

## Bezwijkgedrag van historisch eikenhout onder drie-puntsbuiging – een experimenteel-numerieke studie

**Citation for published version (APA):**

Luimes, R. A., Suiker, A. S. J., Jorissen, A. J. M., & Schellen, H. L. (2016). Bezwijkgedrag van historisch eikenhout onder drie-puntsbuiging – een experimenteel-numerieke studie. In A. J. M. Jorissen, & A. J. M. Leijten (editors), *Onderzoeksmiddag "Construeren met Hout": - 22 januari 2016 -* (blz. 8-23). [???articleNumberLabel???](#)  
1 Eindhoven University of Technology.

**Document status and date:**

Gepubliceerd: 22/01/2016

**Document Version:**

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

**Please check the document version of this publication:**

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

**General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

[www.tue.nl/taverne](http://www.tue.nl/taverne)

**Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

[openaccess@tue.nl](mailto:openaccess@tue.nl)

providing details and we will investigate your claim.

# Bezwijkgedrag van historisch eikenhout onder drie-puntsbuiging – een experimenteel-numerieke studie

R.A. Luimes, A.S.J. Suiker, A.J.M. Jorissen en H.L. Schellen  
Faculteit Bouwkunde, Technische Universiteit Eindhoven, Nederland

## Samenvatting

Historische Nederlandse eikenhouten kabinetten vertonen scheuren die mogelijk veroorzaakt zijn door hygrosopische en thermische klimaatfluctuaties. Dit schademechanisme moet volledig inzichtelijk gemaakt worden om museumobjecten optimaal te kunnen behouden voor toekomstige generaties. Om deze reden wordt in deze paper het bezwijkgedrag van historische eikenhouten balken onder drie-puntsbuiging onderzocht in een gecombineerde experimenteel-numerieke studie. De numerieke resultaten zijn gegenereerd met de eindige-elementenmethode (EEM), waarin discreet scheurgedrag is gesimuleerd met behulp van interface-elementen die zijn voorzien van een interface-schademodel. Zowel het experimenteel bezwijkgedrag als het scheurpad komen goed overeen met de EEM resultaten. Scanning elektronenmicroscopische foto's van het scheurvlak laten zien dat de breuktaaiheid wordt beïnvloed door het zogenoemde "cel-overbruggingseffect". De invloed van anisotroop materiaalgedrag en de locatie van geometrische imperfecties op het bezwijkgedrag is aangetoond.

## 1 Introductie

Historische museumobjecten zijn zeer waardevol en daarom moeten deze objecten worden behouden voor toekomstige generaties. Om het risico op schade te minimaliseren, hanteren vooraanstaande museums strenge eisen voor binnenklimaatcondities door strikte grenzen op te leggen voor temperatuurs- en relatieve vochtigheidsfluctuaties. Op deze manier kunnen kwetsbare kunstwerken worden behouden, waarbij een laag risico op schade wordt gehandhaafd; echter, dit gaat gepaard met een grote energievraag en hoge kosten voor verwarmings-, ventilatie- en airconditioningssystemen (HVAC). Om deze aspecten te verbeteren, is het noodzakelijk om het ontstaan van schade en de mogelijke schadelijke effecten van klimaatfluctuaties inzichtelijk te maken.

In een recente museumstudie zijn de relaties tussen de constructiemethode en het optreden van schade ten gevolge van klimaatfluctuaties onderzocht voor

---

70 paren deuren van laat zeventiende-eeuwse Nederlandse eikenhouten kabinetten [1]. Alle deuren zijn samengesteld uit 100% kwartiers gezaagde eikenhouten planken van hoge kwaliteit, waarbij de fineerlagen zijn gemaakt van verschillende houtsoorten. De schadecategorieën zijn gedefinieerd als: i) geen zichtbare krimp of scheuren, ii) krimp, iii) krimp en open verbindingen, iv) krimp en scheuren in hout, v) combinatie van ii) en iii) en/of losse fineerlagen. Uit de studie volgde, zoals verwacht, dat krimp optreedt in de tangentiële en radiale richting van de celvormige microstructuur en dat zichtbare scheuren voornamelijk parallel aan de vezelrichting lopen. Daarnaast werd er een substantieel aantal bezwaken lijmverbindingen waargenomen ter plaatse van verbindingen tussen eikenhouten planken.

Het begrip en de interpretatie van deze in-situ observaties kunnen verder worden verbeterd door het ontwikkelen van geavanceerde numerieke modellen die nauwkeurig de schadeontwikkeling ten gevolge van hygroscopische en thermische klimaatfluctuaties in houten kabinetten kunnen simuleren. Deze paper presenteert een eerste stap in deze richting, door te focussen op de experimenteel-numerieke karakterisering van het discreet scheurgedrag van historische eikenhouten balken onder drie-puntsbuiging. Het doel van deze gecombineerde studie is tweeledig: De bezwijk eigenschappen van historisch eikenhout kunnen nauwkeurig worden bepaald en de scheurformulering die is toegepast in de modelleerstudie kan worden gevalideerd. Het bezwijkgedrag van de balk is gesimuleerd met de eindige-elementenmethode (EEM), waarbij gebruik is gemaakt van het cohesive zone model zoals gepresenteerd in [2]. Om scheurpaden in arbitraire richtingen te kunnen modelleren is het cohesive zone model opgebouwd uit interface- en continuümelementen. De interface-elementen zijn tussen alle continuümelementen geplaatst, welke het anisotroop materiaalgedrag van hout simuleren. Deze modelleeraanpak is als eerste voorgesteld in [3] en is succesvol toegepast in bezwijk analyses van verschillende constructiematerialen, zoals craquelé- en scheurvorming in polymeren [4] en het gecombineerd scheur- en decohesiegedrag van vezelcomposieten [5,6]. Voor zover bekend bij de auteurs is deze modelleerstrategie nog niet toegepast voor het simuleren van discrete scheuren in hout. Dit heeft waarschijnlijk te maken met de uitdagingen die gepaard gaan met het verkrijgen van numerieke nauwkeurigheid en stabiliteit bij dit soort problemen. Daarentegen zijn verschillende andere strategieën toegepast, zie [7,8,9].

De paper is als volgt ingedeeld: Paragraaf 3 beschrijft de proefstukken en de belastingcondities voor de drie-puntsbuiging experimenten. Paragraaf 4 bespreekt de experimentele resultaten met betrekking tot het bezwijkgedrag, het scheurpad en de microstructuur waargenomen op het scheurvlak. Het numerieke model wordt besproken in paragraaf 5 en de numerieke resultaten worden besproken in paragraaf 6. Paragraaf 7 geeft een samenvatting van de belangrijkste conclusies van de studie.

## 2 Experimentele testen

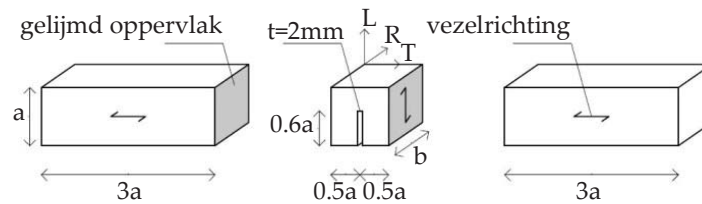
In de museumstudie gepresenteerd in [1], zijn de deuren van laat zeventiende-eeuwse Nederlandse eikenhouten kabinetten samengesteld uit eikenhouten planken die gedecoreerd zijn met fineerlagen. Zichtbare scheuren werden voornamelijk waargenomen parallel aan de vezelrichting waarbij de normaalrichting op het scheurvlak in radiale richting is georiënteerd. Overeenkomstig wordt in de huidige studie het bezwijkgedrag van historisch eikenhout geanalyseerd voor scheuren die parallel aan de vezelrichting lopen, waarbij de normaalrichting op het scheurvlak is georiënteerd in de radiale richting (d.w.z., RL scheuren). Daarnaast zijn scheuren geanalyseerd waarbij de normaalrichting op het scheurvlak is georiënteerd in de tangentiële richting (d.w.z., TL scheuren). Uit het bezwijkgedrag verkregen onder drie-puntsbuiging kunnen de sterkte en de breuktaaiheid worden bepaald. Deze bezwijk eigenschappen zijn benodigd als invoerparameters voor het cohesive zone model dat is gebruikt in de modelleerstudie, zie [2] voor meer details.

### 2.1 Proefstukken

In overeenstemming met [10], is elke proefstuk samengesteld uit twee balken waar tussen een vierkant blok is geplaatst, zie Figuur 1. De verbindingen zijn vervaardigd met een PVA lijm (NOVA COL D1 A). Het vierkante blok is voorzien van een centrisch aangebrachte inkeping om bezwijken te initiëren en scheurpropagatie in de TL of RL materiaalrichtingen te garanderen. De balken zijn gemaakt van nieuw eikenhout en het vierkante blok ter plaatse van het midden van het proefstuk is gemaakt van historisch eikenhout daterend uit 1300 na Christus. Het bezwijkgedrag van jongere eikenhouten blokken is tevens onderzocht; de resultaten hiervan zullen in een toekomstige publicatie worden gepresenteerd. Het historische hout is beschikbaar gesteld door de Agency for Palaces and Cultural Properties uit Denemarken. Archiven en gebouwarcheologie zijn geraadpleegd om de datum van herkomst vast te stellen. Voor de proefstukken met een TL scheur zijn twee verschillende afmetingen getest, namelijk één met een relatief groot blok met

---

een lengte en een hoogte van  $a=45\text{mm}$  en een breedte van  $b=30\text{mm}$ , en één met een klein blok met  $a=25\text{mm}$  en  $b=20\text{mm}$ . De proefstukken met een RL scheur bevatten uitsluitend een klein blok. De lengte van de centrisch aangebrachte inkeping is  $0.6a$  en de lengte van de balken is  $3a$ , zie Figuur 1. Iedere specifieke proefstukconfiguratie is 5 tot 6 keer getest om de herhaalbaarheid van de experimenten na te gaan en een indruk te krijgen van de spreiding in de experimentele resultaten.



Figuur 1: Geometrie en afmetingen van de proefstukken. De longitudinale, radiale en tangentiële richting van het vierkante blok zijn respectievelijk aangegeven met de afkortingen L, R en T.

## 2.2 Preparatie proefstukken

De drie componenten van de proefstukken zijn in een klimaatkamer geplaatst die is ingesteld op een temperatuur van  $20^\circ\text{C}$  en een relatieve vochtigheid van 65%. Nadat binnen een vastgesteld tijdsinterval een constant gewicht van de proefstukken was gemeten, d.w.z. het evenwichtshoutvochtgehalte conform [11] was bereikt, zijn de componenten aan elkaar gelijmd met een PVA lijm. Nadat de lijm was uitgehard, zijn de proefstukken uit de klimaatkamer gehaald en zijn deze voorzien van een centrisch aangebrachte inkeping. De vorm van de punt van de inkeping is verkregen door een botte zaag en een vijl te gebruiken. Vervolgens is het drie-puntsbuiging experiment uitgevoerd. Na afloop van het experiment zijn de massa bij 65% relatieve vochtigheid en de oven-droge massa van een klein stukje van het vierkante blok bepaald. Dit resulteerde in een gemiddeld evenwichtshoutvochtgehalte van 15,0% (klein proefstuk, TL scheur), 14,9% (groot proefstuk, TL scheur) en 14,0% (klein proefstuk, RL scheur).

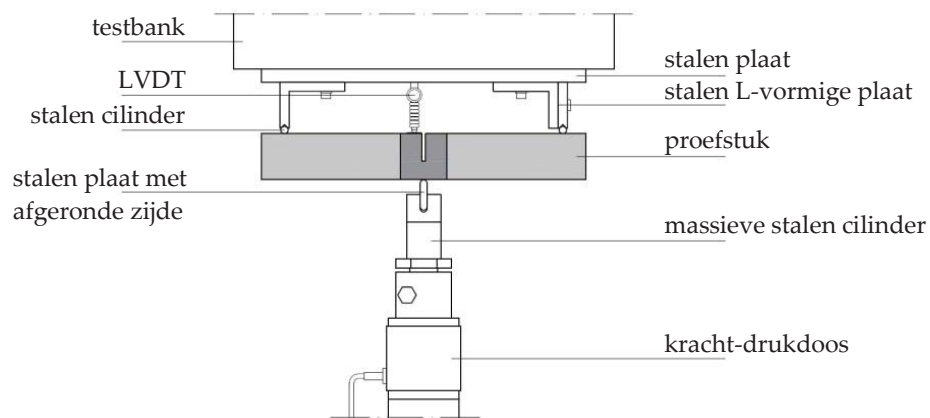
## 2.3 Proefopstelling en parameters

De proefopstelling is weergegeven in Figuur 2. Het proefstuk is scharnierend opgelegd en de belasting wordt ter plaatse van het midden van de overspanning ingeleid. De ondersteuning is opgebouwd uit een massieve L-vormige plaat en een massieve stalen cilinder. De belasting wordt ingeleid via een stalen plaat met een afgeronde zijde. Het ontwerp van de

ondersteuning en de inleiding van de belasting voldoen aan de eisen zoals omschreven in [10]. De quasi-statische belasting wordt verplaatsingsgestuurd aangebracht, waarbij de belastingsnelheid gelijk is aan 0,4 mm/min en 0,6 mm/min voor respectievelijk de kleine en grote proefstukken. De grootte van de belasting wordt gemeten met een kracht-drukdoos en de verplaatsing met een verplaatsingsopnemer (LVDT) ter plaatse van het midden van de overspanning. De breuktaaiheid  $G_f$  van het proefstuk wordt gekarakteriseerd door het oppervlak onder het krachts-verplaatsingsdiagram dat vervolgens wordt gedeeld door het scheuroppervlak, d.w.z.,

$$G_f = \frac{1}{A} \int_0^w F(w)dw, \quad (1)$$

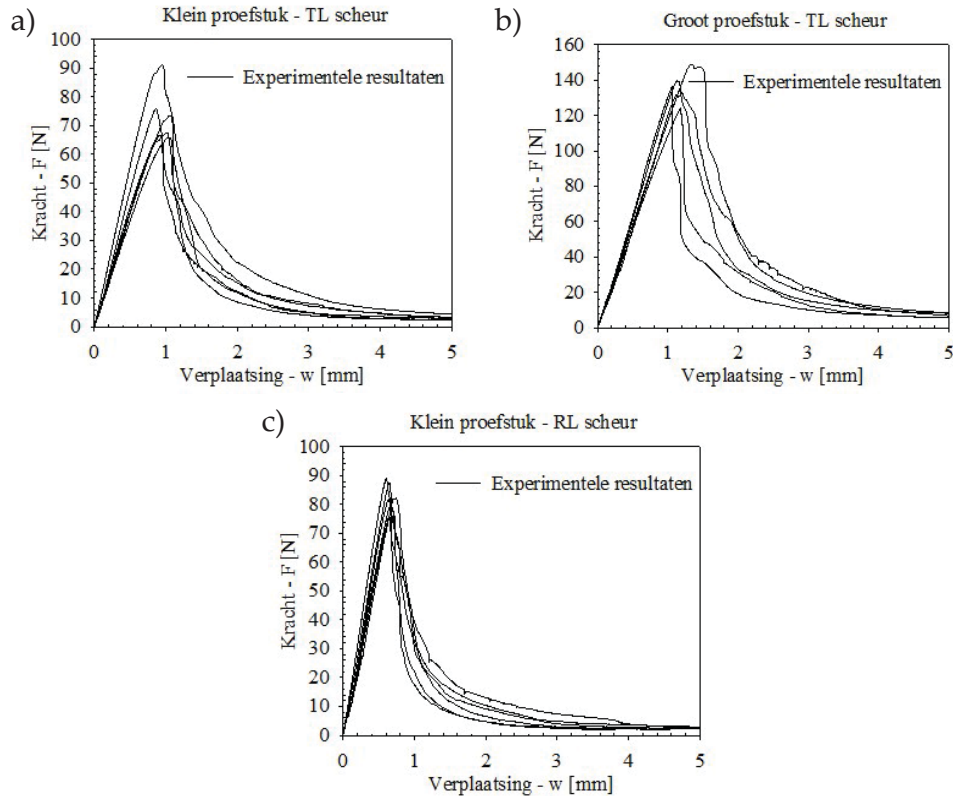
waarbij  $F$  de aangebrachte belasting representeert,  $w$  de verplaatsing en  $A$  het scheuroppervlak.



Figuur 2: Proefopstelling.

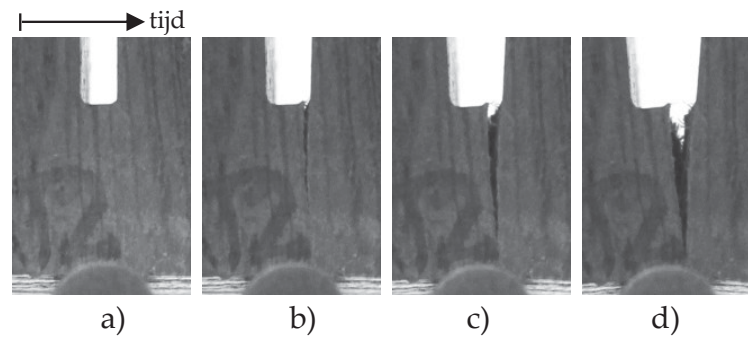
### 3 Experimentele resultaten

In Figuur 3 is de aangebrachte belasting  $F$  versus de verplaatsing  $w$  voor de drie proefstukconfiguraties weergegeven, d.w.z. het kleine proefstuk met een TL scheur (Figuur 3a), het grote proefstuk met een TL scheur (Figuur 3b), en het kleine proefstuk met een RL scheur (Figuur 3c). In eerste instantie neemt de kracht bij benadering lineair toe met toenemende verplaatsing, welk een lineair elastisch gedrag impliceert. Nadat de maximale kracht is bereikt, neemt de kracht af met een toenemende verplaatsing, in overeenstemming met de initiatie van een macroscopische bezwijkscheur. Dit zogenoemde ontstevigingsproces (“softening”) gaat door totdat de kracht is gedaald tot nul en de bezwijkscheur over de gehele proefstukhoogte is ontwikkeld.

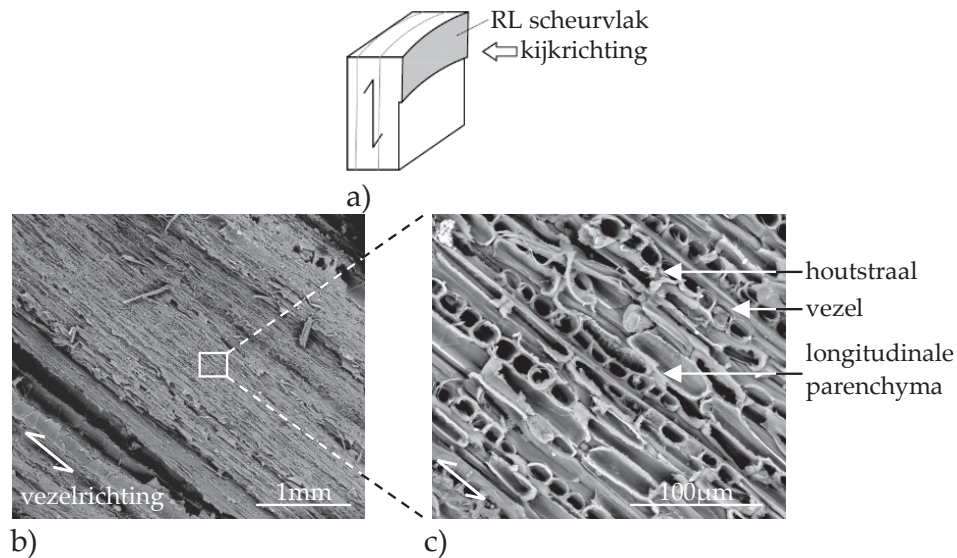


Figuur 3: Kracht-verplaatsingsdiagrammen voor de eikenhouten balken onder drie-puntsbuiging. a) Klein proefstuk met TL scheur. b) Groot proefstuk met TL scheur. c) Klein proefstuk met RL scheur.

Het scheurpad van het kleine proefstuk met de TL scheur is weergegeven in Figuur 4. Dit scheurpad is vergelijkbaar met dat van het proefstuk met de RL scheur. De scheur ontstaat aan de rechter zijde van de inkeping (Figuur 4b), en ontwikkelt vervolgens langs een bijna verticale lijn (Figuur 4c). De weerstand tegen bezwijken, en dus de breuktaaiheid, wordt veroorzaakt door celmateriaal dat de scheurvlakken overbrugt, en dat, wanneer gebroken, gedelamineerd en/of uitgetrokken, aan het uiteindelijke bezwijken van het proefstuk voorafgaat (Figuur 4d). Bezweken cellen zijn zichtbaar aanwezig voor RL scheuren, zoals in detail kan worden waargenomen in de scanning electronenmicroscopische foto's (SEM) van dit specifieke scheurvlak, zie Figuur 5. De cellen met een cirkelvormige doorsnede (houtstralen/parenchyma) en de cellen met een rechthoekige doorsnede (longitudinale parenchyma) zijn voornamelijk bezweken dwars door de celwand heen. De cellen met een grote breedte-lengte verhouding (vezels) zijn voornamelijk bezweken door middel van delaminatie.



Figuur 4: Scheurpad van een klein proefstuk met een TL scheur. a) Elastisch gedrag. b) Scheurinitiatie. c) Scheurpropagatie. d) Bezwijken.



Figuur 5: Microstructuur van het RL scheurvlak van een klein proefstuk. a) kijkrichting op RL scheurvlak. b) 34 keer vergroot. c) 480 keer vergroot.

Op basis van de kracht-verplaatsingsdiagrammen in Figuur 3 is de breuktaaiheid  $G_f$  berekend volgens Eq. (1). Overeenkomstig is de gemiddelde waarde  $\mu$  en standaarddeviatie  $\sigma$  berekend als  $\mu=0,47$  N/mm,  $\sigma=0,10$  N/mm (klein proefstuk, TL scheur),  $\mu=0,35$  N/mm,  $\sigma=0,07$  N/mm (groot proefstuk, TL scheur) en  $\mu=0,36$  N/mm,  $\sigma=0,07$  N/mm (klein proefstuk, RL scheur). Voor het kleine proefstuk is de gemiddelde breuktaaiheid voor de TL scheur 31% groter dan voor de RL scheur. In de literatuur, zie [12], wordt een tegenovergestelde tendens gerapporteerd, waarbij de oorzaak wordt toegeschreven aan TL scheuren die zich voortplanten langs paden met een relatief lage weerstand die worden veroorzaakt door houtstralen, en aan RL scheuren waarbij de houtstralen juist bijdragen aan het scheur-overbruggingseffect en de breuktaaiheid daarbij vergroten. Dit experimentele resultaat wordt momenteel in meer detail onderzocht en de uitkomsten zullen in een toekomstige paper worden gepubliceerd. Verder kan worden



waargenomen dat voor alle gevallen de standaarddeviatie van de breuktaaiheid ongeveer 20% bedraagt van de gemiddelde waarde, wat aannemelijk is voor eikenhout.

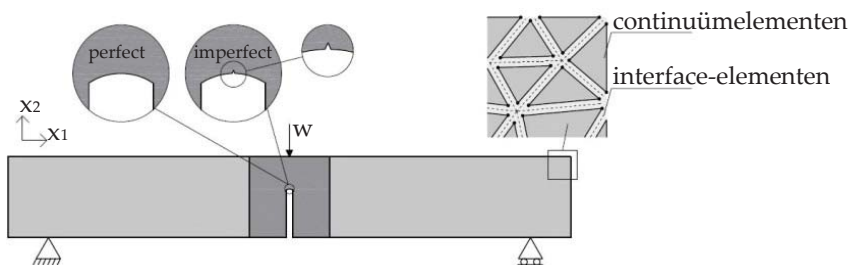
Voor de TL scheur is de gemiddelde waarde van de breuktaaiheid voor de kleine proefstukken 34% groter dan dat voor de grote proefstukken. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat de breuktaaiheid  $G_f$  geen materiaalparameter is, maar afhankelijk is van de proefstukafmeting [13]. Dit zogenoemde “size effect” wordt in meer detail toegelicht in paragraaf 5, waarin de vergelijking met de EEM resultaten wordt beschreven.

## 4 Numeriek model

De resultaten van de drie-puntsbuiging experimenten, zoals beschreven in paragraaf 3, zijn numeriek gesimuleerd. Hiervoor is het eindige-elementenprogramma ABAQUS [14] gebuikt. De geometrie en randvoorwaarden van het model, de eindige-elementendiscretisatie, en de materiaaleigenschappen worden hieronder toegelicht.

### 4.1 Geometrie en randvoorwaarden

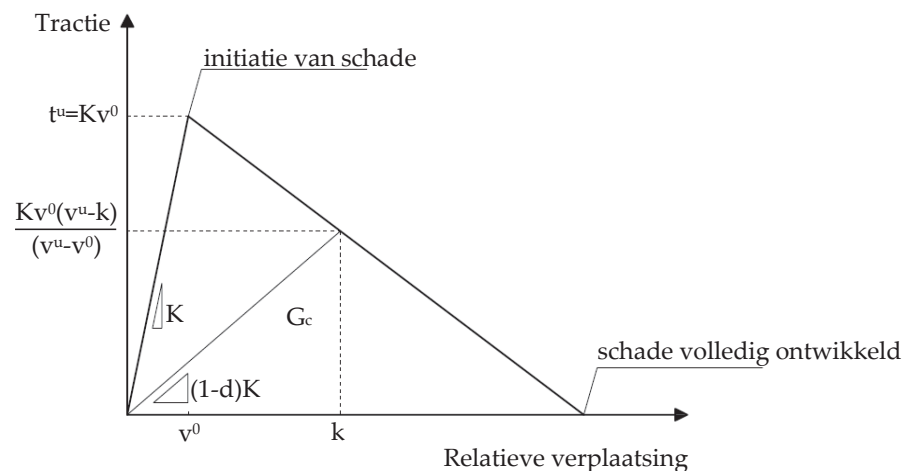
Voor de simulaties is het proefstuk geïdealiseerd als een tweedimensionale constructie waarin een vlakspanningstoestand heerst. De gelijmde oppervlakken tussen de afzonderlijke onderdelen van het proefstuk zijn gesimuleerd door deze te beschouwen als coherente interfaces. Het effect van een geometrische imperfectie ter plaatse van de inkeping op het bezwijkgedrag is bestudeerd door twee situaties te beschouwen; deze zijn i) geen imperfectie ter plaatse van de punt van de inkeping, ii) een kleine imperfectie, met de vorm van een scherpe snede, ter plaatse van de inkeping, zie Figuur 6. De afmeting van de imperfectie is representatief voor de oppervlakte-onregelmatigheden die zijn waargenomen bij de proefstukken, ter plaatse van de inkeping.



Figuur 6: Geometrie en randvoorwaarden van het proefstuk en de eindige-elementendiscretisatie.

## 4.2 Eindige-elementendiscretisatie

De geometrie van het proefstuk is voorzien van een mesh bestaande uit vlakspanning 3-knoops iso-parametrische elementen met een 1-punts Gauss kwadratuur. Met deze continuümelementen wordt het (isotroop/anisotroop) elastisch materiaalgedrag van het eikenhout gemodelleerd. In aanvulling hierop zijn 4-knoops interface-elementen, voorzien van een 2-punts Gauss kwadratuur, tussen alle continuümelementen geplaatst, zoals weergegeven in Figuur 6. Deze aanpak is als eerste voorgesteld in [3] voor het simuleren van scheuren in algemene bulkmaterialen die worden blootgesteld aan willekeurige belastingscondities, en is vervolgens gebruikt voor verschillende materiaaltoepassingen, zoals craquelé- en scheurvorming in polymeren [4] en het gecombineerd scheur- en delaminatiegedrag van vezelcomposieten [5,6]. Het maximaal aantal continuümelementen en interface-elementen van het EEM model is gelijk aan respectievelijk 36.964 en 55.127, wat resulteert in een voldoende nauwkeurige numerieke oplossing. De interface-elementen zijn voorzien van een interface-schademodel, zoals beschreven in [2], voor het simuleren van discreet scheurgedrag. Dit interface-schademodel is voorzien van een lineair tractie-separatiediagram, zie Figuur 7, waarbij de breuktaaiheid is gebaseerd op een standaard mixed-mode criterium dat veelal wordt gebruikt voor het beschrijven van het bros bezwijkgedrag van interfaces. De numerieke implementatie is gebaseerd op een impliciet (backward) Euler schema en een consistente tangent operator. Het interface-schademodel is geïmplementeerd als een zogenoemd “user subroutine” (UMAT) in het eindige-elementenprogramma ABAQUS [14].



Figuur 7: Lineair tractie-separatiediagram voor het beschrijven van het bezwijkgedrag.

### 4.3 Materiaaleigenschappen

De elastische materiaaleigenschappen van het (historisch en nieuw) eikenhout zijn afgeleid uit de literatuur, en samengevat in Tabel 1. Het effect van het anisotrope materiaalgedrag op het bezwijkgedrag is bestudeerd door twee situaties te beschouwen. De eerste situatie wordt gerepresenteerd door een isotroop lineair elastisch materiaalmodel, waarbij de stijfheidseigenschappen corresponderen met de materiaalrichting loodrecht op het scheuoppervlak, d.w.z. de tangentiële of radiale materiaalrichting, en de tweede situatie wordt gerepresenteerd door een orthotroop lineair elastisch materiaalmodel, waarin de drie materiaalrichtingen van eikenhout expliciet in rekening worden gebracht.

De sterkte- en breuktaaiheidseigenschappen van het interface-schademodel zijn samengevat in Tabel 2, en zijn gekalibreerd op basis van de experimentele resultaten zoals gepresenteerd in paragraaf 3. Ter vereenvoudiging is aangenomen dat de eigenschappen voor mode II (zuiver dwarskracht) gelijk zijn aan mode I (zuiver normaalkracht). Hoewel dit resulteert in een onderschatting van de eigenschappen voor mode II, is het effect op het globale bezwijk gedrag klein aangezien mode I bezwijkgedrag domineert. De waarden van de overige materiaaleigenschappen zijn vergelijkbaar met de waarden in [2].

Tabel 1: Materiaaleigenschappen van eikenhout.

Eigenschappen	Referentie	Isotroop	Orthotroop
$E_L$ [N/mm <sup>2</sup> ]	[8]		12799
$E_T$ [N/mm <sup>2</sup> ]	[8]	1120	1120
$E_R$ [N/mm <sup>2</sup> ]	[15]	1600	1600
$\nu_{LT}$ [-]	[8]	0.35*	0.49
$\nu_{LR}$ [-]	[8]	0.35	0.35
$\nu_{TR}$ [-]	[8]		0.28
$G_{LT}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	[8]		815
$G_{LR}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	[15]		1200
$G_{RT}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	[16]		400

\* Voor het isotrope model moet de Poisson's ratio realistisch gezien kleiner worden genomen dan de relatieve hoge waarde van 0,49 die is gebruikt in het orthotrope model.

Tabel 2: Sterkte- ( $t_1$ ,  $t_2$ ) en breuktaaiheidseigenschappen ( $G_{f,I}$ ,  $G_{f,II}$ ) zoals gebruikt in het interface-schademodel voor een TL scheur (klein en groot proefstuk) en een RL scheur (klein proefstuk).

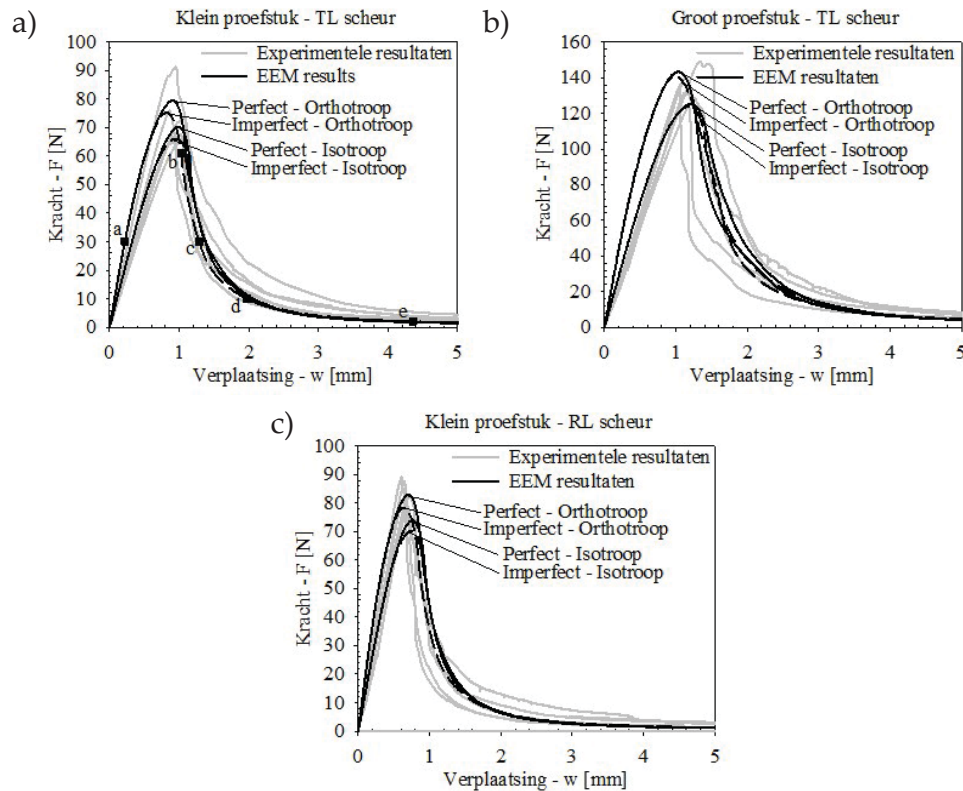
Eigenschappen	Klein	Groot	Klein
	TL scheur	TL scheur	RL scheur
$t_1 = t_2$ (sterkte) [N/mm <sup>2</sup> ]	5,70	4,00	5,70
$G_{f,I} = G_{f,II}$ (breuktaaiheid) [N/mm]	0,40	0,35	0,35

## 5 Numerieke resultaten

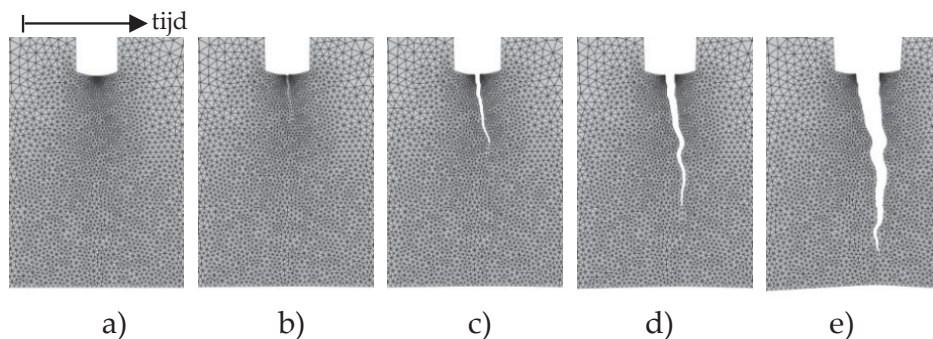
In Figuur 8 is de aangebrachte belasting  $F$  versus de verplaatsing  $w$  weergegeven voor de experimentele resultaten en de numerieke analyses voor het kleine proefstuk met een TL scheur (Figuur 8a), het grote proefstuk met een TL scheur (Figuur 8b), en het kleine proefstuk met een RL scheur (Figuur 8c). De numerieke resultaten komen goed overeen met de experimentele resultaten. Een geometrische imperfectie ter plaatse van de inkeping veroorzaakt een afname van de bezwijkbelasting (top van de grafiek) van maximaal 6%, zie ook Tabel 3. Het orthotrope materiaalmodel resulteert in een wat stijver gedrag in het lineair elastische gedeelte van het kracht-verplaatsingsdiagram, en veroorzaakt daarbij een toename van de bezwijkbelasting van maximaal 15% in vergelijking met het isotrope model. Voor het grote proefstuk met een TL scheur wordt het initiële anisotrope elastische gedrag van de proefstukken wat overschat door de numerieke simulaties, zie Figuur 8b.

Het gesimuleerde scheurpad voor het kleine proefstuk met een TL scheur is weergegeven in Figuur 9. Op basis van een vergelijking tussen Figuur 4 en Figuur 9, kan worden geconcludeerd dat het experimentele en gemodelleerde scheurpad goed overeen komen. Er kan worden waargenomen dat er een klein verschil is in de locatie van de scheurinitiatie. In de numerieke simulatie wordt deze locatie bepaald door de locatie van de geometrische imperfectie; niettemin, de exacte locatie van scheurinitiatie ter plaatse van de inkeping heeft een verwaarloosbaar klein effect op het globale bezwijkgedrag.

De mixed-mode in de cohesive zone ter plaatse van de scheurpunt varieert tussen 0 (zuiver mode I) en 1 (zuiver mode II), in overeenstemming met de definitie gegeven in [2]. De gemeten waarde in de simulaties ligt tussen 0 en 0,6. Dit mixed-mode gedrag wordt veroorzaakt door het feit dat de scheur niet exact langs de centrale verticale as van het proefstuk ontwikkelt, wat zou



Figuur 8: Kracht-verplaatsingsdiagrammen voor de eikenhouten proefstukken onder drie-puntsbuiging; EEM resultaten (zwarte lijnen) versus de experimentele resultaten overeenkomstig Figuur 3 (grijze lijnen). a) Klein proefstuk met TL scheur. b) Groot proefstuk met TL scheur. c) Klein proefstuk met RL scheur. De letters a,b,c,d,e in Figuur 8a corresponderen met 5 verschillende stadiums van het scheurpad, zie Figuur 9.



Figuur 9: Scheurpad van de EEM simulatie van het kleine orthotrope proefstuk met een TL scheurinitiatie ter plaatse van de imperfectie. a) Elastisch gedrag. b) Scheurinitiatie. c) Overgang van scheurinitiatie naar scheurpropagatie. d) Scheurpropagatie. e) Bezwijken.

corresponderen met een zuiver mode I bezwijkgedrag en dus de afwezigheid van dwarskracht.

De waarde van de breuktaaiheid en de bezwijkbelasting, die zijn bepaald op basis van de numerieke analyses, zie Figuur 8, zijn weergegeven in Tabel 3. Analoog aan de experimentele waarden zijn de numerieke waarden berekend volgens Eq. (1). De waarden van de breuktaaiheid zoals weergegeven in Tabel 3 zijn maximaal 8% hoger dan de eigenschappen die als invoer zijn gebruikt voor het cohesive zone model, zie Tabel 2, wat, zoals verwacht, impliceert dat het elastisch materiaalgedrag van eikenhout een minimale invloed heeft op de breuktaaiheidseigenschappen, zoals gemeten op systeemniveau. De bezwijkbelasting- en de breuktaaiheidswaarden voor het isotroop elastisch model zijn 5 tot 13% kleiner dan de waarden voor het orthotroop elastisch model. Daarnaast zijn de breuktaaiheidswaarden vergelijkbaar met de gemiddelde waarden zoals bepaald op basis van de experimentele resultaten, zie paragraaf 3. Voor het verkrijgen van deze mate van gelijkheid moesten voor de TL scheur de waarden van de sterkte en breuktaaiheid van het grote proefstuk lager worden aangenomen dan deze van het kleine proefstuk, zie Tabel 2. Dit impliceert dat de sterkte- en breuktaaiheidseigenschappen, zoals toegepast in het cohesive zone model, afhankelijk zijn van de proefstukafmeting, welk verder onderzoek vereist.

Tabel 3: Breuktaaiheid en bezwijkbelasting bepaald op basis van de EEM simulaties.

	CZ-model		$G_f$ [N/mm]	F [N]
Klein proefstuk, TL scheur	Perfect	Isotroop	0,40	70
		Orthotroop	0,43	79
	Imperfect	Isotroop	0,40	66
		Orthotroop	0,42	75
Groot proefstuk, TL scheur	Perfect	Isotroop	0,35	125
		Orthotroop	0,37	143
	Imperfect	Isotroop	0,34	124
		Orthotroop	0,37	141
Klein proefstuk, RL scheur	Perfect	Isotroop	0,36	74
		Orthotroop	0,38	83
	Imperfect	Isotroop	0,35	70
		Orthotroop	0,37	78

## 6 Conclusie en vervolgonderzoek

Het bezwijkgedrag van historisch eikenhout onder drie-puntsbuiging is bestudeerd op basis van experimenten en eindige-elementensimulaties. Het discreet scheurmodel dat is voorgesteld in [2] blijkt goed in staat om het experimentele bezwijkgedrag nauwkeurig te beschrijven. In vervolgonderzoek zal deze strategie gecombineerd worden met een hygroscopisch-thermisch model, aangezien de schade in historische Nederlandse eikenhouten kabinetten waarschijnlijk voortkomt uit variërende binnenklimaatcondities.

### Dankbetuiging

Dit werk maakt onderdeel uit van het onderzoeksprogramma Science4Arts dat gefinancierd is door de Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek (NWO). De auteurs waarderen de discussies met S.E. Ekelund (Technische Universiteit Eindhoven / Rijksmuseum Amsterdam), P.H.J.C. van Duin (Rijksmuseum Amsterdam), H.A. Ankersmit (Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed) en R.M. Groves (Technische Universiteit Delft) op het gebied van conservatie/restauratie, cultureel erfgoed en experimentele mechanica. De auteurs waarderen de hulp van S.E. Ekelund, S. Segers en H.L.M. Wijen bij het uitvoeren van de experimenten en de hulp van T. Arends en J.H.J. Dalderop bij het maken van SEM foto's.

### Referenties

- [1] S.E. Ekelund, A.J.M. Jorissen. The museum study of the Climate4Wood research project. In: A.J.M. Jotissen, A.J.M. Leijten (Eds.). *Onderzoeksmiddag Construeren met Hout*. ISBN: 978-90-386-3562-0. 2014, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven.
- [2] M.V. Cid Alfaro, A.S.J. Suiker, R. de Borst, J.J.C. Remmers. *Analysis of fracture and delamination in laminates using 3D numerical modelling*. *Engineering Fracture Mechanics* 76 (2009), pp. 761-780.
- [3] X.P. Xu, A. Needleman. *Numerical simulations of fast crack growth in brittle solids*. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 42(9) (1994), pp. 1397-1434.
- [4] M.G.A. Tijssens, E. Van Der Giessen, L.J. Sluys. *Simulation of mode I crack growth in polymers by crazing*. *International Journal of Solids and Structures* 37 (2001), pp. 7307-7327.

- [5] M.V. Cid Alfaro, A.S.J. Suiker, R. de Borst. *Transverse failure behaviour of fiber-epoxy systems*. Journal of Composite Materials 44(12) (2010), pp. 1493-1516.
- [6] M.V. Cid Alfaro, A.S.J. Suiker, C.V. Verhoosel, R. de Borst. *Numerical homogenization of cracking processes in thin fibre-epoxy layers*. European Journal of Mechanics A/Solids 29 (2010), pp. 119-131.
- [7] E.N. Landis, S. Vasic, W.G. Davids, P. Parrod. *Coupled experiments and simulation of microstructural damage in wood*. Experimental Mechanics 42(4) (2002), pp. 389-394.
- [8] S. Saft, M. Kaliske. *A hybrid interface-element for the simulation of moisture-induced cracks in wood*. Engineering Fracture Mechanics 102 (2013), pp. 32-50.
- [9] L.P. Qiu, E.C. Zhu, J.W.G. van de Kuilen. *Modeling crack propagation in wood by extended finite element method*. European Journal of Wood and Wood Products 72 (2014), pp. 273-283.
- [10] NORDTEST. *Wood: fracture energy in tension perpendicular to the grain NT BUILD 422*. 1993, Nordtest, Espoo.
- [11] International Organisation for Standardization (ISO). *Wood – Determination of moisture content for physical and mechanical tests*. 1975, ISO, Switzerland.
- [12] I. Smith, E. Landis, M. Gong. *Fracture and fatigue in wood*. ISBN: 0-471-48708-2. 2003, John Wiley & Sons, England.
- [13] J. Ozbolt, R. Eligehausen. *Scaling laws in concrete structures*. In: *Fracture and damage in quasibrittle structures. – Experiment, modelling and computer analysis*. Z.P. Bazant, Z. Bittnar, M. Jirasek, J. Mazars (Eds.). 1994.
- [14] ABAQUS 6.13-2. *Abaqus 6.13-2 Documentation*. 2013, Dassault Systèmes Simulia Corp., U.S.A. Providence RI.
- [15] A. Reitterer, G. Sinn, S.E. Stanzl-Tschegg. *Fracture characteristics of different wood species under mode I loading perpendicular to the grain*. Materials Science & Engineering A A332 (2002), pp. 29-36.
- [16] F.F.P. Kollman, W.A. Coté. *Principles of Wood Science and Technology*. ISBN-13: 978-3-642-87930-2. 1968, Springer-Verlag, Berlin.



