: Stabilisatorstang met veranderlijke armlengte [18, p . 9].....	35
Figuur 14: Bladed Swaybar - Elephant Racing [19].....	36
Figuur 15: Grafiek van de totale stijfheid van de stabilisatorstang in functie van de verdraaiingshoek van de arm [18, p. 92].....	36
Figuur 16: Variable rate bushing [20, p. 3]	37
Figuur 17: 3 Verschillende bushings [20, p. 4], [21, p. 2].....	37
Figuur 18: Links de meest stijve uitvoering / Rechts gemiddelde stijfheid [18, p. 90]	38
Figuur 19: Voorstelling van het 2-delig centraal stuk van de stabilisatorstang [18, p . 89].....	38
Figuur 20: Conventionele link [22, p. 2].....	39
Figuur 21: Link met rubbers [22, p. 3]	39
Figuur 22: Link met variabele uitwijkingsstijfheid-veer/vloeistof [22, p. 3].....	40
Figuur 23: Variabele stijfheid door veer in het centraal deel te plaatsen [23, p.18]	41
Figuur 25: Progressieve karakteristiek gebruikmakend van een variabele End Link [24, p.6].....	42
Figuur 26: Progressieve karakteristiek gebruikmakend van een variabele End Link.....	42
Figuur 24:Schotelveren verwerken in de end-link van de stabilisatorstang [24, p.3]	42
Figuur 27: Bom van figuur 27 [25, p. 7]	43
Figuur 28:Voorstelling variabele stijfheidsmechanisme [25, p. 1].....	43
Figuur 29:Werkingswijze[25, p. 9].....	43
Figuur 30:Stijfheidsgedrag [25, p. 15].....	43
Figuur 31:Voorstelling non lineair torsion spring 2 [26, p. 4]	44
Figuur 32:Voorstelling non lineair torsion spring [26, p. 1]	44
Figuur 33: Gedrag non lineair torsion spring[26, p. 5].....	44
Figuur 34: Voorstelling actieve end link - veranderen openingskanaal [27, p. 1]	46
Figuur 35: Actieve end link met inwendig een tandheugel [28, p.2].....	47
Figuur 36: Actieve stabilisatorstang met hydraulische aansturing [18, p. 87]	48
Figuur 37: Uitvoering met magnetische koppeling 20, deze bevindt zich in het centraal gedeelte [29, p. 3]	49
Figuur 38: Assemblage van de magnetische koppeling [29, p. 5]	49
Figuur 39: Doorsnede van de magnetische koppeling [29, p. 3].....	49
Figuur 40: Conventionele end link [30].....	51
Figuur 41: End link met rubber [31]	52

Figuur 42: End link met spring [32]	53
Figuur 43: Progressieve schotelveer stapeling [33, p. 8].....	54
Figuur 44: Machined drukveer [34]	55
Figuur 45: End link met magneten.....	56
Figuur 46: Magnetten karakteristiek [35].....	56
Figuur 47: Bladed sway bar [36]	57
Figuur 48: Bladed sway bar - taret 1 [37].....	57
Figuur 49: Spiraal torsie veer	58
Figuur 50: Concept machined torsie veer	59
Figuur 51: Stabilisatorstang met veranderlijke armlengte [18, p. 9].....	60
Figuur 52: Tabblad conventionele stabilisatorstang	62
Figuur 53: Bematingen ARB [15, p. 1]	62
Figuur 54: Kracht i.f.v. uitwijking - conventionele stabilisatorstang.....	64
Figuur 55: Torsiemoment i.f.v. hoekverdraaiing- conventionele stabilisatorstang.....	65
Figuur 56: Variable (dual rate) technologie [38]	66
Figuur 57: Berekningen dual rate veer.....	67
Figuur 58: Veer karakteristiek dual rate veer	67
Figuur 59: Kracht i.f.v. verplaatsing- dual rate veer.....	68
Figuur 60: Dual rate veer karakteristiek-500/700 N/mm	68
Figuur 61: Kracht i.f.v. verplaatsing- dual rate veer- 500/700 N/mm	69
Figuur 62: Enkele voorbeeld designs van 'machined' drukveren [31]	70
Figuur 63: CAD model drukveer 1	70
Figuur 64: Parameters CAD model drukveer 1	70
Figuur 65: Randvoorwaarden drukveer 1	71
Figuur 66: CAD model 'machined' drukveer 2.....	71
Figuur 67: Parameters CAD model 'machined' drukveer 2	71
Figuur 68: FEM simulatie 1: 'machined' drukveer 1	72
Figuur 69: FEM simulatie 2: 'machined' drukveer 1	72
Figuur 70: FEM simulatie 3: 'machined' drukveer 1	72
Figuur 71: FEM simulatie 1: 'machined' drukveer 2	73
Figuur 72: FEM simulatie 2: 'machined' drukveer 2	73
Figuur 73: FEM simulatie 3: 'machined' drukveer 2	73
Figuur 74: Schematische voorstelling afmetingen schotelveer [40, p. 315].....	75
Figuur 75: Resultaten schotelveer karakteristiek- concept.....	76
Figuur 76: Resultaten- Kracht i.f.v. verplaatsing- concept schotelveren.....	77
Figuur 77: Schematische voorstelling rechthoek [41].....	78
Figuur 78: Situatieschets enkele inklemming [42]	78
Figuur 79: Verloop totale stijfheid i.f.v. hoekverdraaiing van de arm	79
Figuur 80: Kracht i.f.v. verplaatsing - concept bladed sway bar.....	80
Figuur 81: Schematische voorstelling centrale deel.....	81
Figuur 82: Torsiemoment i.f.v. torsiehoek concept centrale deel	83
Figuur 83: Schematische voorstelling schotelveren 2 [43].....	87
Figuur 84: Voorstelling seri stapeling van 4 schotelveren	88
Figuur 85: Seri stapeling van 4, 2 parallel gestapelde schotelveren	88

Figuur 86: Mogelijke situaties voor het implementeren van de ontworpen end link	90
Figuur 87: Kracht i.f.v. verplaatsing - concept schotelveren 75%.....	90
Figuur 88: Schotelveer karakteristiek- schotelveren 75%	90
Figuur 89: Progressieve stapeling doormiddel van interne uitwijkingsbegrenzers [43]	91
Figuur 90: Opstelling schotelveren in het testconcept.....	92
Figuur 91: Progressieve stapeling door verschillende schotelveren te stapelen [43, p. 37].....	94
Figuur 92: Progressieve stapeling door de een specifieke stapeling van dezelfde schotelveren [43, p. 40].....	94
Figuur 93: Progressieve gedrag door het gebruiken van interne uitwijkingsbegrenzers [43, p. 40]	95
Figuur 94: Progressieve gedrag door het gebruiken van externe uitwijkingsbegrenzers [43, p. 40]	95
Figuur 95: Progressief gedrag door het gebruiken van platte plaatjes [43, p. 40]	95
Figuur 96: Schotelveer karakteristiek: klasse A D20; F0.75=1521 N	96
Figuur 97: Resultaten D12.5 A-S1:S2:5 _ met stack 3	97
Figuur 98: Resultaten D12.5 A-S1:S2:5 _ zonder stack 3	97
Figuur 99: Gemeten veer karakteristiek vs berekende [45]	97
Figuur 100: Geselecteerde punten: vergelijking Disc spring solver vs het Excelmodel - D16 C-S1:5_S2:2	98
Figuur 101: Vergelijking schotelveer karakteristiek Disc spring solver vs het Excelmodel - D16 C-S1:5_S2:2	98
Figuur 102: Vergelijking schotelveer karakteristiek Disc spring solver vs het Excelmodel - D16 B-S1:5_S2:3	98
Figuur 103: Geselecteerde punten: vergelijking Disc spring solver vs het Excelmodel - D16 B-S1:5_S2:3	98
Figuur 104: Schematische voorstelling externe uitwijkingsbegrenzers [43, p. 40].....	100
Figuur 105: Schematische voorstelling externe uitwijkingsbegrenzers [43, p. 40].....	100
Figuur 106: CAD-model interne uitwijkingsbegrenzer	101
Figuur 107: CAD-model testdesign	102
Figuur 108: Schematische voorstelling testdesign	102
Figuur 109: Close up testopstelling	103
Figuur 110: Gehele testopstelling	103
Figuur 111: Lineaire regressie toegepast op een schotelveer karakteristiek	105
Figuur 112: Lineaire regressie op verschillende delen van een curve	106
Figuur 113: Voorstelling stapeling: S1:4_S2:7	106
Figuur 114: Aangelegde sinusvormige verplaatsing	106
Figuur 115: Schotelveer karakteristiek 5 doorlopen cyclussen.....	107
Figuur 116: Indrukking externe begrenzer	108
Figuur 117: Schotelveer karakteristiek met en zonder indrukking van de externe begrenzer.....	109
Figuur 118: Schotelveren stapeling S1:10_S2:6	109
Figuur 119: Schotelveer karakteristiek D14 A:S1:10_S2:6	109
Figuur 120: Kracht i.f.v. verplaatsing: vergelijking tussen de verschillende begrenzers	110
Figuur 121: Schotelveren stapeling S1:8_S2:0	111
Figuur 122: Schotelveer karakteristiek met interne begrenzer D12.5 A- S1:8_S2:0	111
Figuur 123: Schotelveren stapeling S1:0_S2:5	112
Figuur 124: Schotelveer karakteristiek met interne begrenzer D12.5 A- S1:0_S2:5	112

Figuur 125: Schotelveren stapeling S1:8_S2:5	113
Figuur 126: Schotelveer karakteristiek met interne begrenzer D12.5 A- S1:8_S2:5	113
Figuur 127: Kracht i.f.v. verplaatsing; D12.5 A- S1:8_S2:5- 143N/mm	114
Figuur 128: Kracht i.f.v. verplaatsing; D12.5 A- S1:8_S2:5- 147N/mm	114
Figuur 129: Schotelveren stapeling S1:9_S2:4	115
Figuur 130: Schotelveer karakteristiek met interne begrenzer D14 A- S1:9_S2:4	115
Figuur 131: Kracht i.f.v. verplaatsing; D14 A- S1:9_S2:4	115
Figuur 132: Schotelveren stapeling S1:6_S2:3	116
Figuur 133: Schotelveer karakteristiek met interne begrenzer D16 B-S1:6_S2:3	116
Figuur 134: Kracht i.f.v. verplaatsing; interne begrenzers: D16 B-S1:6_S2:3-143 N/mm	117
Figuur 135: Kracht i.f.v. verplaatsing; interne begrenzers: D16 B-S1:6_S2:3-150N/mm	117
Figuur 136: Schotelveren stapeling S1:4_S2:5	118
Figuur 137: Schotelveer karakteristiek met interne begrenzer D16 B-S1:4_S2:5	118
Figuur 138: Kracht i.f.v. verplaatsing; met interne begrenzers D16 B-S1:4_S2:5-143 N/mm	118
Figuur 139: Schotelveren stapeling S1:3_S2:2	119
Figuur 140: Schotelveer karakteristiek met interne begrenzer D16 C-S1:3_S2:2	119
Figuur 141: Kracht i.f.v. verplaatsing; met interne begrenzers D16 C-S1:3_S2:2-136 N/mm	120
Figuur 142: Kracht i.f.v. verplaatsing; met interne begrenzers D16 C-S1:3_S2:2-138 N/mm	120
Figuur 143: CAD-model prototype	123

Abstract

Deze masterproef gebeurt i.s.m. Flanders Make, een Vlaams onderzoekscentrum ter ondersteuning van product- en procesinnovatie binnen de maakindustrie. Het huidig onderzoek situeert zich binnen de automobielsector.

De dynamische prestaties van een voertuig worden verbeterd d.m.v. een stabilisatorstang. Het onderdeel zorgt voor minder rolbeweging van het voertuig tijdens het nemen van een bocht. Dit gaat echter ten koste van het comfort bij het rijden over een oneffen wegdek.

Deze masterthesis beoogt de ontwikkeling en validatie van een innoverende stabilisatorstang met progressieve stijfheid. Specifiek betekent dit een lage stijfheid bij lage rolhoeken en een hoge stijfheid bij hoge rolhoeken. Dit verbetert de rijervaring ten opzichte van de conventionele stang, maar tegen een lagere prijs in vergelijking met actieve veersystemen.

Een literatuurstudie is uitgevoerd om kennis te vergaren omtrent het stabilisatorstangstelsel. Vervolgens zijn concepten uitgewerkt, en eigenhandig gemodelleerd via Excel. Hieruit is het concept waarbij schotelveren geïntegreerd zijn in de end link gekozen. De validatie gebeurt d.m.v. een zelfontworpen testopstelling waarbij de schotelveer karakteristiek opgemeten wordt. De testresultaten geven een licht afwijkende waarden t.o.v. het model. De opgemeten stijfheid ligt steeds iets hoger dan vooraf voorspeld. Er kan een progressiviteit van omtrent 27% t.o.v. conventionele stabilisatorstang behaald worden. Tenslotte is er een prototype uitgewerkt als CAD-model, die voldoet aan de vereisten eisen.

De gezamenlijke opleiding industrieel ingenieur is een
initiatief van UHasselt en KU Leuven.



Abstract in English

This master's thesis is performed in cooperation with Flanders Make, a Flemish research centre for supporting product and process innovation within the manufacturing industry. The present research focuses on the automotive sector.

The dynamic performance of a vehicle is improved by adding a stabiliser bar. The component ensures less rolling motion of the vehicle during cornering. However, this is at the expense of comfort (more vibration) when driving over an uneven road surface.

This thesis focuses on the development and validation of an innovative stabiliser bar with progressive stiffness. Specifically, this means low stiffness at low roll angles and high stiffness at high roll angles. This improves the driving experience compared to the conventional bar, but at a lower price compared to active suspension systems.

A literature study is carried out to gather knowledge about the stabiliser bar system. Afterwards, concepts were worked out, and modelled in Excel. Therefore, the concept whereby disc springs are implemented in the end link was chosen. The validation is done by means of a self-designed experimental set-up in which the disc spring characteristics are measured. The test results give slightly different values compared to the model. The measured stiffness is always slightly higher than predicted. A progression rate of approx. 27% compared to a conventional stabiliser bar can be achieved. Finally, a prototype has been developed as a CAD-model, which fulfils the requirements

1 Inleiding

Deze masterthesis omvat de ontwikkeling en validatie van een innoverende stabilisatorstang van een personenauto. Allereerst zal de inleiding van deze thesis een situering geven van dit project, samen met de beoogde doelstellingen en een plan van aanpak. Hierna volgt een grondige literatuurstudie omtrent het onderwerp van het project, nl. de stabilisatorstang en wat progressief betekent doorheen deze studie. Bijkomend is er een state of the art opgesteld op basis van een markt- en patentenonderzoek.

In hoofdstuk 4 worden de concepten uitvoerig besproken waarbij een progressieve stijfheid behaald kan worden. Op het laatste van dit hoofdstuk wordt er ook gekozen welke concepten worden meegenomen naar de volgende stap om tot een oplossingen te komen. Het volgende hoofdstuk 5 bevat een verdere uitwerking van de concepten. Hierin worden voor elk van de concepten een analytisch model opgesteld. Uit de eerste resultaten van deze modellen wordt een keuze gemaakt voor het finaal concept. Dit concept wordt in hoofdstuk 6 verder uitgewerkt. Naast een uitbreiding van het Excelmodel is er ook een ontwerp gemaakt voor een testopstelling die nadien toegepast zal worden voor de validatie. Deze validatie gebeurt in hoofdstuk 7, hierin worden de schotelveercharacteristieken van een aantal stapelingen opgemeten en vergeleken met het opgestelde model. Op basis van de bekomen testresultaten wordt een prototype in een CAD-formaat uitgewerkt. Dit wordt in hoofdstuk 8 kort besproken.

Hoofdstuk 9 bevat de conclusie van de gehele masterthesis.

1.1 Situering

Flanders Make is het strategisch onderzoekscentrum voor de maakindustrie onder meer gesteund door de Vlaamse Overheid. Het doel van Flanders Make is bij te dragen tot de technologische ontwikkeling van de voertuigen, machines en fabrieken van de toekomst. Zo creëren ze toegevoegde waarde voor de maakindustrie. Samen helpen ze ondernemingen om beter en sneller te innoveren. Daarnaast zet het bedrijf sterk in op internationale innovatiesamenwerking en op participatie in Europese onderzoeksprojecten [1].

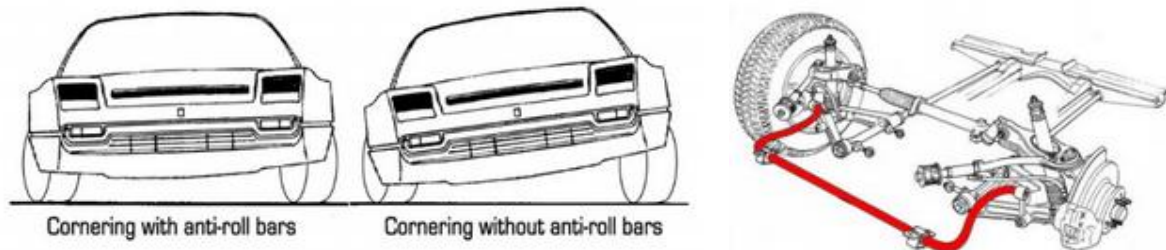
Naast hoogkwalitatief onderzoek biedt Flanders Make ook een uitgebreid aanbod aan in de test- en validatie-infrastructuur. Hierdoor kunnen product- en productie-innovaties uit verschillende industrietakken grondig getest worden.

Dit project komt tot stand in het LightVehicle project.

Het Interreg V-A Euregio Maas Rijn(EMR) programma investeert bijna 100 miljoen in de ontwikkeling van dit Interreg-gebied in de periode tot 2020. Het gebied strekt zich uit van Leuven in het westen tot de grenzen van Keulen in het oosten, en loopt van Eindhoven helemaal tot aan de grenzen van Luxemburg. Meer dan 5.5 miljoen mensen wonen in deze grensoverschrijdende regio, waar het beste van drie landen samenkomt in een echte Europese samenleving. Met deze investering van EU-fondsen in de Interreg-projecten van regionale projectpartners, investeert de EU direct in de economische ontwikkeling, innovatie, territoriale ontwikkeling en de sociale inclusie en onderwijs in dit gebied. [2]

Deze masterthesis omvat de ontwikkeling en validatie van een vernieuwde stabilisatorstang van een auto voor een performante maar toch comfortabele rijervaring. Dit rijgedrag wordt bekomen door het toepassen van progressieve stijfheid: hoge stijfheid bij hoge rolhoeken van het voertuig (= sportief), lage stijfheid bij kleine rolhoeken (= comfortabel) [3].

Figuur 1 toont de rolbeweging van een auto bij het nemen van een bocht [4]. Figuur 2 toont een schematische voorstelling van een conventionele stabilisatorstang [5].



Figuur 1: Rolbeweging in een bocht [4]

Figuur 2: Voorstelling stabilisatorstang [5]

Het doel van een stabilisatorstang is om dynamische prestaties te verbeteren tijdens het nemen van een bocht. Het zorgt voor minder rolbeweging van het voertuig tijdens het nemen van een bocht. Vandaar de toepasselijke Engelstalige benaming: *anti-roll bar* (ook wel *sway bar* genoemd). Een andere benaming is torsiestang, omdat het centrale werkende deel van een stabilisatorstang op torsie wordt belast.

De stabilisatorstang is een stang die zorgt voor een rechtstreekse connectie tussen de rechter- en de linker-wielophanging op eenzelfde voertuigas.

Naast dynamische prestatieverbetering verhoogt de stabilisatorstang ook de veiligheid van het voertuig. Het speelt een grote rol in de baanvastheid, vooral bij het nemen van bochten.

Deze stang kan zich zowel op de vooras als op de achteras bevinden. De verhouding tussen de stijfheid van beide stabilisatorstangen is bepalend voor het onderstuur- of overstuurgedrag van het voertuig tijdens een bocht. De montage aan het voertuigchassis gebeurt door middel van beugels met daarin rubbers. De verbinding met de wielophanging gebeurt aan beide uiteinden van de stabilisatorstang door middel van een scharnierende stang (end links).

Naast de performantie en het comfort, zijn andere vereisten dat de stang bestendig dient te zijn tegen allerlei omgevingsfactoren zoals water, strooizout, ... voornamelijk wegens de positionering aan de onderzijde van het voertuig. Daarnaast moet de stabilisatorstang een aanzienlijke levensduur hebben tegen een lage kost.

1.2 Probleemstelling

De onderzoeksvraag luidt als volgt: "Is het mogelijk om een stabilisatorstang met progressieve stijfheid te ontwerpen, waarbij de juiste balans ontstaat tussen comfort en performantie?"

Iedereen verkiest een auto die comfort combineert met sportief rijgedrag. Een beperkt trillingsniveau op oneffen wegdek is typisch voor een comfortabel voertuig, terwijl een beperkte rolneiging in de bochten typisch is voor een voertuig met een sportief rijgedrag. Dit gedrag kan worden bekomen door middel van een actief systeem, waarbij actuatoren aangestuurd worden op basis van sensormetingen.

De mogelijkheid tot oncomfortabel doet zich voor wanneer er een conventionele stabilisatorstang wordt gebruikt. Deze stabilisatorstang kan stijf zijn of flexibel. De stijve eigenschap zorgt voor het sportief gedrag. Sportief in dit onderzoek betekent een verminderd rolgedrag tijdens het nemen van bochten.

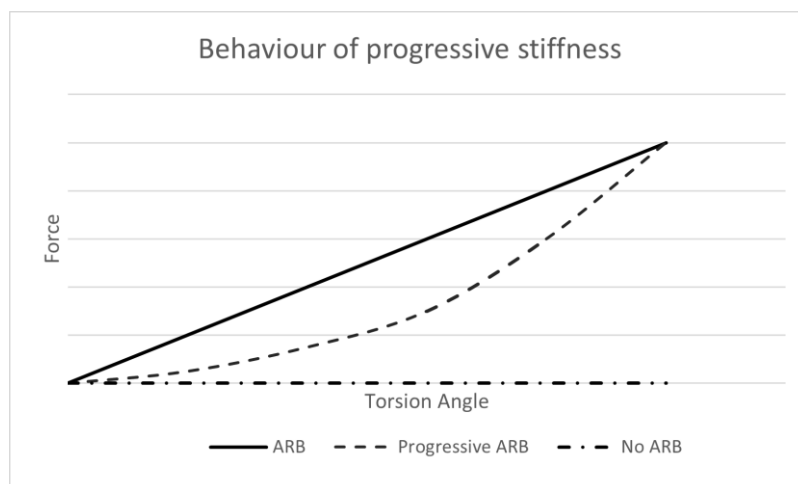
De flexibele eigenschap zorgt voor een zachter rijgedrag t.o.v. een stijve stabilisatorstang, er zijn minder trillingen bij een onregelmatig wegdek. Daarentegen de wagen helt meer bij het nemen van bochten. Daarentegen zijn er minder trillingen bij een onregelmatig wegdek.

1.3 Doelstellingen

Het doel van deze masterproef is om een zo eenvoudig mogelijke oplossing te ontwerpen voor het bereiken van progressieve stijfheid bij een stabilisatorstang, waarbij de kostprijs en het gedrag centraal staan.

Zoals eerder vermeld betekent progressieve stijfheid in deze masterproef dat de stabilisatorstang flexibeler gedraagt bij normaal rijgedrag en zo een comfortabelere rit aanbiedt. Anderzijds bij sportief gedrag of in bochten een stijver gedrag veroorzaakt zodat de auto stabiel(er) (vlakker) op de baan ligt. Specifiek mikt dit ingenieursproject op een progressiviteit van 15% t.o.v. het lineaire stijfheidsgedrag van de conventionele stabilisatorstang, bij een armuitwijking van 7.5 mm.

Figuur 3 geeft het gedrag weer van een stabilisatorstang met progressieve stijfheid ten opzichte van een stabilisatorstang met constante stijfheid en een situatie zonder stabilisatorstang. De richtingscoëfficiënt stelt telkens de stijfheid voor. De stippellijn toont de variabele stijfheid wordt, de volle lijn is het verloop voor de constante stijfheid. De y-as toont de kracht op de wielen, en op de x-as geeft de torsiehoek van de stabilisatorstang weer.



Figuur 3: Voorstelling progressieve stijfheid

Er is een beperking wat betreft de beschikbare inbouwruimte. In een auto zijn alle onderdelen opgesteld voor een optimaal plaats gebruik. De vorm van de stabilisatorstang verschilt van voertuig tot voertuig, omdat de stabilisatorstang aangepast wordt aan de beschikbare ruimte. Omdat deze masterproef zich vooral focust op het idee, zal de geometrie van de stabilisatorstang ten gevolge van de beschikbare ruimte achterwege gelaten worden. De focus van deze masterthesis ligt op het vinden van een concept waarbij een progressieve stijfheid op een passieve manier behaald kan worden. Voor het ontwerp is de inbouwruimte geen prioriteit, al wordt er wel rekening gehouden dat de huidige grootteorde van dimensies van de conventionele stabilisatorstang niet overschreden worden in het ontwerp.

De opgestelde modellen van het finaal gekozen eindconcept zal nadien gevalideerd worden door praktijktesten. Met een ontworpen testopstelling zal er nagegaan worden of de resultaten uit het model overeenstemmen met de opgemeten testresultaten. Totslot zal er prototype ontworpen

worden in CAD-formaat. Toekomstig onderzoek kan dit prototype verder uitwerken en testen in de praktijk.

1.4 Methode

Het eerste deel van het project bestudeert de stabilisatorstangen die beschikbaar zijn op de markt en welke huidige technieken erin slagen om progressieve stijfheid te bekomen. Hieruit valt er mogelijk inspiratie te halen, om zo eventueel technieken te combineren.

Alvorens een idee uit te werken, is het nuttig na te gaan of bepaalde materialen dit progres

sief gedrag rechtstreeks leveren. Dit zou dan puur een materiaalverandering inhouden van de stabilisatorstang. Hierbij wordt verwacht dat dit niet de oplossing gaat bieden aan de onderzoeksvraag. De focus ligt meer op het ontwikkelen van een passief mechanisme waarbij een progressief verloop bekomen wordt op de kracht/verplaatsingscurve van het geheel stabilisatorstang systeem.

Aan de hand van een literatuurstudie, state of the art en mechanisch inzicht worden een aantal concepten opgesteld waarbij wellicht een progressieve stijfheid behaald kan worden. De concepten worden nadien vertaald in een opgesteld Excelmodel. In dit wiskundig model worden de stijfheden van het totaal systeem berekend en wordt er geanalyseerd of er effectief sprake is van een progressief verloop op het totaal systeem. Uit de eerste resultaten van de modellen zal er een finale conceptkeuze gemaakt worden. Dit concept zal dan verder uitgewerkt worden in bijkomende modellen. De basis werkingsprincipes van dit finaal concept zal grondig getest worden of de testresultaten overeenstemmen met de verwachte waarden uit het model. Hiervoor zal er een testopstelling ontworpen worden, die toelaat om snel en eenvoudig veel testen uit te voeren in een korte tijdsperiode.

Nadien zal er op basis van de testresultaten het prototype ontworpen worden in CAD via Creo parametric. In toekomstig onderzoek kan dit prototype in realiteit getest worden of dit voldoet aan de nodige eisen.

2 Literatuurstudie

2.1 Inleiding

Deze bronnenstudie bevat een aantal van de relevante aspecten, dewelke betrekking hebben tot de masterthesis: “*Ontwikkeling en validatie van een innoverende stabilisatorstang met progressieve stijfheid*”.

Allereerst volgt een uitgebreide bespreking van de conventionele stabilisatorstang, zoals het productieproces, het werkingsprincipe en het principe van progressiviteit en wat dit specifiek betekent in deze thesis. Nadien wordt een wiskundig model opgebouwd voor de (progressieve) stijfheid van een stabilisatorstang te berekenen aan de hand van verscheidene basisformules uit de mechanica. Dit wiskundig model zal nadien de basis vormen voor het verder uitwerken van de concepten wat gebeurt in hoofdstuk 5.

In deze studie wordt er grondig onderzoek gedaan naar het opsporen van patenten over een stabilisatorstang met een niet-lineair (progressief) gedrag. De relevante patenten, samen met het huidig marktaanbod, zijn besproken in de sectie “State of the Art”. De overige patenten zijn opgelijst in appendix A.

2.2 Stabilisatorstang

Deze paragraaf geeft uitleg over de functie van een stabilisatorstang, hoe het werkt en hoe de constructie eruitziet. Vervolgens worden enkele basisbegrippen uitgelegd die nodig zijn om de thesis te kunnen begrijpen. Daarna worden de parameters besproken die de stijfheid kunnen bepalen. Hierna wordt uitgelegd wat progressieve stijfheid is. Om af te sluiten met het materiaal gebruik en de productie van de stabilisatorstang.

2.2.1 Functie

De stabilisatorstang is een belangrijk onderdeel van de ophanging van een voertuig en is belangrijk voor de veiligheid van het voertuig. Het speelt een grote rol in de baanvastheid, vooral bij het nemen van bochten. Het nadeel van een traditionele stabilisatorstang is een verminderd comfort bij het rechtdoor rijden op een oneffen wegdek.

De twee hoofddoelen van de stabilisatorstang zijn:

1. Reduceren van de rolbeweging tijdens het nemen van een bocht.

Doordat het zwaartepunt van de auto vaak hoger ligt dan de rol-as van de auto, zorgt de middelpuntvliedende kracht voor een rolmoment tijdens het nemen van een bocht. De rolbeweging komt ook voor wanneer één wiel van de auto over een hobbel rijdt. Hierdoor neemt de kracht op het buitenste wiel sterk toe ten opzichte van het binnenste wiel. De stabilisatorstang zorgt ervoor dat de kracht evenwichtiger wordt verdeeld over beide wielen. Dit zorgt voor betere dynamisch gedrag van de auto. De stabilisatorstang zorgt voor een verhoging van de rol-stijfheid van de voertuigas waarop de stabilisatorstang gemonteerd is. "Rol-stijfheid" is de weerstand tegen de rolbeweging van de auto.

Uit onderzoek [6] blijkt dat het toevoegen van een stabilisatorstang zorgt voor reducering van de rolbeweging met 67% in vergelijking met een auto zonder stabilisatorstang.

2. Wijzigen van de sliphoek van de auto

Door het veranderen van de stijfheid van de stabilisatorstangen voor- en achteraan de auto wordt de sliphoek gewijzigd, om zo onder- of overstuur te verminderen. Onderstuur is het fenomeen dat optreedt wanneer de voorbanden van de auto geen grip meer hebben en beginnen te slippen. Dit zorgt ervoor dat men minder scherp kan indraaien bij het nemen van een bocht. Overstuur treedt op wanneer de achterbanden van het voertuig geen grip meer hebben, hierdoor zullen de achterbanden beginnen te slippen. De auto lijkt te glijden over de achterwielen van het voertuig, wat ervoor zorgt dat de achterwielen zich bewegen naar de buitenkant van de bocht. Beide fenomenen zorgen ervoor dat het sturen van het voertuig bemoeilijkt wordt [7],[8]. Onderstuur verminderen is mogelijk door de torsiestijfheid van de achterste stabilisatorstang te verhogen of door de stijfheid van de voorste stang te verlagen. Overstuur verminderen is mogelijk door de torsiestijfheid van de voorste stabilisatorstang te verhogen of de stijfheid van de achterste stang te verlagen.

De graad van stijfheid van de stabilisatorstang is vaak de afweging tussen het comfort en het dynamisch rijgedrag van de auto.

De stijve eigenschap zorgt voor het sportief gedrag. Sportief in dit onderzoek betekent dat de auto vlakker op de weg ligt, waardoor de wagen minder rolbeweging ondervindt tijdens het nemen van bochten. De flexibele eigenschap zorgt voor een zachter rijgedrag t.o.v. een stijve stabilisatorstang, er zijn minder trillingen bij een onregelmatig wegdek. Daarentegen de wagen helt meer bij het nemen van bochten. Daarentegen zijn er minder trillingen bij een onregelmatig wegdek.

2.2.2 Werkingsprincipe

De stabilisatorstang verbindt de wielen die liggen op eenzelfde voertuig-as. Meestal wordt deze toegepast op alle voertuigassen.

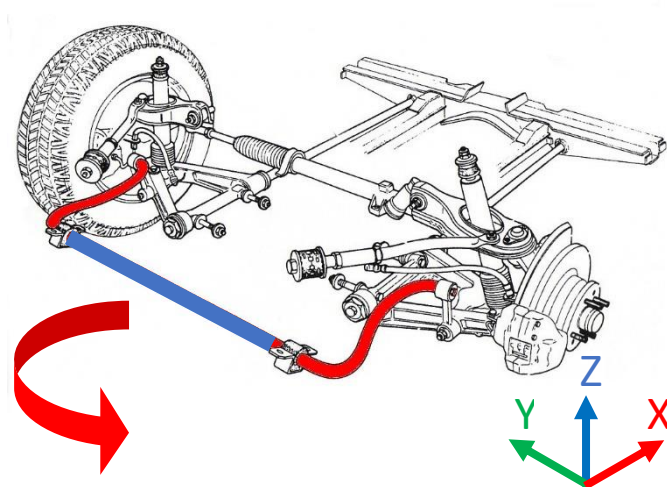
De stabilisatorstang heeft effect wanneer het ene wiel relatief gezien hoger komt te liggen dan het andere zoals tijdens het nemen van een bocht of het rijden over een hobbel.

Het werkprincipe wordt geïllustreerd in figuur 1, hier neemt de auto een bocht naar. Figuur 4 geeft een schematische voorstelling van de stabilisatorstang weer. De pijl in deze figuur geeft aan hoe dat de bocht genomen wordt [5].

Door de ligging van het zwaartepunt zal er een rolbeweging ontstaan naar de buitenkant van de auto. De ophanging aan de rechterzijde van de auto wordt gecompriëerd, hierdoor komt het rechterwiel relatief gezien dicht bij het chassis, waardoor de afstand tussen wiel en chassis verkleint. Het uiteinde van de arm aan rechterwielophanging (aangegeven in het rood in figuur 4) gaat zo naar boven bewegen. Het centrale deel (aangegeven in het blauw op figuur 4) zal een torsiemoment ondervinden, doordat de 2 uiteindes van de armen verdraait zijn t.o.v. elkaar.

Het uiteinde van de arm aan de linkwielophanging gaat dit gedrag willen volgen en zorgt er dus voor dat de ophanging aan de linkerzijde ook wordt gecompriëerd. Het linkerwiel en het chassis komen zo dicht bij elkaar te liggen. De stabilisatorstang “levelt” de wagen dus uit tijdens het nemen van een bocht.

De grootte van de stijfheid van de stabilisatorstang bepaalt de mate van reductie van de rolbeweging van de auto.



Figuur 4: Voorstelling stabilisatorstang bij het nemen van een bocht naar links [5]

2.2.3 Constructie/ onderdelen

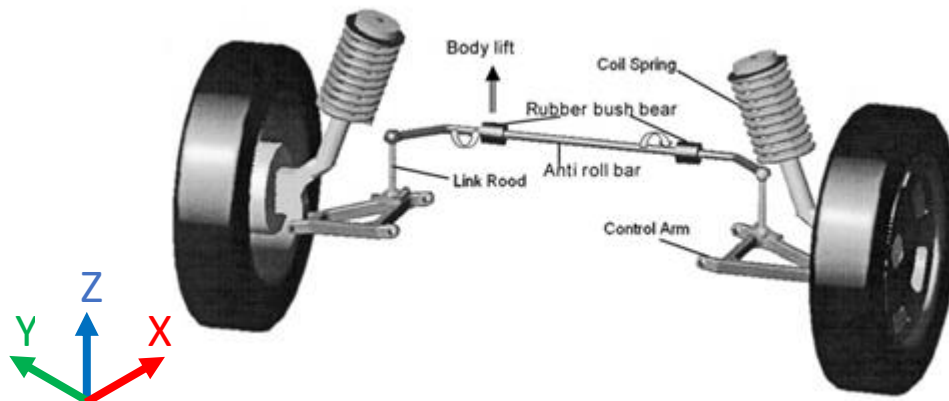
Zoals eerder vermeld kan de stabilisatorstang zich zowel aan de vooras/achteras als op de beide bevinden. Een voorstelling van de stabilisatorstang met nevencomponenten wordt in figuur 4 weergegeven [9].

De stabilisatorstang kan uitgevoerd zijn in verschillende vormen, omdat de stang onderaan en rondom het chassis geplaatst wordt. Meestal heeft de stang een U-vorm gemaakt uit verenstaal [6].

Bij de meest voorkomende uitvoering van de laatste jaren is de stabilisatorstang hol. Dit komt door de gewichtsbesparing ten opzichte van een volle stang. De stangen kunnen in het algemeen diktes aannemen van 10 – 60 mm [6].

Het centrale deel van de stabilisatorstang wordt door middel van beugels met daarin rubbers (“bushings”) vastgemaakt aan het chassis van de auto. Ze zorgen ervoor dat de stabilisatorstang niet op en neer kan bewegen maar enkel vrij kan roteren rond de as van het centraal deel van de stabilisatorstang. Er bestaan 2 varianten op deze bushings, de ene laat een axiale beweging toe, de andere niet. De meest voorkomende materialen zijn rubber, nylon of polyurethaan [6]. De race-industrie past zelfs metalen bushings toe.

De uiteinden van de stabilisatorstang worden met een kogelverbinding, end link genoemd, verbonden aan de wielophanging. Deze verbinding zorgt ervoor dat de armen van de stabilisatorstang omhoog of omlaag bewegen al naargelang de beweging van het wiel.



Figuur 5: Voorstelling componenten [9,p.2]

2.2.4 Basisbegrippen: stijfheid van een stabilisatorstang

Deze paragraaf legt kort uit wat stijfheid is. Stijfheid is de mate waarin een materiaal zich tegen elastische vervorming verzet.

De elasticiteitsmodulus (E) is een maat voor de stijfheid van een materiaal onder normaalbelasting. Des te groter de modulus, des te stijver het materiaal en omgekeerd. De E -modulus valt waar te nemen in het begin van een trekkromme, dit is de richtingscoëfficiënt van het deel van de curve dat volgens een rechte verloopt. De relatieve rek staat op de x -as en de spanning op de y -as. De formule voor de elasticiteitsmodulus is dus: $E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon}$.

Buigstijfheid (“Flexural Modulus”) geeft aan hoe een materiaal zich verzet tegen doorbuiging. De buigstijfheid kan bepaald worden door middel van een driepuntsbelasting.

Torsiestijfheid bekijkt het gedrag van het materiaal bij een inwerkend koppel. Torsiestijfheid wordt gevonden door volgende formule: $k = \frac{G \cdot I_p}{l}$ [Nm/rad], hier is I_p het polair traagheidsmoment, G de glijmodulus en l de lengte van een staafvormig element. De glijmodulus (afschuifmodulus) is een ratio, die het effect aangeeft van de schuifspanning op de “shear strain”. Deze kan als volgt bepaald worden: $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$. Hierin is ν de Poisson-factor. De Poisson-factor is een materiaalconstante die beschrijft hoe een materiaal reageert op een trek- of drukbelasting. Het is de ratio tussen de rek in de longitudinale richting ten opzichte van de laterale richting. Deze wordt als volgt bepaald: $\nu = -\frac{\epsilon_{yy}}{\epsilon_{xx}}$. Hier is ϵ_{yy} de rek in de x -richting (richting waarin getrokken wordt) en ϵ_{xx} de rek in de richting loodrecht op de x -richting [10],[11].

Torsiestijfheid kan ook worden uitgedrukt als $k = \frac{\Delta M}{\Delta\theta} \left[\frac{Nm}{rad} \right]$, ΔM is het verschil in torsiemoment dat wordt aangebracht op de component en $\Delta\theta$ is het verschil in verdraaiing van het onderdeel t.o.v. zijn oorspronkelijke positie [10].

2.2.5 Wat zijn de parameters die de rolstijfheid kunnen bepalen.

Een stabilisatorstang bestaat normaliter uit één stang die conceptueel in 3 delen gesplitst is. Namelijk de armen en het centraal deel. De stijfheden van deze delen zijn van groot belang en daarom bespreekt deze paragraaf de parameters die de stijfheden bepalen.

Door de armlengte of het materiaal aan te passen kan de mate van doorbuiging/buigstijfheid gewijzigd worden.

Het verschil in uitwijking tussen beide uiteindes van de armen van een stabilisatorstang zorgt voor een torsiemoment op het centraal deel van de stabilisatorstang. De lengte van de armen en de kracht bepalen de grootte van het torsiemoment op de stang. Het oppervlaktetraagheidsmoment is rechtstreeks afhankelijk van de doorsnede. Door deze te vergroten verhoogt de buigstijfheid.

Het aanpassen van het materiaal zorgt voor andere materiaaleigenschappen waardoor er een andere stijfheid bekomen wordt.

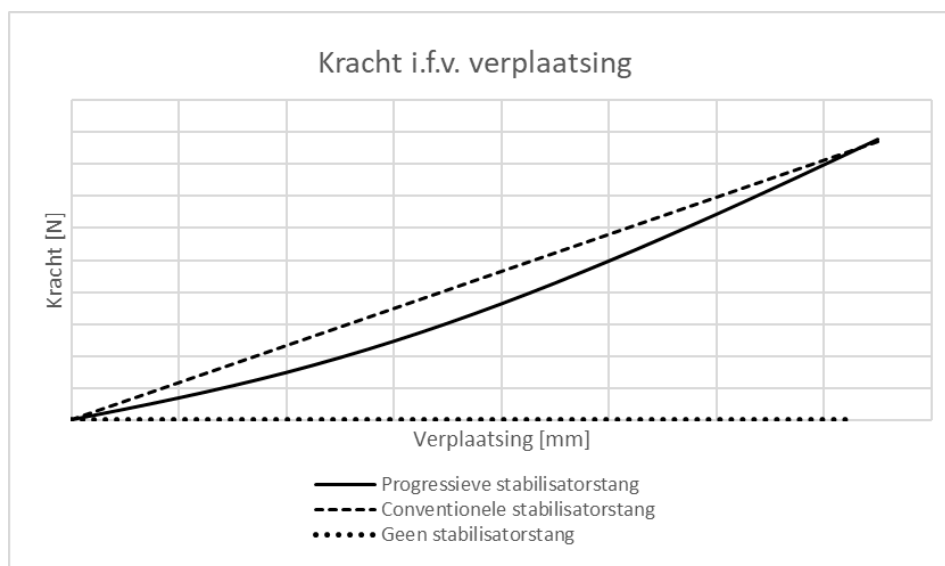
De grootte van de sectiedoorsnede van het centrale deel heeft ook een invloed op de torsiestijfheid van de stabilisatorstang aangezien het polair traagheidsmoment een variabele is.

Er kan ook gekeken worden naar het volledig systeem van de stabilisatorstang. Hierbij kan de End link ook een rol spelen in de grootte van de totale stijfheid.

Het veranderen van de vorm van de bushings kan ook de rolstijfheid beïnvloeden. Het wiskundig model in paragraaf 3.3 kwantificeert deze parameters.

2.2.6 Wat is progressieve stijfheid

Progressieve stijfheid betekent dat bij een toename in belasting de stijfheid ook zal toenemen. Het normale (lineaire) gedrag wordt aangegeven als een zwarte streepjeslijn in figuur 6. Het progressief gedrag is niet lineair, en vertoont een concave vorm. Dit gedrag wordt aangegeven door een volle lijn in figuur 6. Op de y-as is de kracht aangegeven en op de x-as de relatieve verplaatsing tussen de uiteindes van de stabilisatorstang armen.



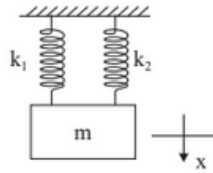
Figuur 6: Grafische voorstelling progressieve stijfheid

2.2.1 Serie en parallelschakeling stijfheden (veren)

Deze sectie maakt gebruik van bron [12].

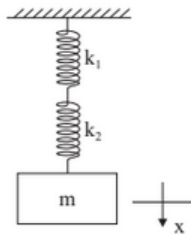
Iedere component van een systeem heeft een stijfheid. Om de stijfheid van het systeem te bepalen dienen de stijfheden van alle componenten gecombineerd te worden. Hier wordt er een veer als component beschouwd.

De veren worden als parallelle veren beschouwd wanneer ze eenzelfde verplaatsing hebben, maar de kracht verdeeld worden. De stijfheid wordt dan bepaald aan de hand van volgende formule: $K_{eq} = K_1 + K_2 + \dots + K_n$. Een voorstelling hiervan wordt weergegeven in figuur 7.



Figuur 8: Parallelschakeling van veren [12, p.14]

De veren worden als seriegeschakelde veren beschouwd wanneer ze eenzelfde kracht ondervinden, maar de verplaatsing de som is van de deel verplaatsingen van de aparte componenten. De stijfheid wordt dan bepaald aan de hand van volgende formule: $\frac{1}{K_{eq}} = \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} + \dots + \frac{1}{K_n}$. Een voorstelling hiervan wordt weergegeven in figuur 8.



Figuur 7: Serieschakeling van veren [12, p.14]

2.2.2 Materiaalgebruik

Het materiaalgebruik van een stabilisatorstang is verschillend naarmate zijn toepassing. Bij auto's die vooral gefocust zijn op het optrekvermogen wordt er meer gebruik gemaakt van composietmateriaal of een steker/stijver materiaal dan voorheen. Composiet heeft een hogere verhouding van stijfheid t.o.v. soortelijk gewicht. Bij het nemen van een sterker/stijver materiaal kan de diameter verminderd worden. De vorm is dus afhankelijk van het materiaal.

Het meest gebruikte materiaal is echter verenstaal, oorspronkelijk gemaakt van 50CrV4. Later is er dan overgegaan op de materialen uit de SAE Class 550 en SAE Class 700[6],[13].

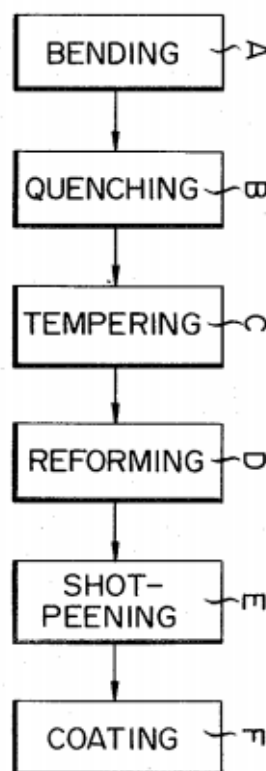
Enkele composietmaterialen die interessant zijn om te gebruiken in een stabilisatorstang zijn: vezel versterkte polymeer composieten, een hybride van carbon fiber alsook het materiaal aluminium. Deze hebben het voordeel van een lager gewicht ten opzichte van staal. Er is echter een nadeel aan composieten, ze zijn moeilijker te produceren/ recyclen [13].

2.2.3 Productie stabilisator stang

In deze paragraaf wordt gebruik gemaakt van bron [14]. In figuur 9 wordt het algemeen productieproces van de conventionele stabilisatorstang weergegeven. Een holle stang wordt gevormd uit warmgewalst verenstaal in plaatvorm (0.2 tot 0.3% C). Deze plaat zal eerst tot een cilinder worden gerold. Door middel van een rolnaadlas proces worden de flanken van de gerolde cilinder aan elkaar gelast. De holle stang wordt dan via een CNC buigmachine koud vervormd tot de gewenste vorm. Hierna krijgt de gebogen stang een warmtebehandeling nl. afschrikharden (A). Hierbij wordt de korrelstructuur van het materiaal omgevormd naar martensietkorrels waardoor de stang sterk versterkt(B). Als 3^{de} productiestap wordt de stang nog getemperd (C). Temperen zorgt ervoor dat het rest-austeniet uit de vorige stap ook nog transformeert in martensiet. Tevens zorgt temperen voor verwijderen van restspanningen waardoor het materiaal minder bros wordt en de kans op spontane scheuren verkleint. Door de voorgaande stappen is de stang lichtjes vervormd. Daarvoor dient stap D, deze stap geeft de stang opnieuw zijn gewenste vorm.

De uiteindes van beide gevormde armen moeten hierna bewerkt worden zodat nadien de montage van de end links hieraan mogelijk is. Een inductieoven verwarmt plaatselijk de uiteindes, zodat deze plat geperst kunnen worden en daarna geponst (E).

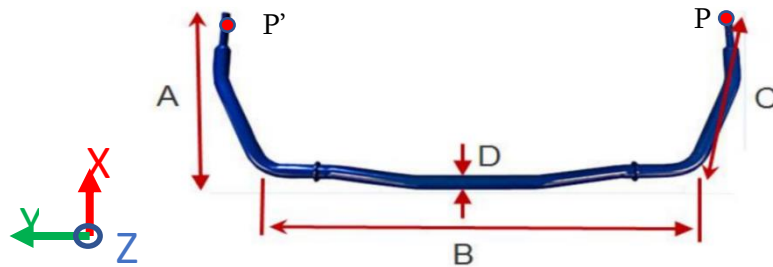
Als laatste productiestap (F) wordt de stabilisatorstang gecoat (zinkfosfaat, epoxy, polyester) om corrosievorming te vermijden.



Figuur 9: Productieproces stabilisatorstang [14, p. 2]

2.3 Analytisch model voor een volledige stabilisatorstang

Deze paragraaf stelt een analytisch model op voor een volledige stabilisatorstang, dit zorgt voor het verkrijgen van een beter inzicht van de verschillende parameters op de totale stijfheid. Figuur 10 toont een vereenvoudigde voorstelling van het bovenaanzicht van een stabilisatorstang. Vertrekkende vanuit deze figuur zal de stijfheid worden bepaald. Op punt P (het einde van de arm) zal een kracht werken die in de positieve z-richting werkt, een denkbeeldige inklemming zorgt ervoor dat punt P' niet beweegt tijdens deze analyse. Deze punten kunnen alsnog omgedraaid worden. Bron [15] is gebruikt om dit analytisch model op te stellen.



Figuur 10: Schematische voorstelling dimensies stabilisatorstang [15, p. 1]

A, B, C, D stellen geometrische parameters voor. Hierin is parameter A de loodrechte afstand van het eindpunt van de arm tot de as van het centrale deel. B is de breedte van het centrale deel van de stabilisatorstang exclusief de armen. C is de afstand van het eindpunt van de arm tot aan het middelpunt van de meest nabije bocht tussen het centrale deel en de arm. D is de buitendiameter en d is de binnendiameter. . Deze zijn allemaal uitgedrukt in mm.

1. Polair traagheidsmoment (gebruikt bij torsie):

$$J = \pi \left(\frac{D^4 - d^4}{32} \right) \quad (1)$$

met d de binnendiameter van de stang.

2. Traagheidsmoment (gebruikt bij buigmomenten):

$$I = \pi \left(\frac{D^4 - d^4}{64} \right) \quad (2)$$

3. Totale hoekverdraaiing rond de y-as van de stabilisatorstang (voor hoeken kleiner dan 15°)

$$\theta_t = \frac{\delta_t}{A} \quad (3)$$

met δ_t de uitwijking in punt P volgens de z-as.

4. Torsiemoment

$$M_t = \frac{\theta_t \cdot J \cdot G}{B} \quad (4)$$

met G [Pa] de glijmodulus

5. Invullen van (1) en (3) in (4) geeft:

$$M_t = \frac{\pi \cdot G \cdot \delta_t \cdot \left(\frac{D^4 - d^4}{32} \right)}{B} \quad (5)$$

6. Torsie door middel van kracht F gericht volgens de z-as in punt P

$$M_t = F \cdot A \quad (6)$$

met F [N] de kracht in punt P

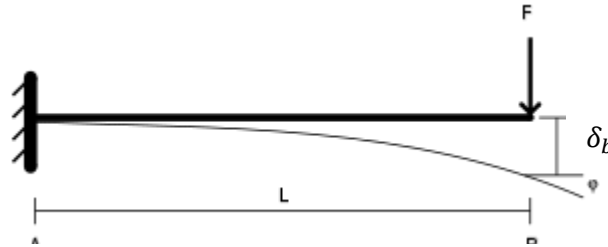
7. Gelijkstellen van beide torsiemomenten (5 en 6) en herwerken naar verplaatsing δ_t

$$F \cdot A = \frac{\pi \cdot G \cdot \delta_t \cdot \left(\frac{D^4 - d^4}{32} \right)}{B} \quad (7)$$

$$\delta_t = \frac{32 \cdot B \cdot P \cdot A^2}{\pi \cdot G \cdot (D^4 - d^4)} \quad (8)$$

8. Bepalen van de uitwijking in punt P door doorbuiging

In de vorige regels is de uitwijking bepaald komende van een torsiemoment, de armen van de stabilisatorstang zelf gaan echter ook doorbuigen. De uitwijking van dit wordt aangegeven als δ_b . Figuur 11 geeft dit belasting geval schematisch weer [16].



Figuur 11: Voorstelling buiging [16]

9. Bepaling van de uitwijking

$$\delta_b = \frac{F \cdot C^3}{3 \cdot E \cdot I} \quad (9)$$

, met E [Pa] de elasticiteitsmodulus van het materiaal

Invullen van (2) in (8)

$$\delta_b = \frac{F \cdot C^3}{3 \cdot E \cdot \pi \left(\frac{D^4 - d^4}{64} \right)} \quad (10)$$

10. Bepalen van stijfheid van de onderdelen

De stijfheid van de arm en het centraal deel worden hier bepaald.

a. Algemene stijfheidsformule

$$k = \frac{F}{\delta} \quad (10)$$

b. (7) en (9) toegepast op (10)

$$k_{torsie} = \frac{\pi \cdot G \cdot (D^4 - d^4)}{32 \cdot A^2 \cdot B} \quad (11)$$

$$k_{buig} = \frac{3 \cdot E \cdot \pi \left(\frac{D^4 - d^4}{64} \right)}{C^3} \quad (12)$$

11. De totale stijfheid kan op 2 manieren bepaald worden: via verplaatsingen

De uiteindelijk bekomen formules zijn echter een benadering van de werkelijke formules.

a. Combineren verplaatsingen

$$\delta_{tot} = 2 \cdot \delta_b + \delta_t \quad (13)$$

b. Toepassen van (13) in (10) en (13) invullen

$$k_{tot} = \frac{3 \cdot \pi \cdot G \cdot (D^4 - d^4)}{32 \cdot (3 \cdot B \cdot E \cdot A^2 + 4 \cdot G \cdot C^3)} \quad (14)$$

12. De totale stijfheid kan op 2 manieren bepaald worden: combinatie stijfheden

a. Combineren stijfheden

$$k_{tot} = \left(\frac{1}{k_{buiging-P'}} + \frac{1}{k_{torsie}} + \frac{1}{k_{buiging-P}} \right)^{-1} \quad (15)$$

b. Invullen van (12) en (11) in (15)

$$k_{tot} = \frac{3 \cdot \pi \cdot G \cdot (D^4 - d^4)}{32 \cdot (3 \cdot B \cdot E \cdot A^2 + 4 \cdot G \cdot C^3)} \quad (16)$$

2.4 State of the Art

In deze paragraaf zullen enkele varianten van een stabilisatorstang besproken worden. Deze varianten zijn gevonden door het zoeken van patenten. Enkel de relevante patenten zullen uitvoerig besproken worden, bij interesse kunnen de niet essentiële patenten gelezen worden in appendix A.

De soorten stabilisatorstangen kunnen opgedeeld worden in drie categorieën: passief, actief en semi actief.

Een passief gedrag betekent dat de stabilisatorstang niet wordt aangestuurd. Het kan wel zijn dat het gedrag aangepast kan worden, maar dit dient handmatig te gebeuren [13].

Een actief gedrag betekent dat het gedrag van de stabilisatorstang zich automatisch aanpast aan het gewenste gedrag. Dit wordt bekomen door middel van een automatische sturing. Eerst wordt de rolbeweging opgemeten door middel van sensoren. Afhankelijk van deze waarden worden de actieve componenten, zoals een actuator of motor aangestuurd.

Een semi-actief gedrag is een combinatie tussen het actief gedrag en het passief gedrag. Het actieve gedrag wordt bekomen doordat er met actieve componenten gewerkt wordt, maar deze actieve componenten worden handmatig aangestuurd. Er zal dus nog steeds interactie nodig zijn van de mens (dit is het passieve gedeelte). Er zal hier enkel één semi-actief systeem besproken worden [13].

Het werkingsprincipe, het gedrag en opmerkingen over dit systeem zullen in volgende paragrafen besproken worden.

2.4.1 Passief

2.4.1.1 Conventionele stabilisatorstang

De conventionele stabilisatorstang is al uitvoerig besproken in de voorgaande paragrafen. In figuur 4 is een conventionele stabilisatorstang weergegeven. Het bestaat uit een stang (meestal veerstaal), zonder koppelstukken of speciale mechanisme. Deze opstelling is passief en heeft één bepaalde stijfheid. Het voordeel van dit systeem is dat het een eenvoudige opbouw heeft en een relatief eenvoudig vormgevingsproces ten opzichte van andere systemen.

2.4.1.2 Verstelbare stabilisatorstang

Op het einde van de armen van de stabilisatorstang zijn enkele gaten geplaatst. De end link zal aan één van de gaten gemonteerd worden. De gaten zorgen voor een aanpasbare stijfheid. Des te korter de end link bij het centraal deel van de stabilisatorstang wordt vastgezet, des te stijver het geheel. Dit komt doordat er een kleiner moment wordt opgewekt wanneer de armlengte verkleint. Alsook zal een verkleining van de armlengte ervoor zorgen dat dat arm minder kan doorbuigen. De opstelling heeft een instelbaar passief gedrag. Het voordeel hiervan is dat de stijfheid veranderd kan worden, echter wel maar in een paar standen. Het is niet gebruiksvriendelijk omdat een persoon onder het chassis moet kruipen om de stijfheid te verstellen. Door het veranderen van de lengte van de arm zal tegelijkertijd ook de hoek van de End link ten opzichte van het chassis veranderen. Dit kan zorgen voor een slechte krachtsoverdracht. Figuur 12 toont een verstelbare stabilisatorstang [17].



Figuur 12: Adjustable anti-roll bar [17]

2.4.1.3 Continue veranderlijke armlengte

Continue veranderlijke armlengte maakt gebruik van bron [18]. Het systeem voorgesteld in figuur 13 verbetert voorgaand systeem door de continue verandering in armlengte toe te laten. De end link kan op elke afstand van het centraal deel worden gepositioneerd. Dit komt doordat de end link door een gleuf kan verschuiven. Naarmate de end link meer naar het centraal deel wordt vastgezet, zal de stabilisatorstang stijver worden. Een nadeel is echter dat de krachtoverbrenging zal veranderen bij grote veranderingen van de hoek tussen de end link en het chassis.



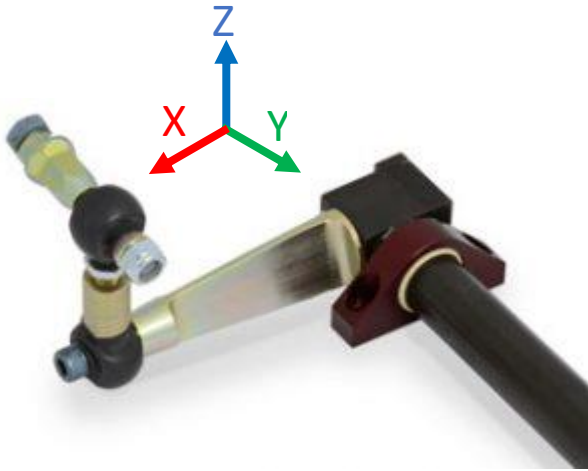
Figuur 13: Stabilisatorstang met veranderlijke armlengte [18, p. 9]

2.4.1.4 “Bladed” stabilisatorstang

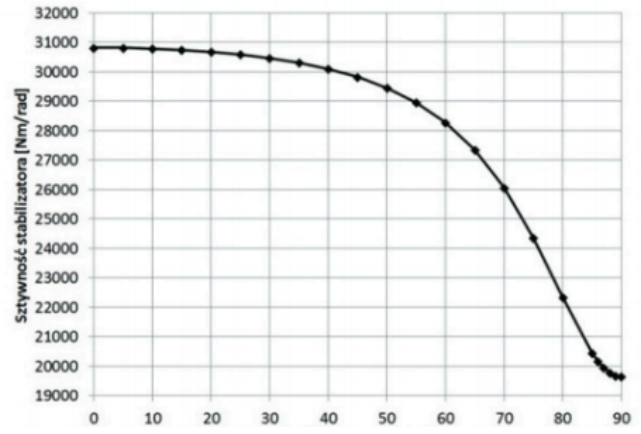
Figuur 14 geeft de “bladed” stabilisatorstang van Elephant Racing weer [19]. Bij deze uitvoering kan de torsiestijfheid van de stabilisatorstang aangepast worden door te spelen met de doorsnede van de arm. De arm kan manueel verdraaid worden tussen de 0° en de 90° . Wanneer de arm volledig horizontaal verdraaid is, geeft dit de laagste stijfheidswaarde van de stabilisatorstang. Dit komt doordat de arm hier het meest kan doorbuigen ten gevolge van de belasting. De stabilisatorstang in zijn geheel is het stijfst wanneer de arm volledig verticaal staat gemonteerd, dit zorgt voor de minste doorbuiging van de arm bij een eenzelfde belasting. Verdraaiingshoeken tussen de 0° en 90° geven variabele stijfheden. Figuur 15 geeft de stijfheidswaarde van de stabilisatorstang in functie van de verdraaiingshoek van de arm weer [18].

Dit principe kan naast passief zowel semi-actief als actief worden uitgevoerd. Hierbij wordt de verdraaiing van de blades veroorzaakt door het aansturen van een wormwiel. Dit wormwiel wordt actief gestuurd. Een semi-actieve uitvoering is door te werken met een hendelsysteem, waarbij deze hendel door de operator zelf wordt bediend. Door het veranderen van de positie van de hendel wordt de blade verdraaid. Dit wordt nu al regelmatig toegepast in de race-industrie.

Dit werkingsprincipe is interessant voor ons onderzoek. Het voordeel is dat de invalshoek van de kracht op het uiteinde van de arm gelijk blijft en dus niet voor problemen zorgt voor de krachtoverbrenging. Wel dient er wel een systeem ontworpen te worden om het verdraaien van de arm passief te laten gebeuren en dus zo een niet-lineaire karakteristiek te bekomen.



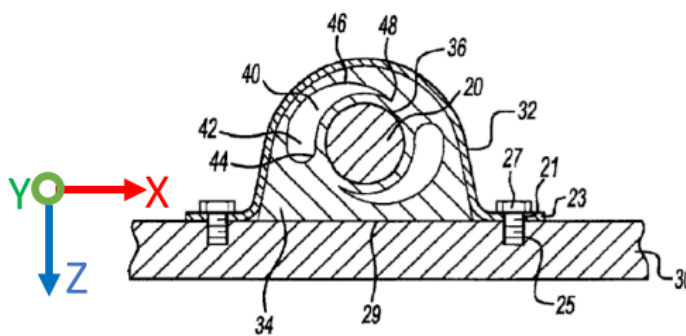
Figuur 14: Bladed Swaybar - Elephant Racing [19]



Figuur 15: Grafiek van de totale stijfheid van de stabilisatorstang in functie van de verdraaiingshoek van de arm [18, p. 92]

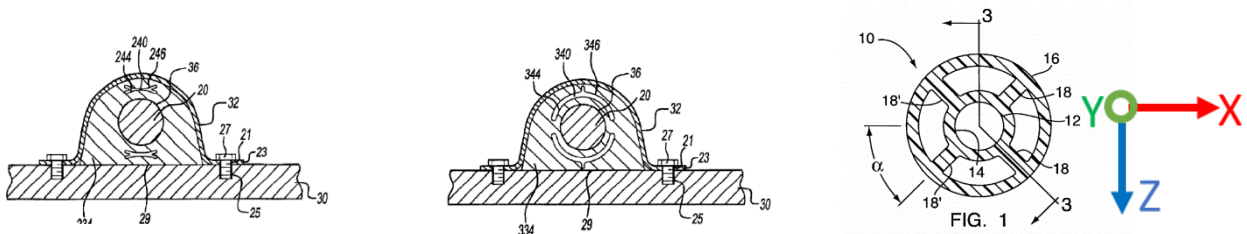
2.4.1.5 'Teardrop bushing' beugel

Deze paragraaf maakt gebruik van patent [20]. Het patent dateert van 15 februari 2005. In figuur 16 is een beugel weergegeven met een 'teardrop bushing' erin. De beugel verbindt de stabilisatorstang met het chassis. Er zijn veel varianten op de vorm van de bushing. In deze paragraaf wordt enkel de 'teardrop bushing' uitgelegd. Wanneer een auto in een bocht gaat dan zal de stabilisatorstang draaien. In het beginpunt zal de bushing deze verdraaiing niet tegenwerken. Naarmate dat de stabilisatorstang meer en meer draait dan zullen de bushings steeds meer en meer worden ingedrukt waardoor de stang het moeilijker heeft om zijn torsiemoment over te brengen. Dit concept resulteert in variabele stijfheiden is daarom interessant. Het voordeel is dat het systeem onveranderd blijft, enkel de beugel moet aangepast worden. Het werkt wel met rubbers (bushings) wat zorgt voor een lagere levensduur.



Figuur 16: Variable rate bushing [20, p. 3]

Er zijn nog verschillende uitvoeringen van bushings, hieronder worden er nog een paar weergegeven. De 2 linkse figuren komen uit bron [20]. De meest rechtse uit [21].



Figuur 17: 3 Verschillende bushings [20, p. 4], [21, p. 2]

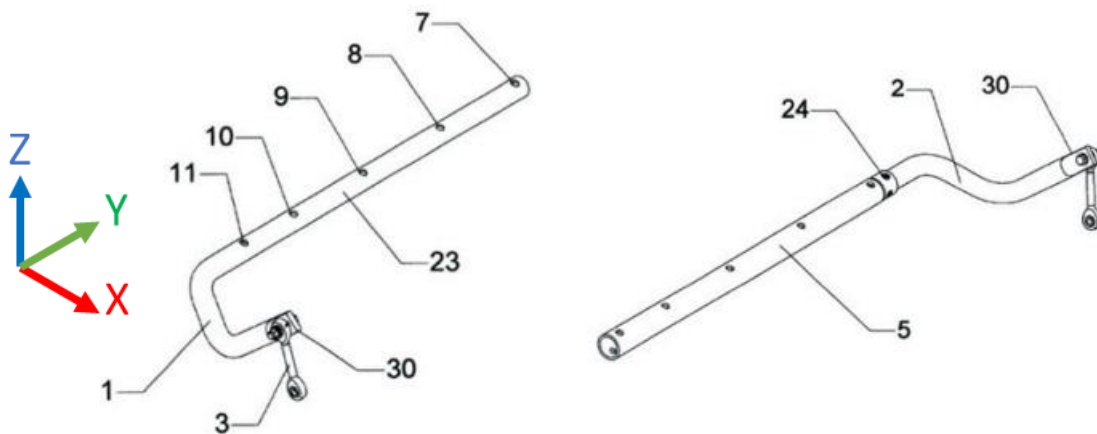
2.4.1.6 2-delig centraal stuk van de stabilisatorstang

In deze paragraaf wordt gebruik gemaakt van bron [18]. Een andere mogelijkheid voor het veranderen van de totale stijfheid van de stabilisatorstang is het wijzigen van de torsiestijfheid van het centraal gedeelte.

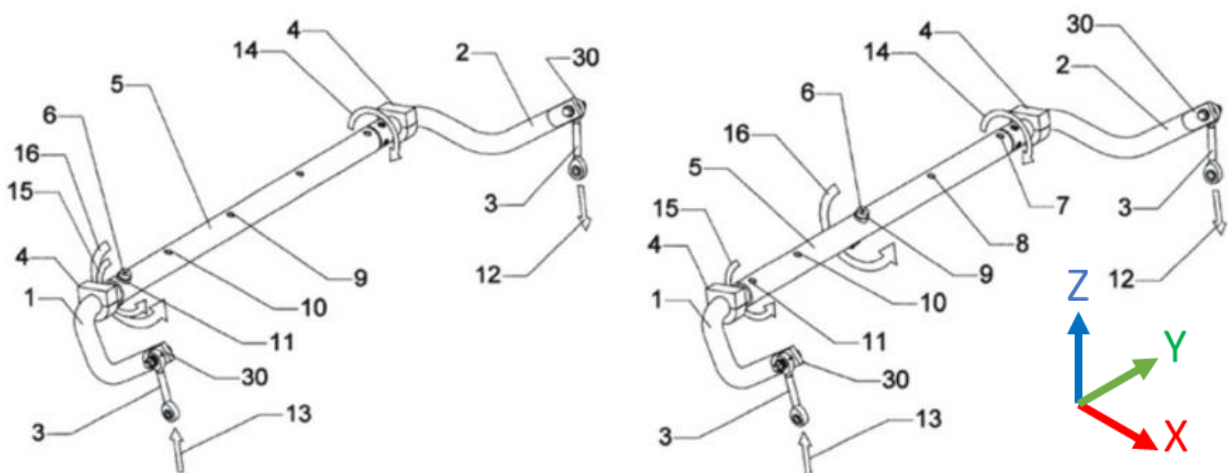
Figuur 19 geeft de opstelling van de uitvoering weer. De stabilisatorstang bestaat uit 2 delen, het linker- en het rechterdeel. Beide delen zijn geperforeerd met gaten. Het linkerdeel wordt in het rechterdeel geschoven en vastgezet door een schroefverbinding 6 (fig. 19).

Wanneer schroef 6 wordt geplaatst in gat 11, wordt de hoogste stijfheid van de stang bekomen. Dit komt doordat de stang met de grootste diameter over een langer eind reikt, wat zich rechtstreeks vertaalt in een hogere torsiestijfheid. In het rechtergedeelte van de figuur 19 wordt schroef 6 geplaatst in het uiterste gat 7, dit zorgt ervoor dat de dunste stang grotendeels het centrale deel beïnvloed. Dit resulteert in een lagere torsiestijfheid. Wanneer schroef 6 in andere gaten wordt gestoken geeft dit tussenwaarden voor de torsiestijfheid.

Dit uitvoeringsprincipe is niet interessant voor ons onderzoek. Het is niet haalbaar om deze uitvoering passief progressief te maken. Om hier een progressief gedrag te bekomen, zou dit actief gestuurd moeten worden.



Figuur 19: Voorstelling van het 2-delig centraal stuk van de stabilisatorstang [18, p. 89]



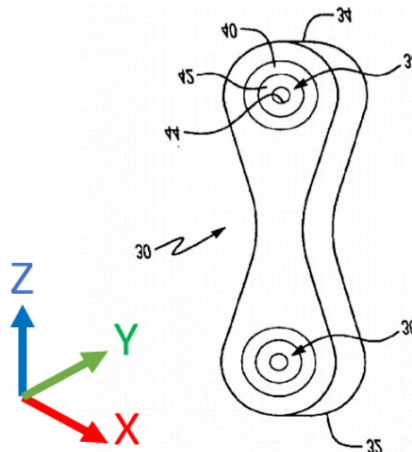
Figuur 18: Links de meest stijve uitvoering / Rechts gemiddelde stijfheid [18, p. 90]

2.4.1.7 Veranderen uitwijking End link

Deze paragraaf maakt gebruik van patent [22].

Conventionele End link

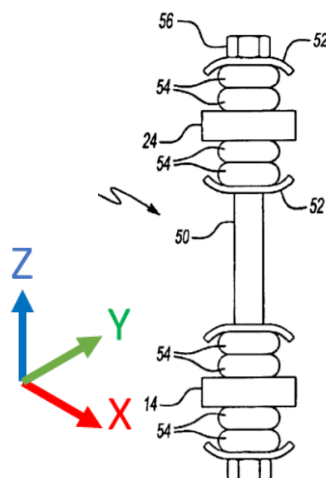
In figuur 20 is een optie van een conventionele end link weergegeven. Een end link verbindt de stabilisatorstang met de wielophanging. Nummer 45 is een metalenring. Hierin komt de bout die de verbinding tussen de onderdelen maakt. Rond deze metalenring zit een stijve rubber, nummer 40. Deze rubber vangt trillingen op. Een echt effect op de stijfheid zal deze niet hebben doordat deze rubber maar enkele millimeters wordt ingedrukt.



Figuur 20: Conventionele link [22, p. 2]

End link met variabele uitwijkingsstijfheid-rubber

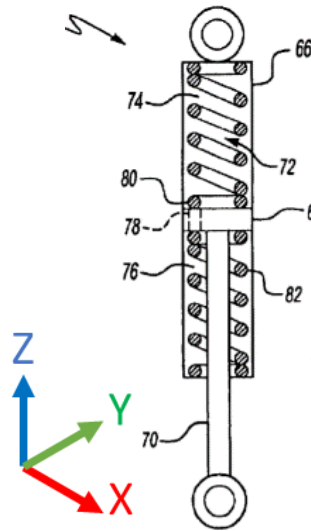
De stabilisatorstang 24 wordt horizontaal in het bovenste deel van de end link gemonteerd. De wielophanging wordt in punt 14 gemonteerd. Nummers 52 zijn de flenzen die zorgen voor een aanslagvlak van de rubbers (nummer 54). Hierbij zorgen de rubbers voor een eerste uitwijkingsstijfheid. De rubbers zullen eerst samengedrukt worden. Op een bepaald punt zullen de flenzen meebuigen, dit zorgt voor een 2^e uitwijkingsstijfheid.



Figuur 21: Link met rubbers [22, p. 3]

End link met variabele uitwijkingsstijfheid-veer/vloeistof

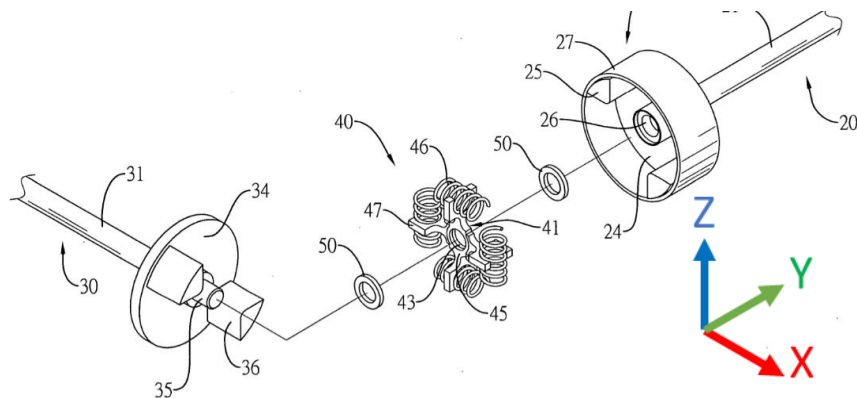
In figuur 22 is een end link weergegeven. Deze end link bestaat uit een behuizing (66) en een stang (70). In deze behuizing zitten 2 elementen die het gedrag bepalen. Ten eerste de vloeistof: deze zal zorgen voor een demping coëfficiënt. Door gat 78 kan de vloeistof van de ene kamer naar de andere stromen. De veren zorgen voor een verandering in stijfheid. De stang is verbonden met de wielophanging en de behuizing wordt verbonden met de stabilisatorstang zelf.



Figuur 22: Link met variabele uitwijkingsstijfheid-veer/vloeistof
[22, p. 3]

2.4.1.8 Veer in het centraal deel

Veer in het centraal deel maakt gebruik van patent [23]. In figuur 21 is te zien dat er in het midden van het centraal deel van de stabilisatorstang een mechanisme is aangebracht. Dit mechanisme bestaat uit een aantal veren en een behuizing van de veren. Er zijn 2 behuizingen, de binnenste is vastgemaakt met het linkerdeel en de buitenste is vast gemaakt met het rechterdeel van de stabilisatorstang. Tussen beide delen bevindt er zich een veer, deze veer zal bij een torsiemoment indrukken. Het variabel stijve deel 40 heeft 2 verschillende stijfheden. Wanneer de kracht die wordt uitgeoefend op het variabele stijve deel 40 onder de krachtdrempel F ligt, dan heeft deel 40 zijn eerste stijfheid (de veerstijfheid). Wanneer de kracht die wordt uitgeoefend op het variabele stijve deel 40 boven de krachtdrempel F ligt zal de veer ingedrukt zijn en zal er een 2^e stijfheid gelden. Dit lijkt niet te passen in de beoogde toepassing, mits de verdraaiingen miniem zijn.



Figuur 23: Variabele stijfheid door veer in het centraal deel te plaatsen [23, p.18]

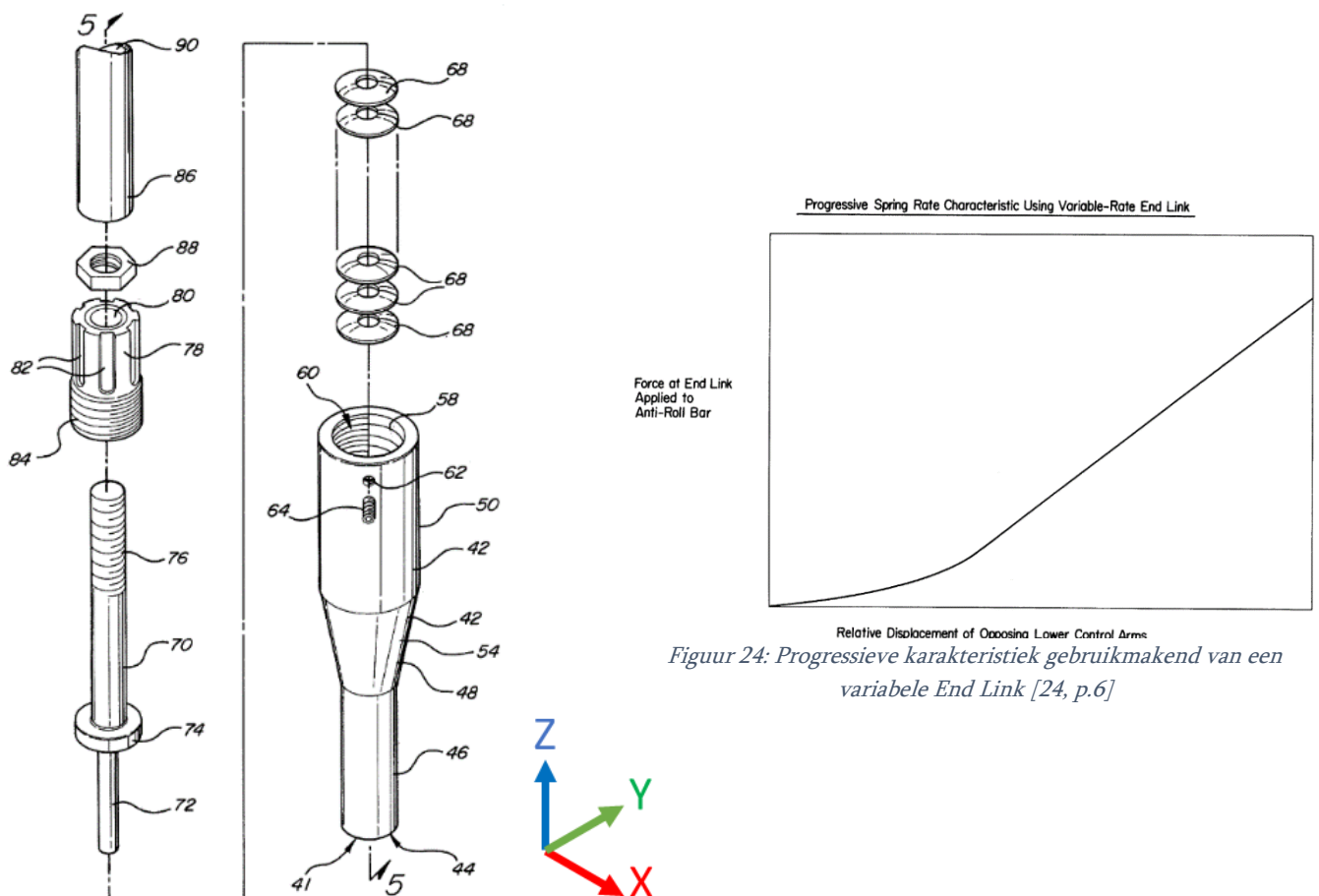
2.4.1.9 Schotelveren verwerken in de End link

Deze paragraaf maakt gebruik van patent [24]. Deze uitvoering is gelijkaardig aan 3.4.1.7. Hierbij wordt er geen gebruik gemaakt van drukveren, maar van schotelveren. Schotelveren zijn stijver dan drukveren, dit maakt schotelveren interessanter voor deze toepassing. Figuur 22 geeft de assemblage tekening weer van de uitvoering.

De end link zorgt voor de krachtoverbrenging naar de stabilisatorstang. Door deze uitvoering wordt de kracht niet meer proportioneel doorgeven aan de stabilisatorstang in functie van de relatieve uitwijking van de wielophanging. Bij een kracht duwt 74 de stapel schotelveren 68 samen. Door het combineren van schotelveren met verschillende stijfheden in serie kan men een progressieve veer karakteristiek bekomen.

De end link is hier een niet-lineaire veer in serie met de stabilisatorstang, die zelf een torsie veer is. Een serie schakeling van beide zorgt voor een niet-lineair verloop van de veer karakteristiek van de stabilisatorstang weergegeven in figuur 24.

Deze uitvoering geeft een progressief gedrag weer.



Figuur 26: Schotelveren verwerken in de end-link van de stabilisatorstang [24, p.3]

2.4.1.10 Variabele stijfheid mechanisme

In deze paragraaf wordt gebruikt gemaakt van patent [25]. Deze uitvoering zorgt voor een variabele krachtoverbrenging. Doorheen het linkerdeel van de stang zit een soort staafje. Dit staafje haakt in in henokgedeelte (nr. 220/420). Het nokgedeelte is verbonden met het rechterdeel van de stabilisatorstang doormiddel van gleuf 230. De vorm van dit nokgedeelte is van groot belang voor het gedrag. Wanneer de linkerarm van de stabilisatorstang zal draaien dan zal het staafje drukken tegen het nokgedeelte. Door deze drukkracht zal het nokgedeelte naar achter verplaatst worden over de as van de stabilisatorstang. Dit zorgt ervoor dat het staafje hoger gelegen wordt in het nokgedeelte, waardoor de hoek (alpha) zal veranderen. Wanneer men kijkt naar figuur 30 (5A) dan valt er te zien dat de loodrechte kracht van het staafje op het no oppervlak kan opgedeeld worden in een F_t en een F_{lb} richting. De grootte van deze zijn afhankelijk van de hoek alpha (verplaatsing van het nok gedeelte). F_t is de kracht die zal worden overgebracht naar het andere deel van de stabilisatorstang. De beginpositie van de nok is veranderbaar door 435 te veranderen. De positie van 435 heeft ook invloed op de voorspanning van de veer. De voorspanning zorgt voor een ander gedrag.

Figuur 27 geeft het gedrag van dit mechanisme weer waarbij de verdraaiing van de stang uitgezet wordt t.o.v. het koppel.

Deze techniek is interessant omdat het gedrag progressief is. Het nadeel is dat de momenten in een personswagen groot zijn, dus dat dit mechanisme hier niet geschikt voor zou zijn. De veerstijfheid zou te hoog moeten zijn.

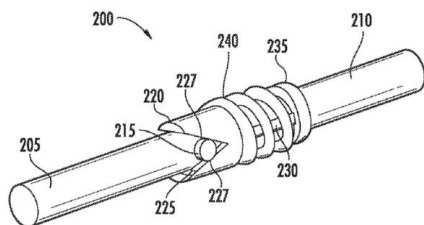


FIG. 3B

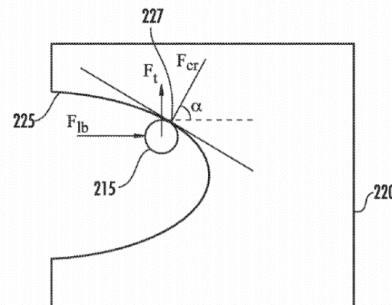
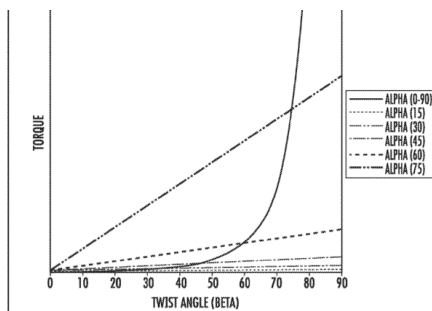


FIG. 5A

Figuur 28: Voorstelling variabele stijfheidsmechanisme [25, p. 1]

Figuur 29: Werkingswijze [25, p. 9]



Figuur 30: Stijfheidsgedrag [25, p. 15]

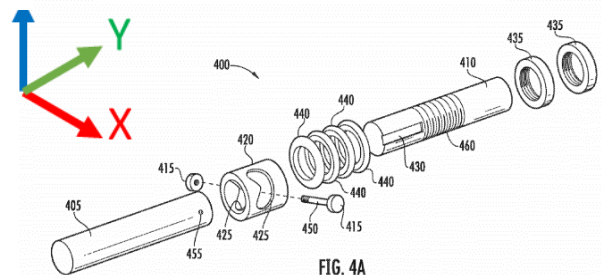


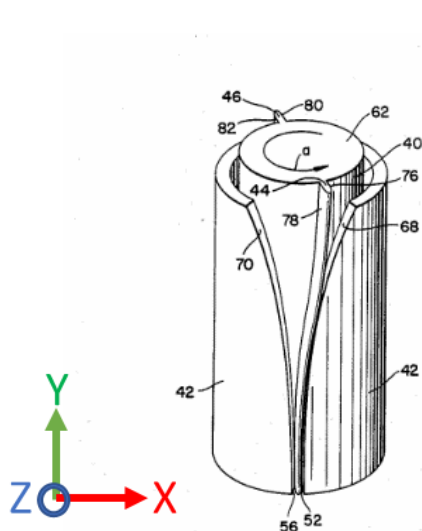
FIG. 4A

Figuur 27: Bom van figuur 27 [25, p. 7]

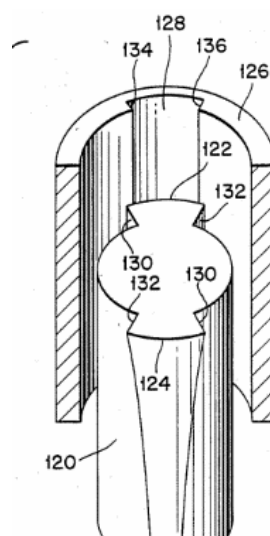
2.4.1.11 Niet lineaire torsieveer

In deze paragraaf wordt gebruikt gemaakt van patent [26]. In figuur 31 en 32 is een niet lineaire torsieveer weergegeven. De stabilisatorstang is hier in 2 verdeeld. In het buitenste deel is een gleuf aangebracht, op het binnenste deel is een bepaalde vorm aangebracht. Beide passen in elkaar. Het progressief gedrag wordt hier bekomen doordat de lamel (78) meer en meer zal meebuigen met onderdeel 42. Doordat deze meebuigt zal hij uiteindelijk zijn kracht beter kunnen overbrengen/stijver worden. Er zijn hier 2 lamellen 180° t.o.v. elkaar geconstrueerd. Dit zorgt voor een extra versteviging. Het onderdeel 42 heeft vlakken waar de lamel kan tegen steunen. Voor één kant zijn dit 70 en 68. Dit zorgt ervoor dat de krachtoverdracht langs beide richtingen gebeurt. Figuur 31 geeft het gedrag van dit systeem weer.

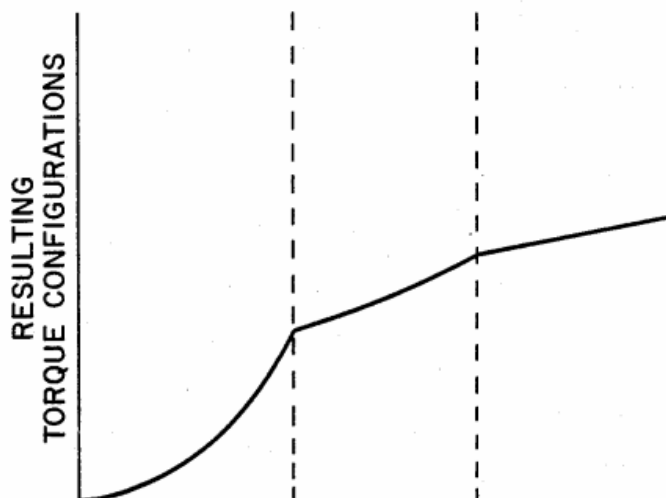
Dit concept is interessant omdat het wederom het progressief gedrag bekomt. Er is hier echter weinig aan te veranderen, dus dit zal niet gebruikt kunnen worden in onze concepten.



Figuur 32: Voorstelling non lineair torsion spring [26, p. 1]



Figuur 31: Voorstelling non lineair torsion spring 2 [26, p. 4]



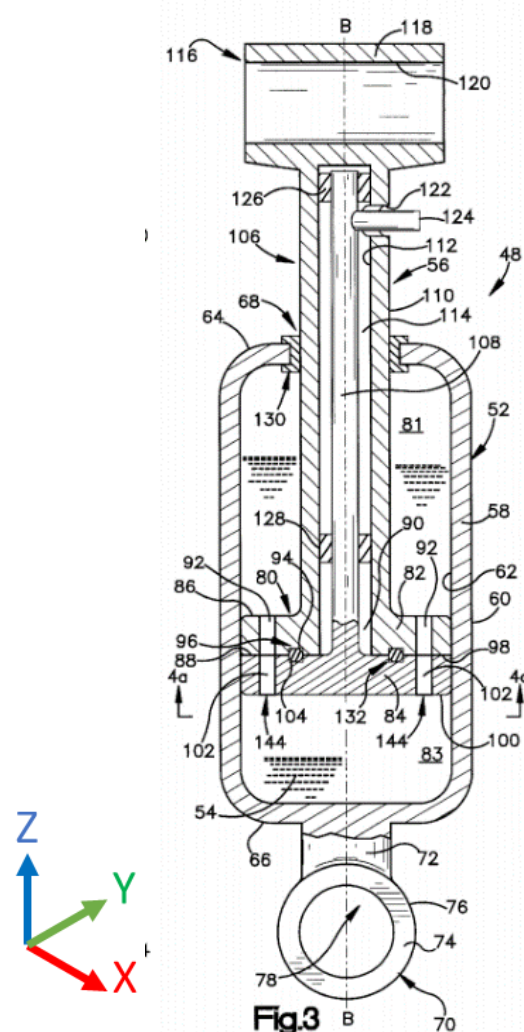
Figuur 33: Gedrag non lineair torsion spring [26, p. 5]

2.4.2 Actief

Actief betekent dat dit systeem gestuurd wordt. Deze sturing gebeurt automatisch. Op basis van sensormetingen worden actuatoren aangestuurd om zo een gewenst gedrag te bekomen dat tijdens die situatie vereist is. Het mechanisme kan op verscheidene manieren uitgevoerd worden. Bv: elektrisch, hydraulisch, mechanisch of hybride systemen. Hieronder zullen een aantal voorbeelden worden toegelicht. Er zullen hier maar enkele besproken worden, omdat deze niet interessant zijn in dit onderzoek aangezien er naar een passieve oplossing wordt gezocht.

2.4.2.1 Actieve End link – veranderen openingskanaal

Deze paragraaf maakt gebruik van patent [27]. Figuur 34 geeft een actieve end link weer. De end link situeert zich tussen de stabilisatorstang en de wielophanging. Op die manier is de zuiger verbonden met de arm van de stabilisatorstang en de behuizing van de cilinder met de wielophanging. De cilinder is gevuld met een vloeistof. Bij het op en neer gaan van de arm zal de zuiger zich ook voortbewegen in de cilinder. De zuiger bestaat uit 2 delen: een binnenste zuiger 108 en een buitenste 106. Het actieve gedrag bekomt men door met een stappenmotor actuator 124 aan te sturen. Door deze actuator zal de binnenste zuiger verdraaien. Deze zuiger bepaalt hoe groot de stromingskanalen zijn tussen beide delen van de cilinder. Hoe kleiner de stromingskanalen hoe meer weerstand de zuiger ondervindt bij het op en neer bewegen.

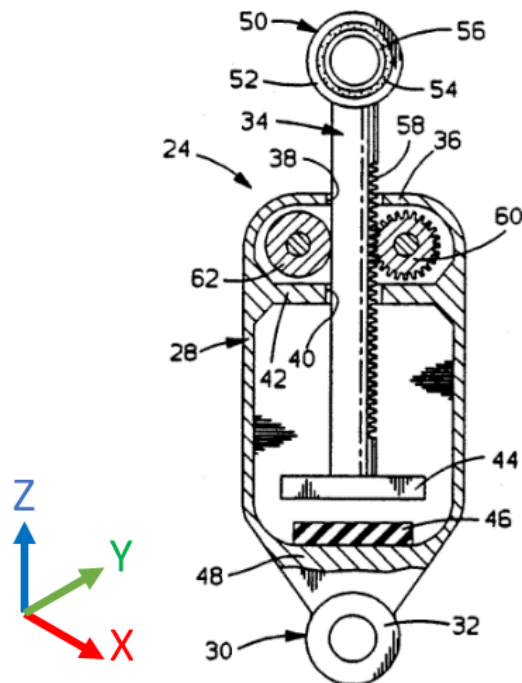


Figuur 34: Voorstelling actieve end link - veranderen openingskanaal [27, p. 1]

2.4.2.2 Actieve End link - Tandheugel

Deze paragraaf maakt gebruik van bron [28]. Figuur 35 geeft de sectiedoorsnede van een actieve End link weer. Sensoren geven een input signaal voor de control unit. Deze stuurt op zijn buurt de actuator aan in de End link. Via tandwiel 60 wordt de tandheugel 58 bewogen afhankelijk van zijn stuursignaal.

Deze uitvoering kan werken in 3 toestanden. De eerste toestand is de vaste toestand: hierbij kan de End link gezien worden als een conventionele End link. Dit geeft een vaste waarde voor de rol stijfheid van de wagen. De tweede mogelijkheid is de vrijstand: dit zorgt voor hetzelfde effect wanneer er geen stabilisatorstang aanwezig zou zijn. De maximale uitwerking van 34 wordt beperkt door de stop 45. De derde stand is de actieve stand: de uitwijking van de End link wordt actief geregeld, wat resulteert in een variabele stijfheid van de stabilisatorstang in zijn geheel.

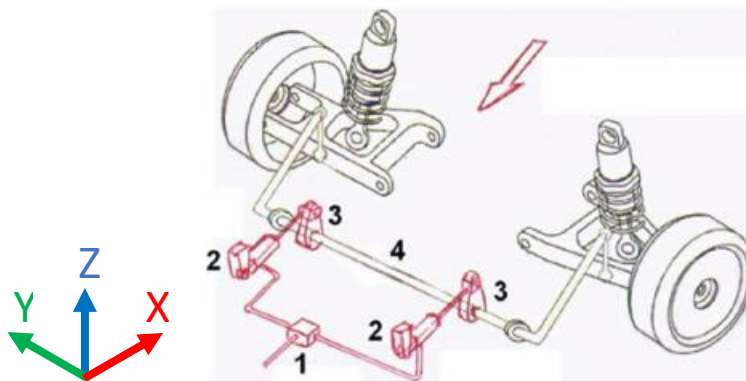


Figuur 35: Actieve end link met inwendig een tandheugel [28, p.2]

2.4.2.3 Actieve stabilisatorstang – Torsie hydraulische aansturing

Deze paragraaf maakt gebruik van bron [18]. Figuur 36 geeft de uitvoering van een actieve stabilisatorstang weer. Deze uitvoering wordt actief hydraulisch aangestuurd. Sensoren meten de nodige parameters van de wagen op, zoals de rolbeweging, snelheid, stuurkracht enz.

Het systeem bezit twee hydraulisch pistons 2 die apart aangestuurd kunnen worden afhankelijk van de stuursignalen van de control unit. Door het in- en uitschuiven van de pistons zorgen de hendels 3, die stevig vastgeklemd zijn aan de stang 4, voor een extra torsiemoment op de stabilisatorstang. Hierdoor kan er een gewenst torsiemoment bekomen voor het minimaliseren van de rolbeweging tijdens het nemen van een bocht.

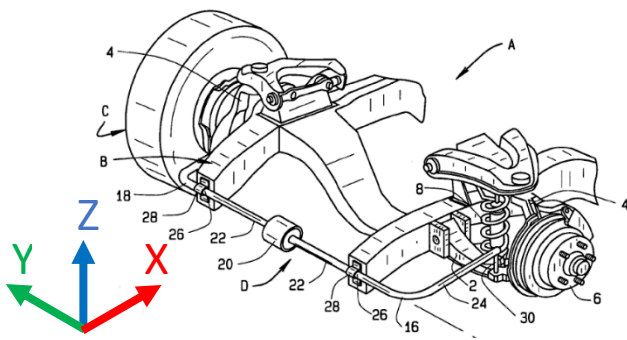


Figuur 36: Actieve stabilisatorstang met hydraulische aansturing [18, p. 87]

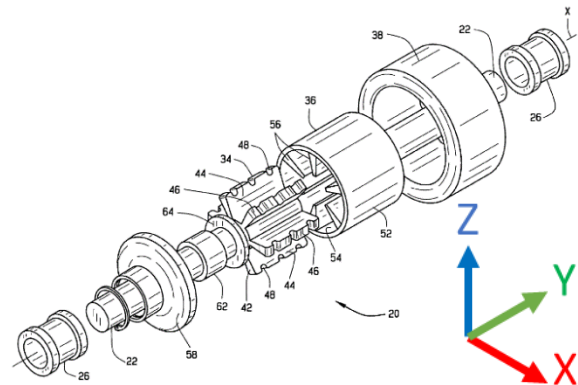
2.4.2.4 Actieve stabilisatorstang – Magnetische koppeling

Deze paragraaf maakt gebruik van patent [29]. Onderstaande figuren 37 en 38 geven de uitvoering van een actieve stabilisatorstang met een magnetische koppeling, centraal gelegen, weer. De stabilisatorstang is hier 2-delig.

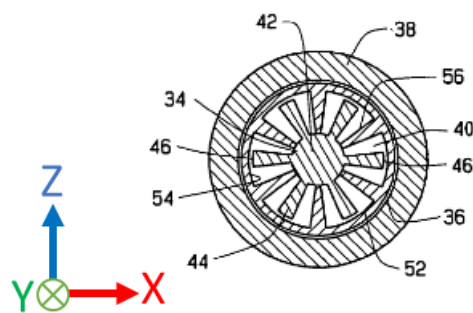
De magnetische koppeling bestaat uit de volgende basis onderdelen. Op het ene deel van de stabilisatorstang bevindt zich een rotor (42), op het andere deel een omhulsel (36). Beide zijn uitgevoerd met vinnen, zodat ze in elkaar kunnen schuiven. Tussen de openingen is er magnetorheologische (MR) vloeistof. Het aansturen van een elektrische spoel (38), die zich rondom het omhulsel bevindt, bepaalt de viscositeit van de MR-vloeistof. Door de viscositeit van de vloeistof te laten variëren, zorgt dit voor een niet-lineair verloop voor de torsiestijfheid van de stabilisatorstang.



Figuur 37: Uitvoering met magnetische koppeling 20, deze bevindt zich in het centraal gedeelte [29, p. 3]



Figuur 38: Assemblage van de magnetische koppeling [29, p. 5]



Figuur 39: Doorsnede van de magnetische koppeling [29, p. 3]

3 Concepten voor realisatie van progressieve stijfheid voor het rolgedrag van een personenwagen

Dit hoofdstuk omvat een het kort bespreken van aantal mogelijke conceptideeën. Het werkingsprincipe en de opbouw van het concept wordt in een beperkt aantal regels uitgelegd. Daarna wordt er gekeken of het progressief gedrag in werkelijkheid haalbaar is en of het concept als een valabele optie gezien kan worden.

Deze conceptideeën zijn op basis van de State of The Art en eigen mechanisch inzicht opgesteld. De concepten bestaan uit innovatieve aanpassingen in van één van de functionele delen van een stabilisatorstang die bijdrage tot de stijfheid (Verwijzing naar 3.3). Zo worden een aantal concepten waarbij de arm van de stabilisatorstang wordt aangepast kort besproken met name: End link, Arm lengte en de Bladed swaybar. Daarnaast wordt er nog een concept waarbij het centrale deel aangepast wordt kort toegelicht.

In het volgende hoofdstuk 5 worden de valabele opties verder uitgewerkt in een wiskundig model.

3.1 End link

Het concept om de end link aan te passen omvat een aantal deelconcepten. Deze worden besproken in enkele subparagrafen. De end link van de oorspronkelijke stabilisatorstang wordt weergegeven in de onderstaande figuur 40 [30].



Figuur 40: Conventionele end link [30]

Werkingsprincipe:

De denkwijze voor ieder end link concept is dat er een uitwijking wordt opgevangen. Het verschil in uitwijking tussen beide armen van de stabilisatorstang zorgt voor de overdracht van een torsiemoment. Door het opvangen van deze uitwijking zal het gedrag van het stabilisatorstangstelsel veranderen.

3.1.1 End link – rubber

In dit concept wordt de End link aangepast door een rubberen component(en) te implementeren in de End link. Rubber is onder verschillende materiaalstijfheden terug te vinden, maar heeft in het algemeen een lagere materiaal stijfheid dan metalen. Het heeft echter een lagere levensduur en is meer temperatuursgevoelig dan metalen.

Opbouw:

De arm van de stabilisatorstang zou gemonteerd worden tussen 2 of meerdere holle rubbers. De stabilisatorstangarm en de rubbers worden gepenetreerd door de end link zelf. Door aanslagen in te bouwen blijven de rubbers op hun plaats. Figuur 41 geeft dit voorbeeld weer[31].



Figuur 41: End link met rubber [31]

Progressief gedrag:

Het progressief gedrag wordt bekomen door verschillende rubbers met verschillende stijfheden met elkaar te combineren of door gebruik te maken van een speciale (progressieve) geometrie van het rubber, met name een kegelvorm.

Valabele optie?

De levensduur is beperkt bij het gebruik van rubber en het gedrag van rubbers is sterk temperatuursafhankelijk. Hierdoor wordt dit concept niet gezien als een valabele optie.

3.1.2 End link – veren

In dit concept wordt de End link aangepast door het toevoegen van verende component(en) meer specifiek spiraalveren. Deze veren hebben zoals de naam aangeeft een spiraalvorm. Door zijn vorm kan de veer bij relatief lage krachten gecompriemd worden t.o.v. schotelveren.

Opbouw:

De arm van de stabilisatorstang wordt gemonteerd aan één van de uiteindes van de end link. Daarnaast bestaat er een mechanisme dat een deel van de end link verbindt met de behuizing van dit mechanisme. Alsook is er een deel dat wordt verbonden met een schijf die wordt geplaatst tussen 2 veren in de behuizing. De kracht uitgeoefend op de ene kant van de end link wordt doorgegeven via de veren naar de behuizing en uiteindelijk naar de andere kant van de end link. Onderstaande figuur geeft de opbouw van dit concept weer. Figuur 42 toont dit soort opbouw [32].



Figuur 42: End link met spring [32]

Progressief gedrag:

Het progressief gedrag wordt bekomen door een progressieve veer oftewel een dual rate veer te integreren in de behuizing. Afhankelijk van het type veer kan een progressief gedrag bekomen worden.

Valabele optie?

Neen. Spiraalveren hebben een te lage stijfheid voor de beperkte inbouwruimte van ongeveer 40 mm in diameter. De verplaatsing van deze veren bij een kracht van 1705N zou te hoog zijn, hierdoor zou de werking van de stabilisatorstang teniet gedaan worden.

3.1.3 End link – schotelveren

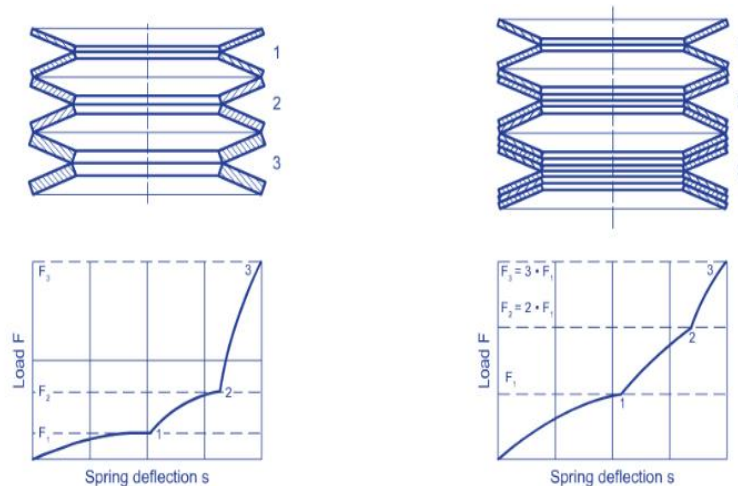
In dit concept zou de end link aangepast worden door het toevoegen van verende component(en), meer specifiek schotelveren. Een schotelveer is een conischvormig element. Door zijn vorm heeft hij in het algemeen een hogere stijfheid dan een spiraalveer. Deze component dient meestal meerdere malen gebruikt te worden in een toepassingen om een specifieke indrukking te bekomen. Eén enkele schotelveer heeft echter niet zo een grote weglengte (in de orde van milimeters).

Opbouw:

De arm van de stabilisatorstang wordt gemonteerd aan één van de uiteindes van de end link. Daarnaast bestaat er een mechanisme dat een deel van de end link verbindt met de behuizing van dit mechanisme en een deel dat wordt verbonden met een schijf die wordt geplaatst tussen een reeks van gestapelde schotelveren in de behuizing. De kracht uitgeoefend op de ene kant van de end link wordt doorgegeven via de schotelveren naar de behuizing en uiteindelijk naar de andere kant van de end link.

Progressief gedrag:

Een schotelveer op zich heeft een licht degressief gedrag, dit gedrag is afhankelijk van de geometrie van de schotelveer. Toch zijn er verschillende mogelijkheden om met schotelveren een progressieve veer karakteristiek te bekomen, bijvoorbeeld dankzij een doordachte stapeling van de schotelveren. Een voorbeeld hiervan wordt weergegeven in figuur 43 [33]. Een progressieve veer karakteristiek zou kunnen resulteren in een progressief verloop van het totaal systeem van de stabilisatorstang.



Figuur 43: Progressieve schotelveer stapeling [33, p. 8]

Valabele optie?

Ja. Dit concept heeft potentieel doordat er daadwerkelijk een progressief gedrag kan bekomen worden. Ook hebben schotelveren een hoge stijfheid en zijn ze beperkt in inbouwruimte. Een nadeel hieraan is echter dat het progressief verloop hakkelig is en dat individuele schotelveren een degressief verloop hebben.

3.1.4 End link – ‘machined’ drukveer

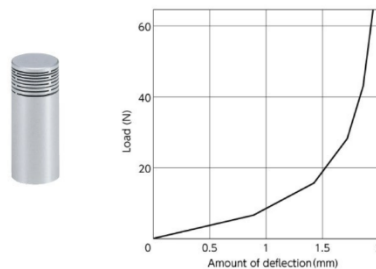
In dit concept zou de end link aangepast worden door het toevoegen van verende component(en) meer specifiek een ‘machined’ drukveer. Een ‘machined’ veer wordt doormiddel van een frees bewerking gemaakt, dit is nodig omdat deze drukveren speciale patronen vertoont. Dit maakt het niet eenvoudig bewerkbaar is. Door zijn speciaal patroon kunnen sommige delen meer doorbuigen dan andere. In het algemeen wordt deze toepassing gebruikt wanneer een stijfheid nodig is die hoger ligt dan die van de schotelveren en de spiraalveren.

Opbouw:

De arm van de stabilisatorstang wordt gemonteerd aan één van de uiteindes van de end link. Daarnaast bestaat er een mechanisme die een deel van de end link verbindt met de behuizing van dit mechanisme en een deel die wordt verbonden met een schijf die wordt geplaatst tussen 2 ‘machined’ drukveren in de behuizing. De kracht uitgeoefend op de ene kant van de End link wordt doorgegeven via de ‘machined’ drukveer naar de behuizing en uiteindelijk naar de andere kant van de End link.

Progressief gedrag:

Door het innovatief ontwerp van de drukveer: onregelmatige ‘pitch’ spleten, kan een progressief gedrag bekomen worden. Door de spleten te veranderen (aantal, steek, breedte, diepte, enz.) kunnen er willekeurige vereigenschappen gerealiseerd worden. Figuur 44 geeft een voorbeeld van zo één soort drukveer [34].



Figuur 44: Machined drukveer [34]

Valabele optie?

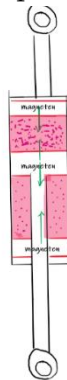
Dit is betwistbaar want het ontwerp heeft zowel voordelen als nadelen. Het grootste nadeel is dat dit soort veer zeer prijzig is. Daarnaast is het niet zeker of er genoeg uitwijking gerealiseerd kan worden met de beperkte inbouwruimte. Een manier om te kijken of dit een valabele optie is, is door er een gedetailleerde eindige-elementenanalyse op uit te voeren.

3.1.5 End link - magneten

In dit concept zou de end link aangepast worden door er een magnetenmechanisme aan toe te voegen. Magneten ondervinden onderling een aantrekkingskracht oftewel een afstotingskracht. Het soort kracht is afhankelijk van de oriëntatie van de polen van de magneten t.o.v. elkaar. Wanneer dezelfde polen naar elkaar gericht zijn, dan ondervinden de magneten een afstotingskracht. Andersom ondervinden zij een aantrekkingskracht. De kracht stijgt wanneer de magneten korter bij elkaar komen.

Opbouw:

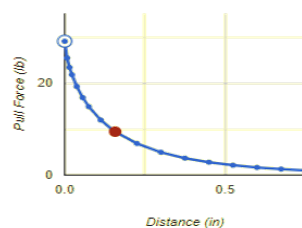
De arm van de stabilisatorstang wordt gemonteerd aan één van de uiteindes van de end link. Daarnaast bestaat er een mechanisme die een deel van de end link verbindt met de behuizing van dit mechanisme. Een ander deel wordt verbonden met een schijf waarop een magneet gemonteerd wordt. Aan beide uiteindes van de behuizing zou dan nog een magneet gemonteerd worden, die zo georiënteerd is dat er een afstotingskracht opgewekt wordt tussen de magneet die zich op de schijf bevindt en degene die zich op de behuizing bevindt. De kracht uitgeoefend op de ene kant van de end link wordt doorgegeven via het magneten paar naar de behuizing en uiteindelijk naar de andere kant van de end link. Figuur 45 geeft dit concept weer.



Figuur 45: End link met magneten

Progressief gedrag:

Dit concept bouwt verder op het principe van de afstotingskracht tussen magneten. De afstotingskracht t.o.v. de afstand tussen de magneten heeft een progressief verloop. Hoe korter de magneten bij elkaar komen hoe hoger de opgewekte krachten zijn. Figuur 46 geeft dit gedrag weer [35].



Figuur 46: Magneten karakteristiek [35]

Valabele optie?

Neen, dit concept past niet in onze toepassing. Het gedrag op zich ziet er wel veelbelovend uit, maar door de beperkte inbouwruimte is de maximale afstotingskracht van 1705N niet haalbaar.

3.2 Bladed sway bar

Dit concept is gebaseerd op de “Bladed Sway Bar”. Hierbij wordt de arm zo opgesteld dat deze kan verdraaien. Hierdoor wordt een andere stijfheid bekomen ten gevolge van de verandering van het oppervlaktetraagheidsmoment. De arm van de stabilisatorstang speelt een rol in de totale stijfheid van de stang. Het oppervlaktetraagheidsmoment vergroot of verkleint naarmate de arm verdraait omwille van zijn geometrie. Figuur 47 toont een voorstelling van een bladed sway bar [36].



Figuur 47: Bladed sway bar [36]

Opbouw:

De opbouw is gelijkaardig aan de huidige “bladed sway bar”. Momenteel wordt deze uitgevoerd in een tweetal types. De eerste mogelijkheid is de mate van verdraaiing kiezen en deze vast zetten. Een 2^{de} mogelijkheid wordt regelmatig toegepast in de race industrie. Hierbij is er in de cockpit van het voertuig een hendelsysteem voorzien. Door deze te bedienen wordt de arm van de stang verdraaid. Dit wordt weergegeven in figuur 48 [37].

Het concept is uitgerust volgens hetzelfde principe als het hendelsysteem, alleen is er geen hendel aanwezig. De staldraad wordt vastgezet aan de andere wielophanging ten opzichte van waar de bladed arm wordt gemonteerd. De draad zal dan geleid worden van de ene naar de andere kant via de stabilisatorstang. Een uitwijking van de ophanging zal dan resulteren in een verdraaiing van de arm. De arm wordt nadien terug op zijn oorspronkelijk positie gebracht door bijvoorbeeld een spiraaltorsieveer.



Figuur 48: Bladed sway bar - taret 1 [37]

Progressief gedrag:

Met dit concept wordt verwacht dat een progressief gedrag wordt bekomen. Door de arm telkens meer te laten verdraaien bij een grotere uitwijking van de ophanging zal het oppervlaktetraagheidsmoment geleidelijk stijgen. Een groter oppervlaktetraagheidsmoment zorgt op zijn beurt voor een grotere buigstijfheid. Mits de buigstijfheid tweemaal in serie staat met de torsiestijfheid wordt er ook een hogere totale stijfheid bekomen. Hierdoor wordt het progressief gedrag bekomen.

Valabele optie?

Dit concept wordt gezien als een valabele optie. De eerste indicaties geven aan dat bij dit concept het gewenste gedrag wordt bekomen. De grote uitdaging hierbij zal zijn om de arm op een passieve mechanische manier te laten verdraaien. Hierbij zijn er nog grote twijfels.

3.3 Centraal deel

Het concept om het centraal deel, het torsiegedeelte van de stabilisatorstang aan te passen bestaat uit een tweetal varianten. Deze worden in de volgende paragrafen kort besproken.

Werkingsprincipe:

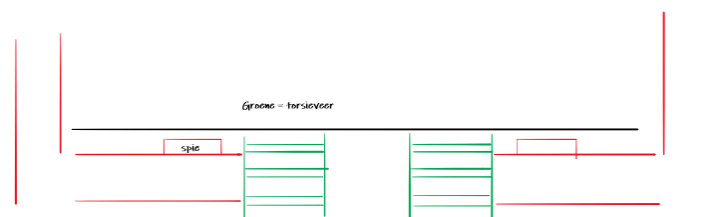
De denkwijze voor beide deelconcepten is dezelfde. Het torsiemoment werkt in op het centrale deel van de stabilisatorstang. Hierdoor zorgt een gegeven torsiemoment voor een bepaalde torsiehoek. De conventionele stabilisatorstang geeft een lineair verband van het torsiemoment in functie van de torsiehoek. Bij deze concepten zal het centraal deel aangepast worden waardoor er in het ideale geval een progressief gedrag bekomen wordt tussen het torsiemoment en de torsiehoek.

3.3.1 Centraal deel – Spiraal torsiebeer

In dit deelconcept wordt in het midden van het centrale deel van de stabilisatorstang een spiraal torsiebeer gemonteerd. Deze beer zorgt ervoor dat een deel van de torsiehoek wordt opgevangen, afhankelijk van de geometrie/stijfheid van de torsiebeer wordt een grote of kleine torsiehoek opgevangen, doch worden ze vooral gebruikt in toepassing waar een lage stijfheid gewenst is.

Opbouw:

Het centrale deel van de stabilisatorstang zal uit 2 delen bestaan, een linker en een rechtergedeelte. Tussen beide delen komt een tussenstuk te staan met daarin progressieve torsiebeeren verwerkt. Mits de stang in beide richtingen torsiemoment moet kunnen opvangen zal er ook gewerkt worden met aanslagen. De schets van het concept wordt weergegeven in figuur 49.



Figuur 49: Spiraal torsiebeer

Progressief gedrag:

Van dit concept kan een progressief gedrag verwacht worden indien de torsiebeeren progressief zijn en deze een groot torsiemoment kunnen opvangen ten opzichte van hun inbouwruimte.

Valabele optie?

Dit concept wordt niet gezien als een valabele optie. Mits de inbouwruimte beperkt is (max. 40 mm in diameter), is het praktisch onmogelijk om dit concept in te bouwen. Het gegeven torsiemoment

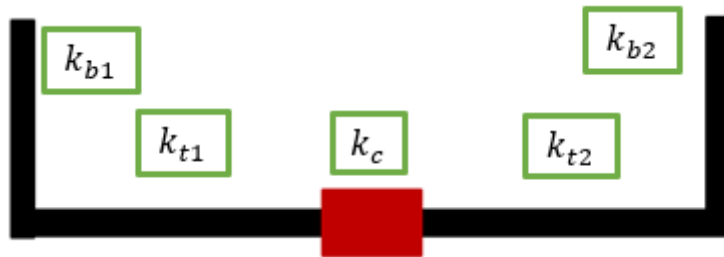
met de bijhorende torsiehoeken is daarvoor te groot. Ook zijn er grote twijfels bij het werken van aanslagen, deze zullen een nadelig effect geven op het vooropgestelde gedrag.

3.3.2 Centraal deel – ‘machined’ progressieve torsie veer

Werkingsprincipe is gelijkaardig met het vorige deelconcept, alleen zal er hier gewerkt worden met een “machined” torsieveer met een progressief gedrag, deze wordt gemaakt met een speciale bewerking op een specifiek patroon in de veer te krijgen. De ‘machined’ drukveer zal een eerste deel van het torsiemoment moeten opvangen. Wanneer de spring zijn maximale verdraaiing heeft bereikt zal het overige moment opgevangen worden door het overig deel van het centrale deel van de stabilisatorstang.

Opbouw:

Net zoals het voorgaande concept zal de stang opgedeeld worden in twee delen. De ‘machined’ drukveer zal zorgen voor de verbinding tussen beide. De machined torsieveer kan enkel in 1 richting verdraaien, hierdoor moet er een alsook een mechanisme voorzien worden waardoor het systeem in beide richtingen kan werken. Dit zal uitgevoerd worden door één veer binnenin de andere te positioneren. Figuur 50 toont deze opbouw.



Figuur 50: Concept machined torsie veer

Progressief gedrag:

Het progressief gedrag kan gerealiseerd worden, indien de “machined” torsie veer progressief wordt ontworpen. Net zoals de “machined” drukveer zal ook hier een speciaal ontwerp voor nodig zijn.

Valabele optie?

De eerste indruk geeft dat dit concept gezien kan worden als een valabele optie. Na gesprekken met een met een fabrikant van dit type veren behoort dit concept niet meer tot de valabele opties. Het opgegeven torsiemoment van 250 Nm is te groot voor de gewenste verdraaiing van ongeveer 4°. Het mechanisme dat nodig zal zijn voor de veer in beide richtingen te laten werken, zal moeilijk in te bouwen zijn binnen de opgelegde inbouwdiameter van 40 mm.

3.4 Armlengte

Hier wordt het concept besproken waarbij de armlengte van de stabilisatorstang wordt veranderd naarmate er een verschil is in uitwijking tussen beide uiteindes van de armen. Het aanpassen van de armlengte heeft als effect dat de stijfheid van het systeem zal veranderen. Hoe langer de arm van de stabilisatorstang hoe minder stijf het systeem zal zijn. Hoe korter de arm, hoe stijver het systeem zal zijn en hoe minder doorbuiging er zal plaatsvinden. Wanneer er nagenoeg geen verschil is tussen de uitwijkingen van de linker- en de rechterarm, dan dient de armlengte voldoende groot te zijn. Naarmate dit verschil groter en groter wordt, dient de arm te verkorten.

Opbouw:

De end link kan op elke afstand van het centraal deel worden gepositioneerd. Dit komt doordat de end link door een gleuf kan verschuiven. Het verbindingspunt tussen de end link en de arm dient in dit concept verschoven te worden naarmate dat er een grotere uitwijking is tussen beide armen. Figuur 51 verduidelijkt dit concept.



Figuur 51: Stabilisatorstang met veranderlijke armlengte [18, p. 9]

Progressief gedrag:

Doordat de stijfheid van het systeem zal veranderen zal ook het gedrag tussen de kracht en de verplaatsing progressief verlopen.

Valabele optie?

Dit concept is geen valabele optie. Bij het uitwerken hiervan werd gevonden dat het moment alsook de uitwijking van de arm daalt. Hierdoor zal de verandering van de stijfheid maar een kleine invloed hebben op het finale gedrag.

4 Conceptkeuze op basis van analytisch model

4.1 Inleiding

De onderstaande sectie bevat een verdere uitwerking van de concepten die gezien worden als een valabele optie voor deze masterthesis. Op basis van analytische stijfheidsberekeningen wordt er uiteindelijk een conceptkeuze gemaakt. De stijfheidsmodellen zijn volledig zelf opgesteld met het programma Excel. Er is vertrokken van het wiskundig model van de conventionele stabilisatorstang (verwijzing naar 3.3). Voor elk valabel concept wordt er gekeken welke stijfheden in serie of parallel geschakeld staan. (verwijzing naar 3.2.1).

De modellen zijn gebruiksvriendelijk en overzichtelijk opgesteld. Het is de bedoeling dat de parameters van deze modellen snel en eenvoudig aangepast kunnen worden. Hierdoor kunnen deze modellen ook in de toekomst gebruikt worden voor een ontwerp van een progressieve stabilisatorstang voor een ander voertuig.

De modellen worden steeds opgesteld en uitgevoerd met de opgegeven kracht (1705 N) en torsiemoment (250 Nm). Zoals eerder aangeven is het uiteindelijke doel een passieve mechanische oplossing te vinden voor een stabilisatorstang met een progressief stijfheidsverloop. Het is dus belangrijk dat het begin- en eindpunt van de curve van het concept samenvalt met die van de conventionele stabilisatorstang. Het beginpunt is namelijk altijd (0,0), aangezien de verdraaiing en de verplaatsing beide 0 zijn wanneer er geen kracht of moment wordt aangelegd op de stang. Het eindpunt bevindt zich op (1705 N, 14.65 mm) of analoog (264 Nm, 4.4°) (verwijzing naar 5.2.1).

Om te garanderen dat het eindpunt (maximale verplaatsing bij een kracht van 1705 N) van het concept overeenkomt met die van de conventionele stabilisatorstang, zal het centrale deel van de stang van het concept altijd een hogere stijfheid moeten hebben ten opzichte van de conventionele stang (verwijzing naar 3.3). Bij alle valabele concepten staan de stijfheden van de innovatieve componenten in serie met ongewijzigde componenten. Dit zorgt dus in totaal voor een lagere stijfheid, daarom zal dit effect gecompenseerd moeten worden met een hogere stijfheid van het gedeelte waaraan qua concept niks gewijzigd wordt.

De vergelijking tussen de kracht-verplaatsingscurve van elk nieuw concept met de conventionele stabilisatorstang geeft een indicatie of het concept theoretisch geschikt is als mogelijke oplossing.

Bijkomend zijn er voor het concept “End link met een “machined” drukveer structurele simulaties doorgevoerd met behulp van Creo Simulate.

4.2 Conventionele stabilisatorstang

4.2.1 Opbouw

Het stijfheidsmodel van de originele stabilisatorstang gebruikt de formules uit paragraaf 3.3.

Figuur 52 geeft een algemeen beeld van de berekeningen van de conventionele stabilisatorstang.

Parameters ARB (mm)		Afstand (inches)
A	155	6.102
B	840	33.071
C	210	8.268
D	27.4	1.079
d	20.94	0.824

J (mm ⁴)	36459.43
I (mm ⁴)	18229.72

Berekeningen	
δt (mm)	11.90
δb (mm)	1.37
ϕ (°)	4.40
kt (N/mm)	143.27
kb (N/mm)	1240.12

Totale verplaatsing/stijfheid	
δ_{tot} (mm)	14.65
ktot_1 (N/mm)	116.38
ktot_2 (N/mm)	116.38
ktot_3 (250) (Nm/°)	60.07
ktot_3 (264) (Nm/°)	60.07

Totale stijfheid bepaald met rekenprogramma	
ktot (lbs/in)	687.5
ktot (N/m)	120390.4
ktot (N/mm)	120.4

↓ x175

Materiaal	
E (N/mm ²)	210000
G (N/mm ²)	79300

Krachtgegevens	
Kracht P (N)	1705
Moment (Nmm)	264275

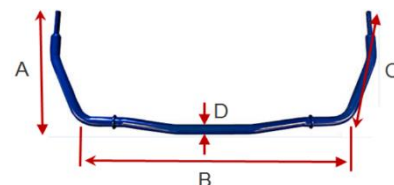
δt helft (mm)	5.95
ϕ helft (°)	2.20
Kt helft (N/mm)	286.5301861

Figuur 52: Tabblad conventionele stabilisatorstang

Als eerste dienen de afmetingen van de conventionele stabilisatorstang ingegeven te worden. Dit wordt gedaan in tabel 1, figuur 53 geeft deze parameters weer.

Tabel 1: Parameters ARB

Parameters ARB (mm)		Afstand (inches)
A	155	6.102
B	840	33.071
C	210	8.268
D	27.4	1.079
d	20.94	0.824



Figuur 53: Bemetingen ARB [15, p. 1]

Hierin is parameter A de loodrechte afstand van het eindpunt van de arm tot de as van het centrale deel. B is de breedte van het centrale deel van de stabilisatorstang exclusief de armen. C is de afstand van het eindpunt van de arm tot aan het middelpunt van de meest nabije bocht tussen het centrale deel en de arm. D is de buitendiameter en d is de binnendiameter. De linkerkolom toont deze afstanden in millimeter, de rechterkolom toont ze in inches. De ingevulde parameters komen overeen met de voorste stabilisatorstang van een Audi A6, met part number: 4G0 411 309 F.

Uit deze gegevens volgen het massatraagheidsmoment (I) en het polair traagheidsmoment (J) in mm⁴. Tabel 2 toont dit.

Tabel 2: Traagheidsmomenten

J (mm ⁴)	45029.29
I (mm ⁴)	22514.64

De materiaal parameters worden in onderstaande tabel ingevoegd. Hierin wordt de E-modulus en de glijmodulus van het gebruikte materiaal ingevuld. Beide uitgedrukt in N/mm². Tabel 3 toont dit.

Tabel 3: Materiaaleigenschappen

Materiaal	
E (N/mm ²)	210000
G (N/mm ²)	79300

Vanuit Flanders Make is aangegeven dat de maximale kracht die optreedt aan één kant van de stabilisatorstang gelijk is aan 1705N. Het moment werd uit dit gegeven en de armlengte berekend. Er is ook een controleberekening uitgevoerd die rekt van moment naar kracht, vandaar de extra kolom rechts. Tabel 4 toont dit.

Tabel 4: Kracht gegevens

Krachtgegevens		
Kracht P (N)	1705	
Moment (Nmm)	264275	250000

De voorgaande invulvelden leiden tot berekende grootheden. De eerste berekende waarde is de uitwijking door het torsiemoment en de uitwijking door het buigmoment (in millimeter). De totale hoekverdraaiing wordt daaronder uitgedrukt in graden. Uit de uitwijking/verdraaiing en de kracht wordt dan de stijfheid afgeleid (uitgedrukt in N/mm). Tabel 5 toont deze berekeningen.

Tabel 5: Berekeningen uitwijkingen, hoekverdraaiing en stijfheden

δ_t (mm)	11.90
δ_b (mm)	1.37
ϕ (°)	4.40
k_t (N/mm)	143.27
k_b (N/mm)	1240.12

De stijfheden k_t en k_b worden dan gecombineerd om een totale stijfheid te vormen, dit gebeurt met formule (15). δ_{tot} Maakt gebruik van formule (13) en waarden δ_t en δ_b om de totale uitwijking te vormen formules. De stijfheid wordt weergegeven in tabel 6.

Tabel 6: Berekenen stijfheden

Totale verplaatsing/stijfheid	
δ_{tot} (mm)	14.65
k_{tot_1} (N/mm)	116.38
k_{tot_2} (N/mm)	116.38
$k_{tot_3(250)}$ (Nm/°)	60.07
$k_{tot_3(264)}$ (Nm/°)	60.07

Hierin zijn verschillende opdelingen gemaakt van k_{tot} . De k_{tot_1} wordt berekend door k_t en k_b te combineren, in serie met elkaar. Hierbij wordt er gebruik gemaakt van volgende formule: $k_{tot} =$

$\frac{1}{\frac{2}{kb} + \frac{1}{kt}}$. Ktot_2 maakt gebruik van formule (14) of (16) in paragraaf 2.3. Beide stijfheden zijn uitgedrukt in N/mm. Ktot_3 (250) berekent de stijfheid door het moment te delen door de hoekverdraaiing (waarbij een moment van 250 Nm wordt opgegeven). Ktot_3 (264) doet dit ook, enkel doet deze het voor de opgegeven kracht van 1705 N (herleid naar een moment van 264 Nm). In de onderste tabel is het resultaat weergegeven van een rekenprogramma vanuit de website gtsparkplugs/sway-bar-calculations, dit resultaat wordt bekomen met eerder opgegeven parameters.

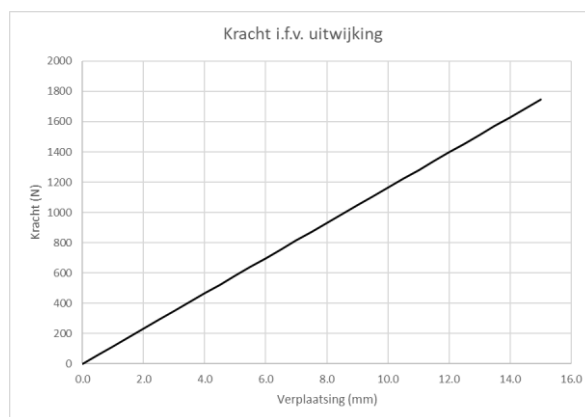
4.2.2 Resultaten

In deze paragraaf worden de resultaten van de berekeningen van de conventionele stabilisatorstang van paragraaf 5.2.1 weergegeven. Met de eerder aangegeven parameters wordt volgend resultaat bekomen (tabel 7):

Tabel 7: Resultaat van de totale verplaatsing/stijfheid

Totale verplaatsing/stijfheid	
δtot (mm)	14.65
ktot (N/mm)	116.38
ktot simp (N/mm)	116.38
ktot (Nm/°) (250)	60.07
ktot (Nm/°) (264)	60.07

De totale stijfheid is 116.38 N/mm, oftewel 60.07 Nm/°. Flanders Make heeft een torsietest op de centrale sectie uitgevoerd, waarbij een stijfheid 55 Nm/° bekomen werd. Een mogelijke afwijking hierop kan te wijten zijn aan de dimensionering van A, de vorm van de stabilisatorstang van het rekenvoorbeeld en de geteste wijken licht af. Aan de hand van dit gegeven kan de kracht uitgezet worden t.o.v. de verplaatsing figuur 54 toont dit, en het moment t.o.v. de hoekverdraaiing figuur 55 toont dit. Hierbij is er telkens een recht evenredig verband tussen uitwijking en kracht of moment en hoekverdraaiing, waarbij de richtingscoëfficiënt de stijfheid is.



Figuur 54: Kracht i.f.v. uitwijking - conventionele stabilisatorstang

Bij een verplaatsing van 14.65 mm wordt de maximale kracht van 1705 N bereikt, dit is het eindpunt van deze grafiek. In 4.40° wordt het maximale moment van 264 Nm bereikt.



*Figuur 55: Torsiemoment i.f.v. hoekverdraaiing-
conventionele stabilisatorstang*

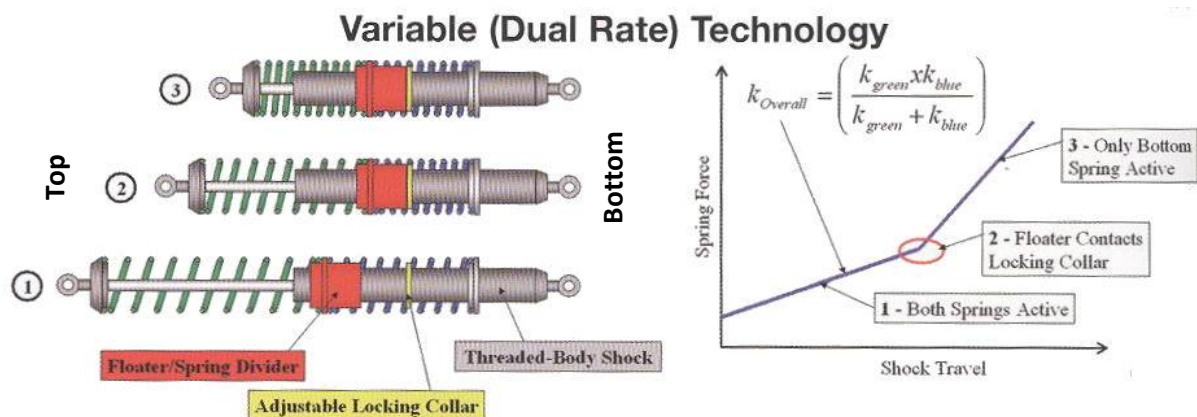
4.3 Concept: End link- dual rate

4.3.1 Opbouw

Hieronder wordt de rekentabel uit Excel weergegeven voor het concept: “End link met Dual-rate veren”. (verwijzing naar 4.1.2)

Bij dit concept wordt er een dual rate veersysteem verwerkt in de end link van de stabilisatorstang. Allereerst is er vertrokken van een dual rate veersysteem, hierdoor kan er snel een conclusie gemaakt worden of dit concept het gewenste resultaat geeft. Als blijkt dat dit concept theoretisch gezien goed zou kunnen werken, kan het veersysteem uitgebreid worden naar een triple rate veersysteem. Hierdoor kan er een betere benadering gemaakt worden van een progressieve veren karakteristiek.

Onderstaande figuur 56 geeft weer hoe een dual rate veersysteem werkt [38]. Links geeft de opstelling van het systeem weer. Rechts de stijfheidskarakteristiek.



Figuur 56: Variable (dual rate) technologie [38]

De eerste veerconstante op de grafiek is de combinatie van de twee veren die in serie geschakeld zijn, beide veren zijn actief in dit gedeelte. Vanaf een vooraf ingestelde indrukking komt de “Floater” tegen de stopring, dit zorgt ervoor dat bij hogere belastingen enkel de onderste veer actief is. Deze bepaalt het schakelpunt van de veren karakteristiek wanneer enkel de onderste veer actief is in plaats van beide veren.

Aan de hand van deze figuur is er een model opgesteld voor dit concept. De rekentabel wordt weergegeven in figuur 57.

Bovenaan worden beide veerconstanten ingegeven. Hieruit wordt de combinatiestijfheid berekend, door de twee veren in serie op te tellen. Verder wordt er ook de instelbare indrukking opgegeven,

Links in figuur 57 wordt de veren karakteristiek opgesteld. Er wordt vertrokken de gecombineerde veerstijfheid. De indrukking wordt berekend door de basis formule: $F = k \cdot \Delta x$. Waarbij de kracht oploopt van 0 N tot 1750 N. De waarde van de stijfheid verandert wanneer de opgegeven indrukking wordt bereikt, vanaf dat punt is enkel de onderste veer actief. In het tweede gedeelte (rechts in figuur 57) wordt het model voor het gedrag voor het totaal systeem van de stabilisatorstang opgesteld. Bovenaan wordt K_t : de stijfheid van het centraal deel van de stang, K_b : Buigstijfheid van de arm opgegeven. Dit zijn de waarden van de conventionele stabilisatorstang. Hieruit worde

K_{conv} , de totale stijfheid van de stabilisatorstang berekend. $K_{concept}$, is de stijfheid van de stabilisatorstang van het concept. Deze stijfheid zal altijd hoger moeten zijn dan K_{conv} , anders zal er nooit hetzelfde eindpunt bereikt worden tussen de beide curves, conventioneel en concept.

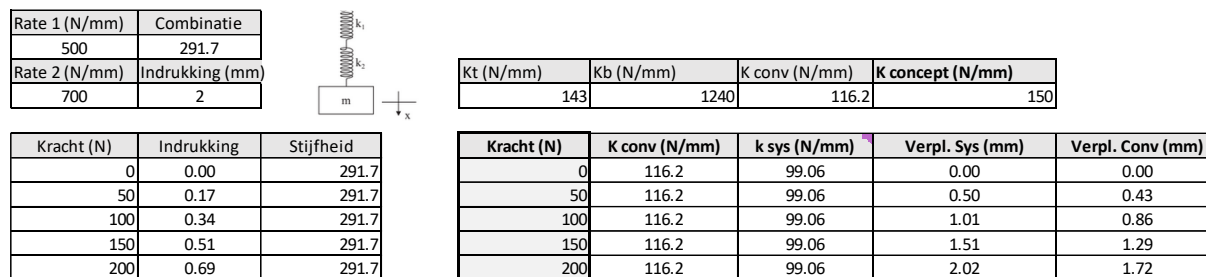
K_{sys} : de totale stijfheid van de innovatieve stabilisatorstang. Deze wordt berekend door de volgende formule: $k_{sys} = \frac{1}{\left(\frac{1}{k_v}\right) + \left(\frac{2}{k_b}\right) + \left(\frac{1}{k_t}\right)} = \frac{1}{\left(\frac{1}{k_v}\right) + \left(\frac{1}{k_{concept}}\right)}$. Dit is visueel voorgesteld op figuur 86 B. Deze formule is afhankelijk van de opstelling hoe de veren geïmplementeerd worden in de End link. (verwijzing naar 6.1.1)

K_v is hierbij de veerconstante bij een bepaalde kracht. Hierbij wordt er gekeken naar de veren karakteristiek van het veersysteem.

Verpl. Sys. geeft de verplaatsing in functie van K_{sys} en kracht. Deze wordt met de onderstaande formule berekend. De resolutie van de verplaatsing kan sterk verhoogd worden door een kleinere stapgrootte in te stellen, deze is momenteel gekozen op 50 N.

$$Verpl. sys.n = Verpl. sys.n-1 + \frac{F_n - F_{n-1}}{K_{sys}}, \text{ met } F_n - F_{n-1} = 50 N$$

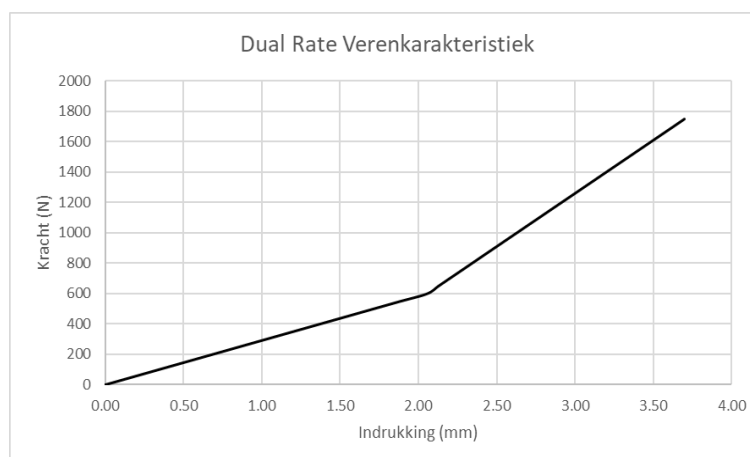
De waarden van K_{conv} en Verpl. Conv. zijn identiek aan de conventionele stabilisatorstang.



Figuur 57: Berekeningen dual rate veer

De veerconstante die ingevuld zijn in de reketabel zijn realistische veerconstanten volgens de DIN EN 10270-1. Er is hier gekozen voor een schakelpunt bij een indrukking van 15mm.

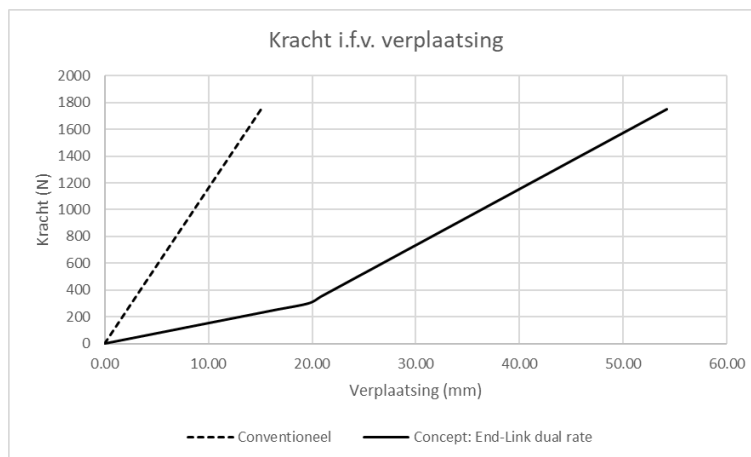
Figuur 58 geeft de veer karakteristiek weer van het dual rate veersysteem met de parameters uit figuur 57. Er is duidelijk een schakelpunt te zien, waarbij de stijfheid wijzigt. Dit punt zou normaal op 15mm moeten liggen, maar door de stapgrootte van 50 N (de resolutie van de berekende curve),



Figuur 58: Veer karakteristiek dual rate veer

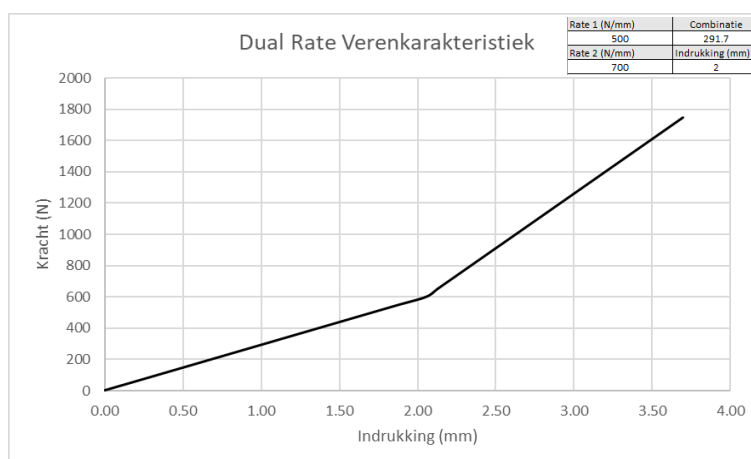
ligt dit punt iets verder. Hoe kleiner de stapgrootte wordt ingesteld, hoe beter de benadering van deze karakteristiek.

Hieronder wordt op figuur 59 de kracht in functie van de verplaatsing weergegeven. Deze grafiek bevat de combinatie van alle stijfheden van het gehele systeem. Dit is verschillend met de voorgaande figuur waarbij enkel de veer karakteristiek van een dual rate veersysteem wordt weergegeven. De stippelijijn is het gedrag van de conventionele stabilisatorstang. De volle lijn geeft het verloop weer van het gedrag van dit dual-rate concept.

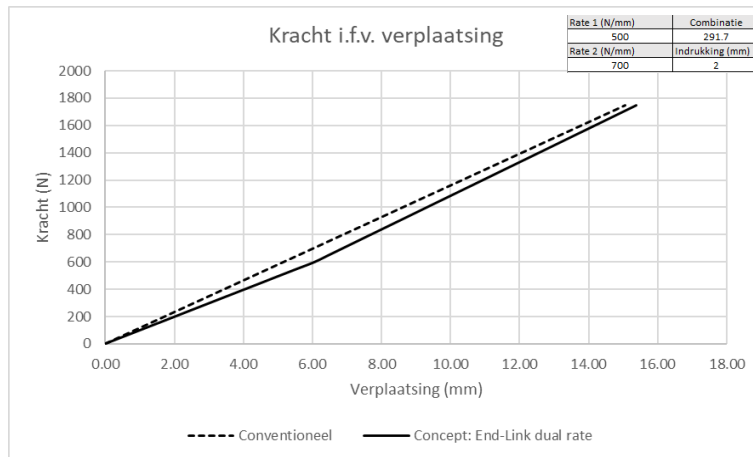


Figuur 59: Kracht i.f.v. verplaatsing- dual rate veer

Hierop is te zien dat die concept niet zal werken in tegenstelling tot wat er eerst verwacht werd. De veerconstante van de veren volgens de DIN EN 10270-1 zijn veel te laag, waardoor het eindpunt nooit zal samenvallen. Er kan dus besloten worden dat het concept “End link dual rate” niet de oplossing biedt waarnaar Flanders Make op zoek is. Er is gekeken naar hoe groot de veerconstanten moeten zijn vooraleer het concept het gewenste progressief gedrag of een benadering ervan vertoont. Bij veerconstanten van 500 en 700 N/mm en bij een opgegeven schakelpunt bij 2 mm indrukking worden de volgende figuren 60 en 61 bekomen



Figuur 60: Dual rate veer karakteristiek-500/700 N/mm



Figuur 61: Kracht i.f.v. verplaatsing- dual rate veer- 500/700 N/mm

Dit zou een licht progressief gedrag van de stabilisatorstang vertonen, maar helaas zijn dit onrealistische waarden voor stijfheden. Door de grote stijfheden en de kleine indrukking wordt er overgestapt naar schotelveren, deze kunnen veel hogere stijfheden hebben. Door het vervangen van spiraalveren door een opstelling met schotelveren wordt er verwacht dat dit betere resultaten zal opleveren. In sectie 4.5 zal dit uitvoerig besproken worden.

4.4 Concept: End link – ‘machined’ drukveer

In dit concept wordt de end link aangepast door het toevoegen van een verende component(en) meer specifiek een ‘machined’ drukveer, deze zal hier uitvoerig besproken worden. Er bestaan verschillende soorten groefpatronen van een ‘machined’ drukveer. Deze patronen komen van eerder onderzoek. Een groef zorgt ervoor dat het materiaal wat zich erboven bevindt meer kan doorbuigen, dus door het plaatsen van groeven in het materiaal kan het materiaal dat boven de groeven ligt meer doorbuigen. Dit zorgt voor een grotere indrukking t.o.v. een massieve cilinder.

4.4.1 Opbouw

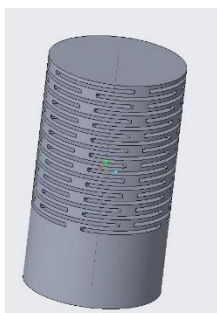
Enkele designs Deze masterproef onderzoekt welke designs een progressief gedrag kunnen vertonen en of het design ook in deze toepassing gebruikt kan worden. De inspiratie van deze designs komen van de website tpa-us [34]. Op onderstaande designs worden enkele iteraties gedaan om zo de gepaste afmetingen van de groeven te vinden. Dit pad kan in verder onderzoek uitgebreid worden.



Figuur 62: Enkele voorbeeld designs van ‘machined’ drukveren [31]

Ten eerste wordt er gekeken of het haalbaar is om zulk design van een ‘machined’ drukveer te gebruiken in de toepassing van de stabilisatorstang. De haalbaarheid wordt nagegaan door het design te tekenen in CREO7 en er een eindige elementenanalyse op uit te oefenen. Er wordt verondersteld dat de maximale diameter van de ‘machined’ drukveer gelijk is aan 35 mm. De lengte van het verend design is voor ieder concept licht verschillend, maar bedraagt maximaal 120 mm of 60 mm als het design aan beide kanten van de end link staat.

Het design op figuur 63 wordt ‘machined’ drukveer 1 genoemd. Dit design wordt getekend door een cilinder te nemen en hieruit op bepaalde vlakken te extruderen. De vorm van de extrusie alsook de afrondingen, zijn hier van groot belang. Onderstaande extrusie wordt als patroon uitgevoerd waardoor er meerdere lagen gecreëerd worden. De spleethoogte is de hoogte van het roze gedeelte en wordt aangegeven als h , de straal van de afronding wordt aangegeven als r (te zien in figuur 64). Het is belangrijk dat alle insnijdingen afgerond worden.

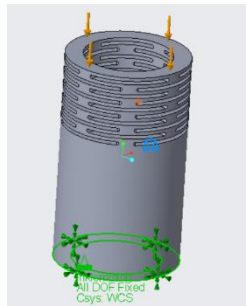


Figuur 63: CAD model drukveer1



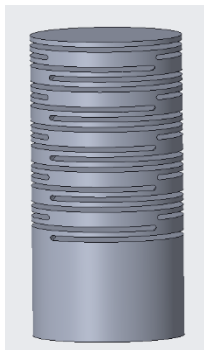
Figuur 64: Parameters CAD model drukveer1

Bij het simuleren dienen alle vrijheidsgraden aan de onderkant vast te staan. Vervolgens wordt er een kracht van 1705N verdeeld over het bovenvlak. Deze voorwaarden worden gebruikt voor alle simulaties.

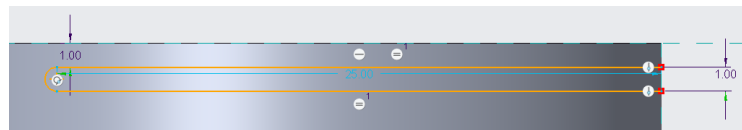


Figuur 65: Randvoorwaarden drukveer 1

Dezelfde denkwijze wordt gevolgd bij het ontwerpen van onderstaand design. Het design wordt opgebouwd door verschillende extrusies uit te voeren in een bepaald patroon, het bestaat uit 4 deelpatronen die telkens over een andere hoek verdraaid zijn. De sketch voor de extrusie is terug te vinden in figuur 67. Dit design wordt 'machined' drukveer 2 genoemd.



Figuur 66: CAD model 'machined' drukveer 2

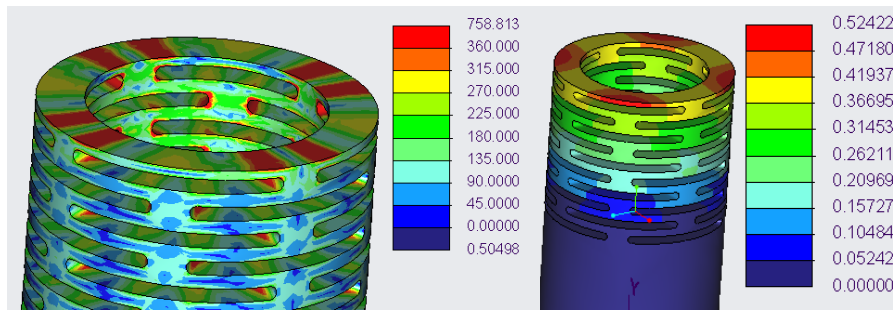


Figuur 67: Parameters CAD model 'machined' drukveer 2

4.4.2 Resultaten

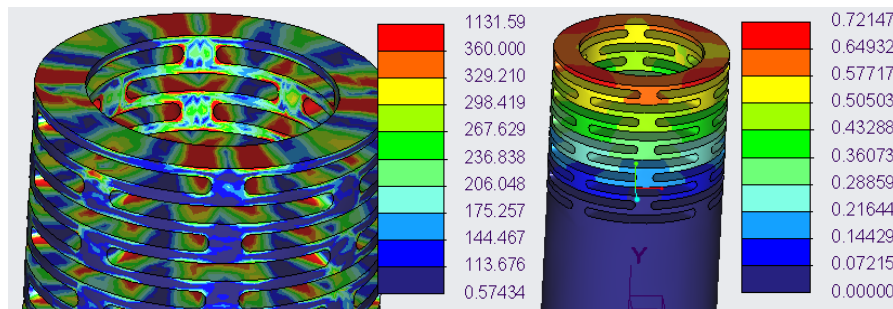
Om te kijken of het design valabel is, wordt een maximale spanning van 360 Mpa (Al-Cu_alloy_wrought_HS) toegekend. Wanneer de spanning nu boven deze waarde ligt, dan kleurt het model op die plaats rood. Zo kan er gekeken worden naar waar het model boven zijn kritische spanning zit. Op deze plaatsen moet het ontwerp aangepast worden.

In de eerste simulatie van 'machined' drukveer 1 is de tussendikte van het patroon 1,5 mm en is er afgerond op 0,75 mm. Er is te zien dat de spanning met een grote factor boven de maximale spanning van 360Mpa ligt. De spanningspieken bevinden zich vooral bij de afrondingen aan de binnenkant. De spanning loopt hier op tot 758 Mpa bij een verplaatsing van 0,524 mm. De hoogte van het design is rond de 20 mm, maar doordat de inbouwruimte rond de 60 mm is, mogen we de verplaatsing vermenigvuldigen met 3 (om te kijken of dit een valabel concept is). Figuur 69 geeft dit weer.



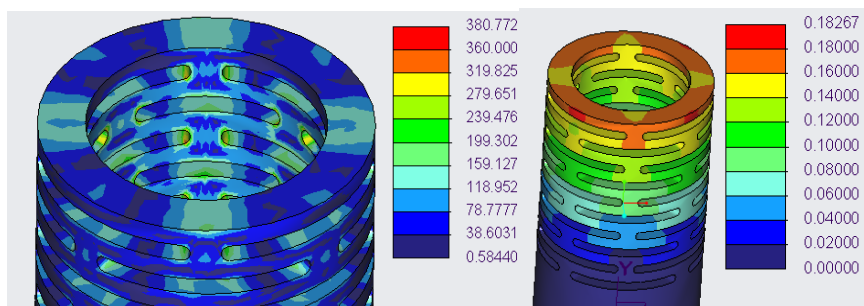
Figuur 68: FEM simulatie 1: 'machined' drukveer 1

De Afrondingen zijn nu vergroot naar straal van 0,9 mm en de spleethoogte van de gleuf wordt nu 1,8 mm. Dit is gedaan doordat hier de spanningen hoog oplopen, door een vergroting van de afronding zou de spanningen moeten dalen. De dikte van de plaatjes is te weinig waardoor de spanning nog hoger worden dan vorig design. Figuur 68 geeft dit weer.



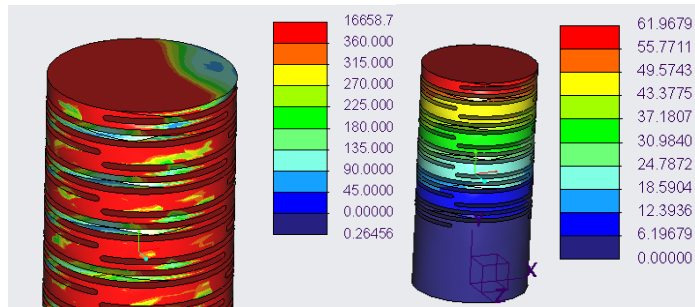
Figuur 69: FEM simulatie 2: 'machined' drukveer 1

De Afrondingen hebben een straal van 0,9 mm, de spleethoogte van de gleuf is 1,8 mm. De schijfdikte is nu 2,2 mm en de lengte van het patroon is ongeveer 40 mm. De schijfdikte is verhoogd omdat er te zien is dat de spanningen nog steeds te groot zijn in de afrondingen, maar door de schijfdikte te verhogen wordt de kracht beter verdeelt. Doordat de lengte van het patroon 40 mm is, en de beschikbare lengte 60 mm is, wordt de totale verplaatsing vermenigvuldigd met 1,5. De maximale spanning ligt nu rond de vloeispanning van het gekozen materiaal (Al-Cu_alloy_wrought_HS). De verplaatsing bedraagt nu 0,18267 mm, vermenigvuldigd met 1,5 is dit 0,27401 mm. Figuur 70 geeft dit weer.



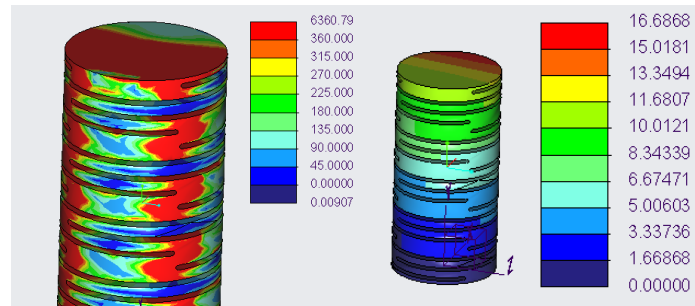
Figuur 70: FEM simulatie 3: 'machined' drukveer 1

Figuur 71 geeft de simulatie van 'machined' drukveer 2 weer waarbij de hoogte van de spleet 1 mm bedraagt, de lengte 25 mm bedraagt en de afronding een straal heeft van 0,5 mm. De tussenafstand tussen elke spleet bedraagt 2 mm (van hartlijn tot hartlijn).



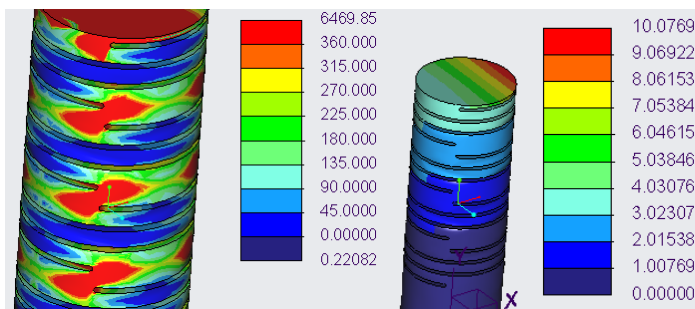
Figuur 71: FEM simulatie 1: 'machined' drukveer 2

Zoals te zien op figuur 71, kleurt bijna heel de cilinder rood. Rood betekent hier dat de spanning de grensspanning (vloeigrens) overschrijdt. Hieruit volgt dat deze zwaarder uitgevoerd moet worden. Wanneer de tussenafstand van de spleten vergroot worden naar 2 mm en het patroon vergroot wordt naar 12 mm, dan wordt figuur 72 bekomen.



Figuur 72: FEM simulatie 2: 'machined' drukveer 2

In figuur 73 is de tussenafstand van de spleten nogmaals vergroot tot 3 mm en het patroon is vergroot naar 16 mm. De piekspanningen treden hier vooral op waar de 2 spleten boven elkaar eindigen. In deze masterproef zal hier niet meer verder op in gegaan worden, dit brengt dit onderzoek te ver.



Figuur 73: FEM simulatie 3: 'machined' drukveer 2

Besluit:

Wanneer ‘machined’ drukveer 1 zo gedimensioneerd is dat de vloeispanning niet overschreden wordt, dan bedraagt de indrukking voor dit patroon 0,274 mm voor een kracht van 1705N. De verplaatsing is te laag voor dit soort toepassing.

Het design van ‘machined’ drukveer 2 lijkt haalbaar voor dit concept, omdat de verplaatsingen voldoende lijken. Maar de spanningspieken moeten nog verlaagd kunnen worden.

Om deze thesis niet te ver te leiden is er hier geen verder onderzoek naar gedaan. In de toekomst zou dit interessant kunnen zijn om een juist ontwerp van deze veer te vinden.

4.5 Concept: End link- schotelveren

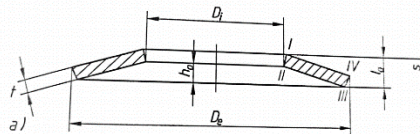
4.5.1 Opbouw

Hieronder wordt de rekentabel uit Excel weergegeven voor het concept: “End link met schotelveren”. Alle tabellen die zich beschouwen over het concept van de “End link” zijn terug te vinden in Excel in het tabblad “End link”. De tabel Schotelveren 100 dient om grafieken te vergelijken met het programma “disc spring solver”. De tabel schotelveren 75% wordt gemaakt omdat schotelveren niet meer dan 75% van hun theoretische weglengte ingedrukt mogen worden. Dan is er nog een tabel waarin de uitwijkingsbegrenzers geïntegreerd zijn in het ontwerp, uitwijkingsbegrenzers zorgen ervoor dat schotelveren niet meer dan 75% kunnen indrukken.

Tabel 8 geeft een reeks gegevens van schotelveren die dient ingevuld te worden in tabel 9, deze gegevens komen uit bron [39]. Er bestaan 3 klassen, met klasse A de stijfste en klasse C de flexibelste schotelveren. Voor de berekeningen zijn er 3 gegevens nodig: de kracht nodig om de schotelveer 75% van h_0 te doen indrukken ($F_{0.75}$), de theoretische maximale weglengte (h_0) en de dikte (t) van de schotelveer (voorgesteld in figuur 74 [40]).

Tabel 8: Gegevenstabel schotelveren

	D	F0.75	h0	t
Klasse A	12.5	660	0.3	0.7
	14	797	0.3	0.8
	16	1013	0.35	0.9
	18	1254	0.4	1
	20	1521	0.45	1.1
	22.5	1929	0.5	1.25
Klasse B	16	410	0.45	0.6
	18	566	0.5	0.7
	20	748	0.55	0.8
	22.5	707	0.65	0.8
	25	862	0.7	0.9
	28	1107	0.8	1
Klasse C	16	154	0.5	0.4
	20	254	0.65	0.5
	22.5	426	0.8	0.6
	25	600	0.9	0.7

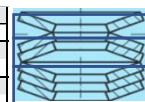


Figuur 74: Schematische voorstelling afmetingen schotelveer [40, p. 315]

In tabel 9 worden de eigenschappen van de stack berekend. Een stack is een stapeling van schotelveren. Hierin dienen de omringde kaders ingevuld te worden. Er wordt dan één schotelveer gekozen, de gegevens hiervan worden gehaald uit het tabellenboek Roloff/Matek (rode kader)[39]. Dit programma maakt het mogelijk om een willekeurige stapeling met één soort schotelveer te modelleren. Het Excel document is opgesteld voor een stapeling waarbij er maximaal 3 schotelveren parallel op elkaar zijn gestapeld (het kan echter wel uitgebreid worden door er een stack... (rij) bij te zetten. Maar in deze toepassing is dit niet nodig. $S_{0.75}$ is de indrukking van de schotelveren bij de kracht $F_{0.75}$ (terug te vinden in tabellen). L_0 is de som van h_0 en t . k is de stijfheid van één stack. Voor stack 1 is k_{tot} de stijfheid van alle stacks gecombineerd, hierin wordt er beschouwd dat nog geen enkele stack is ingedrukt. Voor stack 2 is k_{tot} de stijfheid van de totale stack 2 en 3, stack 1 is hier zagezegd helemaal ingedrukt en heeft theoretisch een stijfheid van oneindig. Voor stack 3 is dit enkel de stijfheid van zichzelf, mits stack 2 en 3 hier zagezegd ingedrukt zijn. In de groene kader dient de grootte van de stack ingevuld te worden, dit betekent hoeveel keer deze bepaalde stapeling zich voordoet. De meest rechtse kolom berekent de inbouw lengte.

Tabel 9: Overzichtelijke tabel-schotelveren

Stack 1	F 0.75	h0	t	s 0.75	l0	k	k tot 3	#stack	Inbouw lengte	
	660	0.3	0.7	0.225	1	2933.3	225.64	12	12	
Stack 2	F 0.75	h0	t	s 0.75	l0	k	ktot 2	#stack	Inbouw lengte	
	1320	0.3	0.7	0.2	1	5867	2933.33	2	3.4	
Stack 3	F 0.75	h0	t	s 0.75	l0	k	k tot 1	#stack	Inbouw lengte	
	1980	0.3	0.7	0.2	1	8800.0	8800000000.0	0.000001	0.0	
									15,40	totale inbouw lengte



Dan dient tabel 10 ingevuld te worden. Het belangrijke hierin is Kconcept, dit is de stijfheid van de nieuw ontworpen stabilisatorstang.

Tabel 10: Stijfheden verschillende delen

Kt	k b	K conv	K concept
143	1240	116	143

De stijfheid wordt hier soortgelijks berekend als in paragraaf 4.3.1. Hetgeen hier belangrijk is, is dat de stijfheid variabel is. Deze rij verandert automatisch van waarde. Dit wordt bekomen door te zeggen: als de kracht > F0.75 van stack2 gebruik dan ktot 1, anders als de kracht < F0.75 van stack 1 gebruik van dan ktot2 zo niet, gebruik ktot3. Deze stijfheid wordt vervolgens gecombineerd met de stijfheid K concept om de stijfheid Ksys te creëren. Tabel 11 geeft het resultaat hiervan weer. Uit de stijfheid en de kracht volgt de verplaatsing. De kracht t.o.v. verplaatsing wordt dan weergegeven in grafieken.

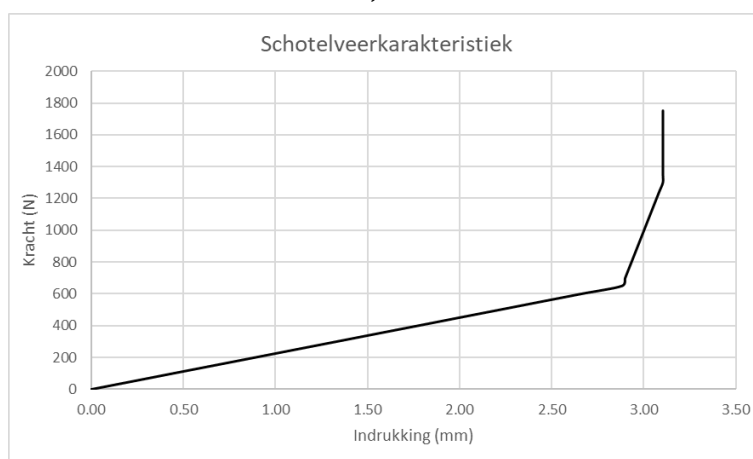
Tabel 11: Resultaten- schotelveren 75%

Kracht	Indrukking	Stijfheid
0	0.00	225.6
50	0.22	225.6
100	0.44	225.6
150	0.66	225.6
200	0.89	225.6

Kracht	K conv	k sys	Verpl. Conv	Verpl. Sys
0	116	87.53	0.0	0.0
50	116	87.53	0.4	0.6
100	116	87.53	0.9	1.1
150	116	87.53	1.3	1.7
200	116	87.53	1.7	2.3

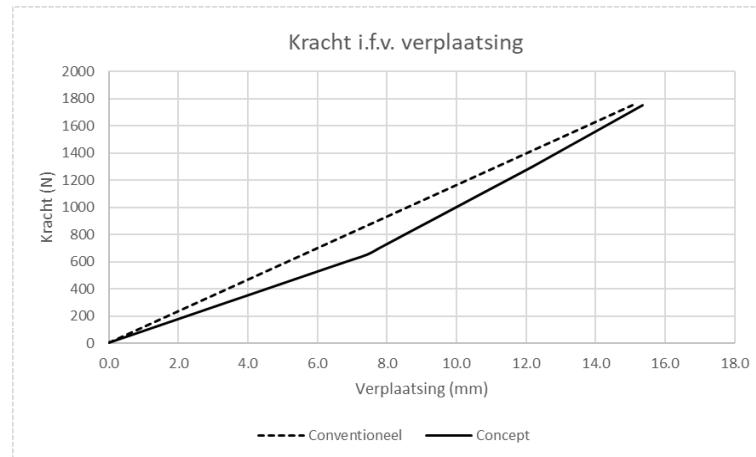
4.5.2 Resultaten

Figuur 75 toont de veer karakteristiek van tabel 9. Deze grafiek vertoont 2 knikken. De eerste knik vindt plaats wanneer de drempelkracht van de enkelvoudige stack overschreden wordt. Op dit punt zullen de schotelveren van deze enkelvoudige stack volledig ingedrukt worden en hierna zal de stijfheid van deze ingedrukte stack als oneindig beschouwd worden. Deze knik vindt plaats op het punt (2.9 mm, 650 N). In het Excel bestand is er ook de mogelijkheid om een 2^e knik te creëren, door het toevoegen van een 3^e stack. Deze knik vindt plaats wanneer de drempelkracht van de dubbelvoudige stack overschreden wordt. De stijfheid neemt in iedere knik toe.



Figuur 75: Resultaten schotelveer karakteristiek- concept

Hieronder wordt op figuur 76 de kracht in functie van de verplaatsing weergegeven van het volledige stabilisatorstangstelsel. De stippellijn is het gedrag van de conventionele stabilisatorstang. De volle lijn geeft het verloop weer van het gedrag van het concept. Zoals te zien in figuur 76 kan met deze opstelling een progressief verloop bekomen worden. In het punt waar beide lijnen het verst uit elkaar liggen kan een verschil in kracht van $\pm 23\%$ opgemerkt worden. Dit is dus een duidelijk verschil.



Figuur 76: Resultaten- Kracht i.f.v. verplaatsing- concept schotelveren

Conclusie:

Met dit concept kan er een duidelijk progressief gedrag bekomen worden, maar het verloop van de curve is discontinu.

4.6 Concept: Bladed sway bar

4.6.1 Opbouw

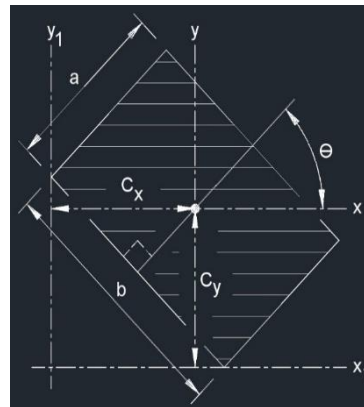
Zoals eerder vermeld in 4.2 heeft het oppervlaktetraagheidsmoment van de arm een effect op de totale stijfheid van de stabilisatorstang. Het concept “Bladed sway bar” gebruikt dit effect om een progressief gedrag te bekomen. Naarmate de uitwijking van de ophanging van de auto groter wordt, zal de arm van de stabilisatorstang meer verdraaien.

Het oppervlaktetraagheidsmoment van de arm onder een bepaalde hoek θ , wordt berekend volgens de formule: $I_x = \frac{b \cdot a}{12} (a^2 \cos^2 \theta + b^2 \sin^2 \theta)$, waarbij parameters a en b de afmetingen zijn van de sectie van de arm. Voor de vereenvoudiging is er als sectie gekozen voor een rechthoek. Dit wordt weergegeven in figuur 77 [41].

In Excel kan het oppervlaktetraagheidsmoment apart berekend worden voor een opgegeven rotatiehoek, dit wordt weergegeven in tabel 12.

Tabel 12: Berekening oppervlakte traagheidsmoment - bladed sway bar

Oppervlakte traagheidsmoment	
Hoogte b (mm)	10
Breedte a (mm)	40
Rotatie (°)	90
I_x (mm ⁴)	3333.3
I_y (mm ⁴)	53333.3

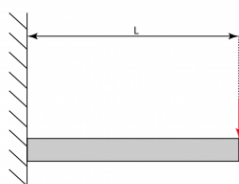


$$I_x = \frac{ba}{12} (a^2 \cos^2 \theta + b^2 \sin^2 \theta)$$

Figuur 77: Schematische voorstelling rechthoek [41]

Allereerst wordt er gekeken hoeveel effect de verandering van het oppervlakte traagheidsmoment van de arm heeft op de totale stijfheid van de stabilisatorstang. Vanuit de hoekverdraaiing van de arm wordt het oppervlakte traagheidsmoment berekend. Vervolgens wordt de doorbuiging van de arm berekend, de arm kan gezien worden als puntbelasting van 1705N op uiteinde bij enkele inklemming (zie figuur 78 [42]).

Situatie 3 – Puntbelasting op uiteinde bij enkele inklemming



Maximaal moment

$$M = P \cdot L$$

Doorbuiging

$$f = \frac{P \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I}$$

Figuur 78: Situatieschets enkele inklemming [42]

De totale doorbuiging δ_{tot} is de som van de berekende doorbuiging δ_b van de arm samen met de uitwijking op het uiteinde van de arm ten gevolge van torsie δ_t .

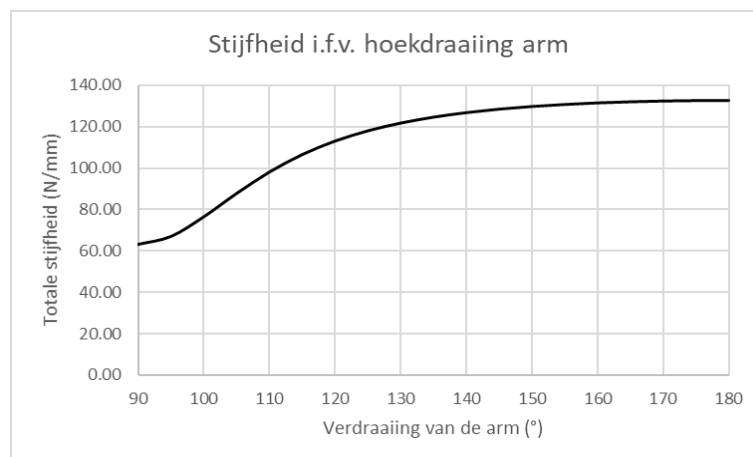
Uiteindelijk wordt de totale stijfheid berekend door de stijfheid van de arm tweemaal serie op te tellen met de stijfheid van het centraal deel.

Tabel 13 is opgesteld voor een hoekverdraaiing van 90°.

Tabel 13: Stijfheid i.f.v. hoekverdraaiing

Hoekverdraaiing arm (°)	I_x (mm ⁴)	δb (mm) (Ix)	δ_{tot} (mm) (Ix)	k_b (N/mm)	k_{tot} (N/mm)
90	3333	7.52	19.42	226.8	63.29
95	3713	6.75	18.65	252.6	67.12
100	4841	5.18	17.08	329.3	76.61
105	6683	3.75	15.65	454.6	87.88
110	9182	2.73	14.63	624.6	98.21
115	12264	2.04	13.94	834.3	106.64
120	15833	1.58	13.48	1077.1	113.16
125	19783	1.27	13.17	1345.8	118.12
130	23992	1.04	12.95	1632.1	121.87
135	28333	0.88	12.79	1927.4	124.72
140	32675	0.77	12.67	2222.8	126.91
145	36884	0.68	12.58	2509.1	128.58
150	40833	0.61	12.51	2777.8	129.87
155	44403	0.56	12.47	3020.6	130.85
160	47484	0.53	12.43	3230.2	131.59
165	49984	0.50	12.40	3400.3	132.13
170	51826	0.48	12.38	3525.6	132.50
175	52954	0.47	12.37	3602.3	132.71
180	53333	0.47	12.37	3628.1	132.78

Figuur 79 toont het verloop van de totale stijfheid in functie van de hoekverdraaiing van de arm. Hierop is te zien dat de stijfheid het sterkste stijgt in de eerste 25° tot 30°. Deze informatie zal gebruikt worden voor het tweede gedeelte van het model.



Figuur 79: Verloop totale stijfheid i.f.v. hoekverdraaiing van de arm

In het tweede gedeelte van het model wordt het concept vergeleken met de conventionele stabilisatorstang. Dit wordt weergegeven in tabel 14. Opnieuw wordt op een analoge manier de oppervlakte traagheidsmoment I_x , de doorbuiging van de arm δb en de stijfheid van de arm kb berekend. K_{sys} is opnieuw de som van tweemaal de stijfheid van arm serie op te tellen met “Kt concept”. Deze wordt ingegeven in Excel. Kt concept is de torsiestijfheid van het centrale deel van de stang, deze zal altijd stijver moeten uitgevoerd worden om het gewenste snijpunt met de conventionele stabilisatorstang op (1705N, 14.65mm) te bekomen. De waarden van de conventionele stabilisatorstang zijn identiek zoals in paragraaf 5.2.2.

Figuur 80 toont het torsiegedrag voor dit concept aan de hand van de volgende parameters. Deze parameters zijn ingesteld als volgt:

$a = 40 \text{ mm}$

$b = 10 \text{ mm}$

$Kt \text{ concept} = 160 \text{ N/mm}$,

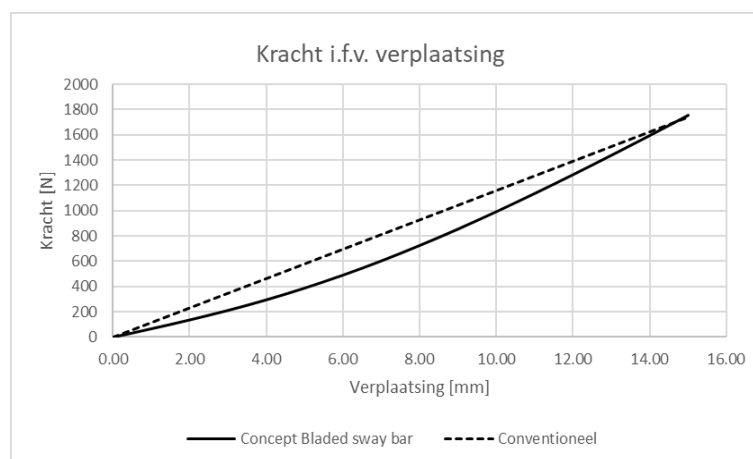
Oppervlakte traagheidsmoment	
Hoogte b (mm)	10
Breedte a (mm)	40
Rotatie (°)	90

Tabel 14: Resultaten tabel- concept bladed sway bar

Tot. Verplaatsing (mm)	14.5	Begin hoek (°)	90	Kt concept (N/mm)	Kconventioneel (N/mm)	I_x (mm ⁴)	3333.3
Interval (mm)	0.5	Eind hoek (°)	115	160.00	116.00	I_y (mm ⁴)	53333.3
Verplaatsing	Hoekverdraaiing (°)	Opp traagheid (mm ⁴)	δb (mm)	kb (N/mm)	K_{sys} (N/mm)	Kracht (N)	Kracht conv (N)
0.00	90	3333.33	0.00	226.8	66.36	0	0
0.50	90.9	3344.65	0.15	227.5	66.49	33	58
1.00	91.7	3378.60	0.29	229.8	66.88	67	116
1.50	92.6	3435.14	0.43	233.7	67.53	101	174

4.6.2 Resultaten

De volle lijn is het verloop van het concept "Bladed sway bar". Hierop is duidelijk het gewenste progressief gedrag te zien. De maximale progressiviteit van de concept bedraagt ongeveer een 25.5% ten opzichte van de conventionele stabilisatorstang.



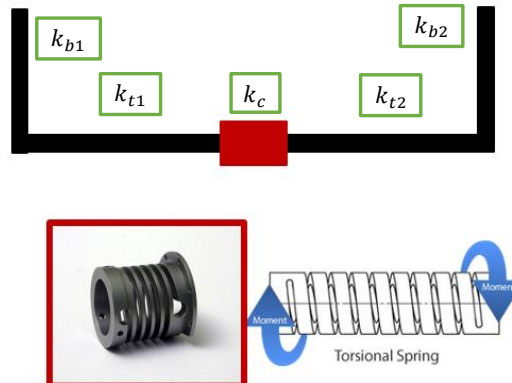
Figuur 80: Kracht i.f.v. verplaatsing - concept bladed sway bar

Dit concept zou theoretisch een goede oplossing zijn voor de onderzoeksvraag. De moeilijkheid van dit concept ligt bij het mechanisme om de arm passief te laten verdraaien bij een grotere uitwijking van de ophanging. Omwille van de complexiteit van het benodigde mechanisme is deze oplossing niet verder uitgewerkt.

4.7 Concept: Centraal deel

4.7.1 Opbouw

Het concept “centraal deel” heeft een centrale component die de stijfheid progressief verandert. In het beschouwde geval zou dit bijvoorbeeld een progressieve torsieveer zijn. De torsieveer heeft dan een bepaalde “start spring rate” (begin stijfheid) en een “progression rate” (verhoging van de stijfheid per °). Figuur 81 weerspiegelt een schematische voorstelling van dit concept.



Figuur 81: Schematische voorstelling centrale deel

De totale stijfheid wordt bepaald door de stijfheden van de verschillende delen in serie op te tellen: $k_{tot} = \frac{1}{\left(\frac{1}{k_c}\right) + \left(\frac{2}{k_b}\right) + \left(\frac{2}{k_t}\right)}$. k_c is de stijfheid van de centraal toegevoegde component, k_b is de buigstijfheid van de armen van de stabilisatorstang en k_t is de torsiestijfheid van de centrale staaf van de stabilisatorstang. De 1 in de noemer boven k_c staat er omdat er 1 verende component is. De 2 in de noemer boven k_b staat er doordat er 2 armen zijn. De 2 in de noemer boven k_t staat er omdat het centrale deel van de stang opgesplitst is in 2 delen.

De waarden in tabel 15 zijn identiek aan de waarden van de conventionele stabilisatorstang (verzwijzing 5.2.2). Hierin staat de buigstijfheid van de arm en de torsiestijfheid van de helft van het centrale deel. Beide worden uitgedrukt in N/mm. k_{tot} is de totale stijfheid uitgedrukt in Nm/°.

Tabel 15: Stijfheden aparte delen

k_b (N/mm)	1240.12
k_t (N/mm)	286.53
k_{tot} conventioneel	60.07

In tabel 15 wordt een vaste stijfheid aan de centrale component toegekend. Deze waarde wordt enkel gebruikt in de invultabel 17 voor te kijken hoeveel % de totale stijfheid zal veranderen door het veranderen van k_c (stijfheid van de centrale component). Hierin kan de verandering $k_c\%$ ingegeven worden, deze geeft aan hoeveel k_c verandert t.o.v. zijn oorspronkelijke waarde. Vervolgens rekt het programma de verandering in totale stijfheid t.o.v. de oorspronkelijke waarde met k_c . Op die manier is te zien wat de invloed is van een verandering in stijfheid van de centrale component t.o.v. de volledige stijfheid van het volledige systeem.

Tabel 17: Stijfheden nodig ter berekening van de totale stijfheid

Kc (N/mm)	200
Kc (Nm/°)	50
Ktot (N/mm)	73.57
Ktot (Nm/°)	27.29

Tabel 16: Invultabel, voor de verandering in stijfheid weer te geven

Invultabel	
Verandering Kc %	10%
Kc (Nm/°)	5
Ktot (Nmm/°)	4.62
Verandering Ktot %	17%

De centrale component die verder beschouwd wordt heeft echter geen vaste stijfheid maar de stijfheid stijgt naarmate de hoekverdraaiing vergroot (progressief gedrag). Het progressief gedrag dat beschouwd wordt, gebruikt de formule $y = Ax + B$, waarin y de nieuwe stijfheid is, x de hoekverdraaiing, B de start spring rate en A de progression/°. A en B zijn de parameters van de progressieve component die moeten worden ingevuld. $K_{concept}$ is de nieuwe stijfheid van de stabilisatorstang gebruikt in dit concept. $K_{conventioneel}$ is de stijfheid van de conventionele stabilisatorstang, deze wordt gebruikt om de conventionele stabilisatorstang te plotten op de grafiek. Beide stijfheden zijn uitgedrukt in $Nm/°$.

Tabel 18: In te vullen stijfheidsparameters

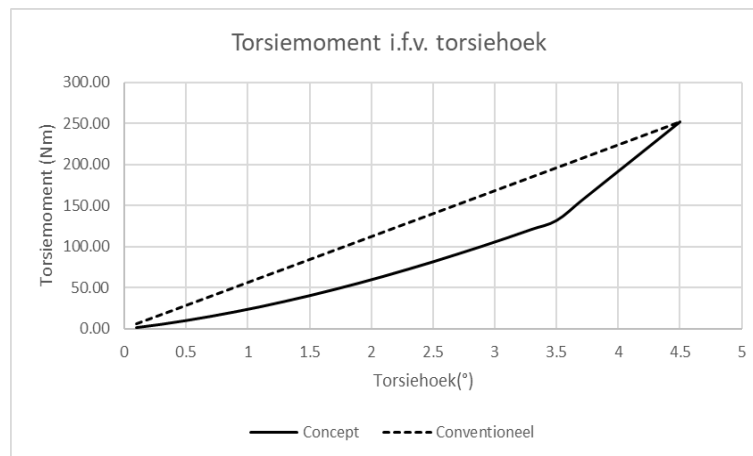
Progressief	Start spring rate	20	$K_{concept}$	$K_{conventioneel}$
$Ax + B$	Progression /°	10.0	120	56

Wanneer bovenstaande gegevens ingevuld zijn, wordt tabel 19 bekomen. Hierna dient er nog gekozen te worden tot hoever de centrale component mee tordeert tot het een massief element wordt of met andere woorden een theoretische stijfheid van oneindig krijgt. De kolom Progressief dient doorgetrokken te worden tot aan de ingestelde hoek. Wanneer deze hoek bereikt wordt, dan is de stijfheid van K_{sys} gelijk aan de stijfheid van het concept ($K_{concept}$).

Tabel 19: Resultaat concept- centraal deel

	Progressief	Start spring rate	20	$K_{concept}$	$K_{conventioneel}$
	$Ax + B$	Progression /°	10.0	120	56
Torsiehoek		K_{sys}	Moment	Conventioneel	
0.1	21.0	17.87	1.79	6	
0.3	23.0	19.30	5.79	17	
0.5	25.0	20.69	10.34	28	
0.7	27.0	22.04	15.43	39	
0.9	29.0	23.36	21.02	50	
1.1	31.0	24.64	27.10	62	
1.3	33.0	25.88	33.65	73	
1.5	35.0	27.10	40.65	84	
1.7	37.0	28.28	48.08	95	
1.9	39.0	29.43	55.92	106	
2.1	41.0	30.56	64.17	118	
2.3	43.0	31.66	72.81	129	
2.5	45.0	32.73	81.82	140	
2.7	47.0	33.77	91.19	151	
2.9	49.0	34.79	100.90	162	
3.1	51.0	35.79	110.95	174	
3.3	53.0	36.76	121.32	185	
3.5	55.0	37.71	132.00	196	
3.7	57.0	120.00	156.00	207	
3.9		120.00	180.00	218	
4.1		120.00	204.00	230	
4.3		120.00	228.00	241	

Figuur 82 geeft dan het verloop van het torsiemoment [Nm] weer ten opzichte van de torsiehoek [°].



Figuur 82: Torsiemoment i.f.v. torsiehoek concept centrale deel

4.7.2 Resultaten

Aan de hand van een iteratieve modellering in Excel blijkt dat het mogelijk is om een progressief gedrag te bekomen. De volle lijn heeft een scherpe overgang tussen het progressieve deel en het lineaire deel van de curve, dit is niet hetgeen wat deze masterproef zoekt.

Conclusie van het effect op het gedrag bij het veranderen van parameters:

Volgende formules zijn een hulpmiddel voor het begrijpen van de conclusie: $k_{tot} = \frac{1}{\left(\frac{1}{k_c}\right) + \left(\frac{2}{k_b}\right) + \left(\frac{2}{k_t}\right)}$,

waarbij $K_c = A \cdot x + B$, waarbij x de torsiehoek is, A de progression rate en B de start spring rate.

Het veranderen van $K_{concept}$:

- Verhogen → steilere helling van het 2de deel v.d. curve
- Verlagen → niet gewenst → minder stijf dan de conventionele

Het veranderen van de start spring rate:

- Verhogen → Sluit korter aan bij de conventionele
- Verlagen → Verder van de conventionele

Het veranderen van de progression/°:

- Verhogen → Meer progressief gedrag → gewenst
- Verlagen → meer lineair gedrag → minder gewenst

Het veranderen van het bereik v.d. torsiehoek:

- Verhogen → Curve schuift op naar rechts
- Verlagen → Curve schuift op naar links

Bij het contacteren van het bedrijf ABSSAC is aangegeven dat dit soort component niet te realiseren is qua inbouwgrootheid en krachten.

4.8 Besluit en keuze concept

De analytische stijfheidsberekening van de conventionele stabilisatorstang vormt de basis voor de modellen van de concepten. Heel wat belangrijke informatie aan waarden over de conventionele stabilisatorstang komen uit deze rekentabel.

Bij het opstellen van het analytisch rekenmodel voor elk concept wordt er per nieuwe component gekeken of deze stijfheid in serie of parallel geschakeld is met de stabilisatorstang.

Voor een correcte, finale keuze te maken welk concept uiteindelijk gebruikt zal worden, wordt er naar een aantal criteria gekeken. De progressiviteit moet minimaal 10 – 15% bedragen. De eindpunten van beide curves, die van de conventionele stabilisatorstang en het concept moeten samenvallen. De aangepaste componenten moeten vanzelfsprekend de belasting en spanning aankunnen. Verder mag het passief mechanisme niet te complex zijn, het is de bedoeling dat het innovatief ontwerp eenvoudig kan ingebouwd worden in bestaande persoonsvoertuigen.

Er worden een drietal varianten gemodelleerd voor het concept waarbij de end link aangepast wordt om een progressief gedrag te bekomen. Hieruit blijkt uiteindelijk maar één variant geschikt als mogelijke oplossing, nl. het toepassen van schotelveren. Uit de resultaten van het concept waarbij er dual rate veren geïmplementeerd worden in de end link blijkt dat dat concept niet zal werken in de praktijk. De veren die zouden passen in het systeem hebben een veel te lage veerconstante. Het eindpunt van de curve van het concept zal nooit kunnen samenvallen met de curve van de conventionele stabilisatorstang. Door de hoge stijfheden wordt de end link gelegd met ‘machined’ drukveers, deze hebben een hoge stijfheid en kunnen op maat ontworpen worden. Er is contact opgenomen met het bedrijf ABSSAC, gespecialiseerd in ‘machined’ drukveers. Na een online meeting is hieruit voortgekomen, dat voor onze toepassing qua krachten en inbouwruimte ‘machined’ drukveers geen oplossing zijn voor zowel het concept van het centraal deel als End link met machined drukveer. Nadien is er ook via eindige elementen analyse gekeken of deze conclusie klopte. De interne spanningen overschrijden telkens de vloeispanning van het materiaal voor de opgegeven verplaatsingen bij verschillende mogelijke ontwerpen.

Een andere mogelijke oplossing voor de onderzoeksvraag is het concept van de Bladed Sway bar. Dit concept is gebaseerd op reeds bestaande ontwerpen. Het innovatief gedeelte zit in het mechanisme om de arm passief te laten verdraaien naarmate de rolhoek stijgt van het voertuig. Ook voor dit concept is er een model opgesteld in Excel. Het effect van het oppervlaktetraagheidsmoment is onderzocht op het totale stijfheid van het systeem. Dit levert zeer belovende resultaten op, de curve heeft het gewenste progressief verloop. Omwille van de complexiteit van het mechanisme wat nodig zou zijn om de arm passief te laten verdraaien naarmate de rolhoek stijgt, wordt dit concept niet gekozen als het finaal concept.

Het concept waarbij er een component in het centrale deel wordt toegevoegd is ook niet gekozen als finaal concept. Uit het model van Excel wordt een hoekig verloop bekomen, dit is niet het gewenste resultaat. Daarbovenop heeft onze contactpersoon van het bedrijf ABSSAC aangegeven dat dit component niet te realiseren is qua inbouwgrootte en krachten. Alsook werd er verondersteld dat het centrale ‘machined’ drukveer volledig kan verdraaien totdat windingen elkaar raken, wat niet in praktijk haalbaar is.

Totslot het gekozen finaal concept, de end link waarin schotelveren geïmplementeerd worden. De eerste resultaten uit het opgesteld Excelmodel geven aan dat met dit concept een progressief verloop van het gehele stabilisatorstangstelsel kan behaald worden. Door de schotelveren op een bepaalde manier te stapelen kan een progressieve schotelveer karakteristiek bekomen worden. De stapeling bestaat uit 2 stacks waarvan de eerste bestaat uit een seriestapeling van telkens 1 schotelveer in parallel, en een 2^{de} stack bestaat uit een seriestapeling van telkens 2 schotelveren die parallel staan. Er kan ook gewerkt worden met een 3^{de} stack, maar uit het Excelmodel blijkt dat deze weinig tot geen effect heeft op het totaal verloop. Dit concept zal verder worden uitgewerkt in de volgende hoofdstukken 6 en 7. Zo zal er bekeken worden welke soort progressieve stapeling het beste resultaat vertoont en welke uitwijkingsbegrenzer het beste functioneert voor deze toepassing.

5 Gedetailleerd ontwerp van het concept “End link – schotelveren”

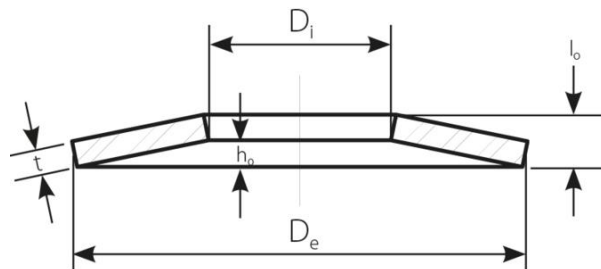
5.1 Ontwerptool voor schotelveren in een End link

“Ontwerptool voor schotelveren in een End link” breidt “concept: End link – schotelveren”(zie 5.5) uit, om zo een beter beeld te krijgen van welke formules achter het Excel gedeelte zitten.

5.1.1 Uitleg

In dit deel worden 5 verschillende tabellen uitgelegd. Schotelveren 75%, hier worden de schotelveren 75% van hun maximale indrukking ingedrukt. Schotelveren 100%, hier worden de schotelveren 100% van hun maximale indrukking ingedrukt. Schotelveren met interne uitwijkingsbegrenzers, deze uitwijkingsbegrenzers begrenzen de indrukking van de schotelveren. Tenslotte geeft schotelveren test de resultaten weer voor de testopstelling.

Figuur 83 toont een schematische voorstelling van een schotelveer en de bijhorende bematingen [43].



Designations of a disc spring

D_e = Outer diameter

D_i = Inner diameter

t = Thickness

h_0 = Cone height of an unloaded disc spring

l_0 = Height of an unloaded disc spring

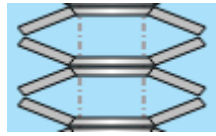
Figuur 83: Schematische voorstelling schotelveren 2 [43]

Schotelveren - 75%

Het eerste gedeelte van het besproken Excel bestand heeft als titel: Schotelveren-75%. Tabel 9 is al eerder vertoond. Ter verduidelijking wordt een deel hiervan herhaald. Alle afmetingen hebben als eenheid millimeter en de stijfheden hebben als eenheid newton/millimeter.

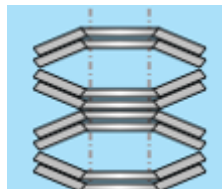
$S_{0.75}$ is de indrukking van de schotelveren bij de kracht $F_{0.75}$ (terug te vinden in tabellen). Maat $S_{0.75}$ kan bekomen worden door de inwendige hoogte (h_0) van de schotelveer te vermenigvuldigen met 0,75. L_0 (de totale hoogte v.d. schotelveer) is de som van h_0 (de inwendige hoogte v.d. schotelveer) en t (de dikte v.d. schotelveer). K is de stijfheid van één schotelveer. K_{tot3} is de stijfheid van alle stacks gecombineerd, via volgende formule kunnen stijfheden van de verschillende stacks met elkaar opgeteld worden: $K_{tot} = \left(\frac{1}{k_{stack1}} + \frac{1}{k_{stack2}} + \frac{1}{k_{stack3}} \right)^{-1}$. K_{tot2} is de stijfheid van de stack 2 en 3 gecombineerd. Voor stack 3 is dit enkel de stijfheid van zichzelf. #stack is hoeveel keer stack (1, 2 of 3) in serie wordt gestapeld. De waarde nul kan niet ingevuld worden in #stack, hierdoor moet er in de plaats een zeer klein getal (zo kort mogelijk bij nul) gekozen worden.

Stack 1 is een seriestapeling van 1 parallel gestapelde schotelveer. Figuur 84 toont dit soort stapeling. Hierdoor worden schotelveren die binnen één stack behoren in serie opgeteld. Dit betekent dat de stijfheid van die stack gelijk is aan: $k_{1\ stack} = \left(\frac{\#stack}{k_{stack\ 1}}\right)^{-1}$.



Figuur 84: Voorstelling seriestapeling van 4 schotelveren

De stijfheden van de stacks onderling worden ook in serie opgeteld, om zo de totale stijfheid te bekomen. Stack 2 bestaat uit een seriestapeling van 2 parallel gestapelde schotelveren. Bij stack 2 verdubbelt de stijfheid ten opzichte van stack1, de stijfheden staan hier in parallel met elkaar. Dit komt omdat de 2 schotelveren op dezelfde manier gestapeld worden (in parallel), waardoor hun verplaatsing gelijk is en de kracht verdeeld wordt over de twee schotelveren. Figuur 85 toont dit. Bij stack 3 geldt hetzelfde principe.



Figuur 85: Seriestapeling van 4, 2 spaarallel gestapelde schotelveren

De inbouw lengte wordt bekomen door de hoogtes van de gecombineerde schotelveren met elkaar op te tellen. De formule voor het bepalen van de inbouw lengte is dan $(h_0+n*t)*\#stack$, waarbij n=het stacknummer. N=1 voor stack1, n=2 voor stack2 en n=3 voor stack3. #stack geeft aan hoeveel keer een bepaalde stack voorkomt. Op figuur 85 is stack2 te zien, hierin is duidelijk te zien dat 2 de hoogte van 2 parallel gestapelde schotelveren gelijk is aan $h_0 + 2$ keer de dikte van de schotelveer. De totale inbouwruimte is de som van de individuele inbouwruimtes.

Om de hoogte van de externe uitwijkingsbegrenzers te bepalen wordt er gekeken naar hoever de stack ingedrukt is bij een kracht van F0.75. Uitwijkingsbegrenzers zorgen ervoor dat schotelveren niet verder worden ingedrukt boven een ingestelde waarde (zie 6.2.3). Dit komt neer op: hoogte externe uitwijkingsbegrenzer= $\#stack*h_0*0.25+n*\#stack*t$, waarin n het stacknummer is (1,2 of 3).

Tabel 20: Schotelverentabel - 75%

Stack	F 0.75	h0	t	s 0.75	l0	k	k tot 3	#stack	Inbouw lengte	hoogte externe ring
Stack 1	797	0.3	0.8	0.225	1.1	3542.2	272.48	10	11	8.75
	F 0.75	h0	t	s 0.75	l0	k	ktot 2	#stack	Inbouw lengte	hoogte externe ring
Stack 2	1594	0.3	0.8	0.2	1.1	7084	1180.74	6	11.4	10.05
	F 0.75	h0	t	s 0.75	l0	k	ktot 1	#stack	Inbouw lengte	
Stack 3	2391	0.3	0.8	0.2	1.1	10626.7	1062666666.7	0.000001	0.0000027	
									22.40	totale inbouw lengte

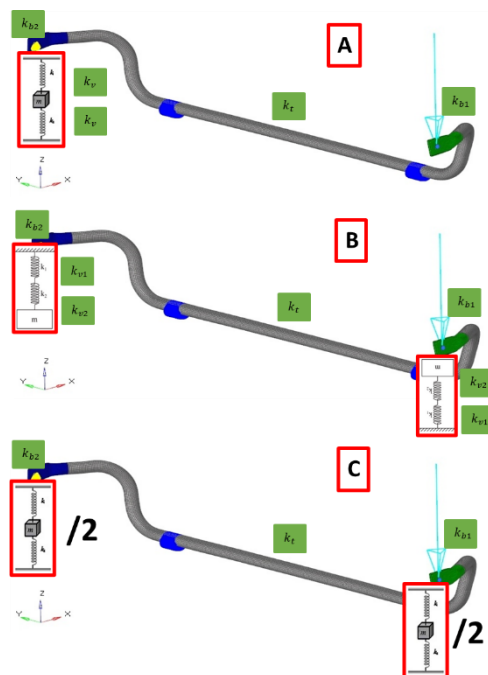
De uitleg van tabel 10 is analoog in dit gedeelte.

De stijfheden wordt hier soortgelijks berekend als in “schotelveren 75%”. De kolom kracht blijft onveranderd en gaat tot een maximale kracht van 1750 N met een interval van 50 N. Naarmate dat de kracht vordert, verandert de stijfheid. Dit komt omdat F0.75 bereikt wordt van een bepaalde schotelveer wanneer deze 75% is ingedrukt. Een stopsysteem zorgt ervoor dat deze schotelveer niet verder kan uitwijken dan 75% van zijn maximale uitwijking, door dit stopsysteem wordt de stijfheid van de ingedrukte stack theoretisch oneindig. De rij stijfheid verandert automatisch van waarde wanneer de krachtdrempel van een stack overschreden wordt. Dit wordt bekomen door te veronderstellen dat: als de kracht > F0.75 stack2 dan ktot 1 anders als kracht > F0.75 stack 1 dan k tot 2 anders k tot 3. De kolom indrukking geeft de indrukking weer van de zuil schotelveren, en wordt berekend door kracht te delen door de stijfheid. Tabel 21 geeft dit weer.

Tabel 21: Resultatentabel- schotelveren 75%

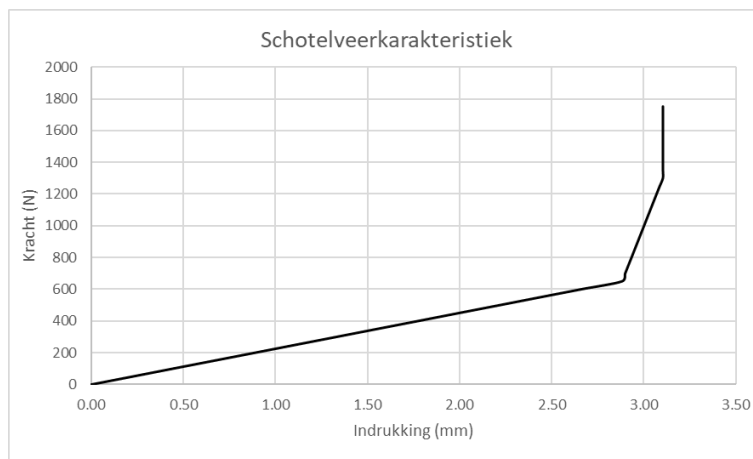
Kracht	Indrukking	Stijfheid	Kracht	K conv	k sys	Verpl. Conv	Verpl. Sys
0	0.00	272.5	0	116	94.64	0.0	0.0
50	0.18	272.5	50	116	94.64	0.4	0.5

De kolom stijfheid wordt vervolgens gecombineerd met de stijfheid K concept om de stijfheid Ksys te creëren. De combinatie hiervan kan volgens 3 verschillende situaties (zie figuur 86) gebeuren. Situatie A, hier worden alle schotelveren in één end link geïntegreerd en in deze end link zitten aan beide kanten schotelveren. Situatie B, de helft van het totaal aantal schotelveren zitten in 1 end link (2 end linken in het totaal) en de schotelveren worden maar aan één kant van de end link geplaatst. Situatie C, de helft van alle schotelveren zitten in 1 end link (2 end linken in het totaal) en de schotelveren zijn verdeeld over beide kanten van de end link. Enkel voor situatie A wordt de formule voor ksys: $(\frac{1}{k_{concept}} + \frac{1}{k_{schotelverenzuil}})^{-1}$, voor situatie B en C wordt de formule als volgt: $(\frac{1}{k_{concept}} + \frac{2}{k_{schotelverenzuil}})^{-1}$. Een andere optie om van situatie A naar B of C te gaan is door het aantal schotelveren te delen door 2. In het finaal prototype wordt optie B gebruikt omdat deze minder problemen geeft quasi inbouwruimte en er geen rekening gehouden moet worden met dat schotelveren los komen te zitten bij.

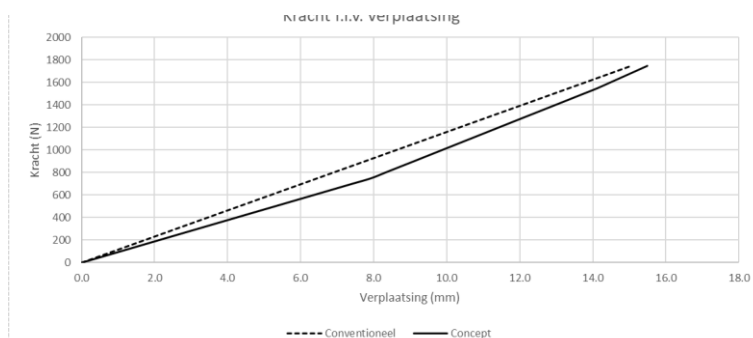


Figuur 86: Mogelijke situaties voor het implementeren van de ontworpen end link

Uit de stijfheid en de kracht volgt de verplaatsing (verplaatsing=kracht/stijfheid). De kracht t.o.v. de verplaatsing wordt dan weergegeven in grafieken. Er worden 2 grafieken geplott, de kracht i.f.v. de verplaatsing (figuur 88) van het volledig systeem en de veren karakteristiek (figuur 87).



Figuur 88: Schotelveer karakteristiek- schotelveren 75%



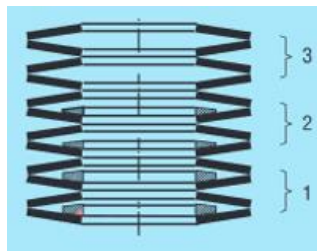
Figuur 87: Kracht i.f.v. verplaatsing - concept schotelveren 75%

Schotelveren - 100%

Het deel schotelveren-100% is analoog aan schotelveren 75%, buiten dat de schotelveren hier 100% van hun maximale uitwijking benutten. Dit wordt bekomen door F0.75 te delen door 0.75 en S0.75 te vervangen door h0. Deze resultaten zijn nodig om een vergelijking te kunnen maken met het programma Disc Spring Solver, dit programma bevat geen stopmechanisme waardoor de schotelveren 100% worden ingedrukt.

Schotelveren - seriestapeling met interne uitwijkingsbegrenzers

In dit deel van het Excel bestand wordt een schotelveren stapeling uitgelegd waarbij alle schotelveren in serie gestapeld zijn en er geen parallel op elkaar gestapeld zijn. Het progressief gedrag wordt hier bekomen door de indrukking van de schotelveren te regelen met stoppers. Figuur 89 geeft dit soort opstelling weer.



Figuur 89: Progressieve stapeling doormiddel van interne uitwijkingsbegrenzers [43]

Enkel de veranderde kolommen ten opzichte van schotelveren – 75% zullen hier besproken worden. De benaming van de eerste kolom is veranderd, de naam heeft als betekenis een serie stapeling van schotelveren met één bepaalde soort interne uitwijkingsbegrenzer. Figuur 89 (hierboven) verduidelijkt de benaming. F75% blijft in ieder deel schotelveren hetzelfde mits er nooit schotelveren parallel op elkaar gestapeld worden. Er is een kolom t plaatje toegevoegd, deze waarde geeft de dikte van het plaatje aan dat tussen twee in serie gestapelde schotelveren zit. Deze waarde kan voor iedere n (1,2 of 3) serie veranderen. De kolom S begrensd geeft aan hoeveel de schotelveer ingedrukt kan worden. Dit wordt berekend door h0 te verminderen met t plaatje/2. De kolom F ingedrukt is de kracht waarbij de stapeling n (1,2 of 3) maximaal ingedrukt is. Deze wordt berekend door s begrensd te vermenigvuldigen met k (de stijfheid van één schotelveer). De inbouwruimte blijft in dit concept gelijk aan $l_0 \cdot \#stack$. De totale inbouw lengte is de som van iedere inbouw lengte apart. Tabel 22 geeft bovenstaande kolommen weer. De grafieken worden op dezelfde manier geplott als in voorgaande voorbeelden.

Tabel 22: Schotelverentabel - interne uitwijkingsbegrenzers

1 Serie	F 75%	h0	t	s 75%	t plaatje	s begrensd	F ingedrukt	l0	k	k tot 3	#stack	Inbouw lengte
	1254	0.4	1.00	0.300	0.3	0.25	1045	1.40	4180.0	522.5	4	5.6
2 Serie	F 75%	h0	t	s 75%	t plaatje	s begrensd	F ingedrukt			ktot 2	#stack	Inbouw lengte
	1254	0.5	1.25	0.375	0.2	0.40	1672	1.75	4180.0	1045.0	4	7.0
3 Serie	F 75%	h0	t	s 75%	t plaatje	s begrensd	F ingedrukt	l0	k	k tot 1	#stack	Inbouw lengte
	1254	0.5	1.25	0.375	0	0.50	2090	1.75	4180.0	#####	0.00001	0.00002
totale inbouw lengte												12.6

Schotelveren – testconcept

In dit deel van het Excel bestand wordt een schotelveren stapeling uitgelegd waarbij er een combinatie is gemaakt tussen schotelveren – 75% en schotelveren seriestapeleling met interne uitwijkingsbegrenzers. Deze wordt gebruikt als testopstelling. Het progressief gedrag wordt hier bekomen door het soort stapeling van de schotelveren. Figuur 90 geeft een schematische voorstelling van dit soort opstelling weer. Hierin zijn de blauwe componenten de schotelveren, de rode de begrenzers en de gele het plaatje waarop de begrenzer aan vastgemaakt wordt. In de praktijk zal dit uit één stuk gefreesd worden.



Figuur 90: Opstelling schotelveren in het testconcept

Hier wordt opnieuw enkel de veranderde kolommen t.o.v. schotelveren-75% besproken. Er dient een kolom bij gevoegd te worden (t plaatje) waarin de dikte van het plaatje vermeld staat. T begrenzer geeft de dikte aan van het stopmechanisme aan één kant (het rode afgebeeld op de figuur 90 hierboven). De dikte van t begrenzer moet altijd hoger zijn dan $h_0 \cdot 0,25$ anders zou de schotelveer meer dan 75% over zijn hoogte ingedrukt zijn. S begrensd is hoeveel de schotelveer kan bewegen. Dit is het verschil tussen h_0 en t begrenzer. De rest van deze tabel en de grafieken die bekomen worden zijn eerder al besproken. Tabel 23 geeft een voorbeeld hiervan weer. De inbouw lengte wordt hier in het rood aangeduid mits de inbouwruimte afhankelijk is van de soort stapeling.

Tabel 23: Schotelverentabel- testconcept

Stack 1	F 75%	h0	t	s 75%	t plaatje	t begrenzer	s begrensd	F ingedrukt	l0	k	k tot 3	#stack	Inbouw lengte	
	797	0.3	0.80	0.225	2	0.1	0.2	708	1.10	3542.2	590.4	4	8.4	
Stack 2	F 75%	h0	t	s 75%	t plaatje	t begrenzer	s begrensd	F ingedrukt			ktot 2	#stack	Inbouw lengte	
	1594	0.5	1.25	0.375	2	0.2	0.3	2125	1.75	7084.4	1771.1	4	16	
Stack 3	F 75%	h0	t	s 75%	t plaatje	t begrenzer	s begrensd	F ingedrukt	l0	k	k tot 1	#stack	Inbouw lengte	
	2391	0.5	1.25	0.375	2	0.0	0.5	5313	1.75	10626.7	10626666666.7	0.000001	0.00000425	
													totale inbouw lengte	24.40

5.1.2 Gebruiksaanwijzing

In deze paragraaf zal het gebruik van het Excel bestand bondig uitgelegd worden.

Als eerste dient er een selectie gemaakt te worden van welke schotelveer in het concept wordt gebruikt. Een keuze van selecties wordt gegeven in tabel 24. Een rij van het niet gemarkeerde gedeelte (witte gedeelte) moet gekopieerd worden.

Tabel 24: Gegevenstabel schotelveren 2

	D	F0.75	h0	t
Klassa A	12.5	660	0.3	0.7
	14	797	0.3	0.8
	16	1013	0.35	0.9
	18	1254	0.4	1
	20	1521	0.45	1.1
	22.5	1929	0.5	1.25
Klasse B	16	410	0.45	0.6
	18	566	0.5	0.7
	20	748	0.55	0.8
	22.5	707	0.65	0.8
	25	862	0.7	0.9
	28	1107	0.8	1
Klasse C	16	154	0.5	0.4
	20	254	0.65	0.5
	22.5	426	0.8	0.6
	25	600	0.9	0.7

De geselecteerde rij dient dan geplakt te worden in tabel 25, zoals omkaderd in deze tabel.

Tabel 25: Schotelverentabel gebruiksaanwijziging

Stack 1	F 0.75	h0	t	s 0.75	l0	k	k tot 3	#stack	Inbouwlengte
	797	0.3	0.8	0.225	1.1	3542.2	272.48	10	11
Stack 2	F 0.75	h0	t	s 0.75	l0	k	ktot 2	#stack	Inbouwlengte
	1594	0.3	0.8	0.2	1.1	7084	1180.74	6	11.4
Stack 3	F 0.75	h0	t	s 0.75	l0	k	k tot 1	#stack	Inbouwlengte
	2391	0.3	0.8	0.2	1.1	10626.7	10626666666.7	0.000001	0.0000027

Dan dient de kolom #stack ingevuld te worden (gemarkeerd in het zwart op tabel 25). Wanneer er één van de drie stapelingen niet gewenst is vul je hier een waarde in die kort bij 0 aanleunt, in dit geval 0,000001.

Na deze stappen dient tabel 26 nog ingevuld te worden. K conv is de stijfheid van de conventionele stabilisatorstang en dient dus niet aangepast te worden. Kt en Kb komen ook van de conventionele en dienen in dit concept ook niet aangepast te worden. Enkel K concept moet aangepast worden. Dit is de stijfheid die de nieuw ontworpen stabilisatorstang krijgt (de stijfheid van de end linken zitten hier niet in).

Tabel 26: Tabel voor het invullen van K concept

Kt	Kb	K conv	K concept
143	1240	116	145

Na het doorlopen van bovenstaande stappen kunnen de grafieken correct afgelezen worden.

5.2 Ontwerp testopstelling

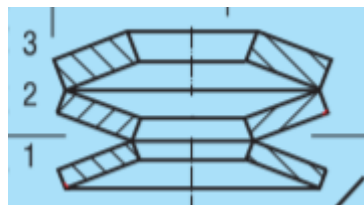
In de volgende paragrafen worden de ontwerp mogelijkheden van de testopstelling besproken. Allereerst wordt er een keuze gemaakt op welke manier de schotelveren gestapeld worden om een progressief verloop van de schotelveer karakteristiek te bekomen (6.2.1). Daarna volgt paragraaf (6.2.2) waarbij een selectie van schotelveertypes wordt gemaakt. Uit de theorie volgt dat een schotelveer tot 75% van zijn maximale veerweg mag ingedrukt worden, dit wordt beschreven in 6.2.3. Totslot volgt nog een bespreking van het CAD-model van de testopstelling.

5.2.1 Progressieve stapeling van schotelveren

Al de gebruikte figuren in dit deel komen uit bron [43].

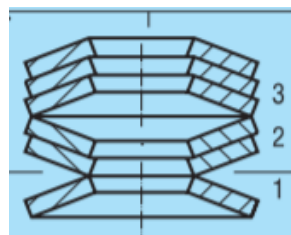
Er zijn verschillende manieren om een progressief gedrag te bekomen met schotelveren. In deze paragraaf worden enkele voorbeelden hiervan gegeven.

Een eerste manier is om verschillende (soorten) schotelveren te combineren. Wanneer er geen plaatje tussen twee gestapelde schotelveren zit, dan moeten de diameters van de schotelveren hetzelfde zijn. De enige manier om nog een progressief gedrag te bekomen is dan om van klasse te veranderen. Een klasse verandering betekent dat de diameter van de schotelveer hetzelfde blijft, maar de dikte hiervan verandert waardoor de stijfheid verandert. Wanneer er een plaatje wordt geplaatst tussen 2 schotelveren kunnen er verschillende diameters van schotelveren op elkaar gestapeld worden. Hiermee moet er wel opgepast worden met de krachtoverbrenging. Het plaatje kan namelijk ook doorbuigen. Door schotelveren met verschillende stijfheden te combineren wordt er een progressief gedrag bekomen. Een voorbeeld hiervan wordt gegeven in figuur 91.



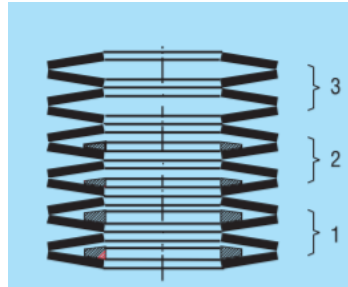
Figuur 91: Progressieve stapeling door verschillende schotelveren te stapelen [43, p. 37]

Een andere manier is om in een seriestapeling van schotelveren enkele schotelveren parallel met elkaar te stapelen waardoor de stijfheid van de parallel geschakelde schotelveren de som is van de individuele stijfheden van de schotelveren. Hierdoor hebben bepaalde delen van de serieschakeling verschillende stijfheden en wordt er een progressief gedrag bekomen. Figuur 92 geeft dit soort opstelling weer.



Figuur 92: Progressieve stapeling door de een specifieke stapeling van dezelfde schotelveren [43, p. 40]

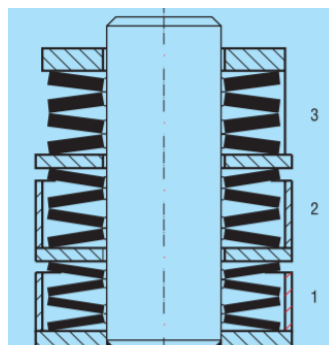
Nog een voorbeeld hiervan is om interne uitwijkingsbegrenzer toe te voegen met veranderende dikte. De interne uitwijkingsbegrenzers situeren zich aan de binnenkant van de stapel schotelveren. Een interne uitwijkingsbegrenzer zorgt ervoor dat wanneer de schotelveer de interne uitwijkingsbegrenzer raakt, de schotelveer niet meer verder kan ingedrukt worden. De stijfheid van deze maximaal ingedrukte schotelveer is theoretisch oneindig waardoor de stijfheid van de volledige stapel schotelveren verhoogt in stijfheid. Door verschillende hoogtes van interne



Figuur 93: Progressieve gedrag door het gebruiken van interne uitwijkingsbegrenzers [43, p. 40]

uitwijkingsbegrenzers te gebruiken bereiken de schotelveren hun maximale uitwijking op verschillende momenten. Hierdoor wordt opnieuw een progressief gedrag bekomen, figuur 93 geeft dit weer.

Dan is er ook nog een variant op de interne uitwijkingsbegrenzer en dat zijn de externe uitwijkingsbegrenzer. Het principe van de interne uitwijkingsbegrenzer geldt opnieuw hier, het verschil is dat het mechanisme niet één schotelveer stopt maar een reeks van schotelveren. Een voorbeeld hiervan is terug te vinden in figuur 94.



Figuur 94: Progressieve gedrag door het gebruiken van externe uitwijkingsbegrenzers [43, p. 40]

Ten laatste is er nog een manier waarbij er plaatjes worden gebruikt. Tussen twee schotelveren wordt een plaatje toegevoegd. Dit plaatje is origineel plat, maar zal vervormen wanneer er een kracht op uitgeoefend wordt. Wanneer dit plaatje zo vervormd zodat dit evenwijdig ligt met een schotelveer, dan mag je de stijfheid van de schotelveer en het plaatje in parallel optellen. Voordat het plaatje parallel komt te staan met de schotelveren wordt de stijfheid van het plaatje in serie opgeteld met de rest. Wanneer men kijkt naar figuur 95 dan ziet men dat er drie componenten



Figuur 95: Progressief gedrag door het gebruiken van platte plaatjes [43, p. 40]

parallel zullen komen te liggen wanneer het plaatje doorbuigt: het plaatje en de 2 schotelveren die het plaatje omringen.

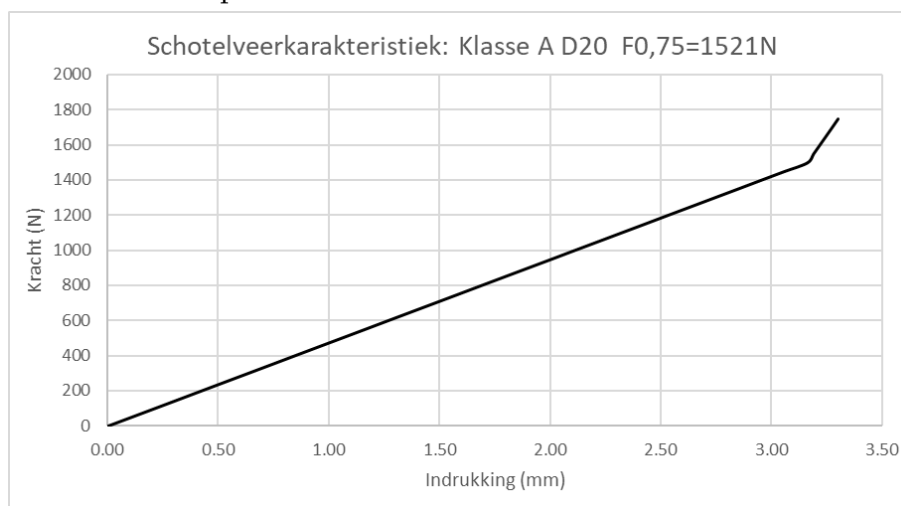
5.2.2 Dimensioneren schotelveren

Voor het dimensioneren van de schotelveren is er gebruik gemaakt van een bijkomend softwarepakket nl. “Disc Spring Solver” [44]. Deze gebruiksvriendelijke software tool maakt het mogelijk om verschillende stapelingen (serie en parallel of combinatie) van schotelveren te simuleren.

Allereerst wordt er gekeken naar de beperking in inbouwruimte. De schotelveren moeten in een koker geplaatst worden. Deze koker mag maximaal 40mm als buitendiameter bedragen, dit is de maximale afmeting van de conventionele end link (fig. 40). Hierdoor worden de schotelveren gekozen tot een maximale diameter van 35,5mm volgens de DIN2093.

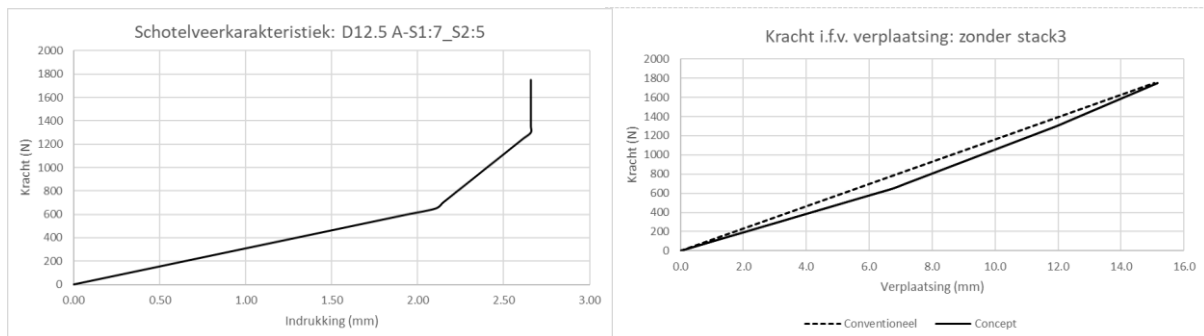
De tweede stap is het opstellen van een stapeling van de schotelveren waarbij het eindpunt van kracht in functie van verplaatsing curve van het concept samenvalt met de curve van de conventionele stabilisatorstang. Hierbij wordt er gebruik gemaakt van het zelf opgesteld model op Excel. Zoals eerder besproken in paragraaf 6.1.1 worden alle essentiële parameters ingegeven. Het model plot twee curves: kracht in functie van de verplaatsing en de veer karakteristiek. Uit de resultaten het model van Excel vallen een groot aantal mogelijke types van schotelveren af.

De schotelveren zijn vaak te stijf. De maximale kracht die kan inwerken op de schotelveren stapeling bedraagt 1705N. Bij elk type schotelveer wordt $F_{0,75}$ aangegeven, dit is de kracht waarbij de schotelveer 75% van zijn indrukking heeft bereikt. Om een progressieve stapeling van schotelveren te bekomen zal de $F_{0,75}$ lager moeten zijn dan de vooropgestelde kracht van 1705N. Dit is logisch want wanneer een schotelveer een te hoge stijfheid heeft en dus $F_{0,75}$ niet wordt bereikt, wordt de andere de stacks ook niet ingedrukt, waardoor er geen sprake is van een progressieve veer karakteristiek. De onderstaande figuur 96 geeft hier een verduidelijking van. Voor dit aan te tonen is er een stapeling (S1_7 en S2_5) gemaakt van schotelveren uit klasse A met een diameter van 20 mm. $F_{0,75}$ bedraagt 1521 N. Dit wilt dus zeggen dat op 1521 N een knippunt bekomen wordt waarna een 2^{de} stijfheid het verloop bepaald. Voor schotelveren waarbij de $F_{0,75}$ groter is dan de 1705 N is er enkel een recht verloop waar te nemen.

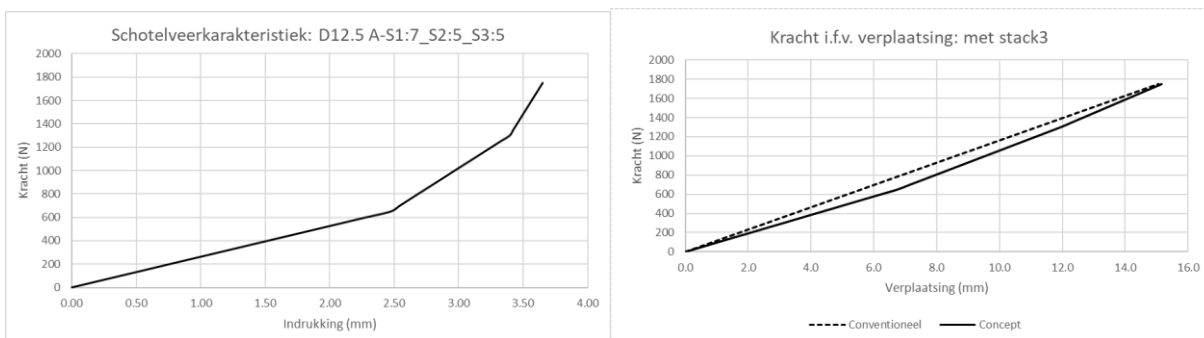


Figuur 96: Schotelveer karakteristiek: klasse A D20; $F_{0,75}=1521 N$

Tijdens verder onderzoek blijkt dat het voldoende is om te werken met 2 stacks, nl. 1 en 2. Stack 3 blijkt weinig tot geen effect te hebben op het totaal gedrag van de stabilisatorstang. De stapelingen bestaan bij dit concept enkel uit de combinatie van stack1 en 2. Figuren 98 en 99 laten het effect zien van een stapeling met en zonder stack3. Voor dit aan te tonen zijn er telkens 2 grafieken geplott. Figuur 98 bestaat uit een schotelveerstacking zonder een stack3, voor het eindpunt te laten samenvallen is $K_{concept}$ gekozen op 140 N/mm. Figuur 99 bestaat uit een stapeling met een stack3, hierbij bedraagt $K_{concept}$ 152 N/mm om het eindpunt te laten samenvallen met de conventionele curve. Uit deze grafieken is er weinig tot geen effect waar te nemen van de aanwezigheid van een stack3, zeker wanneer er gekeken wordt naar de kracht-verplaatsingscurve van het totale systeem. Daarom focussen we ons voor het verdere verloop van de thesis op een stapeling bestaande uit 2 stacks.

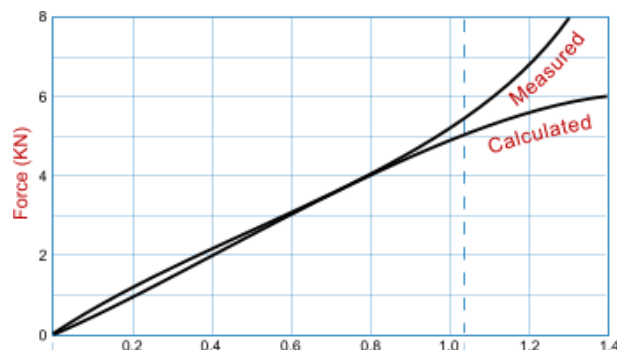


Figuur 98: Resultaten D12.5 A-S1:S2:5_ zonder stack 3



Figuur 97: Resultaten D12.5 A-S1:S2:5_ met stack 3

Kort voordat de afzonderlijke schotelveer geheel vlakgedrukt wordt, neemt de karakteristiek sterk toe, dit is te wijten aan de steunpunten van de schotelveer die verschoven zijn van de buiten- naar de binnenkant. De “hefboom” lengte wordt hierdoor korter en wordt de schotelveer stijver. Figuur 99 toont dit aan [45].



Figuur 99: Gemeten veer karakteristiek vs berekende [45]

Door dit effect mag de schotelveer voor maximaal $s = 0,75 \cdot h_0$ ingedrukt worden [40]. De karakteristiek van de schotelveer verloopt degressief. De veerconstante neemt af met toenemende indrukking. De mate van het degressief gedrag is afhankelijk van de verhouding h_0/t , die alsook de klasse indeling van de schotelveren bepaald.

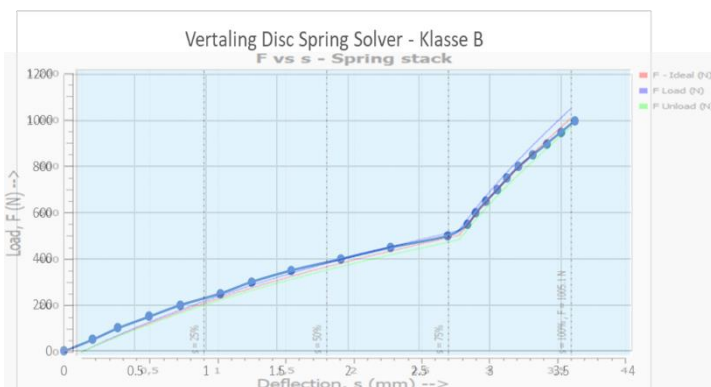
Tabel 27: Vergelijking verschillende schotelveerklasse

	Verhouding D_e / t	Verhouding h_0/t
Klasse A	≈ 18	$\approx 0,4$
Klasse B	≈ 28	$\approx 0,75$
Klasse C	≈ 40	$\approx 1,3$

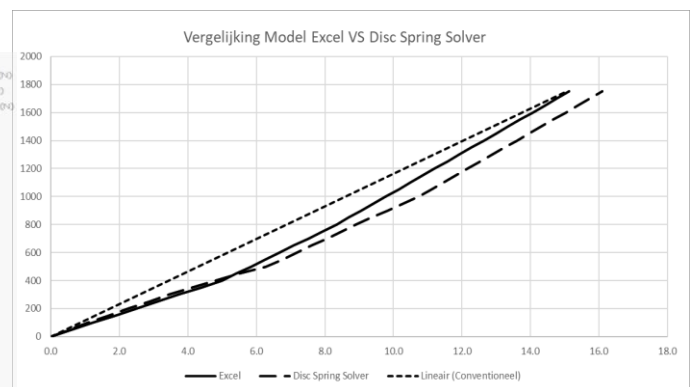
Klasse A zijn de meest stijve schotelveren, deze hebben het meest lineair verloop van hun veren karakteristiek. Daarentegen heeft klasse C, het meest degressief verloop.

Het degressief verloop van de veren karakteristiek is vereenvoudigd naar een lineair verloop in het model op Excel. Hierbij zijn we ons bewust dat hierbij een afwijking verwacht kan worden met de testresultaten in de praktijk. De software tool “Disc Spring Solver” houdt wel rekening met het degressief verloop van de schotelveren.

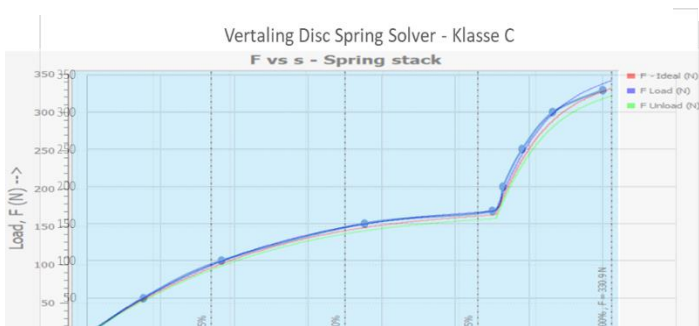
Bijkomend in het model wordt er ook gekeken naar effect van degressiviteit op de totale verloop van de stabilisatorstang. Dit wordt gedaan door de curve uit de Disc Spring Solver te vertalen naar een puntenwolk in Excel. Zowel voor klasse B en C wordt dit uitgevoerd, klasse A wordt buiten beschouwing gelaten omdat deze curves een relatief lineair verloop vertonen. De onderstaande



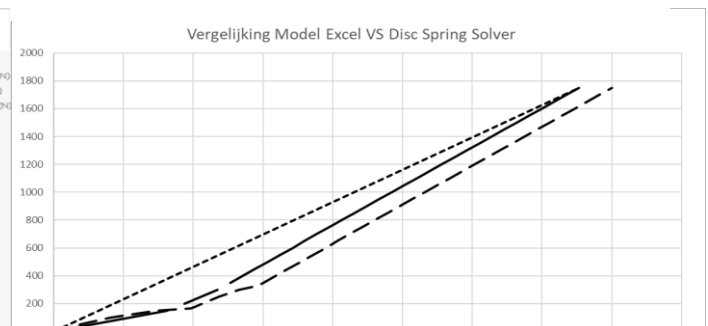
Figuur 103: Geselecteerde punten: vergelijking Disc spring solver vs het Excelmodel - D16 B- S1:5_S2:3



Figuur 102: Vergelijking schotelveerkarakteristiek Disc spring solver vs het Excelmodel - D16 B- S1:5_S2:3



Figuur 100: Geselecteerde punten: vergelijking Disc spring solver vs het Excelmodel - D16 C- S1:5_S2:2



Figuur 101: Vergelijking schotelveerkarakteristiek Disc spring solver vs het Excelmodel - D16 C- S1:5_S2:2

figuren 100-102 geven de resultaten weer. Hierin is de korte stippelijne de conventionele stabilisatorstang, de volle lijn het gemodelleerd concept via Excel en de streepjes lijn is de curve volgens disc spring solver.

Beide curves (Klasse B en C) vanuit “Disc Spring Solver” geven een afwijking ten opzichte van de curves uit het model van Excel. Dit komt doordat het opgesteld Excelmodel een vereenvoudiging is van de werkelijkheid. Wat er exact achter de software zit van de “Disc Spring Solver” is niet geweten. Wel wordt verwacht dat dit een realistischer verloop schetst. Een belangrijke opmerking is dat het opgesteld Excel model wel rekening houdt met de $F_{0.75}$ in tegenstelling tot de “Disc Spring Solver”.

Uit de resultaten blijkt dat het degressief verloop van de schotelveer uit klasse B weinig tot geen effect heeft op het totaal gedrag van de stabilisatorstang in het begin van de curve. Nadien neemt de afwijking wel toe. Het doel is om het eindpunt te laten samenvallen met de conventionele curve, dit kan in dit geval eenvoudig bereikt worden door de stijfheid van de centrale stang van het concept te verhogen, door bijvoorbeeld de diameters aan te passen.

Schotelveren van klasse C hebben wel degelijk effect op het totaal gedrag van de stabilisatorstang. Het eindpunt valt niet meer samen met de conventionele stabilisatorstang, bijkomend zijn er twee afwijkingen waar te nemen in het begin van de curve. Voor met klasse C het eindpunt toch te kunnen laten samenvallen met de curve van de conventionele stabilisatorstang is er de mogelijkheid om de stijfheid van het centrale deel van de stang te verhogen, m.a.w. een grotere diameter en wanddikte.

Hieruit kan besloten worden dat theoretisch gezien enkel klasse A en klasse B gebruikt kunnen worden voor de implementatie van schotelveren in de End link. Om dit te valideren zullen er ook een aantal stapelingen bestaande uit klasse C schotelveren opgemeten worden.

Om uiteindelijk een keuze te maken welke schotelveren gebruikt zullen worden tijdens de testfase wordt er enerzijds gekeken naar de inbouwruimte van de stapeling en anderzijds de mate van progressiviteit in het diepste punt van de curve uit het model. Alsook het aantal mogelijkheden per type schotelveren wordt in rekening genomen. Tijdens de testfase is het de bedoeling om zoveel mogelijkheden van stapelingen te valideren of deze overeenkomen met de curves die de “Disc Spring Solver” geeft als resultaat.

Per type schotelveer is er met behulp van het model een aantal mogelijkheden te testen. *Tabel 28: Keuze te testen schotelveren*

Elke mogelijke stapeling wordt ingegeven op de softwaretool “Disc Spring Solver”. De resultaten van zowel het model als uit de software worden bijgehouden in het Excel bestand. Deze zullen nadien handig zijn voor het model van het concept te valideren.

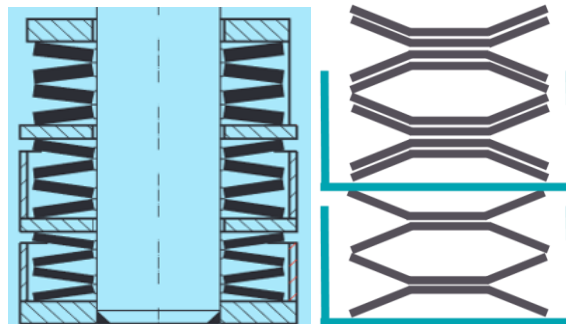
Uiteindelijk zijn de volgende type schotelveren gekozen om te gebruiken tijdens de testfase (tabel 28). Voor mogelijkheden voor het stapelen van de stacks wordt er verwezen naar het Excelmodel.

	Klasse	De (mm)	#mogelijke stapelingen
1	A	12,5	2
2	A	14	5
3	B	16	7
4	C	16	7

5.2.3 Uitwijkingsbegrenzer schotelveren

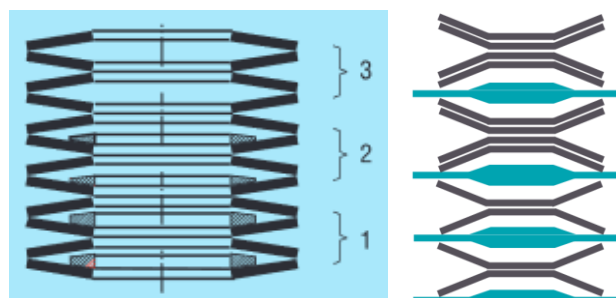
Zoals eerder besproken mogen schotelveren maximaal 75% van hun totale indrukking ingedrukt worden om overbelasting te vermijden, alsook het omklappen van de schotelveren. Hierdoor zal er gewerkt moeten worden met een uitwijkingsbegrenzer voor de schotelveren.

Zoals eerder vermeld bestaan er twee mogelijkheden om de indrukking van de schotelveren te begrenzen. Eerste optie is om extern te begrenzen. Dit kan gedaan worden door externe uitwijkingsbegrenzers te voorzien die rondom de stapeling schotelveren zit. Figuur 104 geeft ter illustratie weer wat er bedoeld wordt met externe ringen [43]. Afhankelijk van de stack heeft de externe uitwijkingsbegrenzer een bepaalde hoogte. Deze hoogte is zo gekozen dat wanneer een stack ingedrukt wordt dat deze begrensd wordt tot 75% van de totale indrukking.



Figuur 104: Schematische voorstelling externe uitwijkingsbegrenzers [43, p. 40]

De tweede optie is het intern begrenzen. Hierbij worden tussen de schotelveren tussenplaatjes voorzien. Figuur 105 geeft weer wat er hiermee bedoeld wordt. De tussenplaatjes zorgen zowel voor de noodzakelijke begrenzing van de indrukking alsook dat de spanning niet overschreden wordt van de schotelveer.



Figuur 105: Schematische voorstelling interne uitwijkingsbegrenzers [43, p. 40]

Voor het testen zal er voornamelijk gebruikt gemaakt worden van de interne uitwijkingsbegrenzers. Dit is het handigste om te gebruiken tijdens de testfase omdat er snel en eenvoudig verschillende stapelingen getest moeten worden. Om te kijken of er een verschil is tussen interne en externe- uitwijkingsbegrenzer worden er ook externeringen voorzien voor een 2 tal type stapelingen.

Voor het finaal eindproduct wordt er een voorkeur gegeven aan externeringen. Dit lijkt ons een betere oplossing omdat externe ringen robuuster zijn qua uitvoering, bijkomend kunnen deze beter afgewerkt worden kwestie toleranties dan de interne tussenplaatjes.

Figuur 105 geeft een schematische voorstelling weer van hoe de stapeling hoofdzakelijk zal gebeuren tijdens de testfase. Het rode gedeelte is een verhoging van het tussenplaatje, dit gedeelte zorgt voor de uiteindelijk uitwijking begrenzing. De hoek en de hoogte wordt berekend op basis van de gegevens van de schotelveer.

De aanduiding van de parameters zijn terug te vinden in figuur 83.

Hoogte van uitwijkingsbegrenzer wordt berekend op basis van h_0 .

$$h_{\text{begrenzer}}[\text{mm}] = h_0 * (1 - 0,75) = h_0 * 0,25 \quad \text{met } h_0, \text{ de veerweg tot aan de vlakgedrukte toestand}$$

De flenshoek (θ) van de uitwijkingsbegrenzer wordt berekend op basis van h_0 , D_e en D_i .

$$\theta[^\circ] = \tan^{-1}\left(\frac{0,25 * h_0}{\frac{(D_e - D_i)}{2}}\right) * \frac{180^\circ}{\pi}$$

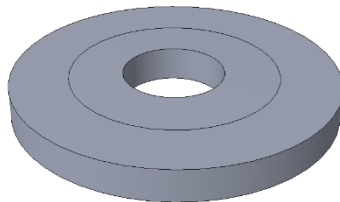
Bijvoorbeeld toegepast op schotelveer DIN2093 – A14

$$h_{\text{begrenzer}}[\text{mm}] = h_0 * 0,25 = 0,3 \text{ mm} * 0,25 = 0,075 \text{ mm}$$

$$\theta[^\circ] = \tan^{-1}\left(\frac{0,25 * h_0}{\frac{(D_e - D_i)}{2}}\right) * \frac{180^\circ}{\pi} = \tan^{-1}\left(\frac{0,25 * 0,3 \text{ mm}}{\frac{(14 \text{ mm} - 7,2 \text{ mm})}{2}}\right) * \frac{180^\circ}{\pi} = 1,26^\circ$$

Dit zijn zeer kleine waarden, maar toch kan dit op basis van gegenereerde banen op een freesbank gerealiseerd worden. (20 μ m nauwkeurig)

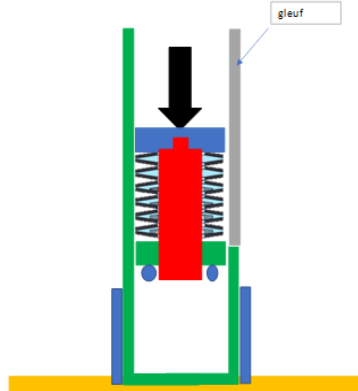
Figuur 106 geeft het CAD-model van de het tussenplaatje weer.



Figuur 106: CAD-model interne uitwijkingsbegrenzer

5.2.4 Opstellen flexibel test concept

In deze paragraaf zal de testdesign overlopen worden. Figuur 108 en 109 geven een schematische weergave van de testopstelling. Deze testopstelling zal toelaten om snel en eenvoudig van verschillende stapelingen van schotelveren hun veer karakteristiek op te meten. Deze zullen vergeleken worden met de curves uit het Excelmodel. Dit zal uitvoerig besproken worden in het volgende hoofdstuk 7 “Validatie op componentniveau”



Figuur 108: Schematische voorstelling testdesign



Figuur 107: CAD-model testdesign

De flens (gele component) is een ronde schijf die voorzien is van twee groeven, eentje waarin 2 kokers passen en eentje waardoor het aanslagvlak gecentreerd wordt. Er bevinden zich ook nog enkele gaten in deze flens waardoor het gemonteerd kan worden op de testbank. De buitenste koker (aangegeven in het blauw vanonder) zorgt ervoor dat de binnenste koker (aangegeven in het groen) op zijn plaats blijft. Door dit systeem hoeft de binnenste koker niet aan de flens gelast worden, wat voordeliger is voor het testen/demonteren. In de binnenste koker worden 2 gaten geboord. Door deze gaten worden 2 paspennen gestoken. Door dit te gebruiken hoeft het plaatje dat op de pennen steunt niet gelast te worden aan de binnenkant van de koker. Een tweede voordeel hieraan is dat er verschillende soorten plaatjes op de paspennen kunnen gelegd worden. Voor het controleren van de schotelveren en het opvolgen hiervan is een gleuf in de binnenste koker aangebracht. De rode stang die door de schotelveren past is demonteerbaar met een schroefdraad zodat verschillende soorten stangen aan de geleidingscilinder (in het blauw vanboven) gemonteerd kunnen worden. De geleidingscilinder wordt gebruikt als aanslagvlak voor de actuator en als geleiding van de rode stang.

In bijlage zijn gedetailleerde 2D-tekeningen hiervan terug te vinden, hierop kunnen de bematingen teruggevonden worden. Enkele maten/materialen hiervan zijn geen functionele maten/materialen en werden afgestemd op wat er op dat moment in het werkhuis te vinden was. De geleidingscilinder wordt vervaardigd uit brons, mits dit een lagere wrijvingscoëfficiënt heeft en omdat het zelf smerend is. De rode stang wordt vervaardigd uit inox. Dit omdat deze staaf dun uitgevoerd wordt en het toch nog een behoorlijke sterkte moet hebben. De buitenste koker is uit staal vervaardigd. De rest is uit aluminium vervaardigd.

Met behulp van deze testopstelling zullen er vervolgens een selectie van stapelingen, met begrenzers getest worden, de metingen worden besproken in volgend hoofdstuk 6.

6 Validatie op componentniveau

6.1 Testopstelling

De testopstelling kan de schotelveer karakteristiek van verschillende stapelingen opmeten. Figuren 109 en 110 tonen de testopstelling die toelaat om de stijfheidskarakteristiek van verschillende stapelingen op te meten en bijgevolg de modellen uit hoofdstuk 5 te valideren. Hierbij wordt er gebruik gemaakt van een high frequency testing system VHF. Doormiddel van hydraulische olie kan het systeem kracht uitoefenen. De maximale kracht die dit systeem kan uitoefenen is 7kN. De zuigerslag heeft een bereik van 20 mm. Beide parameters zijn ruim voldoende voor de beoogde toepassing. Op de zuiger wordt een verlengstuk (in de vorm van een schroef) aangebracht zodat de actuator steeds de bronzegeleidingsbus kan aanraken.



Figuur 110: Gehele testopstelling



Figuur 109: Close up testopstelling

Bij aanvang van een meting wordt een bepaalde stapeling(smethode) uitgekozen, de keuze bestaat uit schotelveren met: interne begrenzer, externe begrenzer of zonder begrenzer. De schotelveren worden zo gestapeld zodat het effect van de uitwijkingsbegrenzer benut wordt. Dit betekent dat de interne begrenzers altijd zo gepositioneerd staan zodat het verhoogje van de interne uitwijkingsbegrenzer in de concave vorm van de schotelveer past. De testopstelling heeft een verplaatsingssensor en een krachtsensor. De verplaatsingssensor is gemonteerd aan de kop van de bewegende actuator en kan zo de verplaatsing hiervan opmeten, de verplaatsing wordt uitgedrukt in millimeter. De krachtsensor bevindt zich op de aanslag en meet de reactiekrachten op in N.

De machine kan op 2 manieren aangestuurd worden, kracht- of verplaatsingsgestuurde analyse. Er wordt gekozen voor een verplaatsingsgestuurde analyse omdat er zo een limiet voor de kracht meegegeven kan worden, in dit geval is dat 2000 N. Eerst wordt positie bepaald wanneer de kracht begint toe te nemen. Dit punt is de startpositie dat wordt opgegeven in de software. Voor elke metingen wordt er een uitwijking gekozen die groter is dan de maximale uitwijking volgens het Excelmodel, op deze manier wordt de volledige schotelveer karakteristiek bekomen. Wanneer de kracht groter wordt dan 2000 N of de maximale indrukking bereikt wordt dan stopt het systeem. De bekomen resultaten worden opgeslagen in een CSV-bestand en geëxporteerd naar Excel. In Excel worden deze curves dan geplott.

Na iedere meting beweegt de testopstelling naar omhoog en kan de koker uit de opstelling verwijderd worden, waarop hij klaargemaakt wordt voor de volgende meting.

6.2 Resultaten

Hieronder volgt een bespreking van de bekomen testresultaten. De focus van de experimenten ligt op het nagaan van verschillende effecten zodat de opgestelde modellen gevalideerd kunnen worden.

Er moet rekening gehouden worden dat de testtijd eerder beperkt was. Hierdoor zijn er een beperkt aantal mogelijkheden van schotelveerstackelingen getest. Verder bestaat de kans dat niet alle fenomenen gevonden worden voor het valideren van het model. Er zijn meerdere mogelijkheden omtrent de manier van stapelen van schotelveren om een progressieve veer karakteristiek te bekomen. De testtijd was beperkt tot één dag, en die tijd is zo efficiënt mogelijk benut door slechts één manier van stapelen vastgehouden wegens tijdsgebrek. Om de werking van 1 schotelveer stack te onderzoeken is er ook een stapeling van 2 stacks opgesplitst in 2 metingen van elks 1 stack.

Zoals eerder aangegeven in sectie 5.2.2 worden er 4 soorten schotelveren geanalyseerd. Tabel 29 geeft een overzicht. Omwille van de beperkte testtijd, is er gekozen om van de groene gemarkeerde stapelingen de veer karakteristieken op te meten. Buiten deze tabel bestaan er natuurlijk nog vele andere mogelijke stapelingen waarbij het gewenste progressief gedrag (min. 15%) bekomen kan worden.

Tabel 29: Overzicht mogelijke schotelveren

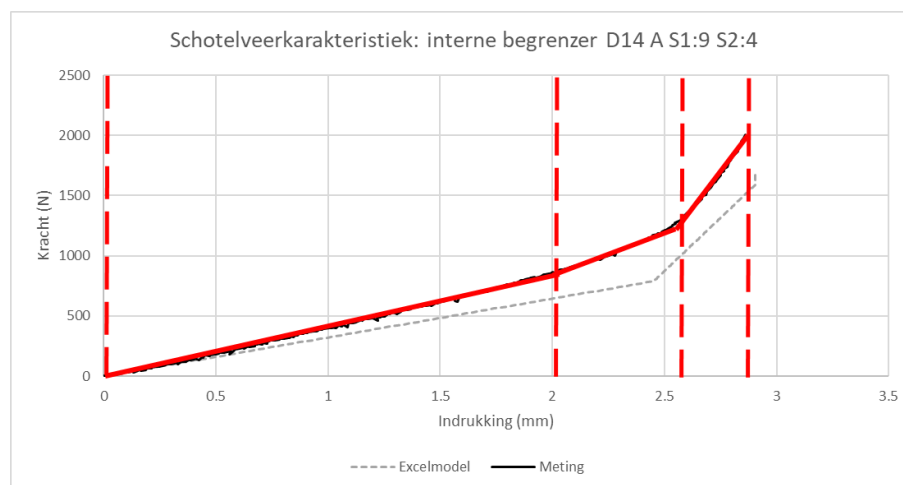
Klasse	Groep	De	Stack 1	Stack 2
A	1	12.5	8	5
A	1	12.5	5	8
A	1	14	10	6
A	1	14	8	6
A	1	14	12	2
A	1	14	9	4
A	1	14	11	2
B	1	16	4	4
B	1	16	4	2
B	1	16	4	5
B	1	16	5	3
B	1	16	5	4
B	1	16	6	2
B	1	16	6	3
B	1	18	6	3
B	1	18	4	4
B	1	18	5	3
B	1	18	6	2
B	1	18	8	0
B	1	20	5	2
B	1	20	6	2
C	1	16	3	3
C	1	16	3	2
C	1	16	4	2
C	1	16	5	2
C	1	20	3	2
C	1	20	2	3
C	1	20	3	3
C	1	20	4	2
C	1	22.5	2	3
C	1	22.5	3	2
C	1	25	2	2
C	1	25	4	0

Hierbij zal telkens de opgemeten kracht/verplaatsingscurve vergeleken worden met de theoretische schotelveer karakteristiek uit het Excelmodel.

De 2 mogelijkheden (interne en externe uitwijkingsbegrenzers) om de uitwijking van de schotelveer te begrenzen tot op 75% van zijn volledige veerweg worden met elkaar vergeleken om zo de meest geschikte uitwijkingsbegrenzer te kiezen voor het uiteindelijk concept ontwerp.

Omdat er ruis zit op de testresultaten en de stapgroottes zeer klein zijn, veranderen de stijfheden enorm. Om dit fenomeen teniet te doen wordt er gebruik gemaakt van lineaire regressies. Eerst wordt de kromme opgesplitst in delen waarbij er een recht evenredig verband is tussen kracht en indrukking. Na de opsplitsing wordt op ieder deel een lineaire regressie toegepast. Als resultaat hiervan wordt een gemiddelde stijfheid (richtingscoëfficiënt) bekomen. Deze worden vervolgens gebruikt in de berekeningen voor het bepalen van de stijfheid van het volledig systeem.

Voor deze grafieken te kunnen opstellen is er op elke meetresultaat een lineaire regressie toegepast vanuit Excel. De opgemeten veer karakteristiek is hierbij opgedeeld in verschillende segmenten. Door deze segmenten is er telkens een rechte gefit, die een benadering vormt van het werkelijke verloop. Uit de resultaten van de lineaire regressie volgt dan telkens een benadering van de stijfheid voor dat segment. Figuur 111 geeft hiervan een verduidelijking. Dit is een voorbeeld van op welke manier de meting benaderd wordt door rechten. Dit meetresultaat is benaderd door 3 rechten. Op deze rechten is er telkens een lineaire regressie toegepast om de richtingscoëfficiënt te bepalen. De



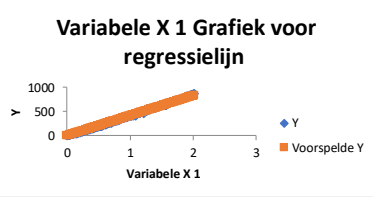
Figuur 111: Lineaire regressie toegepast op een schotelveer karakteristiek

richtingscoëfficiënt stelt dan op zijn beurt de stijfheid voor.

Figuur 112 is een screenshot uit Excel en toont de resultaten van de lineaire regressie van de bovenstaande figuur. De geel gemarkeerde cel stelt telkens de waarde van de stijfheid voor in N/mm.

SAMENVATTING UITVOER

gegevens voor de regressie	
Meervoudige r^2	0.99923
R-kwadraat	0.99846
Aangepaste kle	0.99358
Standaardfout	18.9227
Waarnemingen	206



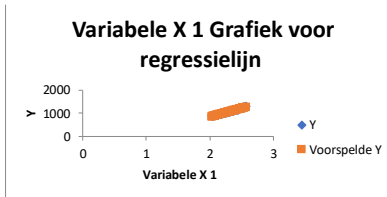
Variatie-analyse

	Vrijheidsgrad	kwadraat	F	gnificantie
Regressie	1	47631427	47631427	133023 4.2E-289
Storing	205	73404.16	358.0691	
Totaal	206	47704831		

	Coëfficiënt	andaardfou	tische	ge	P-waarde	aagste	95%oogste	95%agste	95.0oogste	95.0
Snijpunt	0	#N/B	#N/B	#N/B	#N/B	#N/B	#N/B	#N/B	#N/B	#N/B
Variabele X 1	411.257	1.127588	364.7232	2.7E-290	409.0342	413.4805	409.0342	413.4805		

SAMENVATTING UITVOER

gegevens voor de regressie	
Meervoudige r^2	0.9921
R-kwadraat	0.9843
Aangepaste kle	0.984
Standaardfout	15.149
Waarnemingen	56



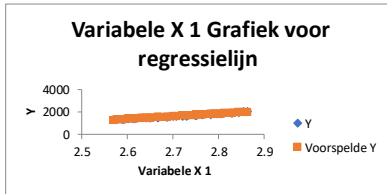
Variatie-analyse

	Vrijheidsgrad	kwadraat	F	gnificantie
Regressie	1	778400.7	778400.7	3392.014 2.01E-50
Storing	54	12391.94	229.4804	
Totaal	55	790792.7		

	Coëfficiënt	andaardfou	tische	ge	P-waarde	aagste	95%oogste	95%agste	95.0oogste	95.0
Snijpunt	-660.79	29.50259	-22.3977	5.25E-29	-719.938	-601.64	-719.938	-601.64		
Variabele X 1	745.68	12.80335	58.241	2.01E-50	720.0104	771.3487	720.0104	771.3487		

SAMENVATTING UITVOER

gegevens voor de regressie	
Meervoudige r^2	0.995472
R-kwadraat	0.990965
Aangepaste kle	0.990692
Standaardfout	20.68872
Waarnemingen	35



Variatie-analyse

	Vrijheidsgrad	kwadraat	F	gnificantie
Regressie	1	1549287	1549287	3619.633 2.59E-35
Storing	33	14124.76	428.0232	
Totaal	34	1563412		

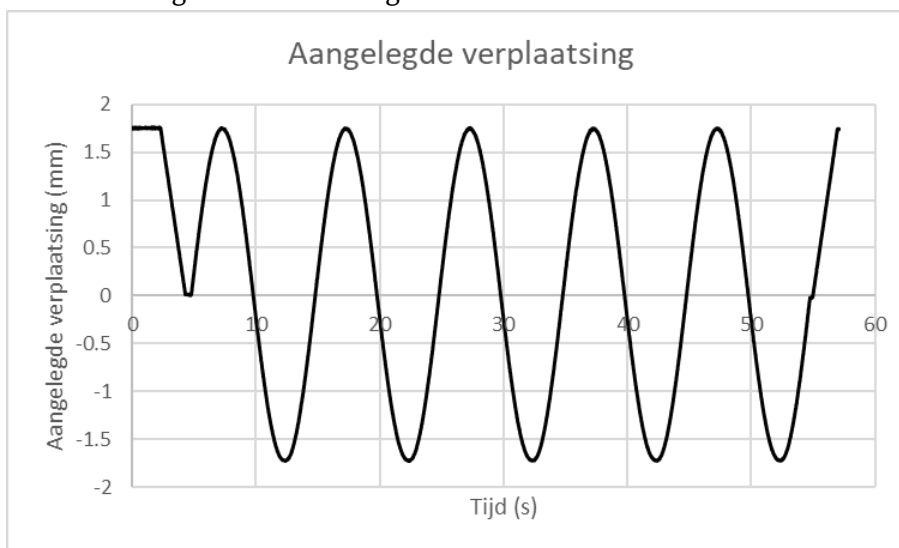
	Coëfficiënt	andaardfou	tische	ge	P-waarde	aagste	95%oogste	95%agste	95.0oogste	95.0
Snijpunt	-4866.41	107.7316	-45.1716	2.97E-31	-5085.59	-4647.23	-5085.59	-4647.23		
Variabele X 1	2384.471	39.63326	60.16339	2.59E-35	2303.837	2465.106	2303.837	2465.106		

Figuur 112: Lineaire regressie op verschillende delen van een curve

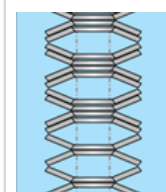
6.2.1 Schotelveer karakteristiek opgemeten voor 5 cycli

Er is éénmalig een sinusverloop van de verplaatsing doorheen de tijd aangelegd op de testopstelling. Figuur 114 geeft het verloop van de aangelegde verplaatsing weer. De meting wordt uitgevoerd op een de stapeling van schotelveren uit klasse B met een diameter van 16mm. De eerste stack bestaat uit een stapeling van 4 schotelveren. De tweede stack bestaat uit een stapeling van 5 waarbij er telkens 2 schotelveren parallel staan.

Het doel van deze test is om te analyseren of de meting van het toestel telkens hetzelfde verloop vertoont. Als er weinig afwijking is tussen de verschillende cycli, kan er besloten worden dat het voldoende is om de meting telkens éénmalig uit te voeren.



Figuur 114: Aangelegde sinusvormige verplaatsing



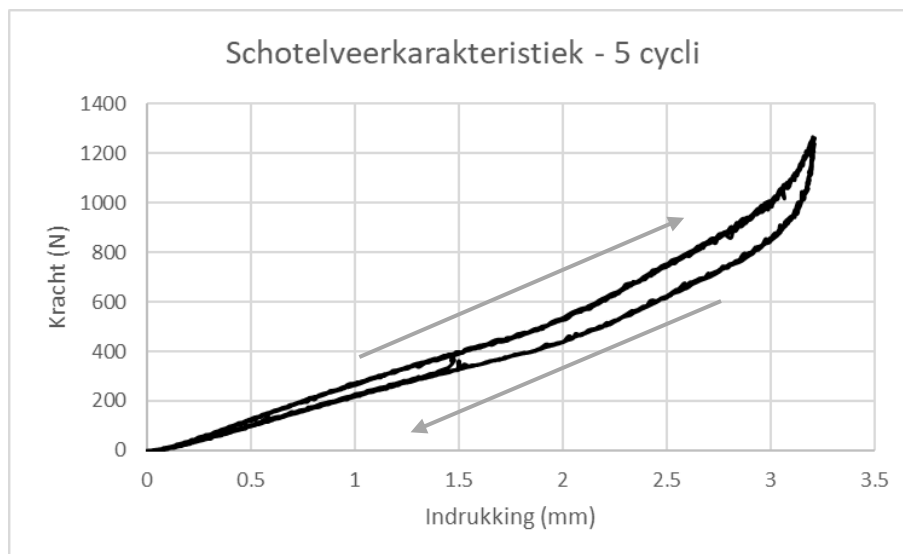
Figuur 113: Voorstelling stapeling: S1:4_S2:7

Onderstaande figuur 115 geeft de opgemeten schotelveer karakteristiek weer. Hieruit is op te maken dat de metingen bij elke cyclus overeenkomen. Enkel is er bij één cyclus op een indrukking van 1.5mm een kleine afwijking te zien t.o.v. de andere cycli. In een éénmalige meting zou zo'n afwijking duidelijk te zien zijn, waardoor dit niet rechtvaardigt om in alle gevallen een cyclusvormige meting uit te voeren.

Op de figuur is ook nog een andere fenomeen zichtbaar. Er is een *hysteresislus* waarneembaar tussen de belastingscurve en de ontlastingscurve. Dit effect is te wijten aan wrijving. De wrijving tussen enerzijds de schotelveren onderling en anderszijds de wrijving tussen de interne begrenzers en de schotelveren heeft invloed op de indrukking van de stacks. De wrijving zorgt voor een afwijking op het verloop van de schotelveer karakteristiek. Naarmate de stapeling groter wordt en er meer schotelveren parallel geplaatst zijn neemt de wrijving toe, dit zorgt dan ook voor een grotere afwijking.

De afwijking van het meetresultaat t.o.v. het Excelmodel is dan ook grotendeels te verklaren door de invloed van de wrijving, dit wordt niet meegenomen in het huidig model. Een betere benadering zal bekomen worden als de wrijving geïntegreerd wordt in het Excelmodel.

Wrijving wordt omgezet in warmte, bij hoog dynamische toepassingen kan dit voor problemen zorgen. Het is dan ook aanbevolen om de wrijving zo laag mogelijk te houden, door bijvoorbeeld een goede smering te voorzien.

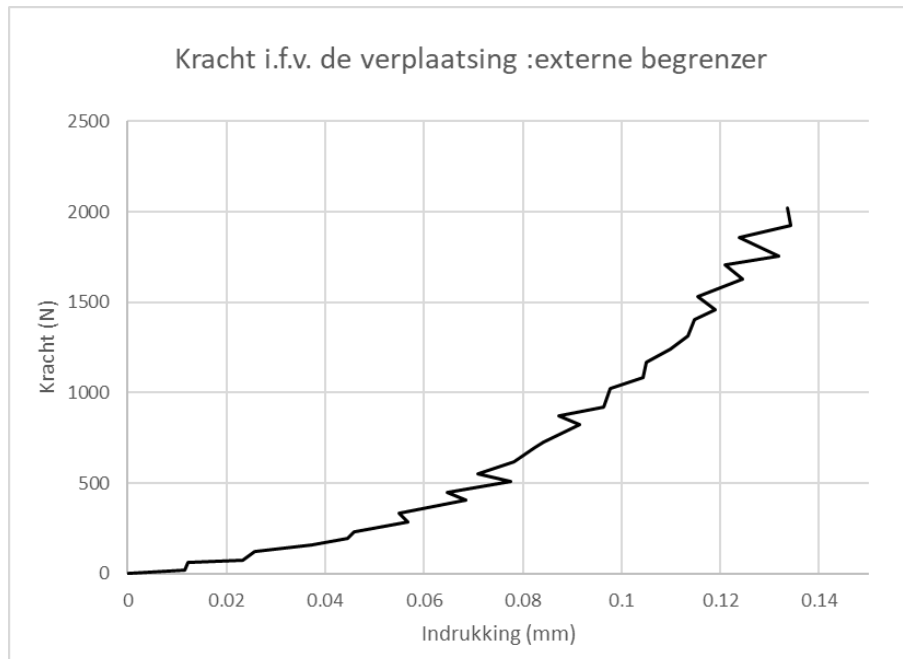


Figuur 115: Schotelveer karakteristiek 5 doorlopen cyclussen

De oppervlakte tussen de belasting en ontlastingscurve is het verlies in energie, dit kan niet meer worden terug gewonnen. Dit effect is wel nuttig voor toepassingen waarbij een demping nodig is, de grootte van de hysteresis is dan een maat voor de hoeveelheid demping [43].

6.2.2 Testresultaten: Indrukking externe begrenzer zonder schotelveren

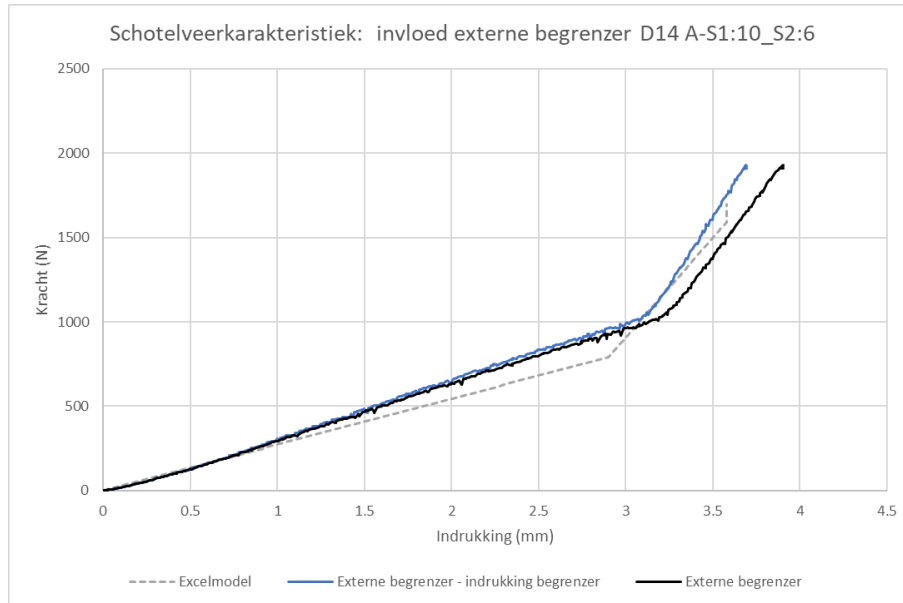
In deze paragraaf wordt de indrukking van de externe (uitwijkings)begrenzer bepaald bij een kracht tot 2000N. Op die manier kan de schotelveer karakteristiek gecorrigeerd worden bij gebruik van externe begrenzers. Figuur 116 geeft de kracht t.o.v. de indrukking weer van de externe begrenzer. De externe begrenzer van stack 1 heeft een buitendiameter van 23 mm, een dikte van 1,5 mm en een hoogte van 8,75 (+0,05 +0) mm. De externe begrenzer van stack 2 heeft een buitendiameter van 20 mm, een dikte van 1,5 mm en een hoogte van 10,05 (+0,05 +0) mm.



Figuur 116: Indrukking externe begrenzer

Figuur 116 kent een grilliger verloop omdat dit een relatief kleine indrukking is, waardoor de meetnauwkeurigheid relatief laag is. De indrukking van deze begrenzers en de rest van het systeem is bij een kracht van 2000 N ongeveer 0,13 mm. Om enkel de schotelveer karakteristiek te weten, dient bij de stack schotelveren met externe begrenzer de indrukking van de externe begrenzer ervan afgetrokken te worden. Figuur 117 geeft dit weer, waarbij de blauwe curve het gecorrigeerde verloop vertoont.

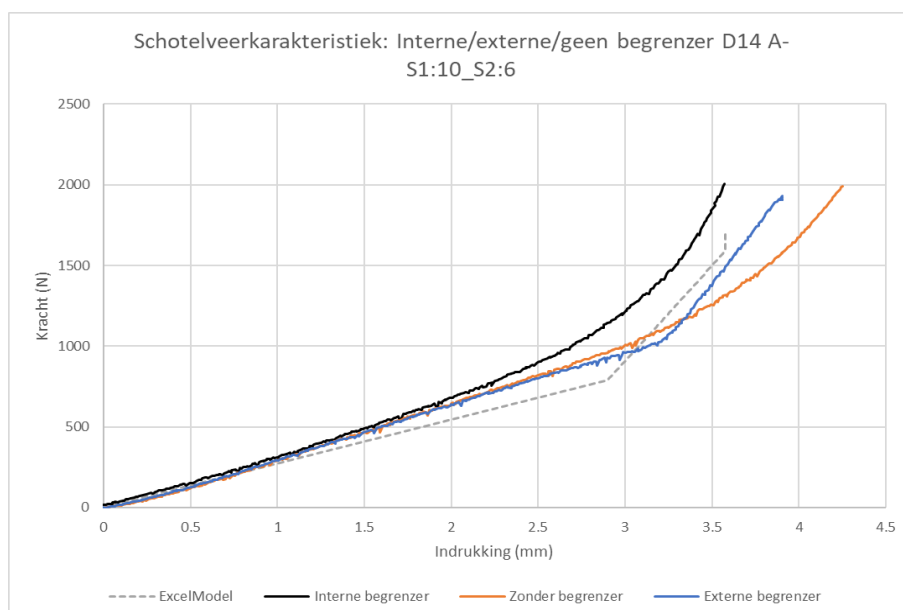
Op figuur 117 is te zien dat de waarde van de externe begrenzer – de indrukking van de begrenzer iets meer naar links ligt dan de curve van de externe begrenzer. En als het ware iets stijver is. Het lijkt ook iets beter overeen te stemmen met het Excelmodel. Er is maar 1 soort externe begrenzer getest, dit voor de stack D14 klasse A S1:10 S2:6. Deze berekeningen zijn dus niet uitgevoerd op de andere resultaten.



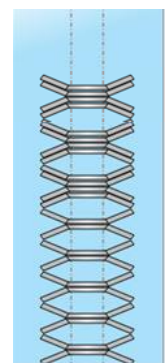
Figuur 117: Schotelveer karakteristiek met en zonder indrukking van de externe begrenzer

6.2.3 Testresultaten: interne/externe/geen begrenzer D14 A-S1:10_S2:6

In dit deel van de resultaten worden de verschillende methodes van stapelen vergeleken, zijnde de interne begrenzer, externe begrenzer en geen begrenzer. De testen in deze paragraaf zijn uitgevoerd op schotelveren die een buitendiameter hebben van 14 mm, komende van klasse A. Stack S1:10_S2:6 heeft 10 stapelingen van stack1 (1 schotelveer in parallel op elkaar), en 6 stapelingen van stack 2 (2 schotelveren in parallel op elkaar) figuur 118 toont dit. Figuur 119 geeft de resultaten van deze stapeling weer.



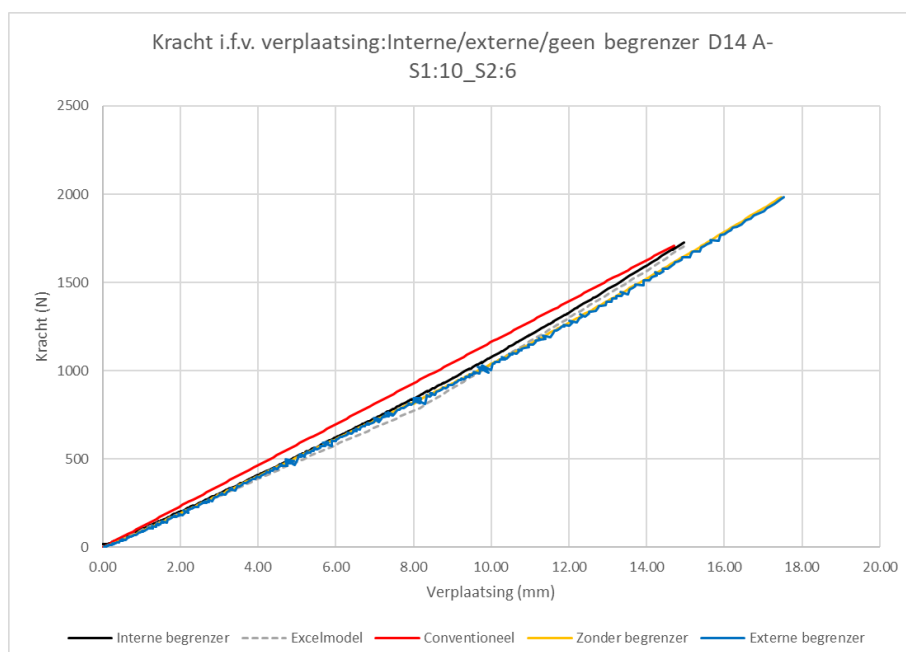
Figuur 119: Schotelveer karakteristiek D14 A:S1:10_S2:6



Figuur 118: Schotelveren stapeling S1:10_S2:6

In figuur 120 geeft de stippellijn hetgeen aan wat er gemodelleerd is in Excel. Het eerste dat hier opvalt is dat de stijfheid in het eerste deel van de curve (tot ± 3 mm) telkens iets hoger is dan de berekende stijfheid. Hieruit volgt dat de eerder gebruikte kracht F0.75 iets hoger ligt dan de waarden die terug te vinden zijn in het tabellenboek van Roloff/Matek. Een mogelijke verklaring hiervoor zou zijn dat de schotelveren wrijvingskrachten ondervinden bij het schuiven over de interne begrenzers. Daarnaast is nog te zien dat ongeveer alle curves bij lagere belastingen (tot 600 N) op elkaar liggen. Dit is logisch mits de begrenzers in dit interval nog niet in actie schieten. De eerste curve die progressief toeneemt (stijgt) is de schotelveren stapeling met interne begrenzers. Dit komt waarschijnlijk omdat de interne begrenzers niet allemaal hetzelfde geconstrueerd zijn (variatie in hoogtes), sommige zullen dus eerder in actie schieten dan andere. Hierdoor verhoogt de stijfheid geleidelijk. De externe begrenzer komt het beste overeen met het Excelmodel, dit komt omdat de tolerantie hierop relatief minder is dan de kleine hoogtes van verhoogjes op de interne begrenzer. Het 3^e deel van de curve van de externe begrenzer (het deel waar de curve verticaal zou moeten lopen/ waarbij de stijfheid oneindig is) zit hier niet in, omdat er een tussenplaatje werd gebruikt waardoor de hoogte van de externe begrenzer van stack 2 niet voldoende was. De indrukking van de externe uitwijkingsbegrenzer is ook apart gemeten en deze bedraagt op een kracht van 2000 N 0,13 mm, dit verklaart voor een deel de verschuiving naar rechts van de curve met externe begrenzer t.o.v. het Excelmodel (zie paragraaf X). Uit de metingen blijkt dat de begrenzers invloed hebben op de stijfheid van het systeem en dat de werking hiervan. De schotelveer stapeling zonder begrenzer is duidelijk minder stijf dan deze met begrenzers.

Figuur 120 toont de stijfheid van het gehele stabilisatorstangstelsel waarin de metingen geïmplementeerd zijn.



Figuur 120: Kracht i.f.v. verplaatsing: vergelijking tussen de verschillende begrenzers

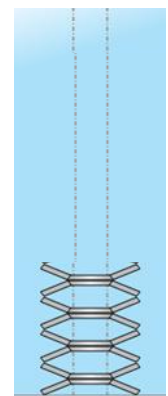
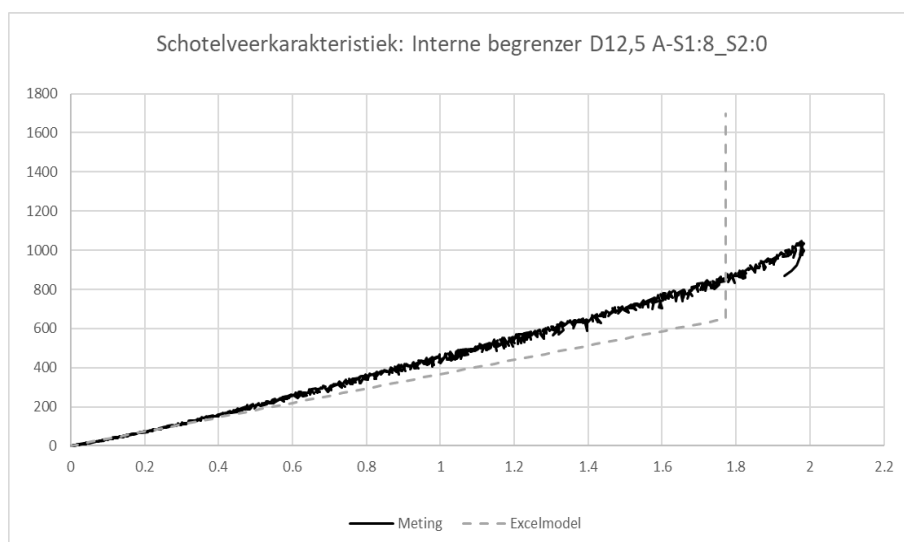
Figuur 120 geeft de kracht in functie van de verplaatsing van het volledige systeem weer. De interne begrenzers lijken beter te passen in dit concept, mits de deze curve de conventionele stabilisatorstangcurve (verder kan dit aangegeven worden als conventionele) snijdt in zijn eindpunt. Maar dat is niet direct het geval. Interne begrenzers hebben grotere afwijkingen op hun bemaattingen,

en vallen dus in dit geval stijver uit waardoor de interne stoppers op een correct punt de conventionele stabilisatorstangcurve snijdt. Maar wanneer de externe begrenzers hoger zijn, dan kan de curve van de externe begrenzer ook de conventionele snijden in het eindpunt. De modellering leunt alvast korter aan bij de externe begrenzer. Op het begin is te zien dat alle curves boven de curve van Excelmodel liggen. Bij een uitwijking van ongeveer 10 mm overstijgt de curve van Excelmodel de curve van externe begrenzer en zonder begrenzer, dit komt omdat de stijfheid van de gemodelleerde schotelveren van Excelmodel hoger ligt.

6.2.4 Testresultaat: interne begrenzer D12,5 A – S1:8_S2:0

Bij deze test wordt er gekeken of de werkelijke stijfheden overeen komen met de voorspelde stijfheden uit het model. Om de stijfheid te bepalen zijn er voor deze metingen telkens lineaire regressies uitgevoerd. De eerste meting wordt toegepast op enkel 1 stack die bestaat uit 8 stapelingen schotelveren van klasse A met een diameter van 12,5mm (figuur 121). De meting is uitgevoerd met het gebruik van interne uitwijkingsbegrenzers.

Figuur 122 geeft het verloop van de meting weer samen met de curve van het Excelmodel.



Figuur 122: Schotelveer karakteristiek met interne begrenzer D12.5 A- S1:8_S2:0

Figuur 121: Schotelveren stapeling S1:8_S2:0

Tabel 30: Vergelijkingstabel

Excelmodel	Lineaire regressie	Afwijking t.o.v. model %
366.67 N/mm	470.77 N/mm	28.4%

Uit tabel 30 is waar te nemen dat de opgemeten stijfheid van stack 1 groter is dan de stijfheid uit het model. Er is een afwijking van 28,4% ten opzichte van het model. Deze afwijking kan te wijten zijn aan meerdere invloeden. De schotelveren zijn volgens DIN2093 geselecteerd en aangekocht. De stijfheid van het model wordt berekend volgens de waarden uit het tabellenboek. Een afwijking in geometrie kan een mogelijke verklaring zijn voor de afwijking in stijfheid. De aanwezigheid van de interne uitwijkingsbegrenzers hebben wellicht ook een effect op de meting. Zo kan de hoogte van de uitwijkingsbegrenzer afwijken t.o.v. de theoretische waarde. De materiaaleigenschappen hebben ook een invloed op de waarde van de stijfheid, ook dit kan een mogelijke oorzaak zijn van het verschil tussen de werkelijke en theoretische waarde. De wrijving tussen de schotelveren (en

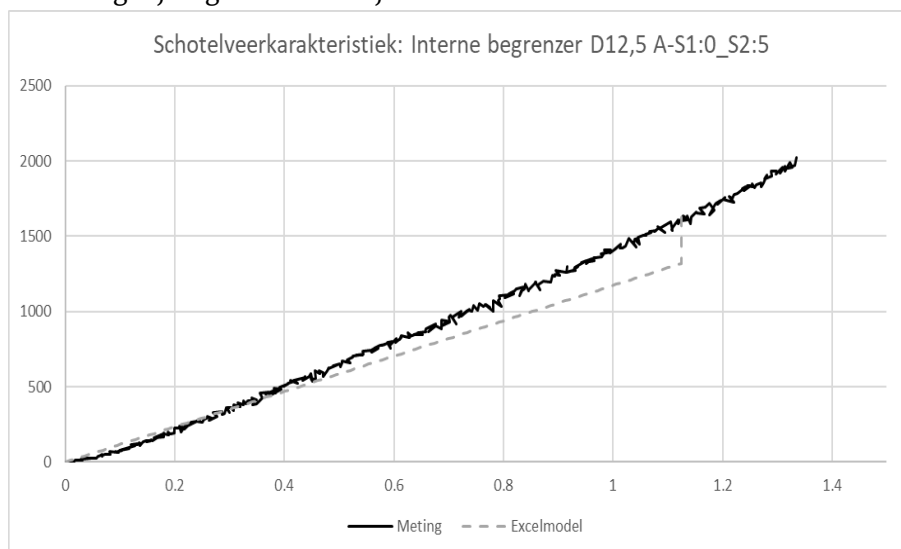
uitwijkingsbegrenzers) wordt niet meegenomen in het Excelmodel wat ook zorgt voor een afwijking tussen de werkelijke en theoretische stijfheid.

Op de meting is ook de theoretische oneindige stijfheid uit het model niet waar te nemen. Dit komt doordat de kracht limiet voor deze meting te laag is ingesteld. Er wordt verwacht wanneer deze hoger had gelegen dat er wel degelijk een stijging van de stijfheid waar te nemen is, al zal deze nooit oneindig zijn.

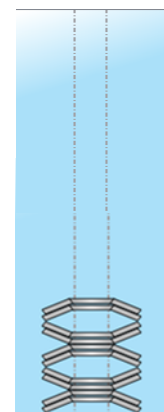
6.2.5 Testresultaat: interne begrenzer D12,5 A – S1:0_S2:5

Op dezelfde manier is de stack 2 apart opgemeten. De stapeling bestaat uit 5 stapelingen schotelveren van klasse A met een diameter van 12,5mm, waarbij telkens 2 schotelveren parallel geplaatst zijn (figuur 123).

De onderstaande figuur 124 geeft de meting weer in vergelijking met de curve uit het Excelmodel. Tabel 31 geeft de vergelijking tussen de stijfheden.



Figuur 124: Schotelveer karakteristiek met interne begrenzer D12.5 A- S1:0_S2:5



Figuur 123: Schotelveren stapeling S1:0_S2:5

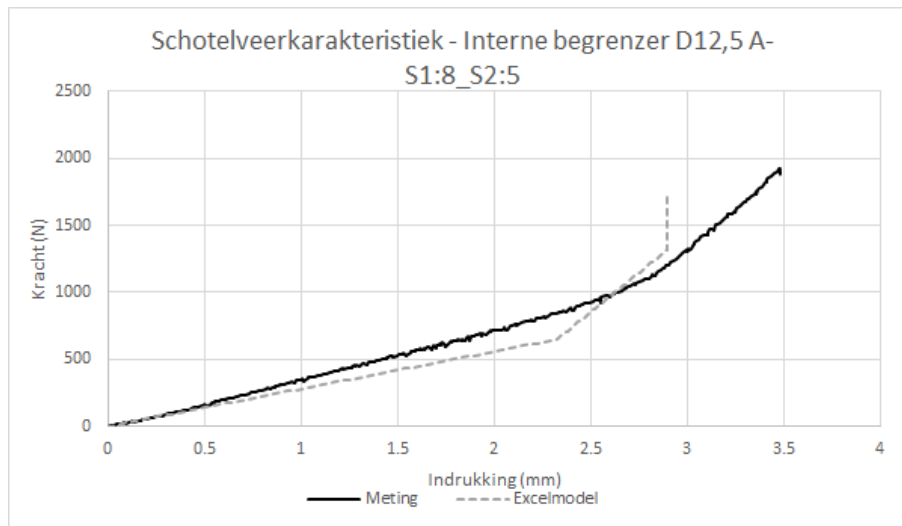
Tabel 31: Vergelijking stijfheden 2

Excelmodel	Lineaire regressie	Afwijking t.o.v. model %
1173.33 N/mm	1425.70 N/mm	21.5%

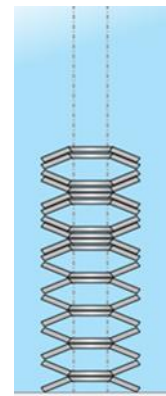
Opnieuw is de opgemeten stijfheid van de stack 2, 21,5% hoger dan de stijfheid uit het Excelmodel. De mogelijke verklaringen voor deze afwijking zijn identiek aan de vorige stack.

6.2.6 Testresultaat: interne begrenzer D12,5 A – S1:8_S2:5

De schotelveer karakteristiek van de stapeling bestaande uit schotelveren van klasse A met diameter 12.5mm wordt opgemeten en vergeleken met de curve komende uit het Excelmodel. De stapeling bestaat uit 2 stacks, waarvan de eerste stack bestaat uit 8 stapelingen van één enkele schotelveer en een 2^{de} stack stapeling van 5 van 2 schotelveren parallel op elkaar (figuur 125). Figuur 126 geeft de veer karakteristiek van het model en de meting weer.



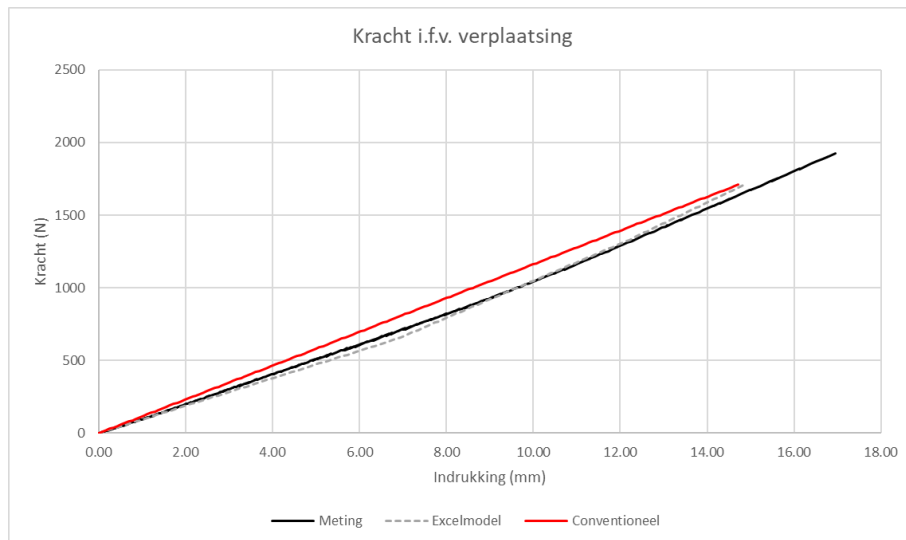
Figuur 126: Schotelveer karakteristiek met interne begrenzer D12.5 A- S1:8_S2:5



Figuur 125: Schotelveren stapeling S1:8_S2:5

De opgemeten schotelveer karakteristiek bestaat duidelijk uit 2 delen, waarvan het eerste deel een lagere stijfheid vertoont t.o.v. het 2^{de} gedeelte. Dit is ook wat er verwacht wordt. Verder stopt de curve doordat de veiligheidslimiet van 2000 N overschreden wordt. Als er vergeleken wordt met de curve uit het Excelmodel valt het op dat de stijfheid bij de meting hoger uitvalt, zeker voor het eerste gedeelte. Het tweede gedeelte lijkt parallel te lopen met het Excelmodel. Het punt wanneer de eerste stack volledig is ingedrukt ligt een 0.5 mm verder t.o.v. het model. Alsook het derde gedeelte uit het Excelmodel waarbij de stijfheid theoretisch gezien oneindig wordt als beide stacks ingedrukt zijn, is niet meteen terug te vinden in de opgemeten curve. Dit is deels te verklaren omwille van de veiligheidslimiet. Wellicht als de limiet hoger wordt ingesteld gaat er een 3^{de} gedeelte waarneembaar zijn op curve.

Figuur 127 geeft de curves van de kracht i.f.v. de verplaatsing van het volledig systeem van zowel het theoretisch model als de berekende waarden op basis van de meting.

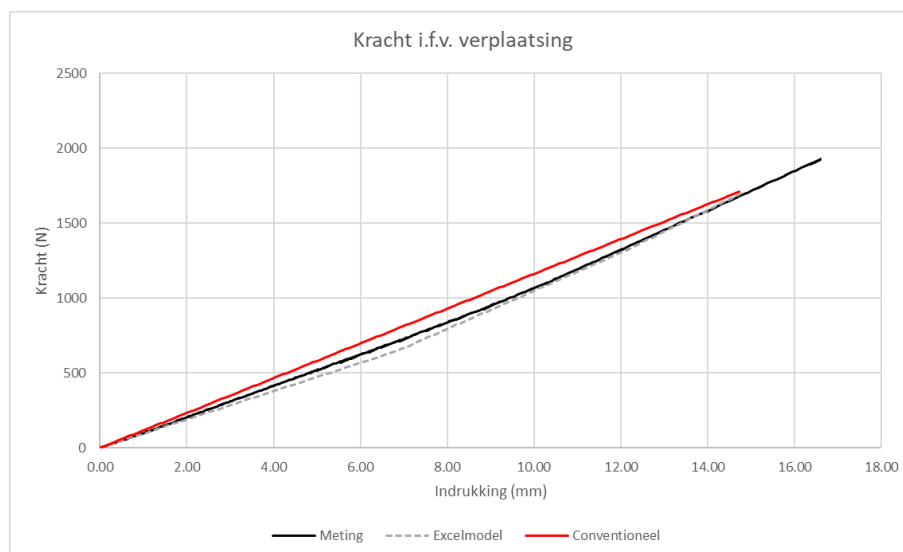


Figuur 127: Kracht i.f.v. verplaatsing; D12.5 A- S1:8_S2:5- 143N/mm

De rode curve geeft het verloop weer van de conventionele stabilisatorstang. Dit is telkens een rechte omdat de stijfheid constant blijft doorheen de verplaatsing.

Het verloop vanuit het Excelmodel wordt weergegeven als een streepjeslijn. De stijfheid van het centrale deel van de aangepaste stabilisatorstang is zo gekozen dat het eindpunt van het Excelmodel samenvalt met de conventionele stabilisatorstang (zie 4.1). Voor deze stapeling is er een stijfheid van 143 N/mm gekozen.

De zwarte lijn geeft het berekende verloop weer op basis van de gemeten testresultaten. De zwarte curve volgt mooi de streepjeslijn van het Excelmodel. In het begin is er een lichte afwijking, nadien liggen de curves perfect op elkaar. Voor ongeveer de laatste 1.5mm wijken de curves weer van elkaar af. Hierdoor wordt hetzelfde eindpunt niet bereikt. De 1705 N wordt ongeveer een 0.40 mm later bereikt. Dit is te wijten aan de afwijking tussen de theoretische en opgemeten schotelveer karakteristiek.



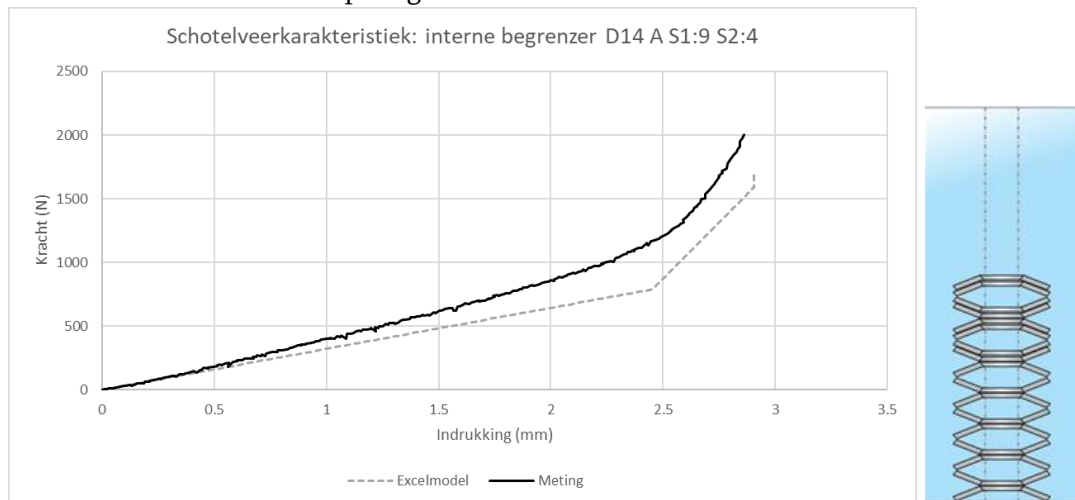
Figuur 128: Kracht i.f.v. verplaatsing; D12.5 A- S1:8_S2:5- 147N/mm

Deze verschuiving is eenvoudig op te lossen door de stijfheid van het centrale gedeelte van de aangepaste stabilisatorstang (niet model) te verhogen, hierdoor zal het eindpunt uiteindelijk wel samenvallen. Dit principe wordt aangetoond in sectie 6.2.2. Voor deze stapeling specifiek wordt de stijfheid van het centraal gedeelte verhoogt naar 147 N/mm.

De maximale progressiviteit bedraagt dan voor deze opgemeten stapeling ongeveer 7.7% t.o.v. de conventionele stabilisatorstang. Dit is nog te laag voor de voorgestelde progressiviteit van 15%. Dit percentage kan bereikt worden door de stapeling van de stacks aan te passen.

6.2.7 Testresultaten: interne begrenzer D14 A-S1:9_S2:4

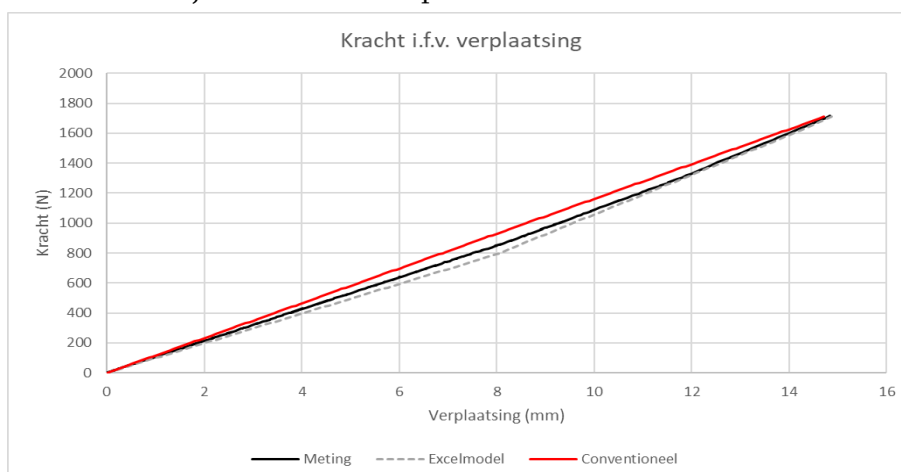
De testen in deze paragraaf zijn uitgevoerd op schotelveren die een buitendiameter hebben van 14 mm, komende van klasse A. De stack die getest wordt heeft 9 stapelingen van stack1 (1 schotelveer in parallel op elkaar), en 4 stapelingen van stack 2 (2 schotelveren in parallel op elkaar) (figuur 129). Figuur 130 geeft de resultaten van deze stapeling weer.



Figuur 130: Schotelveer karakteristiek met interne begrenzer D14 A- S1:9_S2:4

Figuur 129: Schotelveren stapeling S1:9_S2:4

Opnieuw valt in figuur 130 op dat de stijfheid in het eerste deel van de curve hoger is dan het Excelmodel. De overgang van het eerste deel van de curve naar het tweede deel is afgerond en verloopt vloeiender dan het Excelmodel. Dit is een positief gegeven mits er geen bruuske overgangen in stijfheden gewenst zijn. Figuur 131 geeft de kracht in functie van de verplaatsing van het hele systeem weer. De stijfheid van K concept is hier 143 N/mm.

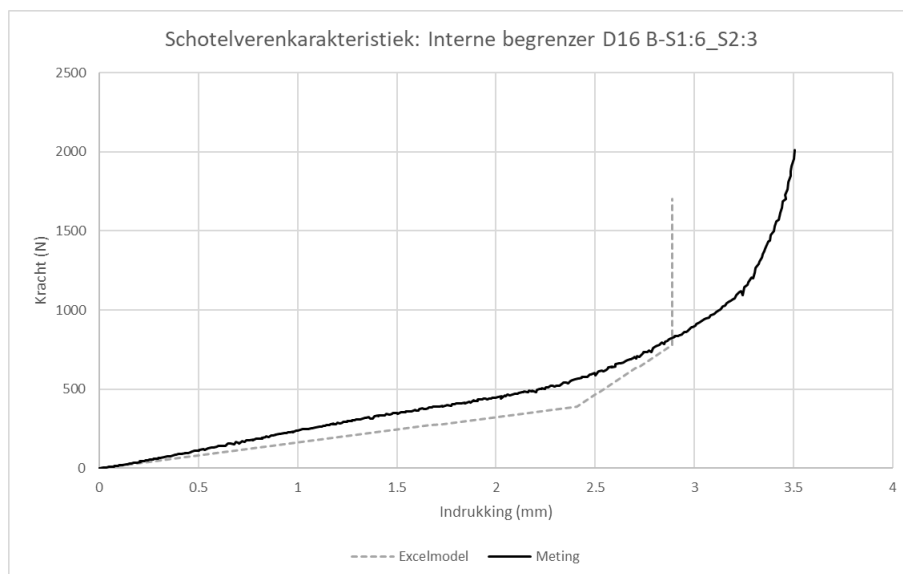


Figuur 131: Kracht i.f.v. verplaatsing: D14 A- S1:9_S2:4

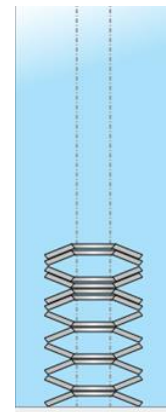
In figuur 131 is te zien dat de stijfheid van de meting hoger ligt dan die van het Excelmodel, waardoor er minder progressiviteit optreedt. De maximale progressiviteit van de meting bedraagt ongeveer 8% (in het punt 8 mm).

6.2.8 Testresultaten: interne begrenzer D16 B-S1:6_S2:3

De testen in deze paragraaf zijn uitgevoerd op schotelveren die een buitendiameter hebben van 16 mm, komende van klasse B. De stack die getest wordt heeft 6 stapelingen van stack1 (1 schotelveer in parallel op elkaar), en 3 stapelingen van stack 2 (2 schotelveren in parallel op elkaar) (figuur 132). Figuur 133 geeft de resultaten van deze stapeling weer.



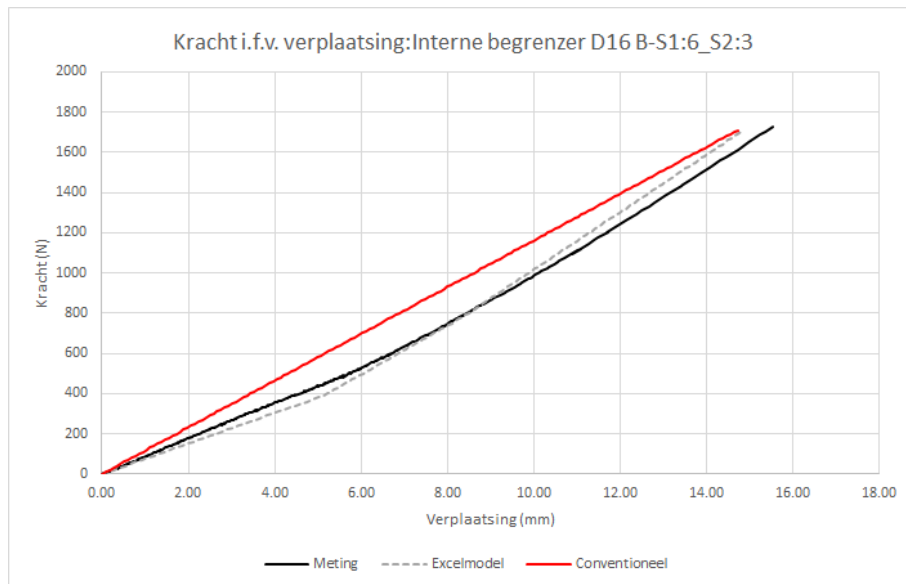
Figuur 133: Schotelveer karakteristiek met interne begrenzer D16 B-S1:6_S2:3



Figuur 132: Schotelveren stapeling S1:6_S2:3

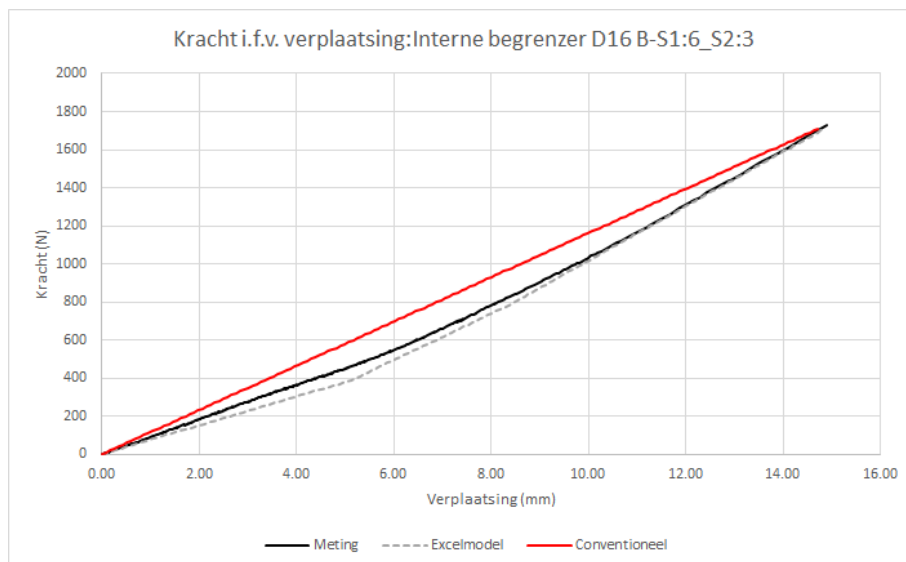
In figuur 134 is opnieuw de begin stijfheid hoger dan die van het Excelmodel. Wat hier verschilt t.o.v. de andere metingen is dat de curve meer naar rechts is verschoven. Een verklaring hiervoor zou zijn dat de interne begrenzers niet hoog genoeg zijn, waardoor de schotelveren meer dan 75% van hun veerweg ingedrukt worden. De interne begrenzers hebben een hoogte van 0,125 (+0.01 +0), en zijn gelijk gesteld aan 75% van h_0 van een schotelveer, toch is niet alles even nauwkeurig afgewerkt. De 3 delen van de Excelmodel curve zijn min of meer herkenbaar in de meting.

Figuur 134 geeft de kracht ten opzichte van de verplaatsing van het ganse systeem weer. De stijfheid van K concept voor het Excelmodel is hier 143 N/mm.



Figuur 134: Kracht i.f.v. verplaatsing: interne begrenzers: D16 B-S1:6_S2:3-143 N/mm

Wordt er gewenst dat het eindpunt van de meting samenvalt met het eindpunt van de conventionele stabilisatorstang, dan moet de stijfheid verhoogd worden naar 150N/mm, deze waarde is iteratief bepaald door te kijken waar de meting de conventionele zou snijden. Dit wordt weergegeven in figuur 135.

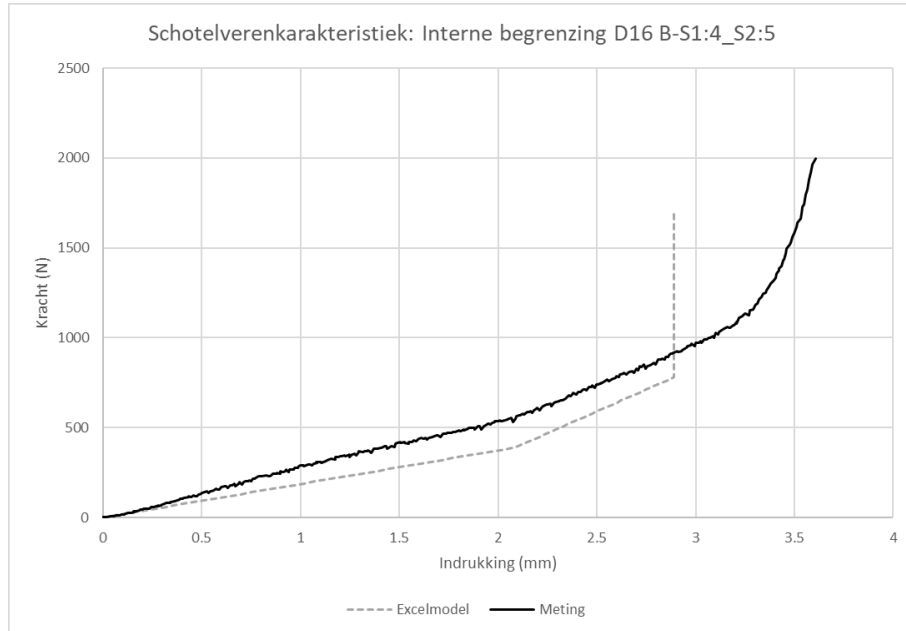


Figuur 135: Kracht i.f.v. verplaatsing: interne begrenzers: D16 B-S1:6_S2:3-150N/mm

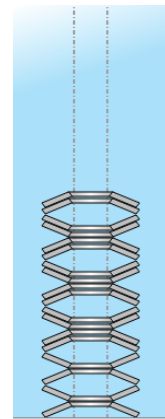
Op figuur 135 is duidelijk te zien dat er een progressief verloop bekomen wordt. De progressiviteit die behaald wordt op het punt 6,4 mm bedraagt ongeveer 27%, en is ruim voldoende voor aan de eisen te voldoen.

6.2.9 Testresultaten: interne begrenzer D16 B-S1:4_S2:5

De testen in deze paragraaf zijn uitgevoerd op schotelveren die een buitendiameter hebben van 16 mm, komende van klasse B. De stack die getest wordt heeft 4 stapelingen van stack1 (1 schotelveer in parallel op elkaar), en 5 stapelingen van stack 2 (2 schotelveren in parallel op elkaar) (figuur 136). Figuur 137 geeft de resultaten van deze stapeling weer.

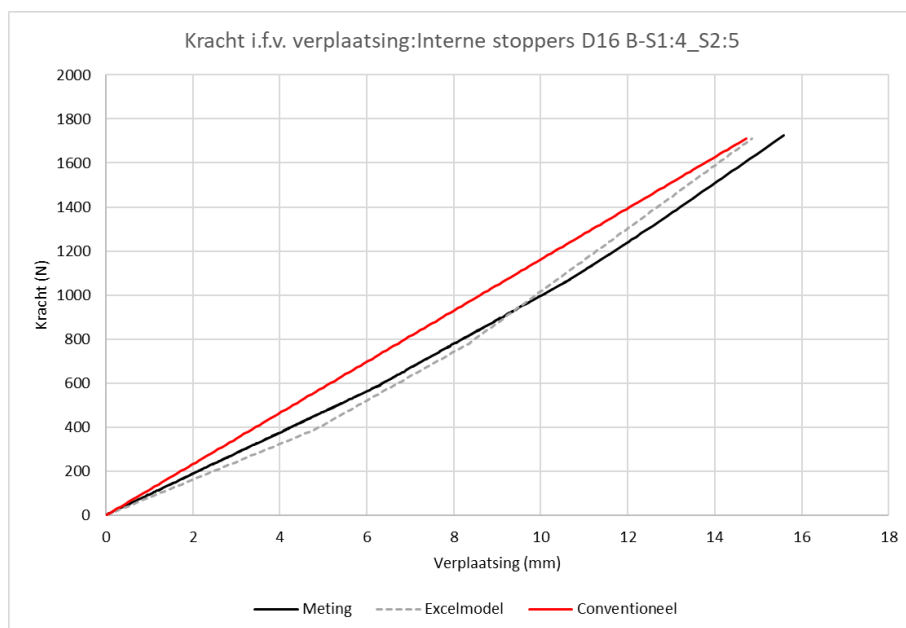


Figuur 137: Schotelveer karakteristiek met interne begrenzer D16 B-S1:4_S2:5



Figuur 136: Schotelveren stapeling S1:4_S2:5

In figuur 137 is opnieuw de begin stijfheid hoger dan die van het Excelmodel. De grafiek is naar rechts verschoven, een verklaring hiervoor is eerder aangegeven. De 3 delen van de Excelmodel curve zijn min of meer herkenbaar in de meting. Figuur 138 geeft de kracht ten opzichte van de verplaatsing van het ganse systeem weer. De stijfheid van K concept voor het Excelmodel is hier 143 N/mm.

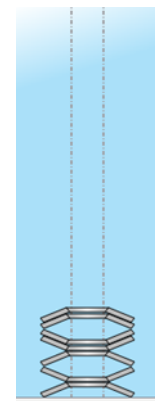
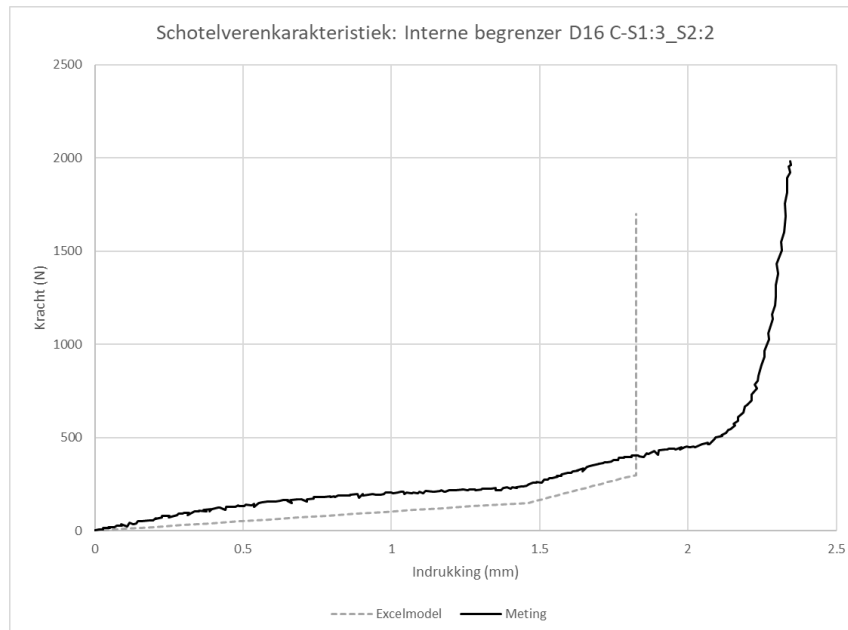


Figuur 138: Kracht i.f.v. verplaatsing: met interne begrenzers D16 B-S1:4_S2:5-143 N/mm

Wordt er gewenst dat het eindpunt van de meting samenvalt met het eindpunt van de conventionele stabilisatorstang, dan moet de stijfheid verhoogd worden naar 153N/mm. De progressiviteit die dan behaald wordt op het punt 8,05 mm bedraagt ongeveer 16%.

6.2.10 Testresultaten: interne begrenzer D16 C-S1:3_S2:2

De testen in deze paragraaf zijn uitgevoerd op schotelveren die een buitendiameter hebben van 16 mm, komende van klasse C. De stack die getest wordt heeft 3 stapelingen van stack1 (1 schotelveer in parallel op elkaar), en 2 stapelingen van stack 2 (2 schotelveren in parallel op elkaar) (figuur 139). Figuur 140 geeft de resultaten van deze stapeling weer.

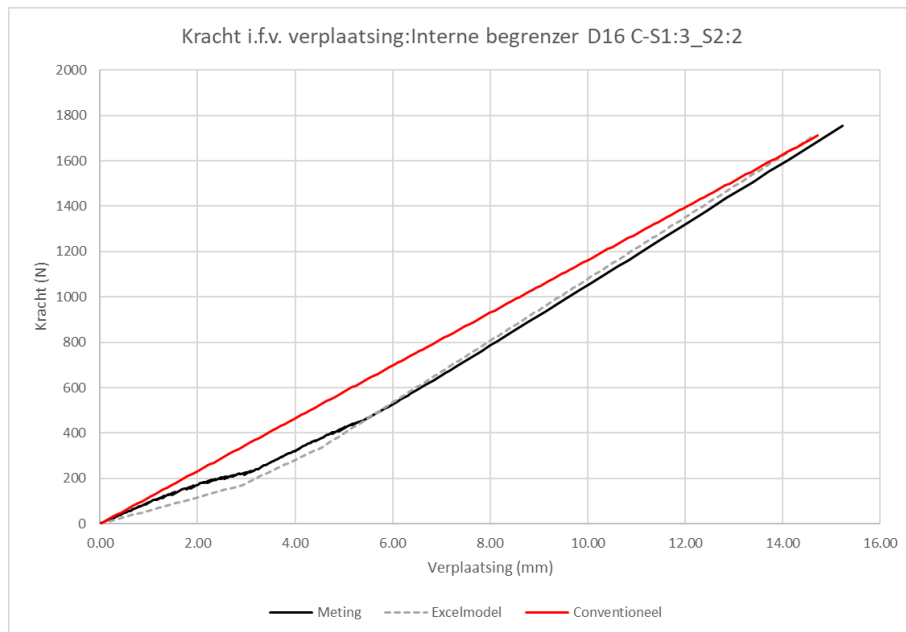


Figuur 140: Schotelveer karakteristiek met interne begrenzer D16 C-S1:3_S2:2 Figuur 139: Schotelveren stapeling S1:3_S2:2

In figuur 140 is er te zien dat de schotelveren een degressieve curve hebben.

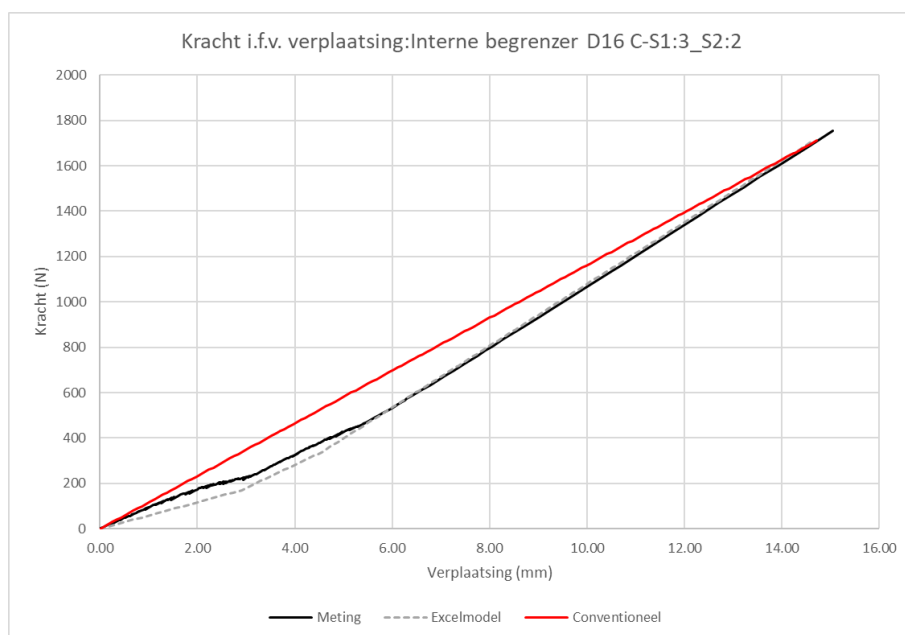
Eerder is besproken dat schotelveren van klasse C een degressieve curve hebben, dit toont het nogmaals aan. De kracht neemt op het begin van ieder deel van de curve snel toe en verzwakt naar het einde van dat deel van de curve. De volledige grafiek is naar rechts opgeschoven. Een verklaring hiervoor zou zijn dat de interne begrenzers niet hoog genoeg waren, waardoor de schotelveren meer dan 75% van hun veerweg ingedrukt zijn.

Wanneer deze metingen geïntegreerd worden in de stijfheid van het stabilisatorstangstelsel, dan wordt figuur 141 bekomen. Figuur 141 geeft de kracht ten opzichte van de verplaatsing van het hele systeem weer.



Figuur 141: Kracht i.f.v. verplaatsing: met interne begrenzers D16 C-S1:3_S2:2-136 N/mm

Deze grafiek wordt bekomen wanneer de stijfheid van de nieuw ontwikkelde stabilisatorstang een stijfheid heeft van 136 N/mm. Hierop is te zien dat de curve van de conventionele en het Excelmodel snijden. Er is steeds een inschatting gemaakt voor de grootte van de stacks om het gewenste Excelmodel te bekomen. Door nu de stijfheid van de nieuw ontwikkelde stabilisatorstang aan te passen kan de meting alsnog snijden met de conventionele. Op figuur 142 wordt de stijfheid ingesteld op 138 N/mm. Dit is een verhoging met 2 N/mm. Nu valt het eindpunt van de meting samen met het eindpunt van de conventionele. De progressiviteit rond 6 mm bedraagt ongeveer 22% en is ruim voldoende voor aan de eisen te voldoen.



Figuur 142: Kracht i.f.v. verplaatsing: met interne begrenzers D16 C-S1:3_S2:2-138 N/mm

6.3 Conclusie validatie

In het algemeen zijn de metingen goed uitgevallen en bevatten ze weinig ruis. De opgemeten schotelveercharacteristieken komen relatief goed overeen met het opgestelde Excelmodel. Een eerste afwijking tussen de metingen en de modellering is dat de stijfheid van de schotelveerstackelingen hoger ligt dan vooraf voorspeld via het model. Dit is te zien aan de steilere richtingscoëfficiënt van de schotelveercharacteristiek. Afhankelijk van de stackeling zijn sommige curven opgeschoven naar links of naar rechts. Een mogelijke verklaring hiervoor is de interne begrenzers niet de juiste hoogte hebben, waardoor de schotelveren meer of minder dan 75% van hun totale veerweg zijn ingedrukt.

Verder is er ook gekeken welke uitwijkingsbegrenzer het beste resultaat oplevert. In het begin van de metingen (bij een lage belasting en indrukking) vertonen alle verschillende uitwijkingsbegrenzers (Intern, extern, geen) hetzelfde verloop. De externe uitwijkingsbegrenzers benaderen het beste het Excelmodel. Dit is te wijten aan de mogelijkheid tot nauwkeurige afwerking van de externe uitwijkingsbegrenzers kwestie toleranties. Het resulteert wel meer in een hoekig verloop. Dit is anders bij de interne uitwijkingsbegrenzers, deze geven een vloeiende overgang tussen het eerste en het tweede gedeelte van de curve, wat meer gewenst is voor deze toepassing aangezien bruuske overgangen van stijfheden vermeden moeten worden. Aangezien de schotelveercharacteristiek van een stackeling met externe uitwijkingsbegrenzers het beste overeenkomt met het de curve uit Excelmodel, was het beter om hierop meer testen uit te voeren.

Een tweetal stackelingen uit de testresultaten lijken voldoen aan de eis van een progressief verloop van meer dan 15% t.o.v. de conventionele stabilisatorstang. De maximale progressiviteit van ongeveer 27% is bekomen met de stackeling: D16 B-S1:6_S2:3 (interne uitwijkingsbegrenzers). D16 C-S1:3_S2:2

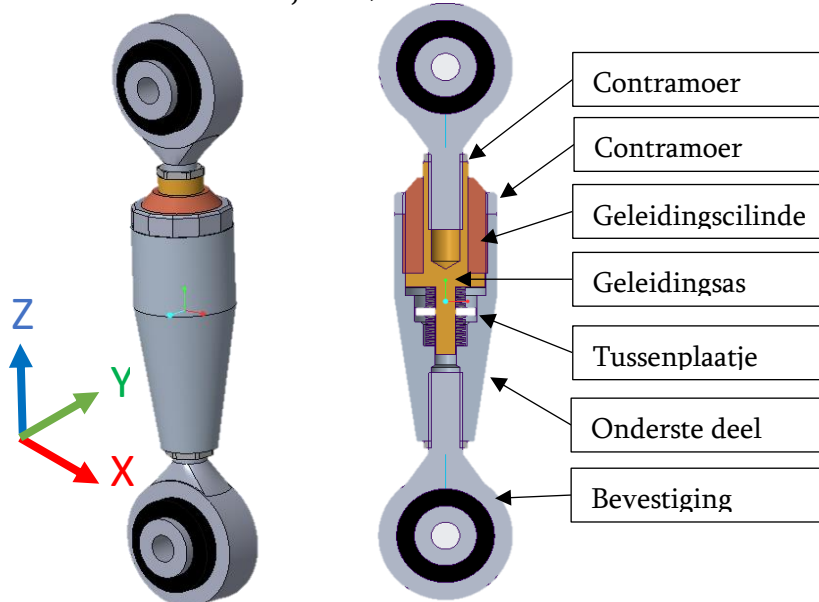
Deze bevindingen moeten wel kritisch bekeken worden. De meetresultaten van de schotelveercharacteristiek zijn geïmplementeerd in een ander opgesteld Excelmodel waarbij de kracht in functie van verplaatsing van het totale stabilisatorstang systeem wordt uitgezet. Dit opgesteld model is een vereenvoudigde weergave van de werkelijkheid.

Er zijn er nog meerdere stackelingen gevonden via het Excelmodel waarbij de beoogde progressiviteit behaald wordt, maar doordat de testtijd eerder beperkt was, zijn er slechts enkele stackelingen geanalyseerd.

In het algemeen zorgt het Excelmodel voor een goede schatting van de veercharacteristiek van een schotelverenstackeling.

7 Korte bespreking CAD model: Prototype

Dit hoofdstuk beschrijft het ontworpen prototype gebaseerd op het finaal concept: End link met schotelveren. Naast het CAD-model zijn er ook 2D-tekeningen gemaakt. Dit prototype is nog niet is nog niet gerealiseerd in de werkelijkheid, waardoor dit model kritisch bekeken moet worden.



Figuur 143: CAD-model prototype

Figuur 143 geeft het finaal CAD-model weer. Dit model is gebaseerd op het gebruik van externe uitwijkingsbegrenzers. Deze uitwijkingsbegrenzers bevinden zich in de vorm van aanslagen die terug te vinden zijn in het onderste deel. Voor goede geleiding van de geleidingsas wordt een geleidingscilinder (vervaardigd uit brons) gebruikt. Deze is voorzien met schroefdraad aan de buitenkant, waardoor dit in het onderste deel kan gedraaid worden. Er is gekozen voor schroefdraad zodat de voorspanning analoog geregeld kan worden. Een zelfontworpen contraoer weerhoudt de geleidingscilinder van het losdraaien bij het ondervinden van trillingen en krachten. De geleidingsas heeft restricties op zijn verplaatsing. De verplaatsing naar boven wordt weerhouden door de geleidingscilinder, bij de verplaatsing naar onder wordt hij tegengehouden door de schotelveren. De bovenste stapeling bevat de schotelveren van stack 2 (2 parallel gestapelde schotelveren), de onderste bevat schotelveren van stack 1 (1 parallel gestapelde schotelveer). Een tussenplaatje scheidt de 2 stapelingen van schotelveren en dient als hulpmiddel voor de uitwijkingsbegrenzer wanneer de grenskracht van stack 1 overschreden wordt, hij zal tegen de onderste aanslag komen liggen. De geleidingsas zal bij het overschrijden van de grenskracht van stack 2 aanslaan tegen de 2^e aanslag in het onderste deel. Aan het onderste deel en het bovenste deel van de geleidingsas wordt een bevestiging aangebracht die enerzijds zorgt voor de connectie tussen de stabilisatorstang en de end link en anderzijds voor de connectie tussen de wielophanging en de end link. Deze worden beide geborgd met een contraoer zodat ze niet kunnen lostrillen.

Dit ontwerp komt betreffende de afmetingen nagenoeg overeen met de bestaande end link, vooral in zijn lengte richting (volgens de z-as), in zijn radiale richting (volgens de x-/y-as) is hij iets dikker in het midden. Bij het gebruiken van dit prototype moet de stabilisatorstang zelf iets stijver uitgevoerd zijn t.o.v. de conventionele stabilisatorstang (bv. door de wanddikte te vergroten), waarbij de stijfheid afhankelijk is van de gekozen stack. Bijgevolg kan dit zonder verdere aanpassingen ingebouwd worden in een bestaand voertuig.

8 Conclusie

Dit hoofdstuk vormt de algemene conclusie betreffende de masterthesis. Er zal volgens chronologische volgorde het proces van het project besproken worden. Daarnaast zal er besproken worden of de openstaande onderzoeksvragen voldoende beantwoord zijn en op welke manier een oplossing is bekomen. Tot slot worden nog een aantal voorstellen gegeven naar toekomstig onderzoek omtrent dit topic.

8.1 Algemene conclusie

Allereerst is er een literatuurstudie uitgevoerd. In deze studie werd duidelijk dat er verscheidene manieren bestaan om een progressieve rolstijfheid van een voertuig te bekomen. Echter zijn de meeste methoden actief gestuurd. Voor het opstellen van het hoofdstuk State of The Art is er naast een blik op de huidige markt, is er vooral een grondig onderzoek gebeurt naar de bestaande patenten die innovatieve manieren beschrijven om een niet-lineair, soms ook progressief, verloop te bekomen.

De State of the art heeft geleid tot het bekomen van een aantal innovatieve concepten voor het beantwoorden van de onderzoeksvraag. Voor elk van de concepten is er op basis van het wiskundig model omtrent de stijfheden van een conventionele stabilisatorstang een model opgesteld. Eerste resultaten uit de opgestelde modellen en gesprekken met verscheidene docenten en mensen uit de industrie (o.a. ABSSAC) resulteerden in een selectie van concepten.

Door de eenvoudigheid van het mechanisme, de eerste goede resultaten volgens het opgestelde model en de opportuniteit naar toekomstig boeiend onderzoek, is er gekozen voor het concept waarbij er schotelveren geïntegreerd worden in de end link. Progressief verloop kan hierbij bekomen worden door een slimme stapeling van de schotelveren. Na onderzoek naar de theoretische achtergrond van het gebruik van schotelveren is er gebleken dat een schotelveer niet meer dan 75% van zijn totale veerweg mag overschrijden. Hierdoor is er nagedacht naar de mogelijke manieren om aan deze eis te voldoen. Er zijn 2 soorten uitwijkingsbegrenzers voorzien: interne en externe uitwijkingsbegrenzers.

Het model voor het gekozen concept werd verder uitgebreid. Zo werd er een model opgesteld dat, afhankelijk van de stapeling, de schotelveer karakteristiek berekent. Om dit model te valideren werd er allereerst het software pakket "Disc Spring Solver" gebruikt om de spanningen en de karakteristiek te analyseren. Deze software liet toe om verschillende stapelingen te maken, echter hield deze tool, in tegenstelling tot ons model, geen rekening met de maximale indrukking van 75%.

Om het model verder te valideren zijn een aantal stapelingen getest op een testbank bij Flanders Make. Deze stapelingen zijn geselecteerd op basis van de resultaten vanuit het model. Deze schotelveer stapelingen (tabel 29) behaalden volgens het model een progressiviteit van ongeveer 15% op het totaalsysteem van de stabilisatorstang.

De uitvoering van deze testen vereiste het ontwerp van een testopstelling mbv Creo. Door de samenwerking met de werkplaats op de universiteit werd het model gerealiseerd in de werkelijkheid. De testopstelling liet toe om een verschillende soorten schotelveren te testen

(Verschillende klassen en diameters). De twee varianten van uitwijkingsbegrenzers werden ook getest om te bepalen welke het meest geschikt was voor het ontwerp van een prototype. Er zijn verscheidene testen uitgevoerd om het model te kunnen toetsen aan zijn nauwkeurigheid. In het algemeen laten de metingen toe om een vergelijking met het model te maken

en bevatten ze weinig ruis. De opgemeten schotelveercharacteristieken komen ondanks kleine afwijkingen goed overeen met het opgestelde Excelmodel. De externe uitwijkingsbegrenzer wordt gezien als meest robuuste en nauwkeurigste oplossing. De metingen waarbij externe ringen als uitwijkingsbegrenzers hebben de beste match met het opgestelde model kwestie veercharacteristiek. De testresultaten van de metingen zijn ingevoegd in het model waarbij het verloop kracht/verplaatsing van het gehele stabilisatorstangstelsel geplot wordt. Hieruit blijken een 2 geteste stapelingen te voldoen aan de vereiste van een progressiviteit van minimaal 15% t.o.v. de conventionele stabilisatorstang. Wegens tijdsgebrek zijn niet alle stapelingen getest, en vermoedelijk bestaan er meer stapelingen die progressiviteit vertonen.

Tot slot is er nog via Creo Parametric een prototype ontworpen van het concept. Dit CAD- model is opgesteld voor 1 specifieke soort stapeling, maar dit kan in de toekomst eenvoudig worden aangepast naar voorkeurs stapeling. Omwille van de robuustheid, werkt het prototype volgens het principe van de externe uitwijkingsbegrenzers.

De onderzoeksvraag luidde als volgt: "Is het mogelijk om een stabilisatorstang met progressieve stijfheid te ontwerpen, die op een passieve manier wordt aangestuurd en waarbij de juiste balans ontstaat tussen comfort en performantie?"

Het antwoord hierop is volgens dit onderzoek ja. Uit de testen blijkt dat het concept waarbij schotelveren in de end link geïntegreerd zijn een valabel concept is om progressieve stijfheid te behalen. Of het gewenste gedrag op het volledig stabilisatorstangstelsel behaald kan worden, kan nog niet met 100% zekerheid gezegd worden, om hierover uitsluitel te geven moet het volledige stabilisatorstangstelsel getest worden. Maar volgens de uitgevoerde modellering is dit wel het geval.

Uit de testresultaten blijkt dat een progressiviteit van ongeveer 27% haalbaar is, dit ligt ruim boven vooropgestelde 15%. Hierbij dient de stabilisatorstang stijver uitgevoerd te worden. Een eenvoudige oplossing hierop is om de binnendiameter te vergroten. Op die manier zal de maximale buitendiameter van 40 mm niet overschreden worden. Het finale CAD-model van het prototype overschrijdt niet de maximale diameter van 40 mm. Bij een juiste materiaalkeuze is dit prototype bestand tegen de vooropgestelde omgevingsfactoren.

We kunnen dus concluderen dat onze masterthesis het beoogde resultaat bekommt. Toekomstig onderzoek zal moeten uitwijzen of het prototype van de end link waarin schotelveren geïmplementeerd zijn, voldoet aan de opgelegde eisen.

8.2 Toekomstig onderzoek

Hier volgen een aantal voorstellen voor toekomstig onderzoek omtrent een stabilisatorstang met progressieve stijfheid.

Doorheen deze masterthesis zijn een aantal modellen opgebouwd. Specifiek voor het concept schotelveren is er een model opgesteld waarbij, afhankelijk van de stapeling, de schotelveer karakteristiek wordt gegeven. Daarnaast is er voor elk concept op basis van het wiskundig model van een stabilisatorstang systeem een model opgebouwd die een benadering geeft van het kracht/verplaatsings verloop van het systeem op basis van berekende stijfheden.

Deze modellen zijn een vereenvoudiging van de werkelijkheid. Om de modellen te optimaliseren en uit te breiden zou er nog diepgaander onderzoek kunnen gebeuren naar de invloed van andere parameters (zoals wrijvingskrachten) die effect hebben op de stijfheid van het systeem. Op basis van grondig empirisch onderzoek zouden de modellen verder uitgebreid worden zodat een betere benadering met de realiteit bekomen wordt. Wanneer de modellen complexer worden door bijvoorbeeld rekening te houden met wrijvingskrachten is het aanbevolen om de huidige modellen opgesteld in Excel, te vertalen naar een wiskundigere software zoals MATLAB of Python.

Uit de bekomen bevindingen blijkt dat de implementatie van schotelveren in de end link een progressief verloop vertonen voor het gehele stabilisatorstangstelsel. Wegens tijdsgebrek zijn van een beperkt aantal stapelingen de schotelveer karakteristiek opgemeten. Het wordt dan ook aanbevolen om deze testen verder uit te breiden om zo de best mogelijke stapeling van schotelveren te bekomen.

Op het einde van de masterthesis is er ook een prototype in CAD-model ontworpen van de end link waarin schotelveren geïmplementeerd zijn. Toekomstig onderzoek moet uitwijzen of dit prototype het verwachte resultaat biedt. Tijdens dit project is er niet de opportuniteit geweest om het systeem met het prototype in zijn geheel te analyseren op een testbank.

Na het analyseren van het prototype op een testbank, kan het onderdeel geïntegreerd worden in het totaalsysteem van een stabilisatorstang, dus waarbij de huidige, conventionele end links vervangen worden door ons bekomen concept. Bijkomend moet het centrale gedeelte van de stabilisatorstang zelf stijver uitgevoerd worden. Dit zou dan eerst in zijn geheel getest kunnen worden op een testbank. Als kerst op de taart zou natuurlijk de implementatie van ons bekomen onderdeel in een personenauto zijn. Hierop kunnen binnen Flanders Make voertuiganalyses gebeuren kwestie levensduur en trillingen. Totslot kan er onderzocht worden of de bestuurder weldegelijk een verschil in rolgedrag opmerkt.

Referentielijst

- [1] Flanders Make, “No Title.” <https://www.flandersmake.be/nl/over-ons> (accessed Oct. 15, 2020).
- [2] I. V. E. M. R. Projecten, “Communicatieverplichtingen Interreg V-A EMR Projecten,” no. december, 2018.
- [3] Flanders, “Validation of a novel composite anti-roll bar for combined sporty and comfortable vehicle driving experience.”
- [4] David, “Effect of anti-roll bars on corenring,” 2017. .
- [5] E.Mason, “Showing a front suspension setup wit the anti-roll bar marked in red,” 2018. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Alfetta_front_suspension_antirroll.jpg.
- [6] A. Mariappa, “Design and Optimization of Anti-Roll Bar,” 2018.
- [7] Wikipedia, “Onderstuur,” [Online]. Available: [https://nl.wikipedia.org/wiki/Onderstuur_\(auto\)](https://nl.wikipedia.org/wiki/Onderstuur_(auto)).
- [8] Wikipedia, “No Title.” <https://nl.wikipedia.org/wiki/Overstuur> (accessed Mar. 03, 2021).
- [9] H. Bayrakceken, S. Tasgetiren, and K. Aslantas, “Fracture of an automobile anti-roll bar,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 13, no. 5, pp. 732–738, 2006, doi: 10.1016/j.engfailanal.2005.04.002.
- [10] Wikipedia, “Stiffness.” <https://en.wikipedia.org/wiki/Stiffness> (accessed Dec. 10, 2020).
- [11] R. C. Hibbler, *Sterkteleer*. Pearson, 2017.
- [12] Prof.dr.ir. Elke Deckers Prof. dr. Stan Wouters, *Trillingsleer: Numerieke simulatietechnieken dynamische aspecten*. .
- [13] M. M. Taha, S. M. Sapuan, M. R. Mansor, and N. A. Aziz, “Development of an Automotive Anti-Roll Bar: A Review,” *J. Soc. Automot. Eng. Malaysia*, vol. 1, no. 1, pp. 63–81, 2017.
- [14] P. E. K. Skiff, “75NI ? JOT,” no. 19, 1985.
- [15] F. Puhn, M. Your, and C. Handle, “Effective Spring Rate in Sway Bars :”
- [16] “Buiging.” <https://en.wikipedia.org/wiki/File:Deflection.svg> (accessed Dec. 10, 2020).
- [17] R. Speed, “Lightweighte adjustable anti-roll bar.” <https://rockettspeed.com/shop/chassis-and-suspension/dinan-lightweight-tubular-adjustable-anti-roll-bar-set-for-bmw-f10-m5-dinan-part-no-d120-0560/> (accessed Dec. 10, 2020).
- [18] K. Macikowski and Z. Pawelski, “Vehicle Stabilizer Bars With Variable Stiffness,” vol. 74, no. 4, pp. 83–94, 2016.
- [19] “Bladed swaybar.” <https://www.elephantracing.com/porsche/911/swaybars-for-911/quickchange-blade-style-swaybars/>.
- [20] U. S. Patent, “United States Patent : 3871965 United States Patent : 3871965,” Yeast,

- vol. 2, no. 12, pp. 4–6, 2010.
- [21] A. Smith, “(12) United States Patent,” vol. 2, no. 12, 2002.
- [22] N. C. Us, R. Ledesma, D. R. Downey, and B. Hills, “(12) United States Patent,” vol. 2, no. 12, 2005.
- [23] Chun-Bin YangJia-Bin LinWei-Lun Xu, “TWI540058B.pdf.” 2015.
- [24] I. N. E. Bloser, A. Lloyd, and G. Larry, “United States Patent (19),” no. 19, 1999.
- [25] S. Grot, “(12) United States Patent Date of Patent :,” *Syst. Method Program. a Weigh. Scale Usinga Key Signal To Enter a Program. Mode*, vol. 1, no. 12, p. 14, 2009.
- [26] B. Road and P. E. Kashnikow, “U . S . Patent Dec . 5 , 1989,” no. 19, 1989.
- [27] P. Examiner, P. N. Dickson, A. Examiner, and J. Y. Sliteris, “(12) United States Patent,” vol. 1, no. 12, 2002.
- [28] A. Link and F. O. R. A. Stabilizer, “United States Patent (19),” no. 19, 1993.
- [29] F. P. Documents, “(12) United States Patent,” vol. 2, no. 12, 2007.
- [30] “Coventionele end link.” <https://www.ebay.com/itm/Front-Sway-Bar-End-End-link-For-Audi-A4-A5-A6-A7-Q5-4M0411317-/254462268856>.
- [31] “End link met rubber.” <https://jeepgrandcherokee-2018.blogspot.com/2020/10/jeep-cherokee-sway-bar-link-bushings.html> (accessed May 21, 2021).
- [32] “End link spring.” <https://www.rockridge4wd.com/i-22622182-jks-flex-connect-sway-bar-link-kit-fits-2-5-lift-for-jeep-wrangler-jk.html> (accessed May 21, 2021).
- [33] “Version 7.1 DISC SPRINGS 1 www.spring-manual.com,” pp. 1–17.
- [34] TPA-US, “Machined springs.” <https://www.tpa-us.com/machined-springs.html> (accessed May 21, 2021).
- [35] “Magneten berekenen.” <https://www.kjmagnetics.com/calculator.repel.asp> (accessed May 21, 2021).
- [36] E. Racing, “Bladed sway bar.” <https://www.elephantracing.com/porsche/911/swaybars-for-911/quickchange-blade-style-swaybars/> (accessed May 21, 2021).
- [37] Tarret, “Bladed sway bar- tarret.” <https://www.tarett.com/images/997RBLDSBA-CUP1.png> (accessed May 21, 2021).
- [38] O. road Engineering, “Dual rate veersysteem.” <http://www.offroad-engineering.com/howduracoovw.html> (accessed May 21, 2021).
- [39] J. V. Herbert Wittel, Dieter Muhs, Dieter Jannasch, “Roloff/Matek machineonderdelen tabellenboek,” .
- [40] J. V. Herbert Wittel, Dieter Muhs, Dieter Jannasch, “Roloff/ Matek machineonderdelen theorieboek,” BOOM.
- [41] “Schematische voorstelling rechthoek.” <https://www.piping-designer.com/index.php/mathematics/geometry/plane-geometry/2343-rotated->

rectangle?fbclid=IwAR2xf6EZ08IfNIEtk1epcUFrXBgAMBgrmaP2JQPlap6iStGmej7vYi
bgK0l (accessed May 21, 2021).

- [42] “Doorbuiging berekenen.” <https://roybosch.nl/doorbuiging-berekenen/> (accessed May 21, 2021).
- [43] “Schematische voorstelling schotelveer 2.” <https://www.schnorr-group.com/en/products/disc-springs/standard-disc-springs/> (accessed May 21, 2021).
- [44] “Disc spring solver.” [Online]. Available: <https://www.dssolver.com/>.
- [45] “Bellevillesprings.” <https://www.bellevillesprings.com/disc-spring-characteristics/> (accessed May 21, 2021).

Appendix A: Patentenlijst

Nr.	Bronnummer	Titel	Patenthouder	Patentnummer	Datum indiening
1	[20]	Variable rate bushing for stabilizer bar	Meritor Light Vehicle Technology, LLC	US 6.854.750 B2	15/02/2005
2	[21]	Non-Linear spring rate sway bar bushing	Uniroyal Chemical Company, Inc.	US 6.419.214 B2	16/07/2002
3	[22]	Roll bumper stabilizer bar links	Meritor Light Vehicle Technology, LLC	US 6.866.276 B2	15/03/2005
4	[23]	Variable rigid anti-roll device	Metal Ind Res & Dev Ct	TW I540058 B	1/07/2016
5	[24]	Variable rate anti-roll bar end link	Chrysler Corporation	US 5.934.696	10/08/1999
6	[25]	Variable rate stabilizer bar	Polaris Industries Inc.	US 7.543.832 B2	9/06/2009
7	[26]	NonLinear torsion spring	Paul Castrilli	4.884.790	5/12/1989
8	[27]	Anti-roll bar with link actuator for controlling torsional rigidity	TRW Inc.	US 6.457.730 B1	1/10/2002
9	[28]	Active link for a stabilizer bar	General Motors Corporation	US 5.186.486	16/02/1993
10	[29]	Stabilizer bar with variable torsional stiffness	The Timken Company	US 7.207.574 B2	24/04/2007
11		Vehicle center section adjustable anti-roll bar	Peterson & Erb	US 6.832.772 B2	21/12/2004
12		Variable rate gripped bushing system	Visteon Global Technologies, Inc.	US 6.889.988 B2	10/05/2005
13		Anti-device bar with variable stiffness for motor vehicle	PSA Automobiles SA	FR 3.044.265 A1	1/12/2015
14		Active anti-roll bar stop for stabilizer bar	Meritor Light Vehicle Technology, LLC	US 6.651.991 B2	25/11/2003
15		Adjustable suspension stabilizer bar	Ford Global Technologies, LLC	US 6.698.767 B2	2/03/2004
16		Roll Control Actuator	Delphi Technologies, Inc.	US 6.318.737 B1	20/11/2001
17		Active roll control system	Hyundai Motor Company	US 8.596.647 B2	3/12/2013
18		Variable stiffness stabilizer device	JTEKT Corporation	US 7.931.281 B2	26/04/2011