

Afstudeerrapport BV/BmS MSEng

Uittrekkapaciteit van zelftappende schroeven in aluminium (gevel)constructies



Randy von Liebenstein

BV/BmS MSEng
Staalconstructeur Oktober 2020
ir. PJTh (Pieter) Pollemans
Technisch Adviesbureau
Pollemans BV Groesbeek

Samenvatting

Door een laag gewicht en een grote ontwerpvrijheid spelen aluminium profielen een belangrijke rol in de gevelbouw. Vaak zijn dit dunwandige profielen die zowel voor stijfheid van een gevelement moeten zorgen alsmede een sterke onderconstructie moeten vormen voor gevelpanelen die aan het gevelement bevestigd worden. De schroefverbindingen die deze gevelpanelen op hun plek houden worden door de vaak hoge windlasten hoofdzakelijk op trek belast. De geldende norm in Europa die de capaciteit van een schroefverbinding in aluminium materiaal geeft is de EN 1999-1-4. Hierin wordt echter de voorwaarde gesteld dat de diameter van de schroef tussen de 6,25 mm en 6,5 mm moet zitten (!) De meest gebruikte 4,8 mm schroef valt hier dus buiten. In dit onderzoek wordt dan ook de hoofdvraag gesteld: *“Kan de uitdrukking in de Eurocode EN1999-1-4 voor het bepalen van de uittrekcapaciteit van zelftappende of zelfborende schroeven in dunwandige aluminium onderconstructies veilig gebruikt worden voor zelftappende schroeven met een diameter van 4,8 mm?”*

Om tot een antwoord op deze vraag te komen is er om te beginnen theoretisch onderzoek gedaan naar de beschikbare normen die een uitdrukking geven voor het bepalen van de uittrekcapaciteit van schroeven. Vervolgens zijn de parameters onderzocht die invloed hebben op de capaciteit. Op basis van beide onderzoeken kan geconcludeerd worden dat met name de diameter van de schroef en dikte en (trek) sterkte van de onderconstructie de capaciteit bepalen.

De volgende stap is geweest om de schroefverbinding te simuleren met behulp van een Eindige Elementen model. Hierin is een aluminium koker met schroefdraad gemodelleerd waar vervolgens een trekkracht op is aangebracht.

Als laatste is een aantal combinaties van variabelen beproefd geworden in een trekbank. Deze proefresultaten zijn gebruikt om zowel het numerieke model te verifiëren als de toepasbaarheid van de normen te bevestigen.

Uiteindelijk kan op basis van het onderzoek geconcludeerd worden dat de uitdrukking in de EN1999-1-4 voor het bepalen van de uittrekcapaciteit van schroeven in aluminium, ook voor schroeven met een diameter van 4,8 mm veilig gebruikt kan worden. Of het gebruik hiervan tot de meest economische constructies leidt valt echter te betwijfelen.

Inhoudsopgave

01	INLEIDING	4
01.1	ALGEMEEN	4
01.2	MOTIVERING KEUZE VAN HET ONDERWERP	6
01.3	PROBLEEMSTELLING EN DOEL VAN HET ONDERZOEK	6
01.4	VERANTWOORDING VAN DE ONDERZOEKSOPZET	8
01.5	STRUCTUUR VAN HET RAPPORT	9
02	THEORETISCH ONDERZOEK	10
02.1	HUIDIGE NORMEN	10
02.2	PARAMETERS UITTREKCAPACITEIT	14
03	NUMERIEK ONDERZOEK.....	18
03.1	ALGEMEEN	18
03.2	GEBRUIKTE ELEMENTEN.....	20
03.3	GEOMETRIE EN ELEMENTENNET.....	21
03.4	MATERIAALMODELLEN.....	23
03.5	BELASTINGEN EN ONDERSTEUNINGEN	24
03.5.1	<i>Belastingen.....</i>	<i>24</i>
03.5.2	<i>Ondersteuningen.....</i>	<i>26</i>
03.6	REKENMODELLEN	27
03.7	RESULTATEN NUMERIEK ONDERZOEK.....	29
04	EXPERIMENTEEL ONDERZOEK.....	31
04.1	ALGEMEEN	31
04.2	TESTPLAN	31
04.2.1	<i>Doelstelling en beproevingsomvang</i>	<i>31</i>
04.2.2	<i>Voorspelling van de proefresultaten.....</i>	<i>32</i>
04.2.3	<i>Specificatie van proefstukken en steekproeven</i>	<i>33</i>
04.2.4	<i>Belastingsspecificaties.....</i>	<i>34</i>
04.2.5	<i>Proefopstelling.....</i>	<i>35</i>
04.2.6	<i>Metingen.....</i>	<i>36</i>
04.2.7	<i>Evaluatie, waardering en rapportering</i>	<i>37</i>
04.3	TESTRESULTATEN.....	38
04.3.1	<i>Beschrijving van bezwijkwijzen</i>	<i>38</i>

04.3.2	<i>Karakteristieke waarden en rekenwaarden uittrekcapaciteit</i>	<i>41</i>
05	VERSCHILLEN EN OVEREENKOMSTEN TUSSEN NORMEN, NUMERIEK ONDERZOEK EN EXPERIMENTEEL ONDERZOEK.....	42
06	CONCLUSIE	45
07	LITERATUURLIJST.....	47
08	FIGUREN- EN TABELLENLIJST.....	48
	BIJLAGE A SPANNING-REK DIAGRAM ALUMINIUM EN-AW 6060 T66.....	49
	BIJLAGE A.1 MATERIAALCERTIFICAAT	49
	BIJLAGE A.2 SPANNING-REK DIAGRAM	52
	BIJLAGE B PROEFOPSTELLING IN AUTOCAD.....	54
	BIJLAGE C PROEFRESULTATEN.....	55
	BIJLAGE C.1 OVERZICHT PROEFRESULTATEN	55
	BIJLAGE C.2 TESTRAPPORT	56
	BIJLAGE D ZELFREFLECTIE	71

01 Inleiding

01.1 Algemeen

Sinds jaar en dag wordt aluminium veel toegepast als materiaal voor gevelelementen, die over het algemeen bestaan uit een aluminium frame en een invulling van glas en aluminium plaatmateriaal. Deze gevelelementen worden onder gecontroleerde omstandigheden samengesteld in de fabriek en vervolgens gemonteerd aan de vloerrand van het gebouw door middel van speciale bevestigingssystemen die tot op de millimeter nauwkeurig gesteld kunnen worden. De profielen waaruit het frame van een gevelelement is opgebouwd worden geëxtrudeerd, waardoor er veel ontwerpvrijheid is en er projectspecifieke oplossingen gecreëerd kunnen worden. Aluminium is daarnaast een duurzaam materiaal en combineert een laag gewicht met een relatief hoge sterkte.

De verbindingen binnen een gevelelement kunnen op diverse manieren worden gerealiseerd. De 'hoofd'-bevestiging die voor de verbinding naar de hoofd draagconstructie zorgt wordt, vanwege de hoge belastingen, echter altijd door middel van een metrische boutverbinding uitgevoerd. De invulpanelen kunnen op verschillende manieren aan het aluminium frame bevestigd worden. Deze verbinding moet worden afgestemd op de toepassing van het gevelpaneel en de eisen aan de onderconstructie. Enerzijds moet de verbinding de optredende krachten veilig kunnen overbrengen naar de aluminium onderconstructie. Anderzijds moet de onderconstructie opgebouwd uit aluminium extrusieprofielen zo dun mogelijk worden uitgevoerd om materiaal te besparen. Vaak betreft het hoogbouw met vele vierkante meters aan geveleoppervlak en is elke millimeter die gespaard kan worden een behoorlijke uiteindelijke besparing in gewicht en materiaalkosten.



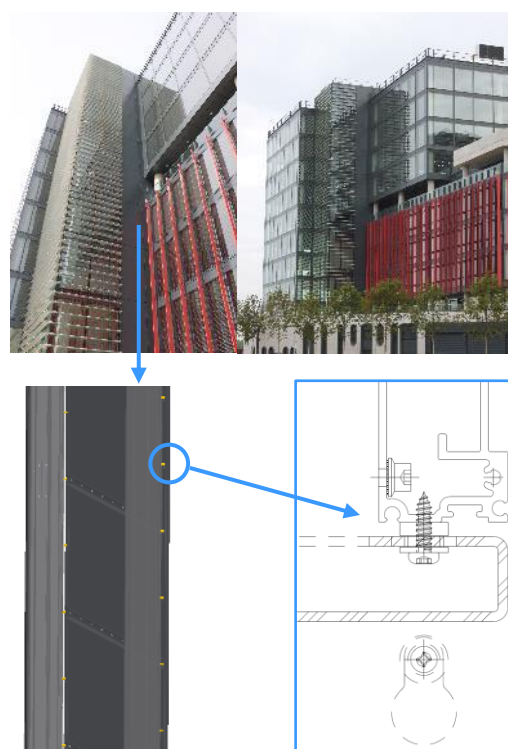
Figuur 01.1 Concept elementgevel

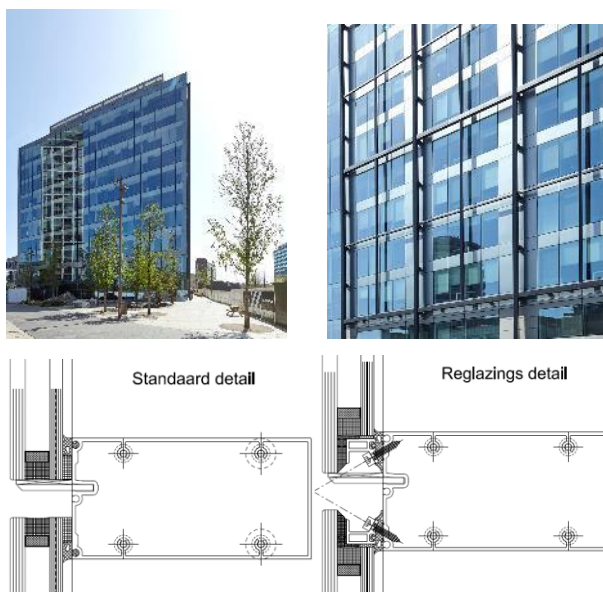
In de basis worden verbindingen met zelftappende of zelfborende schroeven zelden toegepast, vanwege de lage capaciteit van de verbinding en een bepaalde mate van onzekerheid. In de regel geldt echter de eis dat invuldelen individueel vervangbaar moeten zijn zonder dat een heel gevelelement gedemonteerd hoeft te worden. In die toepassing, na vervanging of met het oog op vervanging van invuldelen, zien we dat zelftappende of zelfborende schroeven de voorkeur krijgen boven de eerder genoemde bevestigingsmethoden. Een zelftappende schroef snijdt draad door materiaal te verplaatsen. Een voorboorgat is hier altijd noodzakelijk. In geval van een zelfborende schroef wordt geboord en getapt in slechts één handeling. In het vervolg van dit rapport wordt met schroef of schroefverbinding alleen zelftappende schroeven bedoeld.

Hieronder zijn een tweetal recente toepassingen gegeven waarin zelftappende schroeven gebruikt zijn geworden.

Plaatwerkgevel met inhangdetail (IQL S9 - London)

Gevelbeplating dient vrijwel altijd onzichtbaar te worden bevestigd, dat wil zeggen dat geen schroeven of bouten zichtbaar mogen zijn. Een oplossing om dit te realiseren is door het inhangen van de beplating door middel van een "sleutelgat"-bevestiging. Hierbij wordt een bus op het frame geschroefd waar vervolgens de beplating overheen wordt gehangen. Het eigengewicht van de platen wordt vaak apart afgesteund door deze onder op een profiel te zetten. Alle belastingen uit het vlak, waarbij windbelasting in de regel maatgevend is, moeten door de schroefverbinding worden opgenomen. Het is dus van groot belang dat dit een veilige verbinding is, maar door de vaak grote repetitie ook een economische oplossing is.





Herbeglazingsdetail (RuskinSquare - London)

Een veelgebruikte toepassing van een verbinding met zelftappers is in geval van herbeglazing (reglazing) van een structureel verlijmd ruit. Aangezien een kitvoeg onder gecontroleerde omstandigheden moet worden aangebracht, mag deze handeling vaak niet op de bouw gebeuren. Er wordt dan in de fabriek een kader op het glas verlijmd. Vervolgens wordt het glas met kader op de bouw met zelftappers aan het gevelframe geschroefd. Net als in het vorige voorbeeld wordt de windbelasting op de glasruit opgenomen door de schroef-verbindingen, en is het dus van groot belang dat deze veilig doch economisch worden ontworpen.

In bovenstaande voorbeelden maar ook in algemene zin, worden de meest voorkomende schroefverbindingen in de gevel hoofdzakelijk belast op trek. Afschuifkrachten die meestal worden veroorzaakt door eigen gewicht, worden apart afgedragen en hoeven niet door de schroefverbinding te worden opgenomen. Dit rapport behandelt dan ook alleen trekkrachten en de trekcapaciteit van de schroefverbinding.

01.2 Motivering keuze van het onderwerp

De reden om voor dit onderwerp te kiezen is enerzijds de frequentie waarop ik dit soort schroefverbindingen in mijn dagelijkse praktijk voorbij zie komen, en anderzijds de mate van onzekerheid die er is over de trekcapaciteit van zo'n schroefverbinding en het gebrek aan een eenduidige formule in de norm hiervoor. Vaak wordt om die reden de uittrekcapaciteit van de schroefverbinding ontleend aan testresultaten. Om dit niet voor iedere verbinding te hoeven doen is het dus van belang dat de Eurocode met een algemeen toepasbare formule komt om de capaciteit te bepalen, een die veilige resultaten geeft en niet onnodig conservatief is.

01.3 Probleemstelling en doel van het onderzoek

De huidig geldende norm in Europa voor aluminium constructies deel 4, Eurocode EN 1999-1-4 [1], geeft een uitdrukking voor het bepalen van de uittrekcapaciteit van zelftappende of zelfborende schroeven van staal of roestvast staal in bevestigingsmateriaal van aluminium of staal. Hierin is de diameter van de schroef de enige schroef gerelateerde parameter in de

uitdrukking, naast de dikte en treksterkte van het bevestigingsmateriaal. Tevens geldt de voorwaarde dat de diameter van de schroef tussen de 6,25 mm en 6,5 mm moet zitten, wat betekent dat alleen 6,3 mm schroeven binnen het toepassingsgebied van deze normformule vallen. Met het oog op de standaardisatie van verbindingen wordt in mijn dagelijkse werk echter gestreefd naar het zoveel mogelijk toepassen van een zelfde type schroef met een diameter van 4,8 mm, om fouten in de praktijk te voorkomen en kosten te besparen.

Naast de diameter van de schroef zijn er bovendien meerdere parameters te bedenken die invloed zullen hebben op het falen van de schroefverbinding, zoals de lengte van de schroef, de voorboordiameter, de indraaisnelheid en het aandraaimoment van de schroef. Daarnaast geeft de staalnorm Eurocode EN 1993-1-3 [2] voor koudgeformde dunwandige profielen en platen ook een formule voor het bepalen van de uittrekkapaciteit die afwijkt van de formule uit de eerder genoemde aluminium norm. De afwijking in uittrekkapaciteit bedraagt zo'n 15% voor een 4,8 mm schroef in 3 mm 6063 T6 aluminium (EN1999-1-4: $F_{0,Rd} = 1860$ N en EN1993-1-3: $F_{0,Rd} = 1610$ N).

Conclusie is dat de bestaande formules niet algemeen toepasbaar zijn en geen betrouwbare resultaten geven, mede doordat niet alle aspecten en parameters worden meegenomen die voor falen van de verbinding kunnen zorgen. Hierdoor is het vaak nodig om testen uit te voeren om de capaciteit van de schroefverbinding te bepalen.

Vraag is of de huidig geldende norm voor verbindingen in dunwandig aluminium, de EN1999-1-4, wel het totale scala aan schroeftoepassingen dekt. Aan de ene kant is het de vraag of de formules geen onveilig resultaat geven? Aan de andere kant, zijn we niet te conservatief aan het rekenen wat leidt tot niet-economische constructies?

De hoofdvraag en doel van dit onderzoek luidt dan ook: *“Kan de formule uit de Eurocode EN1999-1-4 voor het bepalen van de uittrekkapaciteit van zelftappende of zelfborende schroeven in dunwandige aluminium onderconstructies veilig gebruikt worden voor zelftappende schroeven met een diameter van 4,8 mm?”*

01.4 Verantwoording van de onderzoeksopzet

Om te komen tot een antwoord op de hoofdvraag zullen een aantal deelvragen moeten worden beantwoord:

1. *Welke normen of richtlijnen zijn er naast de geldende Eurocode nog meer voor handen om de uittrekkapaciteit van een schroefverbinding in dunwandig (aluminium) materiaal te bepalen?*
2. *Welke parameters van de verbinding hebben invloed op de uittrekkapaciteit en hoe groot is deze invloed?*
3. *Welk resultaat geeft een numeriek onderzoek in de vorm van een Eindige Elementen Analyse voor de uittrekkapaciteit?*
4. *Welk resultaat voor de uittrekkapaciteit geeft een experimenteel onderzoek in de vorm van trekproeven?*

Om de eerste twee deelvragen te kunnen beantwoorden zal er literatuuronderzoek gedaan worden naar relevante normen en richtlijnen en naar de parameters die invloed kunnen hebben op de capaciteit van de schroefverbinding. Om niet verzeild te raken in een te theoretisch onderzoek zullen wel alle mogelijke parameters worden benoemd, maar slechts op hoofdlijnen worden behandeld. De invloed van een parameter wordt namelijk ook later in het proces duidelijk aan de hand van de resultaten van het experimenteel onderzoek.

Het numeriek onderzoek wordt gedaan door een Eindige Elementen Analyse in het programma Straus7. Vanwege de complexiteit en detaillering van het model is besloten dat er één configuratie wordt gemodelleerd, namelijk een 4,8 mm schroef in 3 mm aluminium met een voorboordiameter van 4 mm. Het experimenteel onderzoek zal plaatsvinden in samenwerking met Scheldebouw en een extern bedrijf die de fysieke testen zullen uitvoeren. Voor de trekproeven vindt de volgende afbakening plaats van het aantal variabelen dat wordt onderzocht:

- Diameter schroef: 6,3 mm en 4,8 mm
- Plaatdikte materiaal: 2 mm, 3 mm en 4 mm
- Voorboordiameter: drietal diameters

01.5 Structuur van het rapport

De in de vorige paragrafen gedefinieerde hoofd- en deelvragen worden beantwoord door het volgen van de volgende procedure.

In hoofdstuk 2 worden de beschikbare normen besproken en zal er een vergelijking worden gemaakt tussen de verschillende uitdrukkingen die in de normen gegeven zijn. Ook worden in dit hoofdstuk de parameters onderzocht die invloed hebben op het uiteindelijk falen van de schroefverbinding door het uittrekken van de schroef uit het materiaal, met als doel om verderop in het onderzoek de focus te kunnen leggen op die parameters die de grootste invloed hebben.

In hoofdstuk 3 is een Eindige Elementen Model ontwikkeld om het gedrag van de schroefverbinding in het aluminium materiaal ten gevolge van een trekkracht te simuleren. De resultaten hiervan worden gebruikt om het structurele gedrag van de verbinding nader te beschrijven.

In hoofdstuk 4 worden de resultaten gepresenteerd van een serie trekproeven op schroefverbindingen. Deze gegevens worden gebruikt om het Eindige Elementen model te verifiëren en om een waardeoordeel te kunnen doen over de verschillende rekenregels die voorhanden zijn.

Hoofdstuk 5 zal een overzicht geven van de verschillen en overeenkomsten tussen de normen, het numeriek onderzoek en het experimenteel onderzoek.

Hoofdstuk 6 tenslotte bevat een conclusie van het werk waarin de hoofdvraag wordt beantwoord.

02 Theoretisch onderzoek

02.1 Huidige normen

In dit hoofdstuk worden de rekenregels behandeld voor het bepalen van de uittrekcapaciteit, zoals deze in de verschillende normen beschreven staan. De uittrekcapaciteit wordt voor elk van de rekenregels bepaald en uitgewerkt op basis van de volgende uitgangspunten:

- Diameter van de schroef $d = 4,8 \text{ mm}$
- Dikte van het materiaal $t_{sup} = 3,0 \text{ mm}$
- Vloeigrens materiaal $f_0 = 160 \text{ MPa}$
- Treksterkte materiaal $f_u = 215 \text{ MPa}$

EN 1999-1-4

De EN 1999 (deel 1-4) is de huidig geldende norm voor aluminium constructies in Europa en dient voor Europese projecten gevolgd te worden voor het bepalen van de uittrekcapaciteit van schroeven in aluminium achterconstructies. De uittrekcapaciteit wordt beschreven in hoofdstuk 8.3.3.2 van de EN 1999-1-4 door middel van onderstaande uitdrukking 2.1:

$$F_{o,Rd} = 0,95 * f_{u,sup} * \sqrt{t_{sup}^3 * d} / \gamma_{M3} \quad (2.1)$$

Opmerkelijk is dat deze uitdrukking slechts geldig is voor een diameter van de schroef tussen de 6,25mm en 6,5mm, waardoor alleen 6,3mm schroeven kunnen worden berekend.

Op basis van de eerder genoemde uitgangspunten levert dit de volgende capaciteit op:

$$f_{u,sup} = 215 \text{ MPa}$$

$$t_{sup} = 3.0 \text{ mm}$$

$$d = 4.8 \text{ mm}$$

$$\gamma_{M3} = 1.25$$

$$F_{o,Rd} = 0,95 * 215 * \sqrt{3.0^3 * 4.8} / 1.25 = \mathbf{1860 \text{ N}}$$

EN 1993-1-3

De uittrekcapaciteit wordt beschreven in hoofdstuk 8.3 tabel 8.2 van de EN 1993-1-3 aan de hand van onderstaande uitdrukkingen 2.2 en 2.3:

$$\text{If } t_{sup} / P < 1: \quad F_{o,Rd} = 0,45 * d * t_{sup} * f_{u,sup} / \gamma_{M2} \quad (P \text{ is de spoed}) \quad (2.2)$$

$$\text{If } t_{sup} / P \geq 1: \quad F_{o,Rd} = 0,65 * d * t_{sup} * f_{u,sup} / \gamma_{M2} \quad (2.3)$$

Op basis van de eerder genoemde uitgangspunten levert dit de volgende capaciteit op:

$$f_{u,sup} = 215 \text{ MPa}$$

$$t_{sup} = 3.0 \text{ mm}$$

$$d = 4.8 \text{ mm}$$

$$\gamma_{M2} = 1.25$$

$$P = 1.6 \text{ mm} \rightarrow t_{sup}/P = 1.9 \geq 1:$$

$$F_{o,Rd} = 0,65 * 4.8 * 3.0 * 215 / 1.25 = \mathbf{1610 \text{ N}}$$

AAMA TIR A9

Conclusies van onderzoek en testresultaten naar de uittrekwaarden van schroeven in aluminium hebben tot een tweetal typen vergelijkingen geleid binnen de AAMA TIR A9 [3] hoofdstuk 22.0:

- 1) Op basis van vloeigrens: houdt rekening met rekken en buigen van de gat-omtrek in "dun" aluminium
- 2) Op basis van treksterkte: houdt rekening met afschuiving van de (interne) draad in "dik" aluminium

Voor een plaatdikte van 3,0 mm gelden de formules voor dunne platen ($1,5 \text{ mm} < t < 3,2 \text{ mm}$):

$$P_{NOT} = K_M * \pi * d * t * f_0 / \sqrt{3} \quad (2.4)$$

Op basis van de eerder genoemde uitgangspunten levert dit de volgende capaciteit op:

$$K_M = 0.95 * 0.7 = 0.665 \quad \text{voor } 2,0 \text{ mm} \leq t \leq 3,2 \text{ mm}$$

$$f_0 = 160 \text{ MPa}$$

$$t_{sup} = 3.0 \text{ mm}$$

$$d = 4.8 \text{ mm}$$

$$P_{NOT} = 0.665 * \pi * 4.8 * 3.0 * 160 / \sqrt{3} = 2779 \text{ N}$$

$$SF = 3 \quad \text{voor schroeven met diameter} \leq 6,3 \text{ mm}$$

$$P_A = P_{NOT} / SF = 926 \text{ N}$$

Uittrekwaarden die verkregen worden uit de Amerikaanse normen zijn niet één-op-één te vergelijken met de eerder berekende waarden op basis van de Eurocode. De Amerikaanse norm hanteert een andere veiligheidsfilosofie op basis van Allowable Stress Design (ASD) waarbij alle veiligheid aan de materiaalkant zit. Om toch een vergelijking te kunnen maken is de berekende uittrekwaarde (ASD) vermenigvuldigd met de veiligheidsfactor voor veranderlijke belasting γ_Q (=1.5) volgens de Eurocode:

$$“P_{Rd}” = P_A * \gamma_Q = \mathbf{1389 \text{ N}}$$

Aluminum Design Manual (2015)

De uittrekcapaciteit wordt beschreven in hoofdstuk J.5.4.1.1 van de ADM 2015 [4] aan de hand van onderstaande uitdrukking 2.5:

$$P_{NOT} = K_s * d * t_{sup} * f_0 \quad \text{voor } 1,5 \text{ mm} \leq t \leq 3,0 \text{ mm} \quad (2.5)$$

Op basis van de eerder genoemde uitgangspunten levert dit de volgende capaciteit op:

$$K_s = 1.2 \quad \text{voor } 2,0 \text{ mm} \leq t \leq 3,0 \text{ mm}$$

$$f_0 = 160 \text{ MPa}$$

$$t_{sup} = 3.0 \text{ mm}$$

$$d = 4.8 \text{ mm}$$

$$R_n = 1.2 * 4.8 * 3.0 * 160 = 2765 \text{ N}$$

$$\Omega = 3$$

$$R_A = R_n / \Omega = 922 \text{ N}$$

$$“P_{Rd}” = P_A * \gamma_Q = \mathbf{1383 \text{ N}}$$

Overzicht normen

In onderstaande tabel 02.1 zijn de eerder berekende uittrekwaarden op basis van de verschillende normen weergegeven en aangevuld met waarden voor 6,3 mm schroeven en voor 2 mm en 4 mm plaatdikte.

Tabel 02.1 Berekende uittrekwaarden volgens normen

Schroefdiameter [mm]	Plaatdikte [mm]	Uittrekwaarden [N] volgens norm (rekenwaarden)			
		EN-1999-1-4	EN-1993-1-3	AAMA TIR A9	ADM 2015
4,8	2,0	1013	1073	926	922
	3,0	1860	1610	1389	1383
	4,0	2864	2147	2414*	2415**
6,3	2,0	1160	1409	1216	1210
	3,0	2131	2113	1824	1814
	4,0	3281	2817	3114*	3115**

* Gebaseerd op de formules voor de overgang tussen dunne en dikke platen:

$$P_{NOT} = \frac{0.665 \cdot \pi}{\sqrt{3}} * d * f_0 * (6.35 - t) + \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right) * n * A_{TSI} * f_u * (t - 3.175) = 4828N \quad , \text{ waarbij:}$$

$$d = 4.8 \text{ mm}$$

$$f_0 = 160 \text{ MPa}$$

$$f_u = 215 \text{ MPa}$$

$$t = 4.0 \text{ mm}$$

$$P = 1.6 \text{ mm}$$

P is de spoed (zie 02.2)

$$n = \frac{1}{p} = 0.625$$

n is aantal draad per millimeter

$$DS_{min} = 4.65 \text{ mm}$$

DSmin is de minimale buitendiameter (zie 02.2)

$$EN_{max} = 3.58 \text{ mm}$$

ENmax is de maximale kerndiameter (zie 02.2)

$$A_{TSI} = \pi * (DS_{min}) * \left(\frac{1}{2n} + 0.57735(DS_{min} - EN_{max})\right) = 20.71 \text{ mm}^2$$

$$SF = 3$$

voor schroeven met diameter $\leq 6.3 \text{ mm}$

$$P_A = P_{NOT} / SF = 1609 \text{ N}$$

$$P_{Rd} = P_A * \gamma_Q = 2414 \text{ N}$$

$$** R_n = 1.2 * d * f_0 * (6.35 - t) + 1.16 * n * A_{TSI} * f_u * (t - 3.175) \text{ voor } 3.0\text{mm} \leq t \leq 6.3\text{mm}$$

Op basis van de hierboven genoemde uitgangspunten levert dit de volgende capaciteit op:

$$R_n = 1.2 * 4.8 * 160 * (6.35 - 4.0) + 1.16 * 0.625 * 20.71 * 215 * (4.0 - 3.175) = 4829\text{N}$$

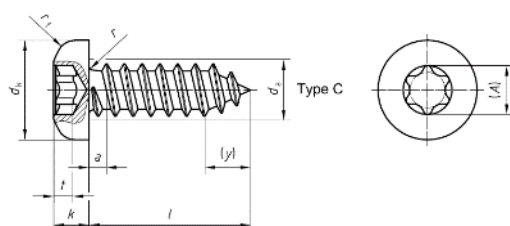
$$P_A = P_{NOT}/SF = 1610\text{ N}$$

$$“P_{Rd}” = P_A * \gamma_Q = \mathbf{2415\text{ N}}$$

02.2 Parameters uittrekcapaciteit

Diameter van de schroef

De schroeven die behandeld worden in dit onderzoek zijn ISO 14585 [5] Pancilinderplaat Schroeven met binnen zeskant. De geometrische eigenschappen van de schroef zijn hieronder weergegeven.



Tabel 02.2 Dimensies schroef ISO 14585

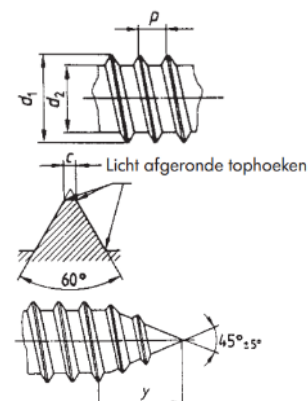
Thread sizes		ST2,9	ST3,5	ST4,2	ST4,8	ST5,5	ST6,3
p^a		1,1	1,3	1,4	1,6	1,8	1,8
a^b		1,1	1,3	1,4	1,6	1,8	1,8
d_a	max.	3,5	4,1	4,9	5,6	6,3	7,3
d_k	nom. = max.	5,6	7,00	8,00	9,50	11,00	12,00
	min.	5,3	6,64	7,64	9,14	10,57	11,57
k	nom. = max.	2,40	2,60	3,1	3,7	4,0	4,6
	min.	2,15	2,35	2,8	3,4	3,7	4,3
r	max.	0,1	0,1	0,2	0,2	0,25	0,25
r_f	$\approx$	5	6	6,5	8	9	10
y ref. ^c	Type C	2,6	3,2	3,7	4,3	5	6,0
	Type F	2,1	2,5	2,8	3,2	3,6	3,6
	Type R	—	2,7	3,2	3,6	4,3	5
Hexalobular socket	Socket No.	10	15	20	25	25	30
	A ref.	2,8	3,35	3,95	4,5	4,5	5,6
	t max.	1,27	1,40	1,80	2,03	2,03	2,42
	min.	1,01	1,14	1,42	1,65	1,65	2,02

In bovenstaande tabel betreft P de spoed, oftewel de verplaatsing van de schroefdraad bij één omwenteling. Dit is een belangrijke maat om te bepalen hoeveel lengte schroefdraad in het materiaal zit en moet worden afgeschoven. Naast de spoed zijn ook de buiten- en binnendiameter van de schroef van belang. De draad is beschreven in de ISO 1478 [6],

onderstaande tabel is daaruit afkomstig. Hierin zijn de buitendiameter d_1 en binnendiameter d_2 af te lezen.

Tabel 02.3 Dimensies schroefdraad ISO 1478

Schroefdraadgrootte		ST 3,9	ST 4,2	ST 4,8	ST 5,5	ST 6,3
P	≈	1,3	1,4	1,6	1,8	1,8
d_1	max.	3,91	4,22	4,8	5,46	6,25
	min.	3,73	4,04	4,65	5,28	6,03
d_2	max.	2,92	3,10	3,58	4,17	4,88
	min.	2,77	2,95	3,43	3,99	4,70
d_3	max.	2,67	2,84	3,30	3,86	4,55
	min.	2,51	2,69	3,12	3,68	4,55
c	max.	0,1	0,1	0,15	0,15	0,15



De spoed, buitendiameter en kerndiameter bepalen dus het afschuifoppervlak van de verbinding. Zoals in hoofdstuk 02.1 al te zien is geweest geeft de Amerikaanse norm daar specifieke rekenregels voor, voor afschuiving van de draad in “dik” aluminium.

Lengte van de schroef

In de tabel op de vorige pagina zegt de totale lengte van de schroef l minus de maat y iets over de lengte van de schroef die in het materiaal wordt gedraaid. Hoe langer deze afstand is hoe meer warmte wordt opgebouwd in de verbinding. Voor de meeste legeringen vindt er een afname van de 0,2% rekgrens plaatst vanaf een temperatuur van 150°C. De breukrek daarentegen neemt voor de meeste legeringen juist toe bij een toename van de temperatuur tot zo'n 400°C (Maljaars, 2005 [7]). Voor temperaturen hoger dan 400°C bestaan onderzoeken die zowel een toename als een afname van de breukrek laten zien. Door de relatief korte inschroeftijd zal de temperatuurtoename minimaal zijn en wordt er gerekend met de materiaaleigenschappen bij kamertemperatuur.

Dikte materiaal

De invloed van de dikte van het materiaal op de uittrekcapaciteit is significant. Dit blijkt ook uit de formules die in de verschillende normen te vinden zijn. In de EN1999-1-4 wordt de dikte zelfs tot de macht drie meegerekend. Hoe dikker het materiaal is waar de schroef wordt ingedraaid, hoe meer draad van de schroef in het materiaal zit en dus hoe meer materiaal moet worden afgeschoven. De Amerikaanse normen maken onderscheid tussen “dunne” en

“dikke” platen met elk een eigen faalgedrag. De Europese normen doen dit echter niet en komen met algemene formules.

Legering aluminium

Het spreekt voor zich dat een sterkere aluminium legering een direct effect heeft op de sterkte van de verbinding. De meest gangbare legeringen in de praktijk zijn EN AW-6063 T6 voor “custom-made” extrusies en EN AW-6060 T66 voor standaard profielen. Beide legeringen hebben vergelijkbare sterkte eigenschappen.

Tabel 02.4 Sterkte eigenschappen aluminium legeringen

EN-AW 6063 T6	$f_0 = 170 \text{ MPa}$	$f_u = 215 \text{ MPa}$	$t \leq 10\text{mm}$
EN-AW 6060 T66	$f_0 = 160 \text{ MPa}$	$f_u = 215 \text{ MPa}$	$t \leq 3\text{mm}$

Zoals in de tabel al te zien is heeft EN-AW 6060 T66 een net iets lagere vloeigrens dan EN-AW 6063 T6. In het vervolg van dit onderzoek zal dan ook de legering 6060 T66 gebruikt worden. Om er zeker van te zijn dat in de berekeningen en rekenmodellen met dezelfde materiaaleigenschappen wordt gerekend als de trekproeven, worden materiaalcertificaten opgevraagd bij de proefstukken.

Voorboordiameter in het plaatmateriaal

De voorboordiameter wordt gekozen volgens de DIN 7975 [8] en is afhankelijk van de diameter van de schroef, de dikte van het materiaal en de (trek)sterkte van het materiaal. Deze voorboordiameters vormen een uitgangspunt, maar worden uitgebreid met een voorboordiameter plus en min 0,1mm om toleranties in de praktijk mee te nemen.

Tabel 02.5 Voorboordiameters DIN 7975

	Kerngatdiameter d _b voor plaatschroeven ST 4,8											Kerngatdiameter d _b voor plaatschroeven ST 6,3									
Plaatdikte	Werkstof-treksterkte R _m van het plaatmateriaal N/mm ²										Plaatdikte	Werkstof-treksterkte R _m van het plaatmateriaal N/mm ²									
s	100	150	200	250	300	350	400	450	500	s	100	150	200	250	300	350	400	450	500		
1,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,7	3,8	3,9	3,9	1,8	4,9	4,9	4,9	4,9	5,0	5,2	5,3	5,3	5,4		
1,7	3,6	3,6	3,6	3,6	3,7	3,8	3,9	3,9	4,0	1,9	4,9	4,9	4,9	5,0	5,1	5,2	5,3	5,4	5,4		
1,8	3,6	3,6	3,6	3,6	3,8	3,8	3,9	4,0	4,0	2,0	4,9	4,9	4,9	5,1	5,2	5,3	5,4	5,4	5,5		
1,9	3,6	3,6	3,6	3,7	3,8	3,9	3,9	4,0	4,0	2,2	4,9	4,9	5,0	5,2	5,3	5,4	5,5	5,5	5,6		
2,0	3,6	3,6	3,6	3,8	3,9	3,9	4,0	4,0	4,1	2,5	4,9	5,0	5,2	5,4	5,4	5,5	5,6	5,6	5,6		
2,2	3,6	3,6	3,7	3,9	3,9	4,0	4,0	4,1	4,1	2,8	4,9	5,2	5,3	5,5	5,5	5,6	5,6	5,7	5,7		
2,5	3,6	3,7	3,9	4,0	4,0	4,1	4,1	4,1	4,2	3,0	4,9	5,3	5,4	5,5	5,6	5,7	5,7	5,7	5,7		
2,8	3,6	3,8	4,0	4,0	4,1	4,1	4,2	4,2	4,2	3,5	5,2	5,4	5,5	5,6	5,7	5,7	5,7	5,7	5,8		
3,0	3,7	3,9	4,0	4,1	4,1	4,2	4,2	4,2	4,2	4,0	5,3	5,5	5,6	5,7	5,7	5,7	5,8	5,8	5,8		
3,5	3,8	4,0	4,1	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,3	4,5	5,5	5,6	5,7	5,7	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8		
4,0	4,0	4,1	4,2	4,2	4,2	4,2	4,3	4,3	4,3	5,0	5,5	5,7	5,7	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8		

Hoe kleiner de voorboordiameter hoe meer materiaal draad snijdt en dus hoe hoger de capaciteit van de verbinding wordt, maar ook hoe moeilijker het inschroeven wordt met mogelijke breuk van de schroef tot gevolg. In de praktijk is het zaak om daar een optimale balans tussen te vinden.

Indraaisnelheid

Wat betreft de indraaisnelheid geldt in principe hetzelfde als voor de lengte van de schroef. De combinatie van schroeflengte met een bepaalde indraaisnelheid zal zorgen voor temperatuuropbouw in het materiaal. Evenals voor de lengte van de schroef is ook hier de verwachting dat deze niet de temperatuur zal bereiken waarop de structuur van het aluminium dusdanig verandert dat er verzwakking van het materiaal en dus verzwakking van de verbinding optreedt.

Aandraaimoment

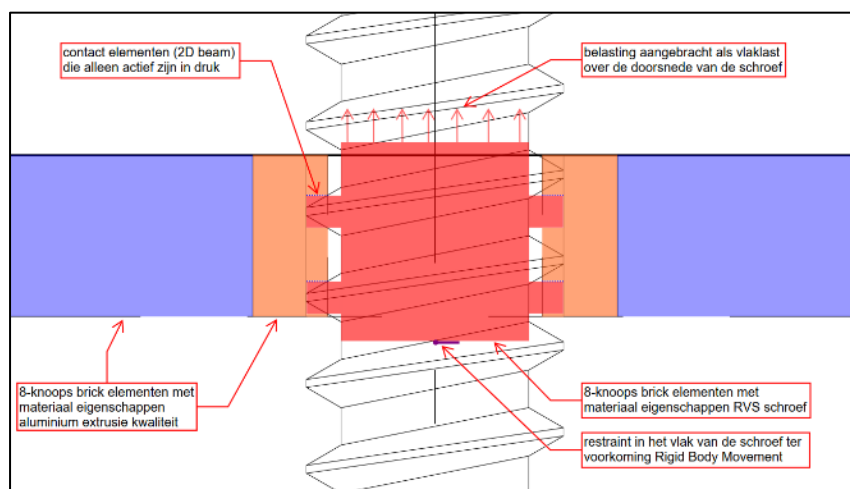
Een aandraaimoment zorgt voor een bepaalde voorspanning in de verbinding. Dit kan in de praktijk de daadwerkelijke capaciteit vergroten. Dit onderzoek focust zich echter op de uittrekcapaciteit van de schroef in het materiaal, waardoor het effect van voorspanning uitgesloten dient te worden.

03 Numeriek onderzoek

03.1 Algemeen

Het doel van het numerieke onderzoek is het zo realistisch mogelijk benaderen van het (faal) gedrag van de schroefverbinding met behulp van een Eindige Elementen model. Wanneer dit mogelijk is, is het niet nodig om voor toekomstige verbindingen uitgebreide testen uit te voeren en volstaat het maken van een model. Allereerst worden de twee modellen beschreven die om diverse redenen zijn afgefallen, maar hebben geleid tot het uiteindelijke model. Deze modellen worden met hun voor- en nadelen hieronder beschreven.

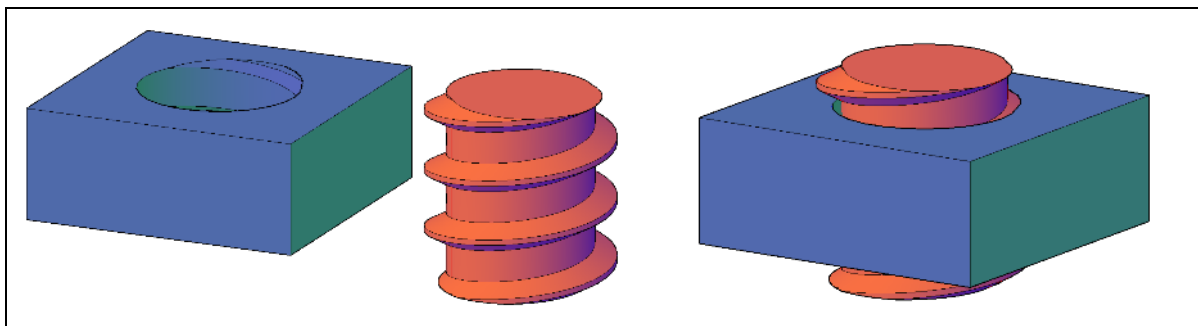
Het eerste model is gericht op een eenvoudige en correcte simulatie van de contactdruk tussen schroef en onderconstructie. Doordat het model in de basis is opgebouwd uit 2D-plaatelementen die vervolgens in de hoogte zijn uitgetrokken, komen knopen van schroef en aluminium onderconstructie exact overeen. De contact-elementen (1D beam) die de knopen verbinden worden zuiver axiaal belast.



Figuur 03.1 Conceptschets Eindige Elementen model 1

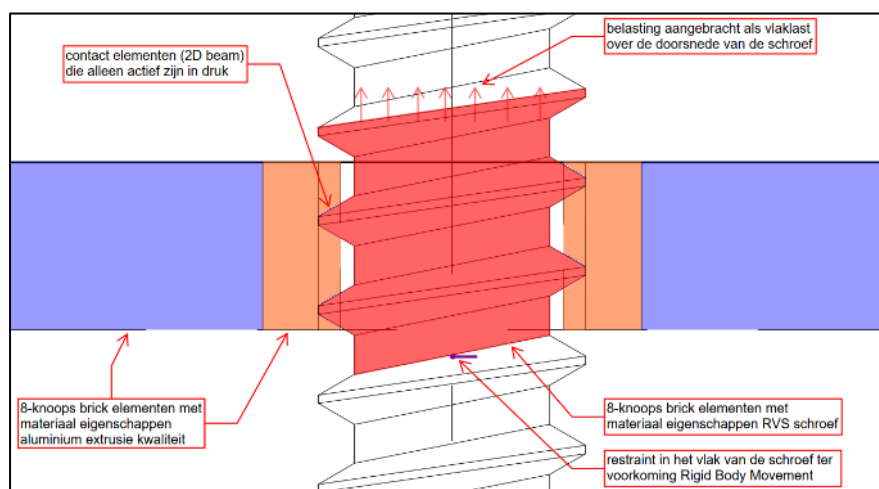
De geometrie van de verbinding is echter niet exact conform werkelijkheid. Doordat het model is opgebouwd vanuit een 2D-vlak, kan de hoek van de draad niet juist gemodelleerd worden. Er vindt alleen contactdruk plaats parallel aan de schroefas, zonder krachten in het vlak van de onderconstructie mee te nemen. Dit heeft nadelige gevolgen voor de nauwkeurigheid van het bepalen van de uiteindelijke bezwijklast.

Het tweede model bestaat uit de schroef met buitendraad en de aluminium onderconstructie met binnendraad als twee aparte 3D-onderdelen die vanuit Autocad zijn geëxporteerd en waarbij de krachtsoverdracht plaatsvindt door middel van 1D contact-elementen.



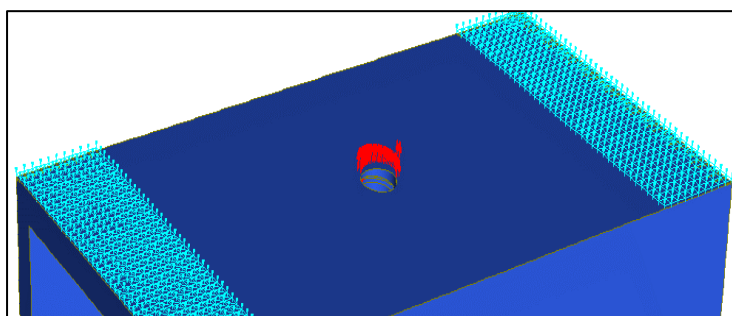
Figuur 03.2 Autocad 3D-onderdelen

Doordat het twee verschillende onderdelen zijn wordt het elementennet ook per onderdeel gegenereerd. Dit heeft het nadelige gevolg dat knopen van beide onderdelen niet netjes uitlijnen. De invloed van de wrijving tussen schroef en onderconstructie wordt verwacht minimaal te zijn, waardoor de krachtsoverdracht enkel en alleen wordt beschouwd in de vorm van contactdruk. De contact-elementen tussen de knopen van schroef en onderconstructie zijn echter bijzonder lastig tot niet aan te brengen, zodanig dat deze exact haaks op het contactvlak van de draad staan. De contact-elementen worden automatisch gemodelleerd door de knopen van de schroefdraad te extruderen in de richting loodrecht op het draadvlak van de aluminium onderconstructie. Of het einde van een contact-element ook uitkomt op een knoop van de onderconstructie is echter volledig gebaseerd op toeval, aangezien de elementennetten totaal willekeurig zijn gevormd. Er zullen dus slechts een aantal contact-elementen ook daadwerkelijk aan beide kanten met een knoop verbonden zijn. Dit heeft tot gevolg dat de krachtsoverdracht tussen schroef en onderconstructie plaatsvindt via slechts die enkele knopen, waardoor er zeer lokale piekspanningen optreden ter plaatse van die knopen die het gedrag van de verbinding verstoren en uiteindelijk tot divergeren leiden.



Figuur 03.3 Conceptschets Eindige Elementen model 2

Uiteindelijk is ervoor gekozen om alleen de aluminium onderconstructie te modelleren. Door het grote verschil in sterkte en stijfheid tussen de roestvast stalen schroef en de aluminium onderconstructie is het namelijk met grote zekerheid te verwachten dat de verbinding faalt ter plaatse van het aluminium. Dit uiteindelijke model zal in het vervolg van dit hoofdstuk uitvoerig worden beschreven wat betreft de gebruikte typen elementen, de geometrie en het elementennet, de materiaalmodellen, belastingen en ondersteuning en de rekenmodellen. Tot slot worden de resultaten van het numeriek onderzoek gegeven.



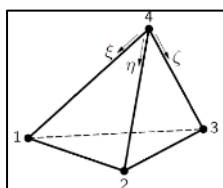
Figuur 03.4 Eindige Elementen model 3

Vanwege de complexiteit en arbeidsintensiviteit is er voor gekozen om één configuratie te modelleren, namelijk een 4,8 mm schroef in 3 mm wanddikte en 4 mm voorboordiameter. Door uiteindelijk de resultaten van dit numeriek model te vergelijken met de testresultaten behorende bij dezelfde parameters, wordt een voldoende betrouwbare verificatie van het model behaald.

Alle Eindige Elementen berekeningen zijn uitgevoerd met behulp van het programma Straus7 [9].

03.2 Gebruikte elementen

Het volledige Eindige Elementen model bestaat uit “TETRA4”-elementen. Dit zijn tetraëder vormige volume-elementen met vier knopen. Elke knoop heeft drie vrijheidsgraden in de drie translatie richtingen. Verplaatsingen tussen de knopen zijn beschreven door middel van een lineaire relatie. Dit betekent dat rekken tussen knopen constant zijn, iets wat in werkelijkheid niet het geval zal zijn.



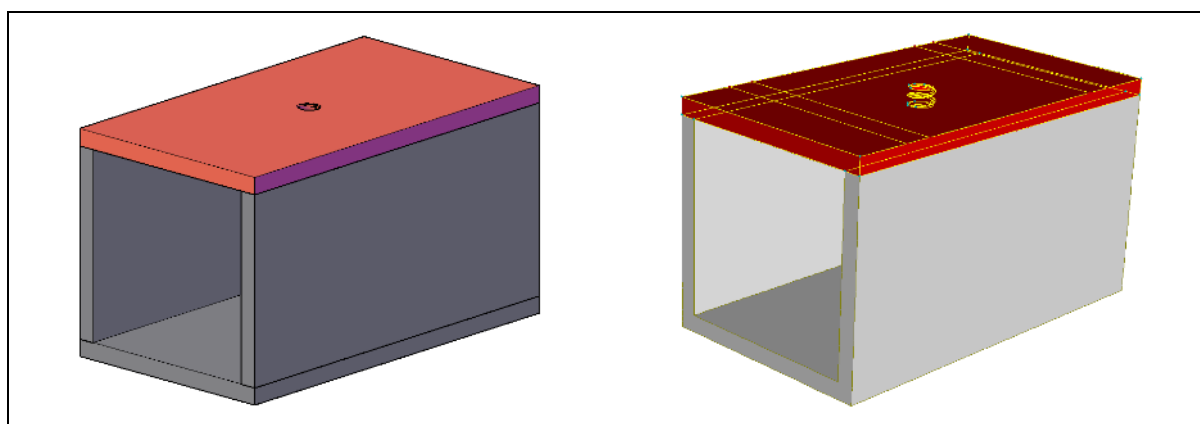
Figuur 03.5 TETRA4: 4-knoops tetraëder element

De meest ideale elementvorm is een kubus met gelijke zijden. De exacte kubusvorm geeft de meest nauwkeurige resultaten tussen knopen. Hierbij geeft een element met alleen hoekknopen (lagere orde-element) een lineair variërende rek tussen knopen en kan een element met hoekknopen en tussenknopen (hogere orde-element) zelfs een kwadratisch variërende rek beschrijven. De laatste geeft weliswaar de meest nauwkeurige resultaten, maar heeft ook een zwaarder model en langere rekentijd tot gevolg.

Doordat het elementennet automatisch gegenereerd is vanuit een geïmporteerd bestand, kan in Straus7 alleen gekozen worden uit tetraëder vormige elementen. Met uitsluitend hexagonale (kubus) vormige elementen kan immers niet elk willekeurig model opgebouwd worden, iets wat met tetraëder vormige elementen wel kan. Wel is er de keuze uit een element met alleen hoekknopen (TETRA4) of een element met hoekknopen en tussenknopen (TETRA10). Aangezien het elementennet ter plaatse van de schroefdraad al dusdanig klein en voldoende nauwkeurig is, is voor de TETRA4 elementen gekozen. Hierdoor wordt rekentijd bespaard bij de grovere elementen, daar waar de verbinding niet zal falen. Een minder nauwkeurige berekening van de rekken zal hier niet direct tot een minder nauwkeurige bepaling van de faalkracht leiden.

03.3 Geometrie en elementennet

De aluminium onderconstructie die wordt gemodelleerd komt overeen met het proefstuk dat gebruikt wordt voor het experimenteel onderzoek, met dezelfde afmetingen aluminium koker en dimensies van de ondersteuning. Een uitgebreide beschrijving van de proefopstelling is te vinden in paragraaf 04.1.5.

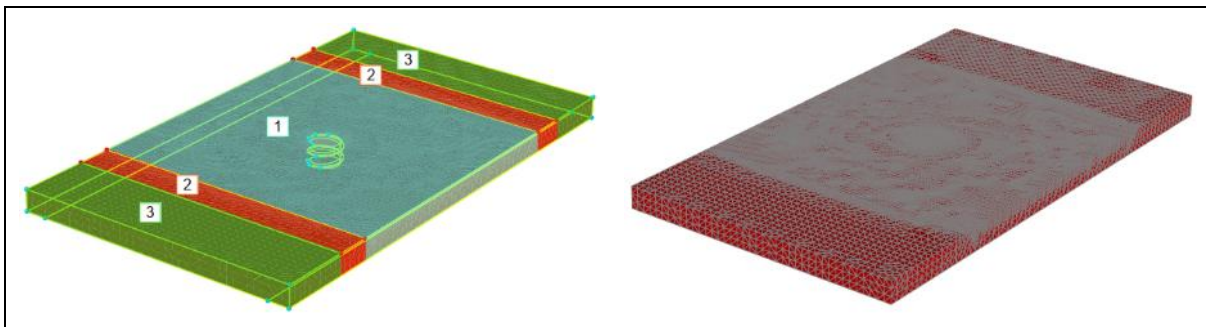


Figuur 03.6 Geometrie aluminium koker (links Autocad, rechts Straus7)

Het Eindige Elementen model van de aluminium onderconstructie is opgebouwd vanuit een geïmporteerd 3D Autocad bestand van de bovenkant van het proefstuk (rood in bovenstaande figuur). Deze bovenkant is vervolgens in drie delen opgedeeld met elk een andere fijnheid van het elementennet:

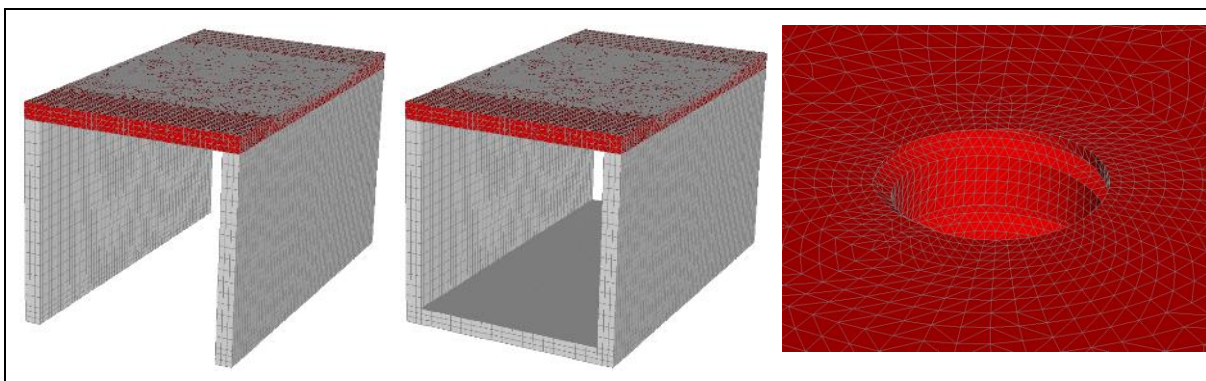
- 1) Elementennet verlopend van heel fijn ter plaatse van de schroefdraad (0,2 mm elementgrootte) naar iets grover richting de zijkanten (0,5 mm elementgrootte).
- 2) Elementennet verlopend van een elementgrootte van 0,5 mm naar een elementgrootte van 1,0 mm.
- 3) Volledig vlak heeft een elementgrootte van 1,0 mm.

Om het aantal elementen te reduceren en rekentijd te besparen verloopt het elementennet ook richting de korte zijden en over de dikte gezien van fijn naar grof.



Figuur 03.7 Elementennet bovenkant (links zone verdeling, rechts mesh van fijn naar grof)

Vanuit dit model is vervolgens het volledige model van de aluminium koker opgebouwd door de twee stroken met elementen in verticale richting te extruderen en als laatste de onderste rijen elementen in horizontale richting te extruderen.

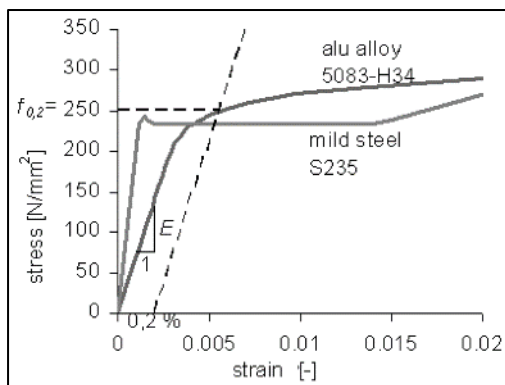


Figuur 03.8 Elementennet volledig model (links en midden) en ter plaatse van schroefdraad (rechts)

03.4 Materiaalmodellen

Op het moment van bezwijken van de verbinding zullen grote plastische rekken optreden. Om dit gedrag zo realistisch mogelijk te beschrijven wordt gebruik gemaakt van een niet-lineair spanning-rek diagram voor het aluminium materiaal.

In tegenstelling tot constructiestaal treedt bij aluminium geen constant vloeiplateau op, zie figuur 03.9. Na een lineair-elastisch gedeelte is er direct sprake van een versterkingstak. Een echte vloeigrens zoals bij staal is ook niet aan te duiden. Het omslagpunt tussen lineair-elastisch en plastisch materiaal gedrag wordt in geval van aluminium aangeduid door middel van de 0.2% rekgrens. Tot de breukrek is er een niet-lineair verband te zien tussen spanningen en rekken.



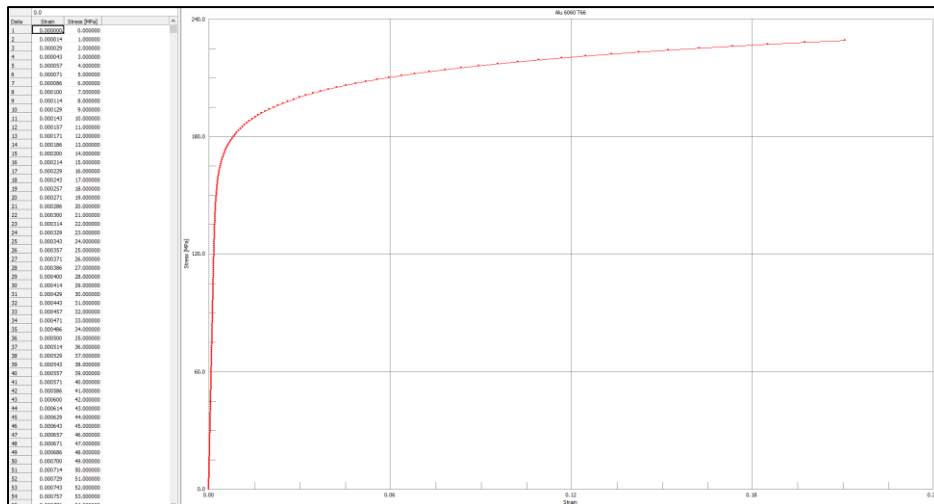
Figuur 03.9 Spanning-rek diagram van aluminium en staal (Sojal, 2016) [10]

Eurocode EN 1999-1-1 [11] bijlage E geeft analytische modellen om voor aluminium legeringen de relatie tussen spanning en rek te beschrijven. Voor aluminium legeringen is het Ramberg-Osgood model (continu) een geschikt model om de relatie tussen spanning en rek te beschrijven. Wanneer de vloeigrens wordt beschouwd bij een rek van 0.2% kan de vergelijking van het Ramberg-Osgood model worden omgeschreven tot vergelijking (3.1).

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0,002 \left(\frac{\sigma}{f_0} \right)^n \quad (3.1)$$

De parameter n in vergelijking (3.1) beschrijft de vorm van de grafiek en zegt iets over de mate van versterking van het materiaal. De overige parameters die nodig zijn om het model te beschrijven zijn verkregen door het testen van de werkelijke mechanische eigenschappen van het materiaal, die in bijlage 08.1.1 in de vorm van een materiaalcertificaat terug te vinden zijn. Voor de berekening van de parameters die niet door testen zijn verkregen wordt verwezen naar bijlage 08.1.2. Hierin is de methode volgens EN 1999-1-1 bijlage E.2.2.2 (5) gebruikt om tot het uiteindelijke spanning-rek diagram te komen dat te zien is in bijlage 08.1.2. De datapunten van dit model zijn vervolgens gebruikt als invoerpunten van het spanning-rek

diagram in Straus7 en vormem de niet-lineaire beschrijving van het materiaalgedrag in het Eindige Elementen model, zie figuur 03.10.



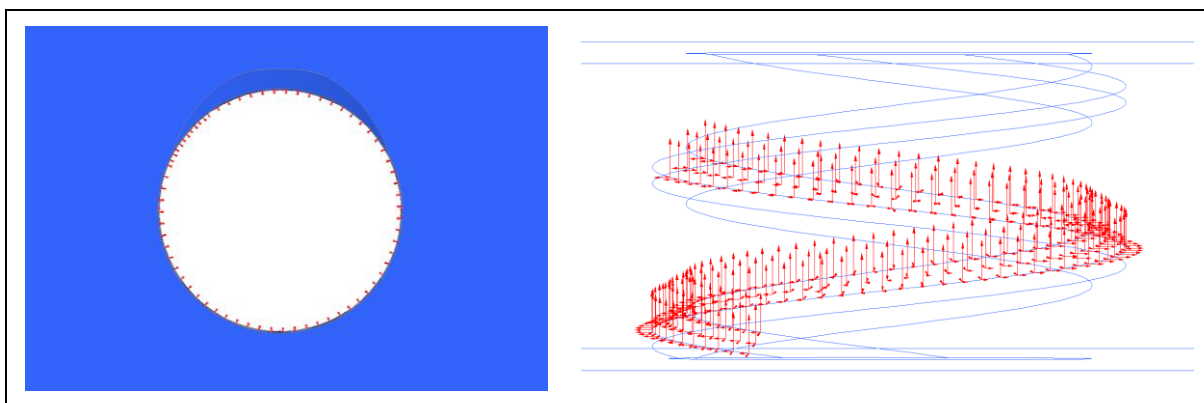
Figuur 03.10 Spanning-rek diagram EN AW 6060 T66

03.5 Belastingen en ondersteuningen

03.5.1 Belastingen

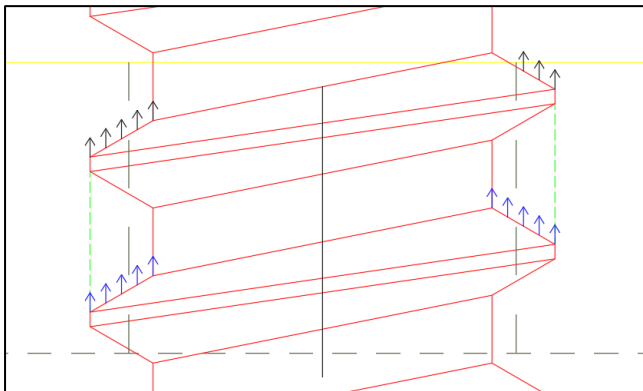
Het doel van het numerieke model is om de kracht te bepalen waarbij de verbinding faalt. Hiervoor wordt de belasting stapsgewijs opgebouwd totdat de faalkracht wordt bereikt. Een eenheidsbelasting van 1 kN wordt initieel aangebracht en door middel van belastingsfactoren wordt de belasting stap voor stap opgebouwd totdat de berekening niet meer convergeert. Meer hierover is te lezen in paragraaf 03.6.

De belasting is aangebracht als knoopkrachten. Deze zijn zowel parallel aan de schroefas als in het vlak aangebracht, wat een resulterende kracht geeft loodrecht op het draadvlak, zie figuur 03.11.



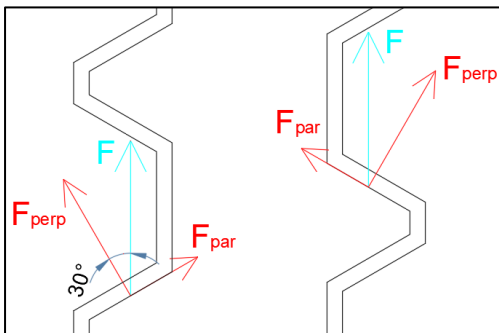
Figuur 03.11 Knoopkrachten in Straus7 (links bovenaanzicht, rechts doorsnede)

De knooppunten zijn alleen aangebracht daar waar een volledige doorsnede van het aluminium zit, te zien in figuur 03.12 (groen gestippelde doorsnede en blauwe pijltjes). In werkelijkheid doet het overige materiaal ook iets. Echter zal de verbinding pas echt falen wanneer deze volledige doorsnedes falen. Door ook knooppunten aan te brengen daar waar een gereduceerde aluminium doorsnede is, gaan deze doorsnedes de spanningspieken domineren met divergeren tot gevolg. In de praktijk zal het falen van deze gereduceerde doorsnedes echter niet tot falen van de verbinding leiden.



Figuur 03.12 Knooppunten in doorsnede

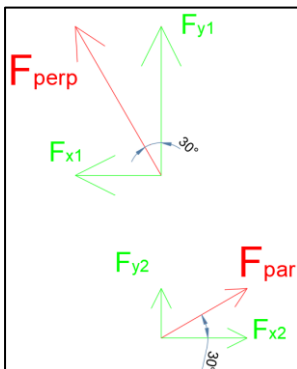
De berekening van de knooppunten in het model is hieronder kort uitgelegd.



$$F_{\text{perp}} = \cos 30^\circ * F = 0.866 F,$$

$$F_{\text{par}} = \sin 30^\circ * F = 0.5 F,$$

$$\text{waarbij } F = 1000 \text{ N}$$



$$F_{x1} = \sin 30^\circ * F_{\text{perp}} = 0.5 * 0.866 * F = 0.433 F$$

$$F_{y1} = \cos 30^\circ * F_{\text{perp}} = 0.866 * 0.866 * F = 0.75 F$$

$$F_{x2} = \cos 30^\circ * F_{\text{par}} = 0.866 * 0.5 * F = 0.433 F$$

$$F_{y2} = \sin 30^\circ * F_{\text{par}} = 0.5 * 0.5 * F = 0.25 F$$

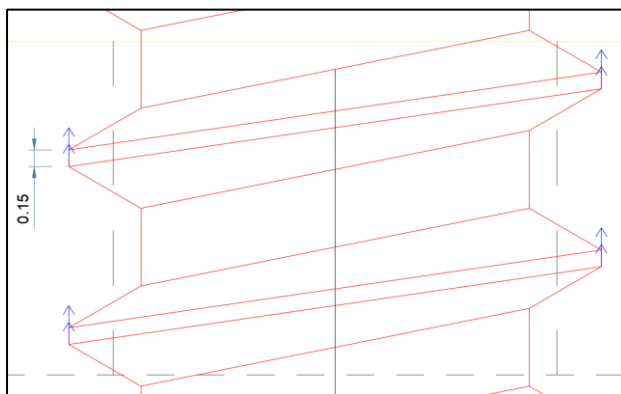
F_{x2} is gericht naar het as middelpunt van de schroef. Alle knooppunten in deze richting bij elkaar opgeteld heffen elkaar op.

De resulterende knoopp krachten die in het model worden aangebracht zijn als volgt:

$$F_y = 0.75 F + 0.25 F = 1.0 F$$

$$F_x = F_{\text{radiaal}} = 0.433 F$$

Wanneer er horizontaal contact is tussen de schroef en de onderconstructie kunnen er bovendien wrijvingskrachten worden overgebracht in de richting van de schroefas. Doordat de schroef is aangebracht in een voorgeboord gat van 4mm zijn de enige punten waarop contact zou kunnen plaatsvinden ter plaatse van de buitenrand van de schroef van 0,15 mm hoogte, zie figuur 03.13. Dit oppervlak is dusdanig klein ten opzichte van het contactvlak in druk dat het aannemelijk is dat de wrijvingscomponent nauwelijks invloed zal hebben op de capaciteit van de verbinding. In het numeriek model wordt deze component dan ook niet beschouwd.



Figuur 03.13 Wrijvingskracht tussen schroef en onderconstructie

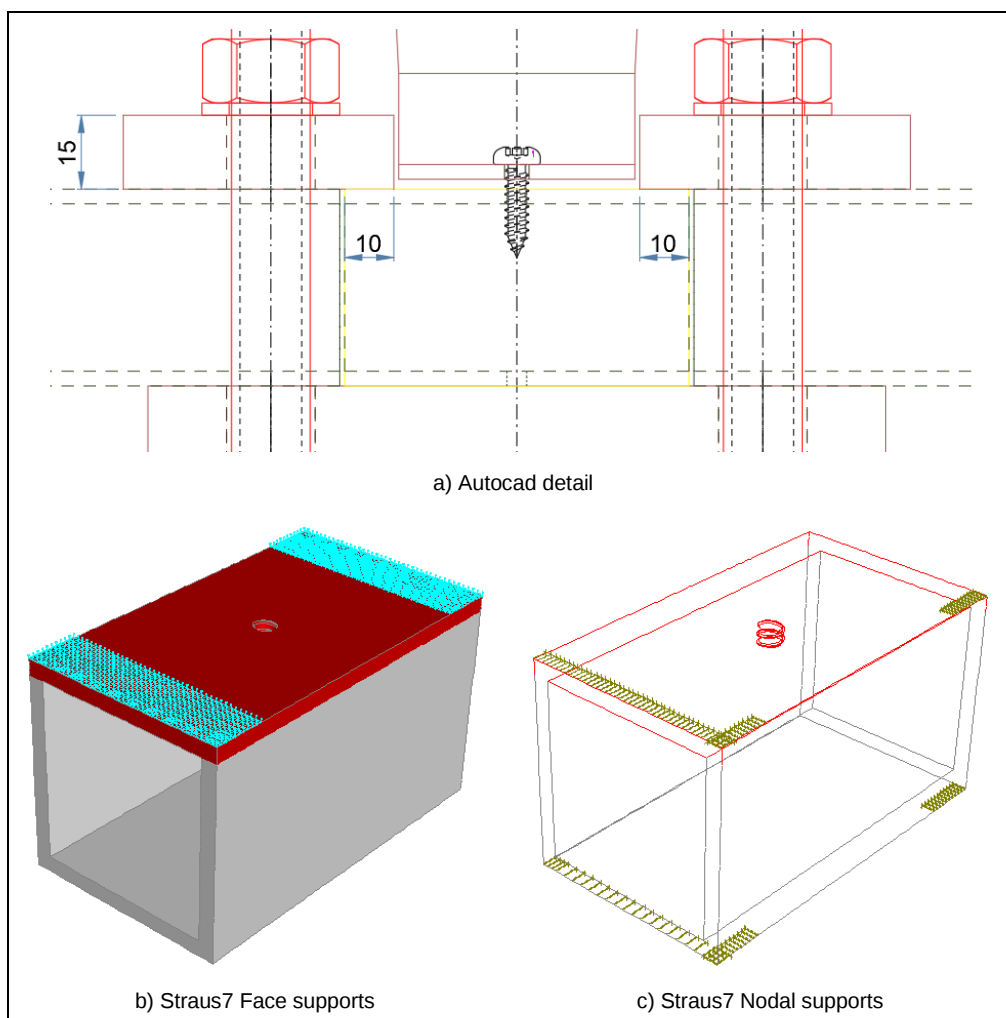
03.5.2 Ondersteuning

Een tweetal typen ondersteuning zijn gebruikt in dit model, te weten “face supports” en “nodal supports (translational stiffness)”. De “face supports” vertegenwoordigen de contactondersteuning van de proefopstelling, specifiek van de 15mm dikke stalen plaat waar de aluminium koker tegenaan wordt getrokken, zie figuur 03.14. De “face supports” hebben de eigenschap alleen druk op te nemen en hebben een stijfheid van $k = 14000 \text{ MPa/mm}$. Deze waarde is bepaald met onderstaande formule 3.2 waarbij de elasticiteitsmodulus van staal $E = 210000 \text{ MPa}$ en de dikte van de stalen plaat $t = 15 \text{ mm}$.

$$k = \frac{E}{t} \quad (3.2)$$

De “nodal supports” zijn aangebracht ter verhogering van starre lichaamsverplaatsingen (Rigid Body Movement). Dit zijn ongehinderde bewegingen van het model zonder daarbij te

vervormen. Als stijfheid voor de “nodal supports” is een waarde van $k = 10 \text{ N/mm}$ aangehouden. Door deze lage veerstijfheid trekken de knoopondersteuning geen krachten naar zich toe, maar dienen ze puur om het model in evenwicht te houden.



Figuur 03.14 Ondersteuning

03.6 Rekenmodellen

In de voorgaande paragrafen 03.4 en 03.5.2 is benoemd dat er in het numerieke model gebruik is gemaakt van een niet-lineair spanning-rek diagram en “face supports” die alleen actief zijn in druk. Dit betekent dat er een geometrisch en fysisch niet-lineaire berekening nodig is om deze eigenschappen mee te nemen. De niet-lineaire berekening voert allemaal kleine belastingstappen uit, de zogeheten “load increments” (zie tabel 03.1), en itereert voor elke stap net zo lang totdat de oplossing convergeert. Op dat moment zijn de interne krachten van

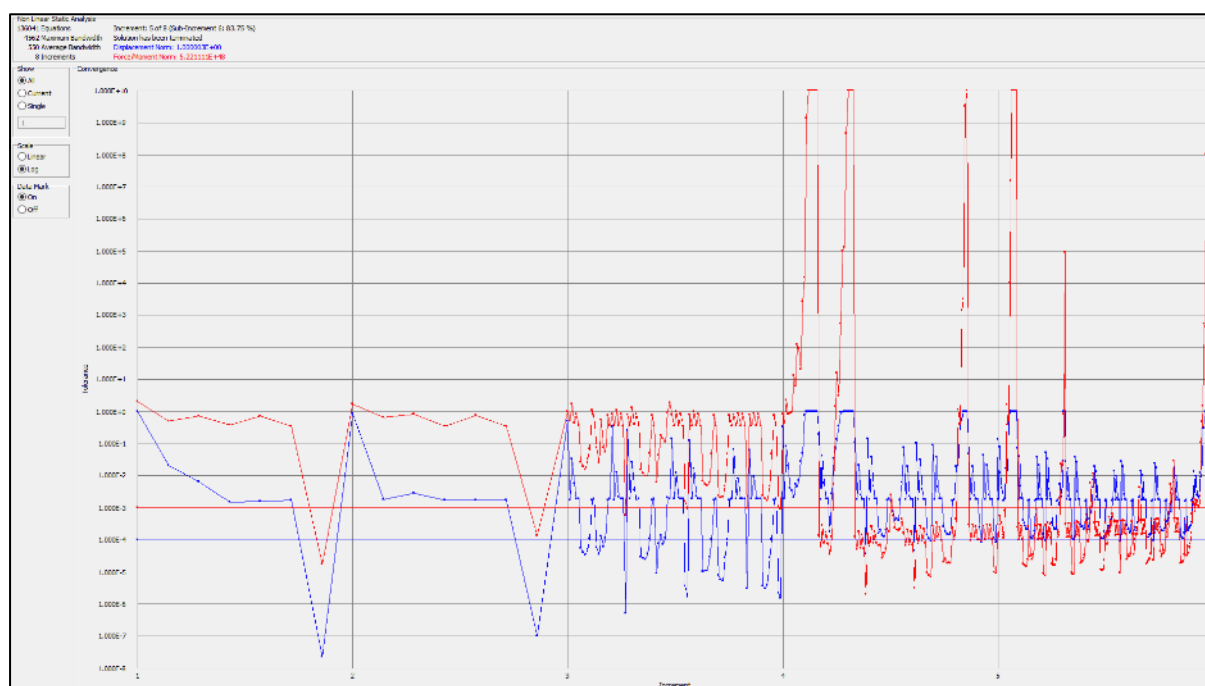
het model in evenwicht met de externe belastingen en blijven berekende verplaatsingen van twee opeenvolgende iteraties (nagenoeg) gelijk.

Tabel 03.1 Belastingstappen ("Load increments")

	1	2	3	4	5	6	7	8
Belastingstap ("Load	0.125	1.0	2.0	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
Belasting	0.125kN	1.0kN	2.0kN	3.0kN	3.5kN	4.0kN	4.5kN	5.0kN

Door de belasting stapsgewijs te verhogen totdat er een belasting wordt gevonden waarbij de berekening niet meer convergeert kan de maximale capaciteit van de verbinding worden gevonden. Hiervoor is gebruik gemaakt van de mogelijkheid om de rekensoftware automatisch "sub-increments" te laten toevoegen wanneer een belastingstap niet convergeert binnen het maximaal toegestaan aantal iteraties. In dat geval wordt de belastingstap simpelweg gehalveerd en wordt de berekening herhaald. Dit proces herhaalt zich totdat er uiteindelijk een belasting wordt gevonden waarbij convergeren onmogelijk is.

In figuur 03.15 is het convergeren van de "load increments" te zien. Hierin is duidelijk te zien dat hoe meer materiaal vloeit, hoe meer iteraties nodig zijn om te convergeren. Ook is te zien dat het laatste increment helemaal niet meer convergeert, wat duidt op een onstabiel systeem. In de praktijk betekent dit dat de verbinding vloeit over de volledige doorsnede en dat de maximale capaciteit is bereikt.

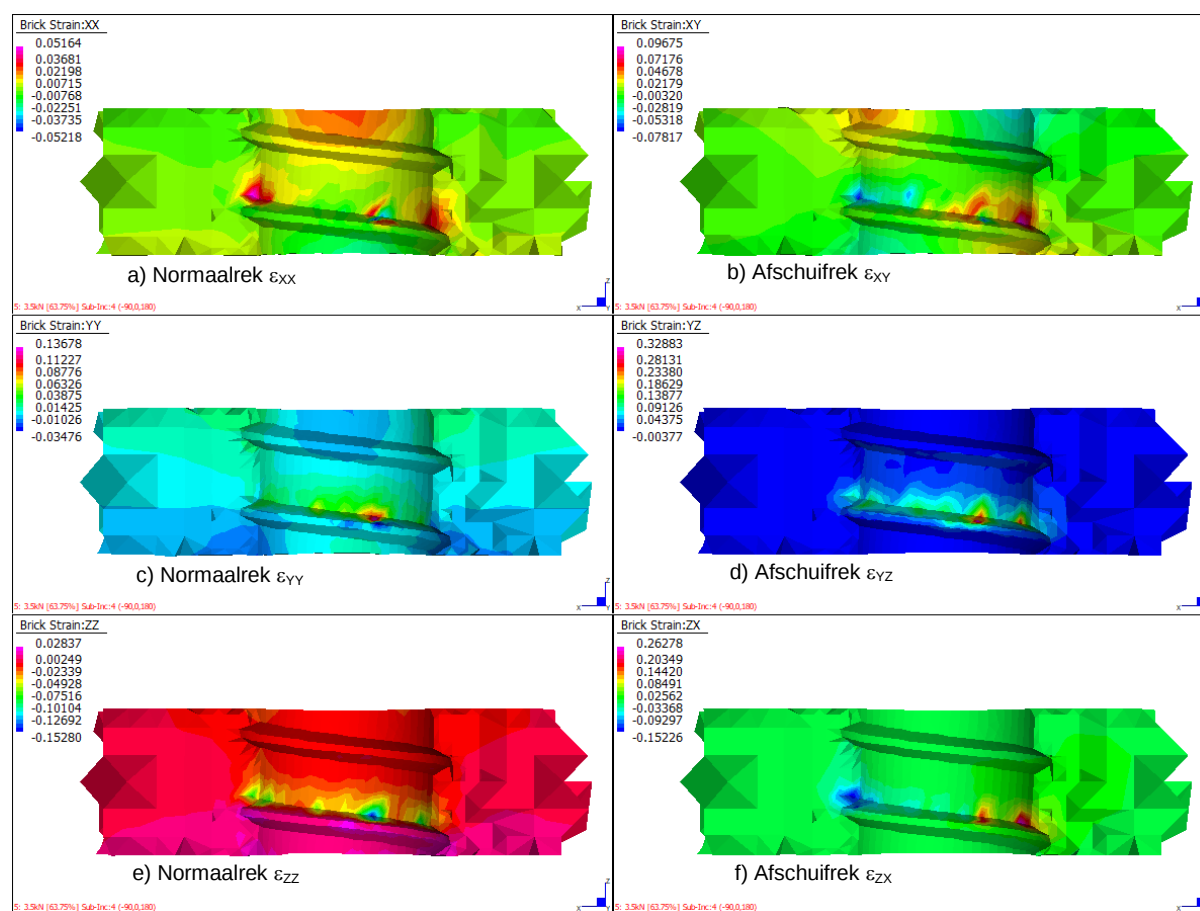


Figuur 03.15 Diagram convergeren van "load increments"

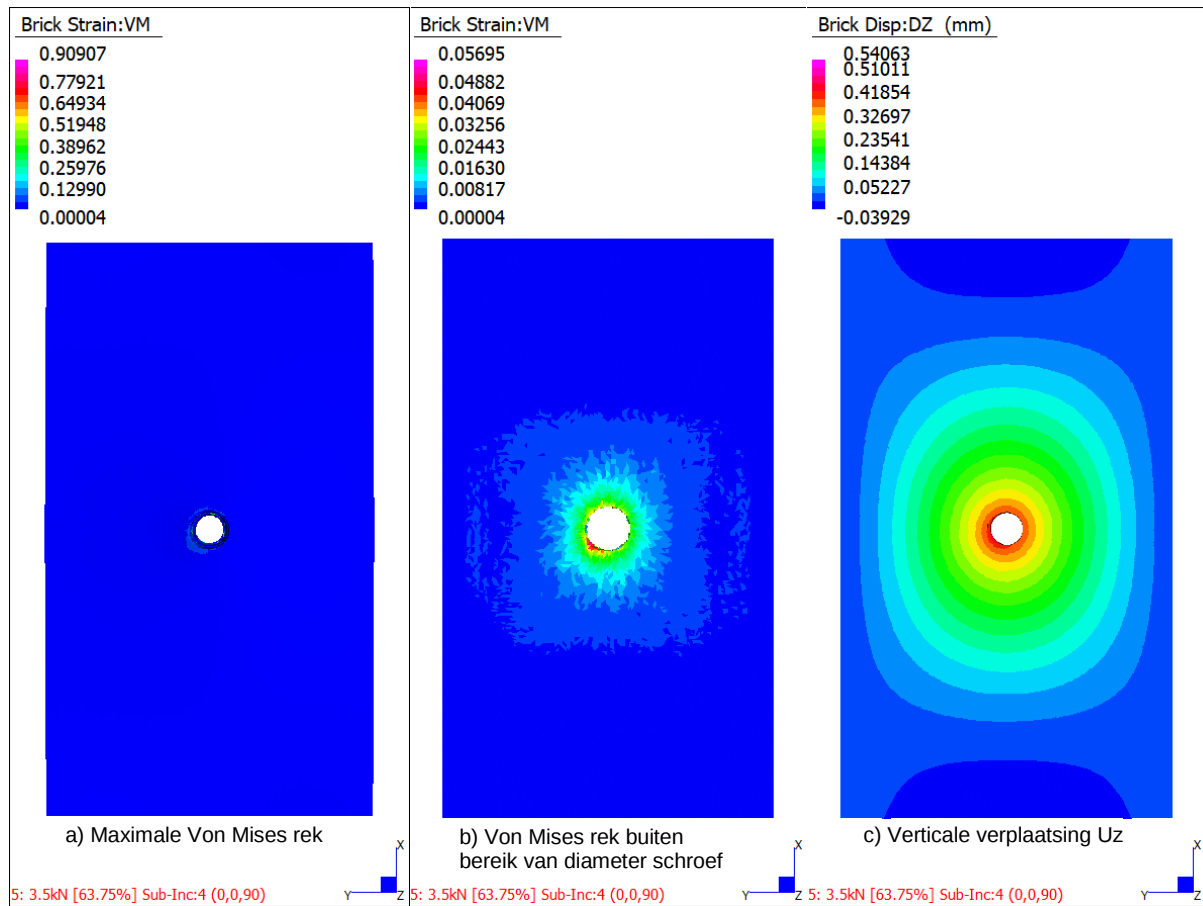
03.7 Resultaten numeriek onderzoek

In de Eindige Elementen berekening is de maximale belasting bereikt doordat de oplossing gedivergeerd is bij het vierde “subincrement” 63.75% van de belastingstap van 3,0 kN naar 3,5 kN. Dit komt overeen met een kracht van 3319 N.

De verticale vervorming bij het bereiken van de maximale belasting bedraagt 0,54 mm. Deze vervorming wordt met name veroorzaakt door dwarskrachtvervorming en maar voor een klein deel door buiging, zie figuur 03.16. Hierin is duidelijk waar te nemen dat de waarden voor de afschuifrekken ε_{YZ} en ε_{ZX} maatgevend zijn boven de normaalrekken die afkomstig zijn uit buiging. De pieken in de rekken zijn voor een groot deel een numeriek probleem en zijn het resultaat van een willekeurig en ongelijkmatig elementennet. Wanneer deze piekrekken zich wat meer zouden spreiden langs de omtrek van de schroef, zou een grotere maximale belasting bereikt kunnen worden. Een betere spreiding zou ook behaald zijn geworden wanneer de schroef ook in het model was meegenomen. Ook al is de roestvast stalen schroef veel stijver dan het aluminium, er zal toch een zekere mate van spreiding hebben plaatsgevonden door vervormen van de schroef (draad).



Figuur 03.16 Lokale rekken ter plaatse van schroefdraad bij maximale belasting



Figuur 03.17 Globaal beeld van rekken en verplaatsingen bij maximale belasting

04 Experimenteel onderzoek

04.1 Algemeen

Het experimenteel onderzoek is de laatste stap binnen deze onderzoeksopdracht en vormt de verificatie van het numerieke model. De praktijktesten zijn uitgevoerd door een extern testbureau Element te Beek (LB). Alvorens de resultaten zijn gegeven van de serie trekproeven is in paragraaf 04.2 het testplan beschreven.

04.2 Testplan

Het testplan is opgebouwd aan de hand van NEN-EN 1990 Bijlage D4 Planning van proeven [12]. De onderdelen die in bijlage D4 worden benoemd vormen tevens de paragrafen in dit hoofdstuk en de basis van het experimenteel onderzoek. Deze onderdelen zijn:

- doelstelling en beproevingsomvang,
- voorspelling van proefresultaten,
- specificatie van proefstukken en steekproeven,
- belastingsspecificaties,
- proefopstelling,
- metingen,
- evaluatie, waardering en rapportering over de proeven.

04.2.1 Doelstelling en beproevingsomvang

De doelstelling van de proeven is het bepalen van de uittrekkraft van een RVS schroef in een aluminium onderconstructie onder variërende ontwerpparameters, te weten de diameter van de schroef, de dikte van het materiaal waarin geschroefd wordt en de voorboordiameter. De resultaten van de proeven worden vervolgens gebruikt om het numerieke model te verifiëren en zeggen tevens iets over de toepasbaarheid van de rekenregels uit de normen. De proeven zijn beperkt tot een tweetal verschillende diameters schroef (4,8 mm en 6,3 mm), een drietal verschillende wanddikten (2 mm, 3 mm en 4 mm) en daarbij een drietal verschillende voorboordiameters. Elke configuratie is vervolgens zes keer getest. Een uitzondering is de configuratie die overeenkomt met het numerieke model, deze is twaalf keer getest. Het oorspronkelijke plan was om alle configuraties twaalf keer te testen, om een kleinere statistische onzekerheid in de verwachte capaciteit te behalen, wat zich vertaalt naar een hogere karakteristieke waarde. Echter door een combinatie van een lange tijdsduur van

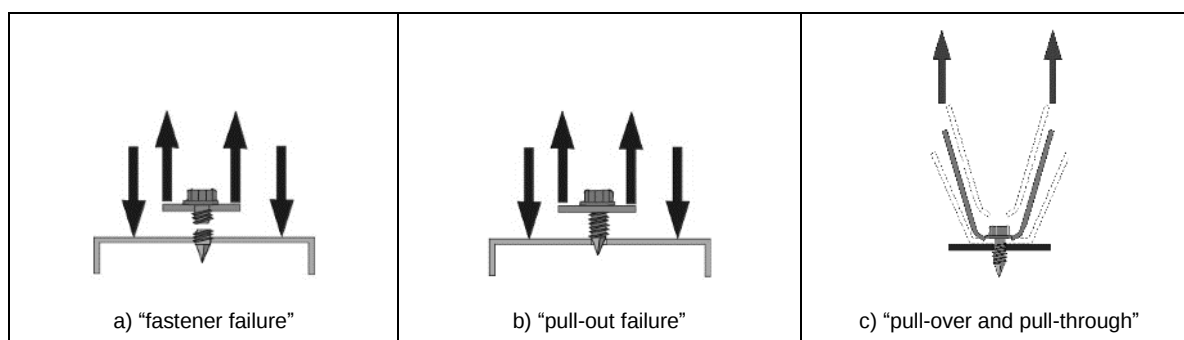
beproeven en over het algemeen redelijk constante testwaarden, is besloten om uiteindelijk alleen de configuratie die dient als verificatie van het numerieke model vaker te testen. In tabel 04.1 is de omvang van de proeven weergegeven.

Tabel 04.1 Beproevingsoomvang

Diameter [mm]	Plaatdikte [mm]	Voorboordiameter [mm]	Test variant	Aantal testen
4.8	2.0	3.5	4.8 - S1	6
		3.6	4.8 - S2	6
		3.7	4.8 - S3	6
	3.0	3.9	4.8 - S4	6
		4.0	4.8 - S5	12
		4.1	4.8 - S6	6
		4.0	4.1	4.8 - S7
	4.2		4.8 - S8	6
	4.3		4.8 - S9	6
6.3	2.0	4.8	6.3 - S1	6
		4.9	6.3 - S2	6
		5.0	6.3 - S3	6
	3.0	5.3	6.3 - S4	6
		5.4	6.3 - S5	6
		5.5	6.3 - S6	6
		4.0	5.5	6.3 - S7
	5.6		6.3 - S8	6
	5.7		6.3 - S9	6
				114

04.2.2 Voorspelling van de proefresultaten

Een op trek belaste schroefverbinding, waar dit onderzoek zich op richt, kan op verschillende manieren bezwijken, namelijk in de schroef zelf (fig. 04.1a), de bevestiging van schroef in onderconstructie (fig. 04.1b) en in de te bevestigen plaat (fig. 04.1c).



Figuur 04.1 Bezwijkmechanismen schroef in trek

In de geveltechniek bestaat de onderconstructie vaak uit dunwandige profielen van aluminium, waardoor pull-out failure al snel maatgevend wordt. De serie proeven concentreert zich op deze bezwijkwijze waarbij de schroef uit het aluminium materiaal wordt getrokken. Dit is het resultaat van het bezwijken op afschuiving van de in het aluminium gevormde draad.

Eigenschappen en omstandigheden die de proefresultaten mogelijk kunnen beïnvloeden zijn:

- toleranties op wanddikte aluminium koker
- toleranties op afmetingen van de schroef
- mechanische eigenschappen aluminium legering. In bijlage A.1 is te zien dat voor verschillende wanddiktes verschillende sterkte-eigenschappen gelden. Echter is ook te zien dat proefstukken met gelijke wanddikte gelijke sterkte eigenschappen hebben.
- de hoek waaronder de schroef is ingebracht. Het inschroeven gebeurt handmatig, waardoor de schroef niet altijd volledig haaks op de wand kan worden ingedraaid.

04.2.3 Specificatie van proefstukken en steekproeven

De proefstukken bestaan uit aluminium kokers 40x40 met wanddiktes van 2 mm, 3 mm en 4 mm. Elke koker is voorzien van een voorgeboord gat met een variabele diameter afhankelijk van de diameter van de schroef en de wanddikte. In het voorgeboorde gat is vervolgens een schroef aangebracht van 4,8 mm of 6,3 mm, zie figuur 04.2.



Figuur 04.2 Voorbeeld van proefstuk met en zonder schroef

Door de kokervorm heeft het proefstuk voldoende stijfheid om te overspannen tussen de opleggingen en is het niet nodig om het proefstuk vierzijdig te ondersteunen. Dit heeft een groot praktisch voordeel met betrekking tot het uitwisselen van de proefstukken.

Binnen de gevelbouw zijn de aluminium profielen doorgaans gemaakt van legering EN AW-6063 T6. De standaardprofielen gebruikt voor de proefstukken zijn echter gemaakt in legering EN AW-6060 T66 dat een iets lagere vloeispanning heeft. Qua materiaalgedrag verschillen

de legeringen echter niet. Dit betekent dat de resultaten uit het experimenteel onderzoek ook gebruikt kunnen worden voor de aluminium gevelprofielen.

De tolerantie op de wanddikte volgens NEN-EN 755-9 [13] bedraagt $\pm 0,40$ mm. Metingen van de wanddikten met behulp van enkele steekproeven wijzen echter uit dat de toleranties lager uitvallen. Voor wanddikten van 2 mm en 3 mm wordt een gemiddelde dikte van $+0,1$ mm gemeten, terwijl voor de 4 mm wanddikte een gemiddelde dikte van $+0,2$ mm wordt gemeten.

Het aantal proefstukken voor het experimenteel onderzoek is al eerder genoemd in paragraaf 04.2.1 en bedraagt zes stuks, met uitzondering van de configuratie die is behandeld in het numerieke onderzoek, welke twaalf keer is getest.

04.2.4 Belastingsspecificaties

De trekkracht in de schroefverbinding wordt aangebracht met behulp van een stalen zetwerk dat om de kop van de schroef grijpt. Aan dit zetwerk wordt vervolgens getrokken doordat het is ingeklemd in de trekbank. Een uitgebreidere beschrijving van de proefopstelling is te vinden in paragraaf 04.2.4.

Doordat de optredende vervormingen tijdens de proeven relatief klein zullen zijn, is de opbouw van de trekkracht krachtgestuurd. Een vervormingsgestuurde belastingsopbouw zal in dit geval namelijk veel te snel de uiterste capaciteit bereiken, waardoor registratie van de karakteristieke punten tijdens de proef lastiger wordt.

De testsnelheid bedraagt 40 MPa/s. Omdat de trekbank gewoonlijk gebruikt wordt voor (gestandaardiseerde) materiaaltesten, moeten voor de trekproeven de instellingen enigszins aangepast worden. De griplengte L_0 wordt ingesteld op $L_0 = 100$ mm, zodat de rek in [%] wordt omgerekend naar vervorming in [mm]. De doorsnede van het proefstuk S_0 wordt ingesteld op $S_0 = 1$ mm², zodat spanning in [MPa] wordt omgerekend naar kracht in [N]. Oftewel de testsnelheid bedraagt 40 N/s.

Als bovengrens van de capaciteit van de verbinding wordt de treksterkte van de schroef aangenomen. De treksterkte wordt bepaald volgens EN 1999-1-4 paragraaf 8.3.3.3:

$$F_{t,Rd} = 560 * A_s / \gamma_{M3} \quad (4.1)$$

Voor het bepalen van de treksterkte van een 4,8 mm schroef respectievelijk een 6,3 mm schroef wordt de maximale kerndiameter $d_{2,min}$ uit tabel 02.3 gebruikt. Dit geeft een conservatieve bovengrens voor de capaciteit. Invullen van de maximale kerndiameter in

formule 4.1 resulteert voor een 4,8 mm schroef in een treksterkte van 4,51 kN en voor een 6,3 mm schroef in een treksterkte van 8,38 kN.

Alle trekproeven zijn uitgevoerd op kamertemperatuur.

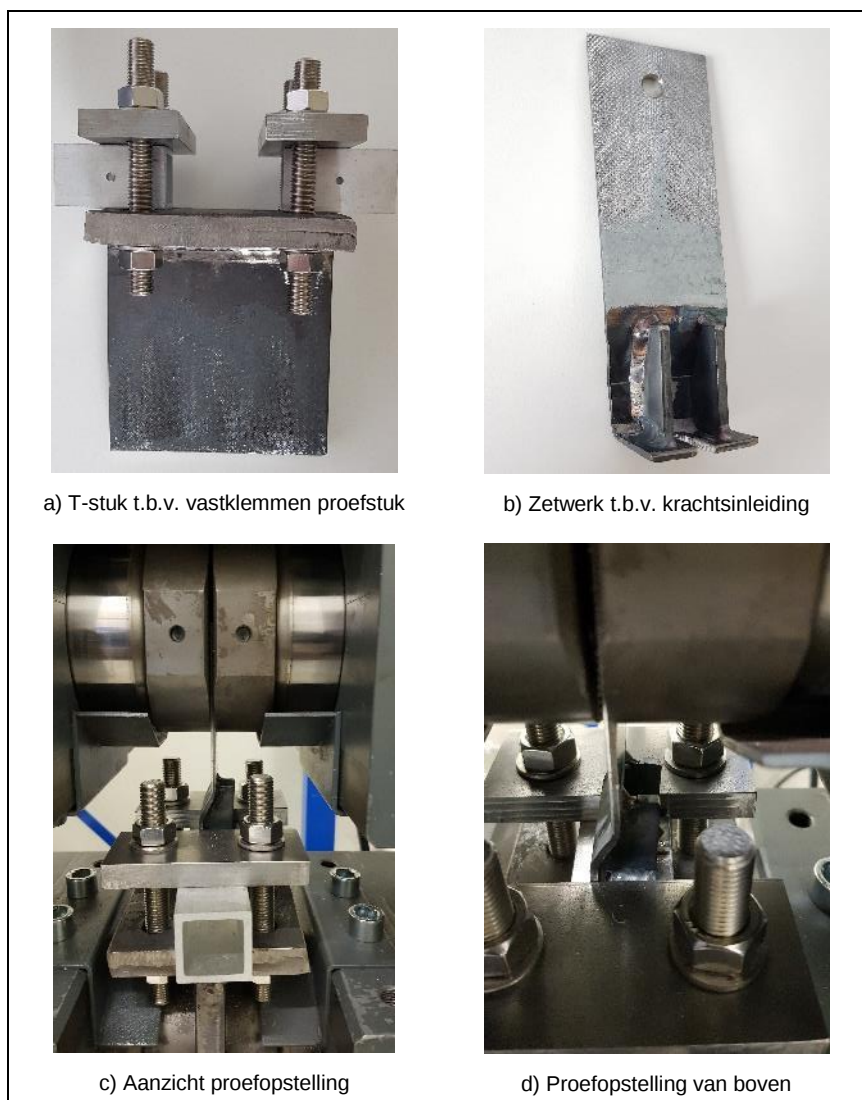
04.2.5 Proefopstelling

In figuur 04.3 hieronder is een afbeelding van de trekbank te zien. Het betreft een Zwick / Roell Z600 hydraulisch aangedreven trekbank met een trekkracht capaciteit van 600 kN. De klemmen met een diameter van zo'n 120 mm hebben een klemkracht van 250 MPa, wat resulteert in een hoge drukkracht en wrijvingskracht.



Figuur 04.3 Trekbank Zwick / Roell Z600

Voor de uitvoering van de proef zijn een tweetal hulpstukken gebruikt. Een gelast T-stuk met vier draadeinden M16 zorgt samen met twee stalen platen aan de bovenzijde ervoor dat de proefstukken, de aluminium kokers, worden vastgeklemd aan de trekbank. Twee kokers aan weerszijden van het proefstuk dienen ter stabilisatie van de stalen platen. Zoals in paragraaf 04.2.4 al benoemd is geworden zorgt een stalen zetwerk dat over de kop van de schroef grijpt voor de krachtsinleiding. Om geen onnodige excentriciteiten en randeffecten te krijgen zijn de zettingen zo gemaakt dat de schroef in lijn met de kracht zit, zie hiervoor ook de ontwerptekening van de proefopstelling in Bijlage B. Twee verstevigingsschotten kort bij de sleufopening zorgen ervoor dat het hulpstuk nauwelijks vervormd. Het zetwerk is vastgeklemd aan het bovenste deel van de trekbank. In figuur 04.4 is de proefopstelling weergegeven.



Figuur 04.4 Proefopstelling en hulpstukken

04.2.6 Metingen

De proefstukken die gebruikt zijn geworden voor de trekproeven zijn speciaal hiervoor gemaakt en zijn niet genomen uit een bestaande en onbekende populatie. Daardoor kan het aantal metingen voorafgaand aan de beproeving beperkt worden tot het opvragen van materiaalcertificaten en het meten van de wanddikte met behulp van een aantal steekproeven.

Metingen gedurende de trekproef gebeuren automatisch. De trekbank registreert de spanningen en rekken en zet deze uit in een grafiek. Door de aangepaste instellingen als beschreven in 04.2.4 is deze grafiek te lezen als een kracht-verplaatsingsdiagram.

De trekbank is gekalibreerd volgens de laatste normen zodat de betrouwbaarheid in gemeten resultaat en herhaalbaarheid van de proeven is gewaarborgd.

04.2.7 Evaluatie, waardering en rapportering

De rekenregels uit de norm geven rekenwaarden voor de uittrekcapaciteit. Om uit de proeven een rekenwaarde te kunnen afleiden wordt gebruik gemaakt van NEN-EN 1990 Bijlage D7 *Statistische waardebepaling van een enkele eigenschap*. Er zijn een tweetal wijzen waarop de rekenwaarde kan worden bepaald: via vaststelling van een karakteristieke waarde in combinatie met een partiële factor en via rechtstreekse bepaling van de rekenwaarde. De voorkeur wordt gegeven aan de eerste methode. Voor het afleiden van de karakteristieke waarde uit proeven behoort een aantal zaken in aanmerking genomen te worden, te weten de spreiding van de proefresultaten, de statistische onzekerheid samenhangend met het aantal proeven en statistische voorkennis.

De tabellen en uitdrukkingen hieronder, volgens NEN-EN 1990 D7.2, zijn gebaseerd op de volgende aannamen:

- alle variabelen volgen een normale of lognormale verdeling;
- er is geen voorkennis betreffende de gemiddelde waarde;
- voor het geval “ V_x niet bekend”, is er geen voorkennis betreffende de variatiecoëfficiënt;
- voor het geval “ V_x bekend”, is alles bekend betreffende de variatiecoëfficiënt.

In het geval van trekproeven met gestandaardiseerde schroeven en geteste materiaaleigenschappen kan er redelijkerwijs een behoudende bovengrensschatting van $V_x = 0.25$ worden aangenomen voor de variatiecoëfficiënt. Dit betekent dat de rij “ V_x bekend” kan worden gebruikt volgens onderstaande tabel 04.2 uit de norm [12].

Tabel 04.2 Waarden van k_n voor de 5% karakteristieke waarde (NEN-EN 1990 Tabel D1)

n	1	2	3	4	5	6	8	10	20	30	∞
V_x bekend	2,31	2,01	1,89	1,83	1,80	1,77	1,74	1,72	1,68	1,67	1,64
V_x niet bekend	-	-	3,37	2,63	2,33	2,18	2,00	1,92	1,76	1,73	1,64

Voor de partiële factor γ_M wordt $\gamma_{M3} = 1.25$ gekozen overeenkomstig NEN-EN 1999-1-4 [1].

De rekenwaarde van de uittrekcapaciteit van de verbinding kan vervolgens worden bepaald gebruikmakend van onderstaande uitdrukking 4.2.

$$X_d = \eta_d \frac{X_{k(n)}}{\gamma_M} = \frac{\eta_d}{\gamma_M} m_x \{1 - k_n V_x\} \quad (4.2)$$

waarin:

- η_d is de rekenwaarde van de omrekeningsfactor
- γ_M is de partiële factor; $\gamma_{M3} = 1,25$
- m_x is de gemiddelde waarde
- k_n is een factor voor de 5% karakteristieke waarde volgens tabel 04.2
- V_x is de variatiecoëfficiënt

De omrekeningsfactor η_d is niet van toepassing. De variatiecoëfficiënt V_x is de standaarddeviatie s_x gedeeld door het gemiddelde m_x , zie uitdrukking 4.3.

$$V_x = \frac{s_x}{m_x} \quad (4.3)$$

Uitdrukking 4.2 kan nu worden omgeschreven tot:

$$X_d = \frac{X_{k(n)}}{\gamma_M} = \frac{m_x - k_n s_x}{\gamma_M} \quad (4.4)$$

$$X_k = m_x - k_n s_x \quad (4.5)$$

04.3 Testresultaten

04.3.1 Beschrijving van bezwijkwijzen

Na het bestuderen van de geteste proefstukken is een duidelijk algemeen beeld waar te nemen met betrekking tot de bezwijkwijze van de verbinding. In vrijwel alle gevallen is te zien dat de in de aluminium gevormde draad op afschuiving is bezweken. Deze bezwijkwijze heeft uiteindelijk geleid tot het bereiken van de maximale uittrekcapaciteit. In figuur 04.5 op de volgende pagina is dit duidelijk waar te nemen.



Figuur 04.5 Afschuiven van aluminium draad

Daarnaast zijn er ook een aantal proefstukken waarbij een andere manier van bezwijken te zien is. In de figuren 04.6 tot en met 04.8 zijn deze proefstukken in beeld gebracht en kort behandeld.



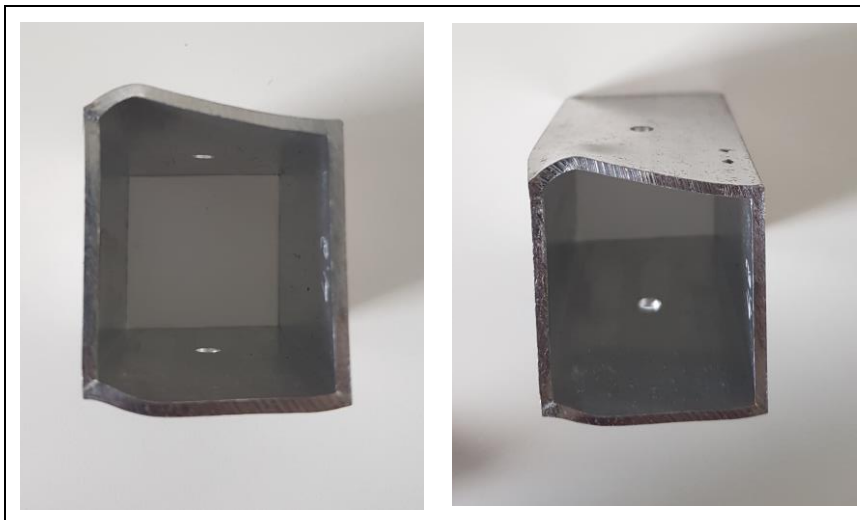
Figuur 04.6 Verdraaien schroefkop (test 4,8-S7-01)

Tijdens de proef met een 4,8 mm schroef in 4 mm wanddikte en 4,1 mm voorboordiameter is de kop van de schroef verdraaid. Reden hiervoor is dat wellicht het zetwerk niet goed om de kop heeft gegrepen. Deze afwijking in gedrag is ook terug te zien in de behaalde trekkracht, zie geel gemarkeerde waarde in tabel C1. Doordat dit een onrealistische waarde is voor de capaciteit van de verbinding, is deze niet meegenomen in de bepaling van de karakteristieke waarde.



Figuur 04.7 Scheuren van wand koker (6.3-S5)

De combinatie van een 6,3 mm schroef in 3 mm wanddikte heeft een aantal proefstukken opgeleverd waarin de wand van de koker gescheurd is volgens het beeld zoals te zien in figuur 04.7. Een verklaring hiervoor kan zijn dat de capaciteit van de aluminium koker in buiging kort bij de waarde voor de uittrekcapaciteit van de schroef zit. In de gevallen waarin de wand scheurt wordt deze bezwijkwijze maatgevend.



Figuur 04.8 Verbuigen van proefstuk (6.3-S1)

In figuur 04.8 is te zien dat de aluminium koker verbogen is. De reden hiervoor is dat het proefstuk per ongeluk verkeerd is ingeklemd in de trekbank. Bovenstaand proefstuk is niet meer gebruikt kunnen worden om te testen. Dit betekent dat deze combinatie van variabelen slechts vijf keer is getest. In het kiezen van de coëfficiënt k_n is hier rekening mee gehouden.

04.3.2 Karakteristieke waarden en rekenwaarden uittrekcapaciteit

De volledige serie testresultaten is gegeven in Bijlage C Tabel C.1. Hierin zijn de gemiddelde waarde en de standaarddeviatie door Excel [14] berekend. De coëfficiënt k_n is vervolgens handmatig ingevuld en aan de hand van deze drie variabelen is de karakteristieke waarde voor de uittrekcapaciteit berekend. De rekenwaarde voor de uittrekcapaciteit is bepaald door de karakteristieke waarde te delen door de partiële factor.

In tabel 04.3 hieronder zijn de berekende karakteristieke waarden en rekenwaarden voor de uittrekcapaciteit gegeven.

Tabel 04.3 Karakteristieke waarden en rekenwaarden uittrekcapaciteit

Diameter [mm]	Wanddikte [mm]	Voorboordiameter [mm]	Test variant	Aantal testen		Gemiddelde	Standaarddeviatie	Coëfficiënt volgens Tabel 04.2	Karakteristieke waarde	Rekenwaarde
						m_x [N]	s_x [N]	k_n	R_k [N]	R_d [N]
4.8	2.0	3.5	4.8 - S1	6		2430.00	141.84	1.77	2178.9	1743.1
		3.6	4.8 - S2	6		2333.33	54.28	1.77	2237.3	1789.8
		3.7	4.8 - S3	6		2206.67	90.26	1.77	2046.9	1637.5
	3.0	3.9	4.8 - S4	6		3880.00	441.36	1.77	3098.8	2479.0
		4.0	4.8 - S5	12		3759.17	394.13	1.712	3084.4	2467.5
		4.1	4.8 - S6	6		3738.33	486.43	1.77	2877.3	2301.9
	4.0	4.1	4.8 - S7	6		5708.00	229.06	1.80	5295.7	4236.5
		4.2	4.8 - S8	6		5221.67	158.80	1.77	4940.6	3952.5
		4.3	4.8 - S9	6		4568.33	197.83	1.77	4218.2	3374.5
6.3	2.0	4.8	6.3 - S1	6		2604.00	56.83	1.80	2501.7	2001.4
		4.9	6.3 - S2	6		2716.67	149.89	1.77	2451.4	1961.1
		5.0	6.3 - S3	6		2681.67	54.19	1.77	2585.7	2068.6
	3.0	5.3	6.3 - S4	6		4178.33	345.45	1.77	3566.9	2853.5
		5.4	6.3 - S5	6		4711.67	535.81	1.77	3763.3	3010.6
		5.5	6.3 - S6	6		4333.33	702.53	1.77	3089.9	2471.9
	4.0	5.5	6.3 - S7	6		6646.67	140.10	1.77	6398.7	5119.0
		5.6	6.3 - S8	6		6290.00	179.11	1.77	5973.0	4778.4
		5.7	6.3 - S9	6		5826.67	103.86	1.77	5642.8	4514.3

05 Verschillen en overeenkomsten tussen normen, numeriek onderzoek en experimenteel onderzoek

In tegenstelling tot de uitdrukkingen in de betreffende normen en het numerieke model, die beide versimpelingen zijn van de werkelijkheid, vertegenwoordigen de trekproeven de werkelijke praktijk. In dit hoofdstuk worden de resultaten uit het experimenteel onderzoek gebruikt om te vergelijken met de berekende capaciteiten afkomstig uit de normen en het Eindige Elementen model.

Tabel 05.1 Vergelijking tussen proeven en normen

Diameter [mm]	Wanddikte [mm]	Voorboordiameter [mm]	Rekenwaarde	Minimale rekenwaarde per wanddikte	Rekenwaarde volgens norm EN-1999-1-4	Afwijking norm t.o.v. proeven	Rekenwaarde volgens norm EN-1993-1-3	Afwijking norm t.o.v. proeven	Rekenwaarde volgens norm AAMA TIR A9	Afwijking norm t.o.v. proeven	Rekenwaarde volgens norm ADM 2015	Afwijking norm t.o.v. proeven
			R_d [N]	R_d [N]	R_d [N]		R_d [N]		R_d [N]		R_d [N]	
4.8	2.0	3.5	1743.1	1637.5	1013.0	-38.14%	1073.0	-34.47%	926.0	-43.45%	922.0	-43.70%
		3.6	1789.8									
		3.7	1637.5									
	3.0	3.9	2479.0	2301.9	1860.0	-19.20%	1610.0	-30.06%	1389.0	-39.66%	1383.0	-39.92%
		4.0	2467.5									
		4.1	2301.9									
	4.0	4.1	4236.5	3374.5	2864.0	-15.13%	2147.0	-36.38%	2414.0	-28.46%	2415.0	-28.43%
		4.2	3952.5									
		4.3	3374.5									
6.3	2.0	4.8	2001.4	1961.1	1160.0	-40.85%	1409.0	-28.15%	1216.0	-37.99%	1210.0	-38.30%
		4.9	1961.1									
		5.0	2068.6									
	3.0	5.3	2853.5	2471.9	2131.0	-13.79%	2113.0	-14.52%	1824.0	-26.21%	1814.0	-26.61%
		5.4	3010.6									
		5.5	2471.9									
	4.0	5.5	5119.0	4514.3	3281.0	-27.32%	2817.0	-37.60%	3114.0	-31.02%	3115.0	-31.00%
		5.6	4778.4									
		5.7	4514.3									

In bovenstaande tabel 05.1 is een vergelijking gemaakt tussen de proefresultaten en de berekende capaciteiten uit de normen. De kleurenschaal geeft de mate van afwijking aan tussen beide resultaten. Hierin betekent groen een lage afwijking en rood een hoge afwijking in resultaat.

Over het geheel genomen is te zien dat de rekenwaarde op basis van de proefresultaten een stuk hoger is dan de berekende waarden. Het verschil zou nog groter zijn als er meer dan zes proefstukken getest zouden worden, aangezien de factor k_n dan lager wordt en de karakteristieke waarde hoger. De norm dient een conservatieve uitkomst te geven onder alle mogelijke omstandigheden binnen het toepassingsgebied en rekening houdend met eventuele randeffecten. Binnen het gestelde kader van dit onderzoek bevestigen de proefresultaten dat dit ook zo is.

Er zijn verder een aantal zaken die opvallen in de tabel. Zo is duidelijk waar te nemen dat de huidige geldende norm voor het bepalen van de uittrekcapaciteit EN-1999-1-4 de minste afwijking vertoont ten opzichte van de proefresultaten. Dit is een goed teken en te verklaren door het feit dat de EN-1999-1-4 een Europese norm is die specifiek geldt voor aluminium constructies.

Daarnaast is te zien dat de afwijking voor een 2 mm wanddikte over het algemeen groter is dan voor een 3 mm of 4 mm wanddikte. De reden hiervoor is dat de spreiding van de proeven het kleinst is in geval van een 2 mm wanddikte. Dit betekent relatief gezien een hogere rekenwaarde voor de proefresultaten, wat resulteert in een hogere afwijking ten opzichte van de theoretisch berekende waarde aan de hand van de norm.

In de tabel in bijlage C.1 is tevens te zien dat de trekproeven in een 3 mm wand een grotere spreiding vertonen dan in de andere wanddikten. Een mogelijke verklaring hiervoor is de overgang tussen “dik” en “dun” aluminium, zoals in de AAMA TIR A9 wordt aangenomen, waarbij de maximale kracht op het moment van falen zich bevindt op de grens tussen enerzijds het rekken en buigen van de gatonttrek en anderzijds het afschuiven van de draad.

Wanneer de proefresultaten worden gebruikt om de bevindingen uit het Eindige Element model te verifiëren, geven de rekenwaarden geen goed beeld. Hierin zijn immers een statistische verwerking en partiële factoren meegenomen om de capaciteit te kunnen toetsen aan de rekenwaarde van de belasting. Het numerieke model simuleert in feite een enkele trekproef. Het is in dat geval passender om de resultaten van dit model te vergelijken met de gemiddelde waarde van de proefresultaten. Met het Eindige Elementen model is een maximale kracht van 3319 N behaald, terwijl uit de proefresultaten van serie 4.8-S5 een gemiddelde waarde van 3759 N kan worden berekend. Dit resulteert in een afwijking van 11,7%.

In figuur 03.16 is te zien dat het model lokale pieken in de rekken vertoont die het materiaalgedrag domineren en de capaciteit van de verbinding bepalen. Uit de praktijkproeven blijkt echter dat de volledige aluminium doorsnede afschuift op het moment van bezwijken. Eindige Elementen software die niet alleen contactelementen tussen knopen kan modelleren, maar ook de beschikking heeft over oppervlakte contactelementen die onafhankelijk van het elementennet twee oppervlakten met elkaar kunnen verbinden, zou het gedrag op het moment van bezwijken beter kunnen beschrijven en hierdoor een maximale kracht vinden die dichterbij de proefresultaten ligt.

06 Conclusie

De hoofdvraag van dit onderzoek luidt: *“Kan de formule uit de Eurocode EN1999-1-4 voor het bepalen van de uittrekcapaciteit van zelftappende of zelfborende schroeven in dunwandige aluminium onderconstructies veilig gebruikt worden voor zelftappende schroeven met een diameter van 4,8 mm?”*. Om deze vraag te kunnen beantwoorden is theoretisch, numeriek en experimenteel onderzoek gedaan. Aan de hand van de deelvragen en bevindingen uit die onderzoeken wordt in dit hoofdstuk de hoofdvraag beantwoord.

1. *Welke normen of richtlijnen zijn er naast de geldende Eurocode nog meer voor handen om de uittrekcapaciteit van een schroefverbinding in dunwandig (aluminium) materiaal te bepalen?*

Naast de van toepassing zijnde norm EN-1999-1-4 zijn er nog een drietal andere normen bekeken die de uittrekcapaciteit van schroeven behandelen. Dit zijn de EN1993-1-3, de AAMA TIR A9 en de Aluminum Design Manual 2015. Van deze vier normen leidt de EN-1999-1-4 tot een capaciteit die het dichtst bij de beproefde waarden in de buurt komt.

2. *Welke parameters van de verbinding hebben invloed op de uittrekcapaciteit en hoe groot is deze invloed?*

De belangrijkste parameters die de capaciteit van de verbinding bepalen komen terug in de uitdrukkingen die gegeven zijn in de normen. Dit zijn de diameter van de schroef en de dikte en treksterkte van het materiaal waar de schroef wordt ingedraaid. Binnen de gevelbouw komen met namen de aluminium legeringen EN AW-6063 T6 en EN AW-6060 T66 voor. Deze twee legeringen hebben vergelijkbare sterkte eigenschappen, waardoor de sterkte van het materiaal niet als variabele is meegenomen in het experimenteel onderzoek. Er is daarentegen wel voor gekozen om de voorboordiameter als variabele te onderzoeken. In de praktijk heeft een grotere voorboordiameter namelijk het voordeel dat de schroef minder weerstand ondervindt. Dit resulteert uiteindelijk in een kortere inschroeftijd en een kleinere kans op schroefbreuk. De proefresultaten bevestigen wat dat betreft de uitdrukkingen in de norm, waarin een grotere diameter en dikker materiaal een grotere uittrekcapaciteit tot gevolg heeft. Over de diameter is in het algemeen te zeggen dat een kleinere voorboordiameter een grotere uittrekcapaciteit betekent.

3. *Welk resultaat geeft een numeriek onderzoek in de vorm van een Eindige Elementen Analyse voor de uittrekcapaciteit?*

Met behulp van Eindige Elementen software is een 4,8 mm schroef in een 3 mm wanddikte en een voorboordiameter van 4 mm gesimuleerd. Door de beperkingen van de software in het gebruik van contactelementen is er uiteindelijk een model ontwikkeld waarin uitsluitend de aluminium onderconstructie is gemodelleerd. De input in het model met betrekking tot geometrie en materiaaleigenschappen is gebaseerd op de proefstukken en de proefopstelling. De maximale kracht die de verbinding in het model kan opnemen is 3319 N.

4. *Welk resultaat voor de uittrekcapaciteit geeft een experimenteel onderzoek in de vorm van trekproeven?*

Van diverse combinaties van variabelen zijn trekproeven uitgevoerd om de uittrekcapaciteit van de verbinding te bepalen. De geteste variant van een 4,8 mm schroef in een 3 mm wanddikte en een voorboordiameter van 4 mm is twaalf keer beproefd. Deze serie proeven resulteert in een gemiddelde waarde van 3759 N en een rekenwaarde van 2468 N. De berekende capaciteit volgens het numerieke model heeft een afwijking van 11,7% ten opzichte van de gemiddelde waarde van de proefresultaten. De berekende (reken)waarde volgens de norm EN1999-1-4 is 1860 N en wijkt 24,6% af ten opzichte van de rekenwaarde van de proefresultaten.

Nadat de deelvragen zijn beantwoord, kan de hoofdvraag worden beantwoord: *“Kan de formule uit de Eurocode EN1999-1-4 voor het bepalen van de uittrekcapaciteit van zelftappende of zelfborende schroeven in dunwandige aluminium onderconstructies veilig gebruikt worden voor zelftappende schroeven met een diameter van 4,8 mm?”*

Het antwoord op deze vraag is ja. De proefresultaten, en in mindere mate het Eindige Elementen model, tonen aan dat de uitdrukking in de norm conservatieve waarden geeft onder alle beproefde combinaties van variabelen. En als er nog meer getest zou worden dan zes keer per combinatie zou de norm alleen maar nog conservatiever uitvallen. Dat de norm veilig te gebruiken is voor schroeven met een diameter van 4,8 mm is dus in feit, maar of het gebruik hiervan ook tot de meest economische constructies leidt valt te betwijfelen. In dat opzicht zal het zich lonen om gebruik te maken van de proefresultaten en voor toekomstige constructies al in het ontwerp een van de beproefde combinaties van variabelen toe te passen.

07 Literatuurlijst

- [1] EN 1999-1-4, 2007. Eurocode 9: Ontwerp en berekening van aluminiumconstructies – Deel 1-4: Koudgevormde dunne platen
- [2] EN 1993-1-3, 2006. Eurocode 3: Ontwerp en berekening van staalconstructies – Deel 1-3: Algemene regels – Aanvullende regels voor koudgevormde dunwandige profielen en platen
- [3] American Architectural Manufacturers Association (2015). TIR-A9-14: Design Guide for Metal Cladding Fasteners.
- [4] The Aluminum Association (2015). Aluminum Design Manual.
- [5] NEN-EN ISO 14585, 2011. Pancilinderplaatschroeven met binnenzesrond.
- [6] NEN-EN ISO 1478, 1999. Schroefdraad voor plaatschroeven.
- [7] Maljaars J., Fellingier J., Soetens F. (2005). *Fire exposed aluminium structures*. HERON 50: 261-278
- [8] DIN 7975, 2016. Tapping screw connections – Guideline values for core hole diameters and use.
- [9] Straus7 Release 2.4.6; Reference Manual
- [10] Soyal Z. (2016). *Creep of aluminium alloys exposed to fire conditions*. Student thesis: Master
- [11] EN 1999-1-1, 2007. Eurocode 9: Ontwerp en berekening van aluminiumconstructies – Deel 1-1: Algemene regels
- [12] NEN-EN 1990, 2019. Eurocode: Grondslagen van het constructief ontwerp
- [13] NEN-EN 755-9, 2016. Aluminium en aluminiumlegeringen – Geëxtrudeerde staven, buizen en profielen – Deel 9: Profielen, toleranties op afmetingen en vorm
- [14] Microsoft Office. Excel 2016

08 Figuren- en tabellenlijst

Figuren

Figuur 01.1 Concept elementgevel	4
Figuur 03.1 Conceptschets Eindige Elementen model 1.....	18
Figuur 03.2 Autocad 3D-onderdelen	19
Figuur 03.3 Conceptschets Eindige Elementen model 2.....	19
Figuur 03.4 Eindige Elementen model 3	20
Figuur 03.5 TETRA4: 4-knoops tetraëder element.....	20
Figuur 03.6 Geometrie aluminium koker (links Autocad, rechts Straus7).....	21
Figuur 03.7 Elementennet bovenkant (links zone verdeling, rechts mesh van fijn naar grof).....	22
Figuur 03.8 Elementennet volledig model (links en midden) en ter plaatse van schroefdraad (rechts).....	22
Figuur 03.9 Spanning-rek diagram van aluminium en staal (Sojal, 2016) [10]	23
Figuur 03.10 Spanning-rek diagram EN AW 6060 T66	24
Figuur 03.11 Knoopkrachten in Straus7 (links bovenaanzicht, rechts doorsnede).....	24
Figuur 03.12 Knoopkrachten in doorsnede	25
Figuur 03.13 Wrijvingskracht tussen schroef en onderconstructie	26
Figuur 03.14 Ondersteuningen.....	27
Figuur 03.15 Diagram convergeren van "load increments"	28
Figuur 03.16 Lokale rekken ter plaatse van schroefdraad bij maximale belasting	29
Figuur 03.17 Globaal beeld van rekken en verplaatsingen bij maximale belasting	30
Figuur 04.1 Bezwijkmechanismen schroef in trek	32
Figuur 04.2 Voorbeeld van proefstuk met en zonder schroef.....	33
Figuur 04.3 Trekbank Zwick / Roell Z600.....	35
Figuur 04.4 Proefopstelling en hulpstukken	36
Figuur 04.5 Afschuiven van aluminium draad	39
Figuur 04.6 Verdraaien schroefkop (test 4,8-S7-01)	39
Figuur 04.7 Scheuren van wand koker (6.3-S5).....	40
Figuur 04.8 Verbuigen van proefstuk (6.3-S1)	40

Tabellen

Tabel 02.1 Berekende uittrekwaarden volgens normen	13
Tabel 02.2 Dimensies schroef ISO 14585.....	14
Tabel 02.3 Dimensies schroefdraad ISO 1478	15
Tabel 02.4 Sterkte eigenschappen aluminium legeringen.....	16
Tabel 02.5 Voorboordiameters DIN 7975.....	16
Tabel 03.1 Belastingstappen ("Load increments")	28
Tabel 04.1 Beproevingssomvang.....	32
Tabel 04.2 Waarden van k_n voor de 5% karakteristieke waarde (NEN-EN 1990 Tabel D1)	37
Tabel 04.3 Karakteristieke waarden en rekenwaarden uittrekkcapaciteit	41
Tabel 05.1 Vergelijking tussen proeven en normen	42
Tabel C.1 Overzicht proefresultaten.....	55

Bijlage A Spanning-rek diagram aluminium EN-AW 6060 T66

Bijlage A.1 Materiaalcertificaat

PRODUCT INSPECTION CERTIFICATE		EN 15088:2005
The Aluminum Company of Egypt 48 / 50 Abdel Khalek Sarwat St. CAIRO - EGYPT - Extrusion Plant - Nag Hammady Tel. 002 02 5762 932 - 002 096 6583 174 - Fax : 002 096 6588 478		 120 GB14/91304

INSPECTION CERTIFICATE

Customer : MG-NE Address : MG-NE - Mergenthalerallee 79 - 81 - Germany
 Standard : EN755:2008 BSEN10204:2004-3.1
 CE-sign : EN15088:2005 ISSUDATE:2014 Egyptalum Certificate No :120

Order no. : **28730**

Box Container No. : **BEAU472052/0**

Alloy	ENAW:6060	Length	6000 mm	Temper	T66	Product	Profiles
-------	-----------	--------	---------	--------	-----	---------	----------

CHEMICAL COMPOSITION

Melt NO.	Analysis %								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
14RDO1-2	0.44	0.19	0.0004	0.0017	0.4440	0.0010	0.0012	0.0081	Rest

Product specification

Item	Pallet No.	Net Weight (Kg)	No. Of pieces	Profiles Specification Dim (mm)	Tensile Strength Rm	Proof strength Rp 0.2	Elongation %	Brinell hardness HB
1	41913266	536	72	RT50X30X3	229	168	10	79
2	41913299	470	192	FB30X5	220	167	10	76
3	42001421	524	32	FB100X10	216	161	9	75
4	42001424	551	14	FB120X20	230	170	10	80
5	42001473	532	77	RP48X3	229	168	10	79
6	42001474	532	77	RP48X3	229	168	10	79
7	42001475	532	77	RP48X3	229	168	10	79
8	42001477	414	60	RP48X3	229	168	10	79
9	42001497	554	56	ST50X50X3	229	168	10	79
10	42001499	554	56	ST50X50X3	229	168	10	79
11	42001502	514	53	RP50X4	225	170	9	80
12	42001524	289	60	RP48X2	230	170	10	80
13	42001525	289	60	RP48X2	230	170	10	80
14	42001526	289	60	RP48X2	230	170	10	80
15	42001527	289	60	RP48X2	230	170	10	80
16	42001556	562	78	ST40X40X3	229	168	10	79
17	42001560	505	70	ST40X40X3	229	168	10	79
18	42001561	505	70	ST40X40X3	229	168	10	79
19	42001563	370	30	FB50X15	216	161	9	75
20	42001574	296	60	RP50X2	230	170	10	80
21	42001592	300	32	RT100X50X2	230	170	10	80
22	42001593	300	32	RT100X50X2	230	170	10	80

The extruded products are in compliance with the requirements of the order .

Date 20/2/2020

Quality Specialist /Eng. Moataz Zaky

PRODUCT INSPECTION CERTIFICATE

 The Aluminum Company of Egypt
 48 / 50 Abdel Khalek Sarwat St.

CAIRO - EGYPT - Extrusion Plant - Nag Hammady

Tel. 002 02 5762 932 - 002 096 6583 174 - Fax : 002 096 6588 478

EN 15088:2005


 120
 GB14/91304

INSPECTION CERTIFICATE

Customer : MG-NE

Address : MG-NE - Mergenthalerallee 79 - 81 - Germany

Standard : EN755:2008

BSEN10204:2004-3.1

CE-sign : EN15088:2005

ISSUDATE:2014

Egyptalum Certificate No :120

 Order no. : **28730**

 Box Container No. : **UASU107392/6**

Alloy	ENAW:6060	Length	6000 mm	Temper	T66	Product	Profiles
-------	-----------	--------	---------	--------	-----	---------	----------

CHEMICAL COMPOSITION

Melt NO.	Analysis %								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
13RDG1-2	0.45	0.18	0.0010	0.0021	0.4167	0.0010	0.0017	0.0083	Rest

Product specification

Item	Pallet No.	Net Weight (Kg)	No. Of pieces	Profiles Specification Dim (mm)	Tensile Strength Rm	Proof strength Rp 0.2	Elongation %	Brinell hardness HB
1	41913484	503	54	US40X80X40X4	220	167	10	76
2	41913505	576	600	FB20X3	225	163	9	77
3	42000368	360	168	RP28X1.5	230	170	10	80
4	42000374	495	69	US40X40X40X4	220	167	10	76
5	42000804	365	12	ST100X100X5	225	170	9	80
6	42000807	543	48	FB70X10	216	161	9	75
7	42000840	411	16	FB200X8	220	167	10	76
8	42001072	494	100	ST40X40X2	230	170	10	80
9	42001153	458	7	FB100X40	230	170	10	80
10	42001317	515	21	FB50X30	230	170	10	80
11	42001417	496	120	FB25X10	216	161	9	75
12	42001438	557	44	FB80X10	216	161	9	75
13	42001459	359	22	ST80X80X3	229	168	10	79
14	42001465	541	175	ST25X25X2	230	170	10	80
15	42001467	585	300	FB30X4	220	167	10	76
16	42001468	585	300	FB30X4	220	167	10	76
17	42001476	532	77	RP48X3	229	168	10	79
18	42001521	289	60	RP48X2	230	170	10	80
19	42001522	289	60	RP48X2	230	170	10	80
20	42001523	289	60	RP48X2	230	170	10	80
21	42001531	251	52	RP48X2	230	170	10	80
22	42001540	526	10	FB80X40	230	170	10	80
23	42001541	502	70	ST40X40X3	229	168	10	79
24	42001542	502	70	ST40X40X3	229	168	10	79
25	42001551	605	126	RT60X20X2	230	170	10	80
26	42001557	467	18	RP60X10	225	170	9	80

The extruded products are in compliance with the requirements of the order .

Date 20/2/2020

Quality Specialist /Eng. Moataz Zaky

PRODUCT INSPECTION CERTIFICATE

The Aluminum Company of Egypt

48 / 50 Abdel Khalek Sarwat St.

CAIRO - EGYPT - Extrusion Plant - Nag Hammady

Tel. 002 02 5762 932 - 002 096 6583 174 - Fax : 002 096 6588 478

EN 15088:2005


INSPECTION CERTIFICATE

Customer : MG-NE Address : MG-NE - Mergenthalerallee 79 - 81 - Germany

Standard : EN755:2008 - EN 573-3 BSEN10204:2004-3.1

CE-sign : EN15088:2005 ISSUATE:2014 Egyptalum Certificate No :120

 Order no. : **28730**

 Box Container No. : **DFSU747818/7**

Alloy	ENAW:6060	Length	6000 mm	Temper	T66	Product	Profiles
-------	-----------	--------	---------	--------	-----	---------	----------

CHEMICAL COMPOSITION

Melt NO.	Analysis %								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
05ROZ1-2	0.45	0.18	0.0008	0.0101	0.4699	0.0014	0.0006	0.0102	Rest

Product specification

Item	Pallet No.	Net Weight (Kg)	No. Of pieces	Profiles Specification Dia (mm)	Tensile Strength Rm	Proof strength Rp 0.2	Elongation %	Brinell hardness HB
1	41915764	462	102	RT50X20X2	230	170	10	80
2	42001389	513	40	ST50X50X4	225	170	9	80
3	42001390	385	30	ST50X50X4	225	170	9	80
4	42001619	489	10	FB100X30	230	170	10	80
5	42001623	400	132	FB30X6	220	167	10	76
6	42001626	498	139	ST30X30X2	230	170	10	80
7	42001627	520	144	ST30X30X2	230	170	10	80
8	42001685	527	72	ST40X40X3	229	168	10	79
9	42001686	467	64	ST40X40X3	229	168	10	79
10	42001722	487	160	ST25X25X2	230	170	10	80
11	42001724	544	84	FB40X10	216	161	9	75
12	42001725	544	84	FB40X10	216	161	9	75
13	42001739	525	160	FB40X5	220	167	10	76
14	42001740	455	140	FB40X5	220	167	10	76
15	42001744	418	35	RT80X50X3	229	168	10	79
16	42001760	500	50	ST40X40X4	225	170	9	80
17	42001768	219	35	RP50X2.5	230	170	10	80
18	42001770	407	28	ST60X60X4	225	170	9	80
19	42001796	405	25	ST80X80X3	229	168	10	79
20	42001800	403	25	ST80X80X3	229	168	10	79
21	42001803	610	42	ST60X60X4	225	170	9	80
22	42001805	463	80	RT50X40X2	230	170	10	80
23	42001806	519	68	RT60X25X3	229	168	10	79
24	42001813	422	68	RP50X2.5	230	170	10	80

The extruded products are in compliance with the requirements of the order .

Date 27/2/2020

Quality Specialist /Eng. Moataz Zaky

Bijlage A.2 Spanning-rek diagram

Spanning-rek diagram wordt hieronder beschreven volgens EN 1999-1-1 Annex E.2.2.2 (5) en E.3.

(5) Based on extensive tests, the following values may be assumed:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0,002 \left(\frac{\sigma}{f_o} \right)^n \quad (\text{E.15})$$

where:

a) elastic range ($f_x = f_p$, $\varepsilon_p = 0,000001$)

$$n = \frac{\ln(0,000001 / 0,002)}{\ln(f_p / f_o)} \quad (\text{E.16})$$

where the proportional limit f_p only depends on the value of the f_o yield stress:

$$f_p = f_{0,2} - 2\sqrt{10 f_{0,2} (\text{N/mm}^2)} \quad \text{if } f_{0,2} > 160 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{E.17})$$

$$f_p = f_{0,2} / 2 \quad \text{if } f_{0,2} \leq 160 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{E.18})$$

b) plastic range ($f_x = f_u$)

$$n = n_p = \frac{\ln(0,002 / \varepsilon_u)}{\ln(f_o / f_u)} \quad (\text{E.19})$$

E.3 Approximate evaluation of ε_u

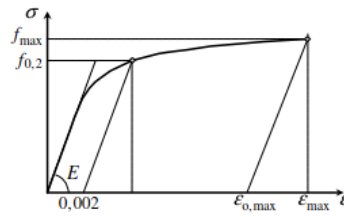
According to experimental data the values of ε_u for the several alloys could be calculated using an analytical expression obtained by means of interpolation of available results. This expression, which provides an upper bound limit for the elongation at rupture, can be synthesised by the following expressions:

$$\varepsilon_u = 0,30 - 0,22 \frac{f_o (\text{N/mm}^2)}{400} \quad \text{if } f_o < 400 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{E.20})$$

$$\varepsilon_u = 0,08 \quad \text{if } f_o \geq 400 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{E.21})$$

Het model is met behulp van Excel gemaakt. Hierbij zijn de formules zoals hierboven gegeven verwerkt met de materiaalgegevens verkregen uit het materiaalcertificaat. De gegeven en berekende parameters zijn samen met het spanning-rek diagram weergegeven op de volgende pagina.

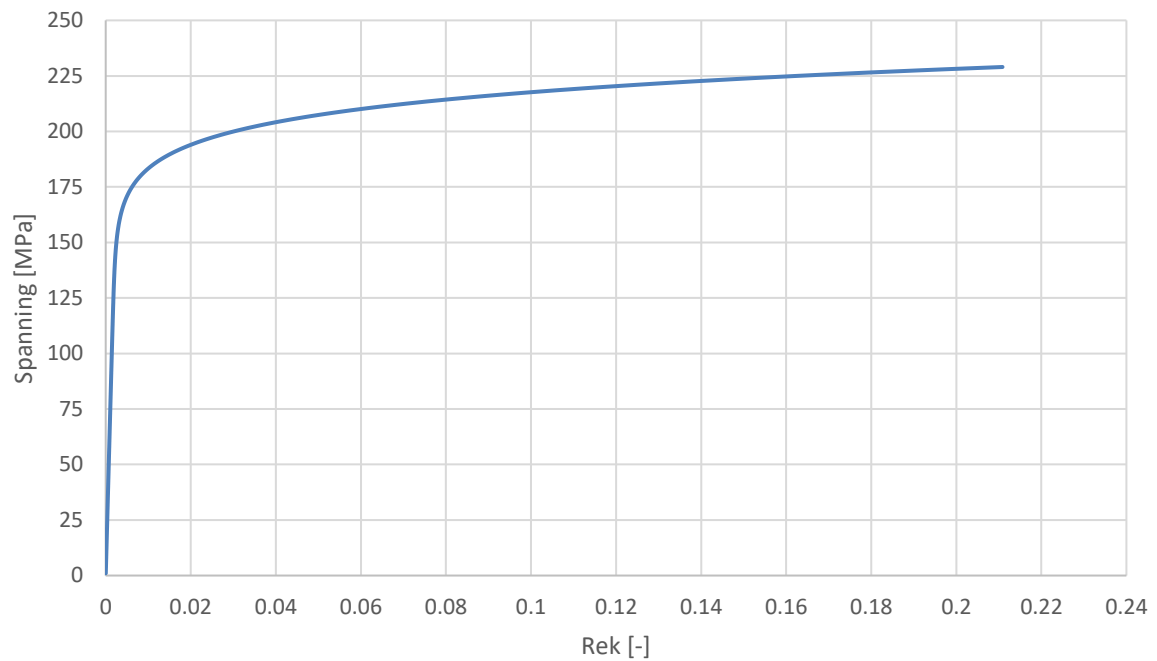
$E = 70000 \text{ MPa}$
 $f_0 = 168 \text{ MPa}$
 $f_p = 86.02 \text{ MPa}$
 $f_u = 229 \text{ MPa}$
 $\epsilon_u = 0.2076$



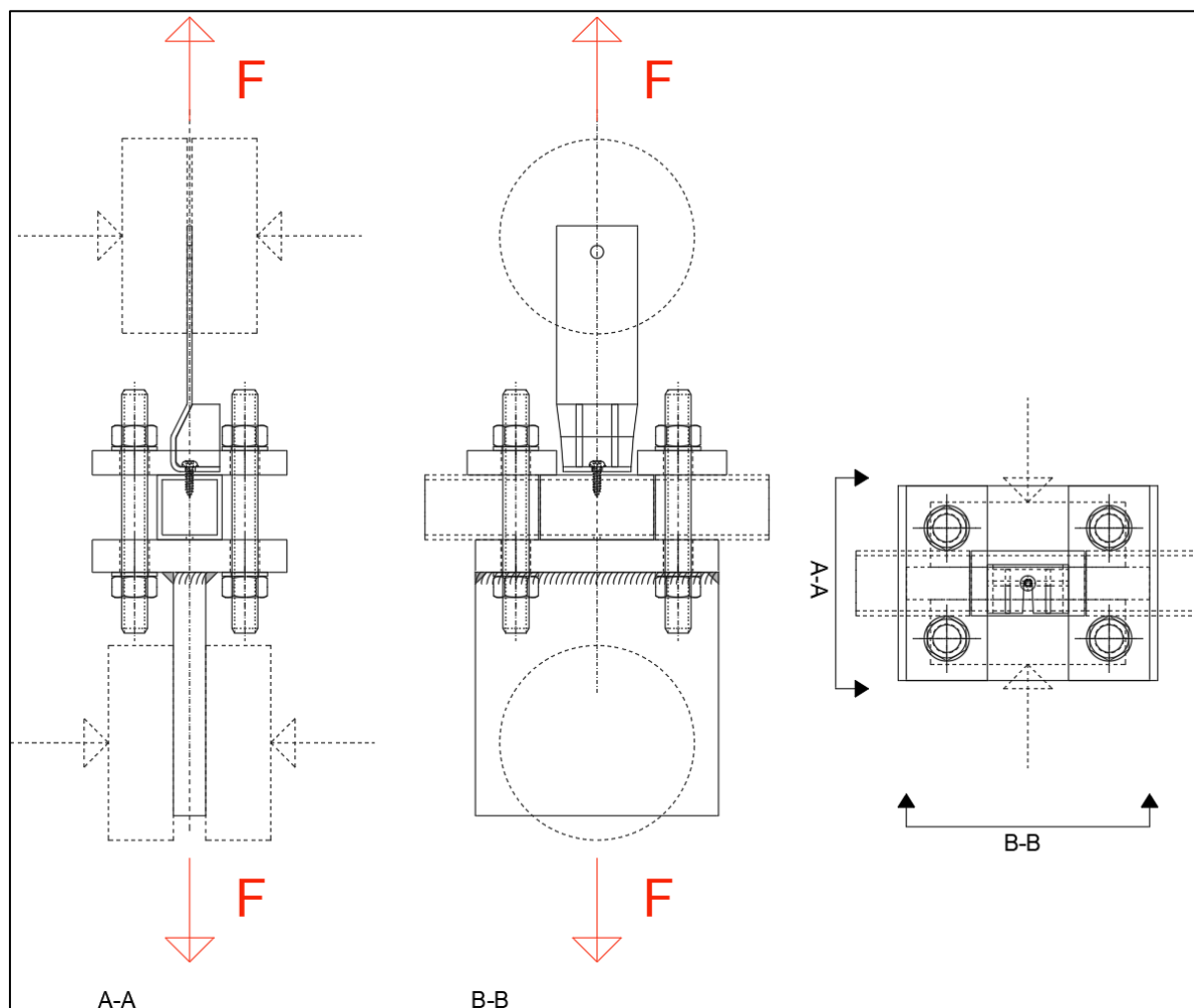
$n_e = 11.35593437$ for elastic range ($f_x = f_p$)

$n_p = 14.98739535$ for plastic range ($f_x = f_u$)

Spanning Rek Diagram EN AW 6060 T66



Bijlage B Proefopstelling in Autocad



Bijlage C Proefresultaten

Bijlage C.1 Overzicht proefresultaten

Tabel C.1 Overzicht proefresultaten

Diameter [mm]	Wanddikte [mm]	Voorboordiameter [mm]	Test variant	Aantal testen	Uittrekwaaarde test [N]												Gemiddelde	Standaarddeviatie	Coefficient volgens Tabel 04.2	Karakteristieke waarde	Rekenwaarde
					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12					
4.8	2.0	3.5	4.8 - S1	6	2550	2300	2210	2500	2470	2550							2430.0	141.8	1.77	2178.9	1743.1
		3.6	4.8 - S2	6	2280	2310	2380	2360	2270	2400							2333.3	54.3	1.77	2237.3	1789.8
		3.7	4.8 - S3	6	2160	2090	2320	2300	2220	2150							2206.7	90.3	1.77	2046.9	1637.5
		3.9	4.8 - S4	6	4710	3560	3600	3870	3970	3570							3880.0	441.4	1.77	3098.8	2479.0
		4.0	4.8 - S5	12	3360	4240	3740	3670	3160	3340	3650	4290	3720	4120	4300	3520	3759.2	394.1	1.712	3084.4	2467.5
		4.1	4.8 - S6	6	3850	4230	3140	4030	3120	4060							3738.3	486.4	1.77	2877.3	2301.9
	3.0	4.1	4.8 - S7	6	2310	5800	5710	5480	6040	5510							5708.0	229.1	1.80	5295.7	4236.5
		4.2	4.8 - S8	6	5420	4940	5210	5200	5280	5280							5221.7	158.8	1.77	4940.6	3952.5
		4.3	4.8 - S9	6	4520	4640	4810	4300	4400	4740							4568.3	197.8	1.77	4218.2	3374.5
		4.8	6.3 - S1	6	2590	2700	2550	2580	2600								2604.0	56.8	1.80	2501.7	2001.4
		4.9	6.3 - S2	6	2530	2790	2520	2800	2850	2810							2716.7	149.9	1.77	2451.4	1961.1
		5.0	6.3 - S3	6	2730	2610	2660	2640	2750	2700							2681.7	54.2	1.77	2585.7	2068.6
6.3	2.0	5.3	6.3 - S4	6	3910	4440	3670	4080	4480	4490							4178.3	345.5	1.77	3566.9	2853.5
		5.4	6.3 - S5	6	3790	5140	4950	4340	4950	5100							4711.7	535.8	1.77	3763.3	3010.6
		5.5	6.3 - S6	6	4930	3840	4940	3390	3910	4990							4333.3	702.5	1.77	3089.9	2471.9
		5.5	6.3 - S7	6	6550	6790	6550	6570	6860	6560							6646.7	140.1	1.77	6398.7	5119.0
		5.6	6.3 - S8	6	6410	6160	6090	6440	6140	6500							6290.0	179.1	1.77	5973.0	4778.4
		5.7	6.3 - S9	6	5810	5770	5860	6020	5760	5740							5826.7	103.9	1.77	5642.8	4514.3
4.0	3.0																				

Bijlage C.2 Testrapport



Element Materials Technology
 Schutterstraat 27 b
 6191 RZ Beek
 NL

P +31 (0)46 451 1197
 F +31 (0)46 452 4070
 info.beek@element.com
 element.com

Bank: ABN AMRO, Amsterdam
 BIC: ABNANL2A
 IBAN: NL74ABNA0529117738
 BTW: NL8056.95.333.B01
 KvK: 24170257

Scheldebouw B.V.
 Beitel 80
 6422 PB Heerlen
 The Netherlands

Date test : 19 May – 12 August 2020
 Date report : 19 – 20 August 2020
 Element report no. : SL2051/20
 PO number : 4200131602 dated 17-8-2020

TEST REPORT

Subject description : Load tests
 Test temperature : Room temperature
 Testing in accordance with : ISO 4136

Note: The above mentioned data is only for information and is no part of the examination in this test report

DESTRUCTIVE TEST

LOAD TEST

PROEF S1-4,8 WD 2MM (3,5)

Item	Specimen (randomly picked)	FU [KN]	Remark
Proef S1-4,8 WD	1	2550	
	2	2300	
	3	2210	
	4	2500	
	5	2470	
	6	2550	

Note: See figure 1 for the test graph.

PROEF S2-4,8 WD 2MM (3,6)

Item	Specimen (randomly picked)	FU [KN]	Remark
Proef S2-4,8 WD	1	2280	
	2	2310	
	3	2380	
	4	2360	
	5	2270	
	6	2400	

Note: See figure 2 for the test graph.




PROEF S3-4,8 WD 2MM (3,7)

Item	Specimen (randomly picked)	FU [KN]	Remark
Proef S3-4,8 WD	1	2160	
	2	2090	
	3	2320	
	4	2300	
	5	2220	
	6	2150	

Note: See figure 3 for the test graph.

PROEF S4-4,8 WD 3MM (3,7)

Item	Specimen (randomly picked)	FU [KN]	Remark
Proef S4-4,8 WD	1	4710	
	2	3560	
	3	3600	
	4	3870	
	5	3970	
	6	3570	

Note: See figure 4 for the test graph.

PROEF S5-4,8 WD 3MM (4,0)

Item	Specimen (randomly picked)	FU [KN]	Remark
Proef S5-4,8 WD	1	3360	
	2	4240	
	3	3740	
	4	3670	
	5	3160	
	6	3340	
	7	3650	
	8	4290	
	9	3720	
	10	4120	
	11	4300	
	12	3520	

Note: See figure 5 for the test graph.


PROEF S6-4,8 WD 3MM (4,1)

Item	Specimen (randomly picked)	FU [KN]	Remark
Proef S6-4,8 WD	1	3850	
	2	4230	
	3	3140	
	4	4030	
	5	3120	
	6	4060	

Note: See figure 6 for the test graph.

PROEF S7-4,8 WD 4MM (4,1)

Item	Specimen (randomly picked)	FU [KN]	Remark
Proef S7-4,8 WD	1	2310	
	2	5800	
	3	5710	
	4	5480	
	5	6040	
	6	5510	

Note: See figure 7 for the test graph.

PROEF S8-4,8 WD 4MM (4,2)

Item	Specimen (randomly picked)	FU [KN]	Remark
Proef S8-4,8 WD	1	5420	
	2	4940	
	3	5210	
	4	5200	
	5	5280	
	6	5280	

Note: See figure 8 for the test graph.

PROEF S9-4,8 WD 4MM (4,3)

Item	Specimen (randomly picked)	FU [KN]	Remark
Proef S9-4,8 WD	1	4520	
	2	4640	
	3	4810	
	4	4300	
	5	4400	
	6	4740	

Note: See figure 8 for the test graph.


PROEF S1-6,3 WD 2MM (4,8)

Item	Specimen (randomly picked)	FU [KN]	Remark
Proef S1-6,3 WD	1	2590	
	2	2700	
	3	2550	
	4	2580	
	5	2600	
	6	-	Profiel was vervormd

Note: See figure 9 for the test graph.

PROEF S2-6,3 WD 2MM (4,9)

Item	Specimen (randomly picked)	FU [KN]	Remark
Proef S2-6,3 WD	1	2530	
	2	2790	
	3	2520	
	4	2800	
	5	2850	
	6	2810	

Note: See figure 10 for the test graph.

PROEF S3-6,3 WD 2MM (5,0)

Item	Specimen (randomly picked)	FU [KN]	Remark
Proef S3-6,3 WD	1	2730	
	2	2610	
	3	2660	
	4	2640	
	5	2750	
	6	2700	

Note: See figure 11 for the test graph.

PROEF S4-6,3 WD 3MM (5,3)

Item	Specimen (randomly picked)	FU [KN]	Remark
Proef S4-6,3 WD	1	3910	Profiel gescheurd
	2	4440	
	3	3670	Profiel gescheurd
	4	4080	Profiel gescheurd
	5	4480	
	6	4490	

Note: See figure 12 for the test graph.


PROEF S5-6,3 WD 3MM (5,4)

Item	Specimen (randomly picked)	FU [KN]	Remark
Proef S5-6,3 WD	1	3790	
	2	5140	
	3	4950	
	4	4340	
	5	4950	
	6	5100	

Note: See figure 13 for the test graph.

PROEF S6-6,3 WD 3MM (5,5)

Item	Specimen (randomly picked)	FU [KN]	Remark
Proef S6-6,3 WD	1	4930	
	2	3840	
	3	4940	
	4	3390	
	5	3910	
	6	4990	

Note: See figure 14 for the test graph.

PROEF S7-6,3 WD 4MM (5,5)

Item	Specimen (randomly picked)	FU [KN]	Remark
Proef S7-6,3 WD	1	6550	
	2	6790	
	3	6550	
	4	6570	
	5	6860	
	6	6560	

Note: See figure 15 for the test graph.

PROEF S8-6,3 WD 4MM (5,6)

Item	Specimen (randomly picked)	FU [KN]	Remark
Proef S8-6,3 WD	1	6410	
	2	6160	
	3	6090	
	4	6440	
	5	6140	
	6	6500	

Note: See figure 16 for the test graph.



PROEF S7-6,3 WD 4MM (5,7)

Item	Specimen (randomly picked)	FU [KN]	Remark
Proef S9-6,3 WD	1	5810	
	2	5770	
	3	5860	
	4	6020	
	5	5760	
	6	5740	

Note: See figure 17 for the test graph.

Element Materials Technology
Beek, 20 August 2020



Y. Heatubun

All characteristics of the above object(s) have, as far as accessible and relevant, been verified by Element Materials Technology Rotterdam b.v. (Element). Other information was provided by the purchaser. This information was verified as far as possible and has been copied into this report, unchanged. Element does not bear responsibility for the correctness of this submitted information. Any kind of "witnessing" and conclusions by a third party is not covered by the RVA accreditation L063 and is no part of the Element report. We hereby certify that the reported test data is correct and that the above object(s) was (were) tested/examined in accordance with purchaser's requirements and/or the above procedure(s) and/or code(s)/specification(s). If a declaration of conformity is issued in the report with regard to compliance with a specification or standard, this declaration is only applicable to the product(s) examined. In this assessment, the decision rule is applied that assumes that the expanded measurement uncertainty is not included in the assessment. On occasion a test is subcontracted by Element, the accreditation number of the subcontracted party is reported. Interpretations, opinions, conclusions and advice are partly based on the examination results and partly on information supplied by the purchaser. This report has legal value only when furnished with an authorized signature. If, upon reproduction, only part of this report is copied, Element will not bear any responsibility for content, purport and conclusions of that reproduction. The items subjected for the examinations will be stored for 2 months, starting from the report date as mentioned on the title page of this report. When no other instructions are received from our client before the end of this standard period of storage, we assume that our client has no objections that the objects concerned will be disposed of by Element at will.



SL2051/2020
page 6 of 15

ET_1017_03

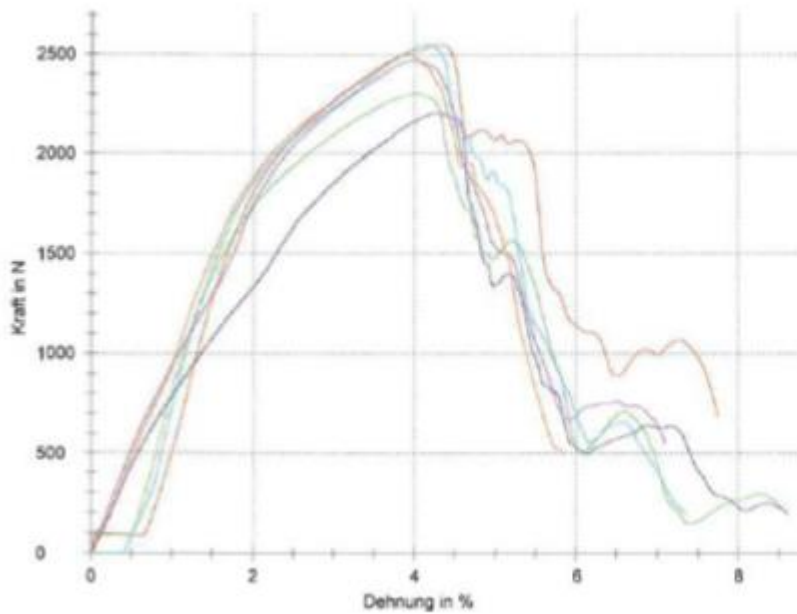


Figure 1. Test graph Proef S1-4,8.

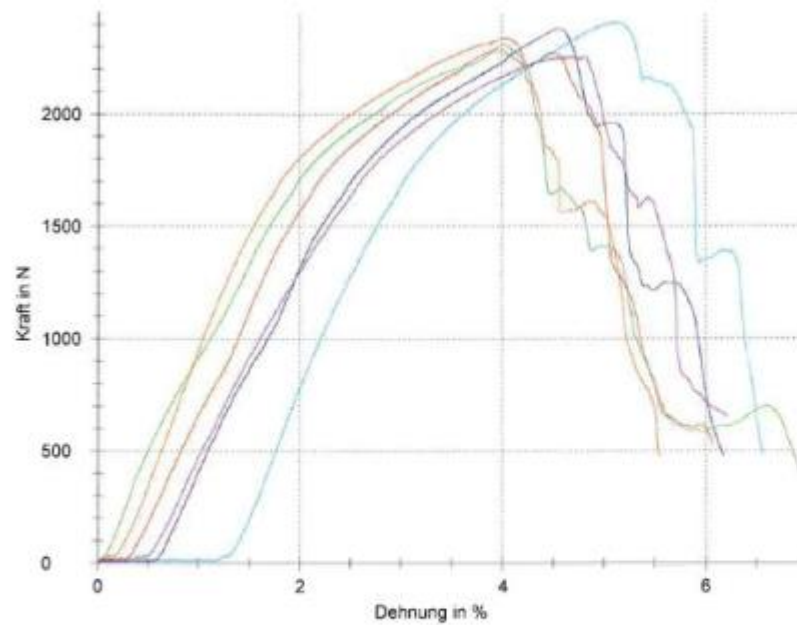


Figure 2. Test graph Proef S2-4,8.



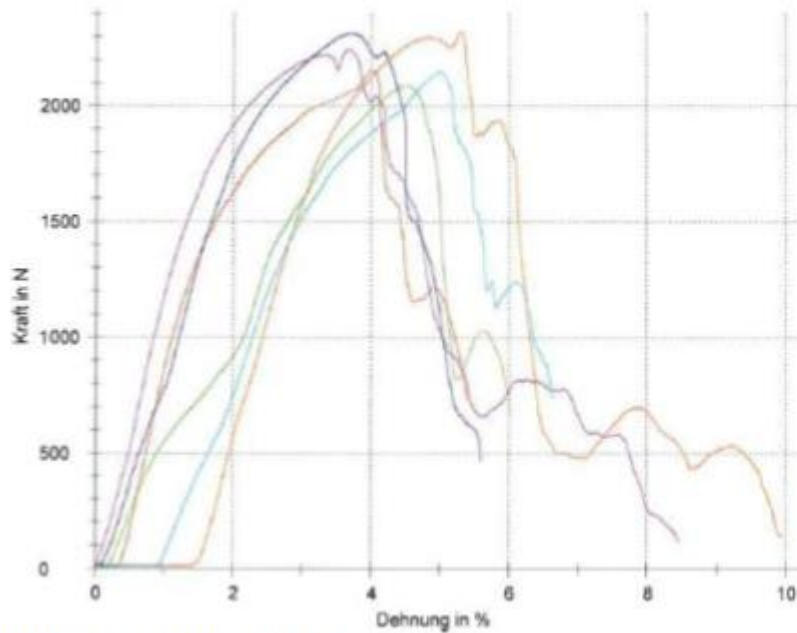


Figure 3. Test graph Proef S3-4,8.

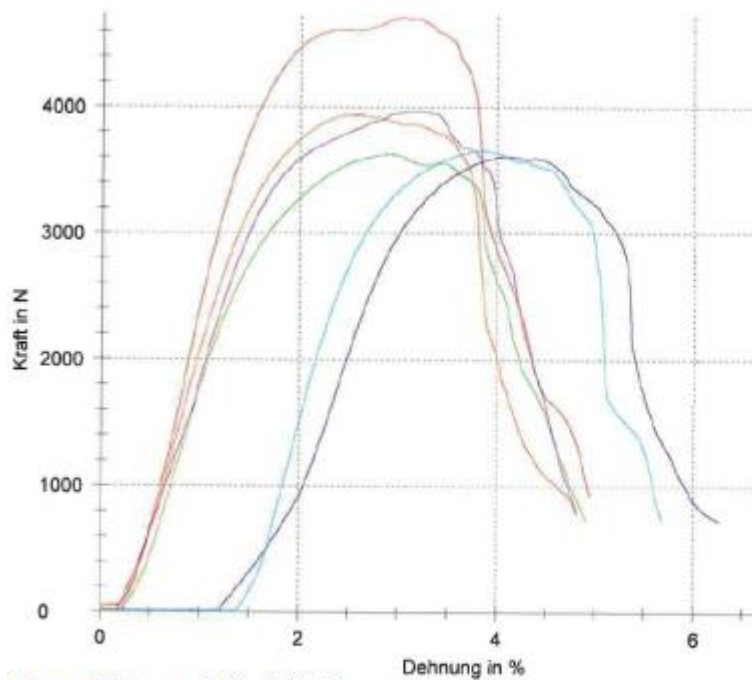


Figure 4. Test graph Proef S4-4,8.

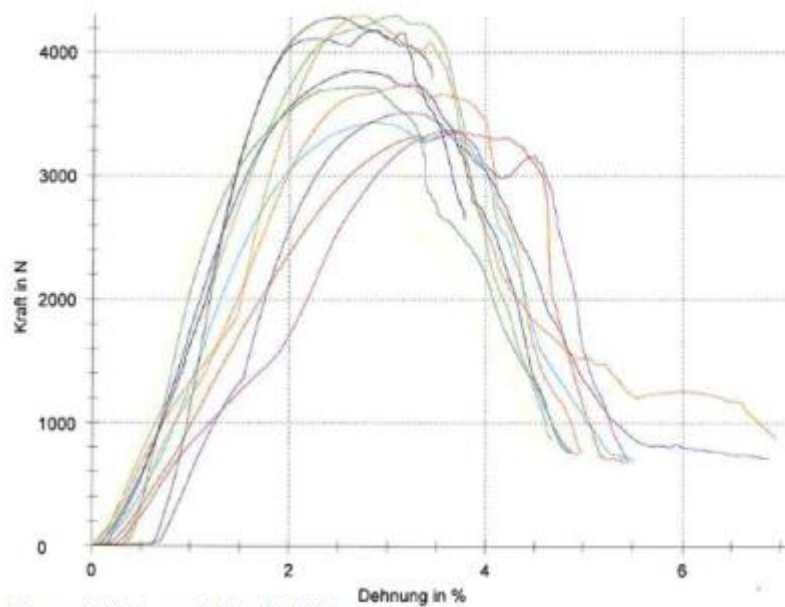


Figure 5. Test graph Proef S5-4,8.

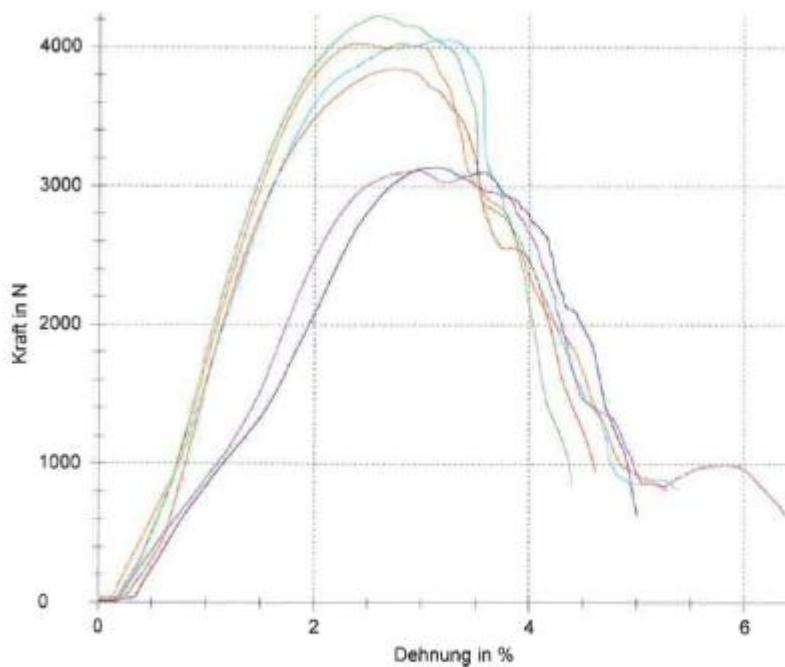


Figure 6. Test graph Proef S6-4,8.

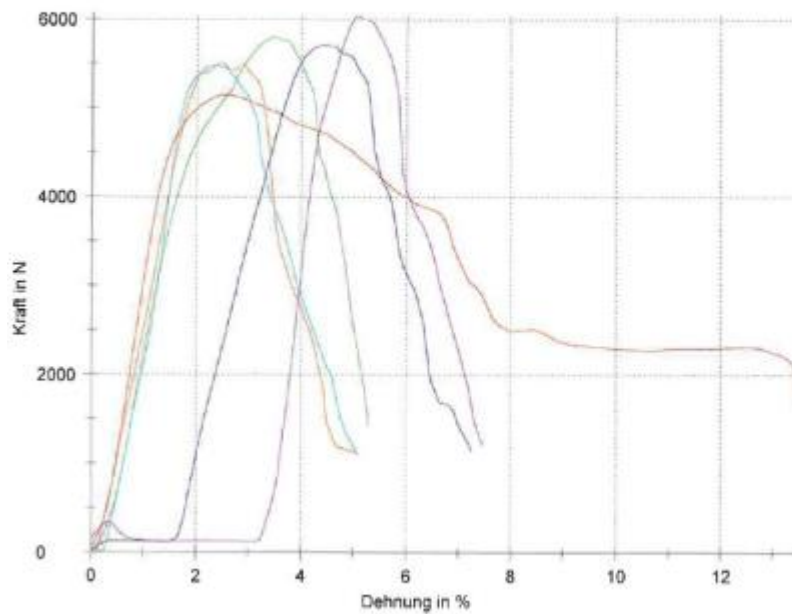


Figure 7. Test graph Proef S7-4,8.

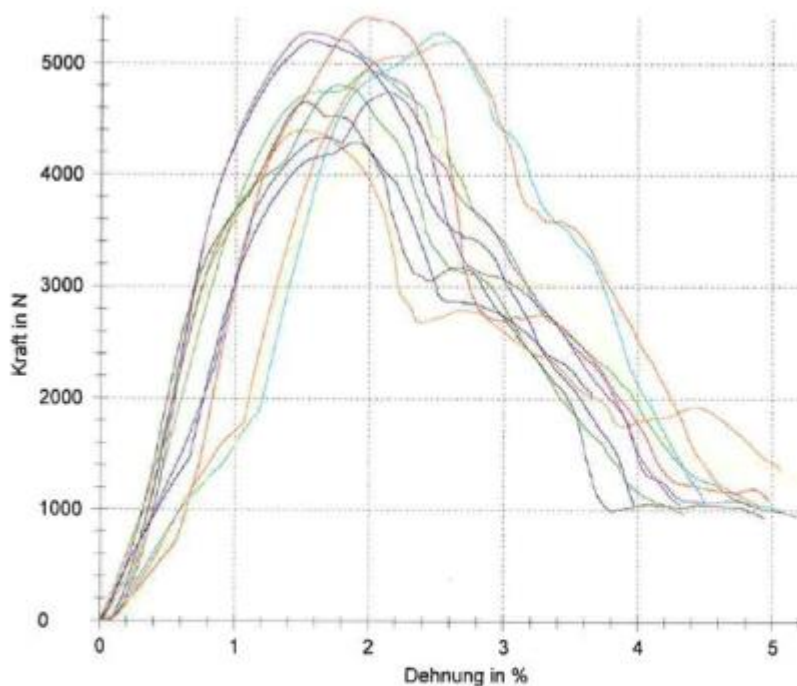


Figure 8. Test graph Proef S8-4,8 + Proef S9-4,8.

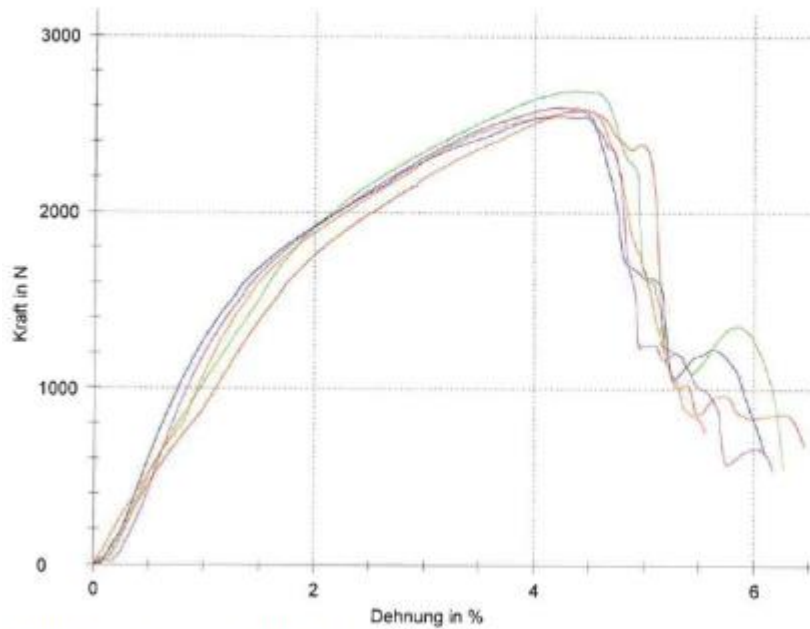


Figure 9. Test graph Proef S1-6,3.

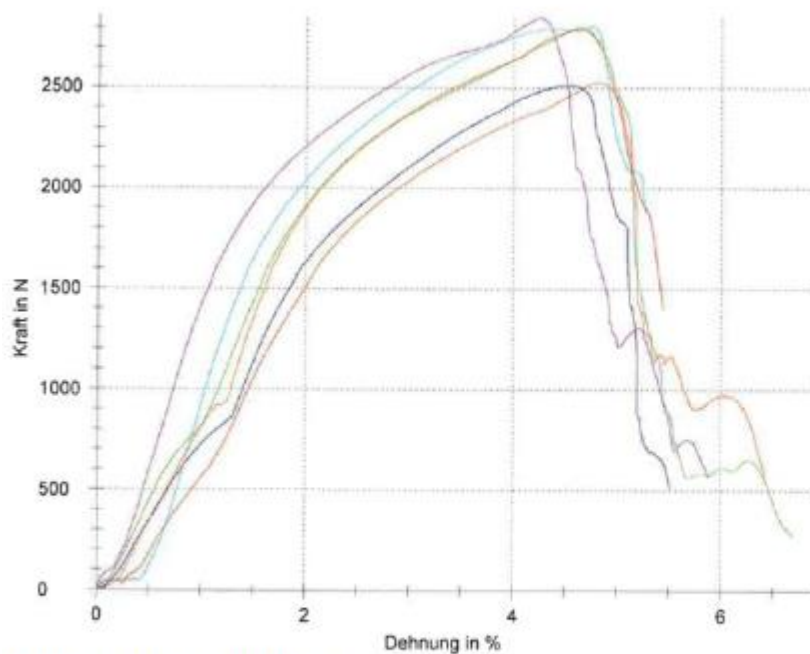


Figure 10. Test graph Proef S2-6,3.

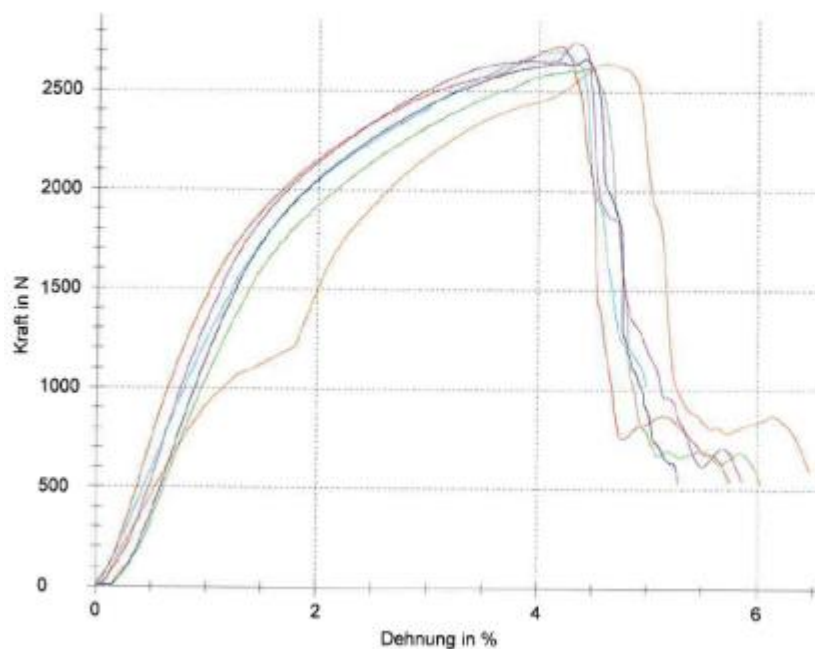


Figure 11. Test graph Proef S3-6,3.

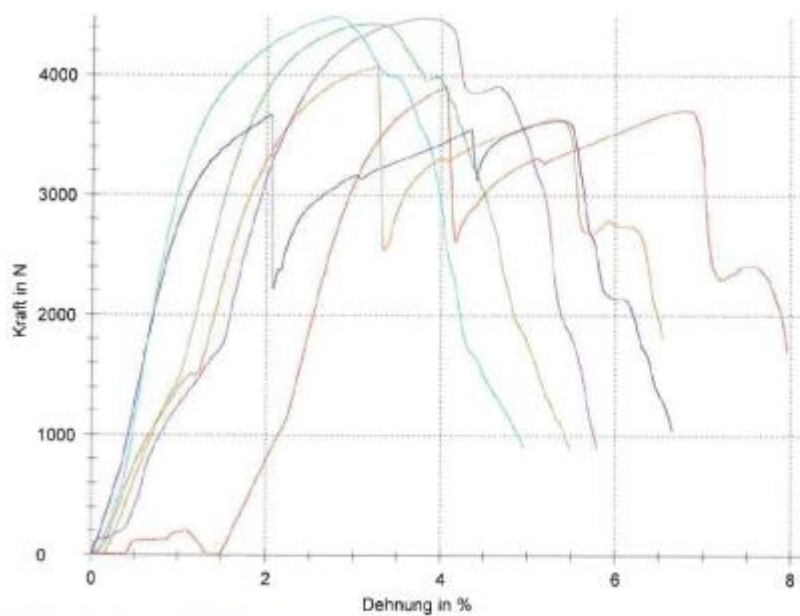


Figure 12. Test graph Proef S4-6,3.

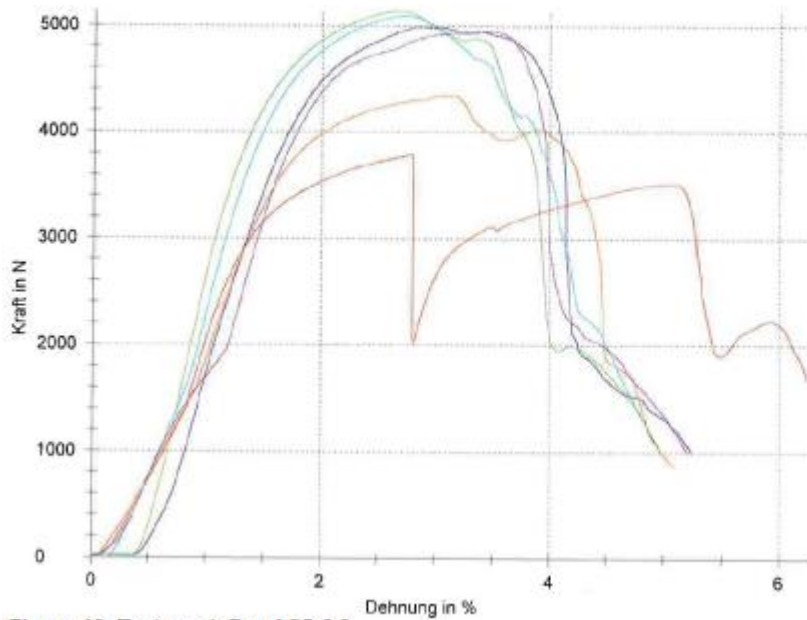


Figure 13. Test graph Proef S5-6,3.

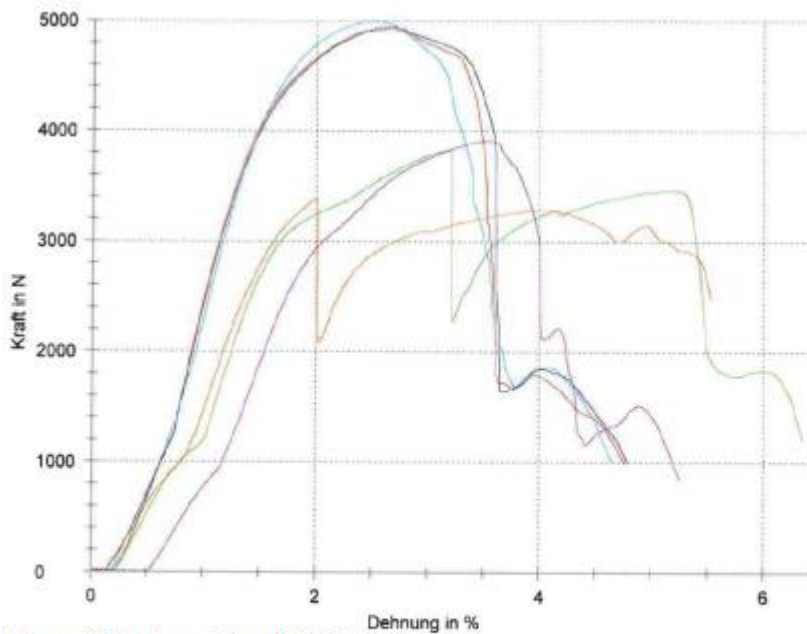


Figure 14. Test graph Proef S6-6,3.

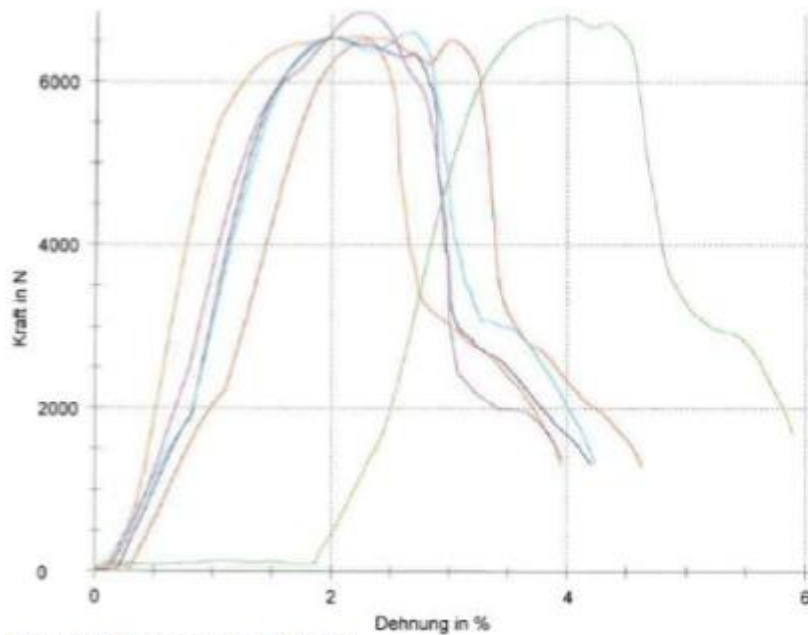


Figure 15. Test graph Proef S7-6,3.

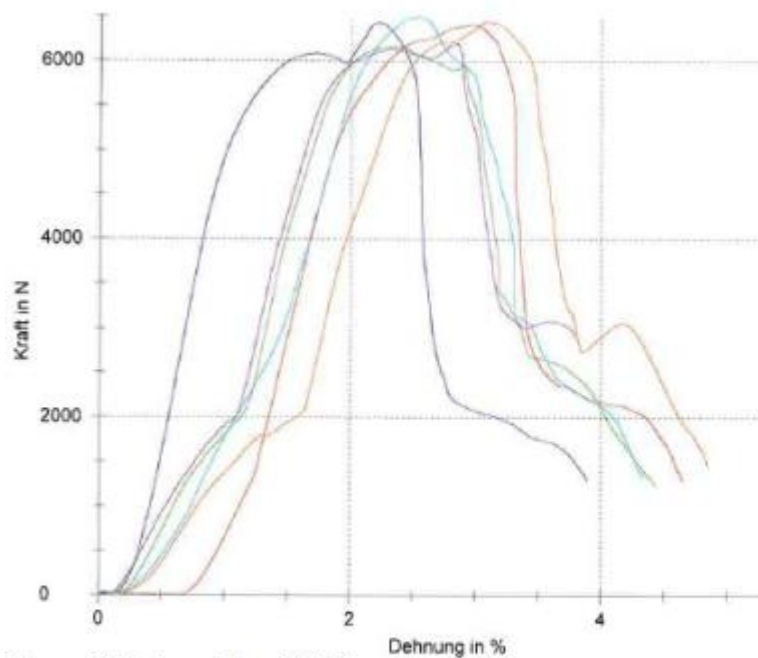


Figure 16. Test graph Proef S8-6,3

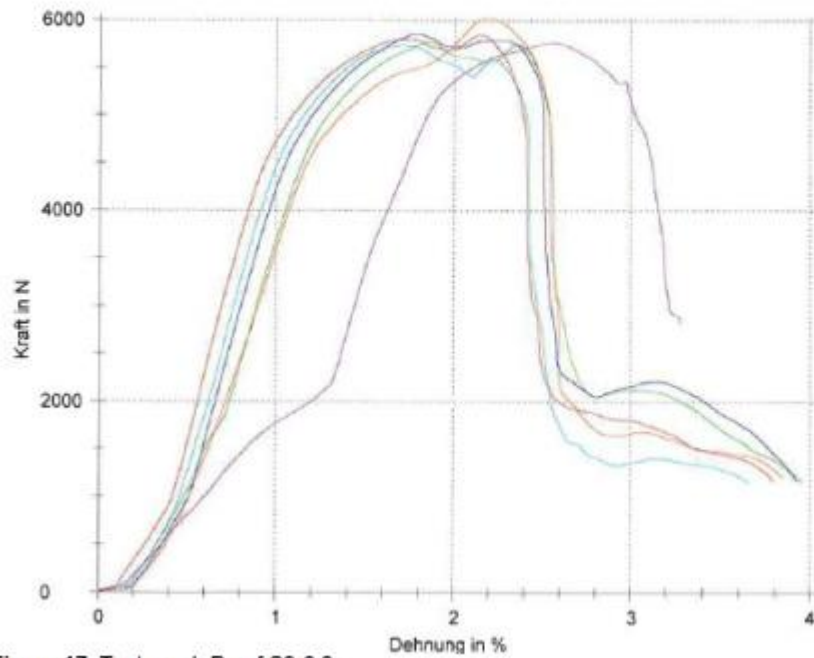


Figure 17. Test graph Proef S9-6,3.

Bijlage D Zelfreflectie

Met dit afstudeeronderzoek komt er een einde aan mijn opleiding tot Staalconstructeur MSEng. Het waren pittige, maar ook zeer interessante jaren waarin ik veel specialistische kennis heb opgedaan op het gebied van constructies en mechanica in het algemeen, en staalconstructies in het bijzonder. Ook al heb ik in mijn dagelijkse werk vooral met aluminium constructies te maken, de opleiding heeft zeker bijgedragen aan mijn (constructieve) ontwikkeling en zal me helpen bij het uitvoeren van mijn dagelijkse werkzaamheden als constructeur.

Aangezien ik werkzaam ben in een vrij specifieke tak van de bouw, namelijk de gevelbouw, wilde ik geen heel gebouw neerzetten voor mijn afstudeeronderzoek, maar me verdiepen in een alledaags probleem en dit tot op de bodem uitzoeken. De vereiste diepgang heb ik naar mijn mening behaald door het probleem vanuit verschillende invalshoeken te benaderen. De praktijktesten vormen hierbij een onmisbaar onderdeel en brengen de overige deelonderzoeken samen. Het onderzoek heeft uiteindelijk geresulteerd in een bruikbaar document dat het bedrijf zal helpen om dit type verbindingen verder te optimaliseren.

Mijn grootste valkuil tijdens de afstudeerperiode was het bewaken van de planning en voortgang. Het kostte vaak veel moeite om na mijn veertigjarige werkweek nog tijd in te plannen om aan mijn afstuderen te werken. Vanwege mijn naderende bruiloft en huwelijksreis heb ik op een gegeven moment besloten om even pas op de plaats te maken en te reflecteren op mijn proces. Hier is vervolgens een nieuwe planning uitgerold die ik de laatste periode ook strak volgde. Daardoor merkte ik dat ik veel vooruitgang boekte. Dit gaf me vervolgens weer meer energie en motivatie om ook buiten mijn planning extra aan het onderzoek te werken.

Een ander aspect dat ik beter had moeten plannen was het in gang zetten van de testen. Uiteindelijk heeft er namelijk veel tijd gezeten in het laten maken van de proefstukken en het uitvoeren van de trekproeven. Met name de tijd die nodig is geweest om de 114 trekproeven uit te voeren, met het verwisselen van de proefstukken en het afstellen van de trekbank, heb ik onderschat. Daarnaast had ik geen rekening gehouden met de vakantieperiode en de beperkte bezetting van het testlab in die weken. Voor een volgend onderzoek zal ik hier dan ook anders mee omgaan en alle zaken die extern moeten gebeuren eerder organiseren.

Door de beperkingen van de software die ik heb gebruikt voor het numerieke onderzoek heeft het me veel tijd extra gekost om een goed werkend model te maken. Achteraf gezien had ik eerder de beperkingen onder ogen moeten zien en moeten zoeken naar een iets minder perfect model binnen de mogelijkheden van de software. Door het vele malen niet convergeren van een urenlange berekening verloor ik bij momenten de motivatie. Dit had ik kunnen verhelpen door eerder aan te kloppen bij mijn begeleider en hem om advies vragen in deze situatie. Mijn karaktereigenschap om zoveel mogelijk zelf te willen oplossen in combinatie met mijn perfectionisme hebben hier in die zin niet aan bijgedragen, maar hebben er aan de andere kant wel voor gezorgd dat ik alles zorgvuldig en nauwkeurig bekeken heb en heb uitgewerkt.

Door de vele hobbels op mijn weg ben ik daarom des te blijer met en trotser op het eindresultaat. Mijn doorzettingsvermogen is op de proef gesteld, maar heeft me uiteindelijk ook geholpen om dit onderzoeksrapport naar tevredenheid af te ronden. Het afstudeeronderzoek in het algemeen en het proces en de planning in het bijzonder, hebben bijgedragen aan mijn ontwikkeling als constructeur en als persoon.