

Toetsing van de Verbindingssterkten van een Ongecoate Membraanconstructie

Een Onderzoek naar SUNTEX in Tijdelijke Architectuur

CTB3000-16 Bachelor Eindwerk

T. Rivas Smits

TU Delft

TEN TECH

PAULINE VAN DONGEN

Toetsing van de Verbindingssterkten van een Ongecoate Membraanconstructie

Een Onderzoek naar SUNTEX in Tijdelijke Architectuur

door

T. Rivas Smits

Thomas
Rivas Smits

Begeleiders:	P. Hoogenboom & M. Veljkovic
Projectduur:	November, 2024 - January, 2025
Faculteit:	Civil Engineering, Delft

AchtergrondSUNTEX door Studio Pauline van Dongen

TU Delft

TEN TECH ONTWERP EN ADVIES VOOR LICHTGEWICHT BOUWEN

PAULINE VAN DONGEN

Voorwoord

Met veel trots presenteer ik u mijn bacheloreindwerk, getiteld Toetsing van de Verbindingssterkten van een Ongecoate Membraanconstructie - Een Onderzoek naar SUNTEX in Tijdelijke Architectuur. Dit vormt het sluitstuk van mijn Bachelor Civiele Techniek aan de Technische Universiteit Delft. Het verslag weerspiegelt niet alleen mijn academische ontwikkeling, maar ook mijn persoonlijke groei tijdens deze boeiende en leerzame periode.

Dit onderzoek zou niet tot stand zijn gekomen zonder de ondersteuning en begeleiding van een aantal mensen. Daarom wil ik van deze gelegenheid gebruikmaken om hen te bedanken. Allereerst wil ik mijn begeleiders vanuit de TU Delft Pierre Hoogenboom en Milan Veljkovic en vanuit TenTech Rogier Houtman en Harmen Werkman bedanken voor hun waardevolle begeleiding, deskundige feedback en het vertrouwen in mijn werk. Hun adviezen hebben me geholpen om dit eindwerk naar een hoger niveau te tillen.

Ten slotte ben ik dankbaar voor alle organisaties en personen die hun tijd hebben vrijgemaakt om mij te voorzien van informatie en inzichten die cruciaal waren voor mijn onderzoek. Hun bereidheid om mee te werken en hun expertise hebben dit werk mogelijk gemaakt.

Ik hoop dat mijn eindwerk een bijdrage kan leveren aan de ontwikkeling van SUNTEX en dat het anderen kan inspireren om verder onderzoek te doen op het gebied van membraanconstructies.

T. Rivas Smits
Delft, januari 2025

Samenvatting

Dit onderzoek richt zich op de ontwikkeling en verificatie van verbindingsmethoden voor SUNTEX, een membraanconstructiemateriaal met geïntegreerde zonnecellen. Het doel is het analyseren en optimaliseren van de mechanische prestaties van rand- en tussenverbindingen in PLA-doekdelen, specifiek ontworpen voor het demonstratiepaviljoen in Arnhem.

Het onderzoek bestaat uit drie hoofdonderdelen:

- **Literatuurstudie**: Analyse van membraanconstructies, verbindingstechnieken en de eigenschappen van SUNTEX bij het demonstratiepaviloen.
- **Ontwerp van testprotocollen**: Ontwerp van protocollen en opstellingen om de treksterkte van de rand- en tussenverbindingen te testen.
- **Fysieke testen**: Uitvoering van trekproeven om de mechanische prestaties van de verbindingen te evalueren.

De berekeningen tonen aan dat zowel het membraan als het kederprofiel voldoen aan de gestelde veiligheidseisen. De gebruikscoëfficiënt (U.C.) is 0.20 voor het membraan en 0.70 in het kederprofiel.

De fysieke testen bevestigen dat randverbindingen, met een gestikte open zoom en een kederprofiel, krachten effectief langs de rand van het membraan verdelen. Tussenverbindingen met drie stiknaden bieden een sterke en duurzame verbinding tussen de doekdelen.

Opvallend is dat in beide testen de verbindingen in weft-richting consistent een hogere trekkracht weerstaan.

Structuur van het onderzoek

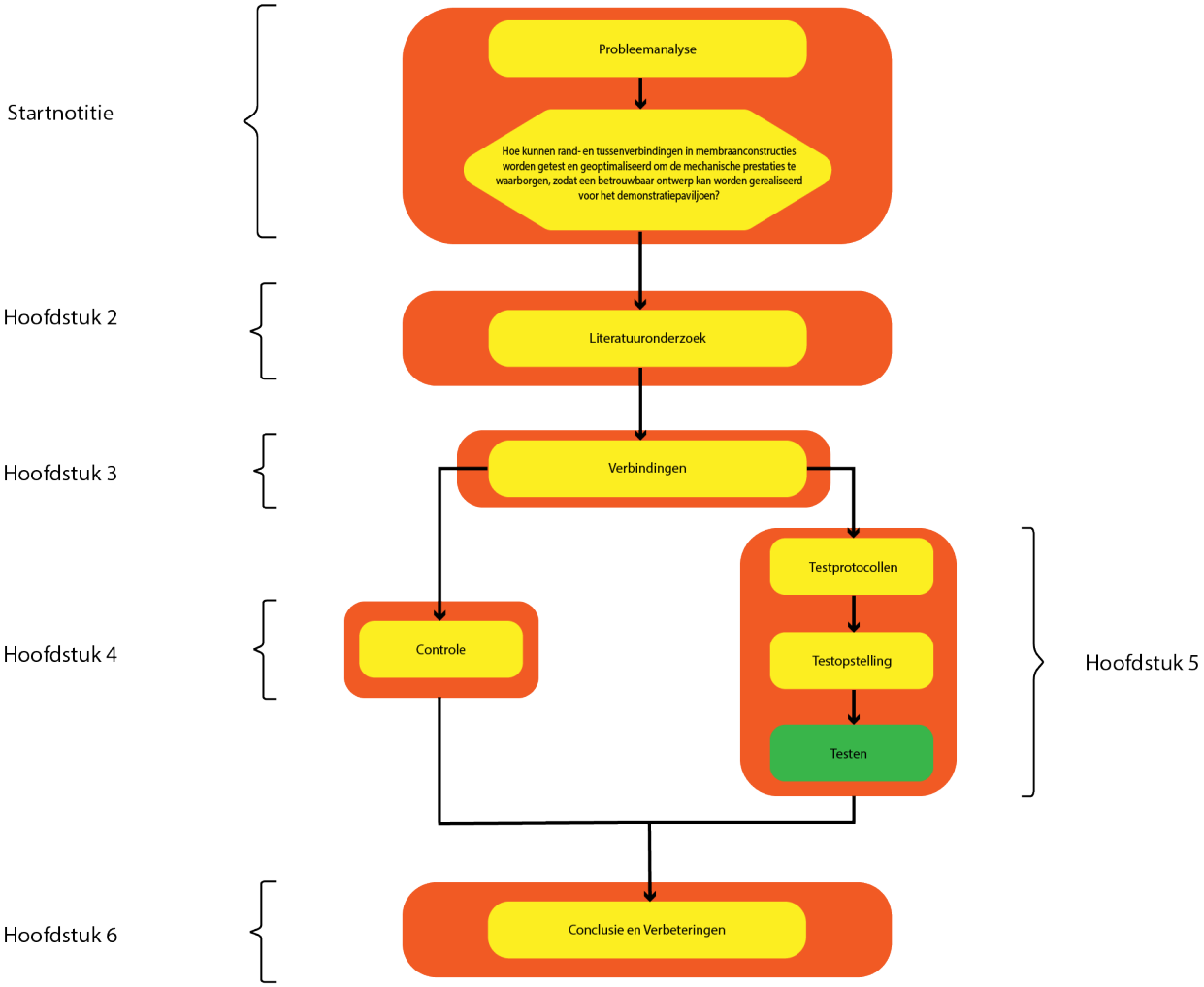


Figure 1: Onderzoeksmethode en structuur

Inhoudsopgave

Voorwoord i

Samenvatting ii

Structuur van het onderzoek iii

1 Introductie 1

2 Vooronderzoek 2
2.1 Membraanconstructies . . . 2
2.2 Weven en SUNTEX . . . 4
2.2.1 Weven . . . 4
2.2.2 SUNTEX . . . 5
2.3 Arnhem Demonstrator . . . 7
2.4 PLA-membraan . . . 8

3 Verbindingen 9
3.1 Verschillende soorten verbindingen . . . 9
3.1.1 Randverbinding . . . 9
3.1.2 Tussenverbinding . . . 12

4 Controle 13
4.1 Spanningverloop in Membraan . . . 13
4.2 Kederprofiel . . . 14
4.3 Conclusie . . . 15

5 Testen 16
5.1 Voorbereiding . . . 16
5.2 Resultaten . . . 17
5.2.1 Randverbindingen . . . 17
5.2.2 Tussenverbindingen . . . 20

6 Conclusie en aanbevelingen 23

A Testprotocol Flexibele Keder Membraan Randverbinding 27
A.1 Testprotocol . . . 27
A.1.1 Proefstukken . . . 27
A.1.2 Testopzet . . . 30
A.1.3 Test Procedure . . . 31
A.1.4 Resultaten en Analyse . . . 32
A.1.5 Conclusie . . . 33
A.2 Stappenplan voor Proefstuk Randverbinding . . . 34
A.3 Tabel Trekproef Randverbinding . . . 35

B Testprotocol Tussenverbinding 36
B.1 Testprotocol . . . 36
B.1.1 Test Proefstukken . . . 36
B.1.2 Testopstelling . . . 38
B.1.3 Testprocedure . . . 38
B.1.4 Conclusie . . . 40
B.2 Stappenplan Trekproef Tussenverbinding . . . 41
B.3 Tabel Trekproef Tussenverbinding . . . 42

C Testverslag **43**
C.1 Proefstuk Productie 43
C.2 Voorspanning en Parameters 47
C.3 Testopstelling 48

D Resultaten **50**
D.1 Gegevensanalyse 54

1

Introductie

Dit rapport richt zich op het analyseren van de mechanische prestaties van de rand- en tussenverbindingen in SUNTEX, een fotovoltaïsch membraanconstructiemateriaal. De uitkomsten van dit onderzoek dragen bij aan de ontwikkeling van het eerste SUNTEX-demonstratiepaviljoen in Arnhem. De centrale onderzoeksvraag luidt als volgt:

Hoe kunnen rand- en tussenverbindingen in membraanconstructies ontworpen en getest worden om de mechanische prestaties te waarborgen, zodat een betrouwbaar ontwerp kan worden gerealiseerd voor het demonstratiepaviljoen?

Het rapport is als volgt opgebouwd:

- Het tweede hoofdstuk bespreekt de achtergrond en eigenschappen van membraanconstructies en het huidige project rond SUNTEX.
- In het derde hoofdstuk worden de rand- en tussenverbindingen uitgebreid geanalyseerd en toegelicht, waarbij de focus ligt op hun functionele principes en krachtswerkingen.
- Het vierde hoofdstuk bespreekt de krachtswerking en spanningsverdeling in twee onderdelen van de membraanconstructie, het membraan zelf en het kederprofiel.
- In het vijfde hoofdstuk worden de verschillende testprotocollen die zijn opgesteld om de prestaties van de membraanverbindingen te evalueren samengevat met de resultaten hiervan.
- Tot slot wordt in het laatste hoofdstuk een conclusie getrokken en worden aanbevelingen gedaan voor verder onderzoek naar de praktische toepassing van SUNTEX in de demonstrator.

2

Vooronderzoek

In dit eerste hoofdstuk worden geanalyseerde informatie, theorieën en eerdere onderzoeken samengevat. Hiermee wordt het kader waarbinnen het onderzoek plaatsvindt duidelijk weergegeven, zodat de lezer een goed overzicht krijgt.

2.1. Membraanconstructies

Membraanconstructies zijn dunne, gespannen oppervlakken die de traditionele bouwmethoden hebben getransformeerd. Dankzij hun hoge sterkte-gewichtsverhouding en flexibiliteit voor complexe vormen zijn ze een veelzijdig materiaal in de architectuur en civiele techniek.(Forster & Mollaert, 2004).

De oorsprong van membraanconstructies gaat terug tot eenvoudige tenten, die al rond 40.000 v.Chr. door de mens werden gebruikt (Soo, 2024). Moderne toepassingen verschenen pas in de 19e eeuw, gedreven door de behoefte aan snel op- en afbreekbare structuren, zoals de populaire rondtrekkende circussen. De mechanisering van het weefproces in dezelfde periode maakte de productie van aanzienlijk grotere membranen mogelijk (Forster & Mollaert, 2004).



Figure 2.1: Forepaugh Circus, (JT Vintage, 1901)

Membraanconstructies onderscheiden zich van traditionele bouwmethoden doordat zij voor hun stabiliteit afhankelijk zijn van interne biaxiale trekspanningen in plaats van massa en stijfheid.

In dit verslag verwijst de term 'stabiliteit van membraanconstructies' niet naar het risico op knik, zoals doorgaans bedoeld bij drukkrachten in stijve elementen. In plaats daarvan duidt het op het vermogen van de constructie om haar vormvastheid te behouden onder externe belastingen. Deze stabiliteit wordt bereikt door een nauwkeurig evenwicht tussen de trekkrachten in het membraanoppervlak(Zhang et al., 2014).

Kenmerken van het Ontwerp

Het ontwerp van membraanconstructies richt zich op drie fundamentele aspecten (Zhang et al., 2014):

Vormkeuze De geometrie van membraanconstructies is doorgaans anticlastisch. Een voorbeeld hiervan is de hyperbolische paraboloïde (zadelvorm), weergegeven in Figuur 2.2. Bij deze geometrie buigt het membraan in twee tegengestelde richtingen. Deze richtingen komen fysisch overeen met de ketting- en inslagrichting van het membraan (Zhang et al., 2014). De betekenis en eigenschappen van deze richtingen worden in het volgende hoofdstuk over Weven en SUNTEX nader toegelicht.

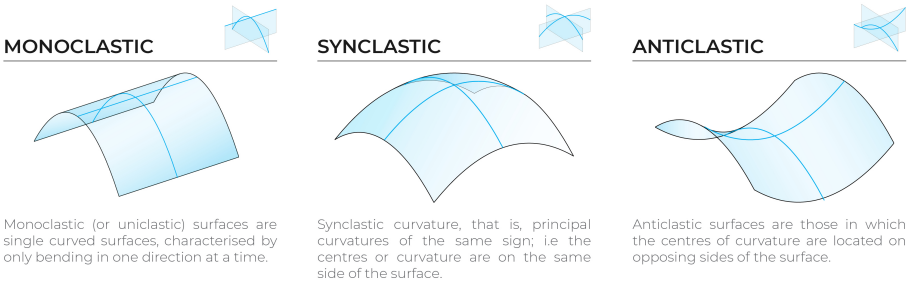


Figure 2.2: Membraan vormen (Whitehead, 2019)

Voorspanning Het toepassen van optimale voorspanning in de ketting- en inslagrichtingen van het membraan verhoogt de stijfheid en voorkomt vervormingen, zoals opwaaiing onder windbelastingen (Zhang et al., 2014).

Vervorming De stabiliteit en uiteindelijke vorm van de constructie worden bepaald door de interactie tussen externe belastingen en interne krachten (Zhang et al., 2014).

Form-Finding: Een Iteratief Proces

Bij membraanconstructies wordt de vorm van de draagstructuur niet vooraf bepaald, zoals bij traditionele bouwmaterialen, maar ontwikkeld via een iteratief proces genaamd *form-finding*. Tijdens dit proces worden aanpassingen gemaakt aan de configuratie van draagelementen, zoals randen, kabels, kolommen en bogen, waarin het membraan wordt voorgespannen (Forster & Mollaert, 2004).

Gedurende het *form-finding*-proces vervormt het membraan zich continu onder invloed van trekkrachten, totdat een stabiele evenwichtstoestand is bereikt. Dit resulteert in een optimale balans tussen externe belastingen en interne krachten (Forster & Mollaert, 2004).

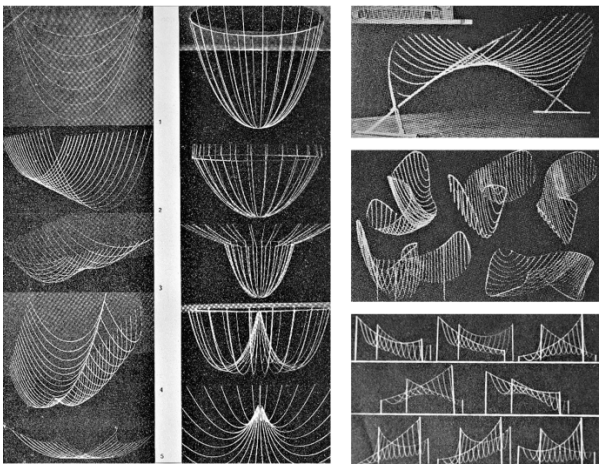


Figure 2.3: Form Finding (F. Otto, n.d.)

2.2. Weven en SUNTEX

2.2.1. Weven

Weven is een fundamenteel proces in de textielindustrie waarbij twee sets draden, de ketting en de inslag, loodrecht op elkaar worden verweven tot een stof. Dit proces werd oorspronkelijk handmatig uitgevoerd op eenvoudige weefgetouwen. Met de industriële revolutie transformeerde weven dankzij mechanische weefgetouwen, die het productieproces aanzienlijk versnelden en verfijnden. Tegenwoordig maken computergestuurde weefmachines het mogelijk om sneller te werken en complexe patronen te creëren (Fashionary, 2020).

Het weefgetouw (Engels: loom) mechaniseert het weefproces. De kettingdraden worden strak gespannen en vormen een stabiele basis. Een mechanisme, bekend als de harness, tilt groepen kettingdraden afwisselend op of laat ze zakken, waardoor een opening ontstaat. Deze opening, de zogenaamde schering, maakt het mogelijk om de inslagdraad door te voeren (Fashionary, 2020).

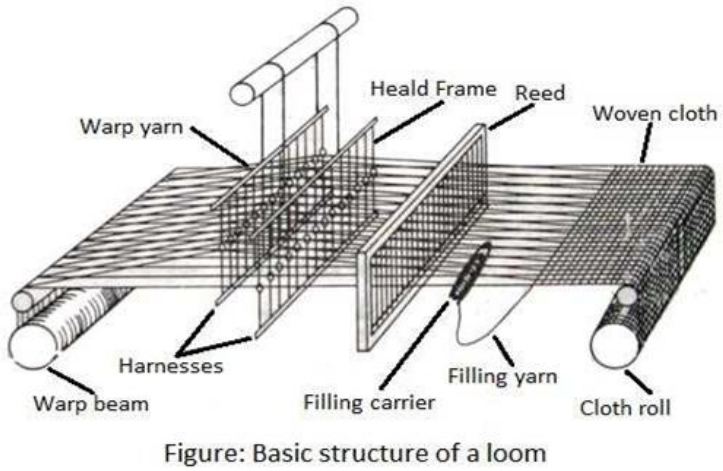


Figure 2.4: Weefgetouw (K.L. Gandhi, 2019)

Het weefproces bestaat uit de volgende stappen:

- **Scheiding:** De kettingdraden, gespannen op het weefgetouw, worden in groepen opgedeeld en omhoog of omlaag bewogen, waardoor openingen ontstaan. Deze beweging bepaalt het patroon in de stof. Door specifieke groepen draden te verplaatsen, kunnen complexe patronen worden geweven. In de afbeelding hierboven wordt deze beweging uitgevoerd door de harnesses (Fashionary, 2020).
- **Inschieten:** De inslagdraad wordt door de opening tussen de kettingdraden geschoten. In de afbeelding wordt dit uitgevoerd door de filling carrier (Fashionary, 2020).
- **Aanslaan:** De inslagdraad wordt hierna tegen de gevormde stof gedrukt om deze te fixeren. Dit proces wordt in de afbeelding uitgevoerd door de reed (Fashionary, 2020).
- **Herhaling:** Deze cyclus wordt herhaald tot de gewenste stoflengte is bereikt (Fashionary, 2020).

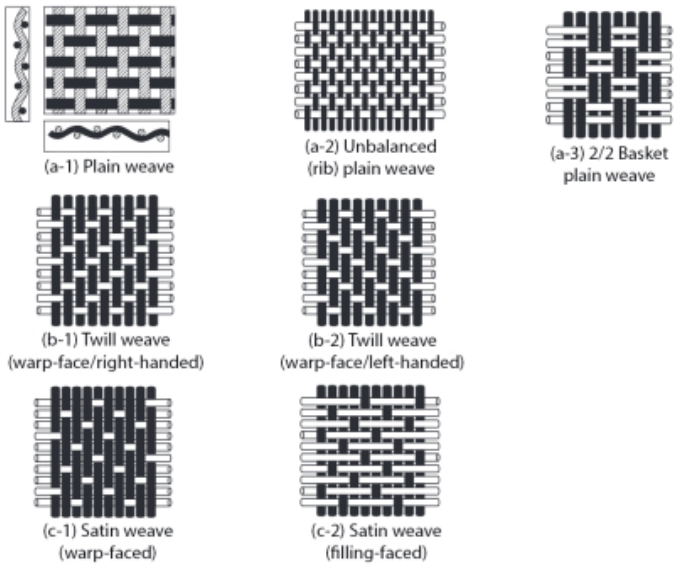
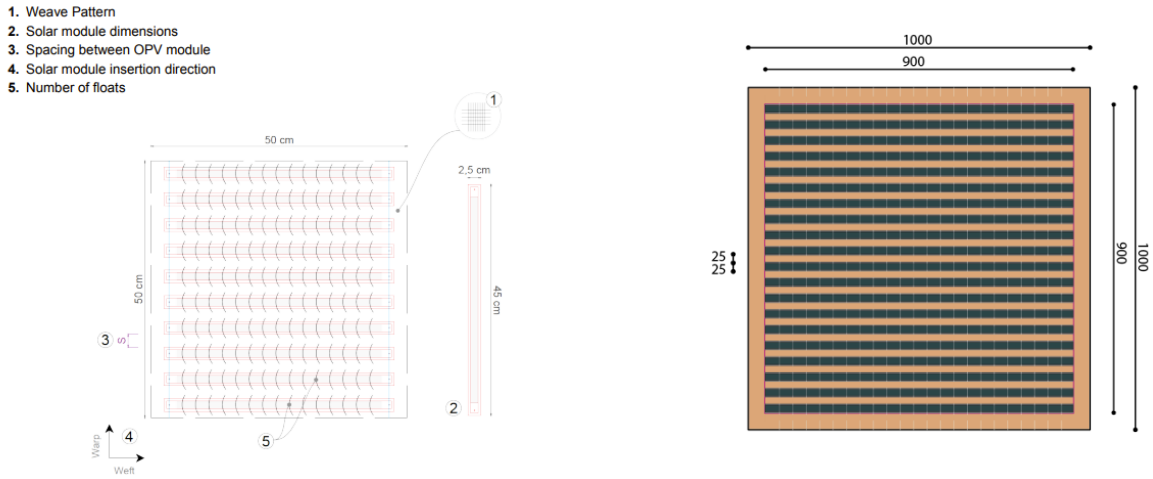


Figure 2.5: Weefpatronen (El Mogahzy, 2009)

Verschillende weefbindingen leiden tot stoffen met unieke eigenschappen. De eenvoudigste binding is de linnenbinding (plain weave), waarbij de inslagdraad afwisselend over en onder de kettingdraden loopt. Complexere bindingen, zoals satijn, creëren stoffen met variërende texturen en esthetische kenmerken (Fashionary, 2020).

2.2.2. SUNTEX

SUNTEX, een textiel oorspronkelijk ontwikkeld door Pauline van Dongen met flexibele dunne-film fotovoltaïsche zonnepanelen, wordt in samenwerking met TenTech verder ontwikkeld tot een gestandaardiseerde, modulaire oplossing voor energieopwekking. Dit textiel benut voorheen ongebruikte oppervlakken in de bebouwde omgeving door zonnecellen te integreren in ingewoven hulsels van het membraan (van Dongen et al., 2022).



(a) SUNTEX samenstelling (Ahmed, 2024)

(b) simple layout SUNTEX fabric 1m x 1m (H. Visser, 2024)

Figure 2.6: SUNTEX Samenstelling

Een van de belangrijkste innovaties van SUNTEX is de methode waarmee zonnecellen in het membraan worden geïntegreerd. In tegenstelling tot andere Building Integrated Photovoltaics (BIPV) bevat het SUNTEX-membraan 'zwevende garens' die op regelmatige afstanden inslagdraden overslaan. Hierdoor ontstaan hulsels waarin Organic Photovoltaics (OPV) zonnecellen kunnen worden geplaatst, zoals geïllustreerd in de onderstaande afbeelding.

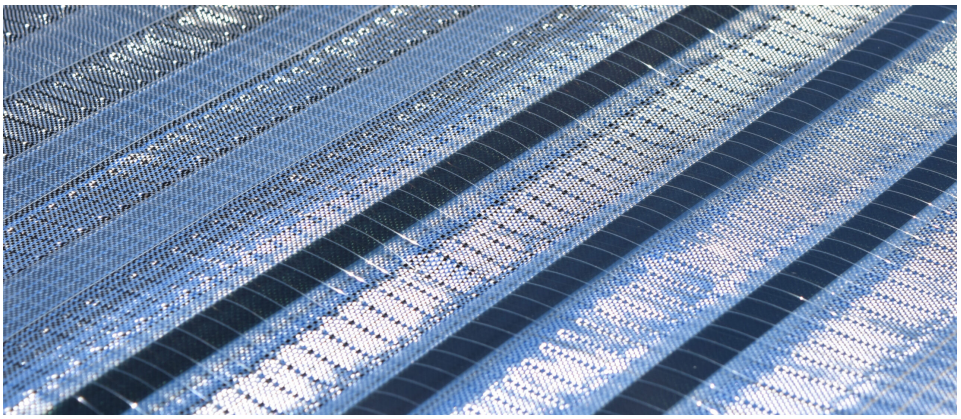


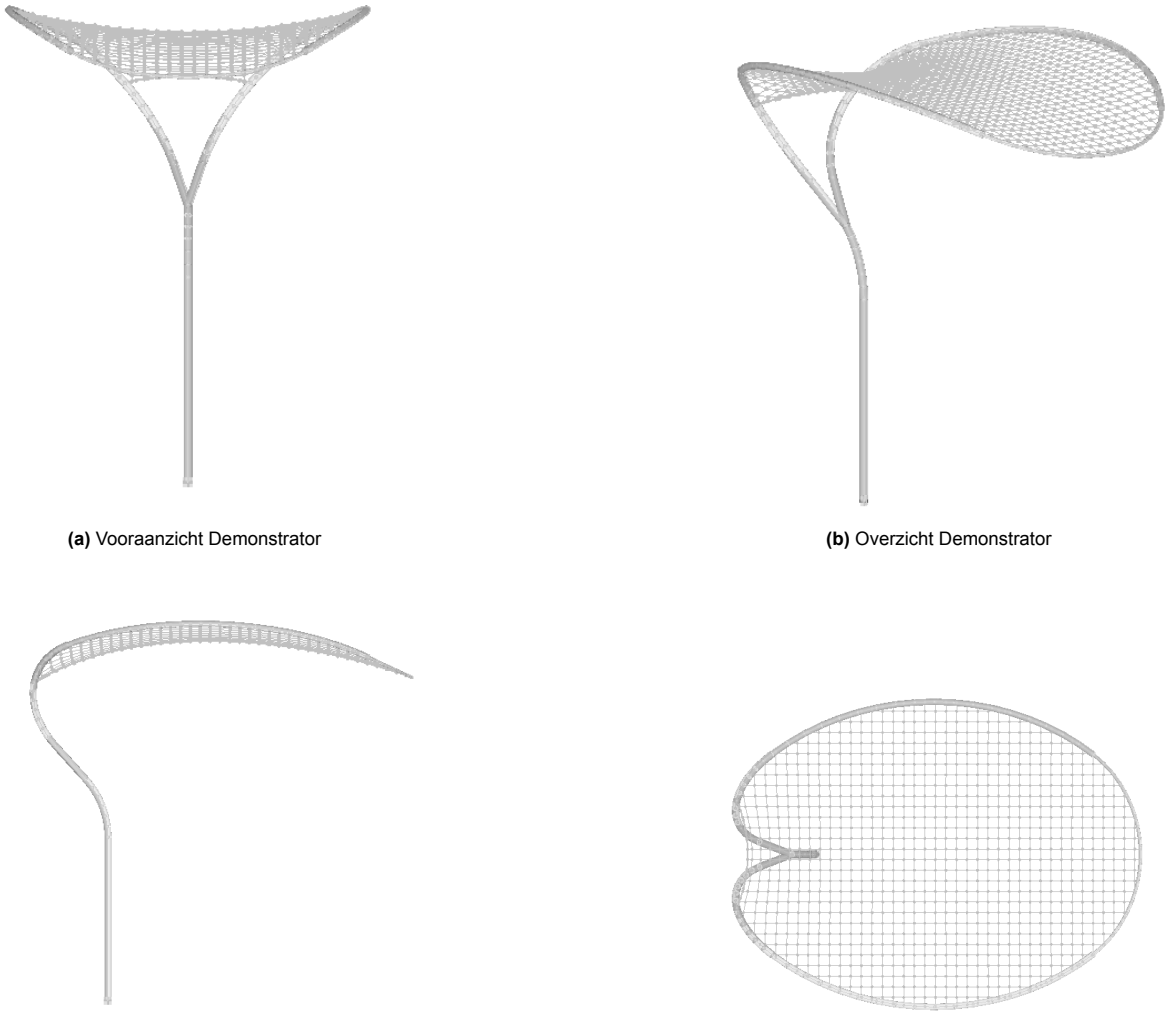
Figure 2.7: SUNTEX closeup (P. van Dongen, 2022)

Het gebruik van zwevende garens in het membraan is mogelijk omdat het ongecoat is en brandvertragend en UV-resistent garen wordt toegepast. Een coating, bedoeld om brandvastheid te garanderen, zou de zwevende garens aan het oorspronkelijke weefsel doen vastplakken (van Dongen et al., 2022).

De OPV-cellen zijn stijver dan het membraan, waardoor volledige hechting extra spanning in de cellen zou veroorzaken. Daarom worden de cellen geplaatst in hulsels met een extra wijdte van 5 mm. Dit voorkomt volledige meebeweging bij vervorming van het membraan en maakt vervanging eenvoudiger bij defecten (Visser, 2025).

2.3. Arnhem Demonstrator

In het kader van de Strategie Klimaatadaptatie Arnhem, die het belang benadrukt van meer schaduwrijke locaties (Gemeente Arnhem, n.d.), heeft Pauline van Dongen een voorstel ingediend voor een schaduwsculptuur op het Audrey Hepburnplein in Arnhem. Dit project omvat meerdere tijdelijke sculpturen waarin SUNTEX voor het eerst als constructiemateriaal zal worden toegepast (Schasfoort, 2024).



(a) Vooraanzicht Demonstrator

(b) Overzicht Demonstrator

(c) Zijaanzicht Demonstrator

(d) Bovenaanzicht Demonstrator

Figure 2.8: Aanzichten SUNTEX Demonstrator (Y. Schasfoort, 2024)

Op basis van de eisen en wensen van zowel de gemeente Arnhem als Pauline van Dongen ontwierp Ymke Schasfoort drie voorontwerpen, waarvan de hierboven weergegeven variant is gekozen.

- De constructie moet voldoende stijf en stabiel zijn om scheuren in SUNTEX te voorkomen.
- De constructie moet snel op- en afgebouwd kunnen worden en een esthetische meerwaarde bieden aan het plein.

Het definitieve ontwerp is vervolgens gemodelleerd en gecontroleerd op alle mogelijke (on)gunstige belastingsituaties. Hoofdstuk 4 gaat hier dieper op in.

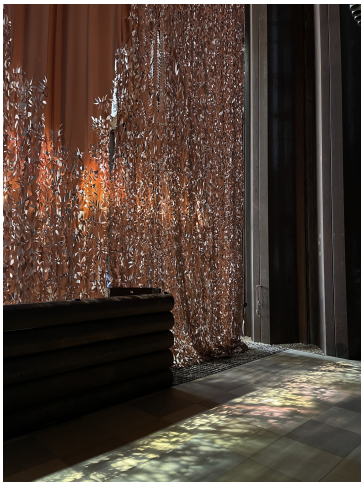
2.4. PLA-membraan

Voor de proeven met de tussen- en randverbindingen is een gekleurde variant van PLA-membraan gebruikt. Polymelkzuur (PLA) is een biologisch afbreekbaar en duurzaam polymeer, geproduceerd uit natuurlijke bronnen zoals maïszetmeel, suikerriet of suikerbieten (More et al., 2022).

Het gebruikte PLA, afkomstig van Senbis Polymer Innovations, is geleverd via Buro Belén, een Amsterdamse designstudio gespecialiseerd in materiaalonderzoek. Buro Belén verfde het PLA-membraan en gebruikte het voor een gordijn en luifel van bio-textiel in het Nederlandse paviljoen op de Wereld Expo in Dubai 2020 (Belén, 2025).



(a) PLA Zonnescherm Nederlands paviljoen Wereld Expo Dubai



(b) PLA Gordijn Nederlands Paviljoen

Figure 2.9: Gebruik PLA Buro Belén op de Wereld Expo Dubai (Buro Belén, 2020)

Aangezien het membraan geverfd is en het effect hiervan op de mechanische eigenschappen onbekend is, kunnen de gegevens van Senbis niet worden overgenomen. Studio PvD heeft daarom zelf een aantal trekproeven uitgevoerd.

Tests	Tensile Strength - F. Max (N/ 5cm)	Elongation at Maximum Force - E@MF (%)
Sample 1	1761	28,20
Sample 2	1703	27
Sample 3	1703	27,30
Sample 4	1582	24,73
Sample 5	1792	34,90

(a) Trekkracht en rek proeven SUNTEX

Mean	1708,20 N/ 5cm	28,42 %
Deviation	80,29	3,83
Observations	standard weight of 463 g/m² + no conditioning	
Visual Results		

(b) Gemiddelde, std en visuele resultaten proeven Studio PvD

Figure 2.10: Testresultaten PLA (Studio PvD., 2024)

Zoals hierboven beschreven, heeft het PLA een gewicht van 463 g/m². De gemiddelde trekkracht in de warp-richting bedraagt 1708,2 N/5 cm, met een maximum van 1792 N/5 cm. Geldige proeven in de weft-richting zijn nog niet uitgevoerd.

3

Verbindingen

In dit hoofdstuk worden de twee onderzochte verbindingstypen van membraanconstructies geanalyseerd en toegelicht. Aan de hand van de literatuur, eerdere onderzoeken en praktische toepassingen worden de tussen- en randverbindingen gedetailleerd besproken. Dit hoofdstuk biedt een overzicht van hun functionele principes, ontwerpkeuzes en krachtswerkingen.

3.1. Verschillende soorten verbindingen

3.1.1. Randverbinding

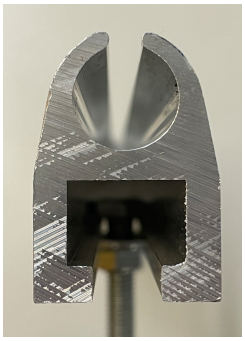
Een keder is een pees, vaak van PVC of rubber, die in een genaaide zak aan de rand van het membraan wordt geschoven, ook wel open zoom genoemd. De flexibele pees past zich aan de vorm van de zoom aan. Door de open zoom met pees in een kederprofiel te plaatsen, ontstaat een stevige verbinding tussen het membraan en de draagconstructie (Zhang et al., 2014).

Het kederprofiel, waarin de open zoom met een pees wordt geschoven en vastgezet, voorkomt dat de pees uit het profiel wordt getrokken wanneer deze loodrecht op de verbinding wordt belast. Langs de lengte kan het doek zich echter wel door de keder bewegen, wat het eenvoudig plaatsen en verwijderen van het doek in het kederprofiel mogelijk maakt. De kracht die op het membraan wordt uitgeoefend, wordt via de pees op het profiel overgebracht en gelijkmatig over de gehele lengte verdeeld. Hiermee wordt lokale spanningsopbouw in de randen van het doek voorkomen (Zhang et al., 2014).

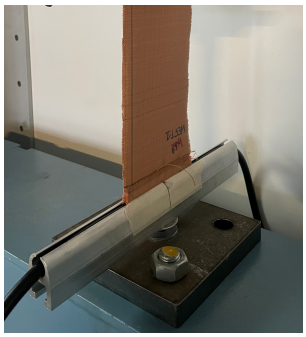
De keder kan in essentie worden beschouwd als een 'rits' voor de randverbinding van membraanstructuren (Zhang et al., 2014).



(a) Open Zoom met pees



(b) Keder Profiel



(c) Randverbinding met Keder Profiel en Open Zoom met Pees

Figure 3.1: Onderdelen van de randverbinding

Bij het ontwerpen van de open zoom moet de grootte zorgvuldig worden bepaald. Wanneer de zak aan de pees wordt gelast, is het gebruikelijk om deze strak om de pees te lassen (Bubner, 1997). In dit onderzoek wordt echter niet gelast; de open zoom zal gestikt worden.

De pees heeft een diameter van 1 cm, wat een omtrek van π (3,14) oplevert. De open zoom krijgt een omtrek van 6 cm, zodat de krachtswerking bij spanning in het membraan niet loodrecht op de stiknaad inwerkt. Dit wordt een pelbelasting genoemd. Om deze pelbelasting te voorkomen, wordt in plaats daarvan de stiknaad vrijwel evenwijdig aan het membraan belast, wat de verbinding sterker maakt. De onderstaande afbeelding illustreert het verschil tussen deze krachtswerkingen (Bubner, 1997).

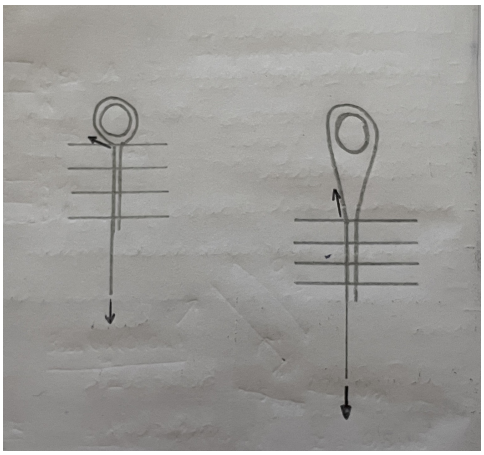
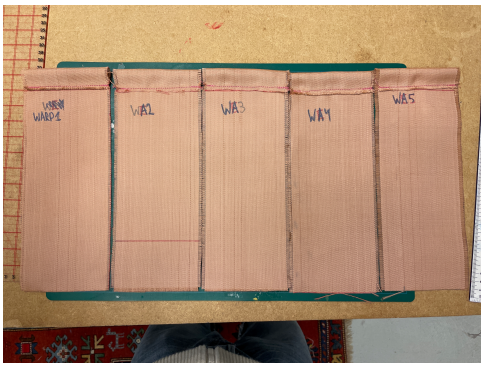
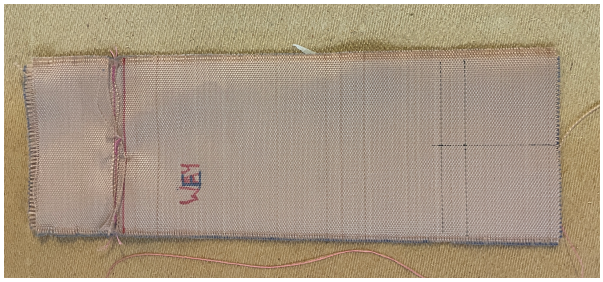


Figure 3.2: Verschil in Krachtswerking Keder (Pelbelasting Links, Evenwijdig Rechts)

In een eerste iteratie van de randverbinding is er gekozen om aan het uiteinde van de open zoom één enkele stiknaad te plaatsen. Bij het uitvoeren van de eerste trekproeven bleek deze optie niet geschikt te zijn. Doordat de enkele stiknaad zich te dichtbij de rand van het membraan bevond, werd deze uit het membraan getrokken. Hierdoor werd de verbindingskracht ervan niet getoetst. De randverbinding moest dus aangepast en verbeterd worden.



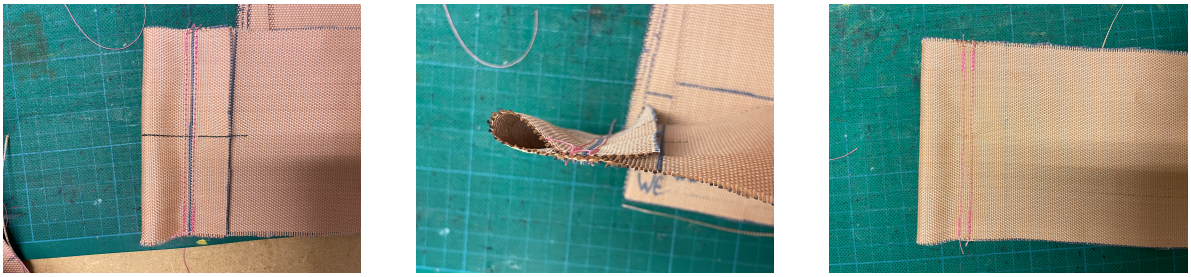
(a) Proefstukken



(b) Bezweken proefstuk

Figure 3.3: Eerste iteratie Randverbinding

Er is gekozen om bij een tweede iteratie de randverbinding te voorzien van twee rechte stikrijen en daarnaast ook de afstand van de buitenste stikrij tot het uiteinde van het membraan te vergroten met 2 cm. Dit zorgt ervoor dat de draden waarop gestikt is, niet even makkelijk uitgetrokken konden worden en de daadwerkelijke verbindingskracht van de stikrij op het membraan nu wel getoetst werd.



(a) Vooraanzicht **(b)** Zijaanzicht **(c)** Achteraanzicht

Figure 3.4: Nieuwe Randverbinding met dubbele stiknaad en extra 2cm

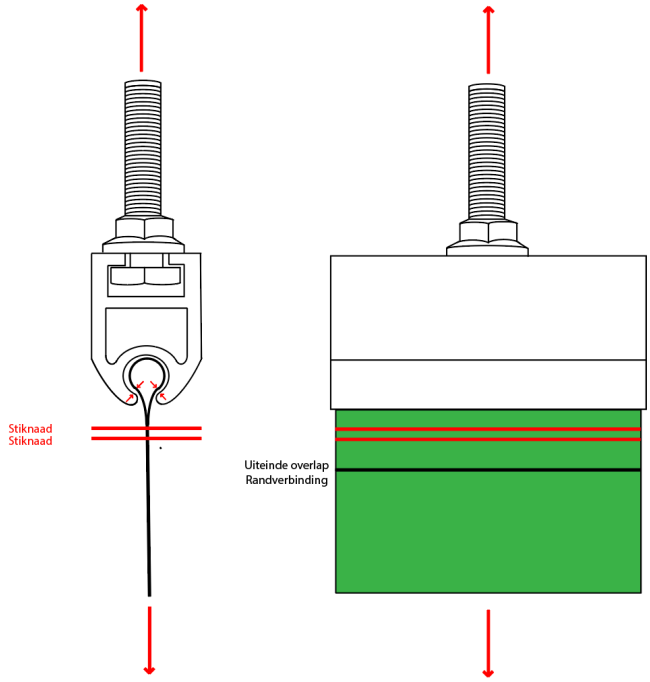


Figure 3.5: Krachtswerking Randverbinding Voor- en Zijaanzicht

3.1.2. Tussenverbinding

Bij ongecoate membranen worden verbindingen doorgaans gestikt. Een combinatie van stikken en lassen kan worden toegepast om een hogere verbindingssterkte te bereiken (Bubner, 1997). In dit onderzoek wordt uitsluitend naar gestikte verbindingen gekeken, omdat het lassen van PLA een complex proces is dat technieken zoals wrijvingslassen (materiaal wordt niet gesmolten maar aaneen gekneed) of ultrasoonlassen vereist (Sharma et al., 2020).

Gewoonlijk worden twee stikrijen gebruikt, terwijl meer dan drie stikrijen nodig zijn om 80% van de membraancapaciteit te bereiken (Bubner, 1997). Het gebruik van slechts één stikrij werd daarom snel verworpen.

De verbinding tussen twee snijpatronen/doekdelen wordt in dit onderzoek de tussenverbinding genoemd. Er is bij de tussenverbinding gekozen voor drie stikrijen. De eerste stikrij bevindt zich in het midden van de overlap om de twee snijpatronen te verbinden en verschuiving te voorkomen. Vervolgens worden de verbonden delen over elkaar gevouwen, waarna de tweede en derde stikrijen aan de uiteinden van de dubbele overlapping worden gestikt. Dit zorgt voor een volledig afgesloten verbinding en voorkomt extra spanning of vuilophoping (Bubner, 1997).

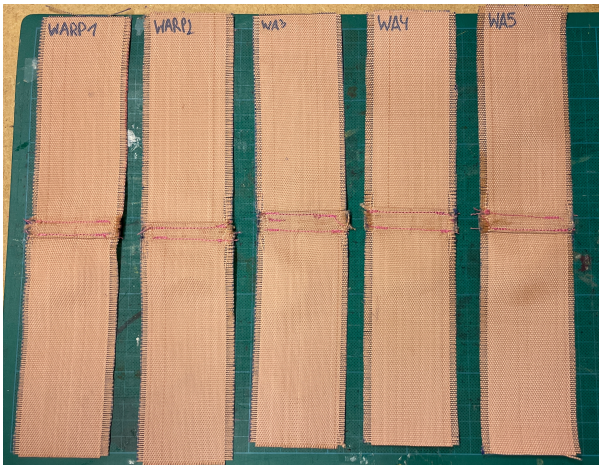


Figure 3.6: Proefstukken Tussenverbinding

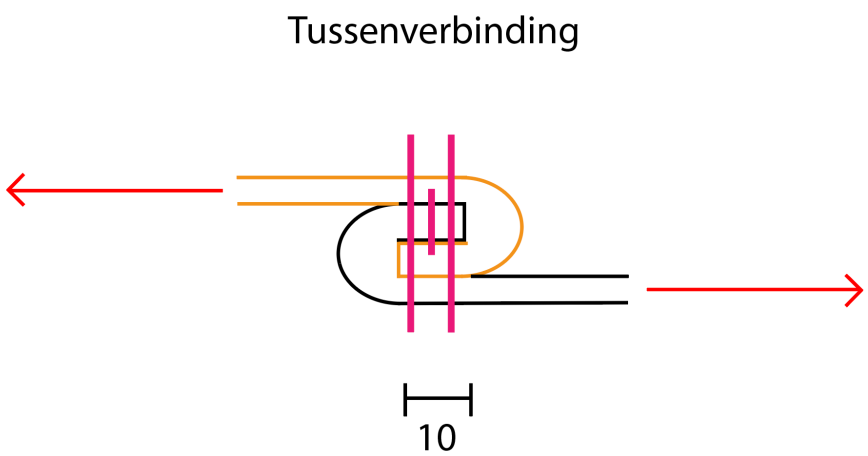


Figure 3.7: Krachtswerking Tussenverbinding Zijaanzicht

4

Controle

In dit hoofdstuk worden de krachtswerking en spanningsverdeling in twee onderdelen van de membraanconstructie geanalyseerd en gecontroleerd. Aan de hand van simulaties, materiaalproeven en vereenvoudigde berekeningen worden het membraan zelf en de kederklem onderzocht. Dit hoofdstuk biedt inzicht in de structurele veiligheid van het ontwerp en toont aan waarom het voldoet aan de benodigde veiligheidseisen.

4.1. Spanningverloop in Membraan

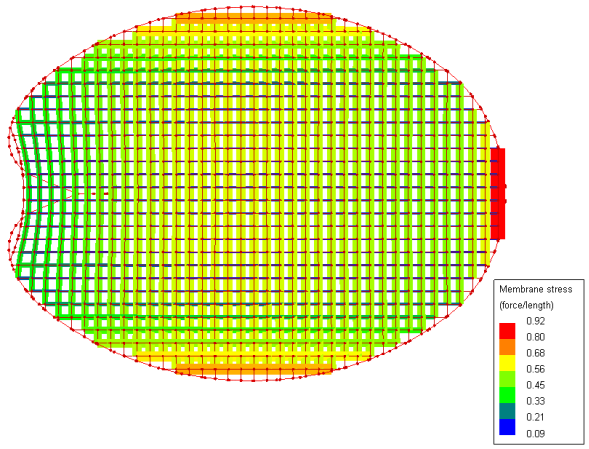


Figure 4.1: Spanningnverloop Membraan Demonstrator in kN/m (Schasfoort, 2024)

In het bovenstaande EASY-model, ontwikkeld door Ymke Schasfoort, kan het spanningsverloop (Kracht/Lengte) in het membraan voor de meest ongunstige situatie worden afgelezen. Hierbij is rekening gehouden met een neerwaartse windbelasting (stuwdruk $q = 0.3\,\mathrm{kN/m}$ en $c_p = +0.3$) en een buitengewone belasting door een hangend persoon van $1\,\mathrm{kN}$ aan de draagconstructie (ir. E. de Groen & Schasfoort, 2024). De maximale spanning treedt op bij het uiteinde van het membraan en bedraagt $0.92\,\mathrm{kN/m}$. Om de ontwerpspanning te bepalen, wordt een veiligheidsfactor van 1.5 toegepast (CEN, 2002):

$$\sigma_{\text{ontwerp}} = \sigma_{\text{max}} \times \text{veiligheidsfactor} = 0.92\,\mathrm{kN/m} \times 1.5 = 1.38\,\mathrm{kN/m}$$

Uit de trekproeven uitgevoerd door Studio PvD blijkt dat de maximale treksterkte van het membraan $1700\,\mathrm{N}/5\,\mathrm{cm}$ bedraagt. Omgerekend is dit:

$$\sigma_{\text{maximaal}} = \frac{1700\,\text{N}}{5\,\text{cm}} = \frac{1700\,\text{N} * 20}{1\,\text{m}} = 34\,\text{kN/m}$$

Voor membraanmateriaal geldt een minimale veiligheidsfactor van 5, wat resulteert in een maximaal toelaatbare treksspanning:

$$\sigma_{\text{toelaatbaar}} = \frac{\sigma_{\text{maximaal}}}{\gamma} = \frac{34\,\text{kN/m}}{5} = 6.8\,\text{kN/m}$$

De gebruikscoëfficiënt ($U.C.$) wordt berekend als:

$$U.C. = \frac{\sigma_{\text{ontwerp}}}{\sigma_{\text{toelaatbaar}}} = \frac{1.38\,\text{kN/m}}{6.8\,\text{kN/m}} = 0.20$$

4.2. Kederprofiel

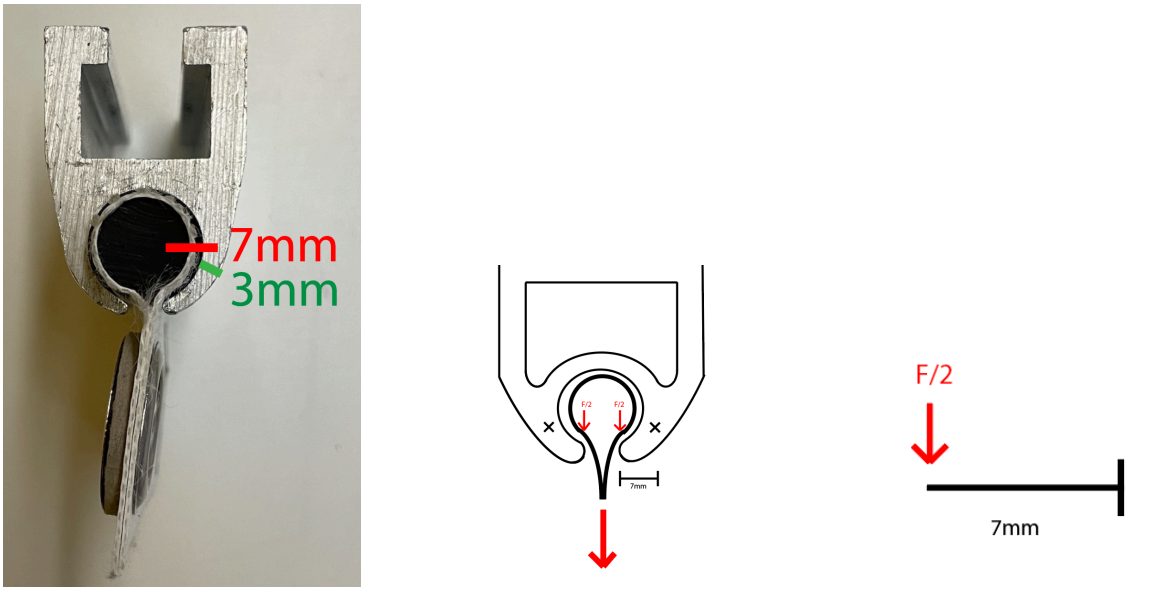
Om te bewijzen dat het kederprofiel niet zal bezwijken, is een handberekening uitgevoerd. Hierbij wordt uitgegaan van de maximale treksterkte die het PLA-membraan moet weerstaan volgens de SUNTEX-specificatie voor een Type 1-membraan, namelijk $3000\,\text{N}/5\,\text{cm}$ (Knippers et al., 2010).

Deze kracht is aanzienlijk groter dan de kracht die daadwerkelijk in het kederprofiel kan optreden, aangezien de verbinding eerder zal bezwijken door de stiknaad dan door het membraan zelf.

In de onderstaande afbeelding wordt weergegeven hoe de trekkracht van het membraan op het kederprofiel wordt overgedragen. De trekkracht wordt verdeeld over de twee pootjes van het kederprofiel. Elke poot draagt een puntlast van:

$$\text{Puntlast per pootje} = \frac{3000\,\text{N}/5\,\text{cm}}{2} = 1500\,\text{N}/5\,\text{cm}.$$

Om de spanning in het kederprofiel te berekenen, wordt deze gesimplificeerd tot een uitkragende ligger met een lengte $L = 7\,\text{mm}$ (afstand van de puntlast tot het midden van het pootje van het kederprofiel, gemeten met een schuifmaat). Het beschouwde gedeelte van het kederprofiel heeft een breedte $b = 1\,\text{m}$ en een dikte $h = 3\,\text{mm}$, eveneens gemeten met een schuifmaat.



(a) Kederprofiel met pees **(b)** Krachtswerking Kederprofiel **(c)** Schets versimpelde Kederprofiel

Figure 4.2: Krachtswerking en schets van de Kederprofiel

De verdeelde belasting wordt berekend als:

$$q = \frac{1500}{0.05} = 30,000\,\mathrm{N/m}.$$

Het buigend moment wordt bepaald met:

$$M = q \cdot b \cdot L = 30,000\,\mathrm{N/m} \cdot 1\,\mathrm{m} \cdot 0.007\,\mathrm{m} = 210\,\mathrm{Nm}.$$

Het traagheidsmoment van het kederprofiel wordt berekend met:

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{1 \cdot (0.003)^3}{12} = \frac{1 \cdot 0.000000027}{12} = 2.25 \cdot 10^{-9}\,\mathrm{m}^4.$$

De buigspanning wordt berekend als:

$$\sigma = \frac{M \cdot c}{I},$$

waarbij:

$$c = \frac{h}{2} = \frac{0.003}{2} = 0.0015\,\mathrm{m}.$$

Invoeren van de waarden:

$$\sigma = \frac{210 \cdot 0.0015}{2.25 \cdot 10^{-9}} = \frac{0.315}{2.25 \cdot 10^{-9}} = 140,000,000\,\mathrm{Pa} = 140\,\mathrm{MPa}.$$

Resultaat

De maximale spanning in de inklemming is:

$$\sigma = 140\,\mathrm{MPa}.$$

Volgens de Eurocode voor Design of Aluminium Structures (EN 1999-1-1) geldt voor geëxtrudeerde holle aluminium profielen een vloeigrens van:

$$f_o = 200\,\mathrm{MPa}.$$

De gebruikscoëfficiënt ($U.C.$) wordt berekend als:

$$U.C. = \frac{\sigma_{\text{ontwerp}}}{\sigma_{\text{toelaatbaar}}} = \frac{140\,\mathrm{MPa}}{200\,\mathrm{MPa}} = 0.70$$

4.3. Conclusie

Uit de analyse van de krachtswerking en spanningsverdeling in het membraan blijkt dat de spanning in het membraan, zelfs onder de meest ongunstige belastingsomstandigheden, binnen de toelaatbare waarden blijft. Met een gebruikscoëfficiënt ($U.C.$) van 0.20 is aangetoond dat het membraan ruimschoots voldoet aan de gestelde veiligheidseisen en niet zal bezwijken.

Voor het kederprofiel toont de handberekening aan dat de maximale spanning in de inklemming $140\,\mathrm{MPa}$ bedraagt. Dit ligt onder de vloeigrens van $200\,\mathrm{MPa}$, zoals voorgeschreven in de Eurocode (European Committee for Standardization, 2007). Ook hieruit volgt dat het kederprofiel, met een gebruikscoëfficiënt ($U.C.$) van 0.70, de krachten kan overdragen zonder bezwijken.

Zowel het membraan als het kederprofiel voldoen aan de structurele veiligheidseisen en zijn geschikt voor gebruik in het ontwerp van de demonstrator.

5

Testen

In dit hoofdstuk worden de verschillende testmethoden en resultaten besproken die zijn uitgevoerd om de prestaties van de membraanverbindingen te evalueren. Aan de hand van gestandaardiseerde testprotocollen worden de rand- en tussenverbindingen van het membraan getest. Dit hoofdstuk biedt een overzicht van de testopstellingen, meetmethoden en een analyse van de resultaten.

5.1. Voorbereiding

De voorbereiding van de proeven voor het testen van de tussen- en randverbindingen van het PLA-membraan werd volgens de bijgevoegde testprotocollen (zie Appendix) uitgevoerd en bestond uit drie hoofdfasen: de productie van proefstukken, het opzetten van de testopstelling en de instelling van de voorspanning en parameters.

Proefstukproductie

- De proefstukken werden uit dezelfde materiaalbatch gesneden met een stofschaar, waarbij franjes van $5\,\mathrm{mm}$ symmetrisch aan beide zijden werden gecreëerd om uniforme resultaten te waarborgen.
- Alle stukken, vervaardigd uit PLA van Studio Belén ($463\,\mathrm{g/m^2}$), werden zorgvuldig voorbereid en gedocumenteerd met hun exacte afmetingen (lengte en breedte).
- Een industriële PFAFF-naaimachine met een stikafstand van $2\,\mathrm{mm}$ werd gebruikt voor het aanbrengen van de stiknaden.

Voorspanning en Parameters

- Op basis van de massa per oppervlakte van elk proefstuk werd aanvankelijk een voorspanning van $5\,\mathrm{N}$ ingesteld. Aangezien deze voorspanning binnen de tolerantie van de proefbank viel kon deze niet nauwkeurig aangebracht worden. Daarom moeten de resultaten onder deze 5N grens buiten beschouwing gelaten worden. Dit kan aangezien deze voorspanning zodanig klein is en ze dus ook geen invloed heeft op de rest van de resultaten.
- De trekbank (constant-rate-of-extension machine) werd ingesteld op een reksnelheid van $100\,\mathrm{mm/min}$, rekening houdend met de maximale rek uit de trekproeven van Studio PvD van het PLA-materiaal, namelijk 28.42% .
- De meetlengte tussen de klemmen werd nauwkeurig vastgesteld op $200\,\mathrm{mm}$.

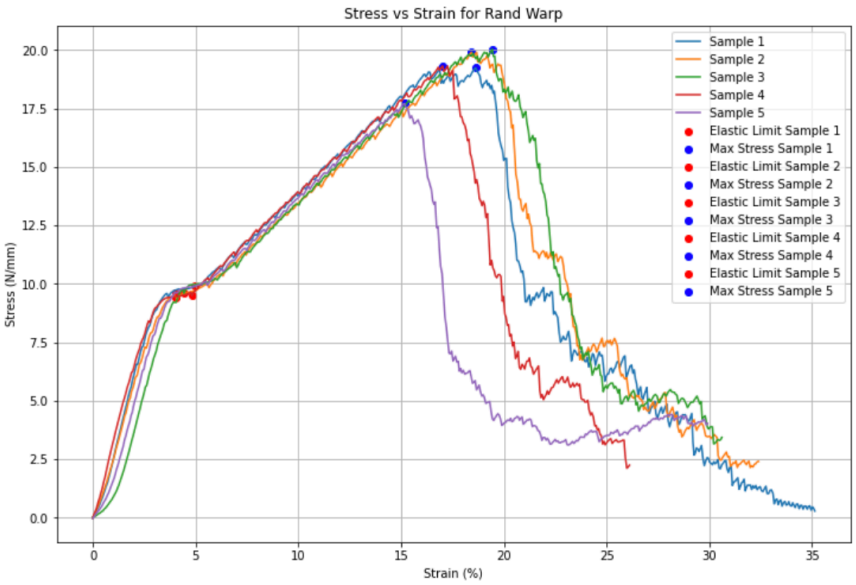
Testopstelling

- De afmetingen van elk proefstuk werden na plaatsing in de klemmen opnieuw gemeten om de spanning per breedte eenheid te kunnen bepalen.
- Het membraan werd bevestigd met een geribbelde klem of een kederklem. De trekbank, die vervormingsgestuurd werkte, veroorzaakte een constante vervorming totdat het proefstuk bezweek.

5.2. Resultaten

5.2.1. Randverbindingen

Warp




```
Rand Warp Elastic Limit – Mean: 9.6060, Std Dev: 0.1618, Characteristic Value with k=2.33: 9.2290, Partial Factor: 0.9608
Rand Warp Maximum Stress – Mean: 19.2360, Std Dev: 0.8253, Characteristic Value with k=2.33: 17.3131, Partial Factor: 0.9000
```

(a) Spanning-Rek Diagram Warp

```
Sample 1 – Elastic Limit Stress: 9.9000 N/mm at Strain: 4.9468%
Sample 1 – Maximum Stress: 19.2300 N/mm at Strain: 18.6341%

Sample 2 – Elastic Limit Stress: 9.4300 N/mm at Strain: 4.0450%
Sample 2 – Maximum Stress: 19.9000 N/mm at Strain: 18.4210%

Sample 3 – Elastic Limit Stress: 9.6000 N/mm at Strain: 4.4365%
Sample 3 – Maximum Stress: 20.0300 N/mm at Strain: 19.4325%

Sample 4 – Elastic Limit Stress: 9.4900 N/mm at Strain: 4.8293%
Sample 4 – Maximum Stress: 19.3100 N/mm at Strain: 17.0205%

Sample 5 – Elastic Limit Stress: 9.6100 N/mm at Strain: 4.0633%
Sample 5 – Maximum Stress: 17.7100 N/mm at Strain: 15.1633%
```

(b) Karakteristieke waarden

De vijf metingen vertonen telkens vergelijkbare resultaten. De proefstukken gedragen zich aanvankelijk elastisch, wat blijkt uit de bijna constante richtingscoëfficiënt van de spannings-rek-grafiek. Vervolgens wordt de elasticiteitsgrens bereikt, waarbij de richtingscoëfficiënt van de grafiek verandert en de proefstukken grotere vervorming ondergaan.

Aanvankelijk worden de weft-garens nabij de stiknaden uitgekamd. Dit betekent dat de individuele vezels uit het weefsel worden getrokken. Naarmate de vervorming toeneemt, beginnen ook de buitenste warp-draden van het proefstuk los te schieten, waardoor het dragende oppervlak steeds kleiner wordt. Uiteindelijk bezwijkt de gestikte verbinding door uitkamming, wat leidt tot het bezwijken van het proefstuk als geheel. De maximale trekkracht wordt bereikt bij een uitrekking van ongeveer 18%.

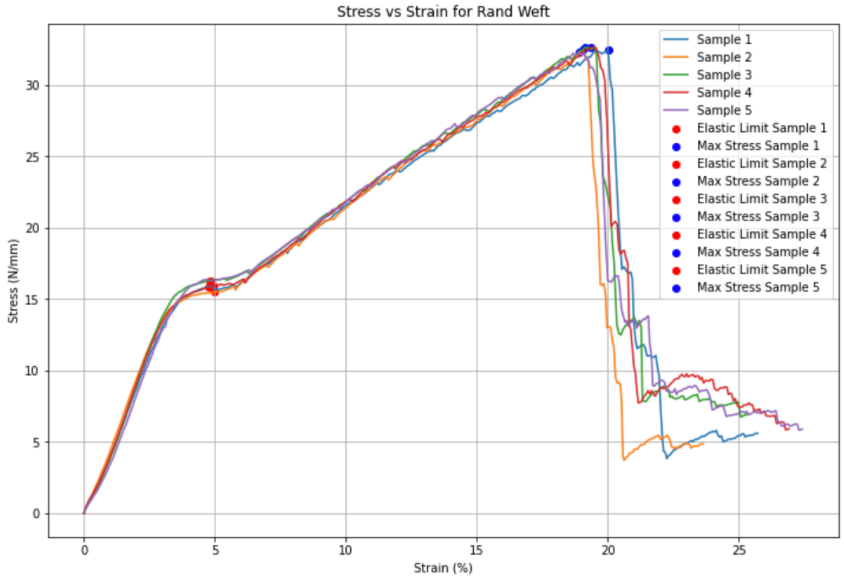
De randverbinding in warp-richting bereikt een maximale spanning van gemiddeld:

$$\sigma_{\text{max, warp}} = 19.24\,\text{N/mm}$$

en heeft een gemiddelde elasticiteitslimiet van:

$$\sigma_{\text{e, warp}} = 9.61\,\text{N/mm}.$$

Weft




```
Rand Weft Elastic Limit – Mean: 15.9680, Std Dev: 0.3098, Characteristic Value with k=2.33: 15.2462, Partial Factor: 0.9548
Rand Weft Maximum Stress – Mean: 32.5020, Std Dev: 0.1312, Characteristic Value with k=2.33: 32.1963, Partial Factor: 0.9906
```

(a) Spanning-Rek Diagram Weft

```
Sample 1 – Elastic Limit Stress: 15.9200 N/mm at Strain: 4.9208%
Sample 1 – Maximum Stress: 32.4600 N/mm at Strain: 20.0183%

Sample 2 – Elastic Limit Stress: 15.4900 N/mm at Strain: 4.9620%
Sample 2 – Maximum Stress: 32.4800 N/mm at Strain: 19.0556%

Sample 3 – Elastic Limit Stress: 16.3100 N/mm at Strain: 4.7975%
Sample 3 – Maximum Stress: 32.6600 N/mm at Strain: 19.1324%

Sample 4 – Elastic Limit Stress: 15.8200 N/mm at Strain: 4.7381%
Sample 4 – Maximum Stress: 32.6200 N/mm at Strain: 19.3446%

Sample 5 – Elastic Limit Stress: 16.3000 N/mm at Strain: 4.8545%
Sample 5 – Maximum Stress: 32.2900 N/mm at Strain: 18.8926%
```

(b) Karakteristieke waarden

De vijf metingen vertonen telkens vergelijkbare resultaten. De proefstukken gedragen zich aanvankelijk elastisch, wat blijkt uit de bijna constante richtingscoëfficiënt van de spannings-rek-grafiek. Vervolgens wordt de elasticiteitsgrens bereikt, waarbij de richtingscoëfficiënt van de grafiek verandert en de proefstukken grotere vervorming ondergaan.

Tijdens het weven worden de warp-garens strak gespannen op het weefgetouw, waardoor ze beter verankerd zitten in het weefsel en minder bewegingsvrijheid hebben. Hierdoor zouden ze minder gevoelig kunnen zijn voor uitkamming. Nadat de elasticiteitsgrens wordt overschreden, beginnen de buitenste weft-draden los te schieten. Uiteindelijk scheuren de weft-draden nabij de stiknaden, en wordt de maximale trekkracht bereikt bij een uitrekking van ongeveer 19%.

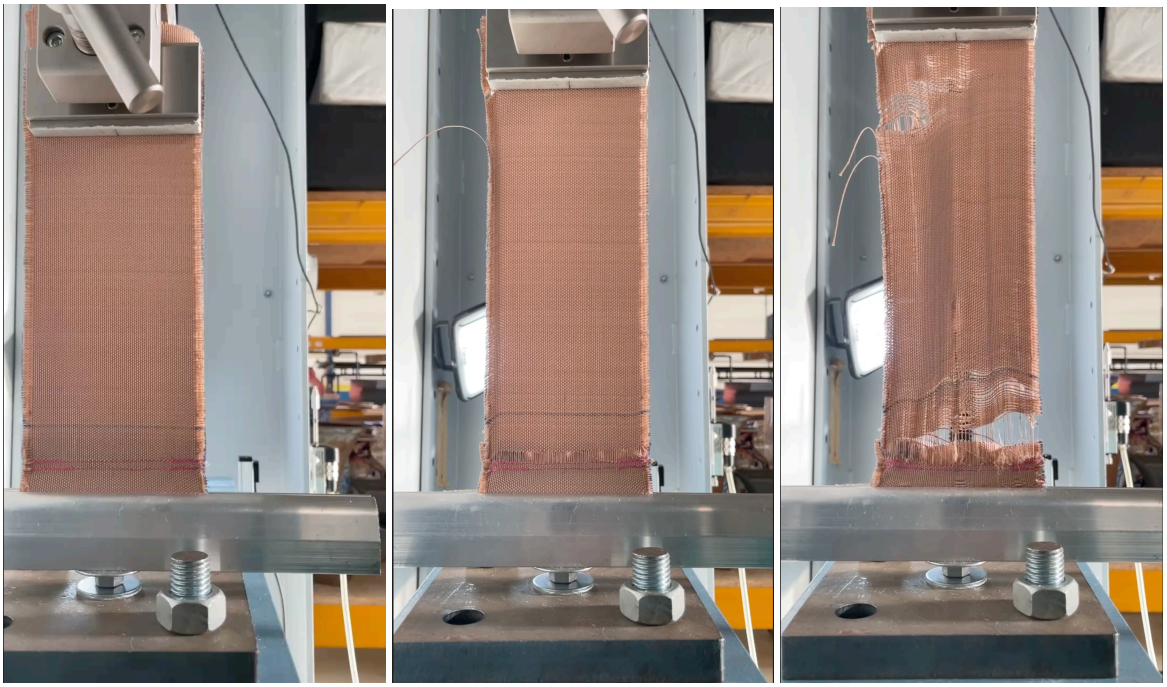
De randverbinding in weft-richting bereikt een maximale spanning van gemiddeld:

$$\sigma_{\text{max, weft}} = 32.50\,\mathrm{N/mm},$$

en heeft een gemiddelde elasticiteitslimiet van:

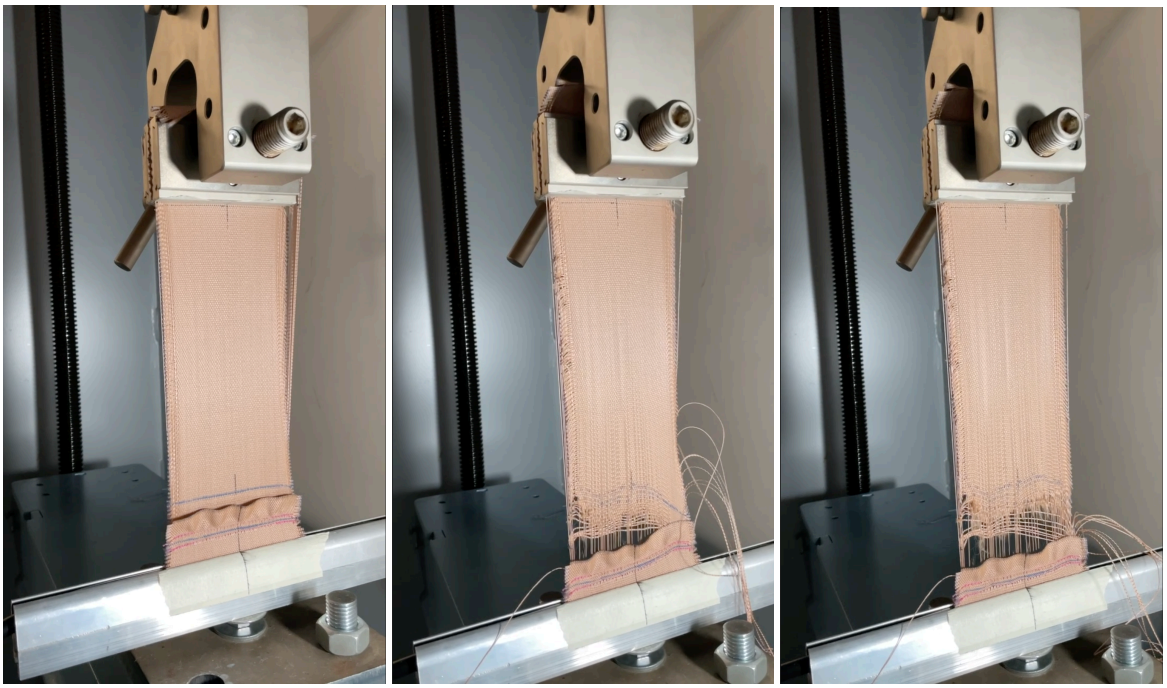
$$\sigma_{\text{e, weft}} = 15.97\,\mathrm{N/mm}.$$

Hieruit blijkt dat de randverbinding in weft-richting sterker is dan die in warp-richting.



(a) Aanvang Rand Warp **(b)** Uitkammen Rand Warp **(c)** Bezwijken Rand Warp

Figure 5.3: Proef Rand Warp

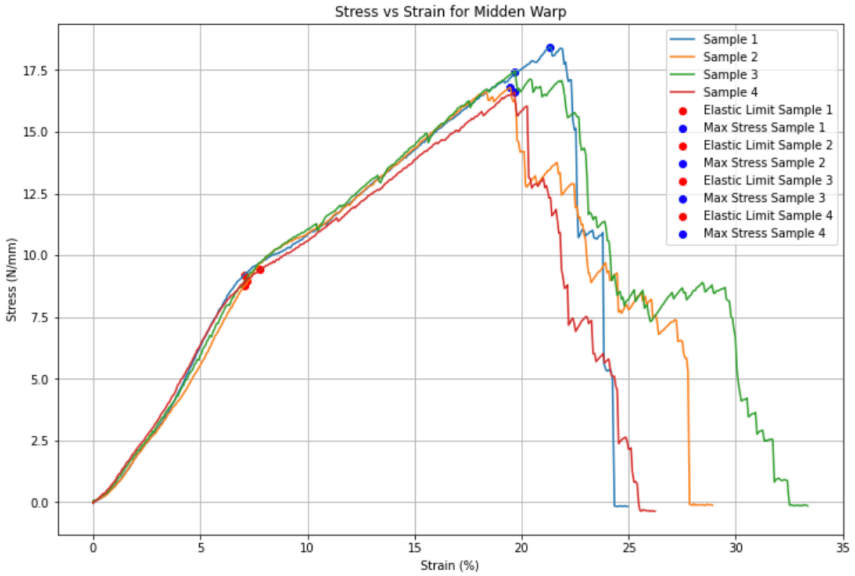


(a) Aanvang Rand Weft **(b)** Trekken Rand Weft **(c)** Bezwijken Rand Weft

Figure 5.4: Proef Rand Weft

5.2.2. Tussenverbindingen

Warp




```
Midden Warp Elastic Limit – Mean: 9.1000, Std Dev: 0.2417, Characteristic Value with k=2.33: 8.5369, Partial Factor: 0.9381
Midden Warp Maximum Stress – Mean: 17.3250, Std Dev: 0.7122, Characteristic Value with k=2.33: 15.6655, Partial Factor: 0.9042
```

(a) Spanning-Rek Diagram Warp

```
Sample 1 – Elastic Limit Stress: 9.2200 N/mm at Strain: 7.0490%
Sample 1 – Maximum Stress: 18.4400 N/mm at Strain: 21.3051%

Sample 2 – Elastic Limit Stress: 8.7800 N/mm at Strain: 7.0797%
Sample 2 – Maximum Stress: 16.8000 N/mm at Strain: 19.4792%

Sample 3 – Elastic Limit Stress: 8.9800 N/mm at Strain: 7.1581%
Sample 3 – Maximum Stress: 17.4400 N/mm at Strain: 19.6904%

Sample 4 – Elastic Limit Stress: 9.4200 N/mm at Strain: 7.7606%
Sample 4 – Maximum Stress: 16.6200 N/mm at Strain: 19.6707%
```

(b) Karakteristieke Waarden

Omdat het laatste van de vijf proefstukken niet goed was ingeklemd en uit de klem is geschoven, zijn de resultaten hiervan buiten beschouwing gelaten. De overige proefstukken gedragen zich, vergelijkbaar met de randverbinding, aanvankelijk elastisch. Dit blijkt uit de bijna constante richtingscoëfficiënt van de spannings-rek-grafiek. Vervolgens wordt de elasticiteitsgrens bereikt, waarbij de richtingscoëfficiënt van de grafiek verandert en de proefstukken grotere vervorming ondergaan.

Aanvankelijk worden de weft-garens boven en onder de stiknaden van de tussenverbinding uitgekamd. Naarmate de vervorming toeneemt, beginnen ook de buitenste warp-draden van het proefstuk los te schieten, waardoor het dragende oppervlak steeds kleiner wordt. Uiteindelijk bezwijkt de gestikte verbinding door uitkamming, wat leidt tot het bezwijken van het proefstuk als geheel. De maximale trekkracht wordt hierbij bereikt bij een uitrekking van ongeveer 20%.

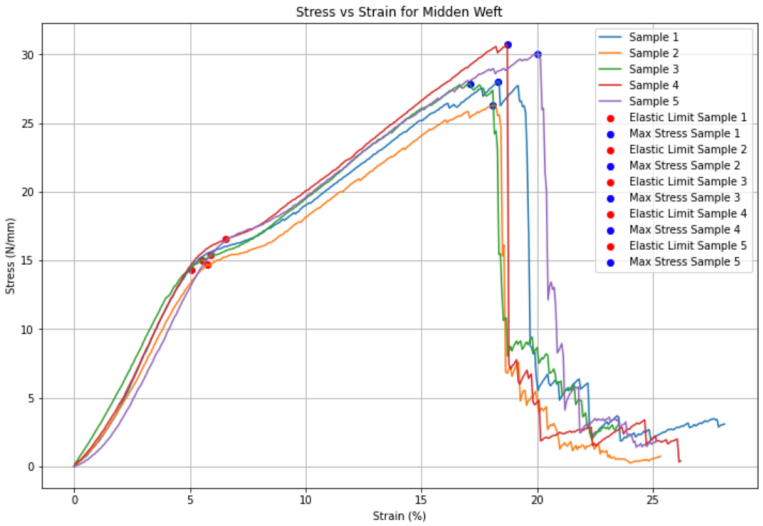
De tussenverbinding in warp-richting bereikt een maximale spanning van gemiddeld:

$$\sigma_{\text{max, warp}} = 17.33\,\mathrm{N/mm},$$

en heeft een gemiddelde elasticiteitslimiet van:

$$\sigma_{\text{e, warp}} = 9.10\,\mathrm{N/mm}.$$

Weft




```
Midden Weft Elastic Limit – Mean: 15.2040, Std Dev: 0.7806, Characteristic Value with k=2.33: 13.3852, Partial Factor: 0.8804
Midden Weft Maximum Stress – Mean: 28.6120, Std Dev: 1.6017, Characteristic Value with k=2.33: 24.8801, Partial Factor: 0.8696
```

(a) Spanning-Rek Diagram Weft

```
Sample 1 – Elastic Limit Stress: 14.2800 N/mm at Strain: 5.0400%
Sample 1 – Maximum Stress: 28.0400 N/mm at Strain: 18.2865%

Sample 2 – Elastic Limit Stress: 14.7200 N/mm at Strain: 5.7396%
Sample 2 – Maximum Stress: 26.3200 N/mm at Strain: 18.0787%

Sample 3 – Elastic Limit Stress: 15.0400 N/mm at Strain: 5.5278%
Sample 3 – Maximum Stress: 27.8800 N/mm at Strain: 17.0902%

Sample 4 – Elastic Limit Stress: 16.5800 N/mm at Strain: 6.5362%
Sample 4 – Maximum Stress: 30.7600 N/mm at Strain: 18.7050%

Sample 5 – Elastic Limit Stress: 15.4000 N/mm at Strain: 5.8720%
Sample 5 – Maximum Stress: 30.0600 N/mm at Strain: 20.0065%
```

(b) Karakteristieke Waarden

De vijf metingen vertonen telkens vergelijkbare resultaten. De proefstukken gedragen zich aanvankelijk elastisch, wat blijkt uit de bijna constante richtingscoëfficiënt van de spannings-rek-grafiek. Vervolgens wordt de elasticiteitsgrens bereikt, waarbij de richtingscoëfficiënt van de grafiek verandert en de proefstukken grotere vervorming ondergaan.

Doordat de warp-garens tijdens het weven strak worden gespannen op het weefgetouw, hebben ze minder bewegingsvrijheid en zitten ze beter verankerd in het weefsel. Hierdoor zijn ze mogelijk minder gevoelig voor uitkamming. Nadat de elasticiteitsgrens wordt overschreden, beginnen de buitenste weft-draden los te schieten totdat uiteindelijk de weft-draden nabij de stikrijen, evenals de stikrijen zelf, scheuren. De maximale trekkracht wordt telkens bereikt bij een uitrekking van ongeveer 18%.

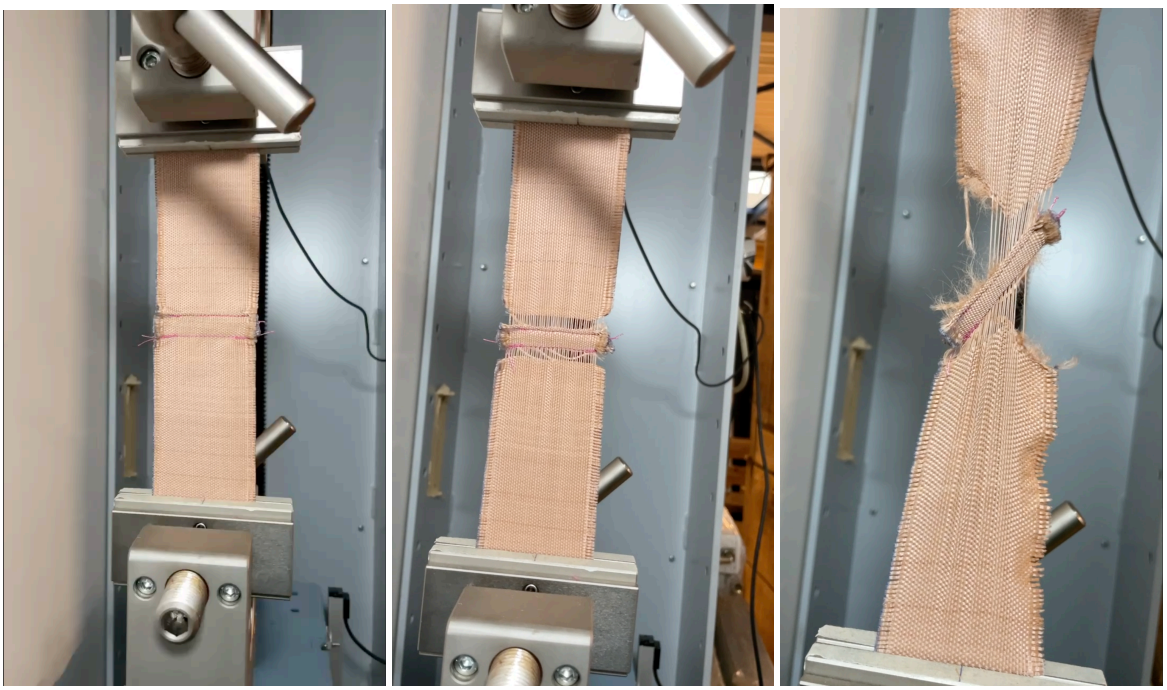
De tussenverbinding in weft-richting bereikt een maximale spanning van gemiddeld:

$$\sigma_{\text{max, weft}} = 28.61\,\mathrm{N/mm},$$

en heeft een gemiddelde elasticiteitslimiet van:

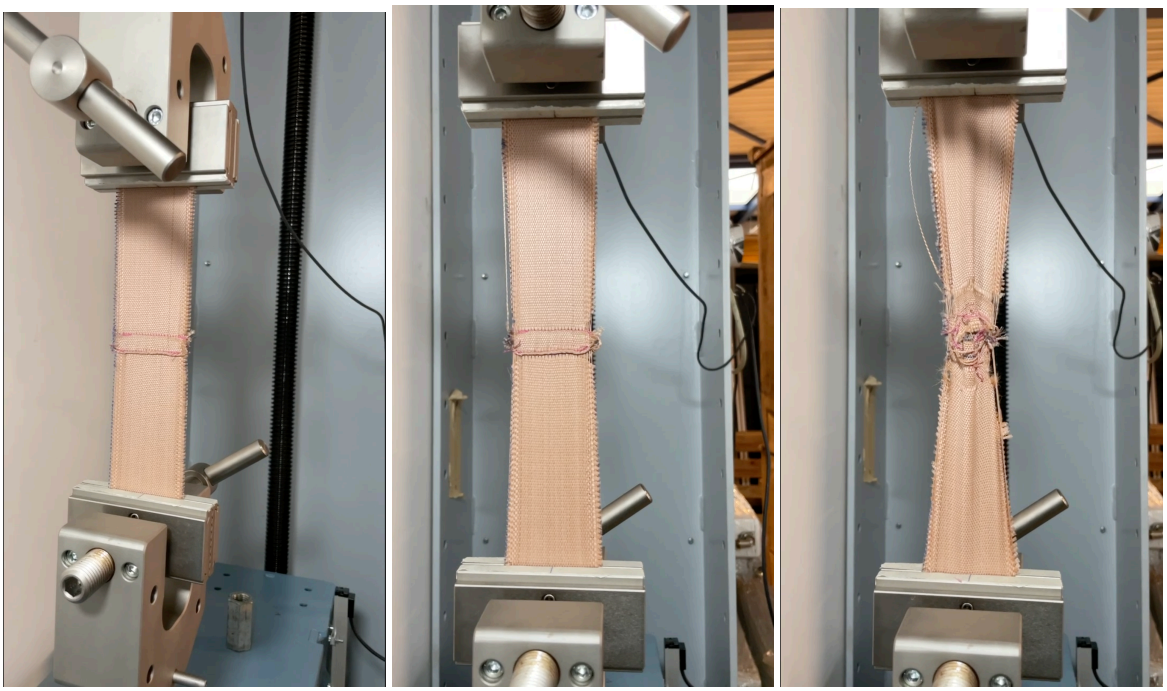
$$\sigma_{\text{e, weft}} = 15.20\,\mathrm{N/mm}.$$

De tussenverbinding in weft-richting is, net als bij de randverbinding, sterker dan in warp-richting.



(a) Aanvang Tussen Warp **(b)** Uitkammen Tussen Warp **(c)** Bezwijken Tussen Warp

Figure 5.7: Proef Tussen Warp



(a) Aanvang Tussen Weft **(b)** Trekken Tussen Weft **(c)** Bezwijken Tussen Weft

Figure 5.8: Proef Tussen Weft

6

Conclusie en aanbevelingen

Proef	σ_{max} $(\mathrm{N/mm})$	σ_{e} $(\mathrm{N/mm})$
Randverbinding in warp-richting	19.24	9.61
Randverbinding in weft-richting	32.50	15.97
Tussenverbinding in warp-richting	17.33	9.10
Tussenverbinding in weft-richting	28.61	15.20

Table 6.1: Gemiddelde maximale spanning en elasticiteitslimiet voor de verschillende proeven

Op basis van de resultaten en het beschreven proefverloop kan worden geconcludeerd dat de sterkte en elasticiteitslimiet van zowel de randverbinding als de tussenverbinding sterk afhankelijk zijn van de draadrichting (weft- of warp-richting) in het membraan.

Randverbindingen

- In weft-richting vertonen randverbindingen de hoogste sterkte en elasticiteitslimiet, met een gemiddelde maximale spanning van $32.50\,\mathrm{N/mm}$ en een elasticiteitslimiet van $15.97\,\mathrm{N/mm}$. Dit wijst erop dat de weft-draden beter bestand zijn tegen vervorming in randverbindingen.
- In warp-richting zijn de gemiddelde waarden lager, met een maximale spanning van $19.24\,\mathrm{N/mm}$ en een elasticiteitslimiet van $9.61\,\mathrm{N/mm}$.

Tussenverbindingen

- Ook hier zijn de verbindingen in weft-richting sterker, met een maximale spanning van $28.61\,\mathrm{N/mm}$ en een elasticiteitslimiet van $15.20\,\mathrm{N/mm}$. Weer blijken de weft-draden in het weefsel meer vervorming en spanning te kunnen verdragen voordat ze bezwijken.
- In warp-richting zijn de waarden lager, met een maximale spanning van $17.33\,\mathrm{N/mm}$ en een elasticiteitslimiet van $9.10\,\mathrm{N/mm}$.

Analyse van het Proefverloop

Tijdens de proef gedragen de proefstukken zich aanvankelijk elastisch, wat blijkt uit de constante richtingscoëfficiënt van de spannings-rek-grafieken. Zodra de elasticiteitsgrens is bereikt, beginnen de buitenste draden (vooral in de weft-richting) los te schieten of treedt er uitkamming op (vooral in de warp-richting). Dit zorgt ervoor dat het membraan verzwakt, waardoor, wanneer de spanning blijft toenemen, een grotere vervorming plaatsvindt totdat het proefstuk bezwijkt.

Conclusie

De onderzoeksresultaten tonen aan dat verbindingen in weft-richting sterker zijn dan in warp-richting, zowel bij rand- als tussenverbindingen. Dit is opmerkelijk, aangezien dit doorgaans omgekeerd is bij de meeste membraanmaterialen. Een mogelijke verklaring hiervoor is het spanningsverschil tussen warp- en weft-draden dat ontstaat tijdens het weefproces. Dit spanningsverschil kan ervoor zorgen dat warpdraden minder snel uitgekamd worden wanneer het membraan in weft-richting wordt belast. Daarnaast kan ook de hoeveelheid filament die is gebruikt bij het vervaardigen van de warp- en weft-draden een significante rol spelen. Verdere studies, met name naar het gedrag van deze verbindingen in andere materialen zoals gerecycled PET (rPET), zijn noodzakelijk om deze hypothesen te bevestigen en de bevindingen verder te onderbouwen.

Deze resultaten benadrukken het belang van draadrichting bij het ontwerp en de implementatie van SUNTEX in de demonstrator. Het wordt aanbevolen om de weft-richting prioriteit te geven in de delen van het membraan waar hoge spanningen worden verwacht, terwijl warp-verbindingen beter geschikt zijn voor gebieden met minder intensieve belasting.

De maximale spanningen waargenomen in de experimenten benaderen in warp-richting niet de maximale sterkte van het membraan, zoals vastgesteld in de trekproeven uitgevoerd door Studio PvD. Deze maximale sterkte bedraagt namelijk ongeveer $1700\,\mathrm{N}/5\,\mathrm{cm}$, omgerekend $34\,\mathrm{N}/\,\mathrm{mm}$.

De randverbinding in warp-richting is in staat om tot 56% van de totale trekkracht van het membraan zelf te dragen. Er zijn geen officiële trekproefresultaten van het PLA in weft-richting beschikbaar, wat de geschiktheid en betrouwbaarheid van het PLA binnen de context van de demonstrator nog niet bevestigt.

Aanbevelingen

Op basis van de resultaten en beperkingen van dit onderzoek worden de volgende aanbevelingen gedaan om verdere inzichten te verkrijgen en de betrouwbaarheid van de huidige bevindingen te versterken:

Invloed van omgevingsfactoren

Het onderzoek heeft geen rekening gehouden met de invloed van temperatuur en langdurige blootstelling aan zonlicht op de verbindingen. Aanbevolen wordt om experimenten uit te voeren die deze factoren onderzoeken, zodat de prestaties en duurzaamheid van de verbindingen in realistische gebruiksomstandigheden kunnen worden beoordeeld.

Onderzoek naar andere verbindingsvormen

In dit onderzoek zijn slechts één tussenverbinding en twee randverbindingen getoetst. Deze bleken uit de literatuurstudie de beste alternatieven te zijn. Dit is echter niet fysiek getest. Er zou dus ook gekeken kunnen worden naar andere alternatieven voor de tussen- en randverbindingsvormen die bestaan. Zo kan achterhaald of er andere opties zijn die een grotere trekkracht kunnen dragen.

Onderzoek naar andere materialen

Het wordt aanbevolen om verder onderzoek te verrichten naar het gedrag van verbindingen in andere materialen, zoals gerecycled PET (rPET). Dit zal bijdragen aan een beter begrip van de toepasbaarheid van dergelijke materialen en helpen bij het bevestigen van de hypothesen.

Trekproeven in weft-richting

Aanvullende trekproeven van PLA in weft-richting worden aanbevolen om een volledig inzicht te verkrijgen in de mechanische eigenschappen van het membraan. Dit maakt het mogelijk om de treksterkte van het membraan in beide draadrichtingen nauwkeurig te vergelijken.

Bibliography

Ahmed, A. B. M. (2024). *Structural solar textile: Design and analysis of woven solar cell-integrated textile for textile architecture application* [Master's thesis, Delft University of Technology] [Confidential until May 31, 2024]. http://repository.tudelft.nl/

Amsler, R. (n.d.). Produktinformation vibrophore-probenhalter für schrauben [Available as PDF document].

Belén, B. (2025). Bio textiles - world expo 2020 [Geraadpleegd op 6 januari 2025]. https://www.burobelen.com/projects/bio-textiles-world-expo-2020

Bubner, E. (1997). *Membrankonstruktionen - verbindungstechniken*. Self-published.

CEN. (2002). *En 1990: Eurocode - basis of structural design* (tech. rep.). European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium. https://www.cen.eu/

Commission, E. (2019). *The european green deal* (COM (2019) 640 final). European Commission. Retrieved November 6, 2024, from https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en

de Groen, E. (2024, October). *Test protocol tensile strip test* (Technical Report No. 24.10.00026.1) (Project Number: TTP20240035. According to ISO 13934-1: Determination of maximum force and elongation at maximum force using the strip method.). Tentech BV. Utrecht.

European Committee for Standardization. (2007). *En 1999-1-1: Eurocode 9: Design of aluminium structures - part 1-1: General structural rules* [Amendment A1, June 2009]. https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/

Fashionary. (2020). *Textilepedia: The complete fabric guide* [A comprehensive guide on textiles and fabric properties.].

Forster, B., & Mollaert, M. (2004). *European design guide for tensile surface structures*. Tensinet.

Gemeente Arnhem. (2020). Strategie klimaatadaptatie arnhem 2020-2030: Groen, slim en samen [Opgehaald van Arnhem.nl: https://www.arnhem.nl].

Gioberto, G., & Dunne, L. E. (2013). Overlock-stitched stretch sensors: Characterization and effect of fabric property. *Journal of Textile and Apparel, Technology and Management (JTATM)*, *8*(3), 1–14.

Hestnes, A. G. (1999). Building integration of solar energy systems. *Solar Energy*, *67*(4), 181–187. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00065-7

ir. E. de Groen & Schasfoort, Y. (2024, November). *Suntex blad constructie* (Design and advisory report for lightweight construction. Includes modeling, material considerations, and safety standards.). Tentech BV. Postbus 85190, 3508 AD Utrecht, Netherlands.

Gemeente Arnhem. (n.d.). Strategie voor klimaatbewuste stad arnhem [Opgehaald van KlimaatadaptatieNederland: https://klimaatadaptatienederland.nl/@248751/strategie-arnhem/].

Knippers, J., Cremers, J., Gabler, M., & Lienhard, J. (2010). *Atlas kunststoffe + membranen: Werkstoffe und halbzeuge, formfindung und konstruktion*. DETAIL.

More, N., Avhad, M., Utekar, S., & More, A. (2022). Polylactic acid (pla) membrane—significance, synthesis, and applications: A review. *Polymer Bulletin*, *80*. https://doi.org/10.1007/s00289-022-04135-z

Ramos, S. (2023, January). *Shear characterisation of a novel woven solar cell integrated textile for tensile structures application* [Master's thesis, Delft University of Technology]. http://repository.tudelft.nl/

Roylance, D. (2001). Finite element analysis [http://ocw.mit.edu/courses/materials-science-and-engineering/3-11-mechanics-of-materials-fall-1999/modules/].

Schasfoort, Y. (2024, October). *Ontwerp van een constructie voor een schaduwdoek met zonnepanelen* [Bachelor's thesis]. Delft University of Technology.

Sharma, A. K. R., Choudhury, M. R., & Debnath, K. (2020). Experimental investigation of friction stir welding of pla. *Welding in the World*, *64*, 1011–1021. https://doi.org/10.1007/s40194-020-00890-7

Soo, J. (2024). *The history of tents: A 40,000-year journey* [Accessed: 2024-11-29]. https://valleyandpeak.co.uk/blogs/news/the-history-of-tents-a-40-000-year-journey

Stranghöner, N., Uhlemann, J., Bilginoglu, F., Bletzinger, K.-U., Bögner-Baltz, H., Corne, E., Gibson, N., Gosling, P., Houtman, R., Llorens, J., Malinowsky, M., Marion, J.-M., Mollaert, M., Nieger, M., Novati, G., Sahnoune, F., Siemens, P., Stimpfle, B., Tanev, V., & Thomas, J.-C. (2023). *Prospect for european guidance for the structural design of tensile membrane structures* (M. Mollaert, S. Dimova, A. Pinto, & S. Denton, Eds.). Publications Office of the European Union. https://doi.org/10.2760/24763

Textiles — tensile properties of fabrics — part 1: Determination of maximum force and elongation at maximum force using the strip method [Second edition, April 15, 2013]. (2013). International Organization for Standardization. Geneva, Switzerland.

van Dongen, P., Britton, E., Wetzel, A., Houtman, R., Ahmed, A. M., & Ramos, S. (2022). Suntex: Weaving solar energy into building skin. *Journal of Facade Design & Engineering*, *10*(Powerskin), 001–020. https://doi.org/10.47982/jfde.2022.powerskin.9

Visser, H. T. (2025). *Designing and detailing with woven solar fabric for building integrated photovoltaic in second skin façades* [Bachelor's thesis]. The Hague University.

Zhang, Y., Zhang, Q., 1, O. A., & 2, O. A. (2014). Research on the mechanical properties of membrane connections in tensioned membrane structures. *Structural Engineering and Mechanics*, *49*(6), 745–755.

A

Testprotocol Flexibele Keder Membraan Randverbinding

A.1. Testprotocol

Introductie

Dit protocol beschrijft het stappenplan benodigd om de mechanische prestatie van een 'Flexibele Keder Membraan Randverbinding' onder trekkracht te toetsen. In dit protocol wordt gekeken naar de sterkte, vervorming en de bezwijkingsvorm van de verbinding (Stranghöner et al., 2023).

A.1.1. Proefstukken

Minimum aantal benodigde proefstukken: 10 (5 kettingrichting, 5 inslagrichting)

Proefstuk Productie

- Alle proefstukken moeten gemaakt zijn uit eenzelfde materiaal afkomstig van dezelfde productie om consistentie in de materiaaleigenschappen te garanderen (Stranghöner et al., 2023).
- Het batchnummer van het gebruikte materiaal om de proefstukken te maken moet worden bijgehouden (Stranghöner et al., 2023).
- Er mogen geen proefstukken worden uitgesneden binnen 150 mm van de rand van het labproefstuk. (de Groen, 2024)
- Zorg ervoor dat de snijrichting correct is: proefstukken in de kettingrichting mogen niet dezelfde kettingdraden bevatten, en proefstukken in de inslagrichting niet dezelfde inslagdraden (de Groen, 2024).
- Op basis van de bovenstaande eisen en de afmetingen van de proefstukken is berekend dat er in totaal $2.42m^2$ aan stof benodigd is om zeker vijf tests uit te kunnen voeren. Hoe deze afmetingen zijn bepaald wordt in de volgende paragraaf beschreven.

Proefstuk Afmetingen ISO13934-1:2013 sectie 8.2

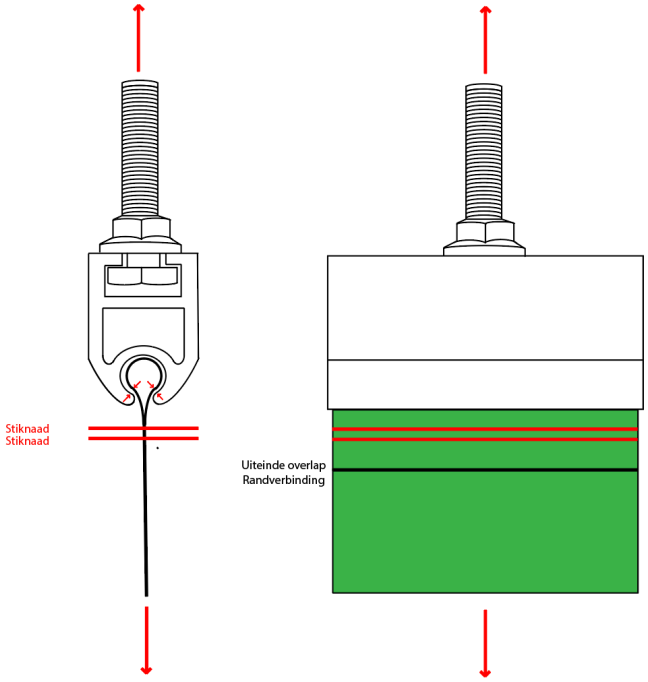
- De afmetingen van proefstukken moeten idealiter overeenkomen met de afmetingen van de keder-randverbindingen die in daadwerkelijke constructies worden gebruikt. Aangezien de omtrek van het doek in de demonstrator veel groter dan de breedte van de trekbank is, kan dit niet. Hierdoor worden de afmetingen dus gebaseerd op de standaard **ISO13934-1:2013**:
  - Lengte: minimaal 200 mm ± 0,5 mm + 150 mm inclusief bijtelling voor kederverbinding en inklemming. Deze zijn respectievelijk 100 en 50 mm lang en bevinden zich aan beide uiteindes van het membraan, met een tussenafstand van 200 mm (Zhang et al., 2014). In deze kederverbinding zijn het membraan en de keder aan elkaar gestikt door middel van

twee recht gestikte rijden over de gehele breedte van de verbinding en op minimaal 20mm afstand van de rand van het membraan(Bubner, 1997). De verbinding wordt in deze test loodrecht getrokken op de stikrichting.

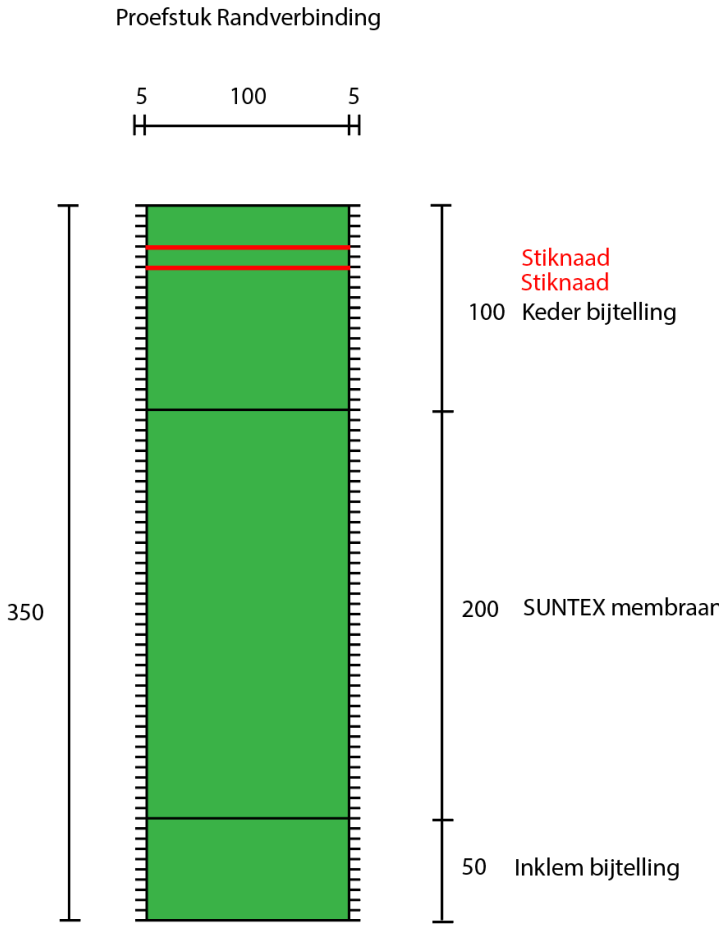
- Breedte: minimaal 100 mm ± 0,5 mm + 10 mm, inclusief keder en aangrenzend membraanmateriaal. Hoewel de standaard een breedte van 50 mm suggereert, is er in dit onderzoek gekozen om te werken met een breedte van 100 mm. Dit is zo gekozen om te garanderen dat de interactie en werking van de kederverbinding met het membraan volledig getest wordt (Zhang et al., 2014).

– Verwijder aan beide lange zijden draden om franjes van ± 5 mm te creëren, zoals beschreven in ISO 13934-1, sectie 8.3. Dit voorkomt ontsnapping van draden tijdens de test (de Groen, 2024).
– Schrijf de afmetingen van elk proefstuk op, inclusief de breedte van het membraan, de diameter van de keder en de lengte van de verbinding indien deze niet gelijk is aan de volledige breedte van het proefstuk.

Op basis van de bovenstaande eisen zullen de proefstukken met bijbehorende afmetingen er als volgt uitkomen te zien:



(a) Krachtswerking Randverbinding Voor- en Zijaanzicht



(b) Proefstuk Randverbinding

Bepaling van het Benodigde Oppervlakte aan Membraanmateriaal Het totale benodigde oppervlak aan membraanmateriaal voor de treksterkte-analyse is 1000 mm x 700 mm

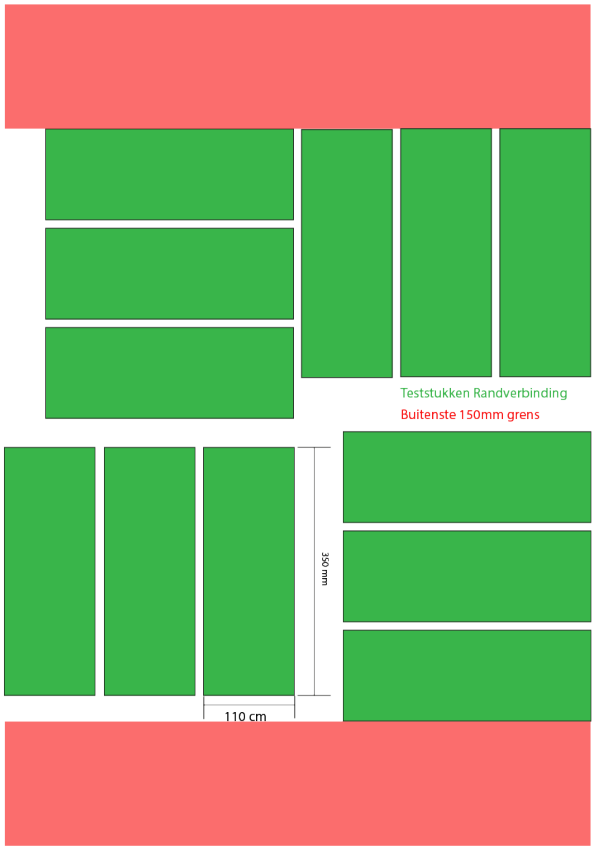


Figure A.2: Snijpatroon Randverbinding

Dit berekende oppervlak van **0.7 m²** garandeert dat alle 10 proefstukken, inclusief afstanden en marges, kunnen worden vervaardigd, terwijl consistentie in materiaaleigenschappen en oriëntatie wordt gehandhaafd. De volledige oppervlakte met bijbehorende snijpatronen zal pas gegeven worden in het volgende protocol, samen met de proefstukken van de tussenverbindingenproef.

A.1.2. Testopzet

- Gebruik een gecalibreerde trekbank met een constant-rate-of-extension (CRE) systeem (de Groen, 2024). Controleer het calibratiecertificaat op afwijkingen.
- Stel de gauge length (afstand tussen klemmen) in op 200 ± 1 mm (de Groen, 2024).
- Ontwerp de testopstelling om de werkelijke randvoorwaarden van de keder-randverbinding in de constructie te simuleren. Dit houdt het nabootsen van het klemsysteem, de ondersteuningsstructuur en de oriëntatie van de verbinding in.

Beschrijving van de opstelling De kederklem wordt via een M10-bout en moer aangesloten aan de trekbank door een plaat waar het andere uiteinde van de bout door uitsteekt en aan wordt vastgedraaid met een andere moer. De andere kant van het membraan wordt met een geribbelde klem ingeklemd. Dit simuleert de werkelijke randvoorwaarden en minimaliseert asymmetrische belastingen.



Figure A.3: Testopstelling Randverbinding in Trekbank

A.1.3. Test Procedure

Voorspanning

- Breng een voorspanning aan op het proefstuk om de initiële spanning in het membraan te simuleren (de Groen, 2024).
- De benodigde voorspanning wordt bepaald door de massa per oppervlakte van het proefstuk, zoals weergegeven in Tabel A.1.
- Controleer dat de voorspanning geen rek groter dan 2% veroorzaakt (de Groen, 2024).

Massa per Oppervlakte van Proefstuk [$\mathrm{g/m^2}$]	Voorspanning [N]
≤ 200	2
$> 200 \leq 500$	5
> 500	10

Table A.1: Voorspanning afhankelijk van massa per oppervlakte.

Belasting

- Gebruik een constant-rate-of-extension (CRE) machine of Trekbank en stel de reksnelheid in op basis van de maximale rek van het materiaal:

Meetlengte [mm]	Rek bij Maximale Kracht van Textiel [%]	Rekverhoging [%/min]	Reksnelheid [mm/min]
200	$<$ 8	10	20
200	$\geq$ 8 tot $\leq$ 75	50	100

Table A.2: Reksnelheid afhankelijk van rek.

- Uit eerdere treksterktetests van Studio PvD is gebleken dat het Buro Belén PLA een maximale rek heeft van rond de 28,42%. Hoewel de rek kan variëren, blijft deze ruim boven de 8% waardoor een reksnelheid van 100 mm/min toegepast zal moeten worden.
- Zorg ervoor dat de centrale lijn van het proefstuk door het middelpunt van de klemmen gaat (de Groen, 2024). Hiervoor kan een een streepje gemaakt worden met een pen en deze onder de bout in de keder klem te plaatsen.

Gegevensanalyse

- Registreer de aangebrachte belasting en rek continu tijdens de test. Documenteer de volgende informatie:
  - Massa per oppervlakte van het proefstuk.
  - Conditie van het proefstuk (nat of droog).
  - Lengte tussen de klemmen aan het begin van de test (standaard $200\,\mathrm{mm}$).
  - Reksnelheid.
  - Maximale kracht (F_{max}) en kracht bij breuk (F_{rup}).
  - Eventuele afwijkingen van de standaardprocedure (de Groen, 2024).

A.1.4. Resultaten en Analyse

Gegevenregistratie

- Teken de kracht-verplaatsingscurve voor elk proefstuk. Dit kan worden gedaan met behulp van de geregistreerde data van kracht en verplaatsing.
- Bepaal de volgende parameters uit de kracht-verplaatsingscurve:
  - **Maximale treksterkte**: De maximale belasting die de verbinding kan weerstaan voordat deze faalt (Stranghöner et al., 2023).
  - **Breuk treksterkte**: De belasting waarbij de verbinding bezwijkt (de Groen, 2024).
  - **Rek bij breuk**: De percentuele toename in lengte van de verbinding bij breuk, zoals beschreven in ISO 13934-1. (de Groen, 2024).
  - **Rek bij Maximale treksterkte**: De maximale belasting die de verbinding kan weerstaan (de Groen, 2024).
  - **Stijfheid**: De helling van de kracht-verplaatsingscurve, die de weerstand van de verbinding tegen vervorming weergeeft. Bereken de stijfheid in het lineaire gedeelte van de curve, voorafgaand aan het faalmoment (Stranghöner et al., 2023).
- Bereken het gemiddelde, de standaarddeviatie en de variatiecoëfficiënt voor elk van de gemeten parameters om de variabiliteit te kwantificeren en een maat voor betrouwbaarheid te bieden. Gebruik hiervoor de formules uit ISO 13934-1, sectie 10.

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \quad s = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2} \quad VC = \frac{s}{\bar{x}} \times 100$$

  - Bereken het rekenkundige gemiddelde van de maximale kracht en, indien vereist, het rekenkundige gemiddelde van de kracht bij breuk, in Newton, voor elke geteste richting. De afrondingsregels zijn weergegeven in Tabel A.3.

Krachtbereik [N]	Afronding [N]
< 100	1
$100 - 1000$	10
≥ 1000	100

Table A.3: Afrondingsregels voor maximale kracht.

  - Bereken het rekenkundige gemiddelde van de rek bij maximale kracht en, indien vereist, bij breuk, voor elke geteste richting. De afrondingsregels zijn weergegeven in Tabel A.4.
  - Indien vereist, bereken de variatiecoëfficiënt tot op 0,1% nauwkeurig en de 95% betrouwbaarheidsgrenzen van de relevante geteste eigenschappen, afgerond op dezelfde precisie als de gemiddelde waarden (de Groen, 2024).
  - Corrigeer de gemeten waarden voor eventuele afwijkingen in de gauge length of voorspanning, zoals gespecificeerd in de testprocedure (Zhang et al., 2014).

Rekbereik [%]	Afronding [%]
< 8	0,2
$8 \leq 75$	0,5
≥ 75	1,0

Table A.4: Afrondingsregels voor rek bij maximale kracht en bij breuk.

Bezwijkmechanisme

- Onderzoek de gefaalde proefstukken zorgvuldig om de faalmodus te bepalen. Noteer observaties en vergelijk deze met de kracht-verplaatsingscurves om afwijkingen te identificeren (Zhang et al., 2014).
- Veelvoorkomende faalmodi voor membraan-flexibele kederverbindingen zijn onder andere:
  - **Falen van het membraan naast de keder**: Treedt op wanneer spanningsconcentraties bij de keder de treksterkte van het membraan overschrijden. Dit wordt vaak gezien bij een onjuiste verdeling van spanningen (Zhang et al., 2014).
  - **Falen van het stiksel die de keder aan het membraan bevestigt**: Wijst op een zwakte in het stikproces, zoals onvoldoende naadrijen of een te zwak stikpratroon/garen. (Zhang et al., 2014).
  - **Uittrekken van de pees uit de verbinding**: Suggereert onvoldoende klemmingskracht of een onjuist ontwerp van de keder. Controleer of de klemming consistent was tijdens de test (Zhang et al., 2014).
- Registreer eventuele andere waargenomen faalmodi en evalueer of deze te relateren zijn aan fouten in de testopstelling of materiaalgebreken (de Groen, 2024).

A.1.5. Conclusie

De testresultaten en de faalmodusanalyse bieden informatie voor de evaluatie van de prestaties en betrouwbaarheid van de membraan-flexibele kederverbinding. Deze informatie kan worden gebruikt om:

- Het ontwerp van de verbinding te optimaliseren door zwaktepunten aan te pakken, zoals spanningsconcentraties of onvoldoende sterkte van stikpatroon (Zhang et al., 2014).
- Geschikte materialen te selecteren op basis van sterkte, rek en weerstand tegen vervorming (Zhang et al., 2014).
- De structurele integriteit van de membraanconstructie te garanderen door betrouwbare verbindingsmethoden te ontwikkelen (Zhang et al., 2014).

A.2. Stappenplan voor Proefstuk Randverbinding

1. **Testvoorbereiding**
    - Zorg voor een gecalibreerde trekbank (Constant-Rate-of-Extension, CRE).
    - Controleer het calibratiecertificaat op afwijkingen.
    - Stel de meetlengte (afstand tussen de klemmen) in op 200 ± 1 mm.
2. **Proefstukproductie**
    - Snijd minimaal 10 proefstukken uit eenzelfde materiaalbatch (5 kettingrichting, 5 inslagrichting).
    - Zorg dat proefstukken minimaal 150 mm van de rand van het materiaal worden uitgesneden.
    - Verwijder draden om symmetrische franjes van 5 mm ± 0,5 mm te creëren.
    - Weeg en noteer de afmetingen van elk proefstuk
3. **Voorspanning**
    - Bepaal de massa per oppervlakte van elk proefstuk.
    - Pas de voorspanning aan op basis van onderstaande tabel:
        - ≤ 200 g/m²: 2 N
        - 200–500 g/m²: 5 N
        - > 500 g/m²: 10 N
    - Zorg ervoor dat de voorspanning geen rek $> 2\%$ veroorzaakt.
4. **Klemmen**
    - Zorg dat de symmetrie van de klemkracht correct is.
    - Controleer dat de centrale lijn van het proefstuk door het middelpunt van de klemmen gaat.
5. **Belasting**
    - Voer de test uit met een reksnelheid zoals gespecificeerd:
        - $< 8\%$ rek: 20 mm/min.
        - $\geq 8\%$ tot $\leq 75\%$ rek: 100 mm/min.
    - Herhaal de test totdat vijf monsters correct getoetst zijn
6. **Dataverzameling**
    - Registreer:
        - Maximale kracht (F_{max}) en kracht bij breuk (F_{rup}).
        - Rek bij maximale kracht en bij breuk (% en mm).
7. **Resultatenanalyse**
    - Bereken gemiddelde waarden, standaardafwijking en variatiecoëfficiënt.
    - Analyseer faalmodi (bijv. membraanbreuk, stikbreuk).

A.3. Tabel Trekproef Randverbinding

Table A.5: Resultaten van de trekproeven voor de Trekproef Randverbinding met Keder, inclusief stijfheid.

Monster	**Ketting of Inslag**	**Pretens. [N]**	F_{max} **[N]**	F_{rup} **[N]**	**Rek bij** F_{max} **[%]**	**Rek bij** F_{rup} **[%]**	**Stijfheid [N/mm]**
Monster 1	Ketting						
Monster 2	Ketting						
Monster 3	Ketting						
Monster 4	Ketting						
Monster 5	Ketting						
Monster 6	Inslag						
Monster 7	Inslag						
Monster 8	Inslag						
Monster 9	Inslag						
Monster 10	Inslag						
Gemiddelde	–						
Std.	–	–	–	–	–	–	–

B

Testprotocol Tussenverbinding

B.1. Testprotocol

Inleiding

Dit protocol beschrijft de procedure voor het testen van de treksterkte van een Recht Gestikte Dubbele Terugslagnaad. Het combineert inzichten uit relevante normen en industriële best practices, met nadruk op Europese standaarden zoals ISO 13934-1 (de Groen, 2024). Het primaire doel is het evalueren van sterkte, vervormingsgedrag en faalmechanismen onder trekbelasting, essentieel voor het bepalen van de structurele integriteit van trekbelaste membraanstructuren, zoals gebruikt in de demonstrator.

B.1.1. Test Proefstukken

Minimum aantal benodigde proefstukken: 10 (5 kettingrichting, 5 inslagrichting) hiervoor zijn in totaal 20 stukken PLA nodig aangezien bij deze verbindingstest telkens twee stukken aan elkaar gestikt moeten worden (de Groen, 2024).

Proefstuk Productie

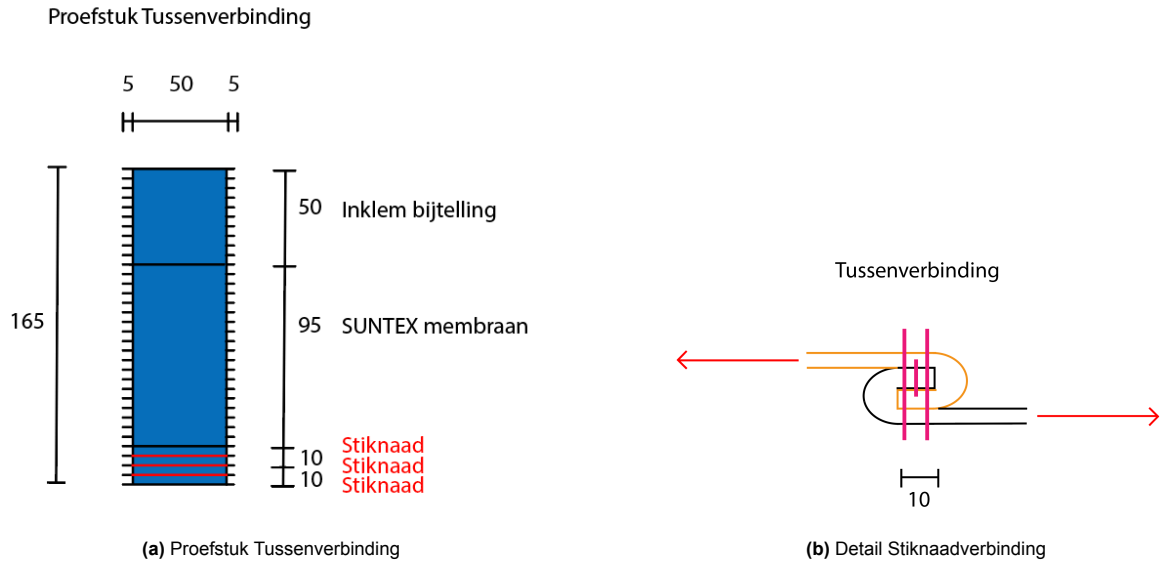
- Alle proefstukken moeten gemaakt zijn uit eenzelfde materiaal afkomstig van dezelfde productie om consistentie in de materiaaleigenschappen te garanderen (Stranghöner et al., 2023).
- Het batchnummer van het gebruikte materiaal om de proefstukken te maken moet worden bijgehouden (Stranghöner et al., 2023).
- Er mogen geen proefstuk worden uitgesneden binnen 150 mm van de rand van het laboratorium proefstuk. (de Groen, 2024)
- Zorg ervoor dat de snijrichting correct is: proefstukken in de kettingrichting mogen niet dezelfde longitudinale draden bevatten, en proefstukken in de inslagrichting niet dezelfde inslagdraden (de Groen, 2024).
- Op basis van de bovenstaande eisen en de afmetingen van de proefstukken is berekend dat er in totaal 2.8m2 aan stof benodigd is om zeker tien tests uit te kunnen voeren. Hoe deze afmetingen zijn bepaald wordt in de volgende paragraaf beschreven.

Proefstuk Afmetingen ISO13934-1:2013 sectie 8.2

- De afmetingen van proefstukken moeten idealiter overeenkomen met de afmetingen van de keder-randverbindingen die in daadwerkelijke constructies worden gebruikt. Aangezien de grootste stiklengte van het doek in de demonstrator 4,127m lang is, is dit niet mogelijk. Hierdoor worden de afmetingen dus gebaseerd op de standaard **ISO13934-1:2013**:
    - De verbinding tussen de twee stukken membraan heeft een totale lengte van **10 mm**. Vanuit het **midden van deze verbinding** tot aan het begin van het membraan dat **95 mm ± 0,5 mm** lang is, bevindt zich een lengte van **5 mm**. Om een totale afstand van **200 mm ± 0,5 mm**

tussen de klemmen te waarborgen, moet de afstand vanaf het **midden van de verbinding** tot elke klem **100 mm** bedragen. Dit betekent dat er vanaf het **einde van de verbinding** tot aan de klem slechts **95 mm** membraan nodig is zoals zichtbaar in figuur 5.3a.

- Daarnaast is er een bijtelling voor de inklemming van **50 mm**, die zich aan een van de twee uiteindes van het proefstuk bevindt. Voor de dubbele terugslag met een verbindingslengte van **10 mm** is aan het andere uiteinde van het proefstuk een extra lengte van **20 mm** nodig. Dit komt doordat het membraan bij de dubbele terugslag twee keer wordt omgeslagen en in elkaar gevouwen, wat zorgt voor een correcte en stevige verbinding.



(a) Proefstuk Tussenverbinding

(b) Detail Stiknaadverbinding

Figure B.1: Tussenverbinding en Stiknaadverbinding

Deze opstelling garandeert dat:

1. De verbinding correct in het midden van het membraan proefstuk ligt.
2. De totale afstand tussen de klemmen voldoet aan de gestelde norm van **200 mm ± 0.5**.
3. Het membraan aan beide uiteinden voldoende lengte heeft om stevig te worden ingeklemd, met allowances voor inklemming en de dubbele terugslag.

– Breedte: minimaal **50 mm ± 0,5 + 10 mm** inclusief allowance voor de franjes (de Groen, 2024).

Franjes

– Verwijder aan beide lange zijden draden om franjes van ± 5 mm te creëren, zoals beschreven in ISO 13934-1, sectie 8.3. Dit voorkomt ontsnapping van draden tijdens de test (de Groen, 2024).
– Symmetrische franjes (5 ± 0,5 mm) moeten worden gecreëerd door het verwijderen van een gelijk aantal draden aan beide zijden (de Groen, 2024).
– Schrijf de afmetingen van elk proefstuk op, inclusief breedte van het membraan en lengte van de verbinding (de Groen, 2024).
– Noteer en rapporteer afwijkingen in afmetingen vanwege beperkingen in testapparatuur.

In de onderstaande afbeelding worden het snijpatroon en de benodigde configuratie afgebeeld. Hiervoor is een totale oppervlakte van het membraan nodig van 700 mm x 1000 mm = 0.7 m2.

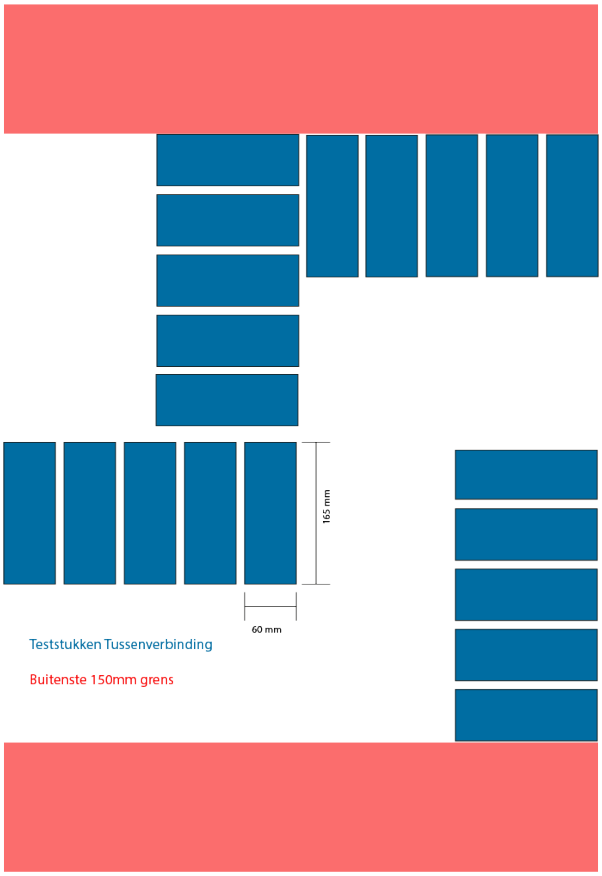


Figure B.2: Snijpatroon Tussenverbindingen

B.1.2. Testopstelling

- Gebruik een Constant-Rate-of-Extension (CRE) machine, zoals gespecificeerd in ISO 13934-1 (de Groen, 2024).
- Zorg ervoor dat klemmen geschikt zijn voor textiel proefstukken en spanning gelijkmatig verdelen.
- Stel de gauge length in op 200 ± 1 mm en controleer de uitlijning van de klemmen.
- Simuleer de randvoorwaarden van de verbinding door klemkracht, belastingrichting en ondersteuningssysteem consistent te houden.

B.1.3. Testprocedure

Meetlengte en Reksnelheid

- Stel de meetlengte in op 200 ± 1 mm (de Groen, 2024).
- Pas de Reksnelheid aan volgens de rek bij maximale kracht van het materiaal:

Meetlengte [mm]	Rek bij Maximale Kracht van Textiel [%]	Rekverhoging [%/min]	Reksnelheid [mm/min]
200	< 8	10	20
200	≥ 8 tot ≤ 75	50	100

Table B.1: Reksnelheid afhankelijk van rek.

- Corrigeer afwijkingen in reksnelheid als gevolg van machine- of materiaaleigenschappen.

Klemmen van het Proefstuk

- Klem de proefstukken stevig vast en controleer dat het proefstuk zowel boven als onderaan gecentreerd ingeklemd zit ten opzichte van de trekbank.

- Gebruik klemmen die specifiek zijn ontworpen voor textielmaterialen om beschadiging of verschuiving te voorkomen (Zhang et al., 2014).
- Controleer voor de test de uitlijning en symmetrie van het proefstuk in de klemmen.

Voorspanning

- Breng een voorspanning aan op het proefstuk afhankelijk van de massa per oppervlakte van het textiel, zoals weergegeven in Tabel A.1.
- Controleer dat de voorspanning geen rek groter dan 2% veroorzaakt (de Groen, 2024).

Massa per Oppervlakte [$\mathrm{g/m^2}$]	Voorspanning [N]
≤ 200	2
$200 - 500$	5
> 500	10

Table B.2: Voorspanning afhankelijk van massa per oppervlakte van het textiel.

Gegevenregistratie

- Teken de kracht-verplaatsingscurve voor elk proefstuk. Dit kan worden gedaan met behulp van de geregistreerde data van kracht en verplaatsing.
- Bepaal de volgende parameters uit de kracht-verplaatsingscurve:
  - **Maximale treksterkte**: De maximale belasting die de verbinding kan weerstaan voordat deze faalt (Stranghöner et al., 2023).
  - **Breuk treksterkte**: De belasting waarbij de verbinding bezwijkt.
  - **Rek bij breuk**: Het percentage toename in lengte van de verbinding bij breuk, zoals beschreven in ISO 13934-1.(de Groen, 2024).
  - **Rek bij Maximale treksterkte**: De maximale belasting die de verbinding kan weerstaan (de Groen, 2024).
  - **Stijfheid**: De helling van de kracht-verplaatsingscurve, die de weerstand van de verbinding tegen vervorming weergeeft. Bereken de stijfheid in het lineaire gedeelte van de curve, voorafgaand aan het faalmoment (Amsler, n.d.).
- Bereken het gemiddelde, de standaarddeviatie en de variatiecoëfficiënt voor elk van de gemeten parameters om de variabiliteit te kwantificeren en een maat voor betrouwbaarheid te bieden. Gebruik hiervoor de formules uit ISO 13934-1, sectie 10 (CEN, 2002).
- Bereken het rekenkundige gemiddelde van de maximale kracht en, indien vereist, het rekenkundige gemiddelde van de kracht bij breuk, in newton, voor elke geteste richting. De afrondingsregels zijn weergegeven in Tabel B.3.

Krachtbereik [N]	Afronding [N]
< 100	1
$100 - 1000$	10
≥ 1000	100

Table B.3: Afrondingsregels voor maximale kracht.

- Bereken het rekenkundige gemiddelde van de rek bij maximale kracht en, indien vereist, bij breuk, voor elke geteste richting. De afrondingsregels zijn weergegeven in Tabel B.4.
- Indien vereist, bereken de variatiecoëfficiënt tot op 0,1% nauwkeurig en de 95% betrouwbaarheidsgrenzen van de relevante geteste eigenschappen, afgerond op dezelfde precisie als de gemiddelde waarden (CEN, 2002).

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \quad s = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2} \quad VC = \frac{s}{\bar{x}} \times 100$$

Rekbereik [%]	Afronding [%]
< 8	0,2
$8 - < 75$	0,5
≥ 75	1,0

Table B.4: Afrondingsregels voor rek bij maximale kracht en bij breuk.

- Corrigeer de gemeten waarden voor eventuele afwijkingen in de gauge length of pretension, zoals gespecificeerd in de testprocedure (Zhang et al., 2014).

B.1.4. Conclusie

De resultaten bieden de benodigde inzichten in de prestaties van de Recht Gestikte Dubbele Terugslagnaad. Gebruik de analyse om ontwerpaanpassingen te doen en de betrouwbaarheid te valideren. Deze gegevens kunnen dienen als basis voor verdere optimalisatie en structurele toepassingen.

Voor beide testprotocollen zijn zowel een stappenplan als de resultaattabel te vinden in de Appendix.

In de onderstaande afbeelding wordt het snijpatroon voor zowel de tussen- en randverbindingen afgebeeld. De totale oppervlakte hiervan is 2x 0.7 m2 en dus 1.4 m2. Voor de zekerheid wordt er gewerkt met een doekoppervlakte van 1.5 m2.

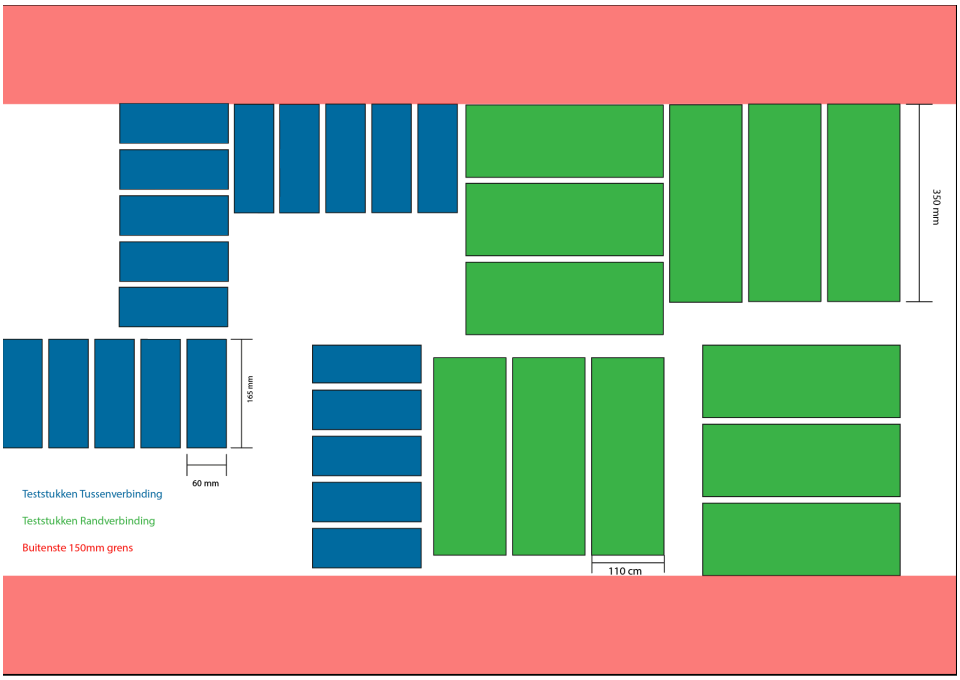


Figure B.3: Snijpatroon Tussen- en Randverbinding

B.2. Stappenplan Trekproef Tussenverbinding

1. **Testvoorbereiding**
   - Zorg voor een gecalibreerde trekbank (CRE).
   - Controleer klemmen geschikt voor textiel en stel de gauge length in op 200 ± 1 mm.
2. **Proefstukproductie**
   - Snijd 20 proefstukken (10 kettingrichting, 10 inslagrichting).
   - Stik telkens twee stukken membraan samen met een zigzag dubbele terugslagnaad van 50 mm.
   - Creëer franjes van 5 mm ± 0,5 mm symmetrisch aan beide zijden.
3. **Voorspanning**
   - Gebruik dezelfde voorspanningscriteria als bij de Randverbinding.
4. **Klemmen**
   - Zorg voor correcte uitlijning in de klemmen. Vermijd asymmetrie en verschuiving.
5. **Belasting**
   - Volg dezelfde richtlijnen voor reksnelheid:
     - $< 8\%$ rek: 20 mm/min.
     - $\geq 8\%$ tot $\leq 75\%$ rek: 100 mm/min.
6. **Dataverzameling**
   - Registreer:
     - Maximale kracht (F_{max}) en kracht bij breuk (F_{rup}).
     - Rek bij maximale kracht en bij breuk (% en mm).
   - Noteer afwijkingen en faalmodi.
7. **Resultatenanalyse**
   - Bereken gemiddelde waarden, standaardafwijking en variatiecoëfficiënt.
   - Identificeer faalmechanismen (bijv. stikbreuk, uittrekken keder).

B.3. Tabel Trekproef Tussenverbinding

Table B.5: Resultaten Trekproef Tussenverbinding, inclusief stijfheid.

Monster	**Richting**	F_{max} **(N)**	F_{rup} **(N)**	**Rek bij** F_{max} **(%)**	**Rek bij** F_{rup} **(%)**	**Stijfheid (N/mm)**
Monster 1	Ketting					
Monster 2	Ketting					
Monster 3	Ketting					
Monster 4	Ketting					
Monster 5	Ketting					
Monster 6	Inslag					
Monster 7	Inslag					
Monster 8	Inslag					
Monster 9	Inslag					
Monster 10	Inslag					
Gemiddelde	–					
Standaarddeviatie	–					
Variatiecoëfficiënt	–					

C

Testverslag

C.1. Proefstuk Productie

- Snijd de proefstukken uit dezelfde materiaalbatch (10 voor elke test). De warmtesnijder smelt de uiteinden van het membraan waardoor hier geen draden getrokken kunnen worden om de franjes te maken. Er wordt dus een stofschaar i.p.v. warmtesnijder gebruikt om zo de franjes te kunnen creëren.
- Om ervoor te zorgen dat de proefstukken minimaal 150 mm van de rand van het materiaal zijn uitgesneden wordt deze grens met rode stift op het PLA aangegeven. Van hieruit worden de samples uitgetekend.

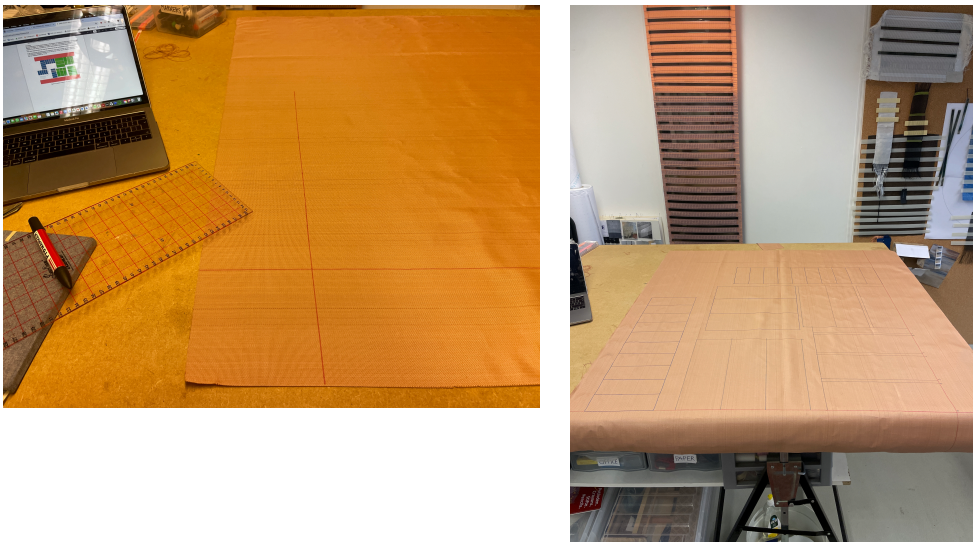


Figure C.1: 150mm rand + Snijpatronen

- Controleer dat de juiste franjes (5 mm ± 0,5 mm) symmetrisch aan beide zijden zijn aangebracht. Voor de franjes zijn telkens 5 draden uitgetrokken aan beide zijden. Dit komt precies overeen met de benodigde lengte van 5mm.

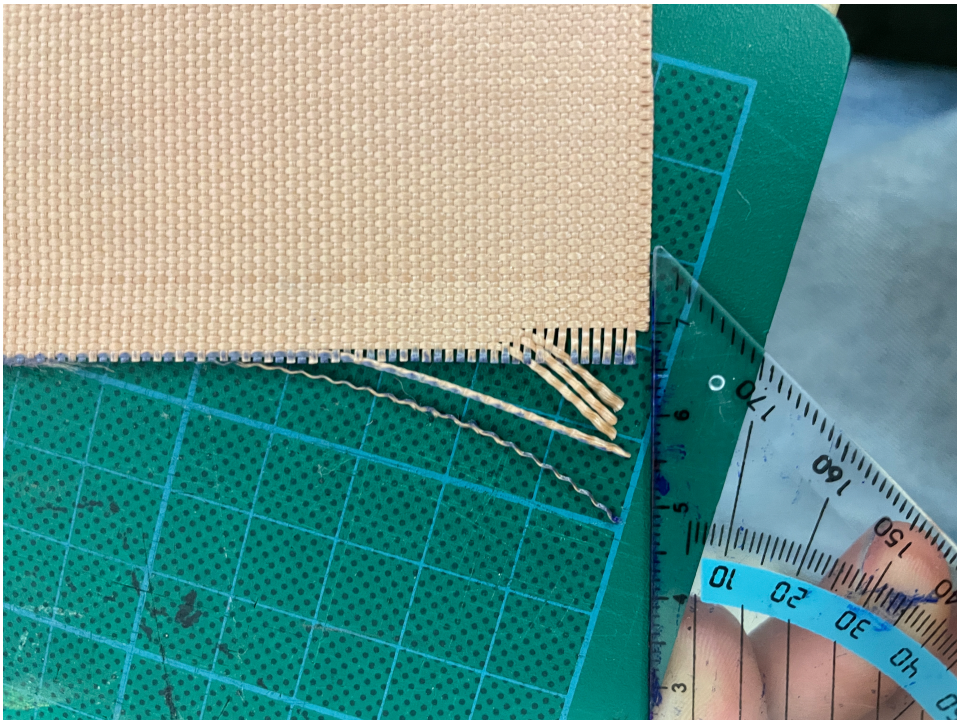
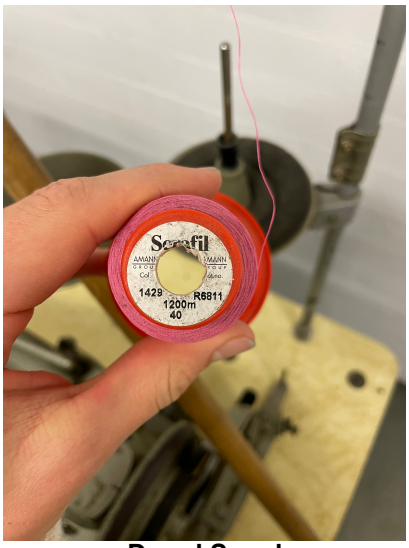


Figure C.2: Franjes

- Maak uit het uitgesneden materiaal de proefstukken.
- Datum en locatie: 18 december 24 - ITKW Arnhem
- PLA van Studio Belen, 304 g/m², droog
- PFAFF Industriële naaimachine met een 2mm stikafstand



PFAFF Naaimachine



Draad Spoel

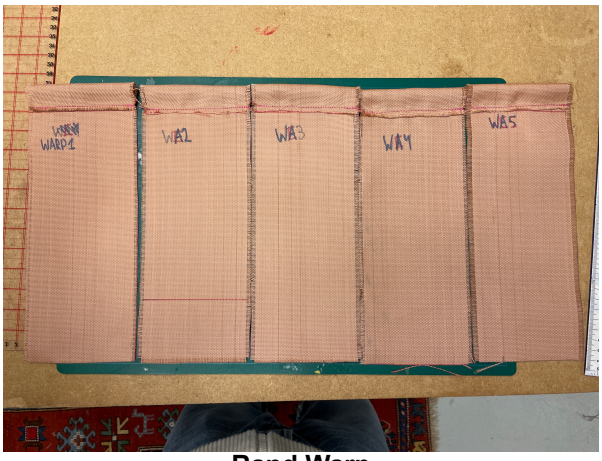


Stikafstand (Close-Up 1)

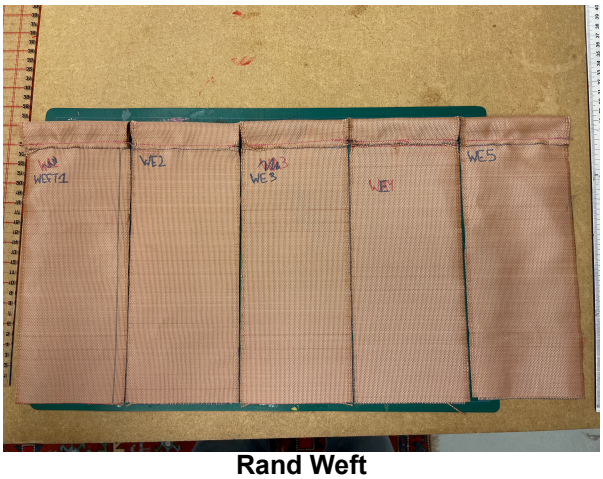


Stikafstand (Close-Up 2)

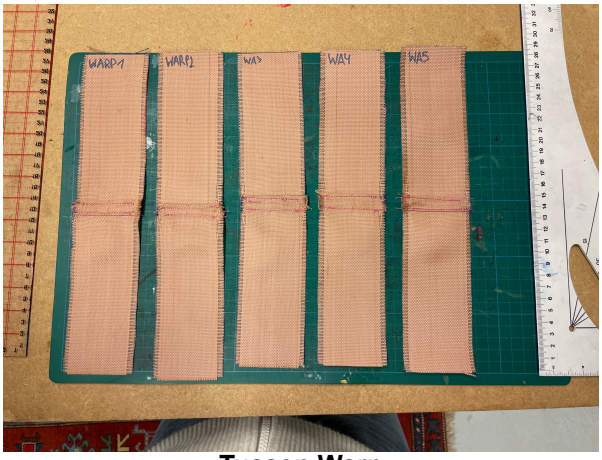
Figure C.3: Naaiapparatuur



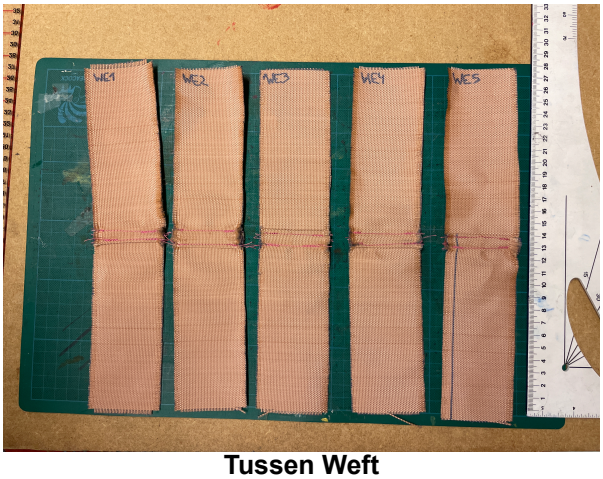
Rand Warp



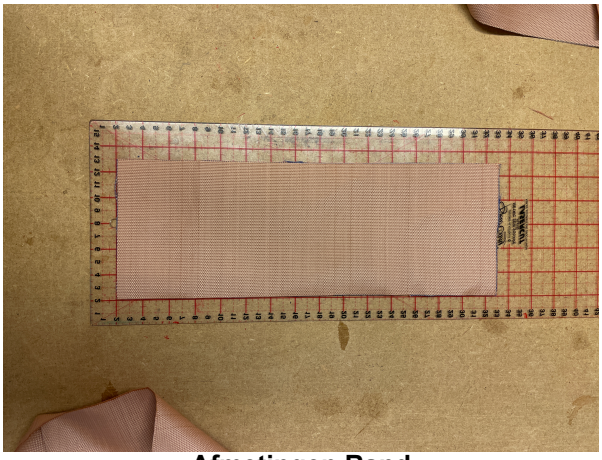
Rand Weft



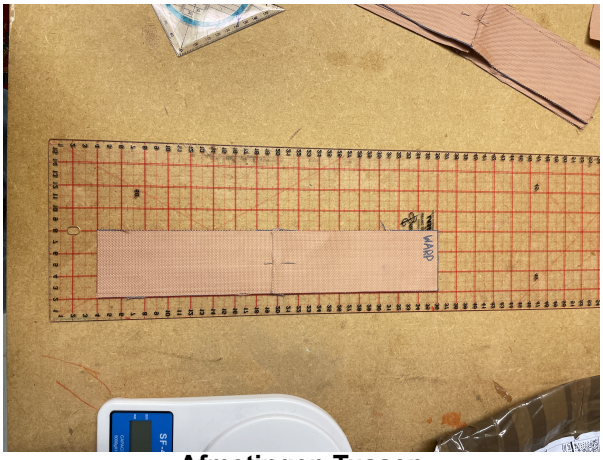
Tussen Warp



Tussen Weft



Afmetingen Rand



Afmetingen Tussen

Figure C.4: Testsamples

- Noteer de afmetingen van alle proefstukken (lengte, breedte, etc.).

Richting	Nummer	Lengte (cm)	Breedte (cm)	Opmerkingen
Warp	1	29	6	Lock iets te vroeg
	2	29,5	6	Beetje langer
	3	28,7	6	Beetje korter
	4	28,6	6	Beetje korter
	5	29,1	6	Steek 3 niet helemaal recht + bolletje
Weft	1	29,5	6	
	2	28,6	6	Grotere verbinding
	3	28,5	6	
	4	28,5	6	
	5	28,8	6	

Table C.1: Afmetingen en opmerkingen van de proefstukken (Tussen).

Richting	Nummer	Lengte (cm)	Breedte (cm)	Opmerkingen
Warp	1	28	11	
	2	27,8	11	
	3	28	11	Niet helemaal recht
	4	27,8	11	Niet helemaal recht
	5	27,7	11	Niet helemaal recht
Weft	1	28	11	Netjes gelukt
	2	27,8	11	Niet helemaal recht
	3	28	11	
	4	27,8	11	
	5	27,7	11	

Table C.2: Afmetingen en opmerkingen van de proefstukken (Rand).

C.2. Voorspanning en Parameters

- Bepaal de massa per oppervlakte van elk proefstuk en stel de voorspanning in:

Massa per Oppervlakte van Proefstuk [$\mathrm{g/m^2}$]	Voorspanning [N]
≤ 200	2
$> 200 \leq 500$	5
> 500	10

Table C.3: Voorspanning afhankelijk van massa per oppervlakte.

Een stuk PLA van 1.25m x 1m wordt gewogen en heeft een gewicht van 380 g. Dit kan omgerekend worden tot het gewicht per m². Namelijk, 304 g/m². Hieruit volgt dat dit materiaal onder de tweede voorspanningscategorie valt: *200–500 g/m²* en er dus een voorspanning van *5N* toegepast moet worden.

- Zorg dat de voorspanning geen rek groter dan 2% veroorzaakt.
- Gebruik een constant-rate-of-extension (CRE) machine of Trekbank en stel de reksnelheid in op basis van de maximale rek van het materiaal:

Meetlengte [mm]	Rek bij Maximale Kracht van Textiel [%]	Rekverhoging [%/min]	Reksnelheid [mm/min]
200	< 8	10	20
200	≥ 8 tot ≤ 75	50	100

Table C.4: Reksnelheid afhankelijk van rek.

Uit eerdere treksterktetests is gebleken dat het Buro Belén PLA een maximale rek heeft van rond de 28,42%. Hoewel de rek kan variëren, blijft deze ruim boven de 8% waardoor een reksnelheid van *100 mm/min* toegepast zal moeten worden.

- Stel de gauge length in op 200 ± 1 mm. Deze wordt telkens gecontroleerd bij het klaarzetten van de test door middel van met een meetlint de afstand tussen de twee klemmen te meten.

C.3. Testopstelling

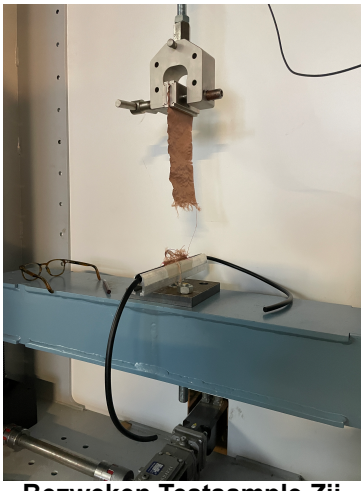
In de onderstaande afbeeldingen is te zien hoe de testopstelling er voor de randverbindingen uitziet. Bovenaan zit het membraan met een geribbelde membraanklem vast en onderaan wordt het membraan door middel van het kederprofiel en pees vastgehouden. Door de trekbank rustig naar beneden te verplaatsen kan het membraan voorgespannen worden. Aangezien 5N binnen de tolerantie van de trekbank valt, is er uiteindelijk gekozen om deze niet toe te passen, aangezien het bijna niet mogelijk is om zo'n lage voorspanning toe te passen met deze trekbank. De trekbank is namelijk vervormingsgestuurd en niet krachtgestuurd. Dit betekent dat de benodigde trekkracht wordt toegepast om het proefstuk met een constante snelheid van 100 mm/min te vervormen. Dit zorgt ervoor dat de kracht die de trekbank uitvoert oorspronkelijk steeds groter wordt, totdat het proefstuk bezwijkt; hierna zal een veel kleinere kracht nodig zijn dezelfde vervorming te veroorzaken.



Testopstelling Rand Voor



Testopstelling Rand Zij



Bezweken Testsample Zij



Bezweken Testsample Closeup

Figure C.5: Trekbank Testopstelling

Nadat elk proefstuk in de klemmen wordt geplaatst, wordt deze opnieuw gemeten. Deze afmetingen

zijn nodig om het oppervlak waarop getrokken wordt te bepalen, dat nodig zal zijn bij het maken van de stress-strain grafiek.

Richting	Nummer	Lengte (cm)	Breedte (cm)
Warp	1	20	5
	2	19,7	5
	3	20,5	5
	4	19,9	5
	5	20	5
Weft	1	19,6	5
	2	19,7	5
	3	19,8	5
	4	19,9	5
	5	19,8	5

Table C.5: Afmetingen en opmerkingen van de proefstukken (Tussen).

Richting	Nummer	Lengte (cm)	Breedte (cm)
Warp	1	20.5	10
	2	20	10
	3	20,3	10
	4	20,5	10
	5	20,7	10
Weft	1	20,2	10
	2	20,5	10
	3	20,4	10
	4	20,2	10
	5	20,2	10

Table C.6: Afmetingen en opmerkingen van de proefstukken (Rand).

D

Resultaten



Figure D.1: Bezweken Samples

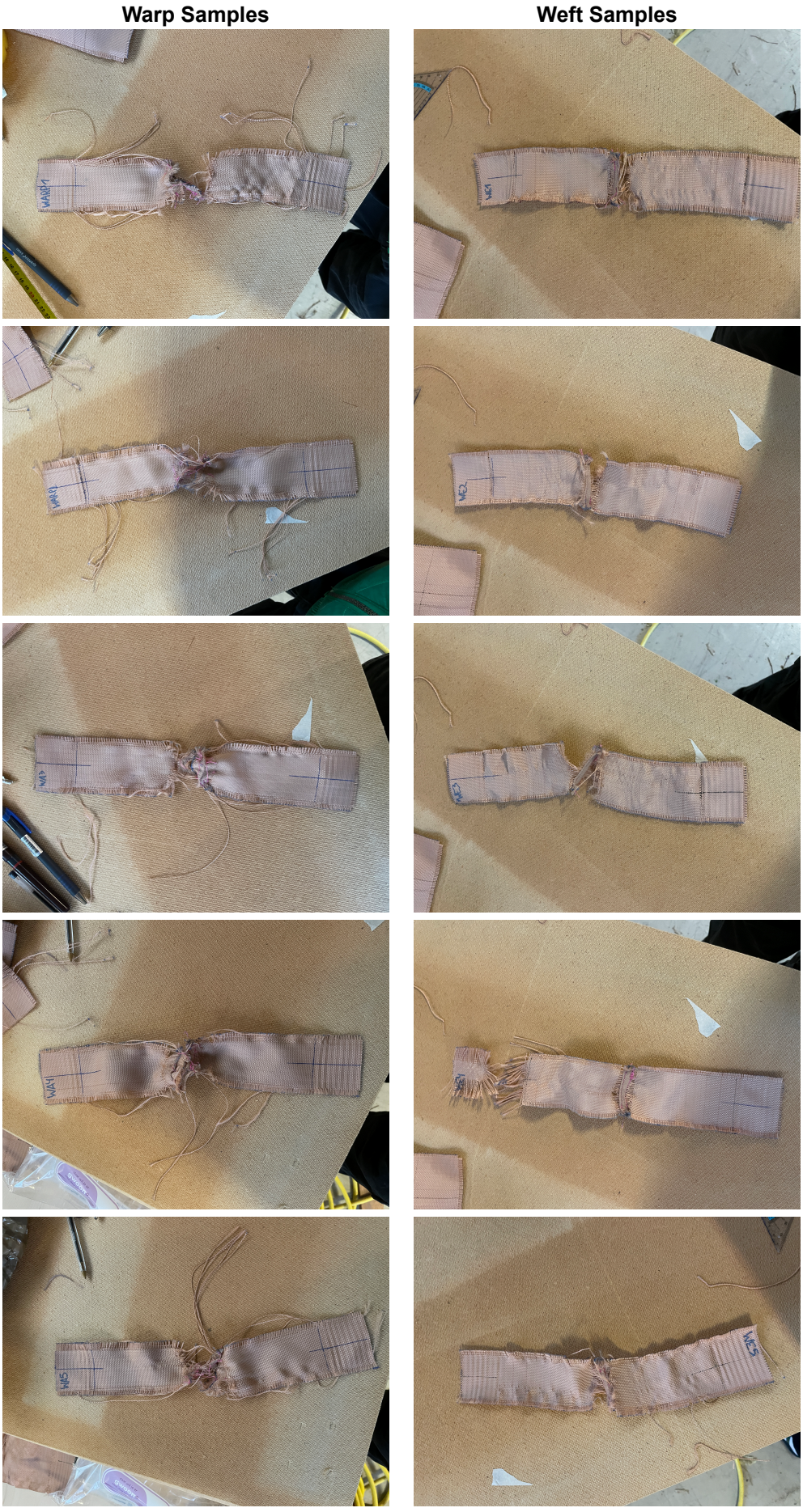


Table D.1: Warp and Weft Tussenverbinding Test Samples (Bezweken).

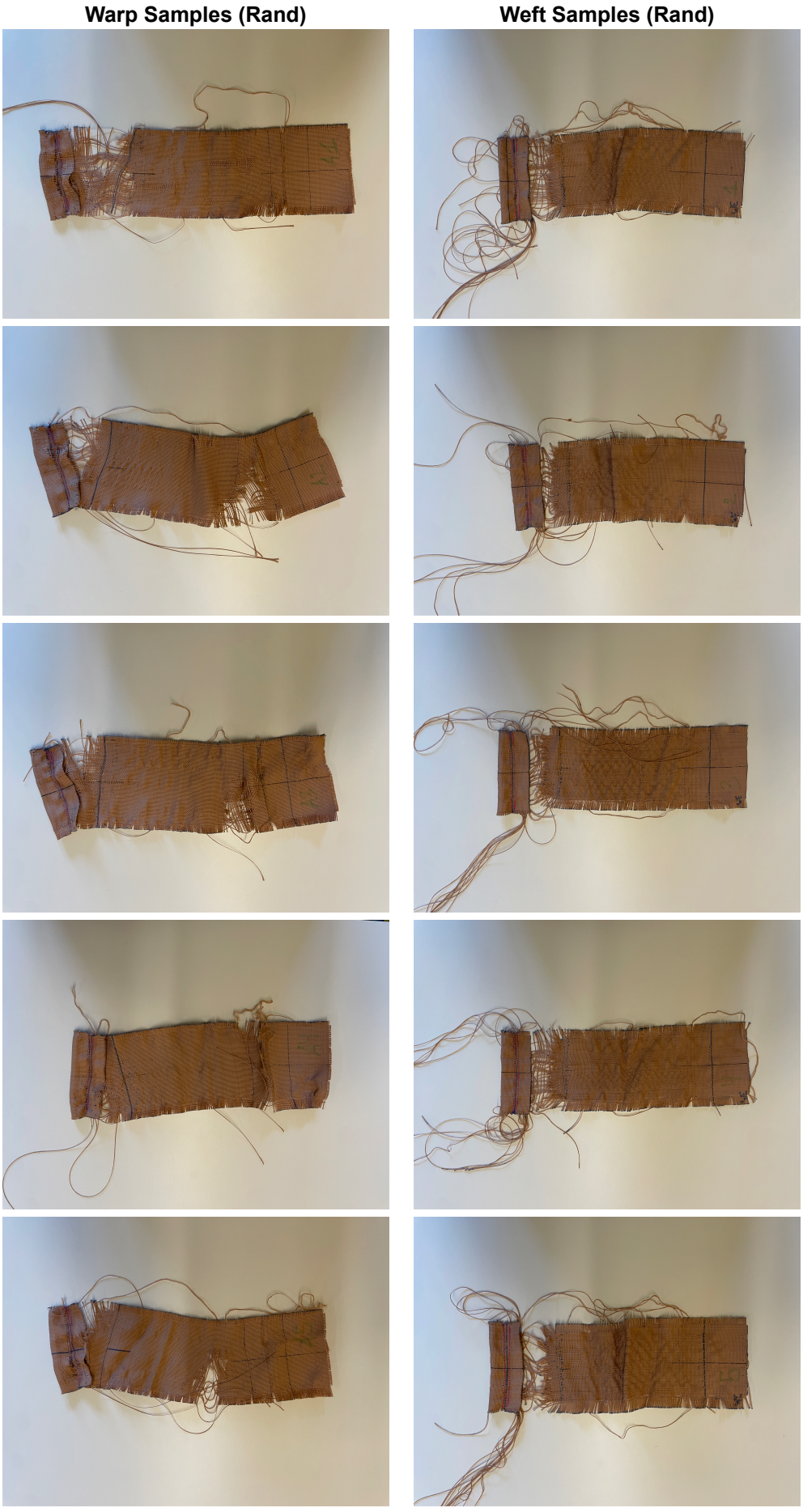
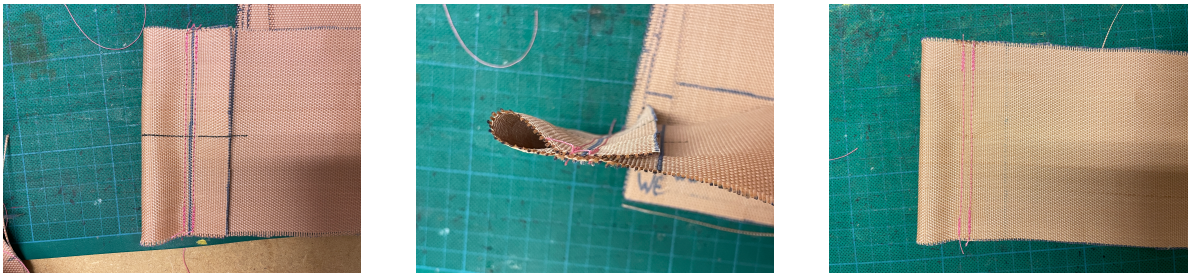


Table D.2: Warp and Weft Randverbinding Test Samples (Bezweken).

Niet alle Randverbinding samples zijn getest omdat al snel bleek dat deze samples niet geschikt waren. De enkele stiknaad was te dichtbij de rand van het membraan geplaatst waardoor de verbindingskracht ervan niet getoetst kon worden. De stiknaad werd namelijk uit het membraan getrokken.

De randverbinding moest dus aangepast en verbeterd worden. Er is gekozen om bij een tweede iteratie de randverbinding te voorzien van twee rechte stikrijen en daarnaast ook de afstand van de buitenste stikrij tot het uiteinde van het membraan te vergroten met 2 cm. Dit zorgt ervoor dat de draden waarop gestikt is, niet even makkelijk uitgetrokken kunnen worden, zodat de daadwerkelijke verbindingskracht van de stikrij en het membraan getoetst kan worden.



(a) Vooraanzicht **(b)** Zijaanzicht **(c)** Achteraanzicht

Figure D.2: Nieuwe Randverbinding met dubbele stiknaad en extra 2cm

D.1. Gegevensanalyse

De meetresultaten zijn door middel van een python script verwerkt om deze te plotten tot een stress-strain grafiek en de bijbehorende statistische waarden te bepalen. In dit script wordt de gemeten kracht omgerekend tot spanning en tegen de vervorming in percentage geplot. Per meting wordt ook de elasticiteitsgrens en de maximale kracht voor bezwijking aangegeven. Van deze gegevens wordt hierna ook het gemiddelde, de standaardafwijking, karakteristieke waarden en de partiële factor bepaald. Voor de karakteristieke waarde is een k=2,33 gebruikt (n=5 proeven, waarbij de variatiecoëfficiënt Vx nog onbekend is) Deze zijn allemaal in de onderstaande afbeeldingen af te lezen (NEN 1990, 2002).

```python
def plot_stress_strain(file_paths, lengths, widths, dataset_name):
    plt.figure(figsize=(12, 8))

    def find_elastic_limit(strain, stress):
        valid_indices = (strain >= 4) & (strain <= 5)
        strain_restricted = strain[valid_indices]
        stress_restricted = stress[valid_indices]

        slope = np.gradient(stress_restricted, strain_restricted)
        max_change_index = np.argmax(np.abs(np.gradient(slope)))

        return stress_restricted.iloc[max_change_index], strain_restricted.iloc[max_change_index]

    for i, (file_path, length, width) in enumerate(zip(file_paths, lengths, widths)):
        df = pd.read_csv(file_path)

        area = length * width

        elongation = -df['stroke 2 [mm]']
        force = df['force [N] ']
        stress = force / area
        strain = elongation / length * 100

        elastic_stress, elastic_strain = find_elastic_limit(strain, stress)
        print(f"Sample {i+1} - Elastic Limit Stress: {elastic_stress:.4f} N/mm² at Strain: {elastic_strain:.4f}%")

        plt.plot(strain, stress, label=f'Sample {i+1}')
        plt.scatter(elastic_strain, elastic_stress, color='red', label=f'Elastic Limit Sample {i+1}')

    plt.title(f'Stress vs Strain for {dataset_name}')
    plt.xlabel('Strain (%)')
    plt.ylabel('Stress (N/mm²)')
    plt.legend()
    plt.grid(True)
    plt.show()

Lengte_Rand_Warp = [205, 200, 203, 205, 207]
Breedte_Rand_Warp = [100, 100, 100, 100, 100]
Lengte_Rand_Weft = [202, 205, 204, 202, 202]
Breedte_Rand_Weft = [100, 100, 100, 100, 100]

Rand_Weft_files = ['Rand_Weft0.csv','Rand_Weft1.csv', 'Rand_Weft2.csv', 'Rand_Weft3.csv','Rand_Weft4.csv']
Rand_Warp_files = ['Rand_Warp0.csv','Rand_Warp1.csv','Rand_Warp2.csv','Rand_Warp3.csv','Rand_Warp4.csv']

plot_stress_strain(Rand_Weft_files, Lengte_Rand_Weft, Breedte_Rand_Weft, "Rand Weft")
plot_stress_strain(Rand_Warp_files, Lengte_Rand_Warp, Breedte_Rand_Warp, "Rand Warp")
```

Figure D.3: Python Script Randverbindingen