



## **Imperfektionsmessungen an stabilitätsgefährdeten Holzbauteilen**

**- Schlussbericht -**

Juli 2022

### **Forschungsvorhaben**

DIBt P 52-5- 13.194-2048/19

### **Projektlaufzeit**

01.01.2020 bis 31.07.2022

### **Projektbearbeitung**

Institut für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart

Prof. Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann

Janusch Töpler, M.Sc. (Sachbearbeiter)

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) gefördert (Geschäftszeichen: P 52-5- 13.194-2048/19).

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.



## Inhaltsverzeichnis

<b>1.</b>	<b>Begriffe.....</b>	<b>5</b>
<b>2.</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>6</b>
<b>3.</b>	<b>Stand der Technik.....</b>	<b>7</b>
3.1.	Geometrische Imperfektionen.....	7
3.2.	Strukturelle Imperfektionen.....	9
<b>4.</b>	<b>Imperfektionsmessungen.....</b>	<b>11</b>
4.1.	Messmethode und Vorgehensweise.....	11
4.2.	Messfehler.....	14
4.3.	Testmessung.....	16
4.4.	Stichprobenauswahl.....	17
4.5.	Auswertung der Punktwolken.....	19
4.5.1.	Träger.....	19
4.5.2.	Stützen.....	23
4.6.	Ergebnisse und Auswertung.....	24
4.6.1.	Allgemeines.....	24
4.6.2.	BSH und FSH Träger - Vorkrümmungen.....	24
4.6.3.	BSH und FSH Träger - Vortordierung.....	27
4.6.4.	FSH Stützen - Vorkrümmungen.....	28
4.6.5.	FSH GL75 Stützen - Schiefstellungen.....	29
<b>5.</b>	<b>Ermittlung geometrischer Ersatzimperfektionen.....</b>	<b>31</b>
5.1.	Allgemeines.....	31
5.2.	Numerische Modelle und Berechnungsmethodik.....	31
5.2.1.	Allgemeines.....	31
5.2.2.	Verfahren zur Ermittlung der geometrischen Ersatzimperfektionen.....	33
5.2.3.	Bewertung der Verfahren zur Ermittlung der Ersatzimperfektionen.....	34
5.3.	Ergebnisse und Auswertung.....	36
5.3.1.	BSH Träger – Vorkrümmungen.....	36
5.3.2.	BSH und FSH Träger – Vortordierungen.....	37
5.3.3.	FSH GL75 Träger und Stützen - Vorkrümmungen.....	42



6.	Strukturelle Imperfektionen .....	44
6.1.	Stützen .....	44
6.2.	Träger.....	44
<b>7.</b>	<b>Vergleich mit Literaturwerten .....</b>	<b>47</b>
7.1.	Vorkrümmungen.....	47
7.2.	Vortordierungen.....	48
7.3.	Stützenschiefstellungen .....	49
<b>8.</b>	<b>Bemessungsempfehlungen.....</b>	<b>50</b>
<b>9.</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>52</b>
<b>10.</b>	<b>Ausblick .....</b>	<b>54</b>
<b>11.</b>	<b>Danksagung .....</b>	<b>54</b>
<b>12.</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>55</b>
<b>Anhang A</b>	<b>Messergebnisse .....</b>	<b>58</b>
A.1	Messergebnisse – Testmessung MPA Stuttgart.....	59
A.2	Messergebnisse – Bauvorhaben 2020-KW23.....	61
A.3	Messergebnisse – Bauvorhaben 2020-KW27.....	63
A.4	Messergebnisse – Bauvorhaben 2020-KW32.....	66
A.5	Messergebnisse – Bauvorhaben 2020-KW33.....	71
A.6	Messergebnisse – Bauvorhaben 2020-KW34.....	73
A.7	Messergebnisse – Bauvorhaben 2020-KW38_1.1.....	78
A.8	Messergebnisse – Bauvorhaben 2020-KW38_1.2.....	82
A.9	Messergebnisse – Bauvorhaben 2020-KW38_1.3.....	88
A.10	Messergebnisse – Bauvorhaben 2020-KW38_1.4.....	91
A.11	Messergebnisse – Bauvorhaben 2020-KW39.....	93
A.12	Messergebnisse – Bauvorhaben 2020-KW45_1.1.....	97
A.13	Messergebnisse – Bauvorhaben 2020-KW45_1.2.....	102
A.14	Messergebnisse – Bauvorhaben 2020-KW47.....	106
A.15	Messergebnisse – Bauvorhaben 2021-KW12.....	109
A.16	Messergebnisse – Bauvorhaben 2021-KW16.....	112
A.17	Messergebnisse – Bauvorhaben 2021-KW22.....	116



A.18	Messergebnisse – Bauvorhaben 2021-KW24.....	120
A.19	Messergebnisse – Bauvorhaben 2021-KW25.....	123
A.20	Messergebnisse – Bauvorhaben 2021-KW30_1.....	128
A.21	Messergebnisse – Bauvorhaben 2021-KW30_2.....	131
A.22	Messergebnisse – Bauvorhaben 2021-KW30_3.....	134
A.23	Messergebnisse – Bauvorhaben 2021-KW33.....	137
A.24	Messergebnisse – Bauvorhaben 2022-KW15.....	143



## 1. Begriffe

Geometrische Imperfektionen:

Abweichungen der tatsächlichen Geometrie und Lage eines Bauteils von der (idealen) Planung.

Strukturelle Imperfektionen:

Abweichung des Dehnungsschwerpunktes vom Flächenschwerpunkt eines Querschnitts infolge streuender Holzeigenschaften im Bauteil (z.B. Rohdichte, Ästigkeit, ...).

Bezeichnung der verschiedenen geometrischen Imperfektionen:

- Vorkrümmung -  $e_{y/z}$ : horizontale Vorverformung der Stabachse eines Querschnitts
- Schiefstellung -  $e_{\phi}$ : dimensionslose Neigung der Stützenachse zur Vertikalen
- Vortordierung -  $e_{\theta}$ : dimensionslose Verdrehung eines Querschnitts um die Stablängsachse

Geometrische Ersatzimperfektionen:

Geometrische Imperfektionen, die in der Bemessung zur Berücksichtigung des Einflusses der tatsächlich gemessenen geometrischen Imperfektionen angenommen werden können.

Ersatzimperfektionen nach DIN EN 1995-1-1 [11], [12]:

Geometrische Imperfektionen, die in der Bemessung zur Berücksichtigung des Einflusses der geometrischen und strukturellen Imperfektionen angenommen werden können.

Verwendetes Koordinatensystem:

In Abb. 1 ist das verwendete Koordinatensystem dargestellt. Bei Trägern verläuft die x-Achse stets horizontal und der Ursprung ist an einem Auflager des statischen Systems in Stabachse angeordnet. Dies gilt auch bei veränderlichen Querschnitten und nicht horizontaler Unter- und/oder Oberkante. Bei Stützen verläuft die x-Achse stets vertikal und der Ursprung ist in der Stabachse im Stützenfußpunkt angeordnet.

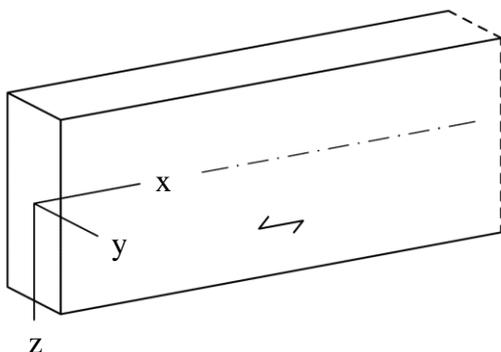


Abb. 1: Koordinatensystem



## 2. Einleitung

Die Aufgabenstellung des Forschungsvorhabens ergab sich aus nachfolgend aufgeführten Problemstellungen, die aktuell bei Imperfektionsannahmen für die Bemessung einzelner stabförmiger Holzbauteile vorhanden sind:

- Die Ersatzimperfektionsannahmen, die den Formeln des aktuellen DIN EN 1995-1-1 [11], [12] zugrunde liegen, beziehungsweise erwähnt werden, sind inkonsistent. Insbesondere die Vorkrümmungen beim Vergleich der Ersatzstabverfahren Biegeknicke (VH:  $\approx L/470$ ; BSH:  $\approx L/1100$ ) und Biegedrillknicke (mit  $L/288$  bis  $L/577$  hergeleitet [17]) und den Schnittgrößenberechnungen nach Theorie II. Ordnung ( $L/400$ ). Es werden in DIN EN 1995-1-1 [11], [12] keine Angaben zu Vortordierungen von Holzbauteilen, die im Rahmen des Biegedrillknicknachweises relevant sind, gemacht.
- Eine belastbare Datenbasis an (geometrischen) Imperfektionsmessungen ist in Bezug auf die genannten Angaben im DIN EN 1995-1-1 [11], [12] nur für Nadelholzstützen bekannt [3].
- Es sind keine Ergebnisse von (geometrischen) Imperfektionsmessungen bei Laubholzbauteilen bekannt.
- Es sind keine systematischen Untersuchungen der (geometrischen) Imperfektionen von biegebelasteten BSH Bauteilen bekannt.

Zur Überarbeitung und Zusammenführung der verschiedenen Imperfektionsannahmen in DIN EN 1995-1-1 [11], [12] wurden in diesem Forschungsprojekt folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Durchführung von (geometrischen) Imperfektionsmessungen an biegebelasteten BSH Bauteilen sowie druck- und/oder biegebelasteten Bauteilen aus Buchen-Furnierschichtholz GL75 (BauBuche) nach ETA-14/0354 [14] zur Schaffung einer Datenbasis gemessener geometrischer Imperfektionen.
- Rückrechnung von Ersatzimperfektionen mit dem FE Programm Abaqus/CAE 2020 unter Annahme geometrischer und struktureller Imperfektionen und Vergleich mit den aktuellen Bemessungsansätzen in DIN EN 1995-1-1 [11], [12] und Fachliteratur.
- Erarbeitung konsistenter Annahmen für Ersatzimperfektionen für die Bemessung imperfektionsempfindlicher, druck- und/oder biegebelasteter stabförmiger Holzbauteile.
- Einbringen der Ergebnisse in die aktuelle Überarbeitung der DIN EN 1995-1-1 [11], [12] und Abstimmung mit den normativen Angaben für Montagetoleranzen.

Imperfektionen komplexer zwei- und dreidimensionale Tragsysteme wie Fachwerk- oder Nagelplattenkonstruktionen werden nicht betrachtet.



### 3. Stand der Technik

#### 3.1. Geometrische Imperfektionen

Nachfolgend wird ein kurzer Überblick über Veröffentlichungen zu Imperfektionsmessungen im Holzbau, sowie Stahlbau und Massivbau, sofern für diese Arbeit relevant, gegeben.

##### Holzbau

Brüninghoff [6] vermaß 13 Dachbinder einer Holzhalle mit je 21,66 m Spannweite und ermittelte die horizontalen Vorkrümmungen. Es ergaben sich Werte zwischen  $L/660$  und  $L/900$ , bei einem Mittelwert von  $L/770$ . Die über Pfetten gekoppelten Träger waren alle in dieselbe Richtung vorgekrümmt. Es konnten keine nennenswerten Vortordierungen festgestellt werden.

Larsen und Theilgaard [28], [29] dokumentierten Druck- und Biegeversuche an 39 schlanken Vollholzbauteilen mit Querschnittsabmessungen  $38,3 \times 101 \text{ mm}^2$ ,  $50,4 \times 152 \text{ mm}^2$  und  $38,6 \times 176 \text{ mm}^2$ . Neben den experimentell ermittelten Torsions- und Biegesteifigkeiten wurden auch die Vorkrümmungen um die starke und schwache Achse, sowie die Vortordierung ermittelt. Diese geometrischen Imperfektionen wurden im vertikalen Versuchsaufbau mittels eines Lots und eines Messschiebers aufgenommen. Anhand der Daten wurden Regressionsgleichungen zur Ermittlung der Vorkrümmung  $e_y$  in Abhängigkeit der Länge  $e_y = 0,0035 \times L$  und der Vortordierung  $e_\vartheta$  in Abhängigkeit der Querschnittsabmessungen  $e_\vartheta = 0,05 \times B / H$  ermittelt. Die Gleichung zur Ermittlung der Vorkrümmung wurde auch zur Herleitung der Kippbeiwerte von Brüninghoff und Heimeshoff [17] herangezogen, deren Ergebnisse in DIN 1052:1988 [7] und nachfolgend in DIN EN 1995-1-1 [11], [12] übernommen wurden.

Blaß und Ehlbeck [3], [4] beschreiben systematische Messungen geometrischer Imperfektionen von Holzstützen an 13 Gebäuden. Es wurden dabei die Schrägstellungen, Vorkrümmungen, Querschnittsabmessungen und Holzfeuchten von 142 VH und 176 BSH Stützen aus Nadelholz aufgenommen. Es wurden sowohl belastete, als auch unbelastete Holzstützen in Bestandsgebäuden verschiedenen Alters untersucht. Der Einfluss von Belastung und Langzeitverhalten wurde auf der sicheren Seite liegend vernachlässigt, da dieser nicht abschätzbar war. Die Messung der Imperfektionen erfolgte mit einem Sekundentheodoliten Typ Wild T2 in den Viertelpunkten der Stützen über die Höhe mittels Messmarken. Die Holzfeuchtemessungen wurden mit einer Hydromette DH 100 in ca. 3 cm Tiefe vorgenommen. Die Vorgehensweise ermöglichte es, eine belastbare Datenbasis der Vorkrümmungen und Schiefstellungen von VH und BSH Nadelholzstützen zu erstellen. Anhand dieser konnten die Ersatzimperfektionen (VH:  $\approx L/470$ ; BSH:  $\approx L/1100$ ) und die  $\beta_c$  Beiwerte (VH: 0,2; BSH: 0,1) des Ersatzstabverfahrens Biegeknicken für VH und BSH aus Nadelholz abgeleitet [1] bis [4] und in DIN 1052:2004 [10] und in DIN EN 1995-1-1 [11], [12] übernommen werden.

Kessel et al. [18], [19], [20] haben in 3 Messreihen Imperfektionsmessungen an Nagelplattenkonstruktionen durchgeführt. In [20] wurde der Fokus auf die Repräsentativität der Stichprobe gelegt, indem zufällig 1 bis 3 Bauteile je Bauwerk ausgewählt und vermessen wurden. Es wurden punktuell über die Länge der Ober- und Untergurte von 45 Bindern in 25 Gebäuden im Montagezustand (oder bei Bauvorhaben, bei denen die Binderkonstruktionen offen oder begehbar waren) die Koordinaten von Oberflächenpunkten der Bauteile aufgenommen. Die Messungen erfolgten mit einem Sekundentheodolit



Th 2, der eine Ebene aufspannt. Der Abstand der Binder zu der Ebene konnte mit einem Zollstock gemessen werden. In [19] wurde die Repräsentativität der Stichprobe durch die Messung einer großen Anzahl von Bindern je Bauwerk sichergestellt. Es wurden punktuell über die Länge die Koordinaten der Obergurte von ca. 80 Bindern in 4 Gebäuden kurz nach der Montage aufgenommen. Die Messung erfolgte mit einem Theodolit Leica Builder RM 100, der die 3D Koordinaten von Punkten bestimmen und an eine CAD Software übergeben kann. In [18] wurden die Messungen bei 10 Bauvorhaben an je 9-10 Bindern mit möglichst unterschiedlichen Binderformen und Spannweiten beschrieben. Die Messungen erfolgten ebenfalls punktuell über die Länge die Obergurte kurz nach der Montage. Messgerät war ein Tachymeter Leica Builder 309, mit dem die 3D Koordinaten von Punkten bestimmt und an eine CAD Software übergeben werden können. Anhand der Messwerte wurden die globalen Schiefstellungen der Nagelplattenbinder über die Höhe und die lokalen Vorkrümmungen der Obergurte ermittelt. Generell wurde in den Untersuchungen von Kessel et al. [18], [19], [20] ein Fokus auf die Repräsentativität der Stichprobe, mögliche Messfehler und die statistische Auswertung der Messergebnisse gelegt. Anhand der Messwerte wurden Montagetoleranzen und Bemessungswerte für die Schrägstellung und Vorkrümmung von einzelnen Nagelplattenbindern und für Aussteifungselemente ermittelt.

Dietsch und Henke [8] beschreiben Imperfektionsmessungen an weitgespannten Brettschichtholzträgern mit Auswertung in Bezug auf das resultierende Torsionsmoment am Auflager. Es wurde je 1 Binder, der direkt an einen Verband angeschlossen war, in 7 Bestandsgebäude von beiden Seiten vermessen. Die Messung erfolgte mit einem 3D Laserscanner Leica ScanStation mit einem Messpunktraster von 50 mm x 50 mm x 10 m. Ausgewertet wurden die horizontalen Vorkrümmungen an Binderober- und -unterkante für beide Seiten des Binders. Die Messergebnisse der gemittelten Vorkrümmungen der Stabachse lagen zwischen ca.  $L/530$  und  $L/1710$ .

Pawlowksi et al. [35] stellten ein einfaches und kostengünstiges Verfahren für kontinuierliche Verformungsmessungen bei Bestandsgebäuden vor. Das Messsystem bestand aus Leuchtdioden, die an ausgewählten Punkten von Bauteilen angebracht und deren 2D Verschiebungen mittels Industriekameras und digitaler Bilderverarbeitung millimetergenau bestimmt werden konnten. Das Messsystem eignet sich insbesondere zum Monitoring von Verschiebungen einzelner Punkte in Bestandsgebäude.

## Stahlbau

Lindner und Giezelt [31] nahmen Imperfektionsmessungen an 266 Stahlstützen in 8 Gebäuden zur Ermittlung der Stützenschiefstellung vor. Die Messungen wurden mit einem Sekundentheodolit während der Montage und nach dem Ausrichten durchgeführt. Eine Fehleranalyse ergab, dass der Messfehler der Schiefstellung für die Auswertung von untergeordneter Bedeutung ist. Anhand der Messwerte wurden mittels computergestützter Traglastberechnungen, unter Berücksichtigung von Eigenspannungen und Fließzonenausbreitung, unterschiedliche Ersatzimperfektionen für Berechnungen mit Elastizitäts- oder Fließgelenktheorie, unter Berücksichtigung des Einflusses der Stützhöhe und der Stützenanzahl in der Reihe, ermittelt.



## Massivbau

Maaß, Rackwitz et al. [32] führten Messungen von Schrägstellungen, Vorkrümmungen, Stützenabmessungen, etc. an bis zu ca. 1000 Stahlbetonstützen bei in der Regel fertigen Rohbauten von 6 mehrgeschossigen Massivbauten durch. Über das Vorgehen und die Messmethode wurden keine genauen Angaben gemacht. Eine Normalverteilung stellte in der Regel eine gute Näherung an die Verteilung der Messergebnisse dar.

Stoffregen und König [37] dokumentierten ca. 6 Monate nach Fertigung die Stützenschiefstellungen von 1074 Stahlbetonstützen in 8 Gebäuden, die mittels Messlatte und Wasserwaage aufgenommen wurden. Anhand der Datenbasis wurden Imperfektionsannahmen für die Bemessung in Abhängigkeit der Anzahl der Geschosse und der Anzahl der Stützen pro Geschoss hergeleitet.

Kolodziejczyk et al. [22] beschreiben Imperfektionsmessungen an 16 gekrümmten Stahlbetonbindern einer Lärmschutzeinhausung. Es wurden zu drei Zeitpunkten Messungen mit einem Laserscanner Leica ScanStation 2 durchgeführt: Bei Lagerung im Fertigteilwerk, nach der Montage und nach Fertigstellung der Stahl-Glas-Dachkonstruktion. Durch einen Vergleich der bereinigten Punktwolken mit den Schalplänen konnten die geometrischen Imperfektionen ermittelt, diese in ein FE-Rechenmodell implementiert und die geometrischen Ersatzimperfektionen der 1. Eigenform berechnet werden.

## Fazit

Über die Zeitschiene der Veröffentlichungen lässt sich eine Fortentwicklung der Messmethoden von manuell geprägten [6] hin zu zum Großteil automatisierten [8] Methoden beobachten. In neueren Untersuchungen wurden Imperfektionsmessungen häufig mittels Laserscannern durchgeführt. Da diese Methode eine schnelle Aufnahme sehr vieler Datenpunkte mit ausreichender Genauigkeit bei automatisierter Auswertung erlaubt, wurde diese auch für die Messungen in diesem Projekt gewählt.

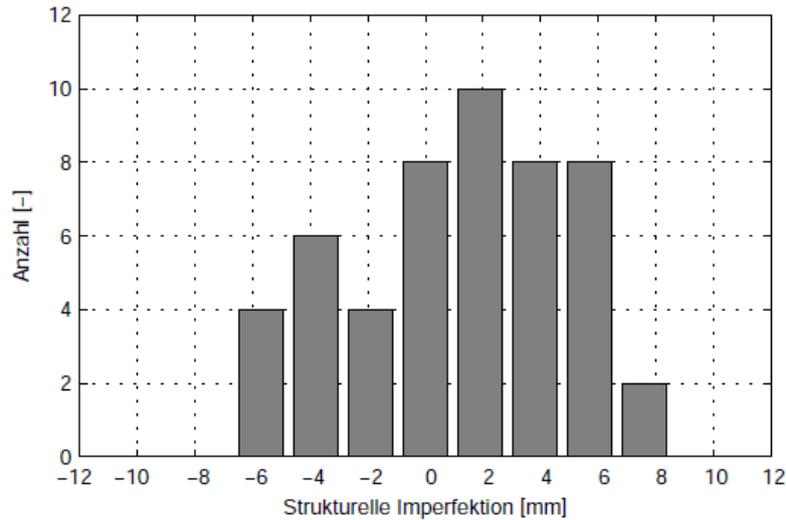
In Bezug auf die Stichprobenauswahl, Bewertung von Messfehlern und statistische Auswertung orientierten sich nachfolgend beschriebenen Untersuchungen an [18], [19], [20].

Die geometrischen Ersatzimperfektionen werden in dieser Arbeit mit einem Verfahren ähnlich dem in [22] anhand Vergleichsrechnungen mit der FE-Software Abaqus bestimmt.

## 3.2. Strukturelle Imperfektionen

Es sind nur zwei Untersuchungen zu strukturellen Imperfektionen im Holzbau veröffentlicht und den Autoren bekannt.

Blaß und Ehlbeck [1], [4] berücksichtigten den Einfluss struktureller Imperfektionen auf das Tragverhalten von Brettschichtholz (BSH) und Vollholz (VH) Stützen mittels des Karlsruher Rechenmodells. Dafür wurden die Stützenquerschnitte in 30 mm hohe und 150 mm lange Lamellenabschnitte unterteilt. Den einzelnen Lamellenabschnitten wurden mittels eines stochastischen Modells streuende Materialkennwerte (E-Moduln, Festigkeiten, ...) zugeordnet. Zusätzlich wurden den zufällig generierten Stützen streuende geometrische Imperfektionen (Querschnittsabmessungen und Vorkrümmungen) zugeordnet. Anhand dieser numerisch erzeugten Stützenversuchskörper mit streuenden Material- und Geometrie-kennwerten wurden Traglastberechnungen im Rahmen einer Monte-Carlo Simulation mit 400



**Abb. 2:** Histogramm der Exzentrizitäten infolge der strukturellen Imperfektionen für 50 Versuche, nach [39]. bis 5000 Berechnungen je Stützenschlankheit durchgeführt. Anhand der 5 % Fraktile der ermittelten Tragfähigkeiten wurden  $\beta_c$  Beiwerte für der Ersatzstabverfahren Biegeknicken ermittelt. Für VH wurde  $\beta_c = 0,2$ , für BSH  $\beta_c = 0,1$  empfohlen. Eine getrennte Untersuchung alleine der strukturellen Imperfektionen von BSH und VH Stützen wurde nicht vorgenommen und es wurde keine explizite Aussage über die Größe struktureller Imperfektionen getroffen. Aus eigenen FE-Berechnungen ergab sich, dass die von Blaß und Ehlbeck [1], [4] ermittelten 5 % Fraktile der Tragfähigkeiten größer sind als Tragfähigkeiten, die sich bei Annahme nomineller (charakteristischer) Materialkennwerte und 95 % Quantilwerte der geometrischen Imperfektionen ergeben [41]. Folglich wird der Einfluss struktureller Imperfektionen beim Biegeknicken durch die Annahme nomineller (charakteristischer) Materialkennwerte und 95 % Quantilwerte der geometrischen Imperfektionen abgedeckt.

Theiler [39] ermittelte den dynamische E-Modul von BSH Lamellen vor dem Verleimen zu Stützen aus GL 24h und GL 32h. Die Stützen hatten eine Querschnittshöhe von 160 mm. Anhand des E-Moduls der Lamellen wurde der Schubmittelpunkt und dessen Abstand (Exzentrizität) vom Querschnittsmittelpunkt bestimmt (siehe Abb. 2). Mittelwert, Standardabweichung und Maximum lagen bei 1,1 mm, 3,9 mm und 8,3 mm. Es konnte kein signifikanter Einfluss der Festigkeitsklasse und der Stützenlänge (1,4 m, 2,3 m und 3,2 m) festgestellt werden. Der 95 % Quantilwert einer Normalverteilung mit genanntem Mittelwert und Standardabweichung liegt bei 7,5 mm. Dies entspricht abhängig von der berücksichtigten Stützenlänge  $L / 190$  bis  $L / 430$ .

## 4. Imperfektionsmessungen

### 4.1. Messmethode und Vorgehensweise

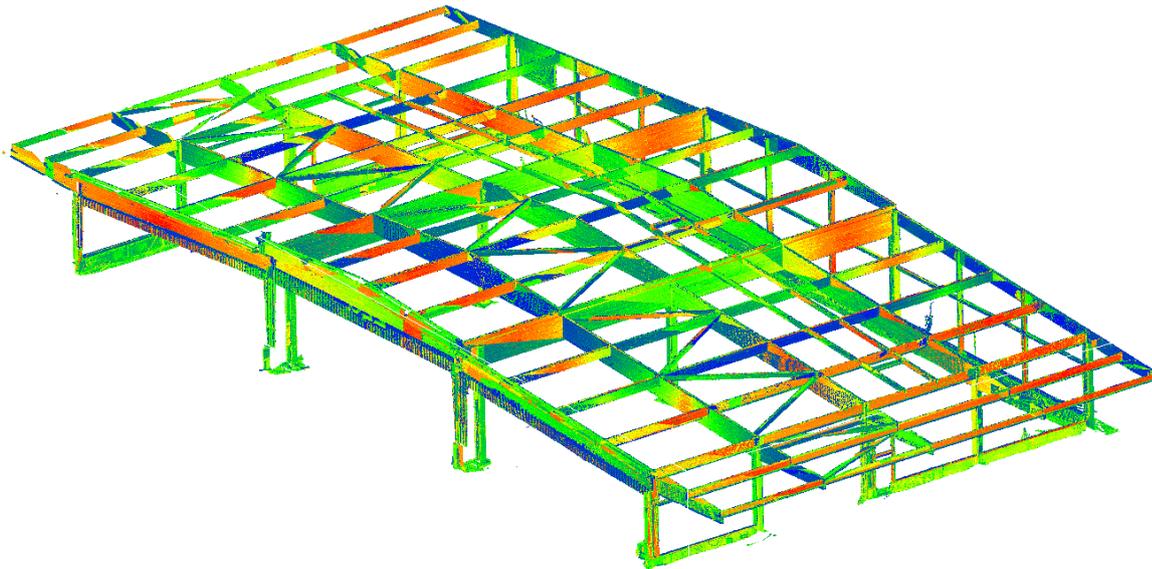
Die Messungen wurden mit einem Laserscanner Leica ScanStation P20 [30] des Instituts für Photogrammetrie in Kooperation mit ebendiesem durchgeführt. Es wurde eine Auflösung gewählt, bei der mit dem Laserscanner ein Punktraster mit 3,1 mm Abstand bei einer Entfernung zum Messobjekt von 10 m erzeugt wird. Pro Punkt wurden geräteintern 4 Messungen zur Ermittlung der Punktkoordinaten durchgeführt (Qualitätsstufe Q2).

In Abb. 3 ist ein typischer Aufbau des Laserscanners während einer Messung dargestellt. Bei einer Messung wurde die gesamte Konstruktion / Bauwerk ab Geländeoberkante vermessen, sodass das Messergebnis eine Punktwolke des gesamten Gebäudes war (siehe Abb. 4). Einzelne Bauteile konnten im Nachgang herausgefiltert werden. Im Sinne der Messgenauigkeit, und um ein dichtes Punktmuster zu erhalten, wurde festgelegt, dass der Abstand zu den Messobjekten nicht größer als ca. 20 m sein sollte (siehe Kapitel 4.2). Dies und der Umstand, dass für z.B. Dachbinder beide Bauteilseiten vermessen werden sollten, bedeutete, dass pro Gebäude Messungen an verschiedenen Standorten, die nachher zu einer Gesamtpunktwolke gekoppelt wurden, durchgeführt wurden. In der Regel wurden deshalb in Gebäudelängsrichtung bzw. quer zu den Dachbindern Messstandorte in 20 m Abständen gewählt (Abb. 5).

Aufgrund des hohen Einflusses der Montage, der aktuellen Belastungen und der Belastungsgeschichte / Langzeitverhalten war ein entscheidender Punkt zudem die Wahl des Zeitpunktes der Messungen.

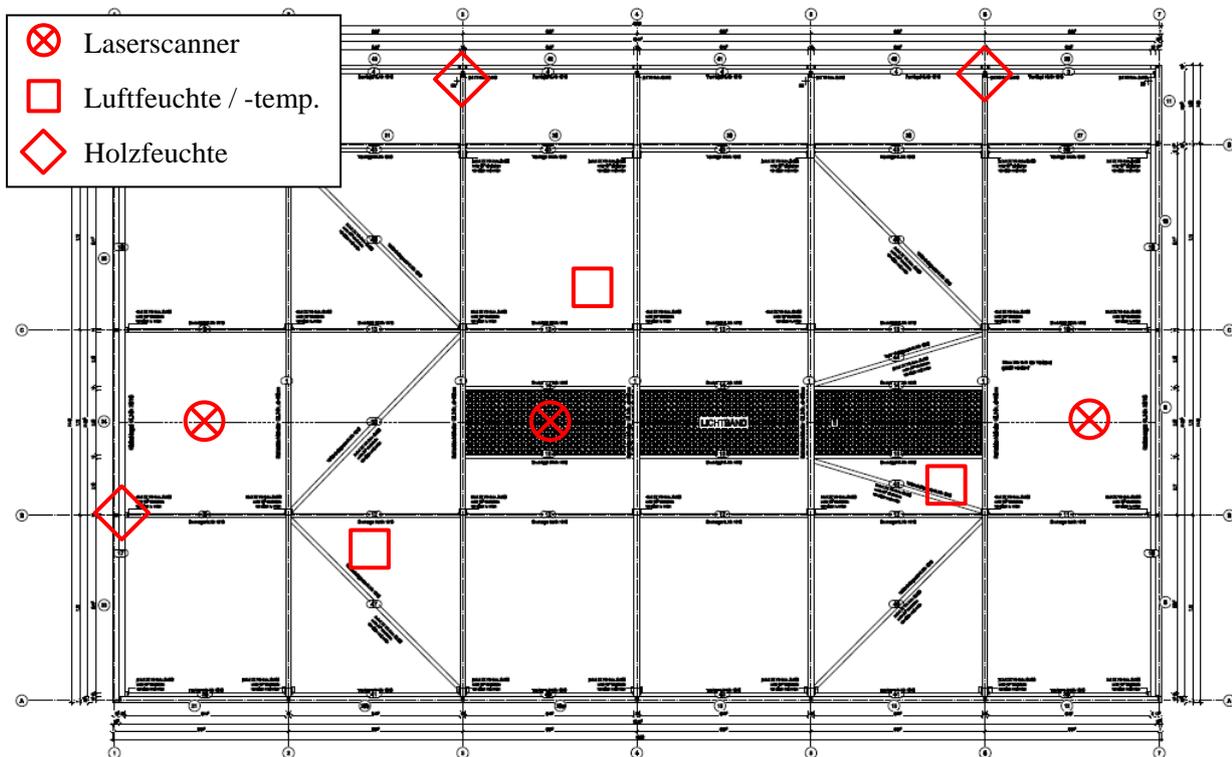


Abb. 3: Aufbau Laserscanner, Bauvorhaben 2020-KW34.



**Abb. 4:** Gesamte Punktwolke des Bauvorhabens 2020-KW34 (die Farben stellen die Intensität des Messsignals dar und haben keine weitere Bedeutung).

Da die Einflüsse der Belastung und der Belastungsgeschichte nach DIN EN 1995-1-1 [11], [12] rechnerisch getrennt von den Imperfektionen berücksichtigt werden können, wurde festgelegt, die Messungen direkt nach Montage und Ausrichten des Tragwerks, idealerweise vor dem Aufbringen von Dach- und Wandverkleidungen, durchzuführen (siehe Abb. 3). Die Holzbauteile wurden somit im quasi un-



**Abb. 5:** Dachgrundriss Bauvorhaben 2020-KW49 mit Messstandorten Laserscanner, Luftfeuchte und -temperatur und Holzfeuchte.



belasteten Zustand (ausgenommen Eigengewicht) vermessen. Aufgrund des Bauablaufs war es bei einigen Gebäuden erst möglich, diese nach Montage der Dachhaut zu vermessen. Dies wurde bei den jeweiligen Messdaten zusammen mit der Höhe der geschätzten ständigen Einwirkungen vermerkt.

Der Einfluss von Windeinwirkungen wurde vernachlässigt, da der geschätzte Beaufortgrad der Windgeschwindigkeit bei Durchführung der Messungen stets  $\leq 5$  (frische Brise) war und die Bauteile bei noch nicht montierter Wandverkleidung eine geringe Windangriffsfläche boten.

Die gemessenen geometrischen Imperfektionen beinhalten somit insbesondere Einflüsse aus Montage, Transport und Fertigung. Nicht oder nur zu einem vernachlässigbar geringen Anteil in den Messergebnissen beinhaltet sind Einflüsse aus der Belastung und dem Langzeitverhalten. Abhängig vom Anschlusstyp der Druckpfetten und der Verbände einer Dachkonstruktion kann zudem bei der ersten wesentlichen Belastung der Dachkonstruktion ein gewisser Schlupf innerhalb der Anschlüsse auftreten (z.B. infolge des Lochspiels von Stabdübelverbindungen).

Der Ablauf der Messungen war in der Regel wie folgt:

1. Festlegung des Messzeitpunktes in Absprache mit dem Bauleiter bei Berücksichtigung der Wetterbedingungen und Anfahrt.
2. Baustellenbegehung, Festlegung der Messstandorte und Aufbau des Laserscanners am 1. Messstandort sowie Platzieren der Referenzmarken (Targets) zum Verknüpfen der Messstandorte.
3. Einmessen der Referenzmarken (Targets).
4. Übersichtsscan der gesamten Umgebung und genauer Scan eines ausgewählten Teils des Gebäudes.
5. Umsetzen des Laserscanners zum nächsten Messstandort (weiter siehe 3.) oder Abbau.

Pro Messstandort ergab sich eine Messdauer von ca. 15 bis 30 min, sodass die Vermessung eines Gebäudes in Abhängigkeit der Anzahl der Messstandorte insgesamt ca. 1,0 bis 4,0 h in Anspruch nahm. Das Messverfahren hat sich im Laufe der Messungen als sehr zuverlässig und robust erwiesen. Schwierigkeiten traten nur bei der Vermessung eines Gebäudes aufgrund eines Sicherungsnetzes unterhalb der Dachkonstruktion (Maschenweite ca. 10 cm), das eine Streuung des Laserstrahls bewirkte, auf. In der Auswertung konnten diese Streupunkte herausgefiltert werden. Es wurden ab dem Zeitpunkt jedoch nur noch Gebäude, deren Konstruktionen nicht eingenetzt waren, vermessen. Niederschlag kann ebenfalls zu einer Streuung des Laserstrahls führen und wurde vermieden.

Zusätzlich zur Geometrie des Bauwerks wurden die Lufttemperatur und -feuchte an mindestens 3 Standorten im Gebäude in ca. 1,0 m über OK Boden und, wenn möglich, die Holzfeuchte an mindestens 3 Bauteilen mit einem Trotec T2000 Multifunktionsmessgerät bestimmt (siehe Abb. 5). Die Holzfeuchte wurde pro Bauteil an 3 Stellen in einer Tiefe von ca. 2,5 cm gemessen und das arithmetische Mittel je Bauteil gebildet.

Zusätzlich zu den Messwerten wurden je Bauvorhaben zudem Informationen zu Gesamttragwerk, Material, Herstellung, Transport, Montageablauf, Bewitterung, Oberflächenqualität und eventuelle Schädigungen der Holzbauteile gesammelt, um eventuelle Einflüsse auf die gemessenen geometrischen Imperfektionen feststellen zu können.



## 4.2. Messfehler

Folgende Angaben zur Messgenauigkeit / Gerätefehlern werden zum Laserscanner in [30] angegeben:

- z-Achsen-Fehler / verbleibender Fehler in der Horizontierung / dual-axis compensator:

Genauigkeit 1,5“ [30] (Bogensekunden)  $\triangleq 7,2 \times 10^{-6}$  rad

Bei einer Trägerhöhe von 1000 mm entspricht dies einer maximalen Differenz der y-Koordinaten über die Trägerhöhe aufgrund des z-Achsen-Fehlers von 0,0072 mm. Dieser je Messstandort systematische Fehler entspricht bei Querschnittsabmessungen von 1000 x 180 mm<sup>2</sup> nur ca. 0,28 % des 95 % Quantilwerts der gemessenen Vortordierung der Träger an Auflagern mit hohen Toleranzen ( $e_9 = 0,01$ , siehe Kapitel 8) und kann somit vernachlässigt werden.

- Positionsgenauigkeit / 3d position accuracy - misst den Winkel eines Signals:

3 mm auf 50 m bzw. 6 mm auf 100 m [30]

Durch die Ausführung mehrerer Messungen je Punkt und des Mitteln der Ergebnisse während der Messung kann die Genauigkeit des Wertes intern im Laserscanner deutlich erhöht werden. Bei Abwägung von Messaufwand und Messgenauigkeit wurde die Qualitätsstufe Q2 festgelegt, die ein Mitteln über 4 Messungen je Punkt zur Folge hatte. Auf den Einfluss solcher zufallsbedingten Messfehler wird nachfolgend im Detail eingegangen.

- Entfernungungenauigkeiten / range noise - misst die Laufzeit eines Signals:

Die Genauigkeit ist abhängig von der Reflexion / Farbe der Oberfläche und hat bei einer Entfernung von 25 m eine Standardabweichung von 0,5 bis 1,0 mm [30].

Ein Gerätefehler von ca. 1 mm je Punktcoordinate entspricht ungefähr der Standardabweichung der y-Koordinaten  $\sigma(y)$ , die in eigenen Messungen mit maximal  $\sigma(y) = 1$  mm bei ca. 15 m Abstand des Laserscanners zum vermessenen Bauteil festgestellt werden konnte.

Nennenswerte Fehler bei der Handhabung des Messgeräts z.B. infolge der Lichtverhältnisse oder Ungenauigkeiten beim Ablesen konnten aufgrund der automatisierten Aufnahme und Verarbeitung der Messdaten ausgeschlossen werden.

Fehler an den Messobjekten können in Fehler, die dokumentiert und ausgewertet werden, und Fehler, die unberücksichtigt bleiben, unterteilt werden. Unberücksichtigt blieben insbesondere lokale Oberflächenfehler kleiner als 10 x 10 cm<sup>2</sup> an der Bauteiloberfläche. Größere Fehler wie abweichende Querschnittsabmessungen, größere Fehlstellen an Trägern, Verkrümmungen von Querschnitten über die Höhe, Ververformungen über die Bauteillänge, u. ä. wurden dokumentiert und in Bezug auf ihren Einfluss auf die Lage des Querschnittsmittelpunktes (Vorkrümmung) und die Vortordierung ausgewertet.

Relevant in Bezug auf Messfehler sind somit ausschließlich die Gerätefehler. Diese können durch die in Kapitel 4.5 beschriebene Auswertung und Mittelung über eine große Anzahl von Messpunkten auf ein unerhebliches Maß reduziert werden. Eine Abschätzung, über wie viele Messpunkte in einem Höhensegment (siehe Abb. 8) gemittelt werden musste, um bei Berücksichtigung des genannten Gerä-



tefehlers mit ausreichender Genauigkeit Mittelwerte von Punktkoordinaten abschätzen zu können, erfolgte nach Fischer [15]. Dafür wurden stichprobenartig die Koordinaten von 6 Höhensegmenten eines Trägers der Testmessung (siehe Kapitel 4.3) ausgewertet. Die Standardabweichung der y-Koordinaten innerhalb eines Segments lag dabei bei  $\sigma(y) = 0,56$  bis  $1,09$  mm. In diesen Werten sind auch die Vortordierung und Unebenheiten der Holzoberfläche beinhaltet, womit nur ein Teil der Standardabweichung auf die Messungenauigkeit zurückzuführen ist. Auf der sicheren Seite wird nachfolgend die gesamte Standardabweichung der Messungenauigkeit zugeordnet. Es befanden sich bei dieser stichprobenartigen Kontrolle zwischen 742 und 1050 Punkte in einem Segment. Anhand der Standardabweichung  $\sigma(y)$  der y-Koordinaten wurde nach [15] die Differenz zwischen oberem und unterem Grenzwert des Erwartungswerts der y-Koordinaten bei einem Konfidenzniveau von 90% unter Annahme einer Normalverteilung für  $n = 200$  und  $n = 1000$  Messpunkte in einem Höhensegment ermittelt.

Es ergaben sich die folgende Werte:

$$n = 200: \quad \Delta = x_o - x_u = 0,13 \text{ bis } 0,26 \text{ mm (in Abhängigkeit von } s_{pk,y})$$

$$n = 1.000: \quad \Delta = x_o - x_u = 0,06 \text{ bis } 0,11 \text{ mm (siehe oben)}$$

Für einen 13,5 m spannenden Träger liegen die anzusetzenden Ersatzimperfektionen infolge Vorkrümmung nach EC5 [11] bei  $e_{y,EC5} = L/400 = 33,75$  mm. Bei dem stichprobenartig ausgewählten gemessenen Träger lag die maximale Vorkrümmung in Feldmitte bei ca.  $e_{y,SP} = 4,5$  mm. Die mit einem Konfidenzniveau von 90 % ermittelte maximale Abweichung  $\Delta$  infolge von Messfehlern für  $n = 1000$  entspricht demzufolge 2,4 % bzw. für  $n = 200$  5,8 % der maximalen Vorkrümmung  $e_{y,SP}$ . Da es sich um einen zufälligen Messfehler handelt, war es im Sinne der Messgenauigkeit ausreichend, wenn sich mehr als 200 Messpunkte in einem ausgewerteten Höhensegment befanden. Die Messgenauigkeit des Laserscanners für die beschriebene Anwendung war damit hoch genug.

### 4.3. Testmessung

Am 18.02.2020 wurde eine Testmessung an der Halle 4a der Materialprüfungsanstalt (MPA) Stuttgart durchgeführt.

Ziel der Messung war es, die Eignung des Messverfahrens zu erproben, verschiedene Konfigurationen des Messgerätes / Laserscanners zu testen und aus den Ergebnissen ein Messverfahren und eine Vorgehensweise zur Auswertung der Messdaten, insbesondere der Punktwolken, festzulegen.

Bei dem Gebäude handelt es sich um eine zweigeschossige offene Lagerhalle (NKL 2), Baujahr 1958. Das Erdgeschoss ist in Massivbauweise ausgeführt und Brettschichtholz Satteldachträgern mit gekrümmtem Untergurt auf Stahlbetonkragstützen bilden das Obergeschoss. Die Aussteifung des Obergeschosses erfolgt über die Kragstützen (siehe Abb. 6). Die Satteldachträger haben eine Spannweite von ca. 13,5 m, Breite von 0,18 m und Höhe am First von 1,0 m.

Es wurden 4 Messungen mit einem Laserscanner an 3 Standorten im Obergeschoss und einem außerhalb des Gebäudes durchgeführt. Je Standort wurden dabei Laserscans in verschiedenen Qualitätsstufen durchgeführt. In der Auswertung hat es sich gezeigt, dass mit Qualitätsstufe Q2 [30] eine ausreichende Messgenauigkeit bei kurzer Messzeit (ca. 6 min) erreicht werden kann (siehe Kapitel 4.2). Anhand der Messergebnisse konnte zudem der Messablauf (Kapitel 4.1) festgelegt, der Einfluss von Messfehlern (Kapitel 4.2) abgeschätzt und die Vorgehensweise bei der Auswertung der Punktwolken (Kapitel 4.5) entwickelt werden.

Die Messergebnisse sind im Anhang dargestellt, werden allerdings aufgrund des vorhandenen signifikanten Langzeiteinflusses (über 60 Jahre) nicht in der Auswertung berücksichtigt.



Abb. 6: Testmessung Halle 4a an der MPA Stuttgart.



#### 4.4. Stichprobenauswahl

Es wurden 23 Gebäude mit 202 BSH Bindern, 38 Buchen FSH Bindern und 57 Buchen FSH Stützen vermessen und ausgewertet (2021-KW33\_1.1 + 2 war eine mehrschiffige Halle). Auf zwei Messungen in Gebäuden mit Buchen FSH Bauteilen in der Schweiz musste aufgrund der Pandemie verzichtet werden. Da Vollholz als Material bei imperfektionsempfindlichen Stützen in Rücksprache mit ausführenden Firmen nur eine untergeordnete Rolle und bei biegedrillknickgefährdeten Trägern aufgrund der Querschnittsabmessungen so gut wie keine Rolle spielt, wurde dies in den Untersuchungen vernachlässigt. Bei den meisten Gebäuden handelte es sich um eingeschossige Hallen (ausgenommen 2021-KW12, 2021-KW22 und 2021-KW25).

In Tab. 1 sind die vermessenen Gebäude und deren wesentlichen Kennwerte in Bezug auf die Stichprobenauswahl aufgeführt. Aus Datenschutzgründen erfolgt keine namentliche Nennung der Hersteller- und Montagebetriebe und die Bezeichnung der Gebäude erfolgt nach dem Datum der Vermessung. Für einige Gebäude wurden die Messdaten zur Auswertung in zwei Datensätze für Träger (T) und Stützen (s) unterteilt.

In Bezug auf die Repräsentativität der Stichprobe kann festgehalten werden, dass der baupraktisch übliche Bereich der Trägergeometrien (Trägerform, Querschnittsabmessung und Spannweiten) im Rahmen der Messungen abgedeckt wurde. Träger mit Querschnittsverhältnissen von  $H / B = 2$  bis 12 bei Spannweiten zwischen 6,9 und 43 m wurden vermessen. Bauteile mit Materialgüten GL 24h, GL 28c, GL 30c und GL75 konnten untersucht werden. Damit wurden die marktüblichen Materialgüten abgedeckt [38]. Da bei BSH der Abbindeprozess, der Transport und die Montage nicht von der Festigkeitsklasse beeinflusst werden, war kein Einfluss der Materialgüte von BSH auf die gemessenen geometrischen Imperfektionen zu erwarten.

Es wurden sowohl Träger vermessen, die während der Montage anhand eines Aussteifungssystems ausgerichtet werden konnten (Dachverbände), als auch Träger ohne ein solches Aussteifungssystem zur Ausrichtung (BSH Dachscheibe oder Trapezblech). Es wurden Gebäude einer möglichst großen Anzahl verschiedener Hersteller und Montagebetriebe gewählt.

Die in Tab. 1 dargestellte Datenbasis an Gebäuden für Imperfektionsmessungen deckt somit den baupraktischen Anwendungsbereich biegedrillknickgefährdeter Holzbinder ab.

**Tab. 1:** Vermessene Gebäude und Gebäudedaten.

Gebäude	Trägerform	Spannweite [m]	Breite / Höhe	Material	Aussteifungssystem	Bauort (Land, PLZ)
2020-KW23		14,5	5,1	GL 28c	Stahlverband	DE, 73278
2020-KW27		29,6	12,2	GL 24h	Holzverband	DE, 84359
2020-KW32		23,6	9,0	GL 28c	Holzverband	DE, 74595
2020-KW33		17,9	8,8	GL 28c	Stahlverband	DE, 84577
2020-KW34		13,1 - 17,5	6,5 - 12,6	GL 24h	Holzverband + Kragstützen	DE, 89616
2020-KW38_1.1		17,4	5,0	GL 28c	BSH Dachscheibe	DE, 68199
2020-KW38_1.2		9,9	3,6	GL 24h	BSH Dachscheibe	DE, 68199
2020-KW38_1.3		10,0	3,8	GL 24h	BSH Dachscheibe	DE, 68199
2020-KW38_1.4		6,9	2,9 + 4,8	GL 24h	BSH Dachscheibe	DE, 68199
2020-KW38_2		42,4	10,6	GL 28c	Holzverband	DE, 86199
2020-KW45_1.1		23,5	9,2	GL 28c	Stahlverband	DE, 67112
2020-KW45_1.2		26,5	9,3	GL 28c	Stahlverband	DE, 67112
2020-KW49		20,8	6,8	GL 24h	Holzverband	DE, 91320
2021-KW12		15,5	4,0	GL75	BSH Dachscheibe	DE, 94094
2021-KW16		20,7	12,0	GL 28c	Stahlverband	DE, 88353
2021-KW22		16,3	8,0	GL75	BSH Dachscheibe	CH, 8041
2021-KW24		42,7	8,7	GL 28c/30c	Holzverband	DE, 82140
2021-KW25_T		11,5	2,0	GL75	BSH Dachscheibe	CH, 8400
2021-KW25_S	Stützen	3,1 – 3,8	1,0 + 1,5	GL75	-	CH, 8400
2021-KW30_1		24,8	6,7	GL 30c	Holzverband	DE, 23879
2021-KW30_2		24,8	8,7	GL 30c	Trapezblech	DE, 23869
2021-KW30_3		24,8	7,8	GL 30c	Holzverband	DE, 21147
2021-KW33_1.1		25,4	7,6	GL 28c	Stahlverband	DE, 72297
2021-KW33_1.2		28,4	7,8	GL 28c	Stahlverband	DE, 72297
2022-KW15_T		16,6	5,5	GL75	BSH Dachscheibe	DE, 70192
2022-KW15_S	Stützen	2,8	1,5	GL75	-	DE, 70192

## 4.5. Auswertung der Punktwolken

### 4.5.1. Träger

Die Auswertung der mit dem Laserscanner generierten Punktwolken (siehe Abb. 4) erfolgte automatisiert mit Matlab [33]. Matlab kann „.pcd“ Punktwolken-Dateien verarbeiten, die mittels der Software CloudCompare aus den .las Punktwolken-Dateien des Laserscanners generiert werden können. Vor der Auswertung in Matlab war zur grafischen Darstellung und Reduzierung der Rechenzeit in Matlab eine Verringerung der Dateigröße (< 3 GB) der Punktwolken in CloudCompare zweckmäßig (Ausschneiden einzelner Bauteile z.B. Träger zur weiteren Auswertung).<sup>1</sup>

In Abb. 7 ist beispielhaft die Punktwolke eines Trägers der Messung an der MPA Stuttgart Halle 4a samt umgebendem Dach in CloudCompare dargestellt, wie sie zur automatischen Auswertung in Matlab eingelesen werden konnte. Die Auswertung der Punktwolke erfolgte automatisiert in folgenden Schritten mit einem Matlab Skript, das im Rahmen dieses Projektes entwickelt wurde:

1. Ausrichtung der x-Achse entlang der Trägerlängsachse,
2. Entfernen der Punkte der Stützen,
3. Separieren der Punkte der Trägerunterkante (UK),
4. Entfernen der Punkte von Bauteilen, die seitlich überstehen (z.B. Pfetten, Verbände, Dach, ...),
5. Bestimmung des Höhenverlaufs / z-Koordinate der Trägeroberkante, -unterkante, -mittellinie,
6. Segmentieren der Punktwolke eines Trägers in x-Richtung in  $j = 101$  Segmente (Abb. 8),
7. Unterteilen der Punktwolken der Segmente in z-Richtung in  $k = 10$  Höhensegmente (Abb. 8),
8. Berechnung der mittleren Koordinaten der Höhensegments je Trägerseite (links - rechts, Abb. 9, Abb. 10),
9. Berechnung der Koordinaten der Trägermitte durch Mittelung der mittleren Koordinaten je eines Höhensegments der rechten und linken Trägerseite aus 8. (Abb. 10),

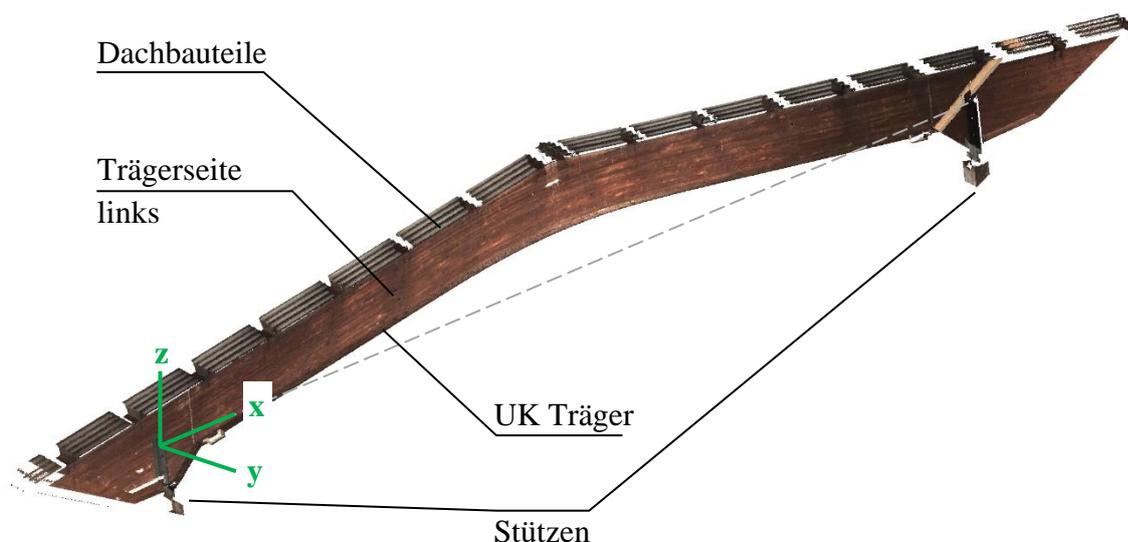
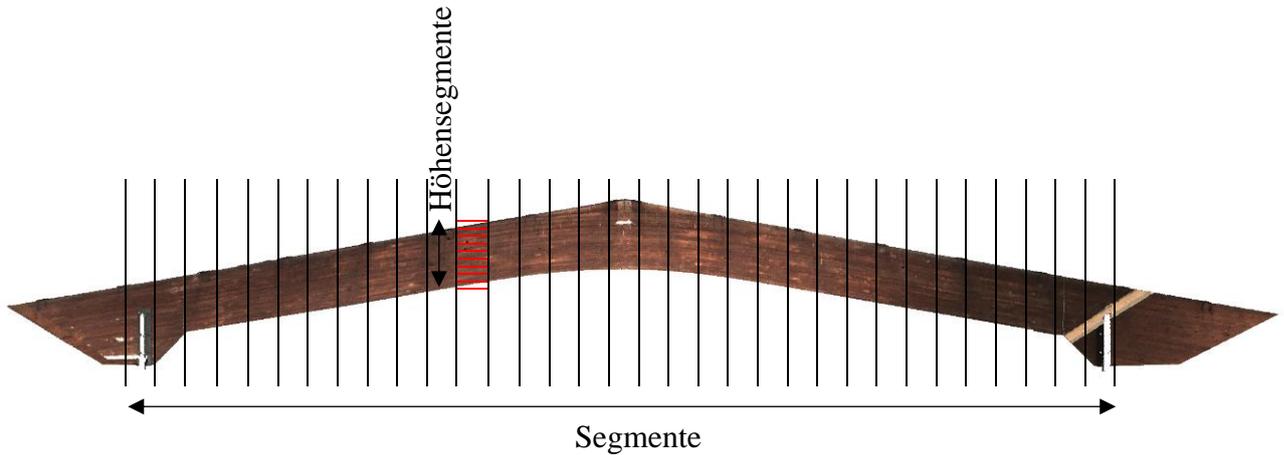


Abb. 7: MPA Stuttgart Halle 4a, eingefärbte Punktwolke Träger Achse 2 inkl. angrenzende Bauteile.



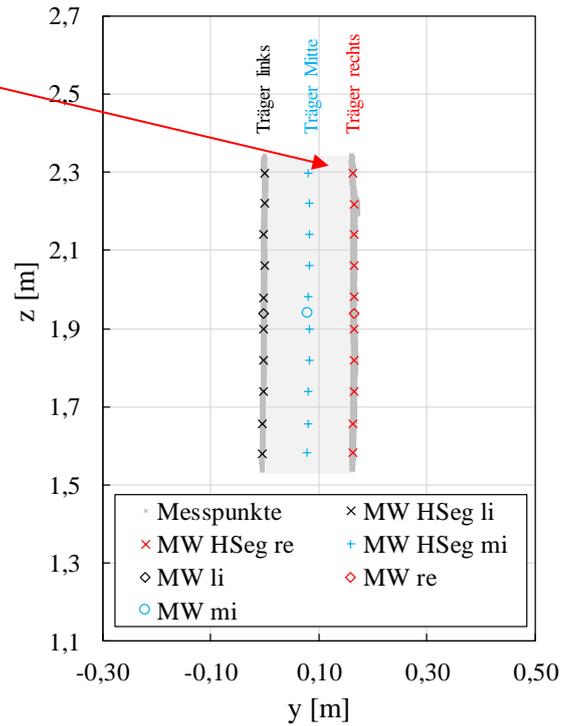
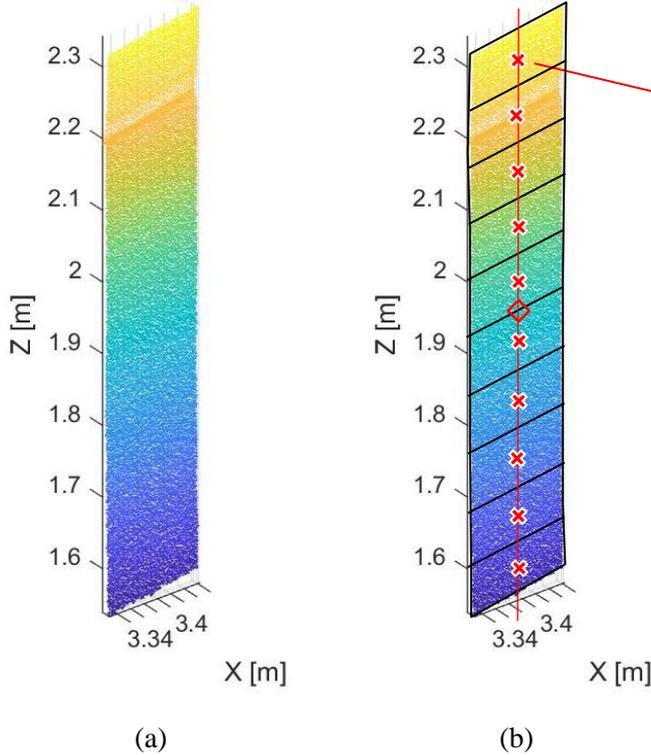
**Abb. 8:** Beispielhafte Unterteilung eines Trägers in Segmente und Höhensegmente.

10. Bestimmung der Ausgleichsgeraden (Methode der kleinsten Fehlerquadrate) der mittleren Koordinaten der Höhensegmente jedes Segments je Trägerseite und der Trägermitte (Abb. 9),
11. Berechnung der Koordinaten der Trägermittellinie (Vorkrümmung) und Verdrehung um die  $x$ -Achse (Vortordierung) je Trägerseite und der Trägermitte durch Auswerten der Ausgleichsgeraden auf halber Trägerhöhe (Abb. 9, Abb. 10),
12. Finales Ausrichten der Trägerlängsachse entlang der  $x$ -Achse anhand der gemessenen / extrapolierten  $y$ -Koordinaten der Auflagerpunkte des statischen Systems des Trägers.

Als Auflagerpunkte wurden stets die aus den Werkplänen ermittelten idealen Auflagerpunkte des statischen Systems angenommen. Es wurde jeweils der Träger zwischen zwei Auflagerpunkten ausgewertet und Kragarme vernachlässigt. Bei mehrfeldrigen Trägern wurden die Punktwolken der einzelnen Felder getrennt ausgewertet.

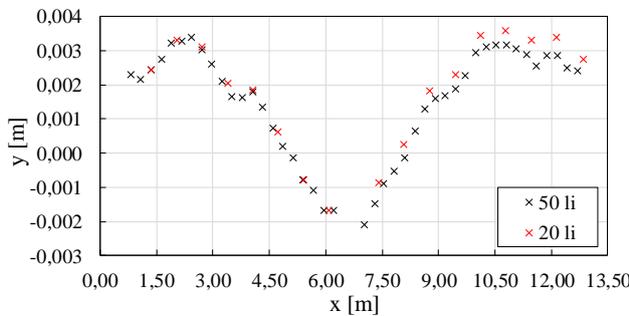
In Abb. 8 ist eine beispielhafte Unterteilung eines Trägers in Segmente und Höhensegmente dargestellt. Bei der Unterteilung des Trägers in Höhenrichtung /  $z$ -Richtung hat sich eine Anzahl der Höhensegmente von 10 als sinnvoll erwiesen, da so genug Informationen über die Trägerhöhe bei einer gleichzeitig ausreichenden Anzahl von Punkten in einem Höhensegment zur Bildung hinreichend genauer Mittelwerte der Punktkoordinaten vorhanden waren. Bei der Unterteilung der Träger in Längenrichtung /  $x$ -Richtung wurden zur Bestimmung der optimalen Segmentanzahl die Ergebnisse der  $y$ -Koordinaten bei Segmentzahlen 20, 50, 100, 150, 200 verglichen. In Abb. 11 sind die  $y$ -Koordinaten der Mittellinie (Vorkrümmung) der linken Seite eines Trägers für unterschiedliche Segmentanzahlen dargestellt. Systematische Abweichungen bei unterschiedlichen Segmentanzahlen sind auf eine unterschiedliche Ausrichtung der  $x$ -Achse zurückzuführen. Bei einer Verfeinerung der Segmentierung von 20 bis 100 Segmenten ist jeweils ein Zugewinn an Informationen zu erkennen. Ab 100 Segmenten werden die  $y$ -Koordinaten nahezu kontinuierlich über die Trägerlänge erfasst. Die Ergebnisse bei 100, 150, 200 Segmenten sind nahezu identisch. Zur Reduktion des Rechenaufwandes bei der Auswertung und der FE-Modellierung (bei der 100 Elemente mit 101 Knoten eine sinnvolle Vernetzung über die Trägerlänge darstellen), wurde deshalb eine Unterteilung der Punktwolke eines Trägers in 101 Segmente über die Länge gewählt.

Punktwolke Seg26- rechts    Punktwolke Seg26- rechts

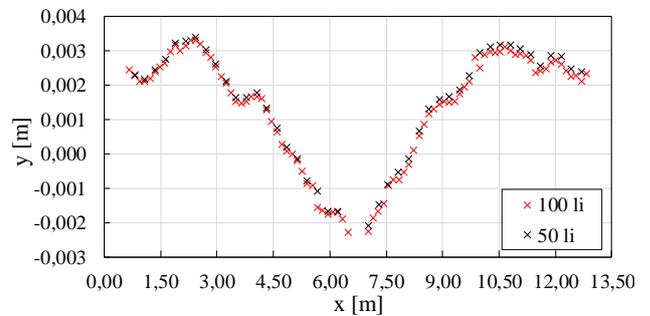


**Abb. 9:** Punktwolke eines Segments (a) mit (b) Markierung der Höhensegmente, mittleren Koordinaten (x = MW HSeg re), Ausgleichsgeraden und des Mittelwerts (◇ = MW re).

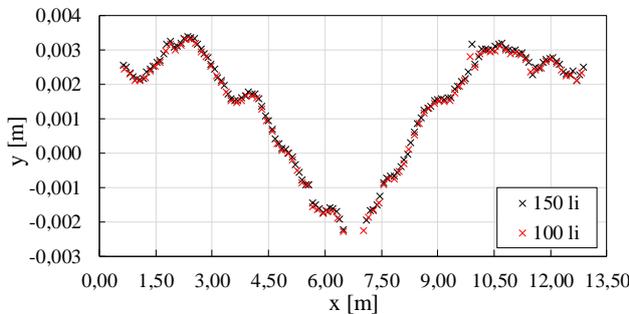
**Abb. 10:** Ergebnisse Auswertung Oberflächenpunkte eines Segments am Querschnitt.



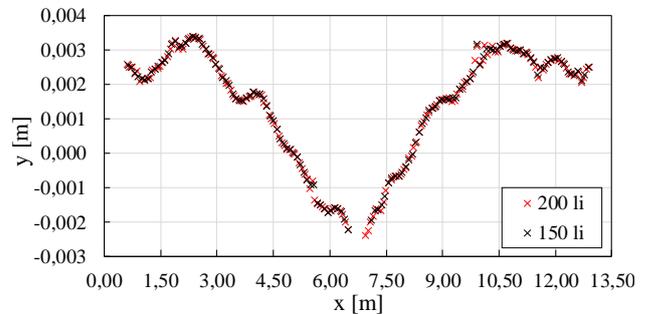
(a) Vergleich 20 und 50 Segmente



(b) Vergleich 50 und 100 Segmente



(c) Vergleich 100 und 150 Segmente



(d) Vergleich 150 und 200 Segmente

**Abb. 11:** Vorkrümmungen eines Trägers in Richtung der y-Achse über die Länge (x-Achse) bzw. überhöhte Draufsicht.



Innerhalb der Auswertung der Punktwolken wurden verschiedene Annahmen getroffen und Methoden verwendet, die, wie es in der Datenauswertung oft unvermeidlich ist, in geringem Ausmaß die extrahierten Ergebnisse beeinflussen. Die wesentlichen Annahmen sind:

- Aufgrund von Verdeckungen der Sicht (z.B. durch angrenzende Bauteile, der Trägeroberseite generell, durch Auflagertaschen, ...) konnten nicht auf der gesamten Bauteiloberfläche des vermessenen Bauteils Oberflächenpunkte gemessen werden. Nicht messbare Vorverformungen wurden anhand der gemessenen Geometrien linear inter- und extrapoliert.
- Wahl der Segmentierung, Mittelwertbildung und Bestimmung der Ausgleichsgeraden wie vorab beschrieben.
- Die Filterung der Punktwolken, insbesondere das Entfernen der Punkte von Bauteilen, die seitlich überstanden, geschah auf Grundlage eines 10 x 10 cm Rasters. Dies bewirkte, dass, sofern ein Punkt in einem Raster gewisse Kriterien nicht erfüllte, keiner der Punkte in dem Raster zur Auswertung herangezogen wurden. Diese Filtermethode hat sich als sehr robust erwiesen.
- Die Trägermitte in z-Richtung wurde anhand der Träger UK und der näherungsweise bestimmten Träger OK ermittelt.

Der Einfluss dieser Annahmen und Methoden in Bezug auf eine mögliche Verzerrung der extrahierten Ergebnisse wird als vernachlässigbar angesehen, da es sich um zufällige Fehler von geringerer Größenordnung als die Messfehler (siehe Kapitel 4.2) handelt.

Die Ergebnisse der Messdatenauswertung sind die Maximalwerte und Verläufe der geometrischen Imperfektionen Vorkrümmung und Vortordierung jedes Trägers (siehe z.B. Abb. 11), die auch vollständig im Anhang dargestellt sind. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse wird in Kapitel 4.6 gegeben. In der weiteren Auswertung wurden die geometrischen Ersatzimperfektionen mit dem in Kapitel 5 beschriebenen FE-Modell berechnet.

### 4.5.2. Stützen

Die Auswertung der geometrischen Imperfektionen der vermessenen FSH Stützen erfolgte analog zu den Trägern (siehe Kapitel 4.5.1) mit den nachfolgend beschriebenen Abweichungen.

Die Schiefstellungen  $e_\phi$  wurden anhand der Mittelwerte der Koordinaten des obersten und des untersten Stützensegments bestimmt (Abb. 12 (a) und (b)). Je Stütze wurden die Schiefstellung in x- und y-Richtung ( $e_{\phi,y}$  und  $e_{\phi,z}$ ) ausgewertet.

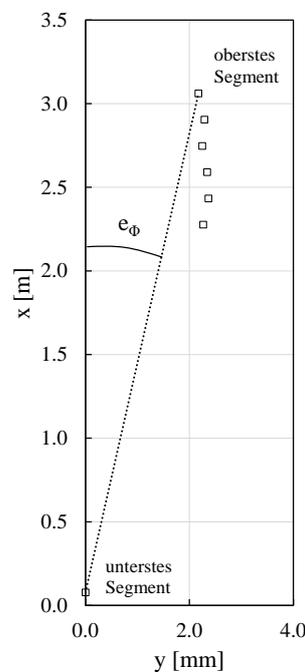
Zur Ermittlung der Vorkrümmungen wurden zuerst die Schiefstellungen  $e_{\phi,y}$  und  $e_{\phi,z}$  aus den Mittelwerte der Koordinaten herausgerechnet (Koordinatentransformation Rotation um  $e_{\phi,y}$  und  $e_{\phi,z}$  veranschaulicht durch Abb. 12 (b) zu Abb. 12 (c)). Mit der Methode der kleinsten Quadrate wurde die Regressionsparabel der Mittelwerte der horizontalen Koordinaten aller Stützensegmente mit Nullpunkten an Stützenkopf und -fuß bestimmt (Abb. 12 (c)). Die Vorkrümmung  $e_{y/z}$  ist die Amplitude der Parabel. Je Stütze wurden die Vorkrümmungen getrennt in y- und z-Richtung ( $e_y$  und  $e_z$ ) ausgewertet (siehe Anhang). Zur Vereinfachung wurde mit Hilfe einer Schnittgrößenberechnung nach Theorie II. Ordnung die Ersatzvorkrümmung  $e_{y,Ersa}$  berechnet, die die Effekte beider Verkrümmungen  $e_y$  und  $e_z$  beinhaltet (siehe Gl. (2)). Dafür wurde festgelegt, dass die Biegespannung aus  $e_y$  und  $e_z$  der Biegespannung aus  $e_{y,Ersa}$  entsprechen soll (siehe Gl. (1)). Ein Knicken um die schwache Achse wurde angenommen.

$$\frac{M_y}{W_y f_m} + \frac{M_z}{W_z f_m} = \frac{M_{y,Ersa}}{W_y f_m} \quad \text{mit } M_y = \frac{N_x e_y}{1-\alpha_{c,y}}, M_z = \frac{N_x e_z}{1-\alpha_{c,z}}, M_{y,Ersa} = \frac{N_x e_{y,Ersa}}{1-\alpha_{c,y}} \quad (1)$$

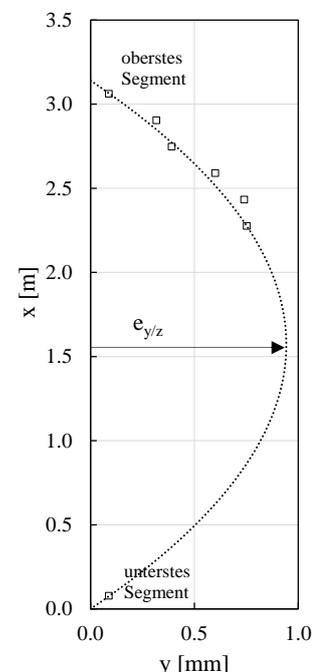
$$e_{y,Ersa} = e_y + e_z \frac{(1-\alpha_{c,y})W_y}{(1-\alpha_{c,z})W_z} \quad (2)$$



(a) Stützensegmente



(b) Schiefstellungen



(c) Vorkrümmungen

Abb. 12: Auswertung der Imperfektionen einer Stütze.

## 4.6. Ergebnisse und Auswertung

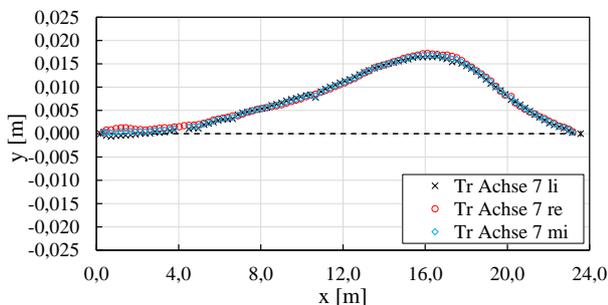
### 4.6.1. Allgemeines

Alle Messergebnisse und die relevanten Gebäude- und Bauteilinformationen sind im Anhang abgebildet. Nachfolgend werden die Ergebnisse der Auswertung der gemessenen geometrischen Imperfektionen (Kapitel 4.5) zusammengefasst und erläutert. Ein Teil der Ergebnisse wurde in [24] diskutiert.

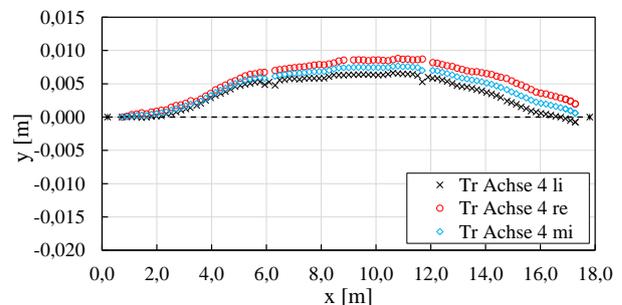
### 4.6.2. BSH und FSH Träger - Vorkrümmungen

In Abb. 13 sind die typischen Verläufe der aus den gemessenen horizontalen Vorkrümmungen  $e_y$  der Träger über die Trägerlängsachse ( $x$ -Achse) dargestellt. Die Vorkrümmungen auf der  $y$ -Achse werden dabei überhöht abgebildet. Die ideal geplante Stabachse mit den zwei Auflagern „ $x$ “ ist als gestrichelte Linie „-“ angegeben. Die Diagramme zeigen somit stets eine überhöhte Draufsicht auf die Trägermittellinie. Je Diagramm sind 3 Kurven dargestellt, zum einen die gemittelten  $y$ -Koordinaten der gemessenen Trägerseiten links und rechts (li und re) und zum anderen die daraus berechneten  $y$ -Koordinaten der Trägermittellinie (mi). An den (extrapolierten) Auflagerpunkte ist per Definition  $y = 0$ . In einem Gebäude wird für alle Träger ein Auflagerpunkt in derselben Gebäudelängsachse mit  $x = 0$  festgelegt, sodass die im Anhang hintereinander dargestellten Vorkrümmungen eines Gebäudes als eine Draufsicht auf das gesamte Gebäude interpretiert werden können.

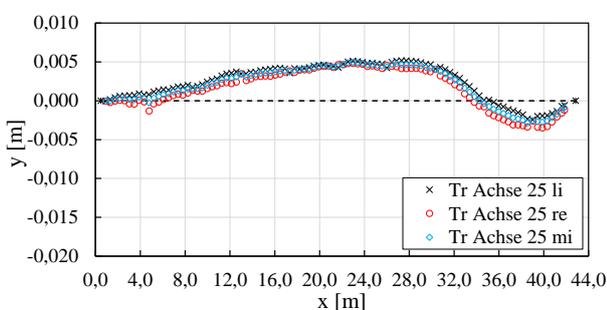
Anhand den in Abb. 13 dargestellten Messergebnissen können einige wesentliche Phänomene, die bei der Betrachtung der Vorkrümmungen auffällig sind, beschrieben werden.



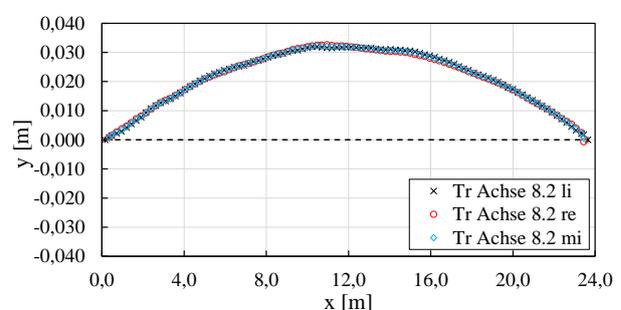
(a) Bauwerk 2020-KW32 - Träger Achse 7



(b) Bauwerk 2020-KW33 - Träger Achse 4



(c) Bauwerk 2020-KW38\_2 - Träger Achse 25

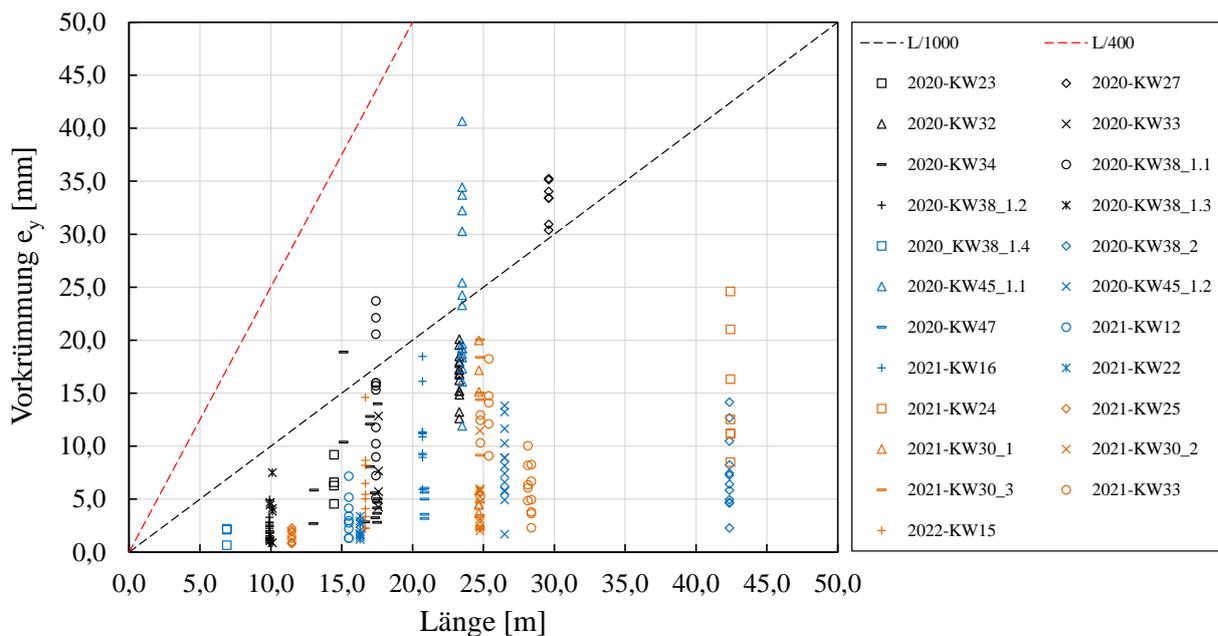


(d) Bauwerk 2020-KW45\_1.1 - Träger Achse 8.2

**Abb. 13:** Typische gemessene Vorkrümmungen von Bindern in Richtung der schwachen Achse bzw. überhöhte Draufsicht auf die Binder, mit  $x$  als Längsachse der Träger.

1. Die Form der Vorkrümmung entsprach in der Regel annähernd einer sinus- oder parabelförmigen Kurve (siehe Abb. 13 (b) und (d)). In einigen Fällen bildete sich eine Höckerform aus (siehe Abb. 13 (a)) und in wenigen Fällen konnte ein Durchschlagen bzw. eine Änderung des Vorzeichens der y-Koordinaten am Angriffspunkt einer Druckfette beobachtet werden (siehe Abb. 13 (c)). Die horizontalen Vorkrümmungen konnten in der Regel gut durch eine Sinus-Halbwellen abgebildet werden.
2. Über die Trägerlänge konnten gelegentlich Unstetigkeitsstellen / Ausreißer einzelner y-Koordinaten beobachtet werden, die z.B. auf lokale Fehlstellen oder angeschlossene Bauteile wie Pfetten zurückgeführt werden konnten. Solche Fehlstellen oder ähnliches bewirkten, dass nicht alle Höhensegmente (siehe Abb. 9) ausgewertet werden konnten, was einen geringfügigen Einfluss auf die Ausgleichsgerade und somit auf die abgeleiteten y-Koordinaten der Trägermittellinie hatte. Sofern Ausreißer der y-Koordinaten auf Fehlstellen oder ähnliches zurückgeführt werden konnten, wurden diese in der nachfolgenden Auswertung vernachlässigt.
3. Bei einigen Bauteilen konnte eine kontinuierliche Veränderung der Trägerbreite beobachtet werden (siehe Abb. 13 b)). So z.B. 9 mm bei Träger Achse 4 Bauvorhaben 2020-KW49.

In Abb. 14 sind die Maximalwerte der gemessenen horizontalen Vorkrümmungen  $e_y$  aller ausgewerteten BSH und FSH Binder, nach Bauwerken aufgeschlüsselt, dargestellt. Auf der x-Achse ist die Länge (Abstand der Auflagerpunkte des statischen Systems) und auf der y-Achse die Vorkrümmung  $e_y$  dargestellt. Jeder Datenpunkt stellt die maximal gemessene horizontale Vorkrümmung (nicht in Feldmitte, siehe Abb. 13) eines Binders eines Bauvorhabens dar. Zusätzlich ist der Rechenwert der Ersatzimperfektion nach DIN EN 1995-1-1 [11], [12],  $L/400$ , und der Werte  $L/1000$  eingezeichnet. Sämtliche gemessenen Vorkrümmungen  $e_y$  lagen unterhalb  $L/400$ . Der in DIN EN 1995-1-1 [11], [12] angenommene lineare Zusammenhang zwischen Vorkrümmung und Spannweite der Holzbauteile bestätigte sich durch die Messergebnisse. Eine maximale Vorkrümmung  $e_y$  von  $L/1000$  wurde von 18 der



**Abb. 14:** Maximal gemessene horizontale Vorkrümmungen  $e_y$  von 202 BSH und 38 FSH Bindern aufgeteilt nach Gebäuden, jeder Datenpunkt repräsentiert ein Bauteil.



240 ausgewerteten Träger überschritten. Diese Überschreitungen werden nachfolgend genauer betrachtet.

Beim Bauvorhaben 2020-KW27 lagen die gemessenen maximalen Vorkrümmungen zwischen  $L/839$  und  $L/974$  und somit alle über  $L/1000$ . Der Polier der Montagefirma beschrieb während Durchführung der Messungen gravierende Montageschwierigkeiten aufgrund der sehr geringen Toleranzen der verwendeten Schwalbenschwanz Stahlverbinder zwischen Druckpfetten und Bindern, bei gleichzeitig unregelmäßiger Binderseitenflächen infolge des Hobelns. Ein optimales Ausrichten des Dachtragwerks scheint infolgedessen nicht möglich gewesen zu sein.

Beim Bauvorhaben 2020-KW38\_1.1 wurden Binder, die durch eine BSH-Dachscheibe ausgesteift wurden, vermessen. Ein Ausrichten der Binder anhand von Dachverbänden während der Montage war somit nicht möglich. Es konnten somit per se größere Vorverformungen der Binder erwartet werden. Allerdings hatten die Binder mit einem Querschnittsverhältnis Höhe / Breite = 5,0 ein günstigeres Verhältnis von  $I_z$  zu  $I_y$  als die in den anderen Bauvorhaben vermessenen Trägern (siehe Tab. 1), was sich positiv auf den Vorkrümmung  $e_y$  ausgewirkt haben könnte. So überschritten die Vorkrümmungen von 3 der 12 über 17,4 m spannenden Binder des Bauvorhabens 2020-KW38\_1.1 den Werte  $L/1000$ . Insbesondere bei weit spannenden Bauteilen könnte somit die Möglichkeit des Ausrichtens bei der Montage einen entscheidenden Einfluss auf die horizontalen Vorkrümmungen zu haben.

Die Messwerte der Vorkrümmungen von anderen durch Scheiben ausgesteiften Bindern bestätigten diese Annahme erstaunlicherweise nicht. Insbesondere auch beim Bauvorhaben 2021-KW30\_2 (Binder mit Spannweite 24,8 m, die nur an einer Firstpfette ausgerichtet wurden) liegen die Vorkrümmungen mit  $e_y = L/1200$  bis  $L/11000$  unterhalb des Grenzwertes  $L/1000$ .

Beim Bauvorhaben 2020-KW45\_1.1 waren zwei Dachverbände innerhalb der vermessenen Dachkonstruktion vorhanden. Während an den umliegenden Bindern des Dachverbandes in Achse 5.2 und 5.3 mit  $e_y = L/1.197$  bis  $L/1.972$  maximale Vorkrümmungen kleiner als  $L/1000$  auftraten, lag bei dem Binder in Achse 8.3, der am Dachverband in Achse 8.2 und 8.3 angeschlossen war, die maximale horizontale Vorkrümmung bei  $L/578$ . Dieser Wert ist zwar günstiger als die für die Bemessung in DIN EN 1995-1-1 [11], [12] angegebene Ersatzimperfektion Vorkrümmung von  $L/400$ , allerdings deutlich ungünstiger als die Messergebnisse aller anderen Bauvorhaben. Es kann deshalb geschlussfolgert werden, dass dieser Dachverband nicht nach den üblichen Regeln der Praxis ausgerichtet wurde.

Obwohl anhand der Messergebnisse kein signifikanter Einfluss der Möglichkeit eines seitlichen Ausrichtens der Binder während der Montage festgestellt werden konnte, hat jedoch eine ungenügende Ausrichtung während der Montage einen wesentlichen Einfluss (Bauvorhaben 2020-KW27 und 2020-KW45\_1.1). Solche Ausreißer können durch entsprechende Kontrollen während der Montage verhindert werden. Da sämtliche gemessenen Vorkrümmungen  $e_y$  kleiner als die nach DIN EN 1995-1-1 [11], [12] angenommenen Ersatzimperfektion  $L/400$  waren, lag die Bemessungen auf der sicheren Seite.

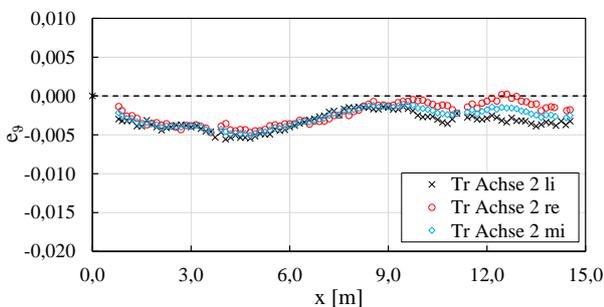
Die Ähnlichkeit der Vorkrümmungen von Trägern, die durch Druckpfetten gekoppelt sind (siehe Anhang), lässt darauf schließen, dass Vorkrümmungen maßgeblich durch die Ausrichtung des Dachverbandes während der Montage beeinflusst werden und die Toleranz der Länge von Pfetten und Druckriegeln sehr gering ist.

### 4.6.3. BSH und FSH Träger - Vortordierung

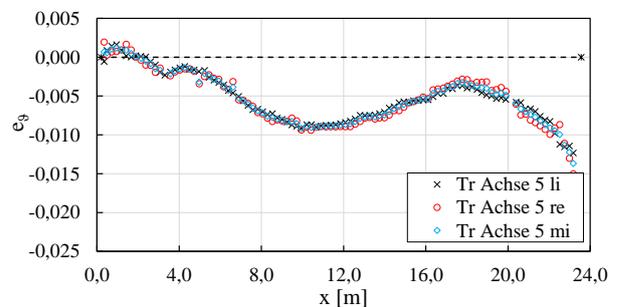
In Abb. 15 sind typische Verläufe der gemessenen Vortordierungen  $e_9$  der Träger um die x-Achse über die Trägerlängsachse (x-Achse) aufgetragen. Infolge der Vorzeichendefinition bedeutet eine positive Vortordierung  $e_9$  eine größere positive Vorverformung der Trägeroberkante in y-Richtung im Verhältnis zur Trägerunterkante. Bei gleichem Vorzeichen wirken  $e_y$  und  $e_9$  somit in die gleiche Richtung. Die ideale Stabachse mit den zwei Auflagern „x“ ist als gestrichelte Linie „-“ dargestellt. Je Diagramm sind 3 Kurven dargestellt, zum einen die gemittelten Vortordierungen  $e_9$  der gemessenen Trägerseiten rechts und links (li und re) und zum anderen die daraus berechneten Vortordierungen  $e_9$  der Trägermittellinie (mi). In einem Gebäude wird für alle Träger ein Auflagerpunkt in derselben Gebäudelängsachse mit  $x = 0$  festgelegt.

Anhand der in Abb. 15 dargestellten Messergebnisse können einige wesentliche Phänomene, die bei der Betrachtung der Vortordierungen auffällig sind, beschrieben werden.

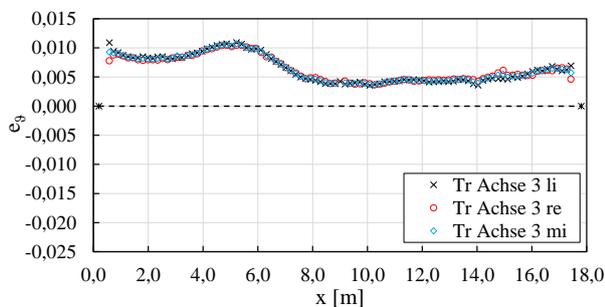
1. Die Form der Vortordierung über die Länge konnte keiner spezifischen Kurvenform zugeordnet werden.
2. Die maximalen Vortordierungen traten oft an den Auflagern auf. Insbesondere, wenn diese als Stahlbetonauflagertaschen ausgeführt wurden.
3. In einigen Fällen konnte eine annähernd parabelförmige Form beobachtet werden (Abb. 15 (a)), in der Regel lagen jedoch entweder an einem Auflager (Abb. 15 (b)), an beiden Auflagern (Abb. 15 (c)), oder an beiden Auflagern mit umgekehrten Vorzeichen (Abb. 15 (d)) relevante Vortordierungen vor. Nicht alle Träger konnten einem dieser Fälle zugeordnet werden.



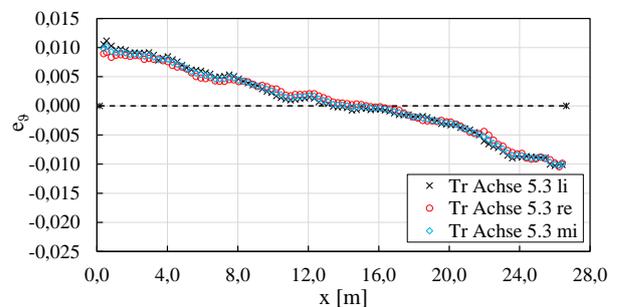
(a) Bauwerk 2020-KW23 - Träger Achse 2



(b) Bauwerk 2020-KW32 - Träger Achse 5



(c) Bauwerk 2020-KW33 - Träger Achse 3



(d) Bauwerk 2020-KW45\_1.2 - Träger Achse 5.3

**Abb. 15:** Typische gemessene Vortordierungen von Bindern um die x-Achse, mit x als Längsachse der Träger.

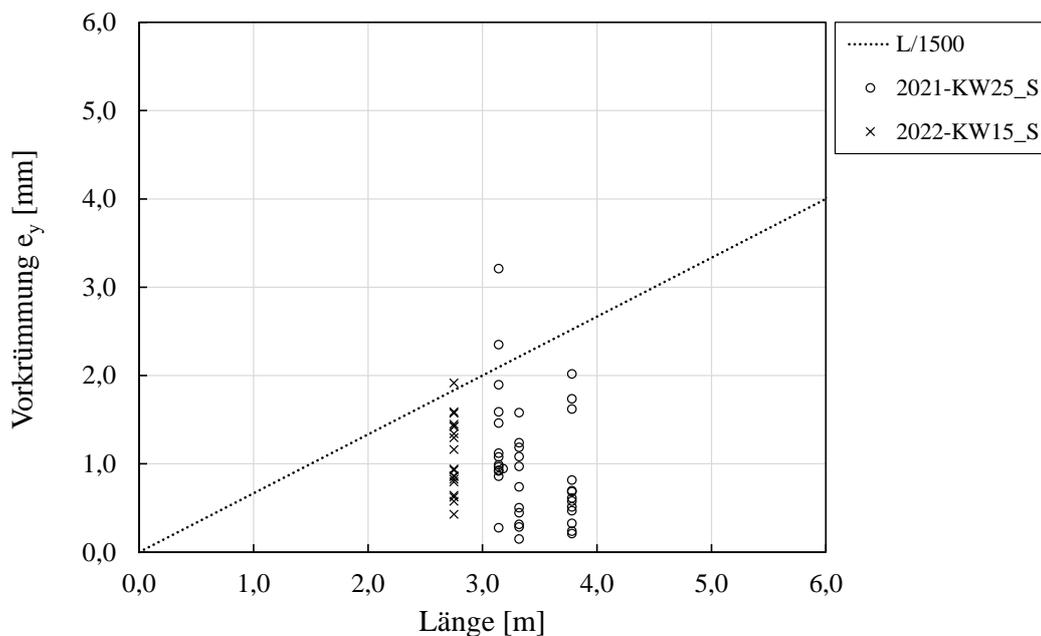
- Über die Trägerlänge konnten gelegentlich Unstetigkeitsstellen / Ausreißer einzelner  $e_y$  Werte beobachten werden, die z.B. auf lokale Fehlstellen oder angeschlossene Bauteile wie Pfetten zurückgeführt werden konnten. Diese Fehlstellen oder ähnliches bewirkten, dass nicht alle Höhensegmente (siehe Abb. 9) ausgewertet werden konnten, was einen geringfügigen Einfluss auf die Ausgleichsgerade und somit auch auf die Vortordierungen hatte. Sofern Ausreißer auf Fehlstellen oder ähnliches zurückgeführt werden konnten, wurden diese in der nachfolgenden Auswertung vernachlässigt.

Auch infolge des sehr heterogenen Bildes des Verlaufs der gemessenen Vortordierungen von BSH Bindern über die Länge (Abb. 15), wurden FE-Berechnungen zur Bestimmung der geometrischen Ersatzimperfektionen durchgeführt. Es wird an dieser Stelle nicht näher auf Maximalwerte der gemessenen Vortordierungen einzelner Träger eingegangen, da deren Aussagekraft gering ist. Es wird auf die ermittelten Ersatzimperfektionen in Kapitel 5.3.2 verwiesen.

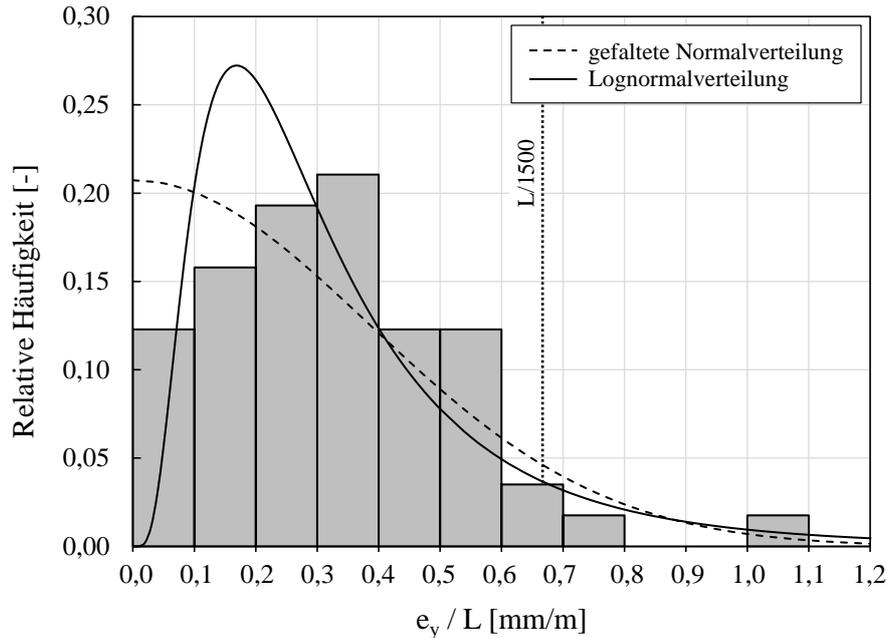
Da Vortordierungen von nebeneinander liegenden Trägern die durch Druckpfetten gekoppelt sind (siehe Anhang), nur geringe Ähnlichkeiten zeigen, kann gefolgert werden, dass Vortordierungen maßgeblich durch die Ausrichtung der einzelnen Träger an den Auflagern beeinflusst werden.

#### 4.6.4. FSH Stützen - Vorkrümmungen

In Abb. 16 sind die Maximalwerte der ermittelten horizontalen Vorkrümmungen  $e_{y,Ersa}$  (siehe Kapitel 4.5) aller ausgewerteten FSH GL75 Stützen, nach Bauwerken aufgeschlüsselt, dargestellt. Auf der x-Achse ist die Länge bzw. Höhe der Stütze (Abstand der Auflagerpunkte des statischen Systems) und auf der y-Achse die Vorkrümmung  $e_{y,Ersa}$  dargestellt. Jeder Datenpunkt stellt die ermittelte horizontale Vorkrümmung eines Bauteils eines Bauvorhabens dar. Zusätzlich ist der Wert  $L/1500$  eingezeichnet. Sämtliche ermittelten Vorkrümmungen  $e_{y,Ersa}$  lagen unterhalb  $L/400$ . Der in DIN EN 1995-1-1 [11],



**Abb. 16:** Maximal ermittelte horizontale Vorkrümmungen  $e_{y,Ersa}$  von 57 FSH GL75 Stützen aufgeteilt nach Gebäuden, jeder Datenpunkt repräsentiert ein Bauteil.



**Abb. 17:** Häufigkeitsverteilung der maximal ermittelten horizontale Vorkrümmungen  $e_{y,Erst} / L$  von 57 FSH GL75 Stützen.

[12] angenommene lineare Zusammenhang zwischen Vorkrümmung und Spannweite konnte aufgrund der geringen Variation der Länge nicht bestätigt werden, zeigte sich aber bei Hinzunahme der Werte der FSH Träger (siehe Kapitel 5.3.3). Eine maximale Vorkrümmung  $e_{y,Erst}$  von  $L/1000$  bzw.  $L/1500$  wurde von 1 bzw. 3 der 57 ausgewerteten Stützen überschritten.

In Abb. 17 ist die Häufigkeitsverteilung der ermittelten Vorkrümmungen  $e_{y,Erst} / L$  dargestellt. Weder eine gefaltete Normalverteilung, noch eine Lognormalverteilung stellen eine plausible Annäherung der Dichtefunktion dar. Für die Stichprobe ergeben sich folgende Werte:

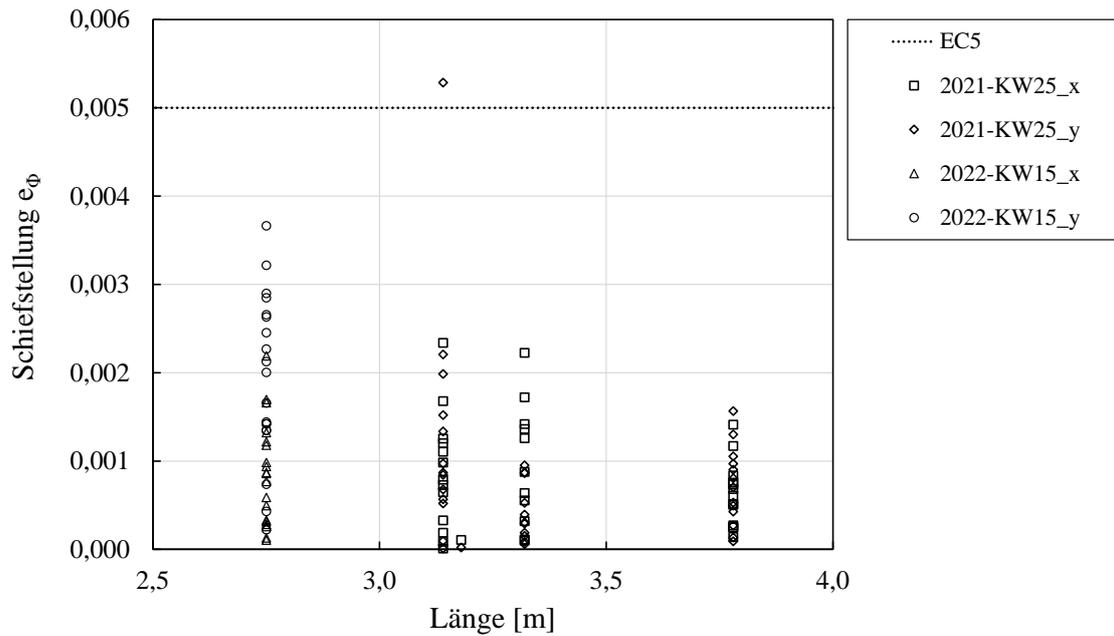
- Mittelwert  $\mu (e_y / L) = 0,329 \text{ mm/m} \cong 1 / 3040$
- Standardabweichung  $\sigma (e_y / L) = 0,194 \text{ mm/m} \cong 1 / 5160$
- 95 % Quantil  $e_{y,95} / L = 0,604 \text{ mm/m} \cong 1 / 1660$

Die Vorkrümmungen von Stützen sind im Wesentlichen produktionsbedingt.

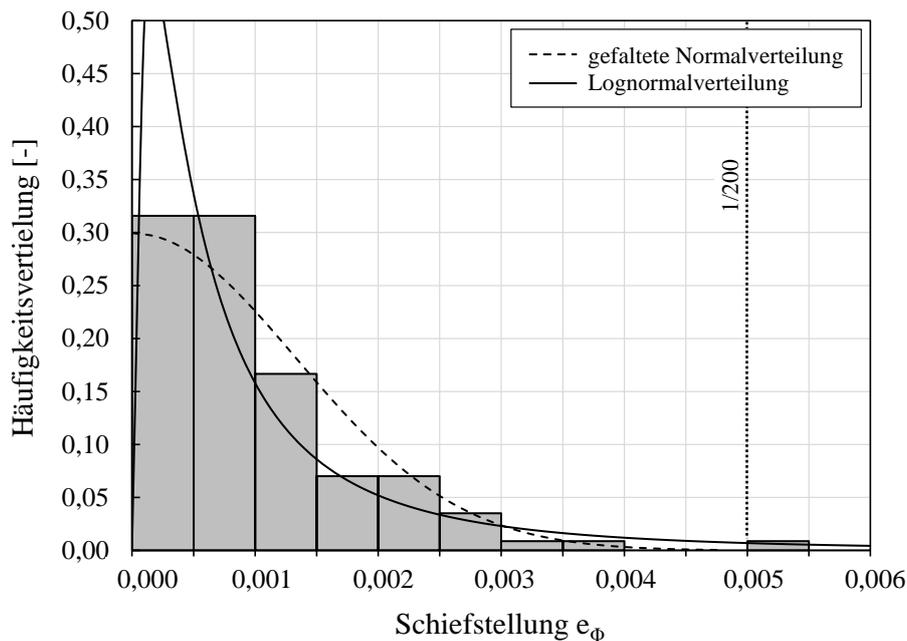
#### 4.6.5. FSH GL75 Stützen - Schiefstellungen

In Abb. 18 sind die Maximalwerte der gemessenen Schiefstellungen  $e_\phi$  aller FSH GL75 Stützen, nach Bauwerken und Richtung aufgeschlüsselt, dargestellt. Auf der x-Achse ist die Stützenlänge und auf der y-Achse die Schiefstellungen  $e_\phi$  angegeben. Jeder Datenpunkt stellt die maximal gemessene Schiefstellung einer Stütze eines Bauvorhabens in eine Richtung dar. Zusätzlich ist der Bemessungswert nach DIN EN 1995-1-1 [11]  $e_\phi = 1/200 = 0,05$  eingezeichnet. Mit zunehmender Stützenlänge konnte eine Abnahme der Schiefstellung beobachtet werden. Dies deckt sich mit der Regelung nach DIN EN 1995-1-1 [11] für Stützen länger als 5 m. Eine maximale Schiefstellung von  $1/200$  wird nur von einer Stütze in eine Richtung überschritten.

In Abb. 19 ist die Häufigkeitsverteilung der maximal gemessenen Schiefstellungen  $e_\phi$  dargestellt. Eine



**Abb. 18:** Maximal gemessene Schiefstellungen  $e_\phi$  von 57 FSH GL75 Stützen aufgeteilt nach Gebäuden und Richtung, jeder Datenpunkt repräsentiert die Schiefstellung eines Bauteils in eine Richtung (zwei Richtungen je Stütze, deshalb  $2 \times 57 = 114$  Werte).



**Abb. 19:** Häufigkeitsverteilung der maximal gemessene Schiefstellungen  $e_\phi$  von 57 FSH GL75 Stützen. gefaltete Normalverteilung stellt eine plausible Annäherung der Dichtefunktion dar. Für die Stichprobe ergeben sich folgende Werte:

- Mittelwert  $\mu(e_\phi) = 0,00100 \cong 1 / 1000$
- Standardabweichung  $\sigma(e_\phi) = 0,00088 \cong 1 / 1140$
- 95 % Quantil  $e_{\phi,95} = 0,00244 \cong 1 / 380$

Die Schiefstellungen von Stützen sind im Wesentlichen montagebedingt.

## 5. Ermittlung geometrischer Ersatzimperfectionen

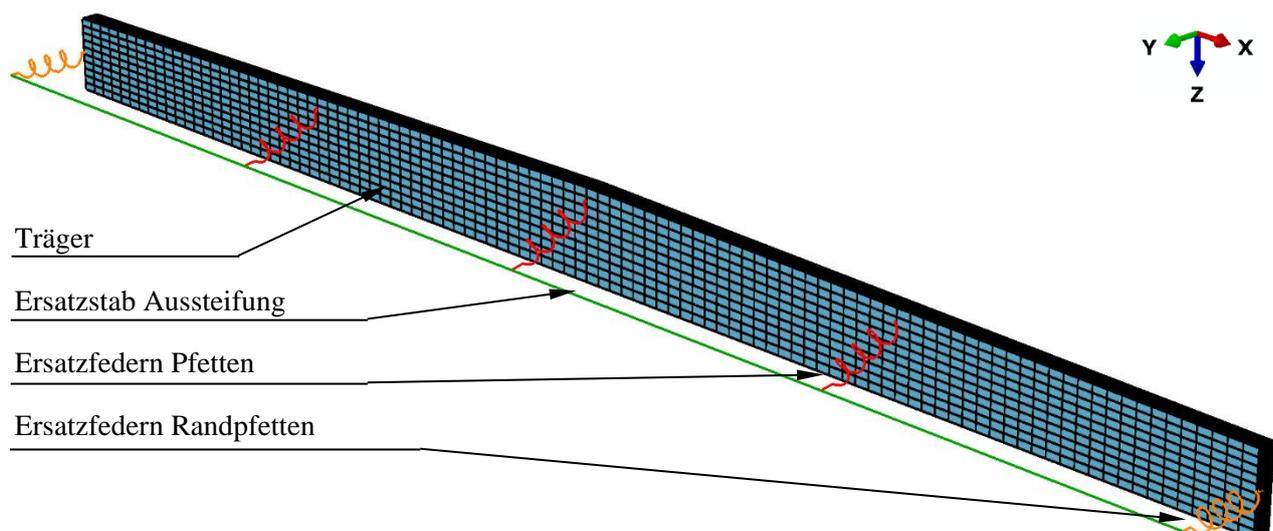
### 5.1. Allgemeines

Die geometrischen Ersatzimperfectionen der Träger wurden anhand numerischer Berechnungen mit dem Finite Elemente Programm Abaqus/CAE 2020 ermittelt. Die Eingabe erfolgte textbasiert über eine Python Skript und ermöglichte einen hohen Grad an Automatisierung. Das Ziel war die Untersuchung des Stabilitätsverhaltens der vermessenen Träger und die Ermittlung von geometrischen Ersatzimperfectionen. Als geometrischen Ersatzimperfection wird eine sinus-halbwellenförmige Imperfection bezeichnet, die zu gleicher Ausnutzung des Biegespannungsnachweises eines Trägers in Feldmitte wie die gemessene Imperfection führt. Pro vermessenen Träger werden Berechnungen mit drei Modellen durchgeführt: (a) Eigenwertuntersuchungen, (b) Berechnungen mit gemessenen Imperfectionen, (c) Berechnungen mit geometrischen Ersatzimperfectionen. Ein Teil der Ergebnisse wurde in [24] diskutiert.

### 5.2. Numerische Modelle und Berechnungsmethodik

#### 5.2.1. Allgemeines

In Abb. 20 ist das numerische Modell des Satteldachträgers des Bauvorhabens 2020-KW23 dargestellt. Die Träger wurden mit ideal geplanter Geometrie modelliert. Die horizontale Aussteifung (sofern vorhanden) wurde mittels eines Ersatzstabes, dessen Steifigkeit nach [21] berechnet wurde, abgebildet. Die Steifigkeit der Pfetten und deren Anschlüsse wurde mit Ersatzfedern in y-Richtung berücksichtigt. Die Auflager wurden als ideale Gabellager in der Stabachse modelliert. Zur Vernetzung wurden 20-knotige Volumenelemente (C3D20R) mit einer Netzfeinheit von 100 Elementen über die Länge, 10 Elemente über die Höhe und 8 Elemente über die Breite, gewählt. Ein orthotropes Materialmodell mit Mittelwerte der E-Moduln und Schubmoduln nach DIN EN 14080 [13] bzw. ETA-14/0354 [14], Querdehnzahlen nach [34] bzw. [23], bilinearem Verhalten unter Druck und linear elastischem Verhalten



**Abb. 20:** Numerisches Modell des Satteldachträgers des Bauvorhabens 2020-KW23.

unter Zug wurde implementiert. Die Faserrichtung wurde parallel zur Trägerunterkante angenommen und die Belastung als Gleichflächenlast in z-Richtung auf die Trägeroberkante aufgebracht. Die Verifizierung und Validierung des Modells wurde in Anlehnung an Töpler et al. [40] durchgeführt und ist in der Masterarbeit von Bockius [5] ausgeführt. Eine detaillierte Modellbeschreibung wird ebenfalls in [5] gegeben.

In Modell 1 wurden keine Imperfektionen und ein rein elastisches Materialverhalten angenommen. Das Modell wurde verwendet um Eigenwerte und Eigenformen der Träger zu bestimmen und daraus die relative Schlankheit  $\lambda_{rel,m}$  und die resultierende Kipplänge  $l_{ef,m}$  zu berechnen.

In Modell 2 wurden die gemessenen Imperfektionen mit Verläufen entsprechend Abb. 13 und Abb. 15 berücksichtigt. Dafür wurden die Koordinaten jedes einzelnen Knotens des Modells automatisiert entsprechend der gemessenen Imperfektionen angepasst. Mit dem Modell wurde die maximale Tragfähigkeit und die dazugehörige Gleichflächenlast  $q_{max}$  der Träger berechnet, bei der die charakteristische Biegefestigkeit  $f_{m,k}$  erreicht war.

In Modell 3 wurden globale sinus-halbwellförmige geometrischen Ersatzimperfektionen mit vorab bestimmter Amplitude (Kapitel 5.2.2) angenommen. Entsprechend der Eigenformen wurden in Voruntersuchungen [5] außerdem lokale mehrwellige geometrischen Ersatzimperfektionen (halbe Wellenlänge = Pfettenabstand) und eine Überlagerung von lokalen und globalen geometrischen Ersatzimperfektionen berücksichtigt (siehe Abb. 21). Die in Modell 2 ermittelte Last  $q_{max}$  wurde in Modell 3 aufgebracht. Die daraus resultierenden Biegespannungen und Ausnutzungen  $\mu_x = \sigma_x / f_{m,k}$  wurden ermittelt. Anhand dieser Ergebnisse wurden die Berechnungsverfahren der geometrischen Ersatzimperfektionen in Kapitel 5.2.2 evaluiert.

Aufgrund der Voruntersuchungen von Bockius [5] wurde entschieden, die geometrischen Ersatzimperfektionen in Modell 3 nicht iterativ (also Erhöhen bis maximale Biegespannungen  $f_{m,k}$  erreicht ist), sondern vorab mittels Näherungsverfahren (Kapitel 5.2.2) zu bestimmen. Die numerischen Berechnungen dienen somit insbesondere der Bestätigung des Berechnungsansatzes der geometrischen Ersatzimperfektionen (Untersuchung der Abweichungen der maximalen Biegezugspannungen in Modell 2 und 3) und nicht der direkten Berechnung der geometrischen Ersatzimperfektionen.

Diese Vorgehensweise ist darin begründet, dass bei punktuell horizontal ausgesteiften Trägern (Abb. 21) das Biegemoment um die schwache Achse in der Regel nur einen geringen Anteil (im Mittel 6 %, siehe Tab. 2) der gesamten Ausnutzung ausmacht. Da die Imperfektionen einzig dieses Biegemoment

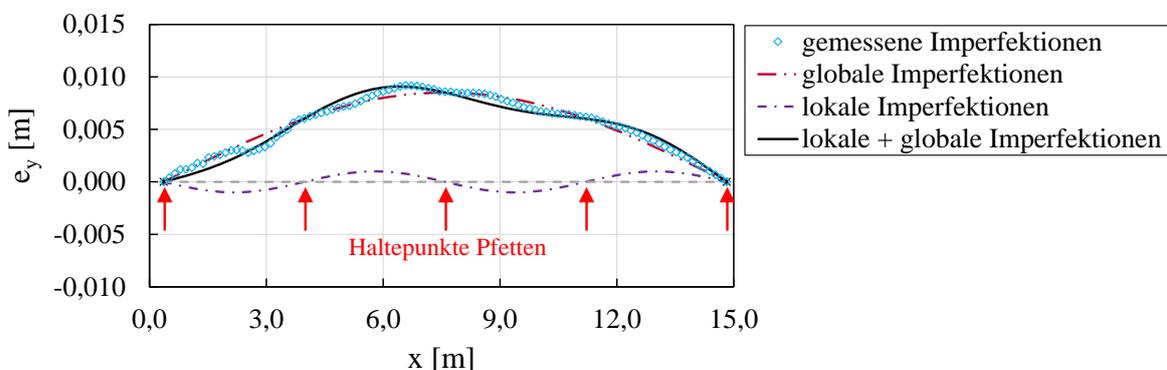


Abb. 21: Vorkrümmungen für die FE-Modellierung, Träger Achse 2 bei Bauvorhaben 2020-KW23.



um die schwache Achse beeinflussen und sinus-halbwellenförmige geometrische Ersatzimperfektionen bei punktuell ausgesteiften System günstiger als die unregelmäßigen gemessenen Imperfektionen sind, wären teilweise unverhältnismäßig hohe geometrische Ersatzimperfektionen nötig gewesen, um  $f_{m,k}$  in Modell 3 bei gleicher Belastung  $q_{\max}$  wie in Modell 2 zu erreichen.

Bockius [5] untersuchte auch den Ansatz lokaler geometrischer Ersatzimperfektionen (Abb. 21). Dabei wurde die Amplitude der globalen geometrischen Ersatzimperfektion gleich der gemessenen Imperfektion in Feldmitte angenommen und iterativ die Amplitude der lokalen geometrischen Ersatzimperfektion bestimmt. Dieser Ansatz hat sich als geeignet erwiesen, den Einfluss unregelmäßiger gemessener Imperfektionen abzubilden.

In Rücksprache mit Tragwerksplaner\*innen, wurde der Ansatz globaler und lokaler geometrischer Ersatzimperfektionen jedoch als zu komplex und praktisch schwer umsetzbar verworfen. Deshalb wurde entschieden, die Berechnung in Modell 3 nur mit globalen geometrischen Ersatzimperfektionen durchzuführen und verschiedene Berechnungsansätze zur Ermittlung der Amplitude der geometrischen Ersatzimperfektionen zu vergleichen.

Diese Berechnungsmethodik (Modell 1 bis 3) wurde für alle 240 Träger zur Ermittlung der geometrischen Ersatzimperfektionen Vorkrümmung und Vortordierung in Feldmitte durchgeführt.

### 5.2.2. Verfahren zur Ermittlung der geometrischen Ersatzimperfektionen

Es wurden 4 Verfahren zur Ermittlung der geometrischen Ersatzimperfektionen untersucht:

- A Gleichheit der Flächenintegrale der gemessenen Imperfektionen und der geometrischen Ersatzimperfektionen über die Trägerlänge,
- B Gleichheit der Maxima der gemessenen Imperfektionen und der geometrischen Ersatzimperfektionen,
- C Gleichheit der Integrale von  $(e_y(x) * \sin(\pi x / L))$  der gemessenen Imperfektionen und der geometrischen Ersatzimperfektionen über die Trägerlänge  $x$ ,
- D Gleichheit der Verformungen infolge horizontaler Ersatzlasten entsprechend der gemessenen Imperfektionen und der geometrischen Ersatzimperfektionen.

Bei Verfahren C wird über das Gewicht der Imperfektionen über die Trägerlänge mittels Sinus berücksichtigt, dass Imperfektionen in Feldmitte einen deutlich ungünstigeren Einfluss als Imperfektionen an den Auflagern haben.

In Verfahren D erfolgt ebenfalls eine Wichtung der Imperfektionen über die Trägerlänge, die allerdings anhand eines mechanischen Modells hergeleitet wurde. Dabei wurden die gemessenen Imperfektionen  $e_y(x)$  und  $e_s(x)$  als horizontale Punktlasten  $P_y(x)$  in der Stabachse mit einem Wert entsprechend der gemessenen Imperfektion interpretiert. Mit diesen Punktlasten konnte die horizontale Verformung eines Trägers in Abhängigkeit von  $EI_z$  berechnet werden. Durch Vergleich dieser Verformung mit der eines Trägers unter sinus-förmiger Belastung (repräsentiert eine sinus-förmige Ersatzimperfektion), konnte die Amplitude der geometrischen Ersatzimperfektion, die die gleiche maximale horizontale

Verformung erzeugt, ermittelt werden. Der Einfluss der veränderlichen Trägerhöhe bei den Vortordierungen wurde berücksichtigt, indem die Vortordierungen  $e_s(x)$  mit der Querschnittshöhe  $H(x)$  multipliziert wurden.

Alle Verfahren liefern brauchbare Ergebnisse, wobei bei Verfahren C und D die Differenzen der Ausnutzung  $\mu_x$  zwischen Modell 2 und 3 am geringsten sind. Ergebnisse mit Verfahren A werden in [24] präsentiert.

Da das Verfahren D mechanisch hergeleitet wurde und gute Ergebnisse liefert (siehe Tab. 2), wurde dieses für die weiteren numerischen Berechnungen gewählt.

### 5.2.3. Bewertung der Verfahren zur Ermittlung der Ersatzimperfectionen

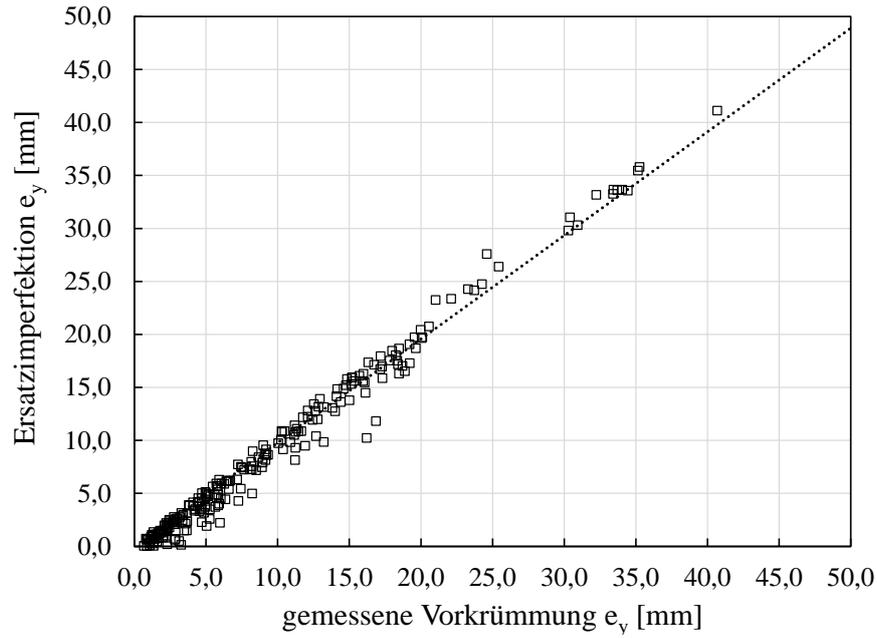
Die Ausnutzungen der Biegezugspannungen  $\mu_x$  aller ausgesteiften Träger, die mit Modell 2 und 3 berechnet wurden, sind in Tab. 2 angegeben. Die mittlere Ausnutzung  $\mu_x$  bei Modell 3 lag bei 1,0 und die Minima und Maxima bei 0,97 und 1,02. Die Ausnutzungen  $\mu_{x,My}$  waren in beiden Modellen identisch, da dieselbe Belastung  $q_{max}$  angenommen wurde. Auch die Ausnutzungen um die schwache Achse waren bei Modell 3 nahezu identisch zu Modell 2. Es konnte somit gezeigt werden, dass sich mit dem gewählten Ansatz zur Berechnung der geometrischen Ersatzimperfectionen (Verfahren D) nahezu identische Ausnutzungen im Vergleich zu FE Berechnungen mit gemessenen Imperfectionen ergeben und das Verfahren D sehr gut zur Ermittlung der geometrischen Ersatzimperfectionen geeignet ist.

**Tab. 2:** Für alle ausgesteiften Träger numerisch ermittelte Mittelwerte, Minima, Maxima und Variationskoeffizienten (COV) der relativen Schlankheit  $\lambda_{rel,m}$  und der maximalen Ausnutzung infolge Biegung  $\mu_x$ , die Ausnutzung aufgeteilt in die beiden Anteile aus  $M_y$  und  $M_z$ .

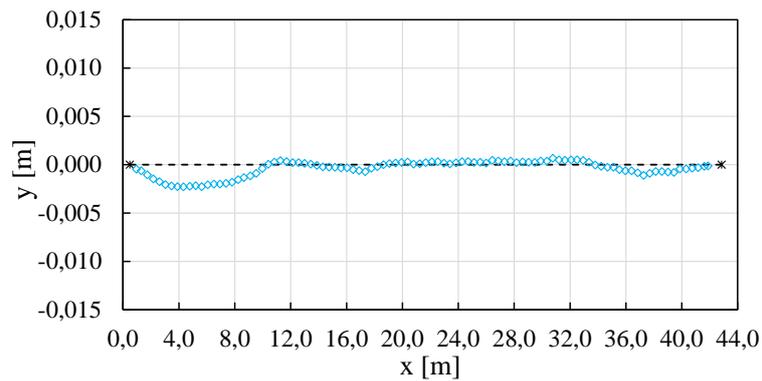
	$\lambda_{rel,m}$	Modell 2 (gemessene Imp.)			Modell 3 (Ersatzimperfectionen)		
		$\mu_x = \sigma_x / f_m$	$\mu_{x,My}$	$\mu_{x,Mz}$	$\mu_x = \sigma_x / f_m$	$\mu_{x,My}$	$\mu_{x,Mz}$
<b>Mittelwert</b>	<b>0,77</b>	<b>1,00</b>	<b>0,94</b>	<b>0,06</b>	<b>1,00</b>	<b>0,94</b>	<b>0,06</b>
Minimum	0,52	1,00	0,72	0,00	0,97	0,72	0,00
Maximum	0,96	1,00	1,00	0,28	1,02	1,00	0,30
COV	0,16	0,00	0,07	1,05	0,01	0,07	1,03

Die geringen relativen Schlankheiten  $\lambda_{rel,m}$  der ausgesteiften Träger veranschaulichten die hohe Wirksamkeit von Verbänden zur horizontalen Stabilisierung schlanker Träger.

Zum Vergleich sind in Abb. 22 die Messwerte und ermittelten geometrischen Ersatzimperfectionen der Vorkrümmungen  $e_y$  aller 240 BSH und FSH Träger gegenübergestellt. Gepunktet dargestellt wird die Regressionsgerade durch den Ursprung. Generell stimmten gemessene geometrische Imperfectionen und geometrische Ersatzimperfectionen gut überein. Die Regressionsgerade hat eine Steigung von 0,98 bei einem Bestimmtheitsmaß von ebenfalls 0,98. Größere Abweichungen traten im Bereich kleiner Imperfectionen auf, wenn die gemessenen Imperfectionen um die Stabachse oszillieren, wie in Abb. 23 für einen Träger beispielhaft dargestellt.



**Abb. 22:** Vergleich Messwerte und geometrische Ersatzimperfektionen der maximalen horizontalen Vorkrümmungen  $e_y$  von 202 BSH und 38 FSH Trägern, jeder Datenpunkt repräsentiert ein Bauteil.



**Abb. 23:** Gemessene Vorkrümmungen  $e_y$  des Trägers Achse 22 über die Länge  $x$ , Bauvorhaben 2020-KW38.

### 5.3. Ergebnisse und Auswertung

#### 5.3.1. BSH Träger – Vorkrümmungen

In Abb. 24 sind die numerisch ermittelten geometrischen Ersatzimperfektionen Vorkrümmung  $e_y$  aller 202 ausgewerteten BSH Träger, nach Bauwerken aufgeschlüsselt, dargestellt. Auf der x-Achse ist die Länge (Abstand der Auflagerpunkte des statischen Systems) und auf der y-Achse die Vorkrümmung  $e_y$  dargestellt. Jeder Datenpunkt stellt die ermittelte Amplitude der horizontalen geometrischen Ersatzimperfektionen Vorkrümmung eines Trägers eines Bauvorhabens dar. Zusätzlich ist der Wert  $L/1000$  eingezeichnet. Sämtliche ermittelten Vorkrümmungen  $e_y$  lagen unterhalb  $L/400$ . Eine maximale Vorkrümmung  $e_y$  von  $L/1000$  wurde von 18 der 202 ausgewerteten Träger überschritten.

Der in DIN EN 1995-1-1 [11], [12] angenommene lineare Zusammenhang zwischen Vorkrümmung und Spannweite der Holzbauteile bestätigt sich durch die Messergebnisse. Einflüsse der Trägerhöhe, Trägerbreite und davon abgeleiteter Größen wie der Schlankheit konnten nicht festgestellt werden.

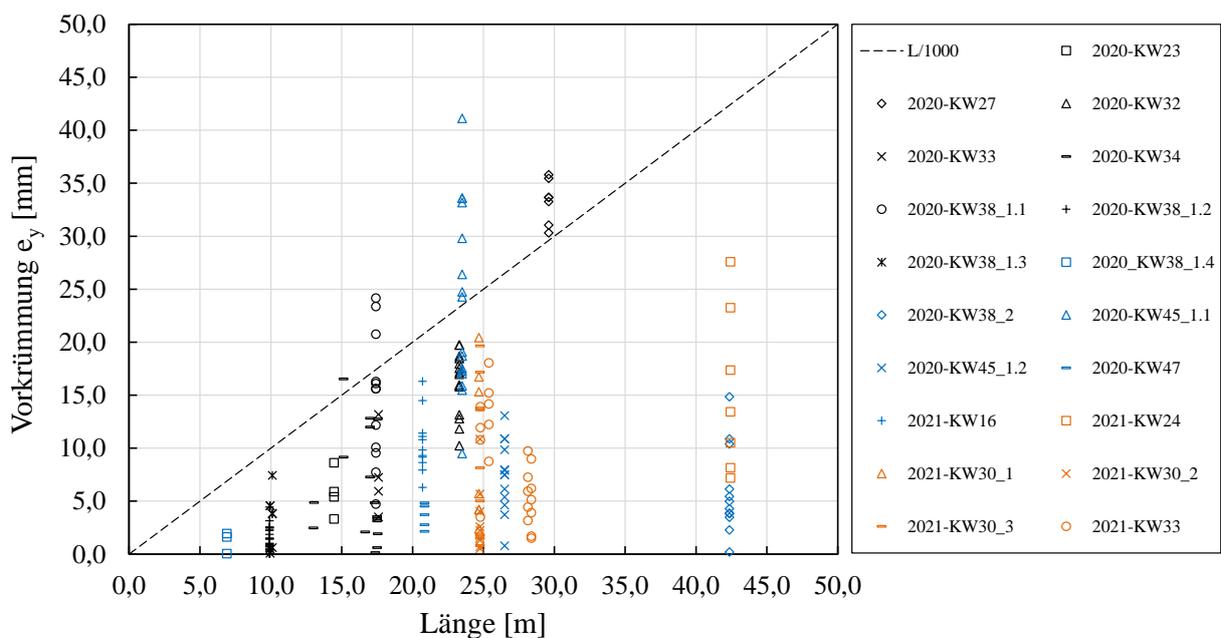
In Abb. 25 ist die Häufigkeitsverteilung der ermittelten geometrischen Ersatzimperfektionen Vorkrümmung  $e_y / L$  dargestellt. Eine gefaltete Normalverteilung stellt eine plausible Annäherung der Dichtefunktion dar. Für die Stichprobe ergeben sich folgende Werte:

Mittelwert  $\mu (e_y / L) = 0,436 \text{ mm/m} \cong 1 / 2290$

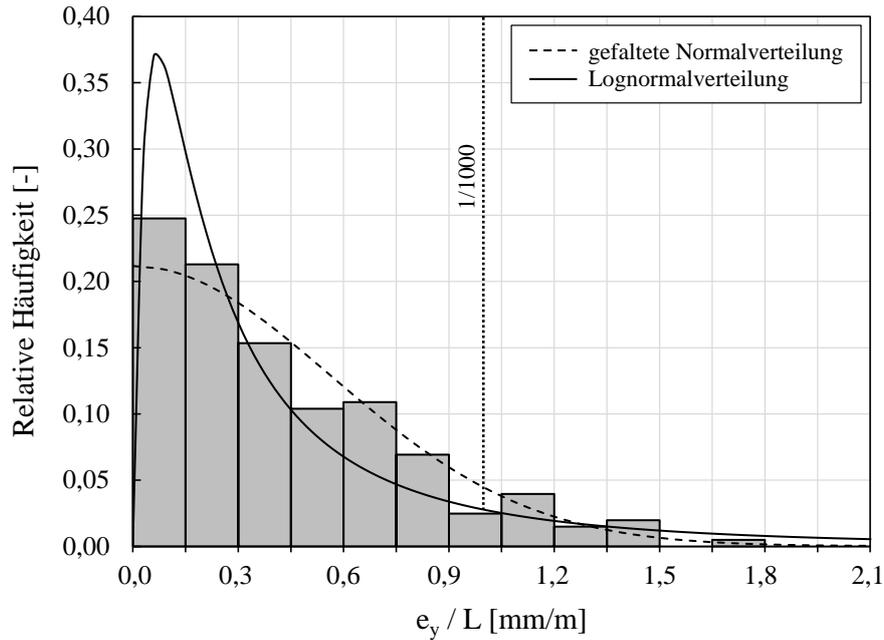
Standardabweichung  $\sigma (e_y / L) = 0,358 \text{ mm/m} \cong 1 / 2790$

95 % Quantil  $e_{y,95} / L = 1,138 \text{ mm/m} \cong 1 / 880$

Werden die Ausreißer der Vorkrümmungen, Bauvorhaben 2020-KW27 und 2020-KW45\_1.1, die bei einer entsprechenden Kontrolle hätten verhindert werden können, vernachlässigt, so können für die restlichen 177 BSH Träger folgende Werte angegeben werden:



**Abb. 24:** Geometrische Ersatzimperfektionen Vorkrümmung  $e_y$  von 202 BSH Trägern, aufgeteilt nach Gebäuden, jeder Datenpunkt repräsentiert ein Bauteil.



**Abb. 25:** Häufigkeitsverteilung der geometrischen Ersatzimperfectionen Vorkrümmung  $e_y / L$  von 202 BSH Trägern.

Mittelwert  $\mu (e_y / L) = 0,359 \text{ mm/m} \cong 1 / 2790$

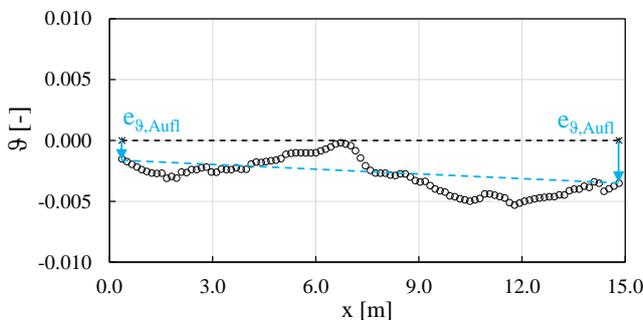
Standardabweichung  $\sigma (e_y / L) = 0,282 \text{ mm/m} \cong 1 / 3540$

95 % Quantil  $e_{y,95} / L = 0,847 \text{ mm/m} \cong 1 / 1180$

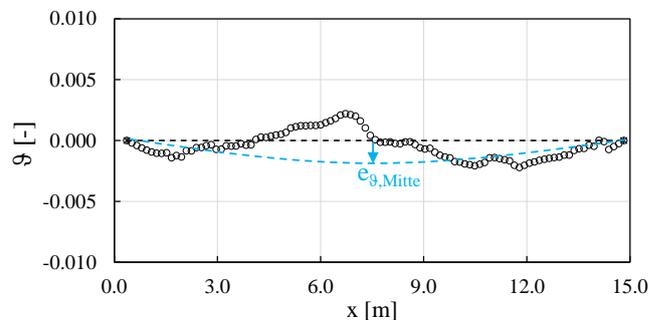
### 5.3.2. BSH und FSH Träger – Vortordierungen

Die FSH Träger wurden gemeinsam mit den BSH Trägern ausgewertet. Aufgrund der unterschiedlichen Ursache wurden die Vortordierungen in Vortordierungen an den Auflagern (vertikale Ausrichtung der Träger an der Gabellagerung) und Vortordierung in Feldmitte (aus Fertigung sowie Ausrichtung des Dachverbandes während der Montage) unterteilt.

Dafür wurden zuerst anhand der gemessenen Vortordierungen die Vortordierungen an den Auflagern  $e_{\vartheta, \text{Aufl}}$  bestimmt (Abb. 26). Dann von den Messwerten die Werte der Verbindungsgeraden (gestrichelte Linie in Abb. 26) der beiden Vortordierungen an den Auflagern  $e_{\vartheta, \text{Aufl}}$  abgezogen. Das Ergebnis dieser



**Abb. 26:** Messwerte Vortordierungen und Vortordierung an den Auflagern  $e_{\vartheta, \text{Aufl}}$ .



**Abb. 27:** Um  $e_{\vartheta, \text{Aufl}}$  reduzierte Messwerte Vortordierungen und ermittelte geometrische Ersatzimperfectionen Vortordierung in Feldmitte  $e_{\vartheta, \text{Mitte}}$ .

Reduktion der Vortordierungen um  $e_{9,Aufl}$  ist in Abb. 27 exemplarisch dargestellt. Schließlich wurden die geometrischen Ersatzimperfektionen Vortordierung in Feldmitte  $e_{9,Mitte}$  mit dem in Kapitel 5.2 beschriebenen Verfahren anhand der um  $e_{9,Aufl}$  reduzierten Messwerte der Vortordierungen (Abb. 27) bestimmt.

### Vortordierungen an den Auflagern

Die Vortordierungen an den Auflagern wurden getrennt für Gabellager mit hohen und für Gabellager mit niedrigen Toleranzen ermittelt. Unter Gabellagern mit hohen Toleranzen werden Stahlbetonaufлагertaschen (Abb. 29) und vergleichbare Verbindungen, die große Toleranzen zulassen, eingruppiert. Bei Gabellagern mit niedrigen Toleranzen werden Beihölzer (Abb. 28) und vergleichbare Verbindungen mit kleinen Toleranzen eingruppiert.

In Abb. 30 und Abb. 31 sind die Vortordierungen an den Auflagern  $e_{9,Aufl}$  aller 202 ausgewerteten BSH Träger, nach Bauwerken aufgeschlüsselt, dargestellt (siehe auch Tab. 1). Auf der x-Achse ist die Länge (Abstand der Auflagerpunkte des statischen Systems) und auf der y-Achse die Vortordierungen  $e_{9,Aufl}$  dargestellt. Jeder Datenpunkt stellt die gemessene Vortordierung am Gabellager eines Bauteils dar. Zusätzlich sind die Werte 1/200, 1/170 und 1/100 eingezeichnet.

Für Gabellager mit niedrigen Toleranzen konnte kein signifikanter Einfluss der Länge, Breite oder Höhe festgestellt werden. Für Gabellager mit hohen Toleranzen konnte ein geringfügiger Längen- und Höheneinfluss bei allerdings sehr großen Streuungen beobachtet werden. Dieser Einfluss war jedoch nur an Trägern  $< 10$  m oder  $> 40$  m zu beobachten. Da die Ergebnisse auch durch nicht repräsentative Messwerte in diesen Bereichen verzerrt sein könnten, wird kein Einfluss von Trägerhöhe und -breite in der Auswertung berücksichtigt.

In Abb. 32 und Abb. 33 sind die Häufigkeitsverteilungen der maximal gemessenen Vortordierungen an den Auflagern  $e_{9,Aufl}$  dargestellt. Eine gefaltete Normalverteilung ist eine plausible Annäherung der Messwerte.



**Abb. 28:** Gabellagerung eines BSH Trägers mit Beihölzern (niedrige Toleranzen).



**Abb. 29:** Gabellagerung eines BSH Trägers mit einer Stahlbetonaufлагertasche (hohe Toleranzen).

Für Gabellager mit niedrigen Toleranzen ergeben sich für die Stichprobe folgende Werte:

- Mittelwert  $\mu (e_9) = 0,0022 \cong 1 / 450$
- Standardabweichung  $\sigma (e_9) = 0,0019 \cong 1 / 530$
- 95 % Quantil  $e_{9,95} = 0,0058 \cong 1 / 170$

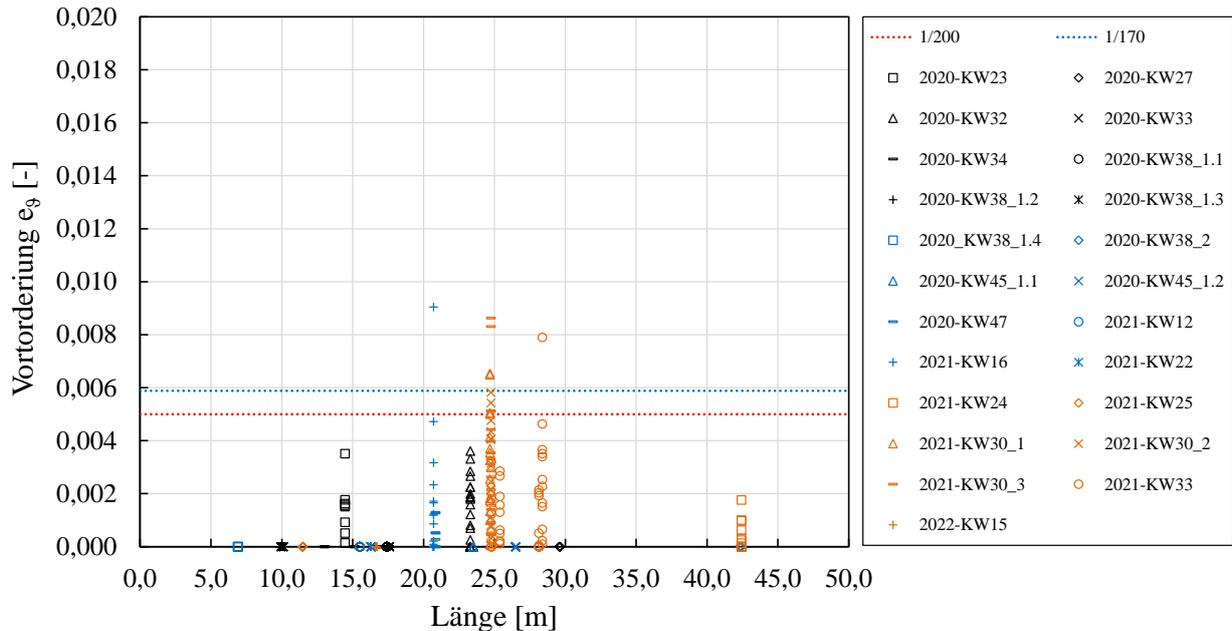


Abb. 30: Maximal gemessene Vortordierungen  $e_{9,Aufl}$  von 127 Auflagern von Trägern, aufgeteilt nach Gebäuden, jeder Datenpunkt repräsentiert ein Gabellager eines Trägers, Gabellager mit niedrigen Toleranzen.

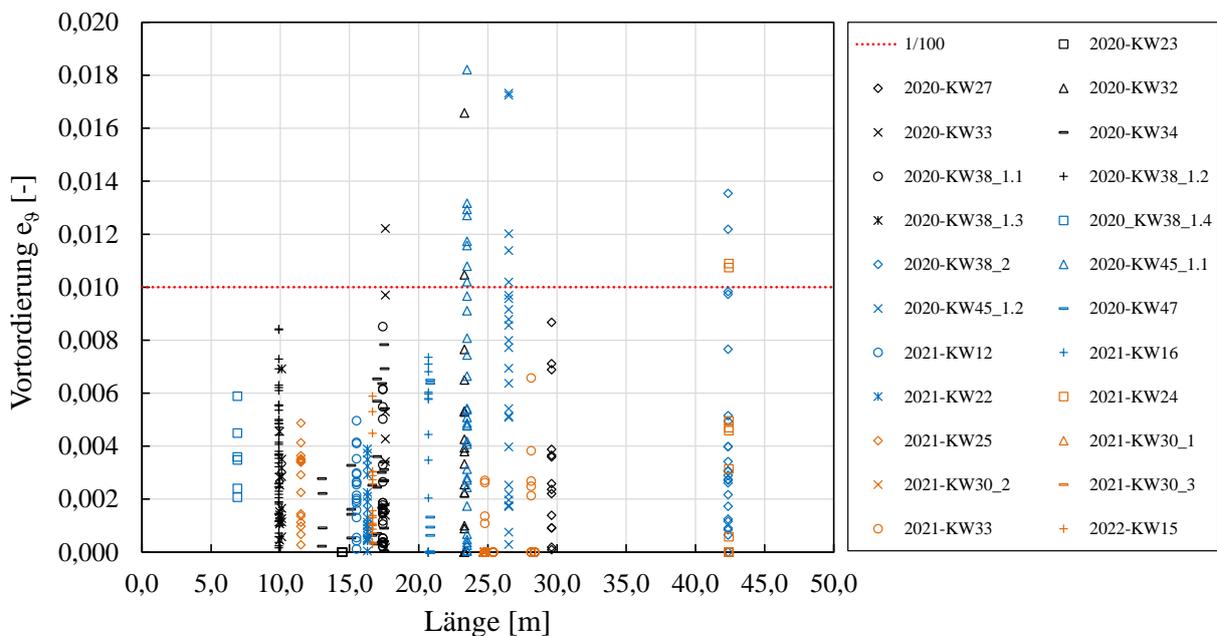


Abb. 31: Maximal gemessene Vortordierungen  $e_{9,Aufl}$  von 353 Auflagern von Trägern, aufgeteilt nach Gebäuden, jeder Datenpunkt repräsentiert ein Gabellager eines Trägers, Gabellager mit hohen Toleranzen.

Für Gabellager mit hohen Toleranzen ergeben sich für die Stichprobe folgende Werte:

Mittelwert	$\mu (e_9)$	$= 0,0037 \cong 1 / 270$
Standardabweichung	$\sigma (e_9)$	$= 0,0033 \cong 1 / 310$
95 % Quantil	$e_{9,95}$	$= 0,0102 \cong 1 / 100$

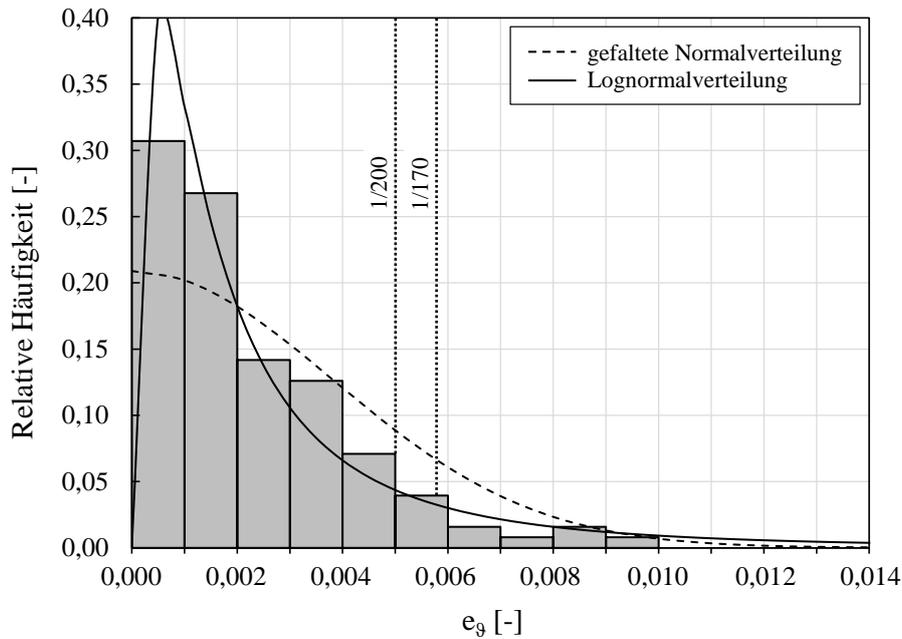


Abb. 32: Häufigkeitsverteilung der maximal gemessene Vortordierungen  $e_{9,Aufl}$  von 127 Auflagern von BSH und FSH Trägern, Gabellager mit niedrigen Toleranzen.

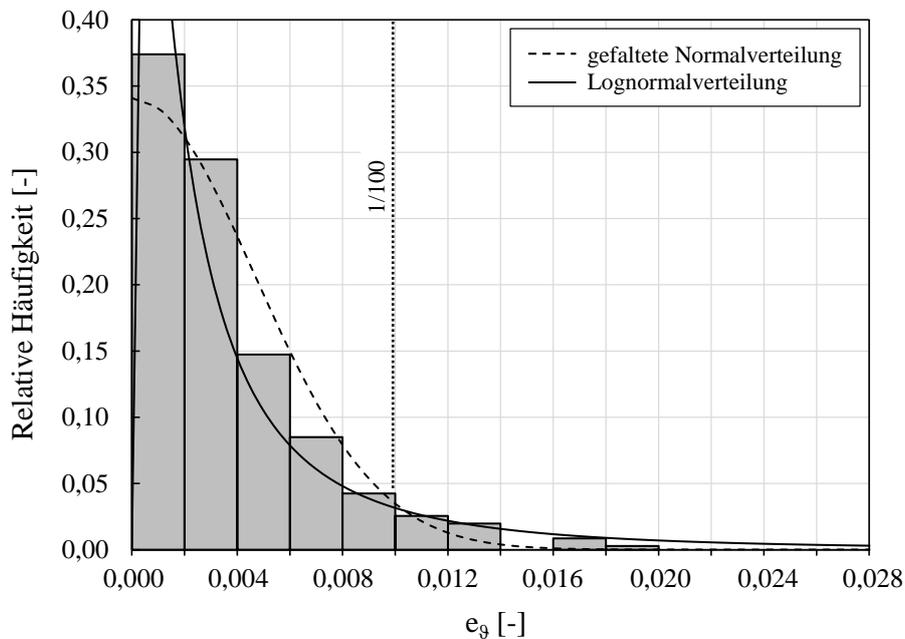
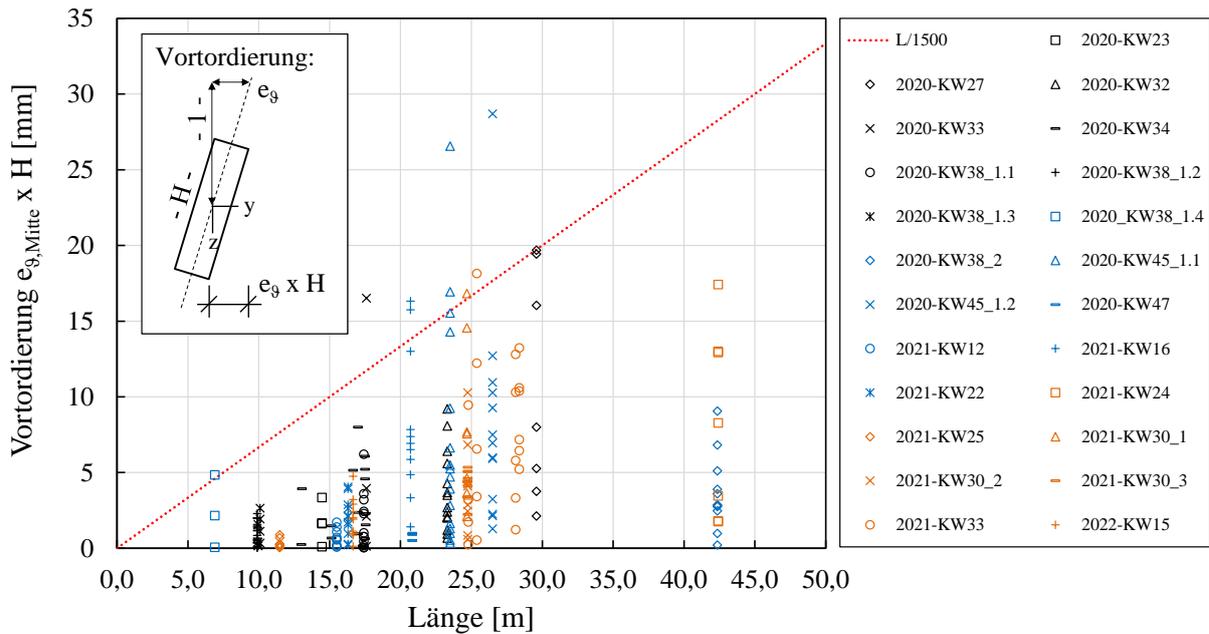


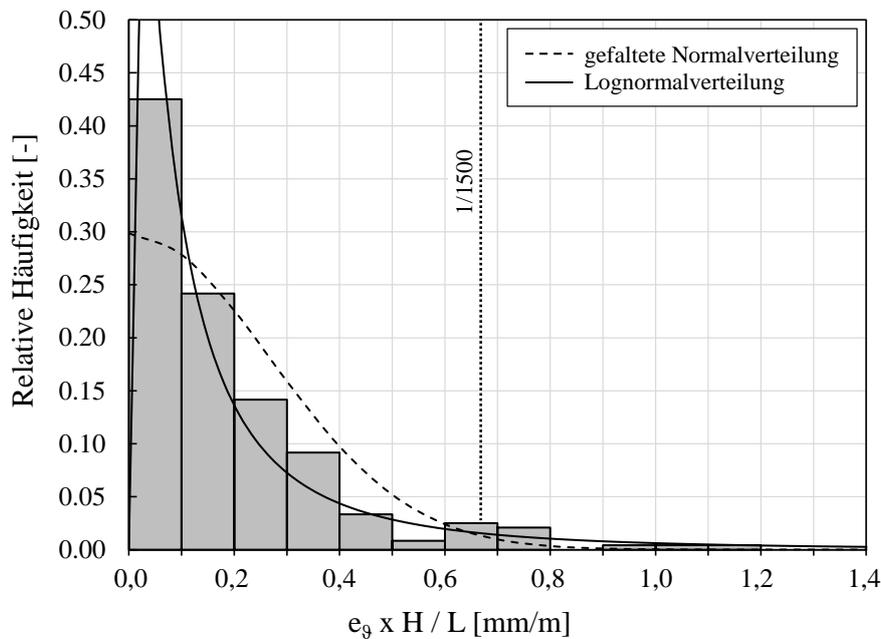
Abb. 33: Häufigkeitsverteilung der maximal gemessene Vortordierungen  $e_{9,Aufl}$  von 353 Auflagern von BSH und FSH Trägern, Gabellager mit hohen Toleranzen.

### Vortordierungen in Feldmitte

In Abb. 34 sind die numerisch ermittelten Ersatzimperfectionen Vortordierung in Feldmitte multipliziert mit der Trägerhöhe ( $e_{9,Mitte} \times H$ ) aller 202 BSH und 38 FSH Träger, nach Bauwerken aufgeschlüsselt, dargestellt (siehe auch Tab. 1). ( $e_{9,Mitte} \times H$ ) beschreibt dabei die Differenz der horizontalen Vorverformungen von Trägeroberkante zu -unterkante (Abb. 34). Auf der x-Achse ist die Länge (Abstand



**Abb. 34:** Geometrische Ersatzimperfectionen Vortordierung in Feldmitte  $e_{9,Mitte} \times H$  von 202 BSH und 38 FSH Trägern, aufgeteilt nach Gebäuden, jeder Datenpunkt repräsentiert ein Bauteil.



**Abb. 35:** Häufigkeitsverteilung der geometrischen Ersatzimperfectionen Vortordierung in Feldmitte  $e_{9,Mitte} \times H / L$  von 202 BSH und 38 FSH Trägern.

der Auflagerpunkte des statischen Systems) und auf der y-Achse ( $e_{9,Mitte} \times H$ ) dargestellt. Jeder Datenpunkt stellt die ermittelte Amplitude der Ersatzimperfection Vortordierung eines Bauteils eines Bauvorhabens dar. Zusätzlich ist der Wert  $L/1500$  eingezeichnet.

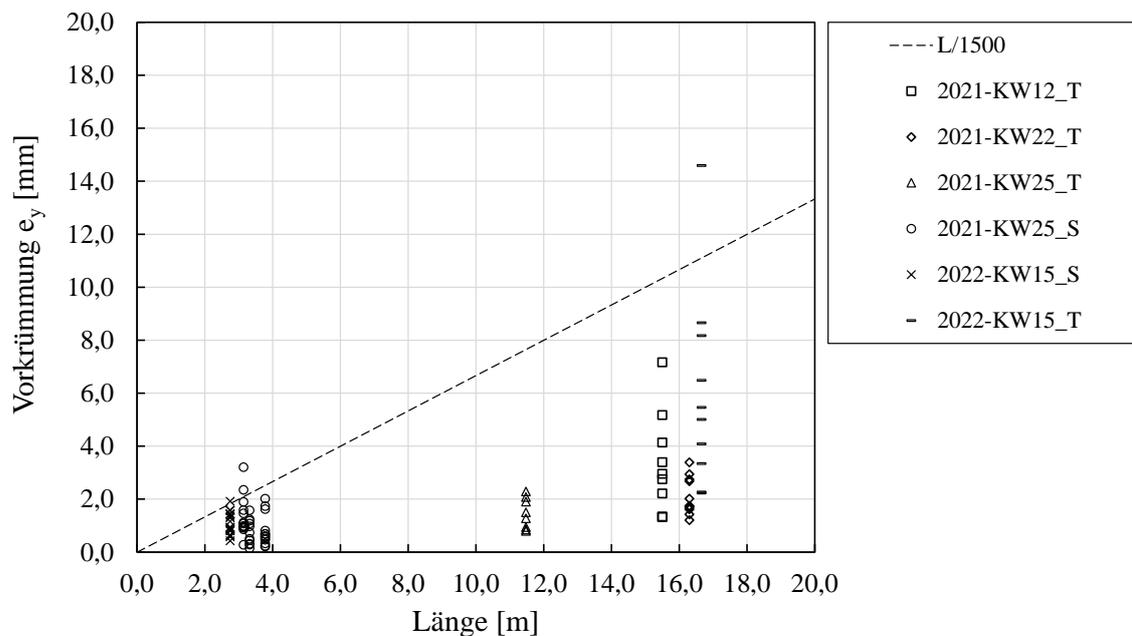
Analog zu den Vorkrümmungen zeigt sich auch für die Vortordierungen ( $e_{9,Mitte} \times H$ ) die annähernd lineare Abhängigkeit von der Trägerlänge. Durch das Einbeziehen der Trägerhöhe verbessert sich nochmals die Korrelation. Die Trägerbreite hat keinen signifikanten Einfluss.

In Abb. 35 ist die Häufigkeitsverteilung der Ersatzimperfection Vortordierung in Feldmitte  $e_{9,Mitte} \times H / L$  dargestellt. Eine gefaltete Normalverteilung stellt eine plausible Annäherung der Dichtefunktion dar. Für die Stichprobe ergeben sich folgende Werte:

- Mittelwert  $\mu (e_9 \times H / L) = 0,184 \text{ mm/m} \cong 1 / 5430$
- Standardabweichung  $\sigma (e_9 \times H / L) = 0,193 \text{ mm/m} \cong 1 / 5170$
- 95 % Quantil  $e_{9,95} \times H / L = 0,628 \text{ mm/m} \cong 1 / 1590$

### 5.3.3. FSH GL75 Träger und Stützen - Vorkrümmungen

In Abb. 36 sind die numerisch ermittelten geometrischen Ersatzimperfectionen Vorkrümmung  $e_y$  aller ausgewerteten FSH GL75 Träger (siehe Kapitel 5.2) und die ermittelten Vorkrümmungen  $e_{y,Ersa}$  aller FSH Stützen (siehe Kapitel 4.5), nach Bauwerken aufgeschlüsselt, dargestellt (siehe auch Tab. 1). Auf der x-Achse ist die Länge (Abstand der Auflagerpunkte des statischen Systems) und auf der y-Achse die Vorkrümmung  $e_y$  dargestellt. Jeder Datenpunkt stellt die ermittelte horizontale Vorkrümmung eines Bauteils eines Bauvorhabens dar. Zusätzlich ist der Wert  $L/1500$  eingezeichnet. Sämtliche ermittelten Vorkrümmungen  $e_y$  lagen unterhalb  $L/400$ . Der im DIN EN 1995-1-1 [11], [12] angenommene lineare Zusammenhang zwischen Vorkrümmung und Spannweite der Holzbauteile bestätigte sich durch die



**Abb. 36:** Maximale horizontale Vorkrümmungen  $e_y$  von 95 FSH GL75 Stützen und Trägern, aufgeteilt nach Gebäuden, jeder Datenpunkt repräsentiert ein Bauteil.

Messergebnisse. Eine maximale Vorkrümmung  $e_y$  von  $L/1000$  bzw.  $L/1500$  wurde von 1 bzw. 4 der 95 ausgewerteten Bauteile überschritten.

In Abb. 37 ist die Häufigkeitsverteilung der maximal ermittelten Vorkrümmungen  $e_y / L$  dargestellt. Sowohl eine gefaltete Normalverteilung, als auch eine Lognormalverteilung stellen eine plausible Annäherung der Dichtefunktion dar. Für die Stichprobe ergeben sich folgende Werte:

Mittelwert  $\mu (e_y / L) = 0,282 \text{ mm/m} \cong 1 / 3540$

Standardabweichung  $\sigma (e_y / L) = 0,190 \text{ mm/m} \cong 1 / 5260$

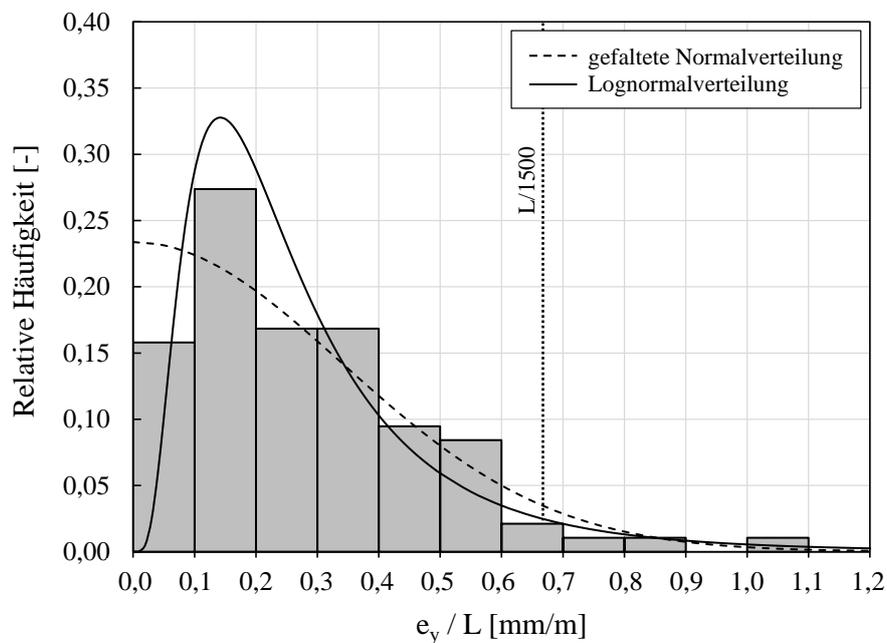
95 % Quantil  $e_{y,95} / L = 0,578 \text{ mm/m} \cong 1 / 1730$

Werden nur die Vorkrümmungen der 57 Stützen ausgewertet ergeben sich folgende Werte:

Mittelwert  $\mu (e_y / L) = 0,329 \text{ mm/m} \cong 1 / 3040$

Standardabweichung  $\sigma (e_y / L) = 0,194 \text{ mm/m} \cong 1 / 5160$

95 % Quantil  $e_{y,95} / L = 0,604 \text{ mm/m} \cong 1 / 1660$



**Abb. 37:** Häufigkeitsverteilung der maximalen horizontalen Vorkrümmungen  $e_y / L$  von 95 FSH GL75 Stützen und Trägern.

## 6. Strukturelle Imperfektionen

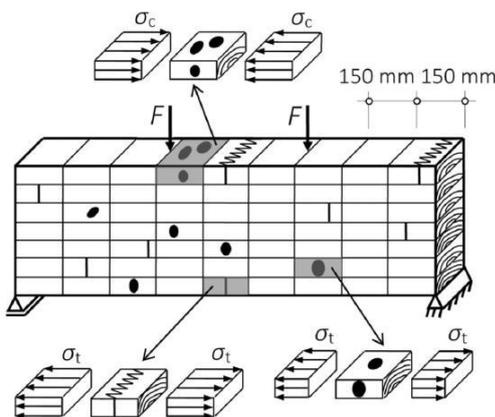
### 6.1. Stützen

Aus den Ergebnissen der Untersuchungen von Blaß und Ehlbeck [1] bis [4] kann gefolgert werden, dass für VH und BSH Stützen aus Nadelholz durch die Berücksichtigung nomineller (charakteristischer) Werte für Festigkeiten, Steifigkeiten und Vorkrümmungen der Einfluss struktureller Imperfektionen erfasst ist. Da die Streuungen des E-Moduls  $E_0$  und der Festigkeiten  $f_{c,0}$  und  $f_m$  bei Buchen FSH GL75 (BauBuche) [9] geringer als bei BSH und VH aus Nadelholz, ist kein größerer Einfluss struktureller Imperfektionen zu erwarten. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass für VH und BSH Stützen aus Nadelholz und aus Buchen FSH GL75 (BauBuche) der Einfluss struktureller Imperfektionen durch die Annahme nomineller Materialkennwerte und Imperfektionen berücksichtigt ist.

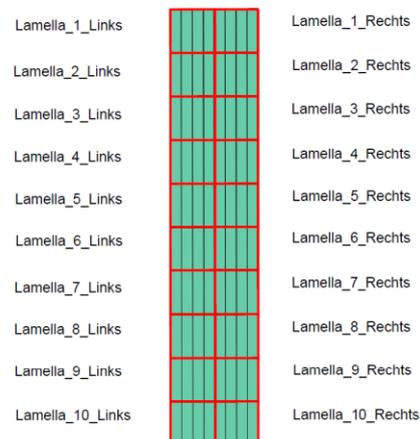
### 6.2. Träger

Zur Berücksichtigung struktureller Imperfektionen hochkant biegebelasteter Lamellen (Biegung von BSH Trägern um die schwache Achse), muss die Streuung der Eigenschaften von Brettschichtholzlamellen über die Breite bekannt sein. Es sind den Autoren keine Untersuchungen und Modelle bekannt, die sich explizit mit einer Variation der Holzeigenschaften einer Lamelle über die Breite befassen. Anhaltspunkte könnten die Untersuchungen von Sieder und Brandner [36] geben, diese sind jedoch noch nicht soweit ausgeführt.

Zur Grenzwertabschätzung des Einflusses struktureller Imperfektionen auf das Biegedrillknickverhalten schlanker BSH Träger wurden deshalb in einer projektbegleitenden Masterarbeit [27] Untersuchungen mit einem vereinfachten FE-Modell durchgeführt. Dafür wurde das Karlsruher Rechenmodell [16], anhand dem der Einfluss streuender Materialkennwerte auf die Querschnittstragfähigkeit von BSH bei zug- und einachsig biegebelasteten Bauteilen untersucht werden kann (Abb. 38), in Abaqus CAE/2020 mittels eines Python Skripts implementiert. Zur Erweiterung um den Einfluss streuender Materialkenn-



**Abb. 38:** Schematische Darstellung eines Brettschichtholzbauteils für das Karlsruher Rechenmodell [16].



**Abb. 39:** Unterteilung des Trägers im FE-Modell in Lamellen links/rechts zur Berücksichtigung struktureller Imperfektionen [27].

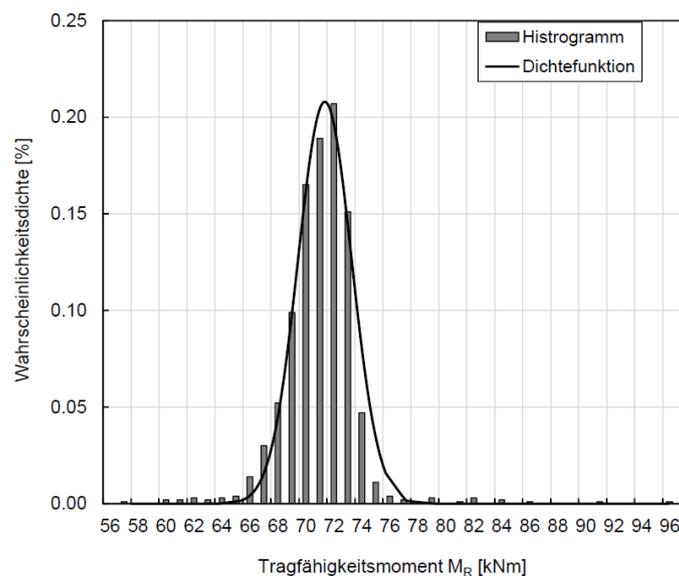
werte bei Biegung um die schwache Achse wurde ein Träger aus zwei nebeneinanderstehenden Trägern aufgebaut. Dies ist in Abbildung Abb. 39 dargestellt. Jeder einzelnen Lamelle wurden getrennt und unabhängig je Trägerseite (links / rechts) streuende Materialkennwerte nach dem Karlsruher Rechenmodell zugewiesen. Es wurden auf der sicheren Seite liegend unsortierte Lamellen verwendet.

Für einen schlanken Referenzträger mit Länge x Breite x Höhe = 10050 x 100 x 500 mm<sup>3</sup> wurden 1000 Berechnungen mit streuenden Materialkennwerten durchgeführt (Monte-Carlo Simulation) und jeweils die maximale Tragfähigkeit des Trägers bestimmt. Der Mittelwert der Trägertragfähigkeit ergab sich zu 71,85 kNm und die Standardabweichung zu 1,92 kNm (Abb. 40). Der 5 % Fraktilwert lag bei 67,7 kNm.

Schließlich wurden durch FE-Vergleichsrechnungen mit einer sinus-halbwellenförmigen Ersatzimperfektion Vorkrümmung iterativ die Amplitude der Ersatzimperfektion, die eine vergleichbare Tragfähigkeit erzeugt, berechnet. Der errechnete 5 % Fraktilwert der strukturellen Ersatzimperfektion Vorkrümmung betrug  $e_y \approx L/550$ .

Da die Annahme der Unabhängigkeit der Materialkennwerte innerhalb einer Lamelle (rechts / links, Abb. 39) weit auf der sicheren Seite liegt und unsortierte Lamellen modelliert wurden, ist davon auszugehen, dass für die tatsächliche strukturelle Ersatzimperfektion von BSH Trägern  $e_y \ll L/550$  gilt.

Im Kontext der ähnlich großen strukturellen Imperfektionen von BSH Stützen die Theiler [39] festgestellt hat (siehe Kapitel 3.2) und, dass der Einfluss struktureller Imperfektionen von BSH Stützen durch die Annahme nomineller (charakteristischer) Werte für Festigkeiten, Steifigkeiten und geometrische Imperfektionen abgedeckt zu werden scheint ([1] bis [4]), kann davon ausgegangen werden, dass auch bei BSH Träger durch die Annahme nomineller (charakteristischer) Werte für Material und geometrische Ersatzimperfektionen der Einfluss struktureller Imperfektionen erfasst wird.



**Abb. 40:** Häufigkeitsverteilung der numerisch ermittelten Trägertragfähigkeiten bei Berücksichtigung struktureller Imperfektionen [27].



Weitere Untersuchungen des Einflusses struktureller Imperfektionen auf das Tragverhalten biegedrillknickgefährdeter Träger sind sinnvoll, sobald gesicherte Erkenntnisse über die Variation von Materialeigenschaften über die Lamellenbreite bekannt sind.

## 7. Vergleich mit Literaturwerten

### 7.1. Vorkrümmungen

In Tab. 3 sind die Ergebnisse der Ersatzvorkrümmungen  $e_y$  der hier präsentierten Untersuchungen den Messungen von Blaß und Ehlbeck [3], Brüninghoff [6] und Dietsch und Henke [8] an BSH Bauteilen und Annahmen in den DIN EN 1995-1-1 [11] gegenübergestellt. Bei Brüninghoff [6] und Dietsch und Henke [8] wurden keine 95 % Quantilwerte ermittelt, da zu wenige Messwerte vorhanden sind.

Die Messergebnisse von Larsen und Theilgaard [29] wurden nicht berücksichtigt, da sich diese auf kleine Vollholzquerschnitte beziehen.

**Tab. 3:** Ermittelte geometrische Ersatzimperfectionen Vorkrümmung  $e_y / L$  im Vergleich zu Messergebnissen aus der Literatur und DIN EN 1995-1-1 [11].

	Mittelwert [mm/m]	Standardabw. [mm/m]	95 % Quantil [mm/m]	Anzahl der Messwerte
BSH Träger	1 / 2290	1 / 2790	1 / 880	202
BSH Träger ohne Ausreißer <sup>1</sup>	1 / 2790	1 / 3540	1 / 1180	177
FSH GL75 Träger + Stützen	1 / 3540	1 / 5260	1 / 1730	95
Blaß und Ehlbeck [3]	1 / 2820	1 / 3550	1 / 1140	176
Brüninghoff [6]	1 / 780	1 / 7000	-	13
Dietsch und Henke [8]	1 / 1720	1 / 1830	-	7
$k_c$ Verfahren EC5 [11]	-	-	$\approx 1 / 1100$	-
Th. 2. O. EC5 [11]	-	-	1 / 400	-

<sup>1</sup> Ausreißer sind Vorkrümmungen bei Bauvorhaben 2020-KW27 und 2020-KW45\_1.1.

Die in diesem Projekt ermittelten geometrischen Ersatzimperfectionen Vorkrümmung von BSH und FSH Trägern und Stützen sind sehr ähnlich wie die von Blaß und Ehlbeck [3] vor knapp 40 Jahren gemessenen Werte von BSH Stützen. Da die Messwerte von Blaß und Ehlbeck [3] zudem teils Einflüsse aus Kriechen und Belastung enthalten, scheint es keine signifikante Verbesserung der produktionsbedingten Bauteilvorkrümmung in diesem Zeitraum gegeben zu haben. Die montagebedingten und die produktionsbedingten Bauteilvorkrümmungen schlanker BSH Träger sind in der gleichen Größenordnung wie die rein produktionsbedingten Bauteilvorkrümmungen von BSH Stützen. Für FSH GL75 Stützen und Träger ergaben sich etwas günstigere Werte als für BSH Träger, was durch eine höhere Fertigungsgenauigkeit und/oder die gedrungeneren Querschnitte bedingt sein könnte.

Brüninghoff [6] maß größere Vorkrümmungen für BSH Träger an einem einzelnen Bauvorhaben. Der ermittelte hohe Mittelwert könnte im Vergleich mit den eigenen Messergebnissen auf eine verbesserte Montagegenauigkeit in den letzten 50 Jahren hinweisen.

Die Messwerte von Dietsch und Henke [8] sind etwas ungünstiger als die eigenen Ergebnisse, allerdings beinhalten diese zusätzlich Einflüsse aus Kriechen und Belastung. Unter Berücksichtigung dessen fügen sich die Werte gut ins Gesamtbild der Messergebnisse ein.



Die in DIN EN 1995-1-1 [11] indirekt im Ersatzstabverfahren Biegeknicken ( $k_c$  Verfahren) hinterlegte geometrische Ersatzimperfektion Vorkrümmung von ca.  $L/1100$  ( $\beta_c = 0,10$ ) stimmt gut mit dem 95 % Quantilwert der eigenen Messergebnisse bei Vernachlässigung der Ausreißer überein.

Die für Theorie 2. Ordnung (Th. 2. O.) Berechnungen in DIN EN 1995-1-1 [11] angegebene geometrische Ersatzimperfektion Vorkrümmung von  $L/400$  ist dagegen deutlich größer, passt eher zu den Messergebnissen von Brüninghoff [6] und könnte anhand dieser validiert worden sein. Aufgrund offensichtlich deutlich verbesserter Werte, die anhand einer deutlich größeren Stichprobe ermittelt wurden, scheint es zweckmäßig, diesen Wert anzupassen.

## 7.2. Vortordierungen

In Tab. 4 sind die Ergebnisse der geometrischen Ersatzimperfektionen Vortordierung in Feldmitte  $e_9 \times H / L$  der hier präsentierten Untersuchungen den Messungen von Brüninghoff [6] und Dietsch und Henke [8] an BSH Bauteilen und den Annahmen in DIN EN 1995-1-1 [11] gegenübergestellt.

Es sind keine Messungen zu Vortordierungen an Auflagern von Holzträgern bekannt. Die Messergebnisse von Larsen und Theilgaard [29] wurden nicht berücksichtigt, da sich diese auf kleine Vollholzquerschnitte beziehen.

**Tab. 4:** Ermittelte geometrische Ersatzimperfektionen Vortordierung in Feldmitte  $e_9 \times H / L$  im Vergleich zu Messergebnissen aus der Literatur und DIN EN 1995-1-1 [11].

	Mittelwert [mm/m]	Standardabw. [mm/m]	95 % Quantil [mm/m]	Anzahl der Messwerte
BSH und FSH Träger	1 / 5430	1 / 5170	1 / 1590	240
Brüninghoff [6]	keine	keine	keine	13
Dietsch und Henke [8]	1 / 6500	1 / 4490	-	7
$k_m$ Verfahren EC5 [11]	keine	keine	keine	keine
Th. 2. O. EC5 [11]	keine	keine	keine	keine

Brüninghoff [6] berichtete, dass keine Vorverdrillungen ( $\cong$  Vortordierungen) festgestellt werden konnten. Ebenso werden in den aktuellen Bemessungsverfahren nach DIN EN 1995-1-1 [11], die auf den Untersuchungen von Brüninghoff und Heimeshoff [17] beruhen, keine Vortordierungen berücksichtigt.

Messungen von Dietsch und Henke [8] und die eigenen Messungen ergaben dahingegen ähnliche Werte für Vortordierungen von Trägern in Feldmitte.

Die ermittelten Vortordierungen in Feldmitte betragen ca.  $2/3$  der ermittelten Vorkrümmungen, haben jedoch durchaus einen signifikanten Einfluss auf die numerische Biegedrillknickberechnung in Kapitel 5. Bei kleinen Vorkrümmungen waren die Vortordierungen teils maßgebend. Es wird deshalb empfohlen bei der Biegedrillknickbemessung den Einfluss der Vortordierung zu berücksichtigen.



### 7.3. Stützenschiefstellungen

In Tab. 5 sind die Ergebnisse der Stützenschiefstellungen  $e_{\phi}$  der hier präsentierten Untersuchungen an Stützen aus Buchen FSH GL75 den Messungen von Blaß und Ehlbeck [3] an BSH Stützen und den Annahmen in DIN EN 1995-1-1 [11] gegenübergestellt.

**Tab. 5:** Ermittelte Stützenschiefstellungen  $e_{\phi}$  im Vergleich zu Messergebnissen aus der Literatur und DIN EN 1995-1-1 [11].

	Mittelwert [mm/m]	Standardabw. [mm/m]	95 % Quantil [mm/m]	Anzahl der Messwerte
FSH Stützen	1 / 1000	1 / 1140	1 / 380	114
Blaß und Ehlbeck [3]	1 / 495	1 / 560	1 / 187	176
Th. 2. O. EC5 [11]	-	-	1 / 200	-

Die in diesem Projekt ermittelten Schiefstellung von FSH Stützen waren ca. halb so groß wie die von Blaß und Ehlbeck [3] gemessenen Werte für BSH Stützen. Dies könnte entweder in der erhöhten Montagegenauigkeit oder der hier präsentierten Stichprobe begründet sein.

Die in DIN EN 1995-1-1 [11] angegebene Stützenschiefstellung entspricht dem 95 % Quantilwert der Messungen von Blaß und Ehlbeck [3].

Es ist an dieser Stelle zu erwähnen, dass die (montagebedingten) Stützenschiefstellungen in den aktuellen Eurocodes materialübergreifend abgestimmt wurden. Lindner und Giezelt [31] haben für den Stahlbau aus Messungen eine reine geometrische Schiefstellung von 1/400 hergeleitet. Mit der Erhöhung von 1/400 auf 1/200 werden im Stahlbau die strukturellen Imperfektionen und der Einfluss des Plastizierens erfasst.



## 8. Bemessungsempfehlungen

Für die Bauteilbemessung von Stützen und Trägern aus BSH und Buchen-Furnierschichtholz GL75 werden die Ersatzimperfektionen nach Gl. (3) bis (9) empfohlen.

- Bemessungsvorschlag – Ersatzimperfektion Vorkrümmung von BSH Trägern:

$$e_y = \frac{L}{800} \quad (3)$$

Bei entsprechender bauseitiger Kontrolle kann der Wert auf  $e_y = \frac{L}{1000}$  reduziert werden.

- Bemessungsvorschlag – Ersatzimperfektion Vorkrümmung von BSH Stützen:

$$e_y = \frac{L}{1000} \quad (4)$$

- Bemessungsvorschlag – Ersatzimperfektion Vorkrümmung von Buchen-Furnierschichtholz GL75 Trägern und Stützen:

$$e_y = \frac{L}{1500} \quad (5)$$

- Bemessungsvorschlag – Ersatzimperfektion Vortordierung am Gabellager von BSH und Buchen-Furnierschichtholz GL75 Trägern:

Gabellager mit niedrigen Toleranzen <sup>1</sup>:

$$e_{\theta, \text{Aufl}} = \frac{1}{200} \quad (6)$$

<sup>1</sup> Als Gabellager mit niedrigen Toleranzen zählen Beihölzer und vergleichbare Konstruktionen.

Gabellager mit hohen Toleranzen <sup>2</sup>:

$$e_{\theta, \text{Aufl}} = \frac{1}{100} \quad (7)$$

<sup>2</sup> Als Gabellager mit hohen Toleranzen zählen Stahlbetonauflagertaschen und vergleichbare Konstruktionen.

- Bemessungsvorschlag – Ersatzimperfektion Vortordierung in Feldmitte von BSH und Buchen-Furnierschichtholz GL75 Trägern:

$$e_{\theta, \text{Mitte}} = \frac{L}{1500 H_{\text{Mitte}}} \quad (8)$$

- Schiefstellung von Holzstützen nach DIN EN 1995-1-1 [11]:

$$e_{\Phi} = \frac{1}{200} \quad \text{für } L \leq 5 \text{ m, sonst: } e_{\Phi} = \frac{1}{200} \sqrt{\frac{5000}{L}} \quad (9)$$



Mit  $L$  = Träger- oder Stützenlänge im Sinne der Spannweite des statischen Systems und  $H_{\text{Mitte}}$  = Trägerhöhe in Feldmitte. Alle Einheiten in [mm].

Es ist die ungünstigste Kombination der Ersatzimperfectionen zu ermittelt und in der Bemessung anzusetzen. Dies gilt insbesondere für die Kombination von Vorkrümmungen und Vortordierungen (an Auflagern und in Feldmitte) von biegedrillknickgefährdeten Trägern. Bei Stützen sind keine Überlagerungen der Imperfectionen die beiden Richtungen senkrecht zur Stabachse vorzunehmen, da diese Effekte durch die angegebenen Ersatzimperfectionen erfasst sind.

Abweichend zu Gl. (3) bis (9) können geringere Ersatzimperfectionen angenommen werden, wenn deren Einhaltung durch bauseitige Kontrollen sichergestellt wird.

Die erarbeiteten Bemessungsempfehlungen wurden in der Normungsgruppe „CEN/TC 250/SC 5/WG 3 TG Imperfections“ diskutiert und fließen in die aktuelle Überarbeitung des EN 1995-1-1 ein.

Das Ersatzstabverfahren Biegedrillknicken ( $k_m$  Verfahren) nach DIN-EN-1995-1-1 [11] liegt in Bezug auf die ermittelten Ersatzimperfectionen auf der sicheren Seite. Eine Überarbeitung und wirtschaftliche Optimierung des Nachweises wird im Rahmen des Forschungsprojektes IGF - 21285 N „Optimierung des Ersatzstabverfahrens für biegedrillknickgefährdete Bauteile aus Holz unter Momenten-Normalkraft-Belastung“ [25] durchgeführt.

Die Bemessung biegeknickgefährdeter Stützen aus Buchen FSH GL75 wurde im Forschungsprojekt DFG EXC 2120/1 – 390831618 [26] untersucht und von Töpler und Kuhlmann [41] diskutiert.



## 9. Zusammenfassung

Die Holztragwerke von 23 Bauvorhaben wurden mit einem Laserscanner vermessen und die Daten von 202 BSH Bindern, 38 Buchen-Furnierschichtholz GL75 Bindern und 57 Buchen-Furnierschichtholz GL75 [14] Stützen in Bezug auf die Vorverformungen der Bauteile und die daraus resultierenden geometrischen Ersatzimperfectionen ausgewertet. Ein Teil der Ergebnisse wurde in [24] diskutiert.

Die Messungen wurden direkt nach Montage und Ausrichten der Tragwerke im möglichst wenig belasteten Zustand durchgeführt. Die gemessenen geometrischen Imperfectionen beinhalteten somit insbesondere Einflüsse aus Montage, Transport und Fertigung und keine (bzw. vernachlässigbar kleine) Einflüsse aus der Belastung und dem Langzeitverhalten. Laserscanning hat sich als sehr gut geeignet für eine flexible und schnelle Vermessung von Tragwerken bei hoher Messgenauigkeit erwiesen.

Es wurde in Matlab ein Auswertungsskript für Punktwolken von Trägern und Stützen zur Verarbeitung der großen Datenmengen entwickelt. Zur Ermittlung von geometrischen Ersatzimperfectionen zur Abbildung der gemessenen geometrischen Imperfectionen wurden numerische Vergleichsberechnungen mit Abaqus CAE/2020 durchgeführt. Das entwickelte Verfahren D (Kapitel 5.2.2) zur direkten Ermittlung der Amplitude sinus-halbwellenförmiger geometrischer Ersatzimperfectionen aus den gemessenen geometrischen Imperfectionen lieferte gute Ergebnisse und kann für weitere Auswertungen gemessener Imperfectionen empfohlen werden. Des Weiteren wurden Ansätze mehrwelliger sinus-förmiger geometrischer Ersatzimperfectionen über die Trägerlänge untersucht. Da diese jedoch deutlich aufwändiger und in der Baupraxis schwer umsetzbar sind, wurden diese wieder verworfen und alle geometrischen Ersatzimperfectionen in Form einer Sinus-Halbwellen angenommen.

Der Einfluss struktureller Imperfectionen wurde in Kapitel 6 mit einem vereinfachten FE-Modell auf Basis des Karlsruher Rechenmodells untersucht. In Kombination mit den Ergebnissen der Untersuchungen von Blaß und Ehlbeck [4] kann davon ausgegangen werden, dass der Einfluss struktureller Imperfectionen durch die Annahme nomineller (charakteristischer) Werte für Festigkeiten, Steifigkeiten und geometrische Imperfectionen abgedeckt wird.

Es konnte kein signifikanter Einfluss der Möglichkeit eines seitlichen Ausrichtens der Binder während der Montage auf die Vorkrümmung festgestellt werden. Jedoch hat eine ungenügende Ausrichtung während der Montage einen wesentlichen Einfluss. Ausreißer der Imperfectionen von Trägern können durch entsprechende Kontrollen während der Montage verhindert werden. Für alle gemessenen Imperfectionen galt, dass die Bemessungsansätze nach DIN EN 1995-1-1 [11] auf der sicheren Seite liegen.

Vorkrümmungen von Trägern, die durch Druckpfetten gekoppelt sind, werden maßgeblich durch die Ausrichtung des Dachverbandes während der Montage beeinflusst. An einem Dachverband angeschlossene Träger sind in der Regel in die gleiche Richtung vorgekrümmt. Vortordierungen werden dahingegen maßgeblich durch die Ausrichtung der einzelnen Träger an den Auflagern beeinflusst und können somit für nebeneinanderliegende Träger sehr unterschiedlich sein. Die Vorkrümmungen von Stützen sind im Wesentlichen produktionsbedingt. Die Schiefstellungen von Stützen sind im Wesentlichen montagebedingt.

Der 95 % Quantilwert der ermittelten geometrischen Ersatzimperfectionen Vorkrümmung von 202 BSH Trägern lag bei  $e_y = L/880$ . Durch die Vernachlässigung von Ausreißern, die durch entsprechende

bauseitige Kontrollen vermieden werden können, konnte der Wert auf  $e_y = L/1180$  (177 BSH Träger) reduziert werden. Die geometrischen Ersatzimperfectionen Vortordierung von 202 BSH und 38 Buchen FSH GL75 Trägern in Feldmitte betragen ca. 2/3 der Vorkrümmungen mit einem 95 % Quantilwert von  $e_{9,Mitte} \times H_{Mitte} = L / 1590$ . Vortordierungen haben einen signifikanten Einfluss auf das Biegedrillknickverhalten schlanker Träger und sind zu berücksichtigen. Weitere Ergebnisse zur Vortordierungen von BSH Trägern an den Auflagern, Imperfectionen von Buchen FSH GL75 Trägern und Stützen sind in Kapitel 4.6.5 und 5.3 dargestellt.

Bei den produktionsbedingten Bauteilvorkrümmungen konnte keine signifikante Veränderung im Vergleich zu den Messwerten von Blaß und Ehlbeck [3] festgestellt werden. Insgesamt stimmen Messwerte aus der Literatur und die in diesem Projekt ermittelten Imperfectionen gut überein.

Es wurden Bemessungsempfehlungen für Ersatzimperfectionen von Stützen und Trägern aus BSH und Buchen FSH GL75 erarbeitet und in Kapitel 8 vorgestellt. Diese schlagen erstmals konsistente Imperfectionsansätze für Stützen und Träger für die Bemessung mit den Ersatzstabverfahren und anhand von Theorie II. Ordnung Berechnungen vor. Diese Empfehlungen wurden in der Normungsgruppe „CEN/TC 250/SC 5/WG 3 TG Imperfections“ diskutiert und fließen in die Überarbeitung des EN 1995-1-1 ein.

In Tab. 6 ist der abgeschlossene Arbeitsplan dargestellt.

**Tab. 6:** Übersicht Arbeitszeitplan (abgeschlossen).

		2020				2021				2022	
		I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II
Imperfektionsmessungen	Vorbereitung Messungen	■	■								
	Durchführung der Messungen		■	■	■	■	■	■	■	■	
	Auswertung Messergebnisse		■	■	■	■	■	■	■	■	■
Ermittlung Ersatzimperfectionen	Auswertung der Literatur bzgl. struktureller Imperfektionen					■	■				
	FE-Berechnungen inkl. geometr. + strukt. Imperfektionen				■	■	■	■	■	■	■
	Rückrechnung von Ersatzimperfectionen				■	■	■	■	■	■	■
Anwendung / Aufbereitung Ergebnisse	Vergleich mit Literatur, Auswertung bzgl. Sicherheitsni-									■	■
	Erarbeitung Vorschlag für Ersatzimperfectionen										■
	Schlussbericht										■



## 10. Ausblick

Die erarbeiteten Bemessungsempfehlungen wurden in der Normungsgruppe „CEN/TC 250/SC 5/WG 3 TG Imperfections“ diskutiert und fließen in die aktuelle Überarbeitung von EN 1995-1-1 ein. Dies geschieht in Abstimmung mit dem neuen „Execution“ Teil des Eurocode 5.

Das Ersatzstabverfahren Biegedrillknicken ( $k_m$  Verfahren) nach DIN EN 1995-1-1 [11] liegt in Bezug auf die ermittelten Ersatzimperfektionen auf der sicheren Seite. Eine Überarbeitung und wirtschaftliche Optimierung des Nachweises wird im Rahmen des Forschungsprojektes IGF - 21285 N „Optimierung des Ersatzstabverfahrens für biegedrillknickgefährdete Bauteile aus Holz unter Momenten-Normalkraft-Belastung“ [25] durchgeführt.

Die Bemessung biegeknickgefährdeter Stützen aus Buchen FSH GL75 wurde im Forschungsprojekt DFG EXC 2120/1 – 390831618 / RP7 [26] untersucht, von Töpler und Kuhlmann in [41] diskutiert und Bemessungsempfehlungen für den Nachweis des Biegeknickens von Buchen FSH GL75 Stützen unter Berücksichtigung der gemessenen geometrischen Imperfektionen entwickelt [41].

Die Messergebnisse können zudem für Untersuchungen des Torsionsmoments am Gabellager, der Stabilisierungslasten von Dachverbänden und des Langzeitverhaltens von imperfektionsempfindlichen Trägern genutzt werden.

Da immer die gesamten Gebäude vermessen wurden, sind zudem umfangreiche Daten zu sekundären Bauteilen und auch eingespannten Stahlbetonstützen vorhanden, die in Bezug auf Montagetoleranzen ausgewertet werden können. Die Datensätze der Messungen, Auswertungs- und Berechnungsskripte werden im Datenrepositorium der Universität Stuttgart (DaRUS) zur Verfügung gestellt.

Sobald gesicherte Erkenntnisse über die Variation von Materialeigenschaften über die Lamellenbreite von Brettschichtholzträgern vorliegen, sind weitere Untersuchungen des Einflusses struktureller Imperfektionen auf das Tragverhalten biegedrillknickgefährdeter Träger wünschenswert.

## 11. Danksagung

Das Forschungsvorhaben (P 52-5- 13.194-2048/19) wurde mit finanzieller Förderung des Deutschen Institutes für Bautechnik (DIBt) durchgeführt. Für die Unterstützung wird herzlich gedankt.

Für die Ermöglichung der Vermessung von Gebäuden einen ganz herzlichen Dank an: Architekturbüro Rohloff & Wespel, Blättler Holzbau GmbH, Egger + Ingenieure GmbH, GMS Partner AG, GöSta Hallenbau GmbH, Haas Fertigungsbau GmbH, Heni Architekten, Implenia Schweiz AG, Pollmeier Massivholz GmbH & Co. KG, Schaffitzel Holzindustrie GmbH & Co. KG, Schnackenberg Holzbau GmbH und WIEHAG GmbH (in alphabetischer Reihenfolge).

Für die Durchführung des Laserscannings und die Beratung bei der Auswertung einen ganz herzlichen Dank an das Institut für Photogrammetrie (IfP) der Universität Stuttgart und insbesondere an Lena Joachim und Edward Necşulescu.

Vielen Dank an Philip Bockius und Florijan Kuqi für die Diskussionen und die Unterstützung im Rahmen der projektbegleitenden Masterarbeiten.



## 12. Literaturverzeichnis

- [1] Blaß, H. J.: *Tragfähigkeit von Druckstäben aus Brettschichtholz unter Berücksichtigung streuender Materialeigenschaften*. Dissertation, Universität Fredericiana zu Karlsruhe, 1987.
- [2] Blaß, H. J.: *Traglastberechnung von Druckstäben aus Brettschichtholz*. In: Bauingenieur, 63, S. 245–251, 1988.
- [3] Blaß, H. J.; Ehlbeck, J.: *Imperfektionsannahmen für Holzdruckstäbe*. In: Holz als Roh- und Werkstoff, 45, S. 231–235, 1987.
- [4] Blaß, H. J.; Ehlbeck, J.: *Zuverlässigkeit von Holzdruckstäben*. Forschungsbericht. Universität Fredericiana zu Karlsruhe, 1987.
- [5] Bockius, P.: *Ermittlung geometrische Ersatzimperfektionen biegedrillknickgefährdeter Holzträger anhand gemessener geometrischer Imperfektionen*. Masterarbeit, Institut für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart, 2021.
- [6] Brüninghoff, H.: *Spannungen und Stabilität bei quergestützten Brettschichtholzträgern*. Dissertation. Universität Karlsruhe, 1973.
- [7] Brüninghoff, H.; Cyron, G.; Ehlbeck, J.; Franz, J.; Heimeshoff, B.; Milbrandt, E.; Möhler, K.; Radović, B.; Scheer, C.; Schulze, H.; Steck, G.: *Holzbauwerke - Eine ausführliche Erläuterung zu DIN 1052, Teil 1 bis Teil 3 mit den Änderungen A 1*. Ausgabe Oktober 1996, Beuth Verlag GmbH, 1997.
- [8] Dietsch, P.; Henke, K.: *Verformungsmessungen an weitgespannten Brettschichtholzträgern zur Ermittlung horizontaler Verformungen*. Forschungsbericht, Technische Universität München, 2010.
- [9] Dill-Langer, G.: *Tragfähigkeit und Baupotenziale von Buchen-Furnierschichtholz*. In: Internationales Holzbau Forum (IHF), Garmisch, 2014.
- [10] DIN 1052: *Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken – Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, 2004.
- [11] DIN EN 1995-1-1: *DIN EN 1995-1-1 : Bemessung und Konstruktion von Hochbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, 2010.
- [12] DIN EN 1995-1-1/NA: *Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – DIN EN 1995-1-1 : Be-messung und Konstruktion von Hochbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, 2013.
- [13] DIN EN 14080: *Holzbauwerke – Brettschichtholz und Balkenschichtholz – Anforderungen*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, 2013-09.
- [14] ETA-14/0354: *Träger BauBuche GL75*. Österreichisches Institut für Bautechnik (OIB), Wien, 2018.



- [15] Fischer, L.: *Charakteristische Werte - ihre Bedeutung und Berechnung*. In: Bauingenieur, 78, S. 179–187, 2003.
- [16] Frese, M.: *Computergestützte Verfahren zur pragmatischen Beurteilung der Tragwiderstände von Brettschichtholz: Zusammenfassung exemplarischer Simulationsstudien*. Habilitation, Karlsruher Institut für Technologie, 2016.
- [17] Heimeshoff, B.: *Berechnung und Ausführung von Holzbauwerken*. In: Ingenieur-Holzbau 86 - Fachtagung für Bauingenieure, Stuttgart, 1986.
- [18] Kessel, M. H.: *Imperfektionen von satteldachförmigen Fachwerkträgern aus Holz*. Forschungsbericht, Technische Universität Braunschweig, 2012.
- [19] Kessel, M. H.; Kühl, A.; Hall, C.: *Überprüfung und Ergänzung der Imperfektionsannahmen und Montageregeln der DIN EN 1995-1-1 für Nagelplattenkonstruktionen zur Steigerung ihrer Sicherheit und Wirtschaftlichkeit*. Forschungsbericht, Fraunhofer IRB Verlag, 2015.
- [20] Kessel, M. H.; Mertinaschk, A.: *Imperfektionsmessungen an Nagelplattenbindern*. Forschungsbericht, Technische Universität Braunschweig, 2001.
- [21] Kessel, M. H.; Sieder, M.; Kreuzinger, H.: *Personal contribution by Martin H. Kessel, Mike Sieder and H. Kreuzinger (DE): Bracing of the main girder of a pedestrian bridge*. CEN/TC 250/SC 5/WG 3 N 153, 2020.
- [22] Kolodziejczyk, A.; Höller, T.; Maurer, R.; et al.: *Untersuchungen zum Ansatz der Vorverformungen beim Nachweis der Kippsicherheit schlanker Träger*. In: Beton- und Stahlbetonbau, 111, 7, S. 408–418, 2016.
- [23] Kuhlmann, U.; Töpler, J.: *Experimentelle und numerische Untersuchungen von Brettschichtholz aus Buchen-Furnierschichtholz (BauBuche)*. In: Doktorandenkolloquium Holzbau Forschung und Praxis. online, 2022.
- [24] Kuhlmann, U.; Töpler, J.: *Imperfections of slender glulam beams*. In: International Network on Timber Research (INTER), 54-12-3, online, 2021.
- [25] Kuhlmann, U.; Töpler, J.: *Optimierung des Ersatzstabverfahrens für biegedrillknickgefährdete Bauteile aus Holz unter Momenten-Normalkraft-Belastung*. Forschungsprojekt IGF - 21285 N Institut für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart, 2021 bis 2023.
- [26] Kuhlmann, U.; Töpler, J.; Gauß, J.; Buchholz, L.: *Integrated approach of testing and numerical verifications (IATN)*. Forschungsprojekt RP 7, DFG Exzellenzcluster “Integrative Computational Design and Construction for Architecture”, EXC 2120/1 – 390831618, Institut für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart, 2019 bis 2022.
- [27] Kuqi, F.: *Zum Einfluss struktureller Imperfektionen auf das Tragverhalten biegedrillknickgefährdeter Holzbauteile*. Masterarbeit. Institut für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart, 2021.
- [28] Larsen, H. J.: *Laterally Loaded Timber Columns, Tests and Theory*. In: CIB-W18, 8-15-1, 1977.



- [29] Larsen, H. J.; Theilgaard, E.: *Laterally Loaded Timber Columns*. In: Journal of Structural Division, ST7, S. 1347–1363, 1979.
- [30] Leica Geosystems AG: *Leica ScanStation P20*. Benutzerhandbuch, 2013.
- [31] Lindner, J.; Giezelt, R.: *Imperfektionsannahmen für Stützenschiefstellungen*. In: Stahlbau, 53, 4, S. 97–101, 1984.
- [32] Maaß, G.; Rackwitz, R.: *Statistische Untersuchungen von geometrischen Abweichungen an ausgeführten Stahlbetonstützen, Teil 1: Geometrische Imperfektionen bei Stahlbetonstützen*. Forschungsbericht Technische Universität München, 1976.
- [33] MathWorks: Matlab Documentation, <https://de.mathworks.com/help/matlab/>, accessed on 13.09.2022.
- [34] Neuhaus, F.-H.: *Elastizitätszahlen von Fichtenholz in Abhängigkeit der Holzfeuchtigkeit*. Dissertation, Ruhr Universität Bochum, 1981.
- [35] Pawlowski, R.; Henke, K.; Schregle, P.; et al.: *Überwachung von Bauwerksverformungen mittels digitaler Bildverarbeitung*. In: Bauingenieur, 88, 5, S. 214–221, 2013.
- [36] Sieder, R.; Brandner, R.: *Tensile properties of lengthwise split boards and their application in engineered timber products*. In: Doktorandenkolloquium Holzbau Forschung und Praxis, online, 2022.
- [37] Stoffregen, U.; König, G.: *Schiefstellung von Stützen in vorgefertigten Skelettbauten*. In: Beton- und Stahlbetonbau, 74, 1, S. 1–5, 1979.
- [38] Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V.: *Herstellung und Eigenschaften von geklebten Vollholzprodukten*. holzbau handbuch, Reihe 4, Teil 2, Folge 2, 2019.
- [39] Theiler, M.: *Stabilität von axial auf Druck beanspruchten Bauteilen aus Vollholz und Brett-schichtholz*. Dissertation. ETH Zürich, 2014.
- [40] Töpler, J.; Buchholz, L.; Sabrina, M.; Kuhlmann, U.: *Guidelines for a Finite Element Based Design of Timber Structures*. Mitteilung Nr. 2022-36X, Institut für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart, 09-2022.
- [41] Töpler, J.; Kuhlmann, U.: *In-plane buckling of beech LVL columns*. In: International Network on Timber Research (INTER), 55-2-1, Bad Aibling, 2022.



## Anhang A Messergebnisse



### A.1 Messergebnisse – Testmessung MPA Stuttgart

Bauort	70369 Stuttgart, Pfaffenwaldring 4a						
Messdatum	18.02.2020						
Hersteller Holzbauteile	unbekannt						
Montagefirma	unbekannt						
Bauteile	Anzahl	Form	L [mm]	H <sub>max</sub> [mm]	H <sub>min</sub> [mm]	Breite [mm]	Material
	3		13.500	800	unbekannt	180	unbekannt
Aussteifungstyp	keine						
Gabellagerung	Stahlbeton Auflagertaschen						
Belastung (zum Zeitpunkt d. Messung)	Eigengewicht der gesamten Dachkonstruktion						
Lufttemperatur	-						
Luftfeuchtigkeit	-						
Holzfeuchtigkeit	-						
Bemerkungen	-						

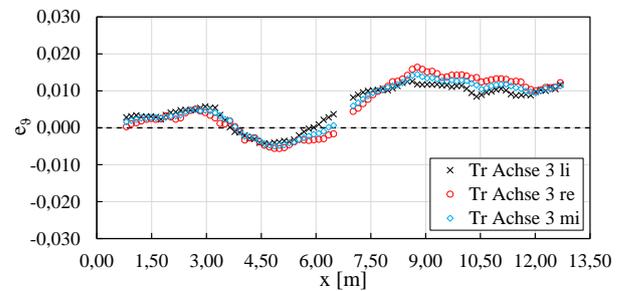
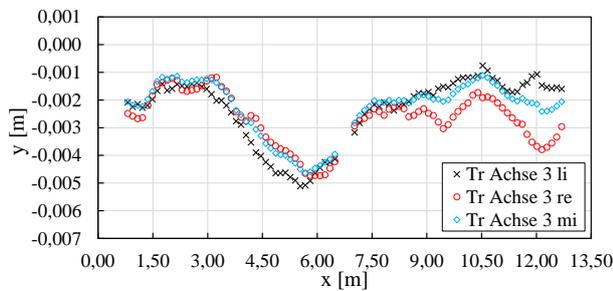
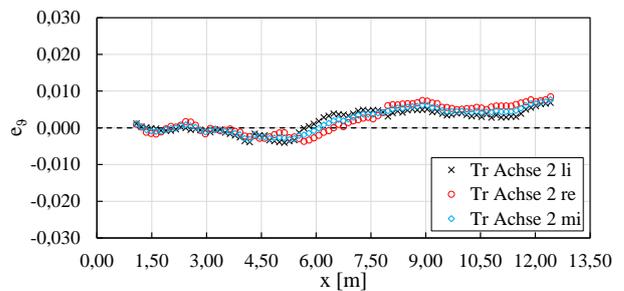
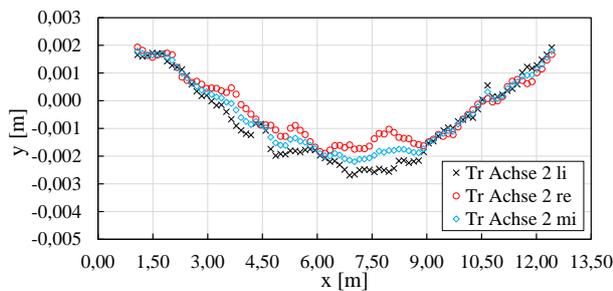
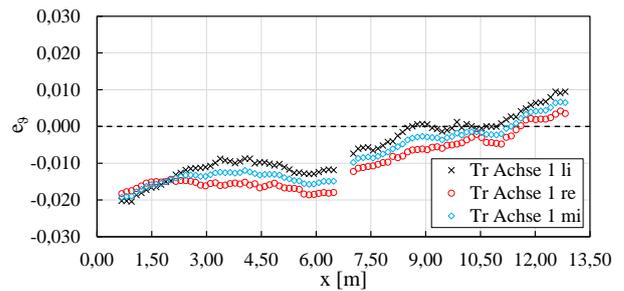
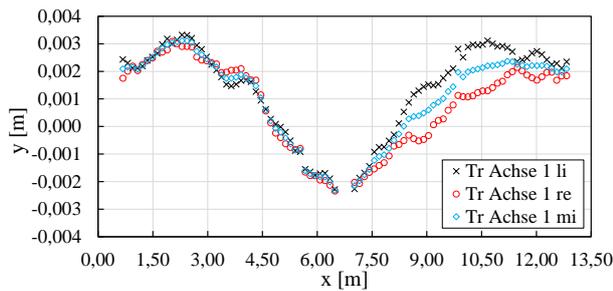
**Beschreibung des Bauvorhabens** Es handelt sich um eine bestehende zweigeschossige Lagerhalle mit ca. 14,5 m spannenden BSH Satteldachbindern mit zweiseitigen Kragarmen auf Stahlbetonstützen. Die Aussteifung erfolgt über die eingespannten Stahlbetonstützen.



Abb. 41: Testmessung MPA Stuttgart

Auffälligkeiten Messergebnisse:

- Vorkrümmungen:
  - alle Binder in die gleiche Richtung vorgekrümmt
  - Form  $e_y$  eines Binders teilweise eine sinus-Halbwellen
  - Maximalwert ca. in Feldmitte und ähnlich groß (0,004 - 0,007 m)
- Vortordierungen:
  - maximale Vortordierung der Binder in unterschiedliche Richtungen, aber eine ähnliche Form bei benachbarten Bindern
  - $e_z$  wechselt teils das Vorzeichen über die Länge
  - oft Maximalwerte an den Auflagern, die das Gesamtbild der Form der Vortordierung prägen



**Abb. 42:** Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der BSH Binder der Testmessung an der MPA Stuttgart



**A.2 Messergebnisse – Bauvorhaben 2020-KW23**

Bauort	73278 Schlierbach						
Messdatum	03.06.2020						
Hersteller Holzbauteile	H_A						
Montagefirma	M_A						
Bauteile	Anzahl	Form	L [mm]	H <sub>max</sub> [mm]	H <sub>min</sub> [mm]	Breite [mm]	Material
	4		14.460	910	760	180	GL 28c
Aussteifungstyp	Dachverband (Achse 4-5)						
Gabellagerung	Beihölzer						
Belastung <i>(zum Zeitpunkt d. Messung)</i>	Eigengewicht der Holzbauteile						
Lufttemperatur <i>(ca. 1,0 m über GOK)</i>	29,3 °C						
Luftfeuchtigkeit <i>(ca. 1,0 m über GOK)</i>	30,3 %						
Holzfeuchtigkeit	11,1 % (Binder Achse 5) 10,7 % (Stütze Achse A/1) 10,7 % (Pfette Achse 4-5)						
Bemerkungen	-						

**Beschreibung des Bauvorhabens** Es handelt sich um den Neubau einer eingeschossigen Lagerhalle mit ca. 14,5 m spannenden BSH Satteldachbindern mit einseitigem Kragarm auf BSH Stützen. Die Aussteifung erfolgt über Dach- und Wandverbände aus Stahl.



**Abb. 41:** Bauvorhaben 2020-KW23 zum Zeitpunkt der Messung

Auffälligkeiten Messergebnisse:

- Vorkrümmungen:
    - alle Binder in die gleiche Richtung vorgekrümmt
    - Form  $e_y$  eines Binders annähernd eine sinus-Halbwellen
    - Maximalwert ca. in Feldmitte und ähnlich groß (0,005 - 0,010 m)
    - am Dachverband Achse 4-5 geringste maximale Vorkrümmungen
  - Vortordierungen:
    - alle Binder in die gleiche Richtung vortordiert
    - gesamtes  $e_9$  eines Binders in gleiche Richtung
    - geringe Werte an Auflagern und Maximalwerte ähnlich groß (-0,005)
- kein Zusammenhang zwischen Lage Dachverband und max.  $e_9$

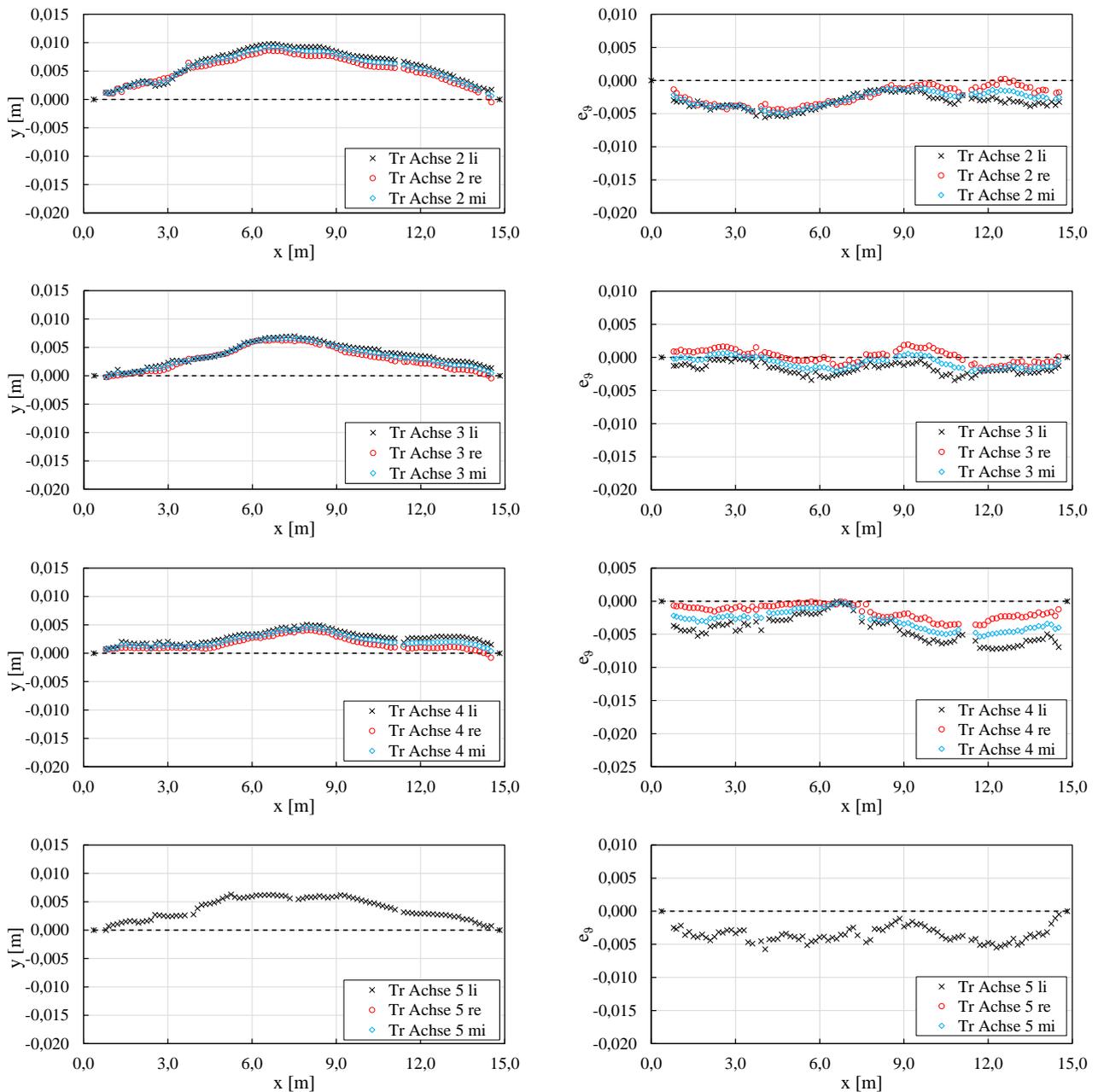


Abb. 42: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der BSH Binder des Bauvorhabens 2020-KW23

### A.3 Messergebnisse – Bauvorhaben 2020-KW27

Bauort	83459 Simbach am Inn						
Messdatum	30.06.2020						
Hersteller Holzbauteile	H_B						
Montagefirma	M_B						
Bauteile	Anzahl	Form	L [mm]	H <sub>max</sub> [mm]	H <sub>min</sub> [mm]	Breite [mm]	Material
	8		29.600	2.690	1.350	220	GL 24h
Aussteifungstyp	Dachverbände (Achsen 2-3, 4-5, 6-7, 8-9)						
Gabellagerung	Stahlbeton Auflagertaschen						
Belastung (zum Zeitpunkt d. Messung)	Eigengewicht der Holzbauteile, Netz zur Absturzsicherung, Binder Achse 5 bis 8 teilweise durch Dachsandwichpaneele						
Lufttemperatur (ca. 1,0 m über GOK)	27,7 °C						
Luftfeuchtigkeit (ca. 1,0 m über GOK)	30,2 %						
Holzfeuchtigkeit	11,9 % (Binder Achse 2); 10,9 % (Binder Achse 3); 11,6 % (Binder Achse 4)						
Bemerkungen	Polier der Montagefirma schildert bei Durchführung der Messungen Montageschwierigkeiten aufgrund geringer Toleranzen der Stahlverbinder der Druckpfetten und Unebenheiten der Binderseitenflächen.						

**Beschreibung des Bauvorhabens** Es handelt sich um den Neubau einer eingeschossigen Lagerhalle mit 29,6 m spannenden BSH Satteldachbindern mit zweiseitigem Kragarm auf Stahlbetonstützen. Die Aussteifung erfolgt über Dachverbände aus Holz und eingespannte Stahlbetonstützen.



Abb. 43: Bauvorhaben 2020-KW27 zum Zeitpunkt der Messung

Auffälligkeiten Messergebnisse:

- Vorkrümmungen:
  - alle Binder in die gleiche Richtung vorgekrümmt
  - Form  $e_y$  eines Binders annähernd eine sinus-Halbwellen
  - Maximalwert ca. in Feldmitte und ähnlich groß (0,030 - 0,040 m)
  - alle Binder sind an Dachverbände angeschlossen
- Vortordierungen:
  - alle Binder insgesamt in die gleiche Richtung vortordiert
  - $e_\vartheta$  wechselt teils das Vorzeichen über die Länge
  - oft Maximalwerte (0,004 bis 0,008) an den Auflagern, die das Gesamtbild der Form der Vortordierung prägen

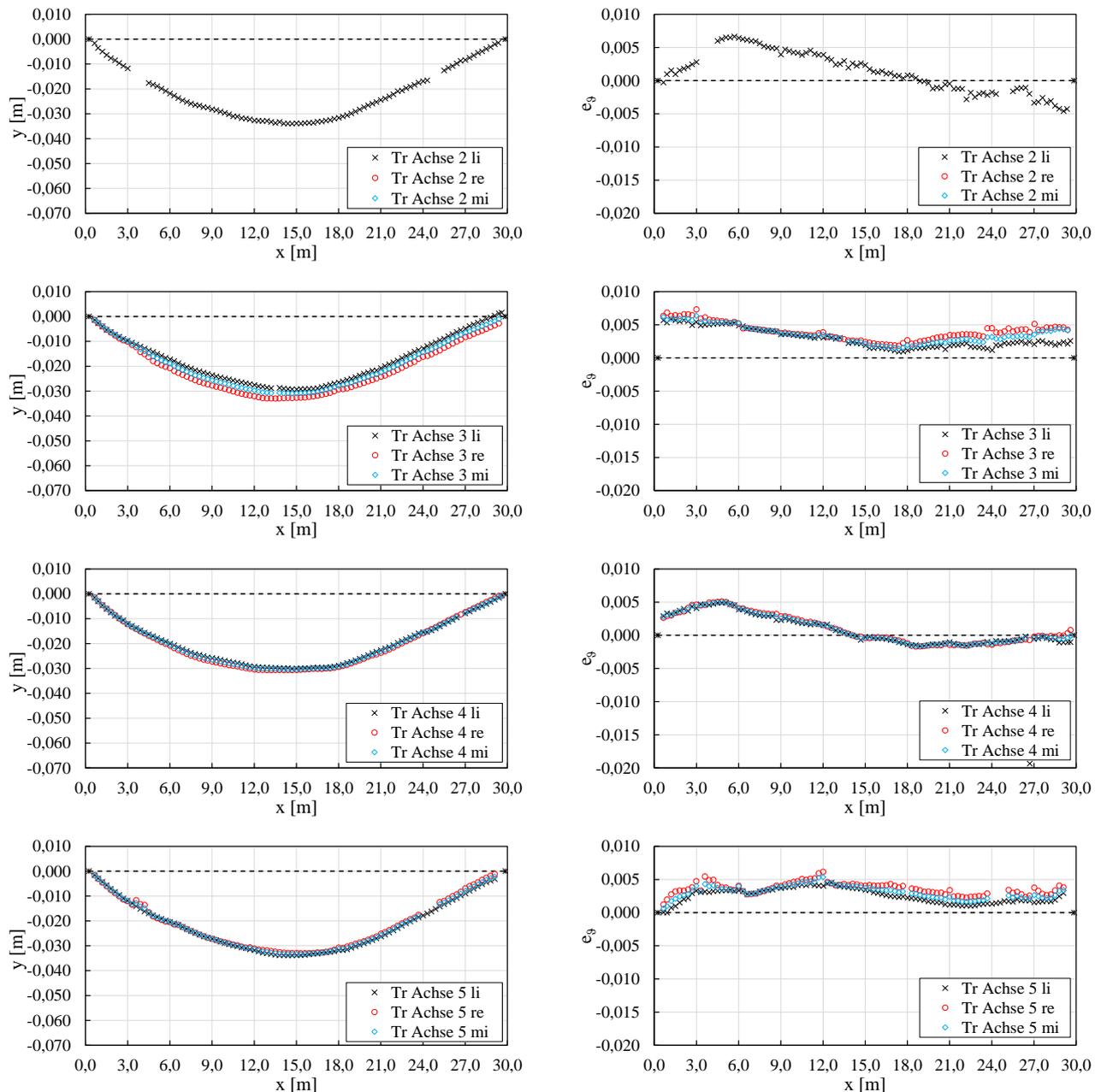


Abb. 44: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der BSH Binder des Bauvorhabens 2020-KW27

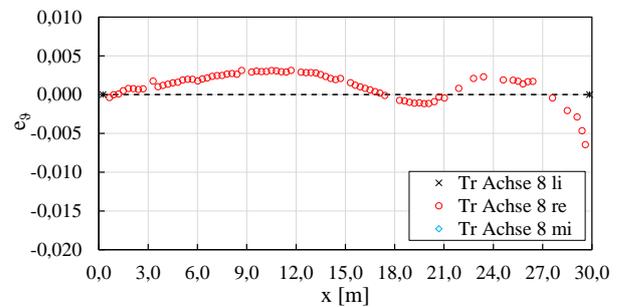
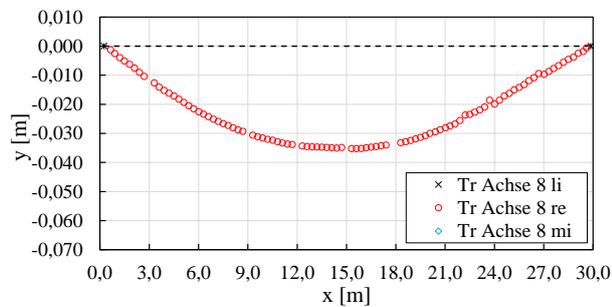
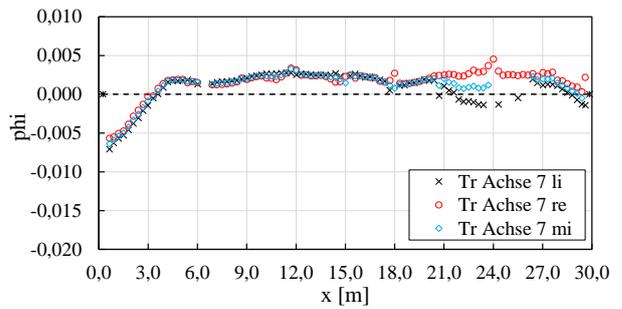
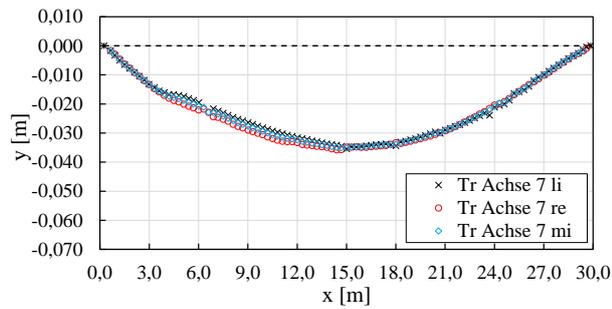
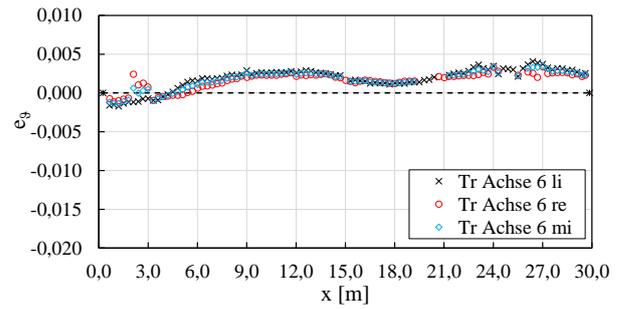
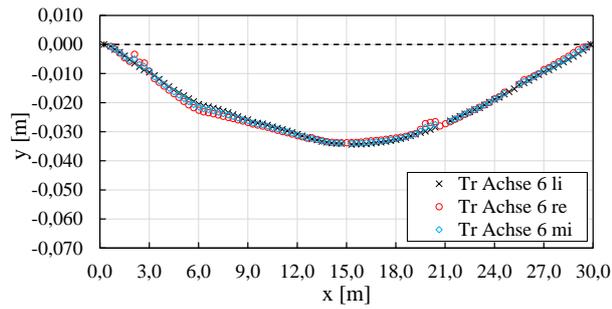


Abb. 45: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der BSH Binder des Bauvorhabens 2020-KW27

#### A.4 Messergebnisse – Bauvorhaben 2020-KW32

Bauort	74595 Langenburg						
Messdatum	05.08.2020						
Hersteller Holzbauteile	H_A						
Montagefirma	unbekannt						
Bauteile	Anzahl	Form	L [mm]	H <sub>max</sub> [mm]	H <sub>min</sub> [mm]	Breite [mm]	Material
	16		23.560	1.440	780	160	GL 28c
Aussteifungstyp	Dachverbände (Achsen 3-4, 8-9, 13-14)						
Gabellagerung	Stahlbeton Auflagertasche (Achse B, x = L), Beihölzer (Achse C, x = 0)						
Belastung (zum Zeitpunkt d. Messung)	Eigengewicht der Holzbauteile						
Lufttemperatur (ca. 1,0 m über GOK)	23,0 °C						
Luftfeuchtigkeit (ca. 1,0 m über GOK)	42,1 %						
Holzfeuchtigkeit	10,7 % (Stütze Achse C/2)						
Bemerkungen	-						

**Beschreibung des Bauvorhabens** Es handelt sich um den Neubau einer eingeschossigen Montagehalle mit 23,6 m spannenden BSH Fischbauchbindern mit angehängtem einseitigem Anbau. Die Aussteifung erfolgt über Dachverbände aus Holz und eingespannte Stahlbetonstützen und Wandverbände aus Holz.



Abb. 46: Bauvorhaben 2020-KW32 zum Zeitpunkt der Messung

Auffälligkeiten Messergebnisse:

- Vorkrümmungen: - alle Binder in an einem Verband angeschossen sind, sind in die gleiche Richtung vorgekrümmt  
 - Form  $e_y$  eines Binders annähernd eine sinus-Halbwellle, ausgenommen Binder Achse 7 und Achse 16 (Höckerform)  
 - Maximalwert ca. in Feldmitte und ähnlich groß (0,012 - 0,020 m)  
 - kein Zusammenhang zur Lage des Dachverbandes erkennbar
- Vortordierungen: - i.d.R. ähnlicher Verlauf der Vortordierung benachbarter Binder  
 -  $e_y$  wechselt teils das Vorzeichen über die Länge  
 - größere Vortordierungen am Auflager  $x = L$  (Stahlbetonaufлагertasche) im Vergleich zu Auflager  $x = 0$  (Beihölzer)

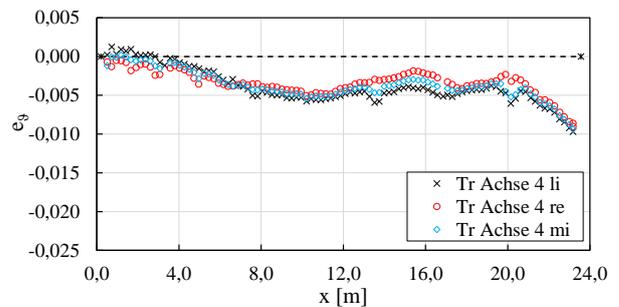
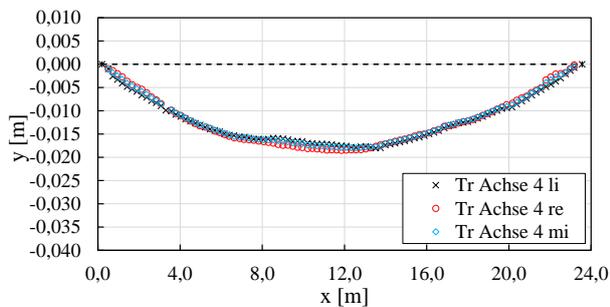
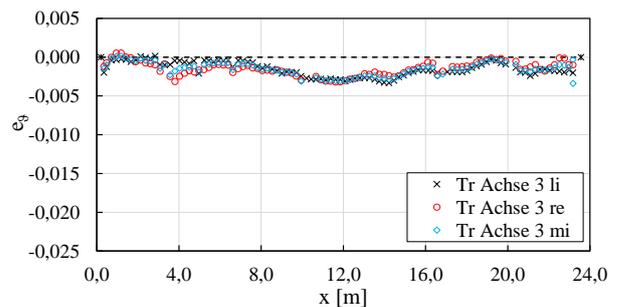
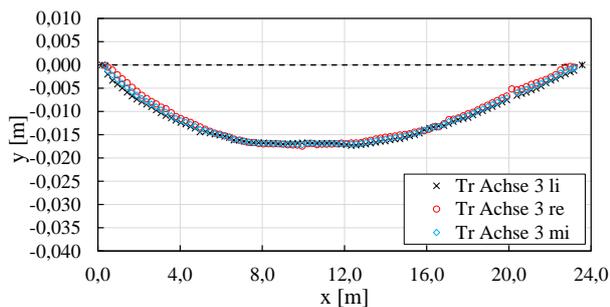
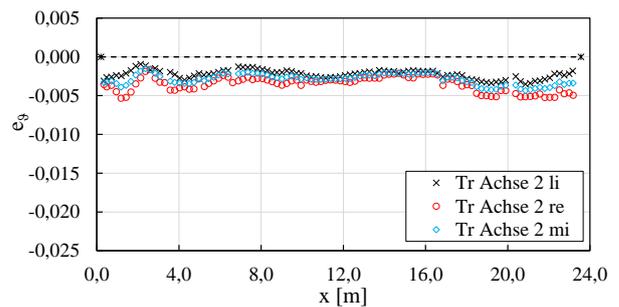
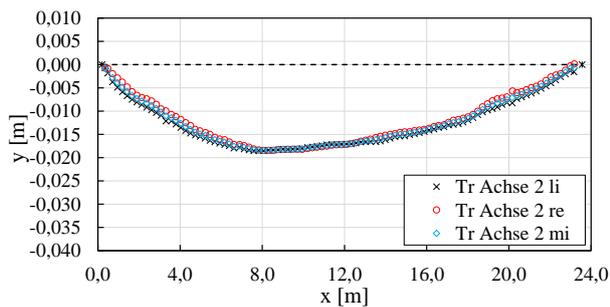


Abb. 47: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der BSH Binder des Bauvorhabens 2020-KW32

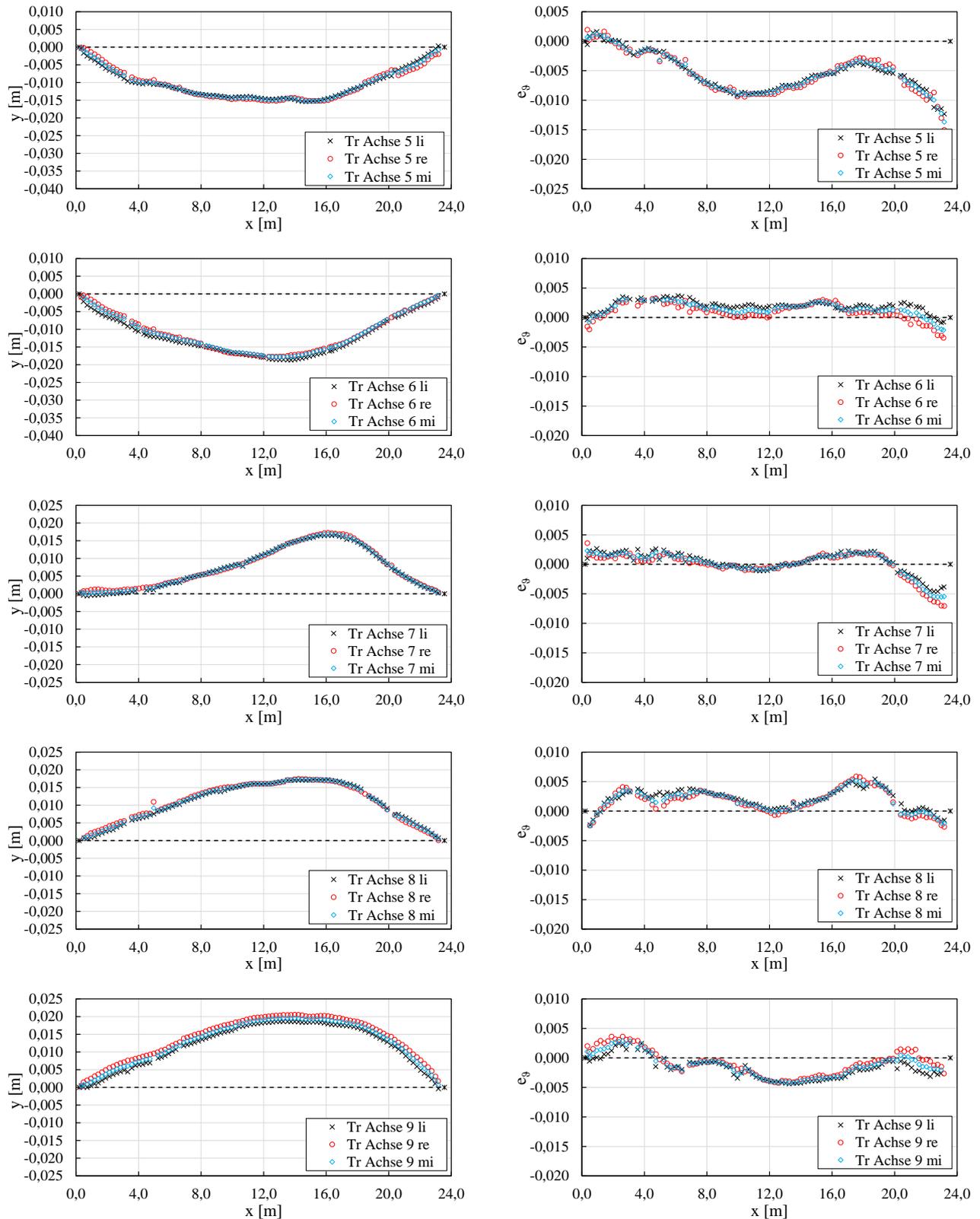


Abb. 48: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der BSH Binder des Bauvorhabens 2020-KW32

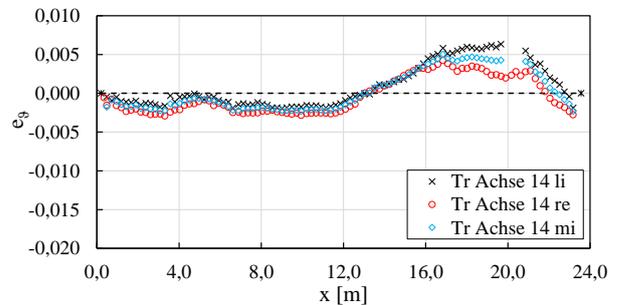
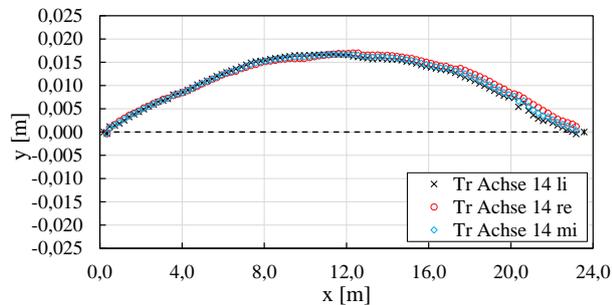
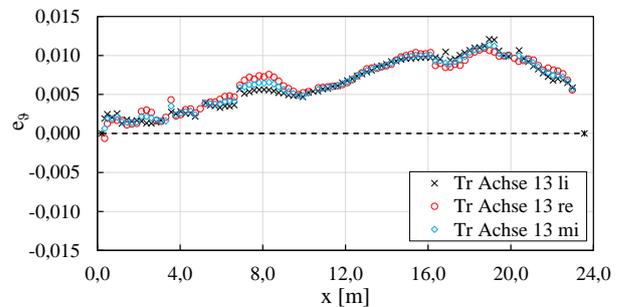
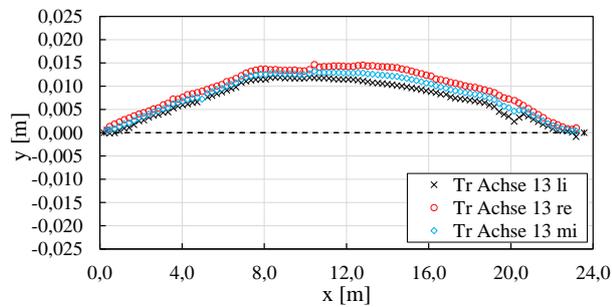
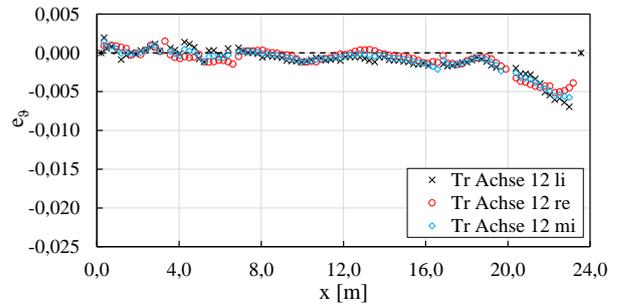
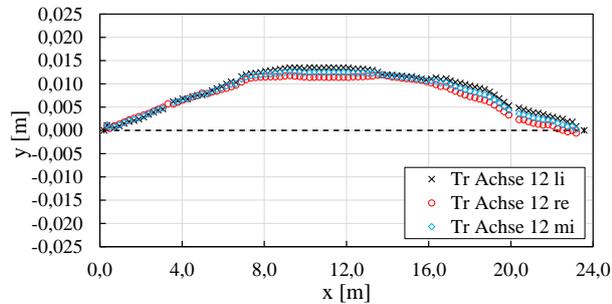
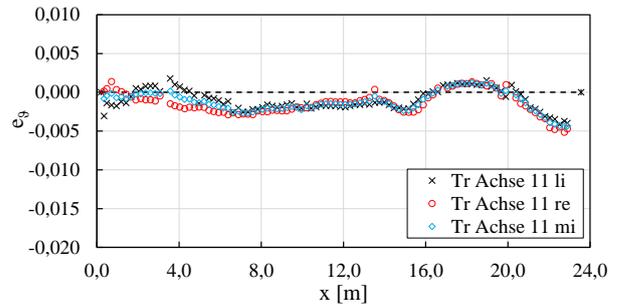
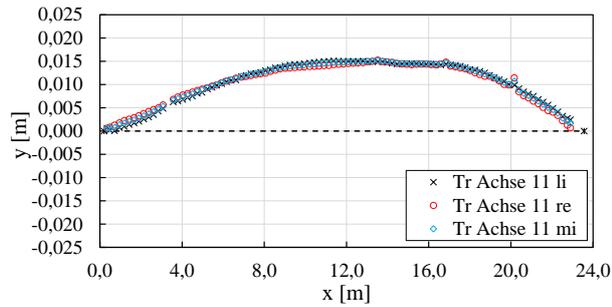
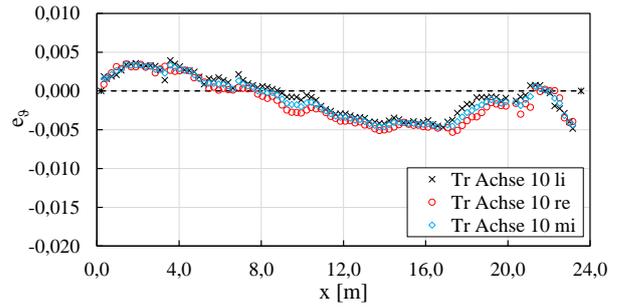
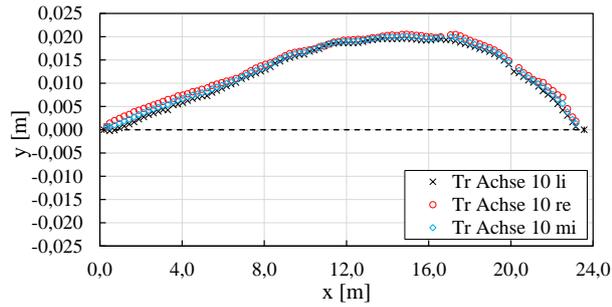


Abb. 49: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der BSH Binder des Bauvorhabens 2020-KW32

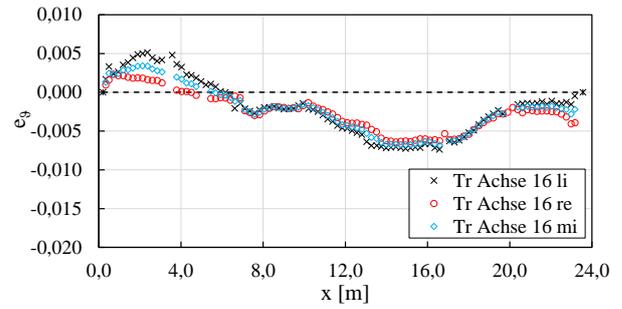
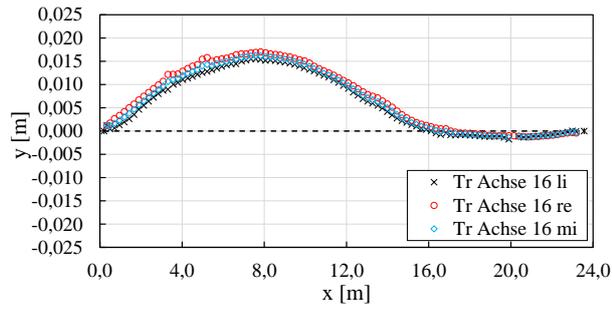
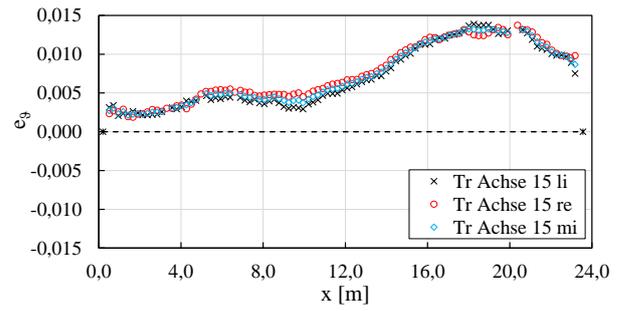
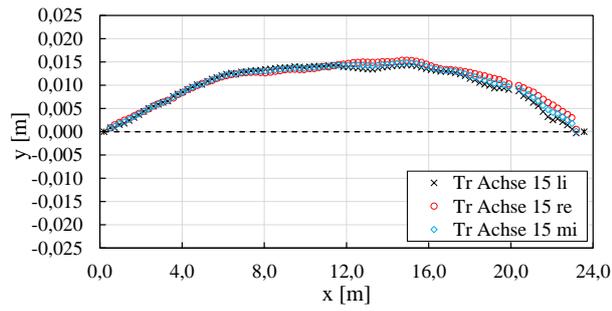


Abb. 50: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der BSH Binder des Bauvorhabens 2020-KW32

### A.5 Messergebnisse – Bauvorhaben 2020-KW33

Bauort	84577 Tüßling						
Messdatum	10.08.2020						
Hersteller Holzbauteile	H_C						
Montagefirma	unbekannt						
Bauteile	Anzahl	Form	L [mm]	H <sub>max</sub> [mm]	H <sub>min</sub> [mm]	Breite [mm]	Material
	4		17.850	1.400	900	160	GL 28c
Aussteifungstyp	Dachverband (Achsen 3-4)						
Gabellagerung	Stahlbeton Auflagertaschen						
Belastung (zum Zeitpunkt d. Messung)	Eigengewicht der Holzbauteile und Dacheindeckung (Ziegeldeckung inkl. Unterkonstruktion $g_k' \approx 0,60 \text{ kN/m}^2$ )						
Lufttemperatur (ca. 1,0 m über GOK)	30,7 °C						
Luftfeuchtigkeit (ca. 1,0 m über GOK)	44,4 %						
Holzfeuchtigkeit	11,1 % (Binder Achse 2), 10,5 % (Binder Achse 3), 10,4 % (Binder Achse 4)						
Bemerkungen	-						

**Beschreibung des Bauvorhabens** Es handelt sich um den Neubau einer eingeschossigen Lager- und Maschinenhalle mit 17,9 m spannenden BSH Satteldachträgern mit gekrümmter UK mit beidseitigen Kragarmen. Die Aussteifung erfolgt über den Dachverband aus Stahl und aussteifende Wandscheiben aus Mauerwerk.



Abb. 51: Bauvorhaben 2020-KW33 zum Zeitpunkt der Messung

Auffälligkeiten Messergebnisse:

- **Vorkrümmungen:**
  - alle Binder sind in die gleiche Richtung vorgekrümmt
  - Form  $e_y$  eines Binders annähernd eine sinus-Halbwellen
  - Maximalwert ca. in Feldmitte; Träger Achse 2 deutlich größeres  $e_y$
  - der Träger Achse 2 mit den größten Verformungen ist nicht direkt am Dachverband angeschlossen, sondern über Druckpfetten
- **Vortordierungen:**
  - kein Zusammenhang erkennbar
  - $e_\vartheta$  wechselt teils das Vorzeichen über die Länge
  - Maximalwerte an den Auflagern

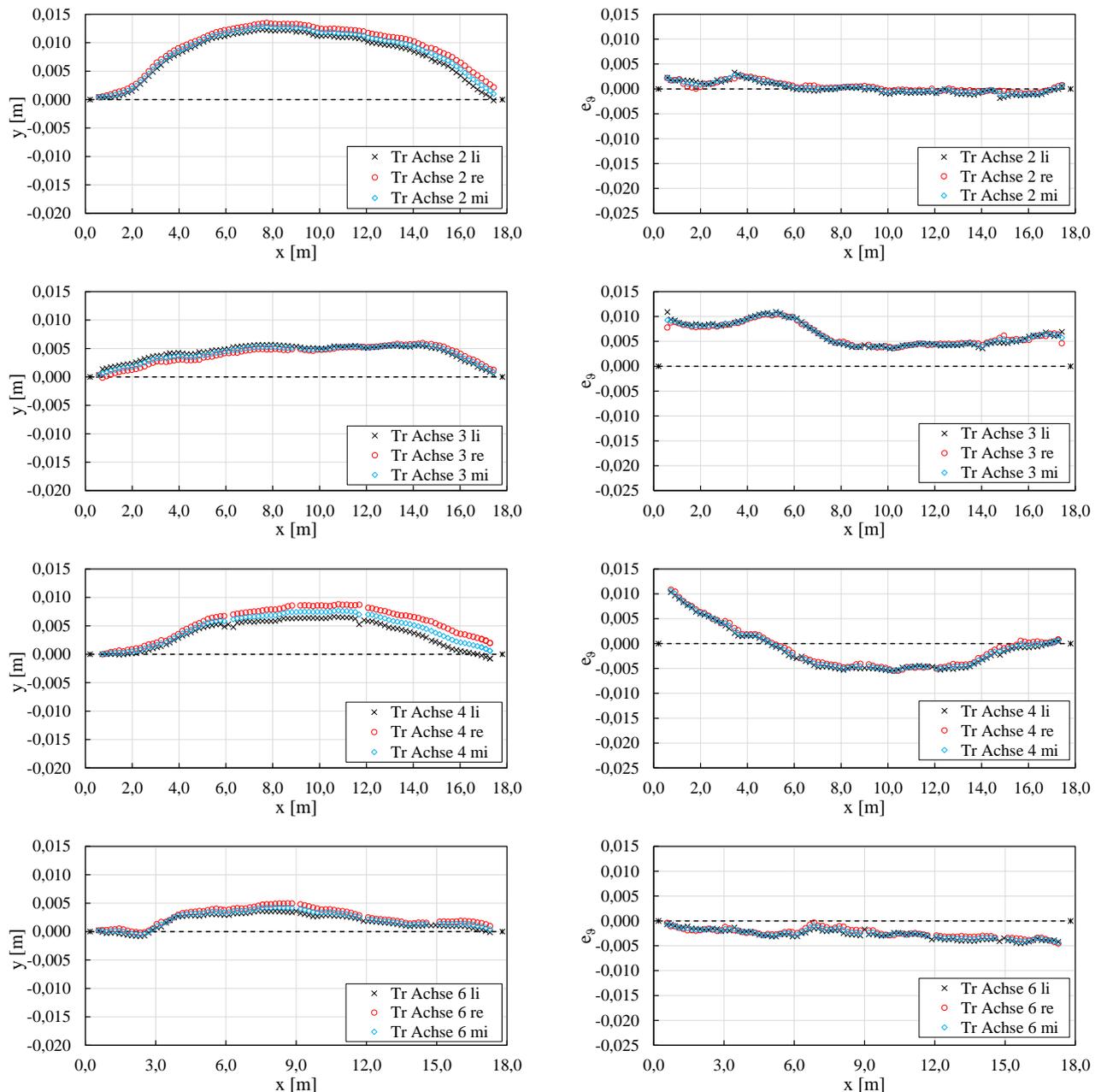


Abb. 52: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der BSH Binder des Bauvorhabens 2020-KW33

**A.6 Messergebnisse – Bauvorhaben 2020-KW34**

Bauort 89616 Rottenacker  
 Messdatum 20.08.2020  
 Hersteller Holzbauteile H\_B  
 Montagefirma unbekannt

Bauteile	Anzahl	Form	L [mm]	H <sub>max</sub> [mm]	H <sub>min</sub> [mm]	Breite [mm]	Material
	4		17.000	1.440	780	140	GL 24h
	12		13.000 - 17.000	1.760 - 1.010	-	140 - 220	

Aussteifungstyp Dachverband (Achsen 16-17)  
 Gabellagerung Stahlbeton Auflagertasche oder geschraubter Stahlverbinder  
 Belastung Eigengewicht der Holzbauteile  
*(zum Zeitpunkt d. Messung)*  
 Lufttemperatur 28,9 °C  
*(ca. 1,0 m über GOK)*  
 Luftfeuchtigkeit 44,9 %  
*(ca. 1,0 m über GOK)*  
 Holzfeuchtigkeit 11,2 % (Stütze A-B/19); 11,2 % (Stütze C-D/19); 10,0 % (Stütze D/15)  
 Bemerkungen -

**Beschreibung des Bauvorhabens** Es handelt sich um den Anbau an eine eingeschossige Lagerhalle mit 13 bis 17 m spannenden BSH Bindern teilweise mit Kragarmen. Die Aussteifung erfolgt über einen Dachverband aus Holz und eingespannte Stahlbetonstützen.



**Abb. 53:** Bauvorhaben 2020-KW34 zum Zeitpunkt der Messung

Auffälligkeiten Messergebnisse:

- Vorkrümmungen:
  - benachbarte Binder weisen eine ähnlich Vorkrümmungsfigur auf und sind in die gleiche Richtung vorgekrümmt
  - Form  $e_y$  eines Binders oft annähernd eine sinus-Halbwellen, ausgenommen Binder Achse A-B/15-18 (eher sinus-förmig)
  - Maximalwert meist ca. in Feldmitte (ausgenommen Binder Achse A-B/15-18), im Betrag teils allerdings recht unterschiedlich
  - $e_y$  der Binder die direkt am Dachverband angeschlossen sind ist geringer
- Vortordierungen:
  - kein Zusammenhang bei benachbarten Bindern erkennbar
  - $e_s$  wechselt teils das Vorzeichen über die Länge
  - oft Maximalwerte an den Auflagern wenn Stahlbeton Auflagertaschen

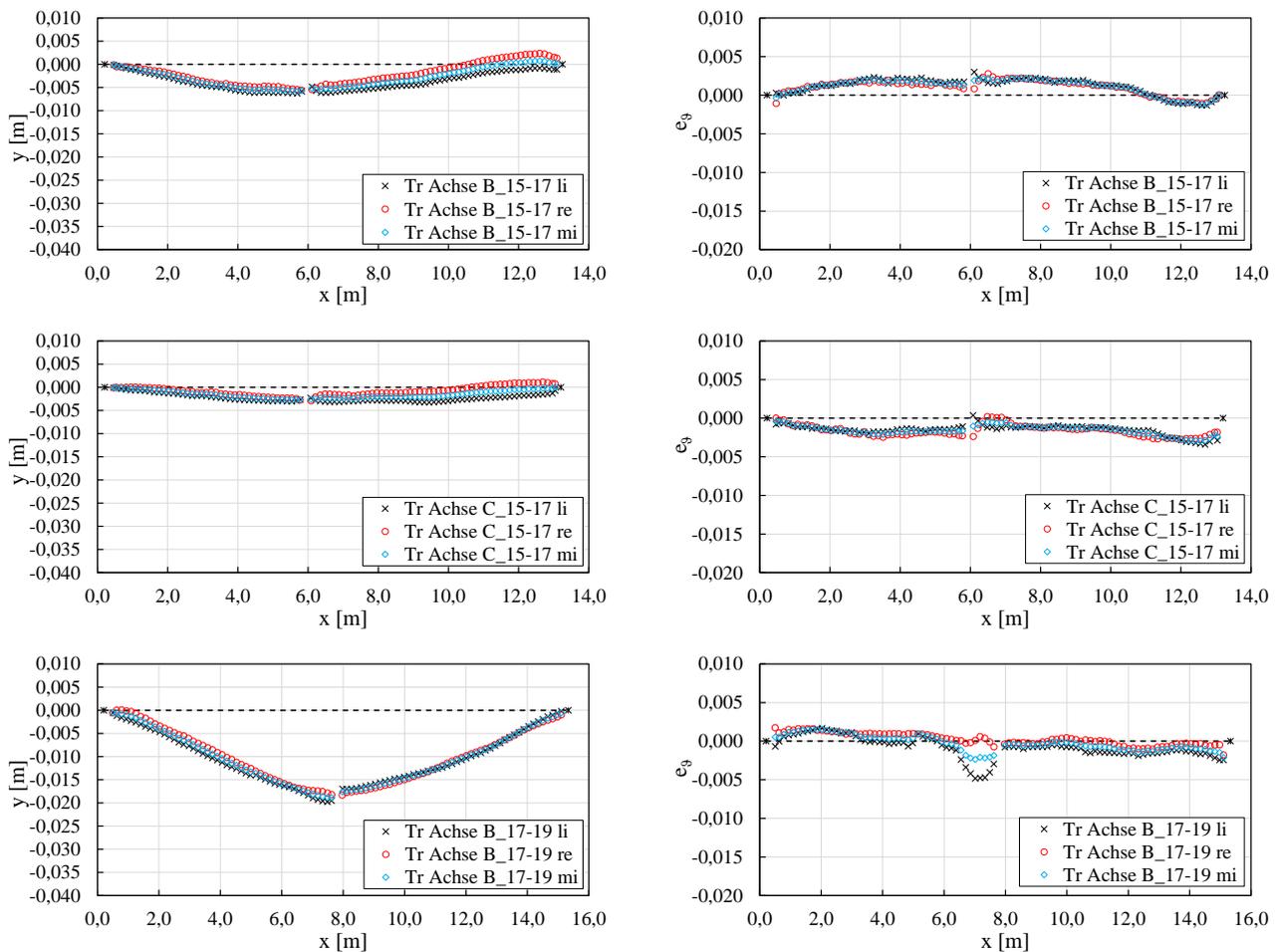


Abb. 54: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der BSH Binder des Bauvorhabens 2020-KW34

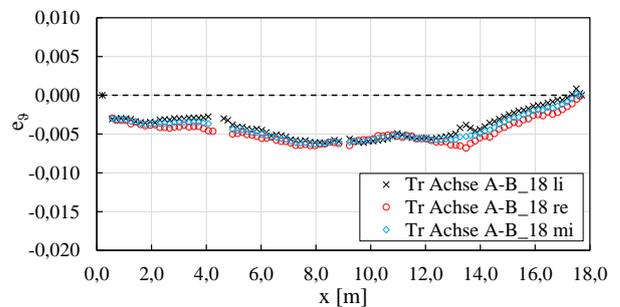
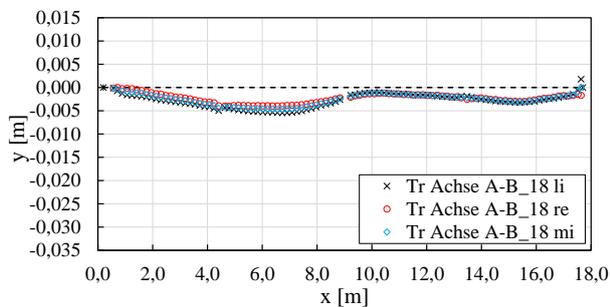
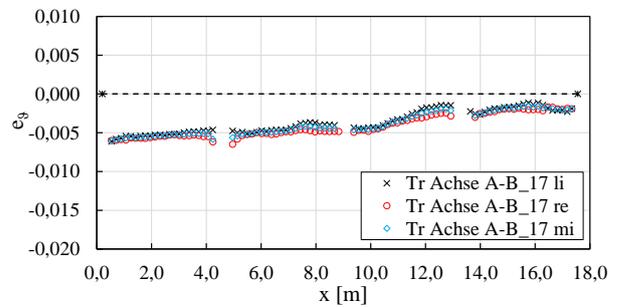
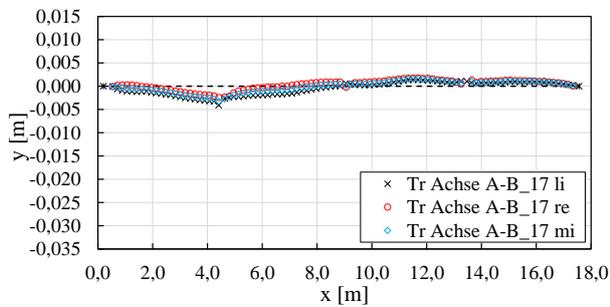
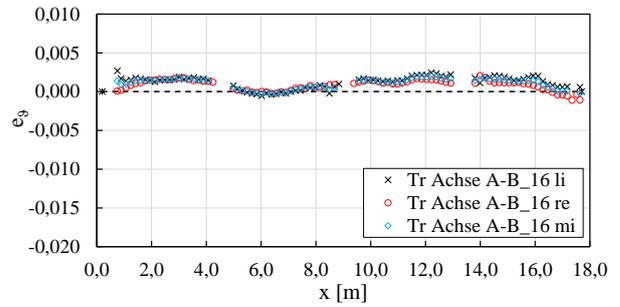
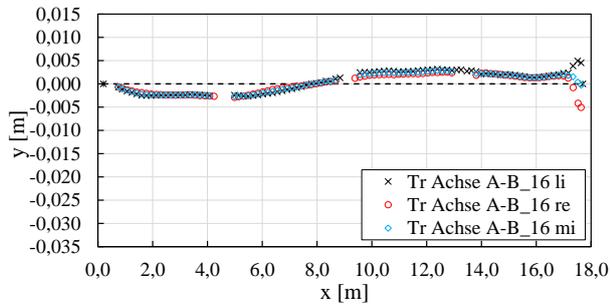
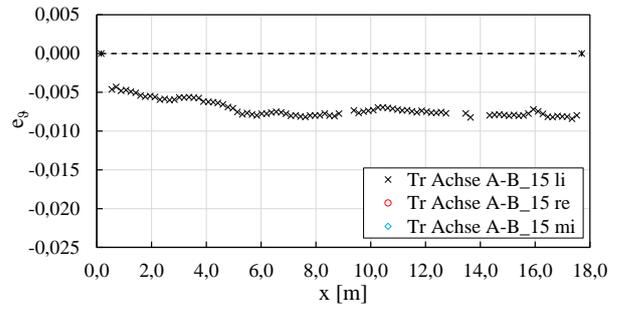
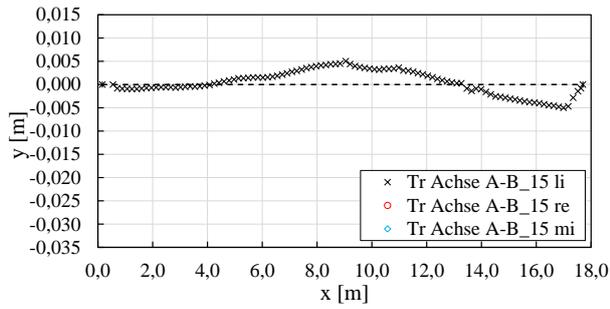
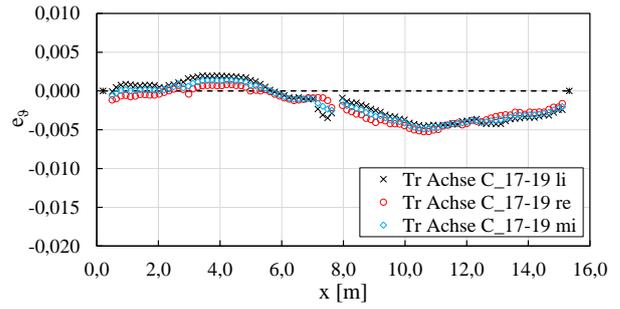
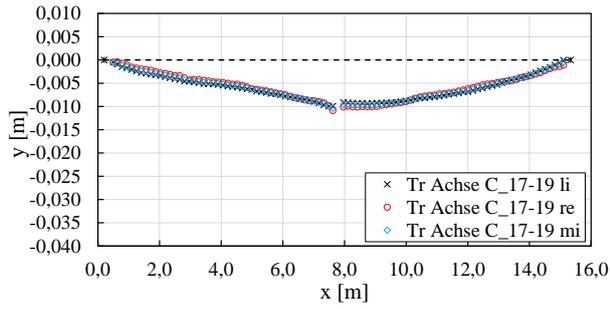


Abb. 55: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der BSH Binder des Bauvorhabens 2020-KW34

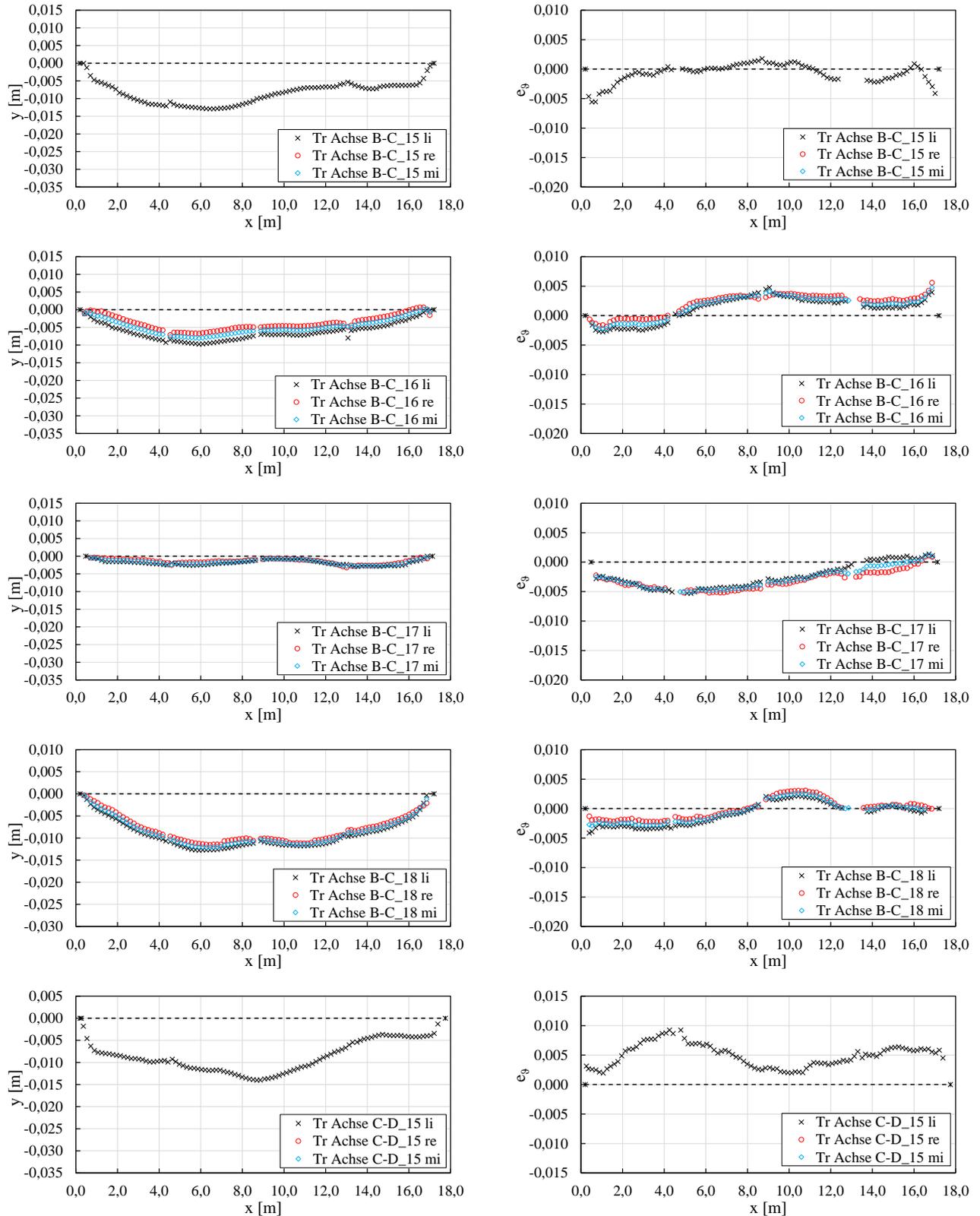


Abb. 56: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der BSH Binder des Bauvorhabens 2020-KW34

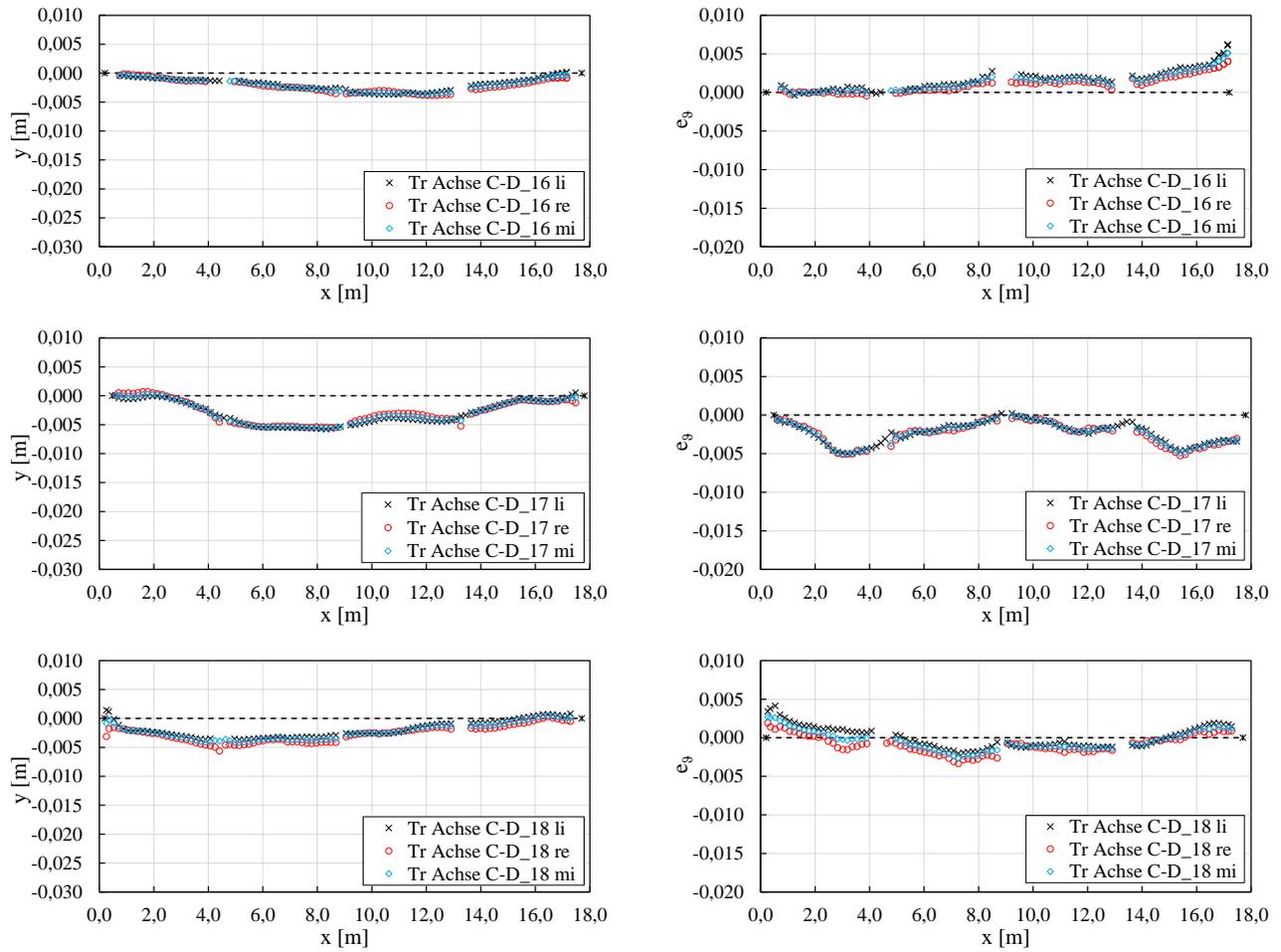


Abb. 57: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der BSH Binder des Bauvorhabens 2020-KW34

### A.7 Messergebnisse – Bauvorhaben 2020-KW38\_1.1

Bauort	68199 Mannheim						
Messdatum	15.09.2020						
Hersteller Holzbauteile	H_C						
Montagefirma	unbekannt						
Bauteile	Anzahl	Form	L [mm]	H <sub>max</sub> [mm]	H <sub>min</sub> [mm]	Breite [mm]	Material
	12		17.410	1.300	1.120	260	GL 28c
Aussteifungstyp	BSH Dachscheibe						
Gabellagerung	OK + UK Binder horizontal gehalten						
Belastung <i>(zum Zeitpunkt d. Messung)</i>	Eigengewicht der Holzbauteile, Dachscheibe, Dampfsperre						
Lufttemperatur <i>(ca. 1,0 m über GOK)</i>	25,3 °C						
Luftfeuchtigkeit <i>(ca. 1,0 m über GOK)</i>	51,4 %						
Holzfeuchtigkeit	-						
Bemerkungen	-						

**Beschreibung des Bauvorhabens** Es handelt sich um den Neubau einer eingeschossigen Lagerhalle mit 17,4 m spannenden BSH Satteldachbindern. Die Aussteifung erfolgt über die Dachscheibe, eingespannte Stahlbetonstützen und Stahlbetonwände.



**Abb. 58:** Bauvorhaben 2020-KW38\_1.1 zum Zeitpunkt der Messung

Auffälligkeiten Messergebnisse:

- Vorkrümmungen: - alle Binder sind in die gleiche Richtung vorgekrümmt  
 - Form  $e_y$  eines Binders annähernd eine sinus-Halbwellen  
 - Maximalwert ca. in Feldmitte, im Betrag teils allerdings recht unterschiedlich (5 - 24 mm)
- Vortordierungen: - kein Zusammenhang bei benachbarten Bindern erkennbar  
 -  $e_z$  wechselt teils das Vorzeichen über die Länge  
 - oft Maximalwerte an den Auflagern  
 - zwischen den Auflagern meist annähernd linearer Verlauf

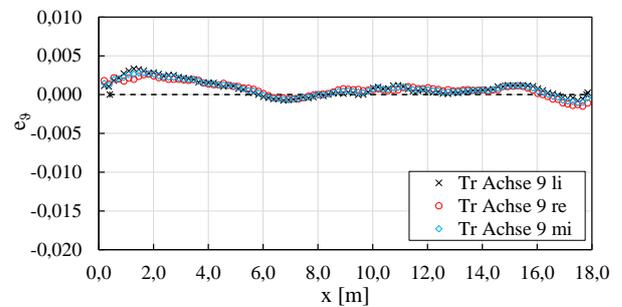
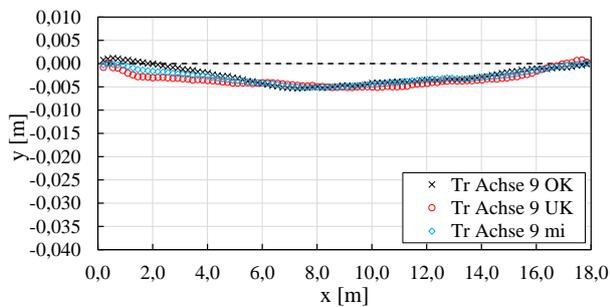
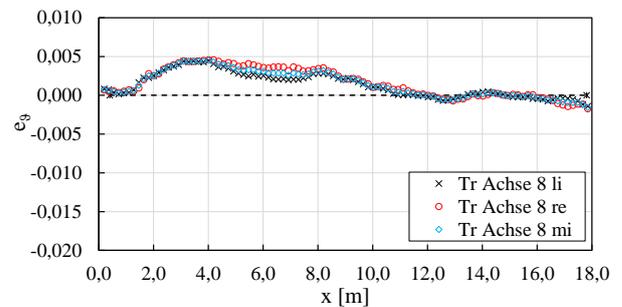
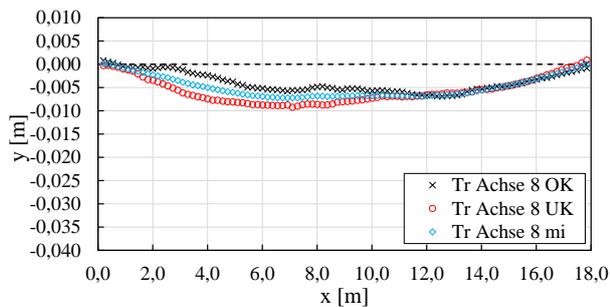
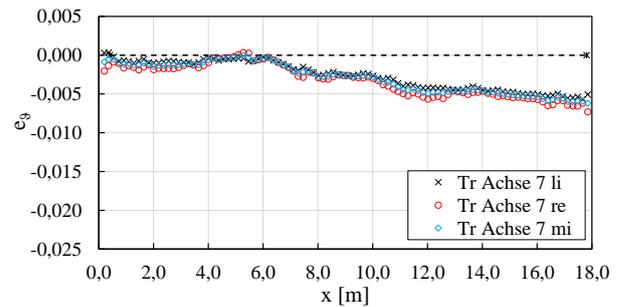
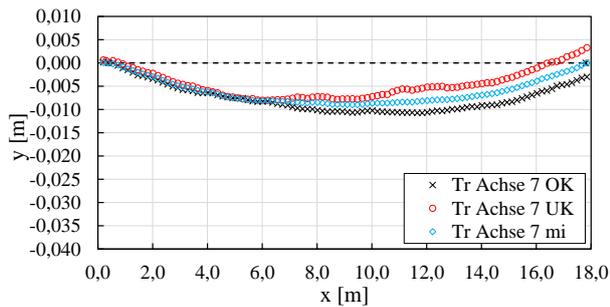


Abb. 59: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der BSH Binder des Bauvorhabens 2020-KW38\_1.1

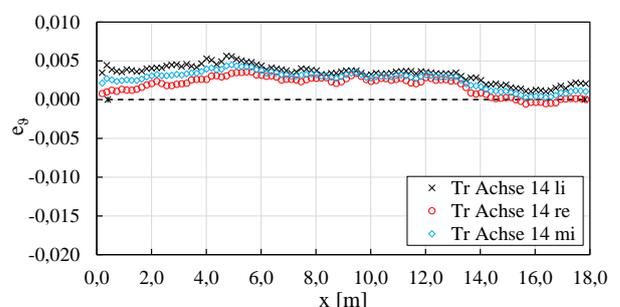
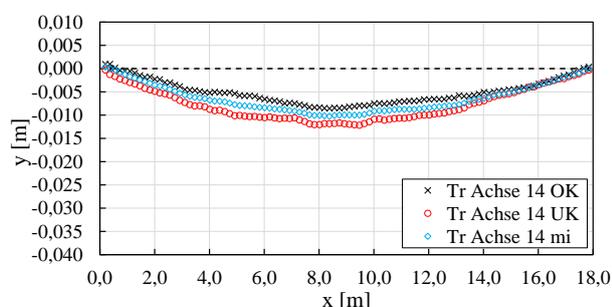
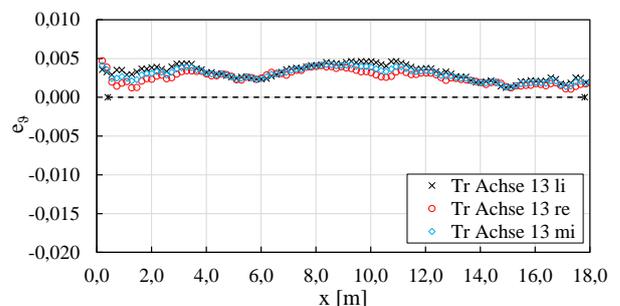
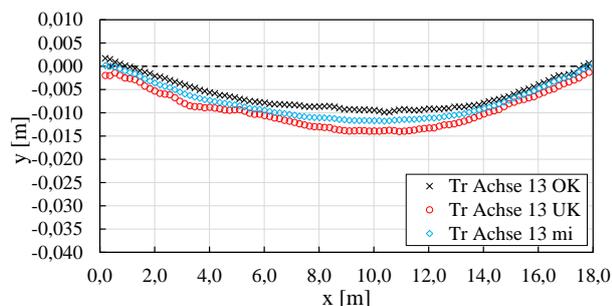
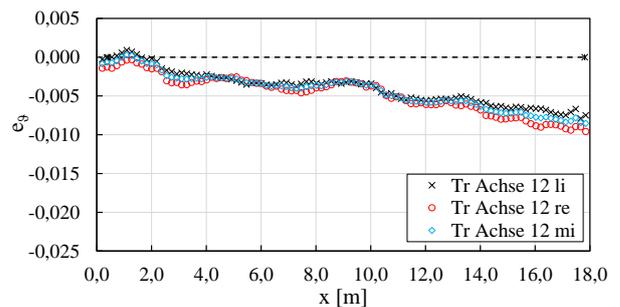
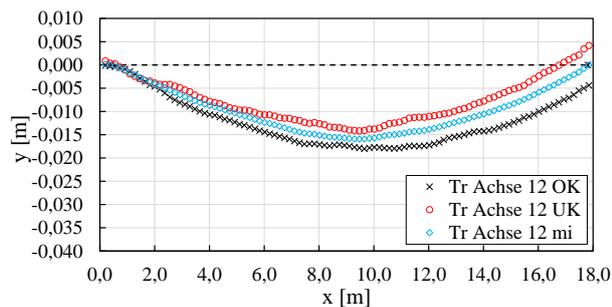
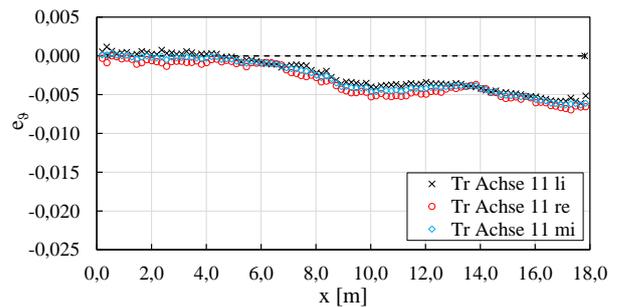
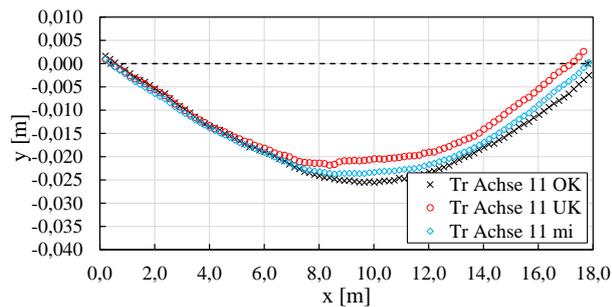
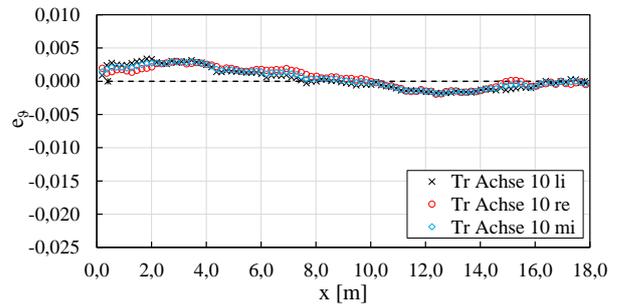
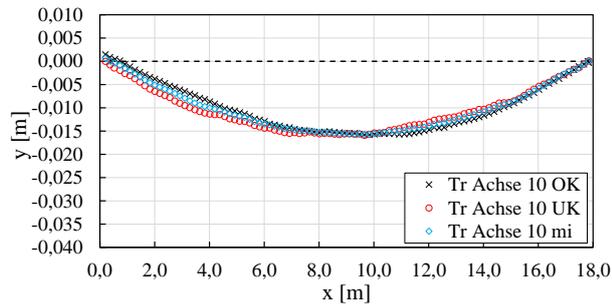


Abb. 60: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der BSH Binder des Bauvorhabens 2020-KW38\_1.1

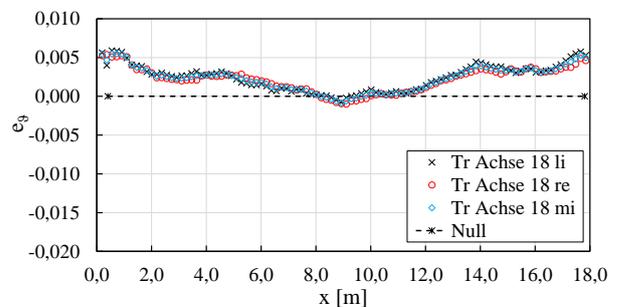
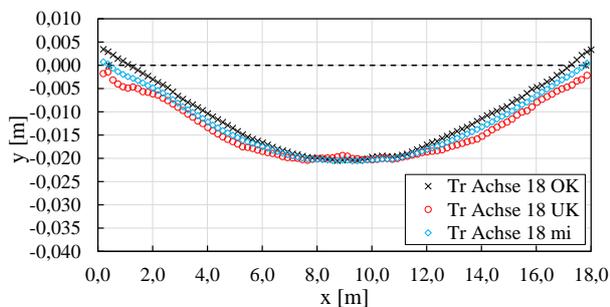
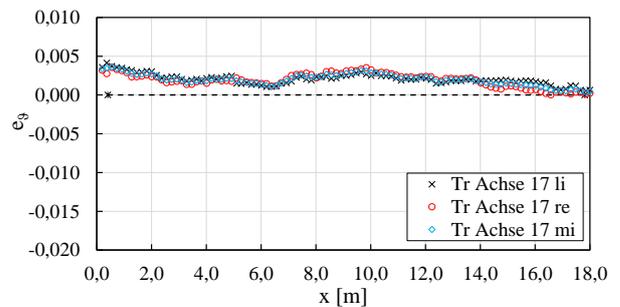
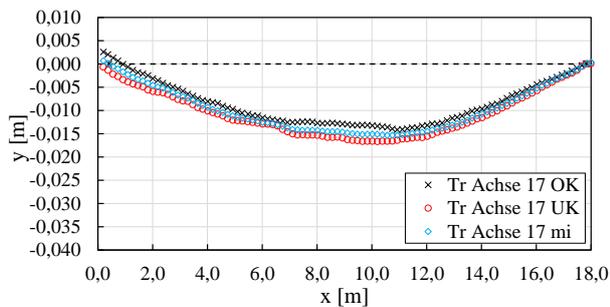
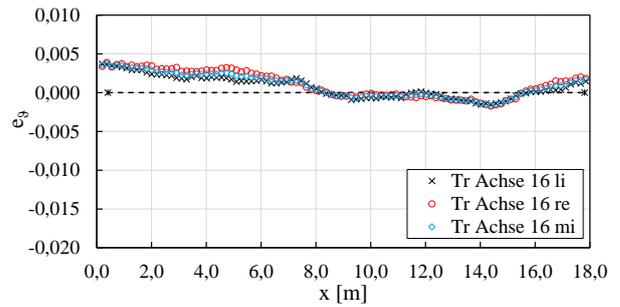
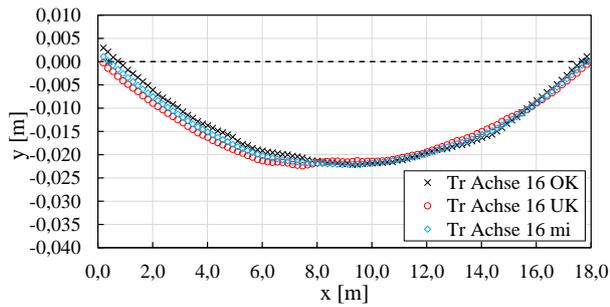
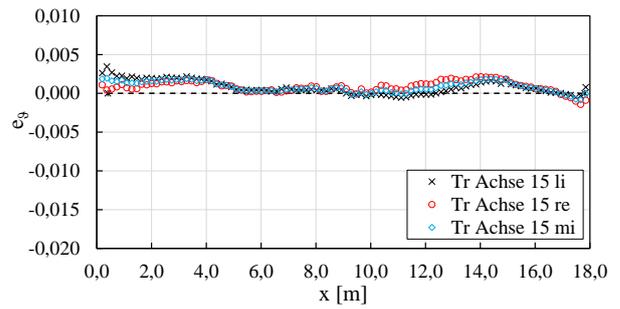
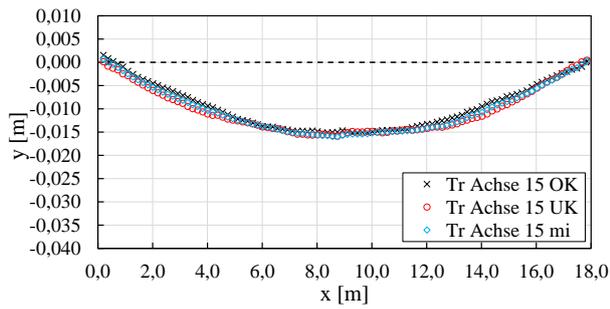


Abb. 61: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der BSH Binder des Bauvorhabens 2020-KW38\_1.1

### A.8 Messergebnisse – Bauvorhaben 2020-KW38\_1.2

Bauort	68199 Mannheim						
Messdatum	15.09.2020						
Hersteller Holzbauteile	H_C						
Montagefirma	unbekannt						
Bauteile	Anzahl	Form	L [mm]	H <sub>max</sub> [mm]	H <sub>min</sub> [mm]	Breite [mm]	Material
	2x 12		9.900	800	-	220	GL 24h
		über zwei Felder					
Aussteifungstyp	BSH Dachscheibe						
Gabellagerung	Stahlbeton Auflagertaschen						
Belastung (zum Zeitpunkt d. Messung)	Eigengewicht der Holzbauteile, Dachscheibe, Dampfsperre						
Lufttemperatur (ca. 1,0 m über GOK)	26,7 °C						
Luftfeuchtigkeit (ca. 1,0 m über GOK)	51,0 %						
Holzfeuchtigkeit	-						
Bemerkungen	-						

**Beschreibung des Bauvorhabens** Es handelt sich um den Neubau einer eingeschossigen Lagerhalle mit BSH Bindern die über zwei Felder mit je 9,90 m spannen. Die Aussteifung erfolgt über die Dachscheibe und Stahlbetonwände.



Abb. 62: Bauvorhaben 2020-KW38\_1.2 zum Zeitpunkt der Messung

Auffälligkeiten Messergebnisse:

- Vorkrümmungen:
  - fast alle Binder sind in die gleiche Richtung vorgekrümmt
  - Form  $e_y$  eines Binders annähernd eine sinus-Halbwellen
  - Maximalwert ca. in Feldmitte, im Betrag teils allerdings recht unterschiedlich (1 - 5 mm)
- Vortordierungen:
  - i.d.R. ähnlicher Verlauf der Vortordierung benachbarter Binder
  - $e_y$  wechselt teils das Vorzeichen über die Länge
  - oft Maximalwerte an den Auflagern
  - zwischen den Auflagern meist annähernd linearer Verlauf

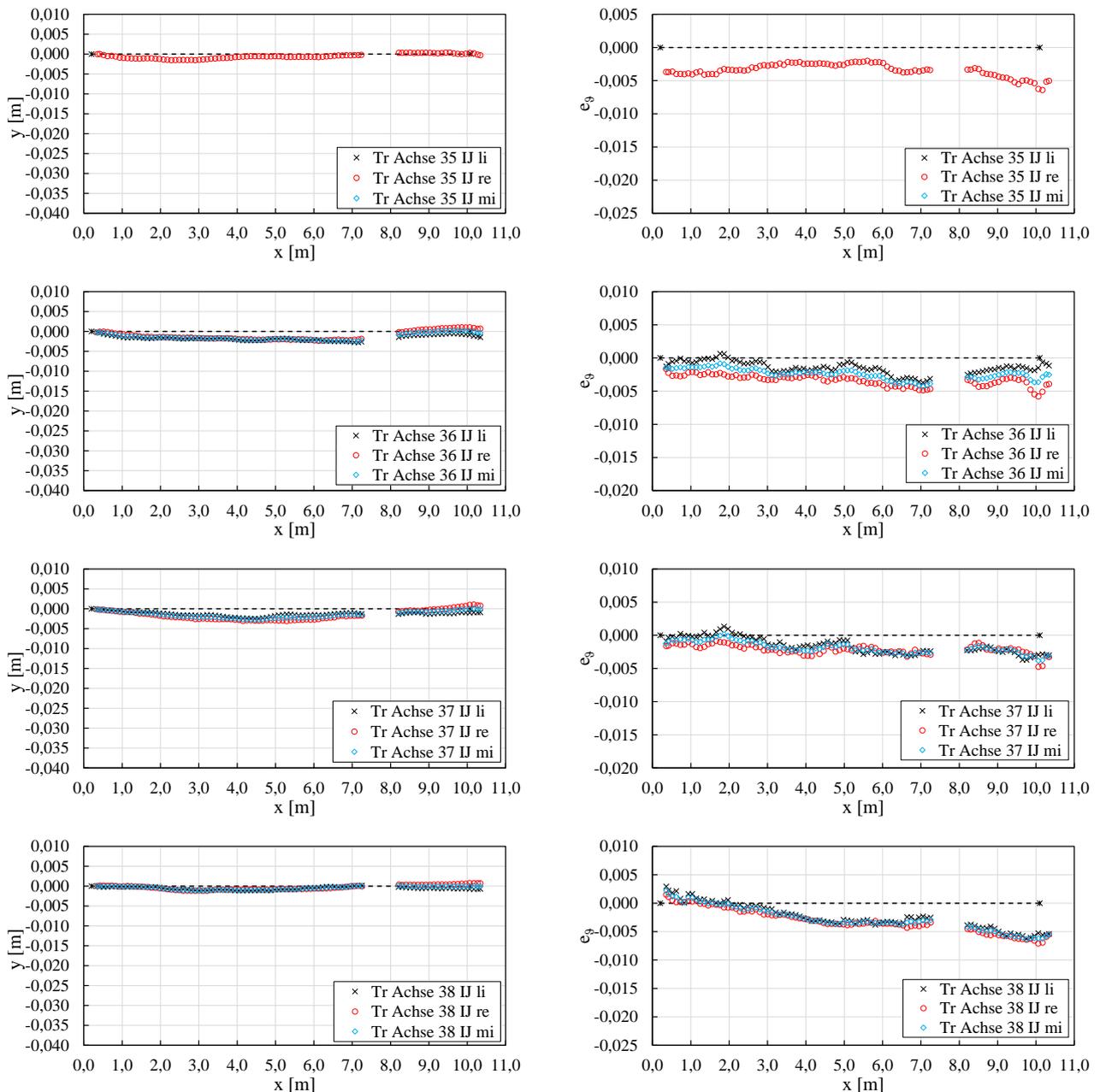


Abb. 63: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der BSH Binder des BV 2020-KW38\_1.2

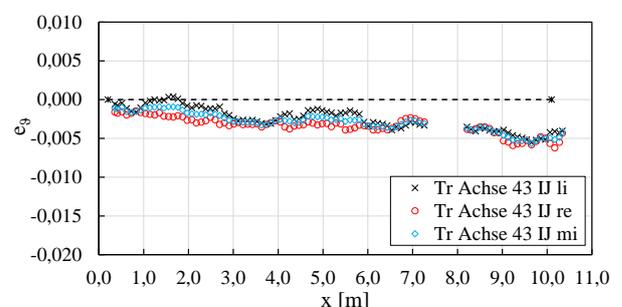
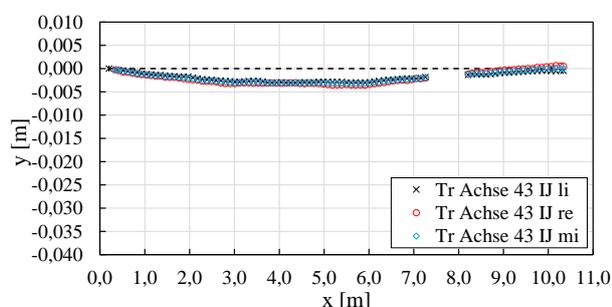
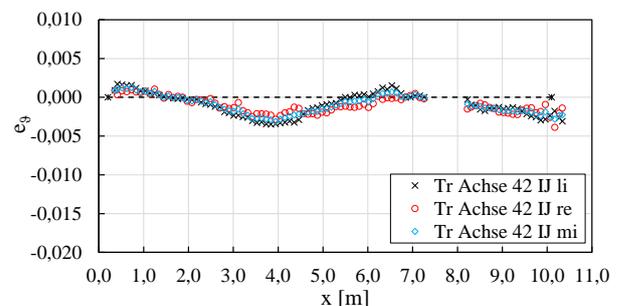
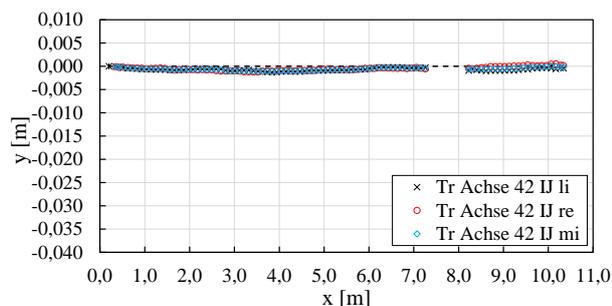
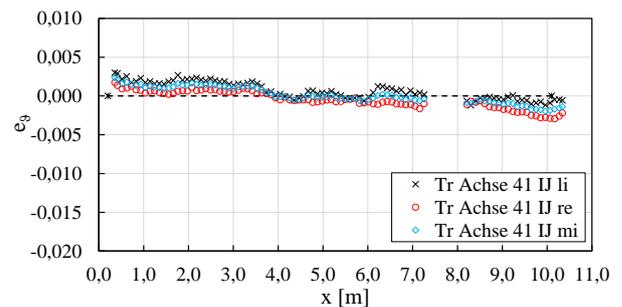
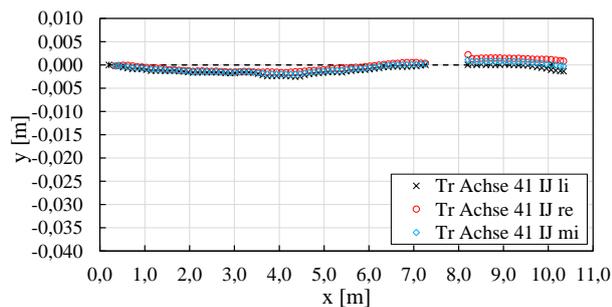
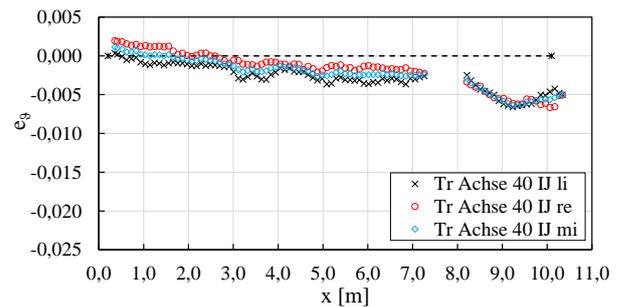
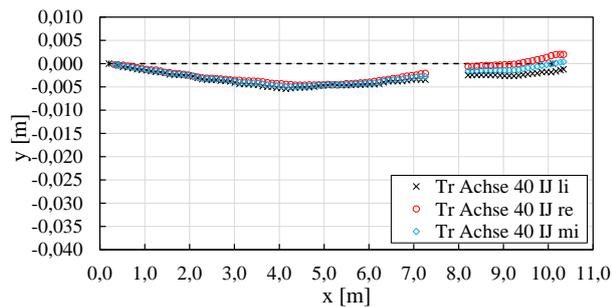
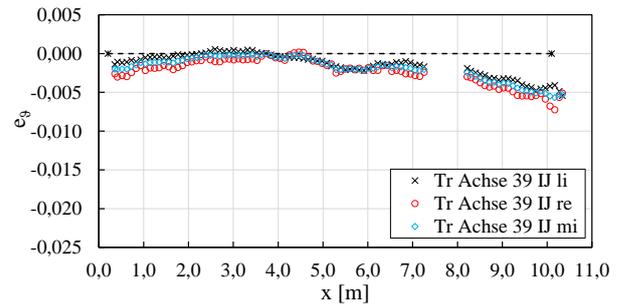
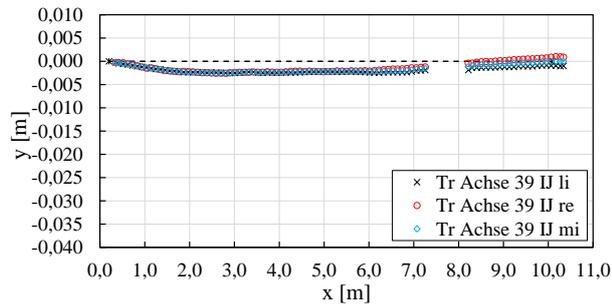


Abb. 64: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der BSH Binder des Bauvorhabens 2020-KW38\_1.2

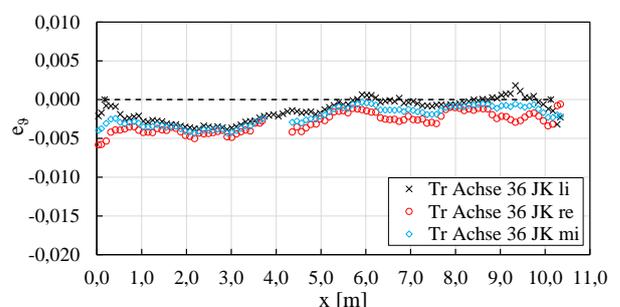
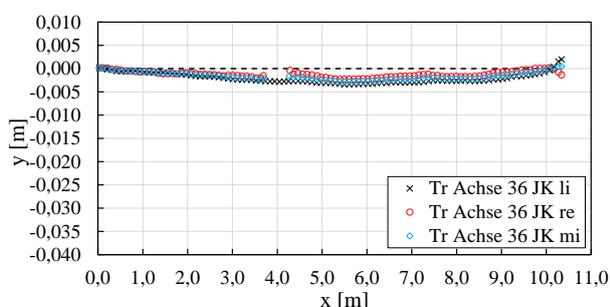
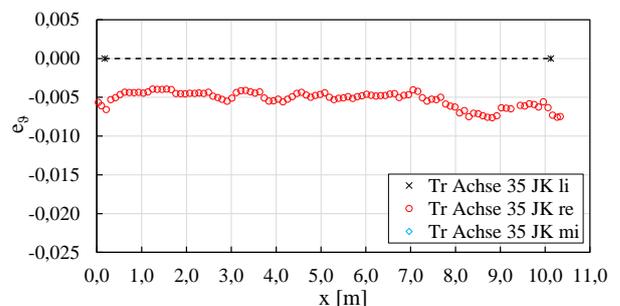
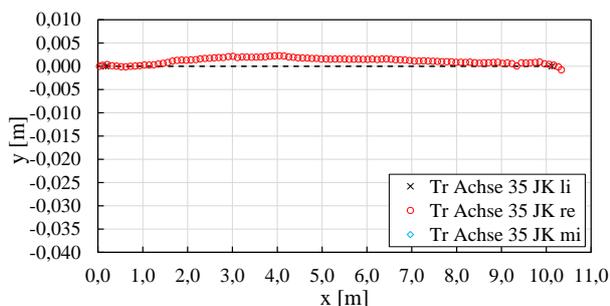
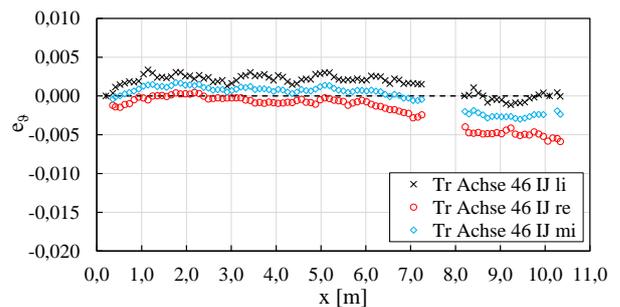
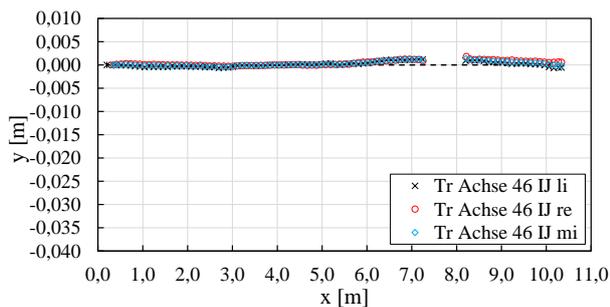
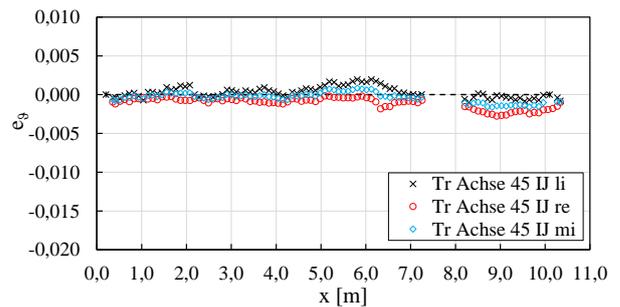
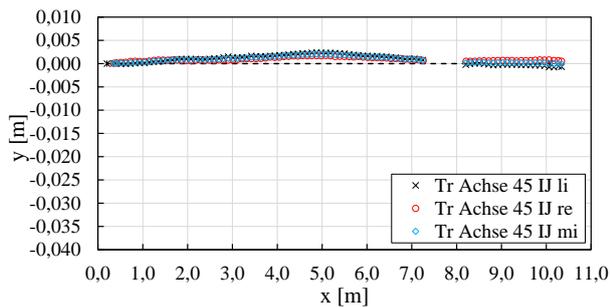
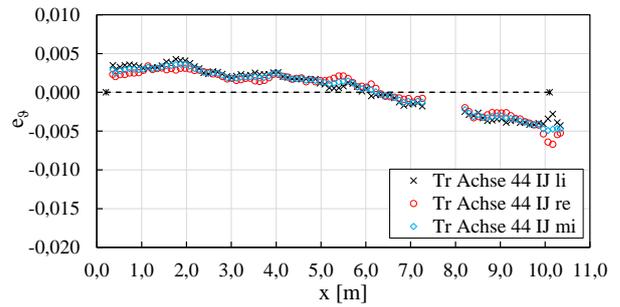
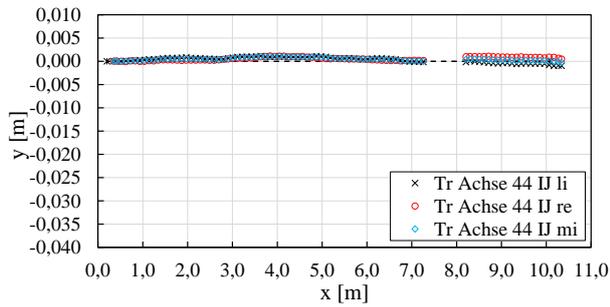


Abb. 65: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der BSH Binder des Bauvorhabens 2020-KW38\_1.2

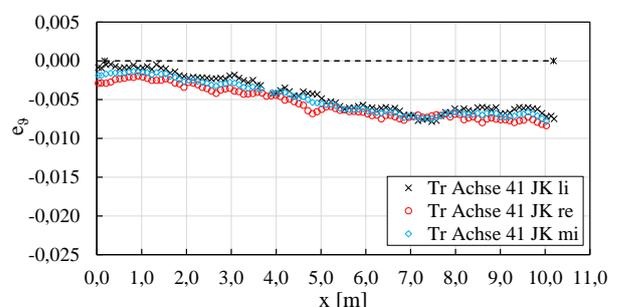
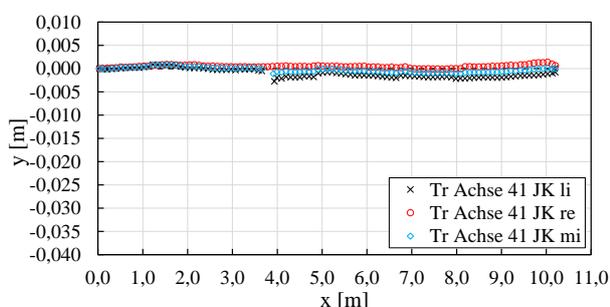
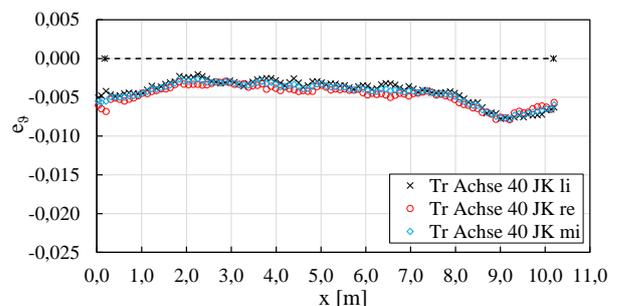
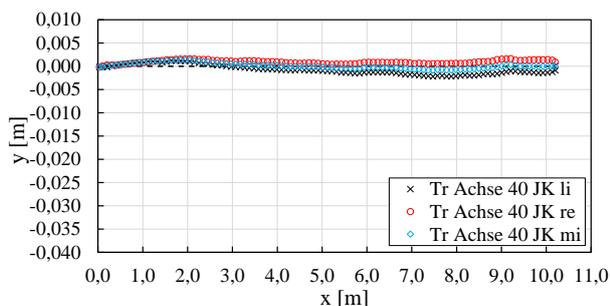
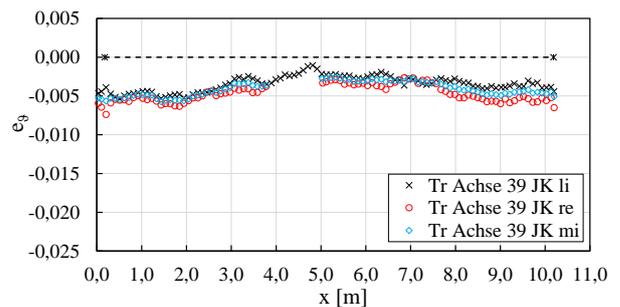
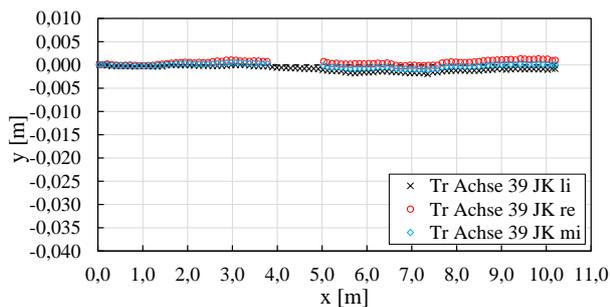
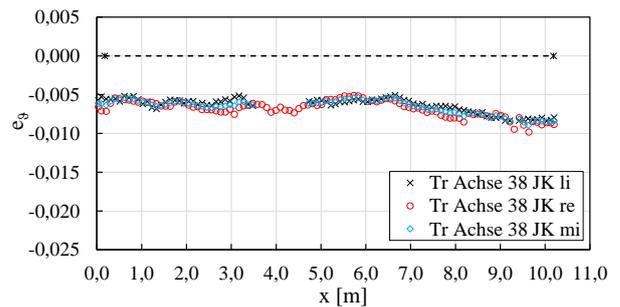
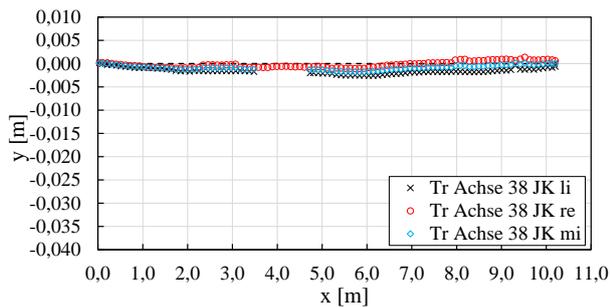
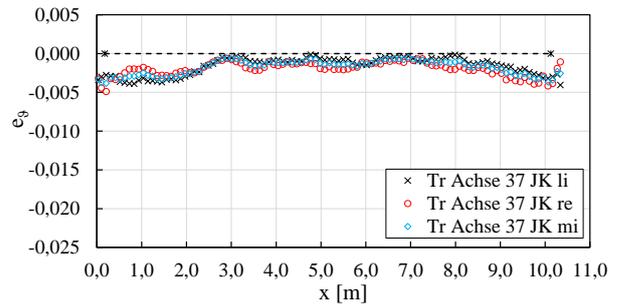
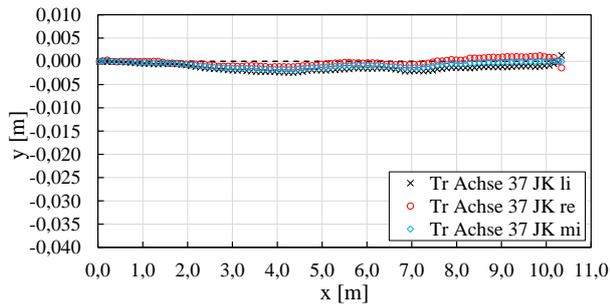


Abb. 66: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der BSH Binder des Bauvorhabens 2020-KW38\_1.2

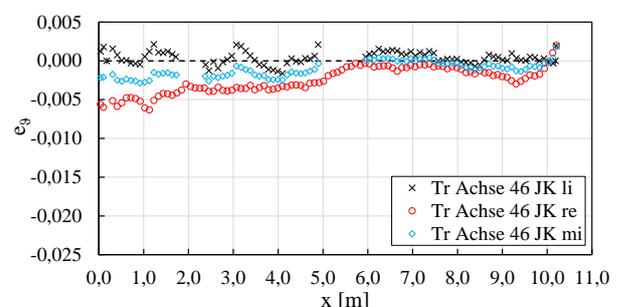
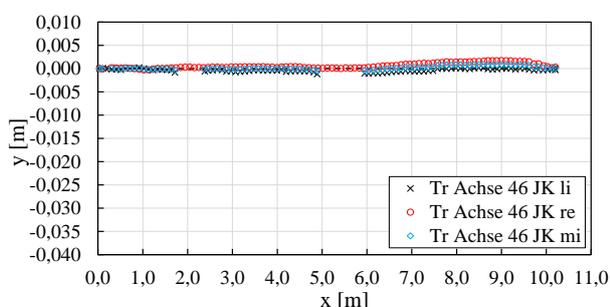
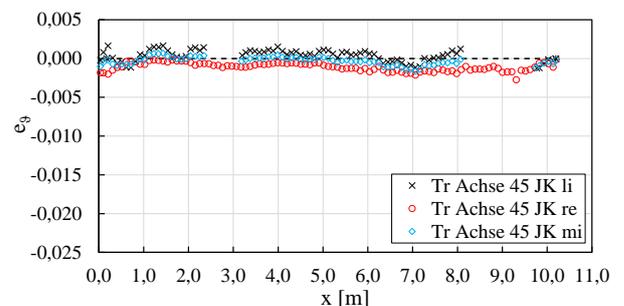
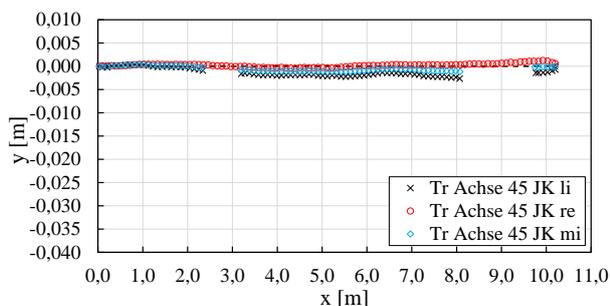
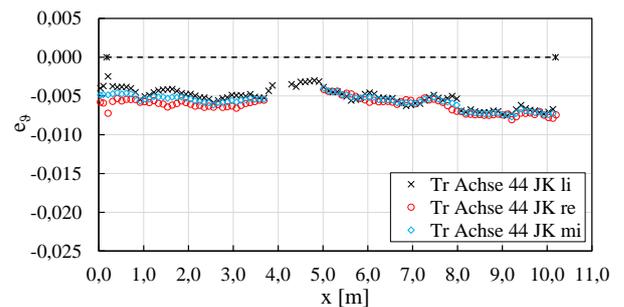
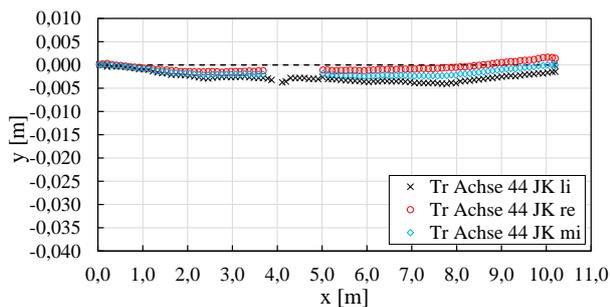
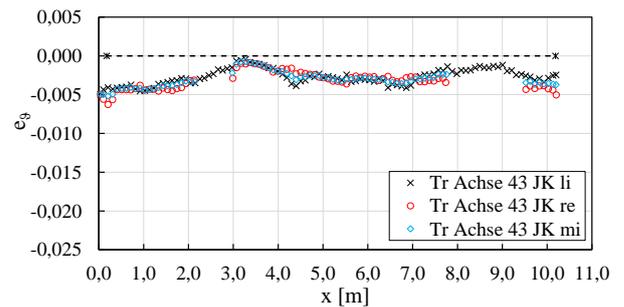
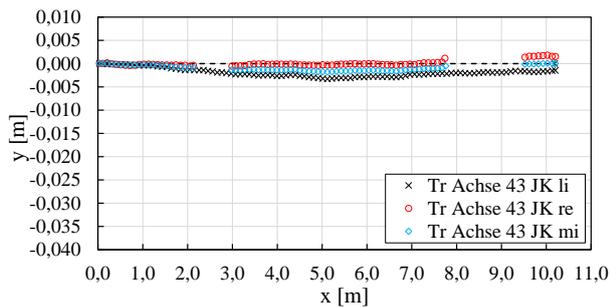
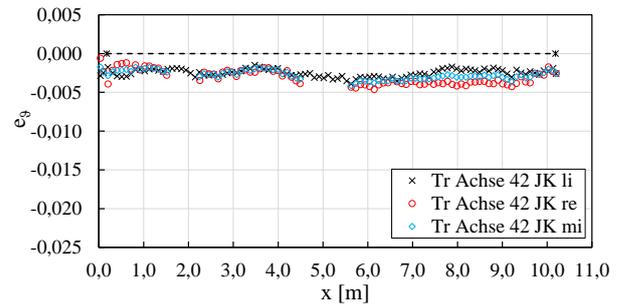
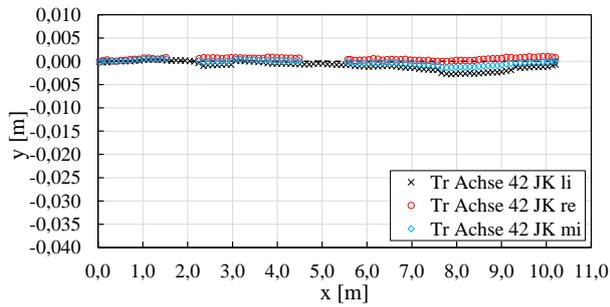


Abb. 67: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der BSH Binder des Bauvorhabens 2020-KW38\_1.2

### A.9 Messergebnisse – Bauvorhaben 2020-KW38\_1.3

Bauort	68199 Mannheim						
Messdatum	15.09.2020						
Hersteller Holzbauteile	H_C						
Montagefirma	unbekannt						
Bauteile	Anzahl	Form	L [mm]	H <sub>max</sub> [mm]	H <sub>min</sub> [mm]	Breite [mm]	Material
	2x 4	 über zwei Felder	9.950 - 10.100	980	-	260	GL 24h
Aussteifungstyp	BSH Dachscheibe						
Gabellagerung	Stahlbeton Auflagertaschen oder OK + UK Binder horizontal gehalten						
Belastung (zum Zeitpunkt d. Messung)	Eigengewicht der Holzbauteile, Dachscheibe, Dampfsperre						
Lufttemperatur (ca. 1,0 m über GOK)	27,5 °C						
Luftfeuchtigkeit (ca. 1,0 m über GOK)	50,5 %						
Holzfeuchtigkeit	-						
Bemerkungen	-						

**Beschreibung des Bauvorhabens** Es handelt sich um den Neubau einer eingeschossigen Lagerhalle mit BSH Bindern die über zwei Felder mit je ca. 10 m spannen. Die Aussteifung erfolgt über die Dachscheibe und Stahlbetonwände.



**Abb. 68:** Bauvorhaben 2020-KW38\_1.3 zum Zeitpunkt der Messung

Auffälligkeiten Messergebnisse:

- Vorkrümmungen: - alle Binder sind in die gleiche Richtung vorgekrümmt bzw. besitzen keine nennenswerte Vorkrümmung  
 - Form  $e_y$  eines Binders meist annähernd eine sinus-Halbwellen  
 - Maximalwert ca. in Feldmitte, im Betrag teils allerdings recht unterschiedlich (1 - 8 mm)
- Vortordierungen: - kein Zusammenhang bei benachbarten Bindern erkennbar  
 -  $e_y$  wechselt teils das Vorzeichen über die Länge  
 - oft Maximalwerte an den Auflagern  
 - zwischen den Auflagern meist annähernd linearer Verlauf

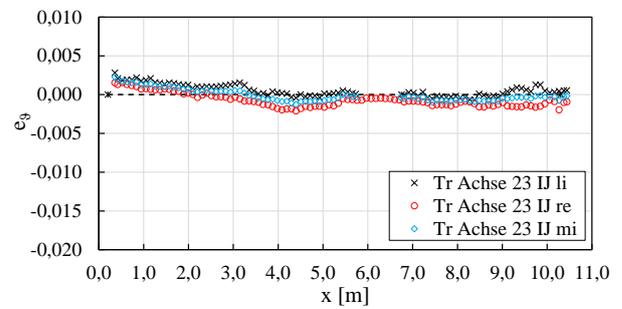
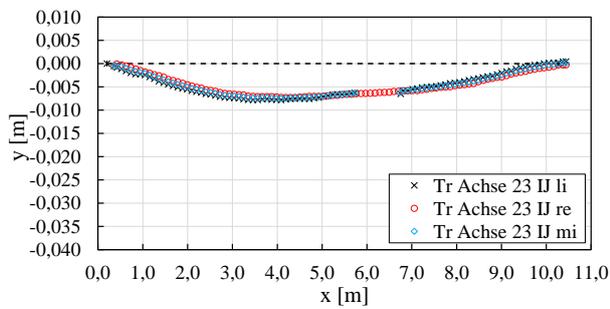
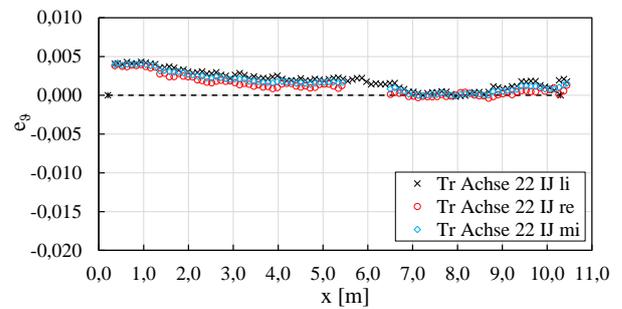
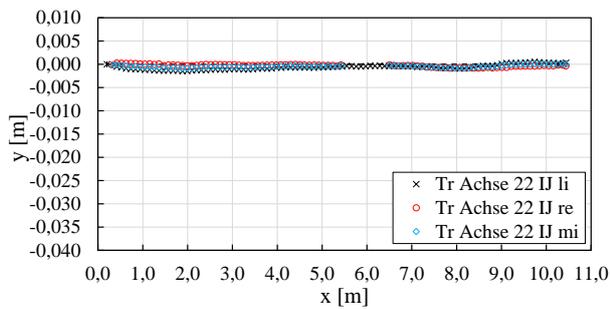
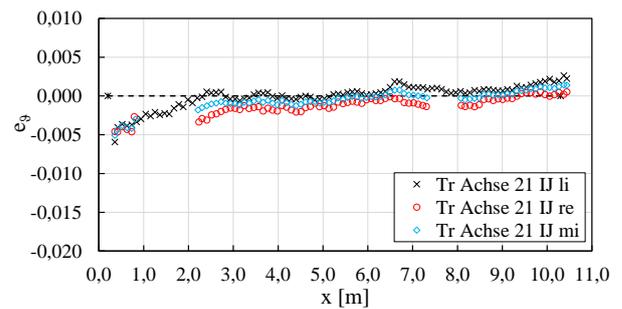
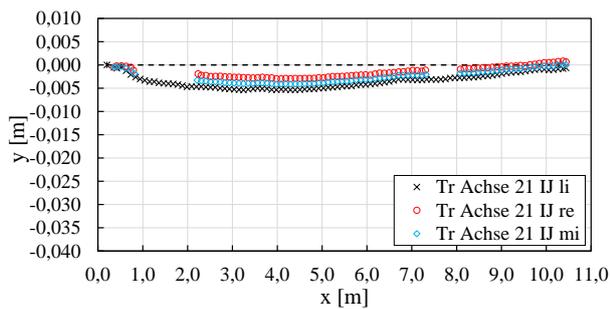


Abb. 69: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der BSH Binder des Bauvorhabens 2020-KW38\_1.3

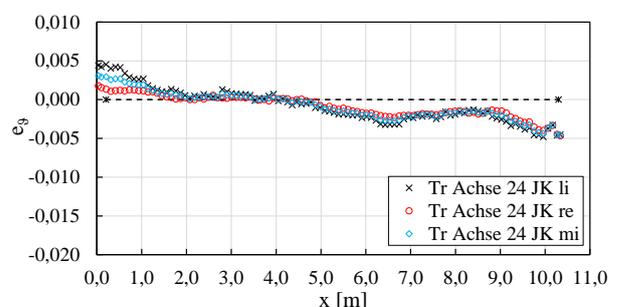
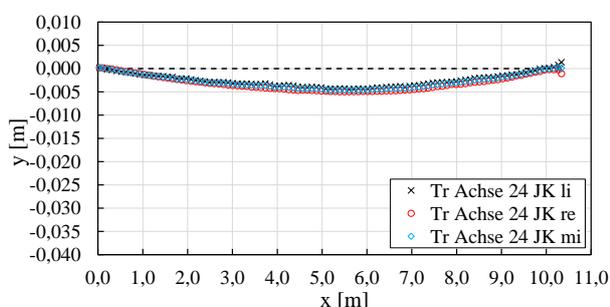
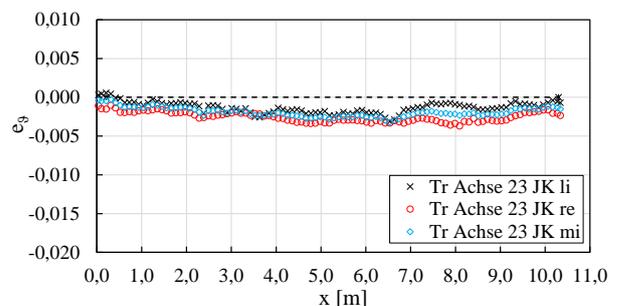
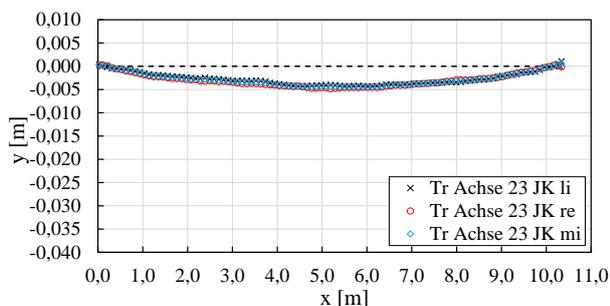
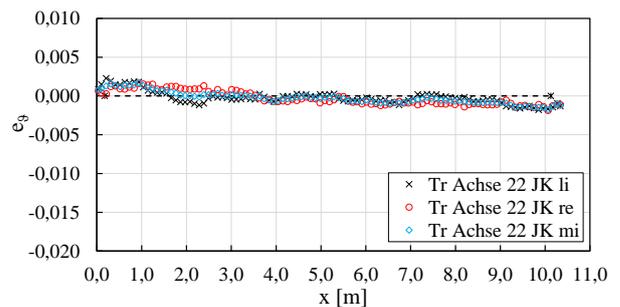
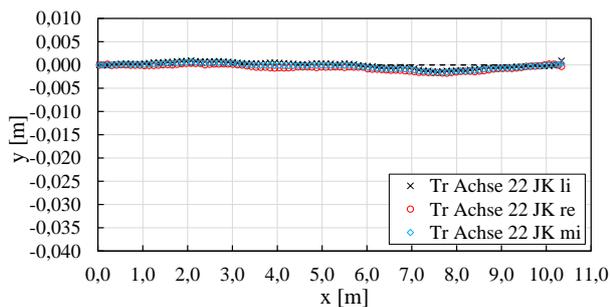
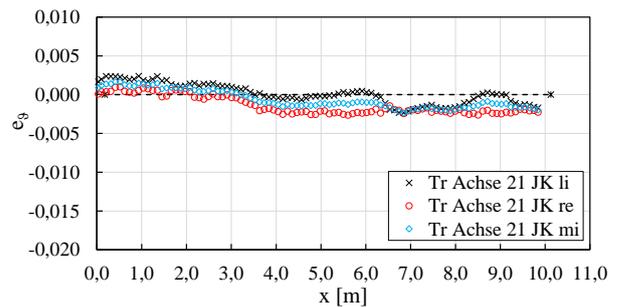
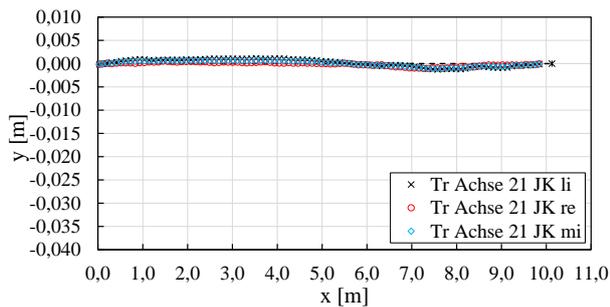
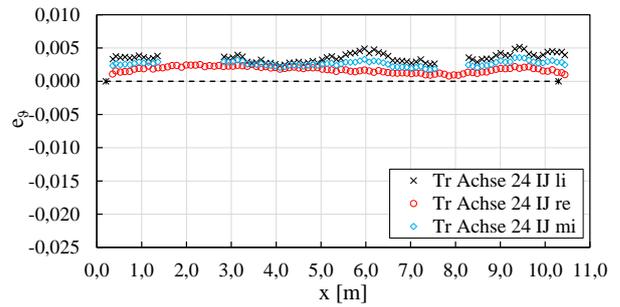
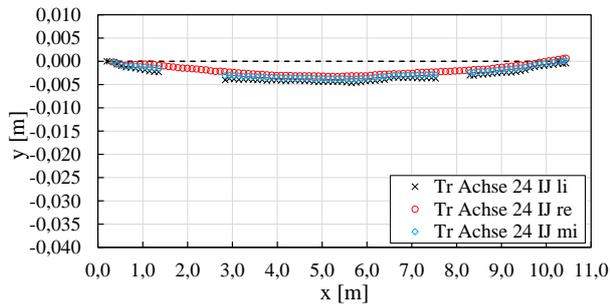


Abb. 70: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der BSH Binder des Bauvorhabens 2020-KW38\_1.3



**A.10 Messergebnisse – Bauvorhaben 2020-KW38\_1.4**

Bauort 68199 Mannheim

Messdatum 15.09.2020

Hersteller Holzbauteile H\_C

Montagefirma unbekannt

Bauteile	Anzahl	Form	L [mm]	H <sub>max</sub> [mm]	H <sub>min</sub> [mm]	Breite [mm]	Material
	1		6.900	1.140	-	240	GL 24h
	2		6.900	690	-	240	GL 24h

Aussteifungstyp BSH Dachscheibe

Gabellagerung Stahlbeton Auflagertaschen oder OK + UK Binder horizontal gehalten

Belastung Eigengewicht der Holzbauteile, Dachscheibe, Dampfsperre  
 (zum Zeitpunkt d. Messung)

Lufttemperatur 27,5 °C  
 (ca. 1,0 m über GOK)

Luftfeuchtigkeit 50,5 %  
 (ca. 1,0 m über GOK)

Holzfeuchtigkeit -

Bemerkungen -

**Beschreibung des Bauvorhabens** Es handelt sich um den Neubau einer eingeschossigen Lagerhalle mit 6,9 m spannenden BSH Bindern. Die Aussteifung erfolgt über die Dachscheibe, Stahlbetonwände und eingespannte Stahlbetonstützen.

Auffälligkeiten Messergebnisse:

- Vorkrümmungen: - kein Zusammenhang bei benachbarten Bindern erkennbar  
 - Form  $e_y$  eines Binders annähernd eine sinus-Halbwellen  
 - Maximalwert ca. in Feldmitte, im Betrag teils allerdings recht unterschiedlich (1 - 3 mm)
- Vortordierungen: - kein Zusammenhang bei benachbarten Bindern erkennbar  
 -  $e_z$  wechselt teils das Vorzeichen über die Länge  
 - oft Maximalwerte an den Auflagern

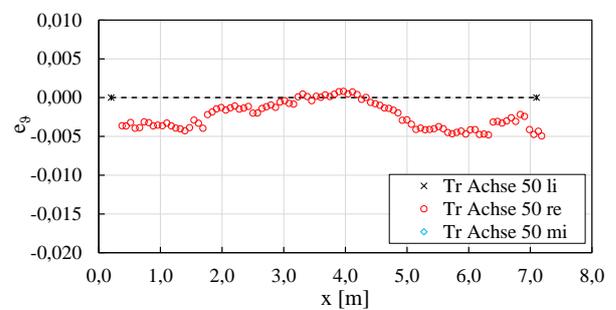
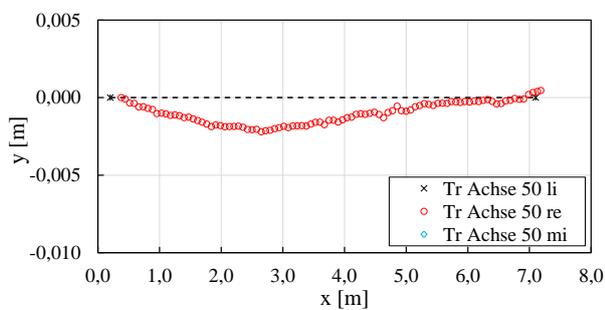
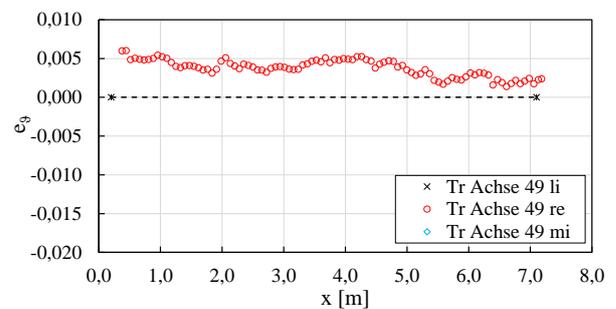
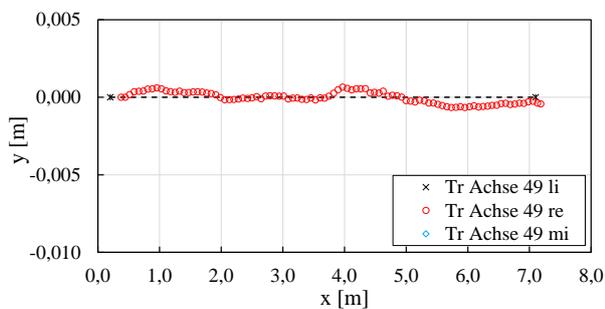
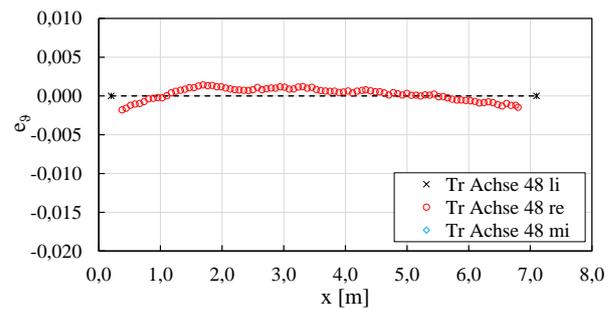
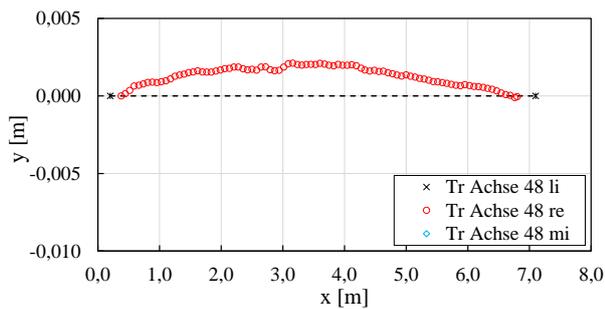


Abb. 71: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der BSH Binder des Bauvorhabens 2020-KW38\_1.4

### A.11 Messergebnisse – Bauvorhaben 2020-KW38\_2

Bauort	86368 Gersthofen						
Messdatum	17.09.2020						
Hersteller Holzbauteile	H_C						
Montagefirma	M_C = H_C						
Bauteile	Anzahl	Form	L [mm]	H <sub>max</sub> [mm]	H <sub>min</sub> [mm]	Breite [mm]	Material
	13		42.460	2.540	1.720	240	GL 28c
Aussteifungstyp	Dachverbände (Achsen 15-16, 20-21, 24-25)						
Gabellagerung	Stahlbeton Auflagertaschen						
Belastung <i>(zum Zeitpunkt d. Messung)</i>	Eigengewicht der Holzbauteile						
Lufttemperatur <i>(ca. 1,0 m über GOK)</i>	20,7 °C						
Luftfeuchtigkeit <i>(ca. 1,0 m über GOK)</i>	65,1 %						
Holzfeuchtigkeit	11,8 % (Binder Achse 22); 12,7 % (Binder Achse 23)						
Bemerkungen	Binder 23 nur an First- und Auflagerpunkten mit dem Dachverband gekoppelt.						

**Beschreibung des Bauvorhabens** Es handelt sich um den Neubau einer eingeschossigen Logistikhalle mit 42,3 m spannenden BSH Satteldach-Fischbauchträger. Die Aussteifung erfolgt über die Dachverbände und eingespannte Stahlbetonstützen.



Abb. 72: Bauvorhaben 2020-KW38\_2 zum Zeitpunkt der Messung

Auffälligkeiten Messergebnisse:

- **Vorkrümmungen:**
  - alle Binder die an einem Dachverband angeschlossen sind, sind in der Regel in die gleiche Richtung vorgekrümmt (ausgenommen Träger Achse 20) bzw. besitzen keine nennenswerte Vorkrümmung
  - Form  $e_y$  eines Binders oft annähernd eine sinus-Halbwellen, aufgenommen Binder Achse 17, 19, 20, 25 (zusätzlich kleiner Wellen vorhanden)
  - Maximalwert meist ca. in Feldmitte, im Betrag teils allerdings recht unterschiedlich (2 - 14 mm), insgesamt im Verhältnis zur Spannweite klein
  - kein Zusammenhang zwischen der der Größe der Vorkrümmung und der Lage der Dachverbände
- **Vortordierungen:**
  - teils ähnlicher Verlauf der Vortordierung benachbarter Binder
  - $e_y$  wechselt teils das Vorzeichen über die Länge
  - oft Maximalwerte an den Auflagern
  - zwischen den Auflagern meist annähernd linearer Verlauf

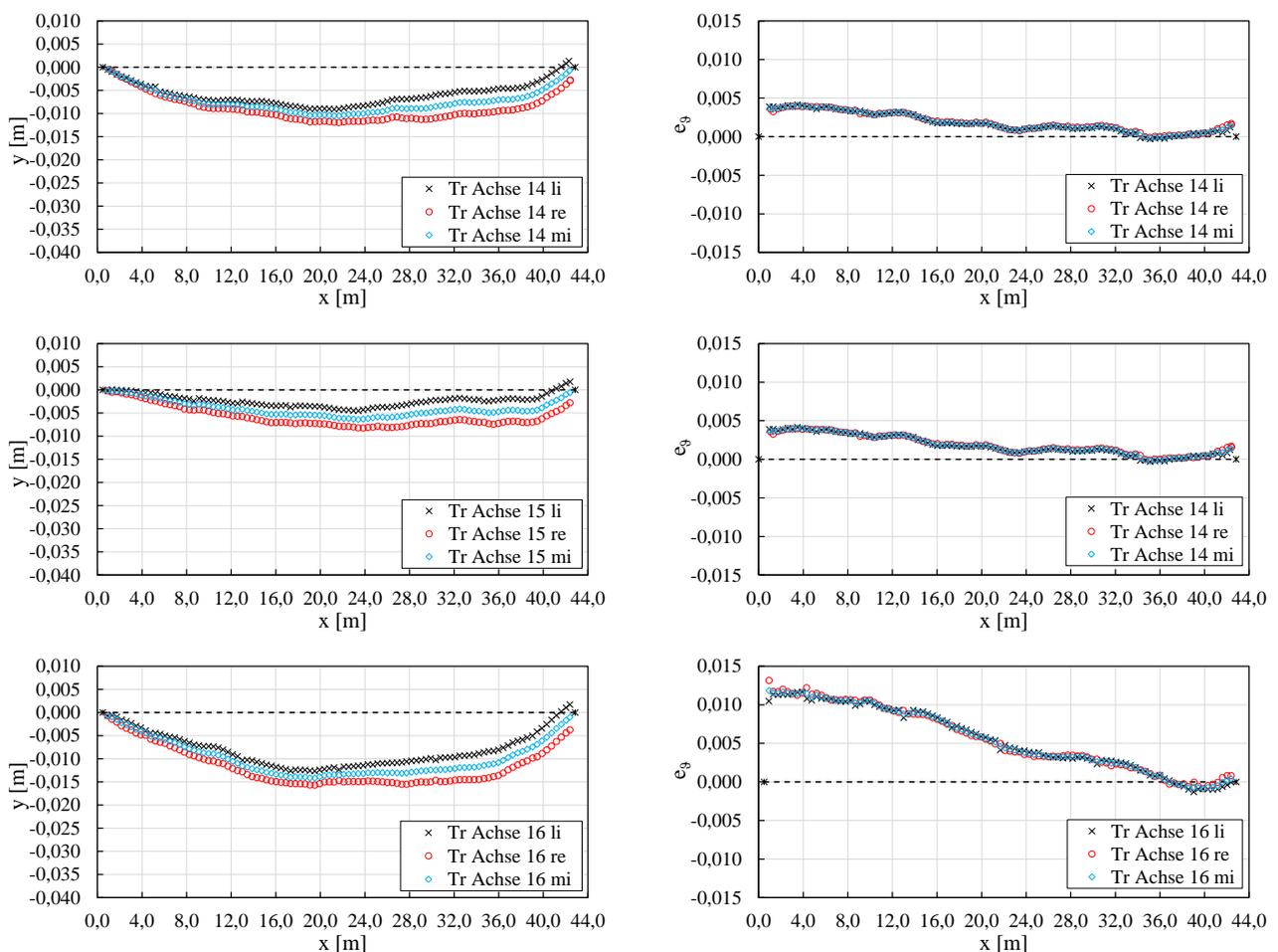


Abb. 73: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der BSH Binder des Bauvorhabens 2020-KW38\_2

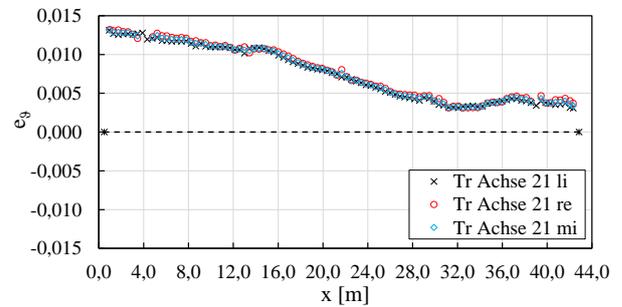
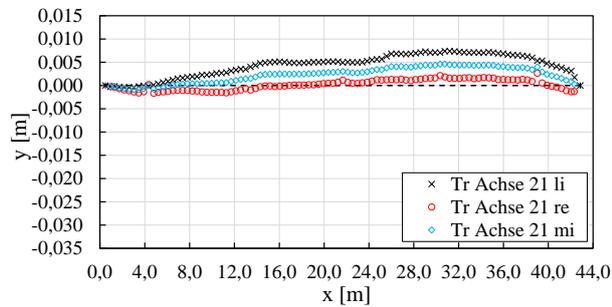
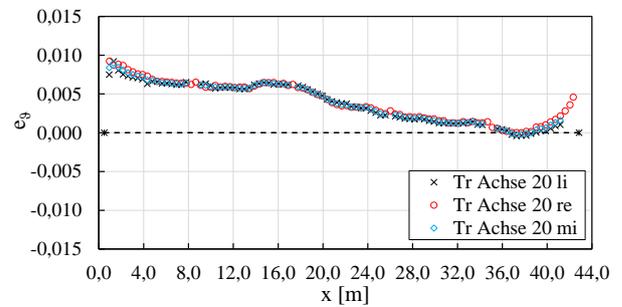
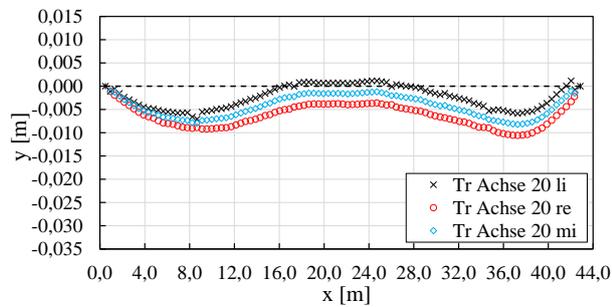
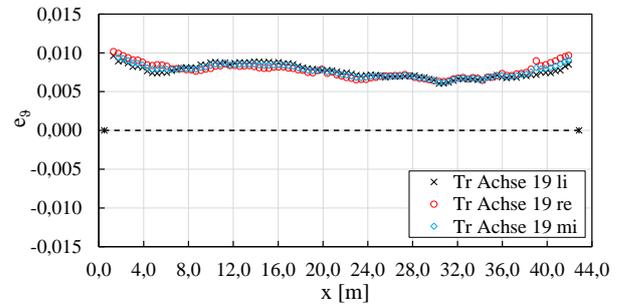
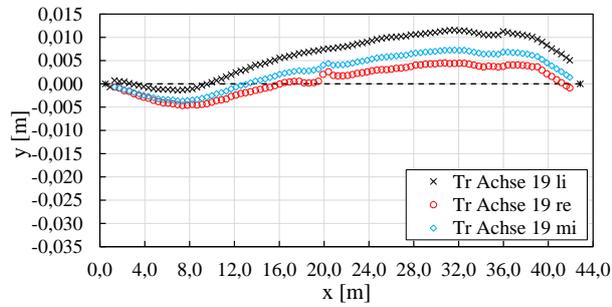
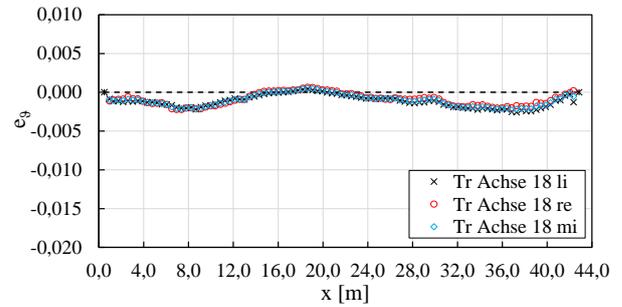
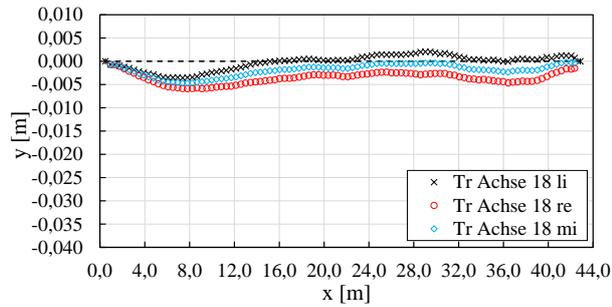
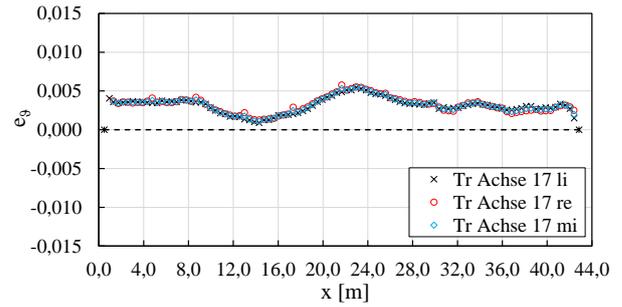
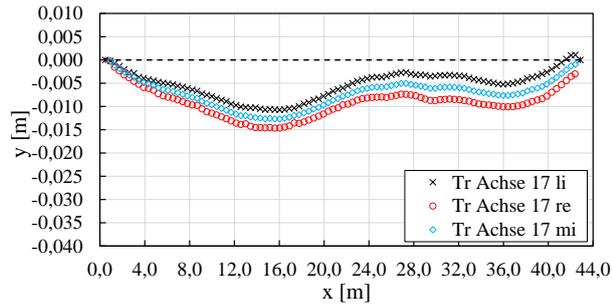


Abb. 74: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der BSH Binder des Bauvorhabens 2020-KW38\_2

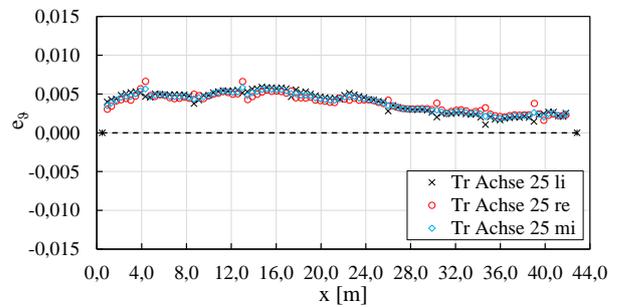
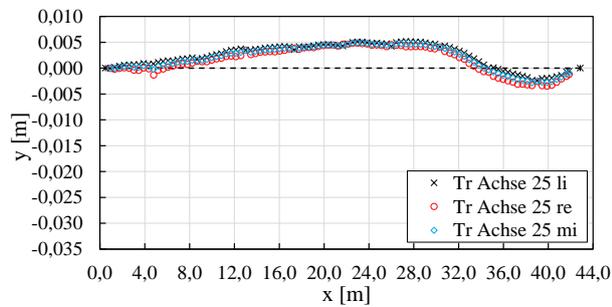
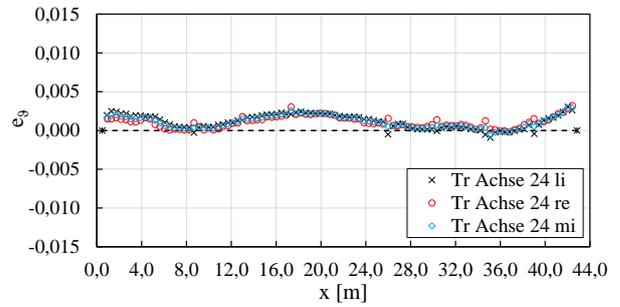
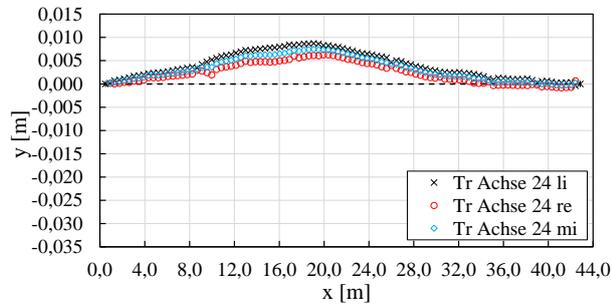
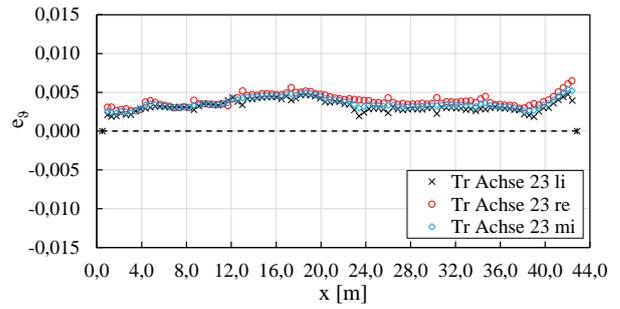
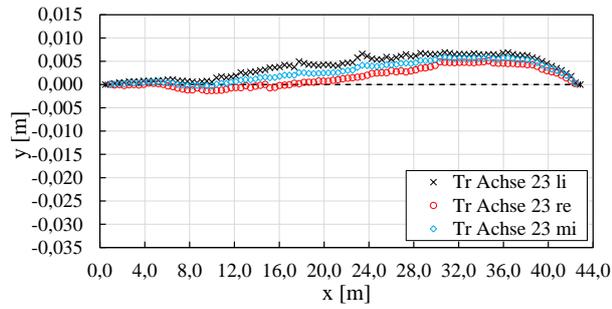
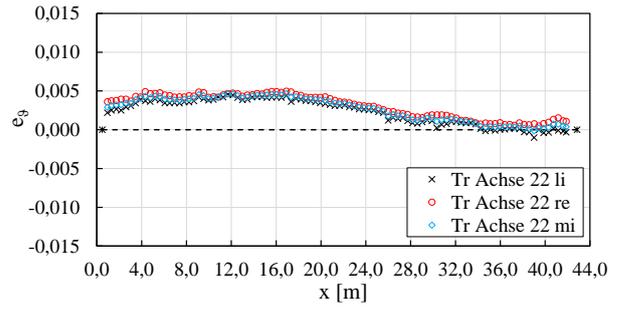
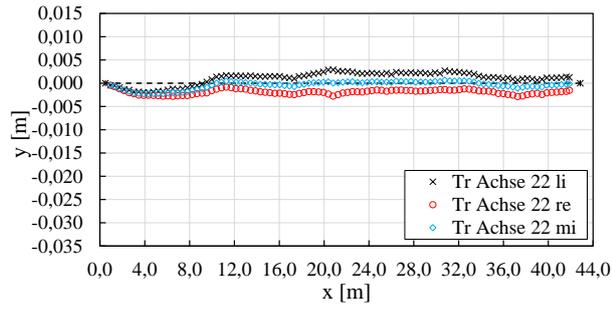


Abb. 75: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der BSH Binder des Bauvorhabens 2020-KW38\_2

### A.12 Messergebnisse – Bauvorhaben 2020-KW45\_1.1

Bauort	67112 Mutterstadt						
Messdatum	06.11.2020						
Hersteller Holzbauteile	H_C						
Montagefirma	unbekannt						
Bauteile	Anzahl	Form	L [mm]	H <sub>max</sub> [mm]	H <sub>min</sub> [mm]	Breite [mm]	Material
	16		23.500	1.650	1.200	180	GL 28c
Aussteifungstyp	Dachverbände (Achsen 5.2-5.3, 8.3-8.4)						
Gabellagerung	Stahlbeton Auflagertaschen						
Belastung (zum Zeitpunkt d. Messung)	Eigengewicht der Holzbauteile, Trapezblech						
Lufttemperatur (ca. 1,0 m über GOK)	ca. 80 % (Wetterstation Mutterstadt)						
Luftfeuchtigkeit (ca. 1,0 m über GOK)	ca. 11 °C (Wetterstation Mutterstadt)						
Holzfeuchtigkeit	-						
Bemerkungen	-						

**Beschreibung des Bauvorhabens** Es handelt sich um den mehrschiffigen Neubau eines Großmarktes mit in diesem Feld 23,5 m spannenden BSH Fischbauchträger. Die Aussteifung erfolgt in diesem Gebäudeteil über die Dachverbände, eingespannte Stahlbetonstützen und Stahlbetonwände.



Abb. 76: Bauvorhaben 2020-KW45\_1.1 zum Zeitpunkt der Messung

Auffälligkeiten Messergebnisse:

- Vorkrümmungen:
  - alle Binder sind in der Regel in die gleiche Richtung vorgekrümmt
  - Form  $e_y$  eines Binders annähernd eine sinus-Halbwellen
  - Maximalwert meist ca. in Feldmitte, im Betrag teils allerdings recht unterschiedlich (12 - 41 mm)
  - maximale Vorkrümmung beim Binder 8.4 der direkt an einen Dachverband angeschlossen ist. Binder die am anderen Dachverband angeschlossen sind weisen deutlich geringere Verkrümmungen auf
- Vortordierungen:
  - teils ähnlicher Verlauf der Vortordierung benachbarter Binder
  - $e_s$  wechselt teils das Vorzeichen über die Länge
  - oft Maximalwerte an den Auflagern
  - zwischen den Auflagern oft annähernd linearer Verlauf

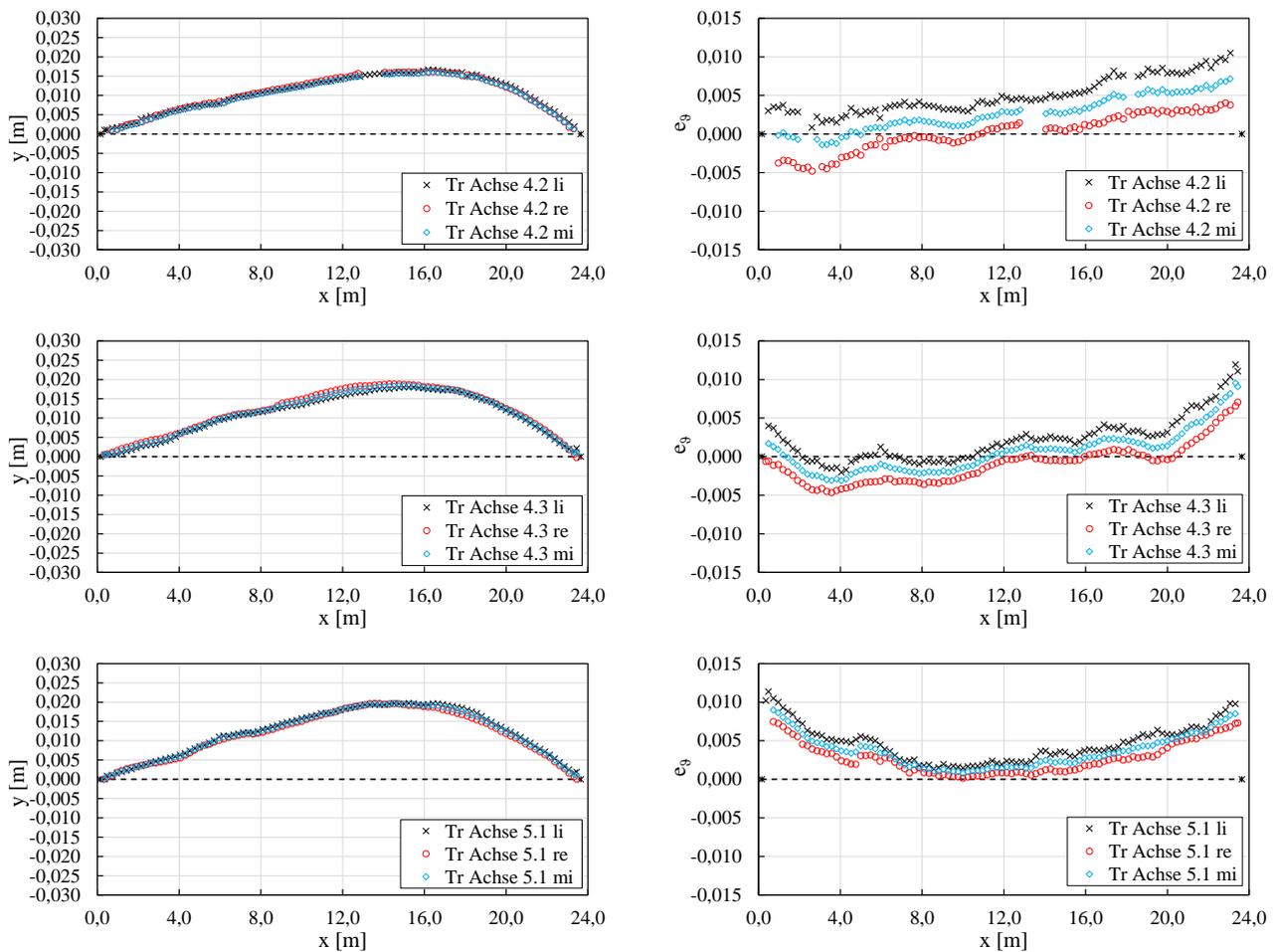


Abb. 77: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der BSH Binder des Bauvorhabens 2020-KW45\_1.1

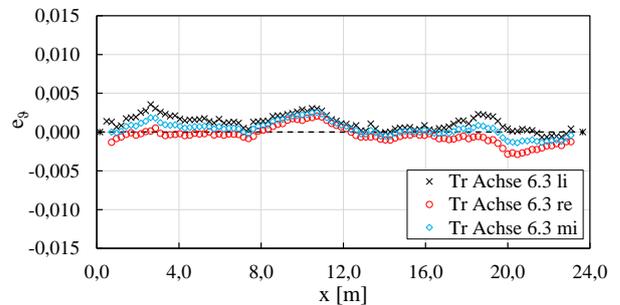
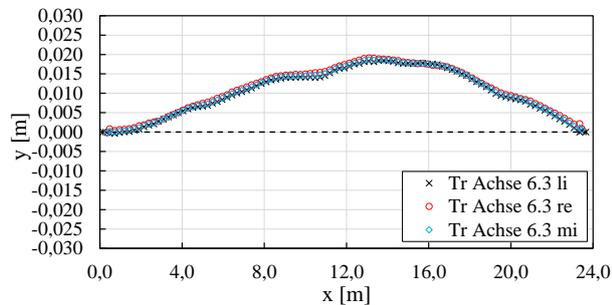
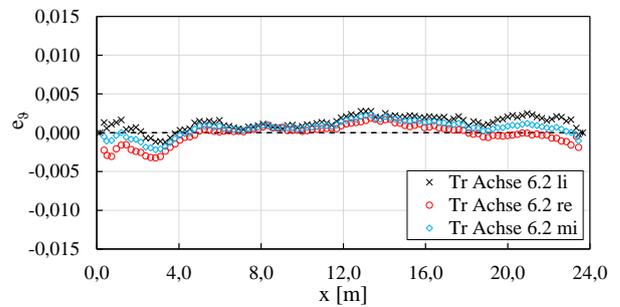
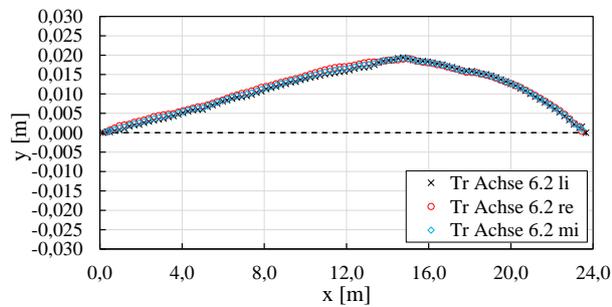
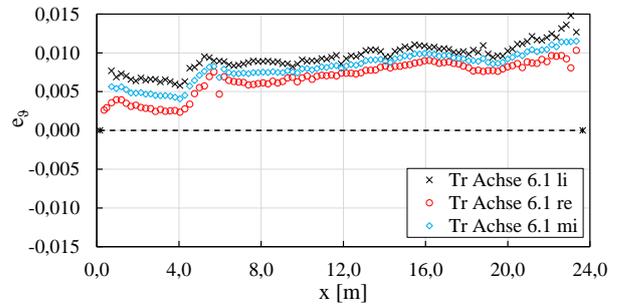
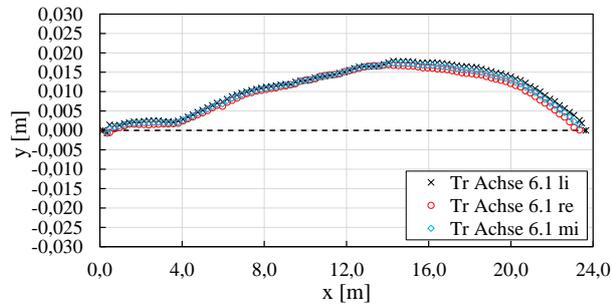
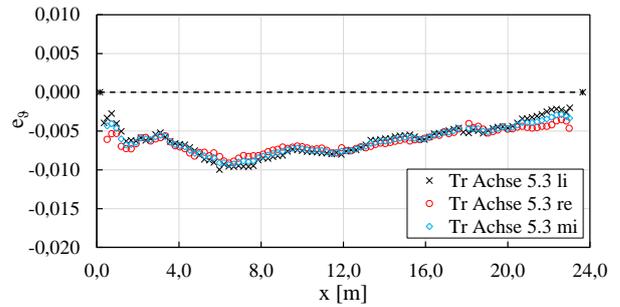
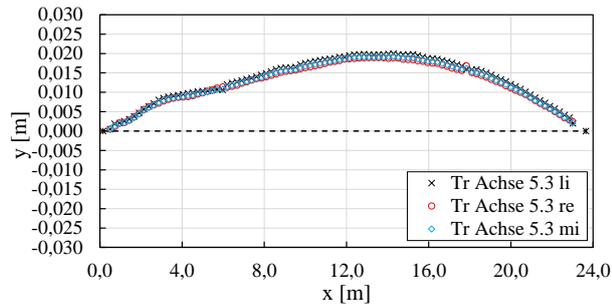
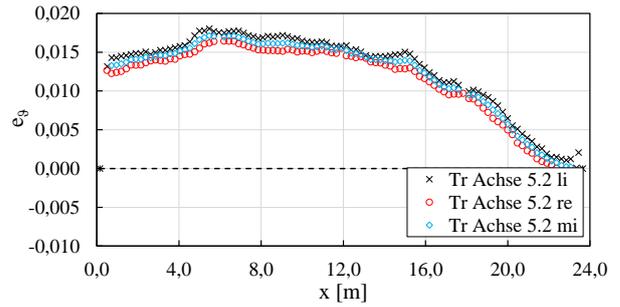
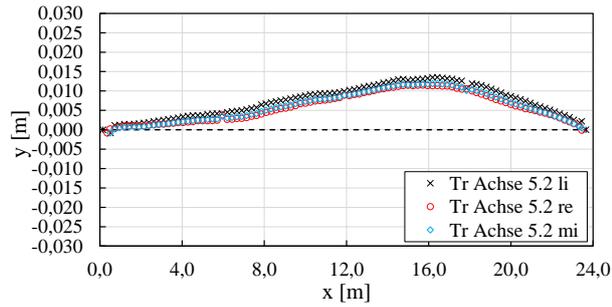


Abb. 78: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der BSH Binder des Bauvorhabens 2020-KW45\_1.1

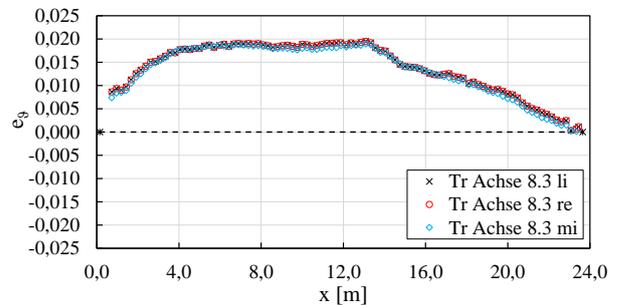
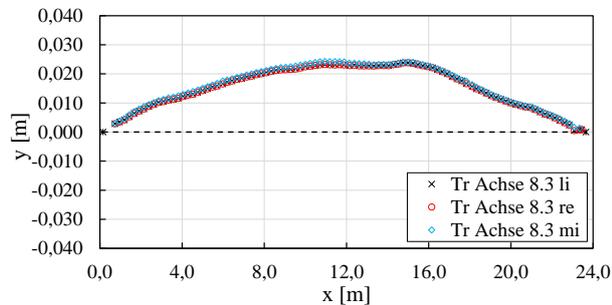
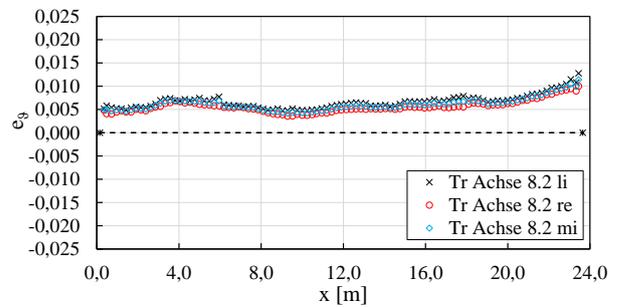
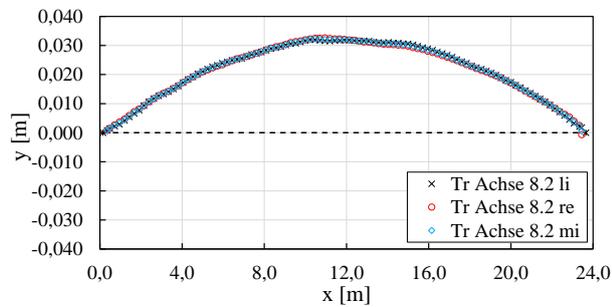
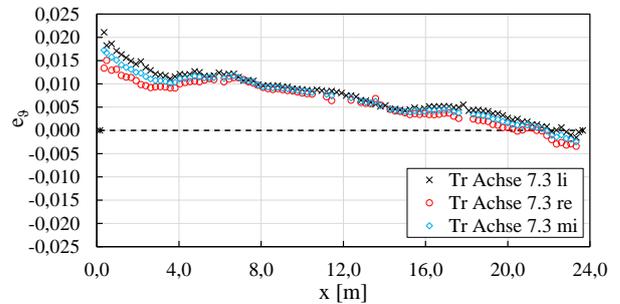
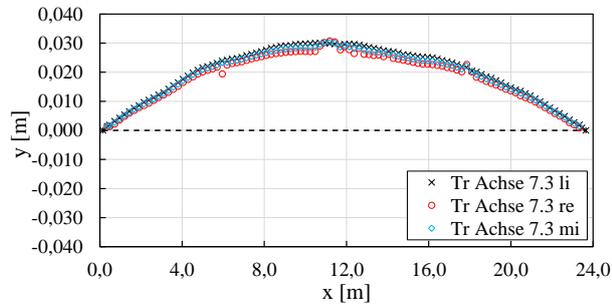
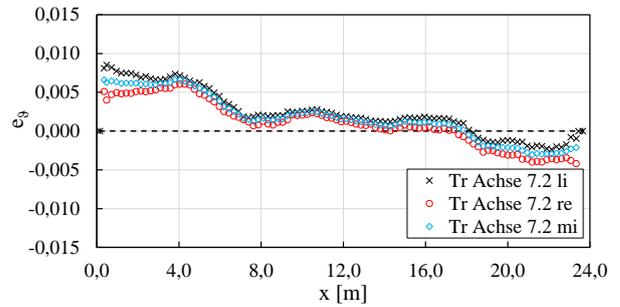
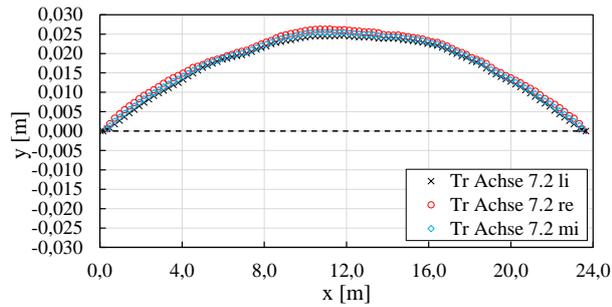
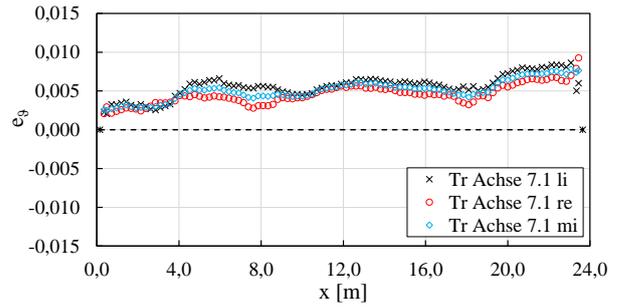
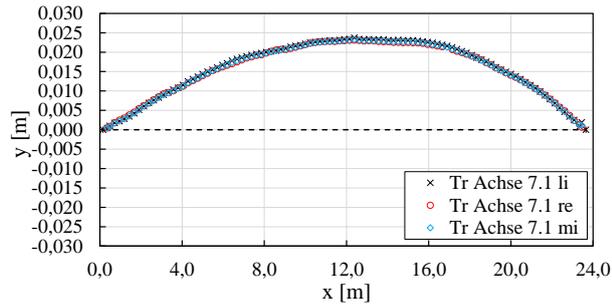


Abb. 79: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der BSH Binder des Bauvorhabens 2020-KW45\_1.1

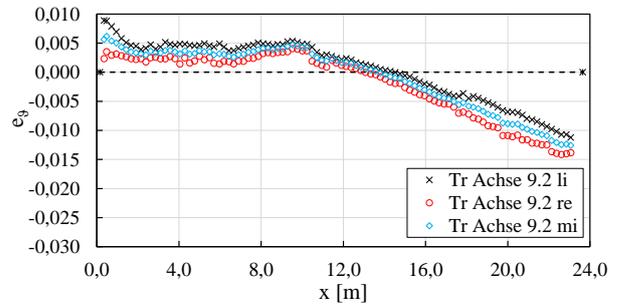
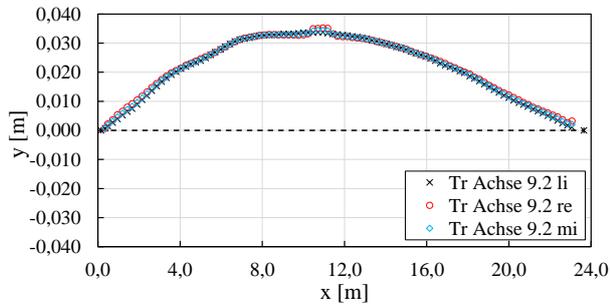
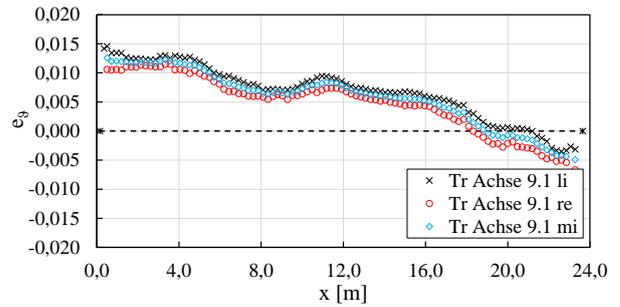
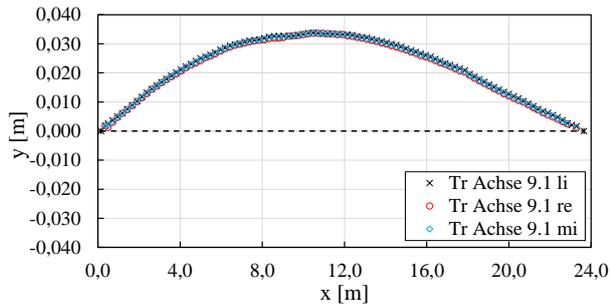
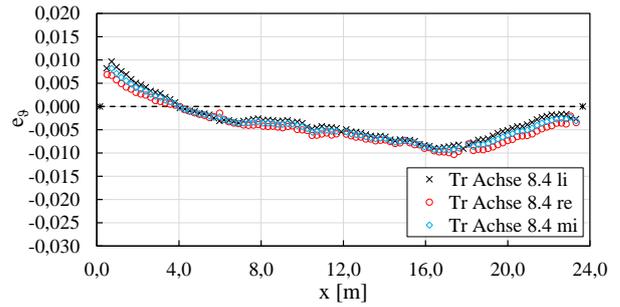
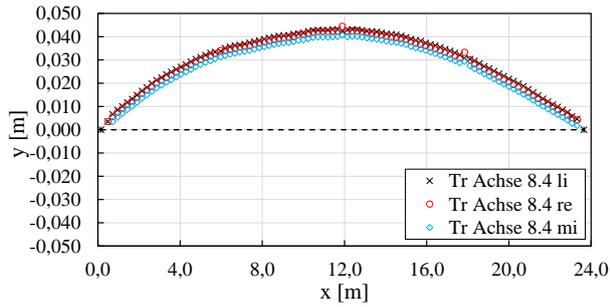


Abb. 80: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der BSH Binder des Bauvorhabens 2020-KW45\_1.1

### A.13 Messergebnisse – Bauvorhaben 2020-KW45\_1.2

Bauort	67112 Mutterstadt						
Messdatum	06.11.2020						
Hersteller Holzbauteile	H_C						
Montagefirma	unbekannt						
Bauteile	Anzahl	Form	L [mm]	H <sub>max</sub> [mm]	H <sub>min</sub> [mm]	Breite [mm]	Material
	13		26.500	1.850	1.280	200	GL 28c
Aussteifungstyp	Dachverband (Achse 4.1-4.2)						
Gabellagerung	Stahlbeton Auflagertaschen						
Belastung (zum Zeitpunkt d. Messung)	Eigengewicht der Holzbauteile						
Lufttemperatur (ca. 1,0 m über GOK)	ca. 80 % (Wetterstation Mutterstadt)						
Luftfeuchtigkeit (ca. 1,0 m über GOK)	ca. 11 °C (Wetterstation Mutterstadt)						
Holzfeuchtigkeit	-						
Bemerkungen	-						

**Beschreibung des Bauvorhabens** Es handelt sich um den mehrschiffigen Neubau eines Großmarktes mit in diesem Feld 26,5 m spannenden BSH Fischbauchträger. Die Aussteifung erfolgt in diesem Gebäudeteil über die Dachverbände und eingespannte Stahlbetonstützen.



**Abb. 81:** Bauvorhaben 2020-KW45\_1.2 zum Zeitpunkt der Messung

Auffälligkeiten Messergebnisse:

- Vorkrümmungen:
  - alle Binder sind in der Regel in die gleiche Richtung vorgekrümmt
  - Form  $e_y$  eines Binders meist annähernd eine sinus-Halbwellen
  - Maximalwert meist ca. in Feldmitte, im Betrag teils allerdings recht unterschiedlich (2 - 14 mm)
  - minimale Vorkrümmung am Dachverbandsbinder Achse 4.2
- Vortordierungen:
  - teils ähnlicher Verlauf der Vortordierung benachbarter Binder
  - $e_\vartheta$  wechselt teils das Vorzeichen über die Länge
  - oft Maximalwerte an den Auflagern
  - zwischen den Auflagern oft annähernd linearer Verlauf

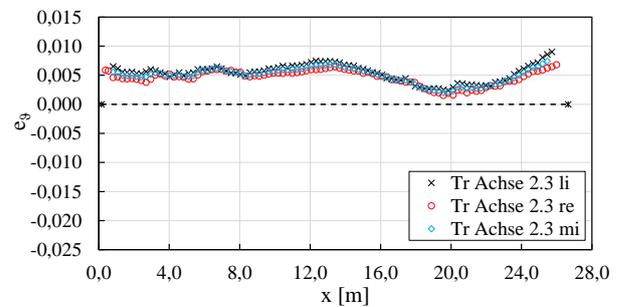
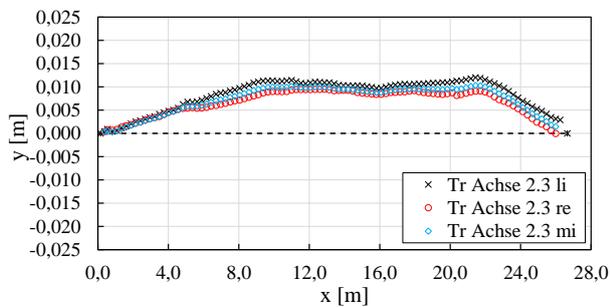
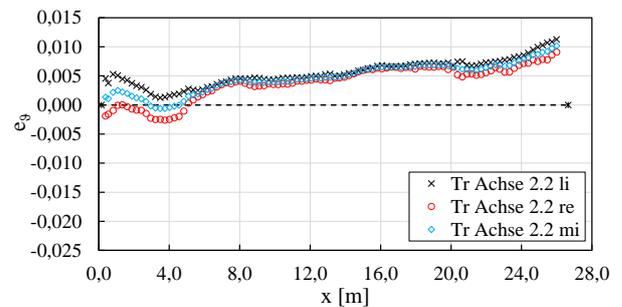
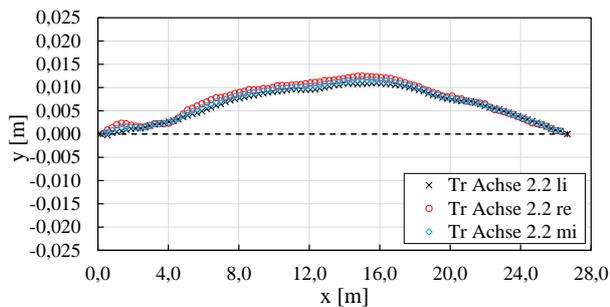
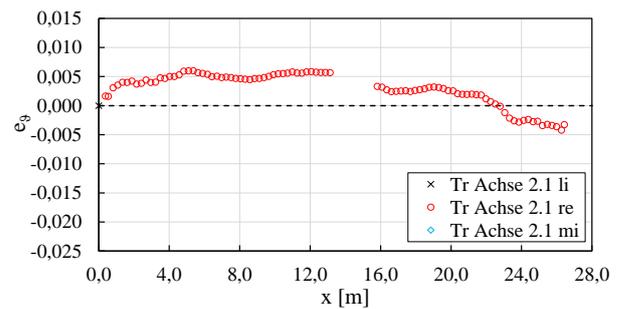
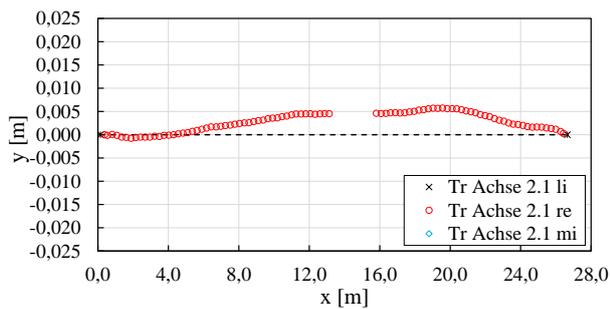


Abb. 82: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der BSH Binder des Bauvorhabens 2020-KW45\_1.2

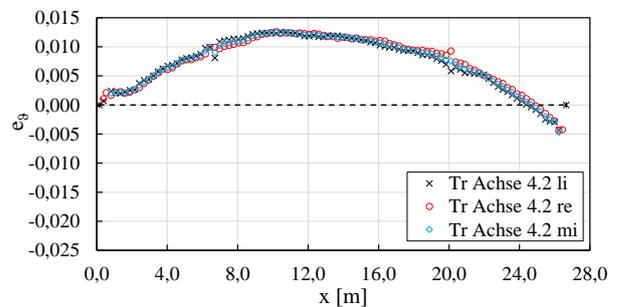
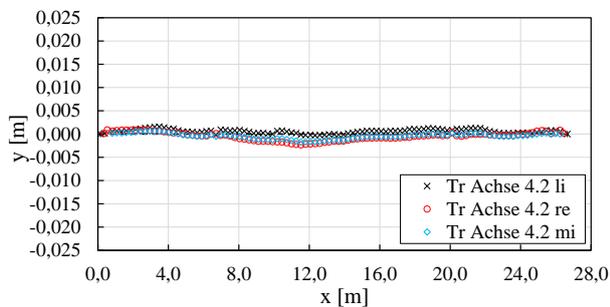
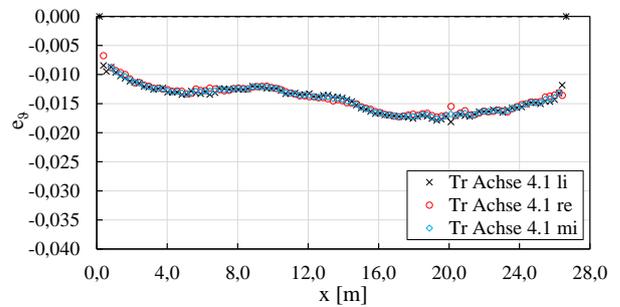
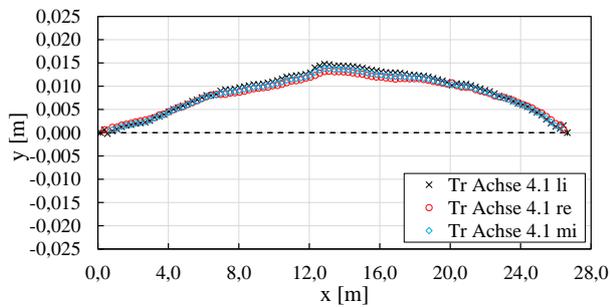
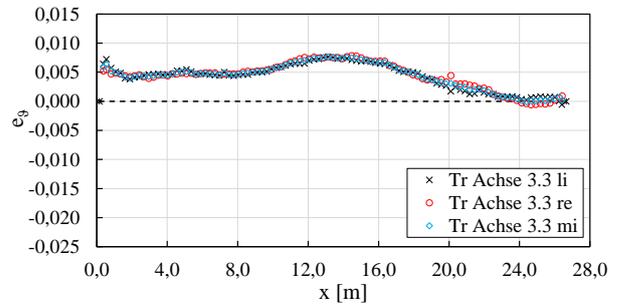
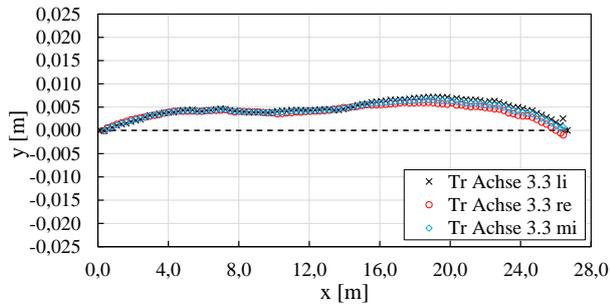
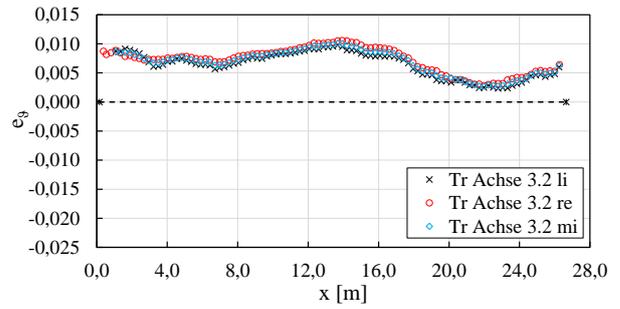
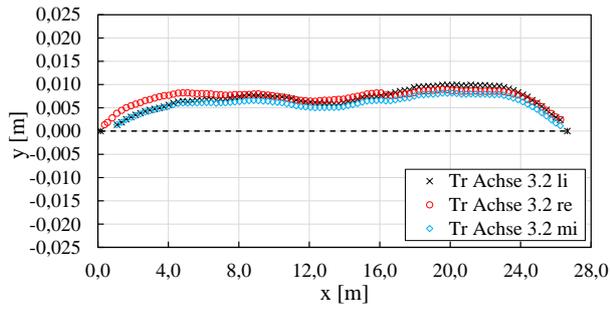
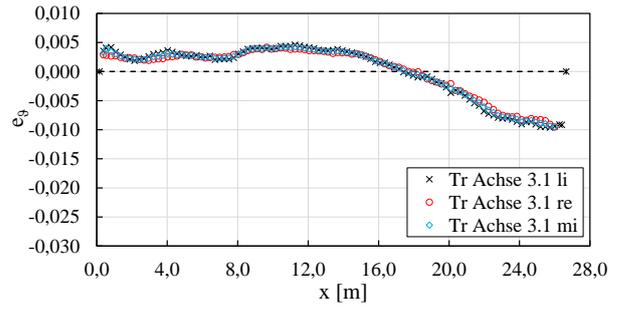
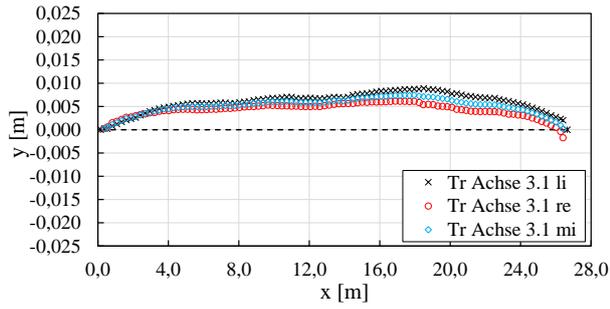


Abb. 83: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der BSH Binder des Bauvorhabens 2020-KW45\_1.2

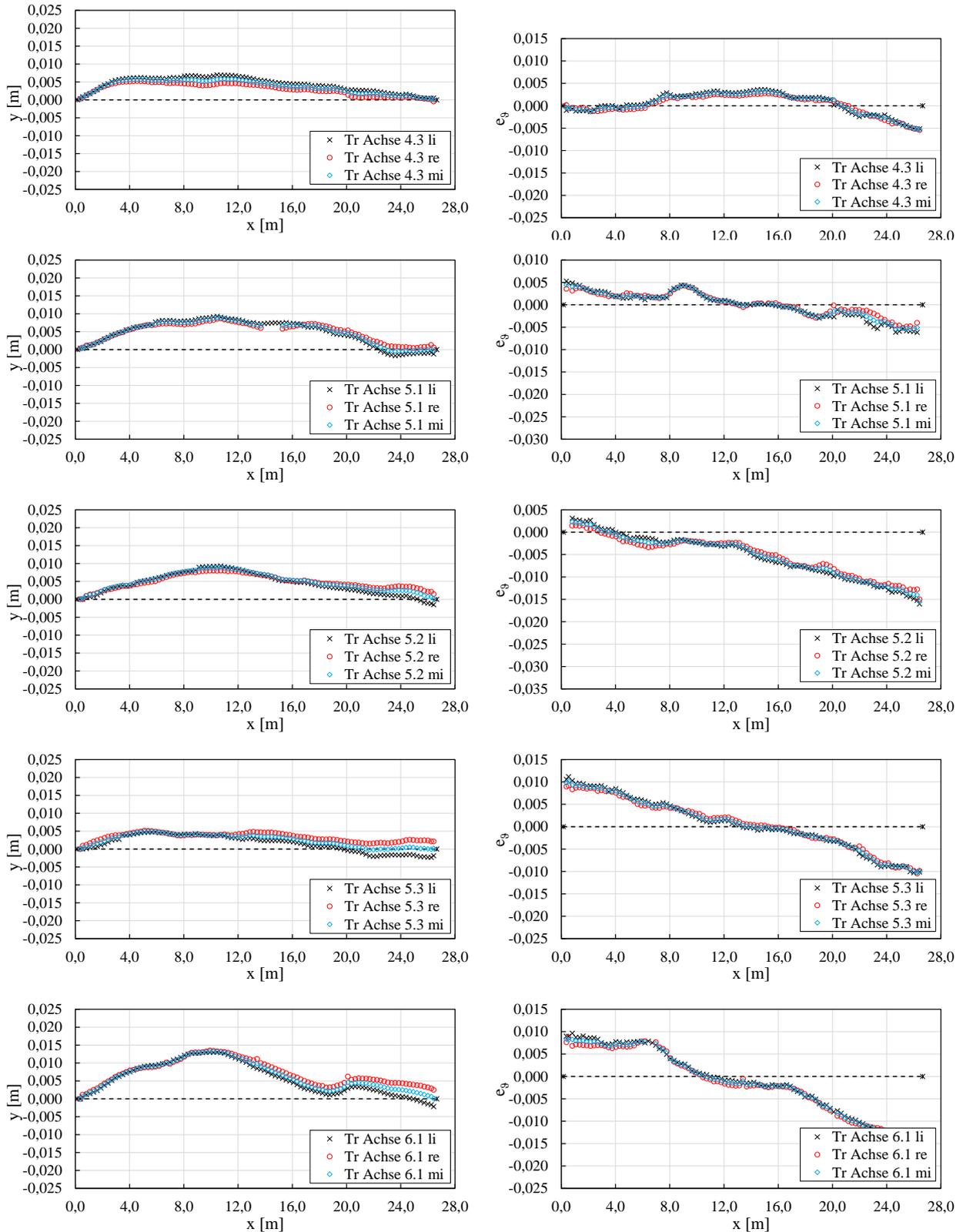


Abb. 84: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der BSH Binder des Bauvorhabens 2020-KW45\_1.2

### A.14 Messergebnisse – Bauvorhaben 2020-KW47

Bauort	91320 Ebermannstadt						
Messdatum	04.12.2020						
Hersteller Holzbauteile	H_B						
Montagefirma	unbekannt						
Bauteile	Anzahl	Form	L [mm]	H <sub>max</sub> [mm]	H <sub>min</sub> [mm]	Breite [mm]	Material
	5		20.840	1.353	1.141	200	GL 24h
Aussteifungstyp	Dachverbände (Achsen 2-3, 5-6)						
Gabellagerung	Beihölzer (x = 0) und Stahlbeton Auflagertaschen (x = L)						
Belastung (zum Zeitpunkt d. Messung)	Eigengewicht der Holzbauteile, Trapezblech, ca. 2 cm Schnee und punktuell gelagerte Pakete der Dachdämmung						
Lufttemperatur (ca. 1,0 m über GOK)	2,9 °C						
Luftfeuchtigkeit (ca. 1,0 m über GOK)	65,9 %						
Holzfeuchtigkeit	11,7 % (Stütze Achse D/3); 12,3 % (Stütze Achse B/1); 13,2 % (Stütze Achse D/6)						
Bemerkungen	-						

**Beschreibung des Bauvorhabens** Es handelt sich um den Neubau einer Industriehalle mit 20,8 m spannenden BSH Satteldachträger. Die Aussteifung erfolgt in über die Dachverbände, eingespannte Stahlbetonstützen und Wandscheiben.



Abb. 85: Bauvorhaben 2020-KW47 zum Zeitpunkt der Messung

Auffälligkeiten Messergebnisse:

- **Vorkrümmungen:**
  - alle Binder sind in der Regel in die gleiche Richtung vorgekrümmt
  - Form  $e_y$  eines Binders annähernd eine sinus-Halbwellen
  - Maximalwert meist ca. in Feldmitte, im Betrag teils allerdings recht unterschiedlich (2 - 14 mm)
  - da 4 von 5 Bindern direkt an die Dachverbände angeschlossen sind, keine Aussage in Bezug auf einen möglichen Einflusse des Abstandes vom Dachverband möglich
- **Vortordierungen:**
  - teils ähnlicher Verlauf der Vortordierung benachbarter Binder
  - $e_s$  wechselt teils das Vorzeichen über die Länge
  - Maximalwerte in Feldmitte oder am Auflager  $x = L$  (Stahlbeton Auflagertasche)
  - zwischen den Auflagern teils annähernd linearer Verlauf

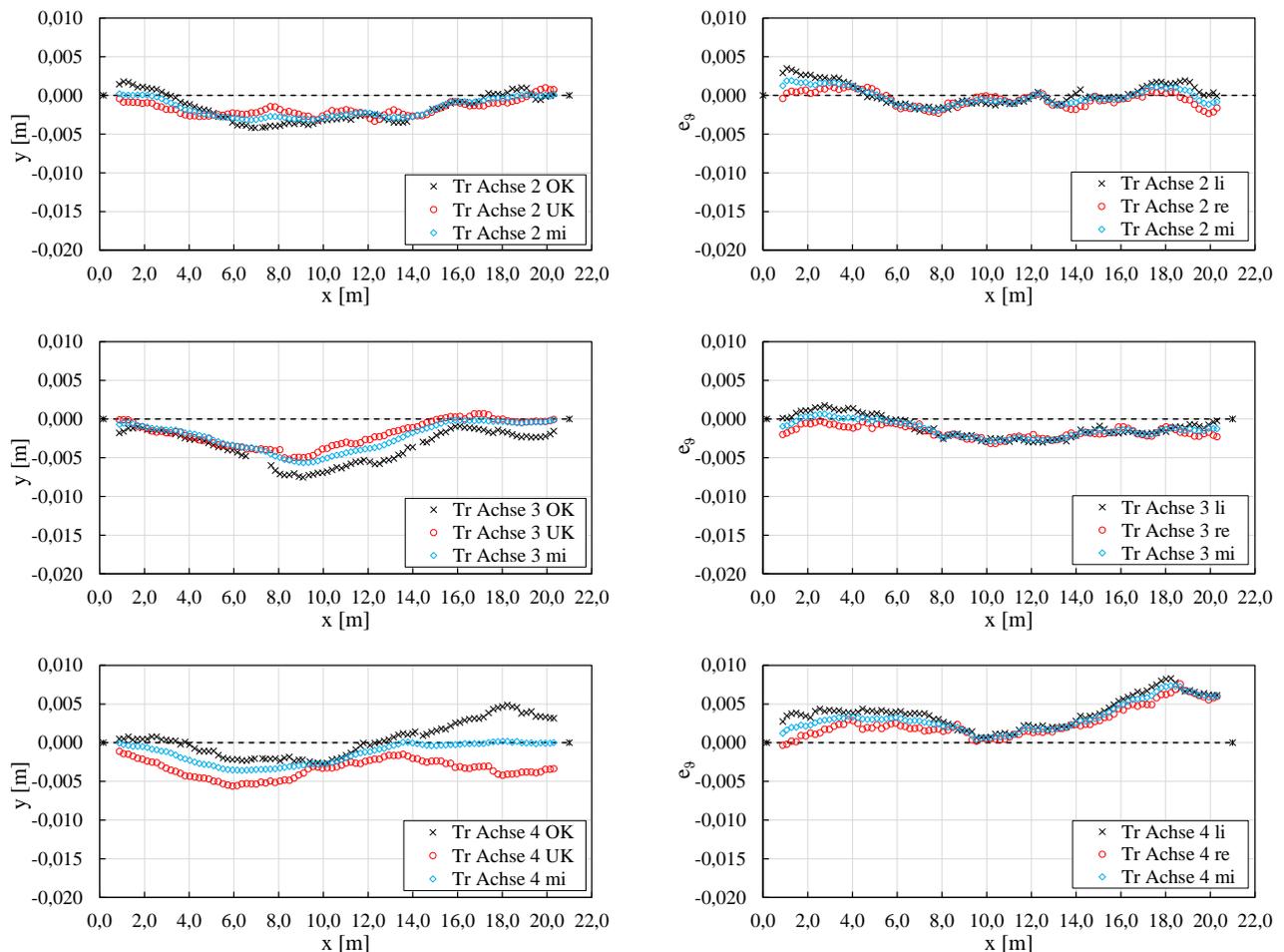


Abb. 86: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der BSH Binder des Bauvorhabens 2020-KW47

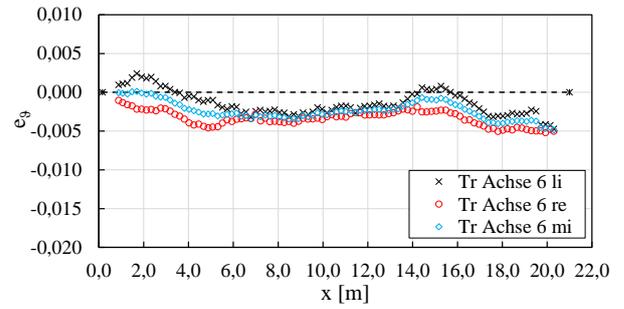
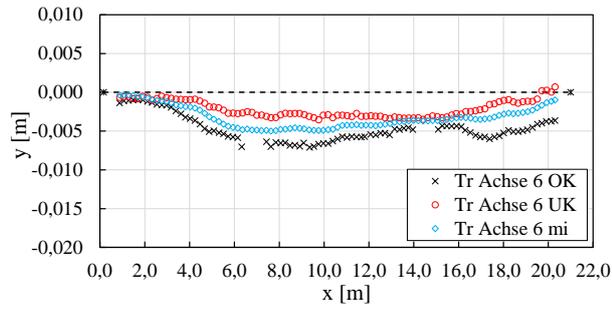
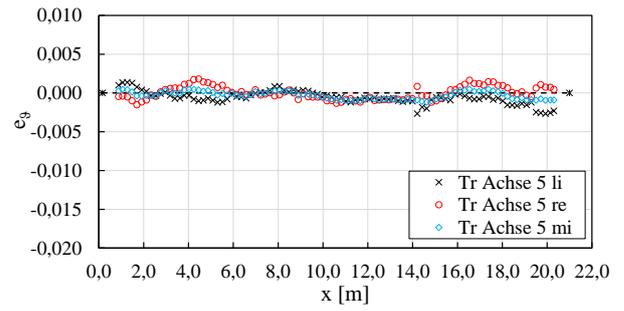
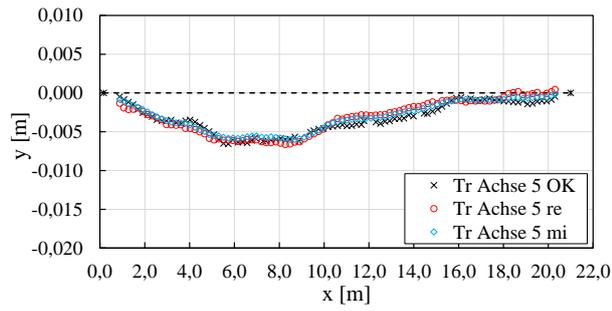


Abb. 87: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der BSH Binder des Bauvorhabens 2020-KW47

**A.15 Messergebnisse – Bauvorhaben 2021-KW12**

Bauort 94094 Rotthalmünster

Messdatum 26.03.2021

Hersteller Holzbauteile H\_D

Montagefirma M\_D

Bauteile	Anzahl	Form	L [mm]	H <sub>max</sub> [mm]	H <sub>min</sub> [mm]	Breite [mm]	Material	
	9		Parallelgurträger	15.500	960	-	240	GL75

Aussteifungstyp BSH Dachscheibe

Gabellagerung Randträger

Belastung Eigengewicht der Holzbauteile, Dachscheibe, Folie  
 (zum Zeitpunkt d. Messung)

Lufttemperatur 10 - 17 °C  
 (ca. 1,0 m über GOK)

Luftfeuchtigkeit 54 - 41 %  
 (ca. 1,0 m über GOK)

Holzfeuchtigkeit -

Bemerkungen 0 bis 4 mm Spalt zwischen BSH Randunterzügen/-träger der Fenster (Gabel-lager der BauBuche Träger) und den BauBuche Trägern. Teils beidseitig.

**Beschreibung des Bauvorhabens** Es handelt sich um den Neubau eines Schulgebäudes mit integrier-ter Sporthalle im UG+EG mit ca. 15,5 m spannenden FSH Bindern mit einseitigem Kragarm auf FSH Stützen. Die Aussteifung erfolgt über eingespannte Stützen, Wand- und Dachscheiben.

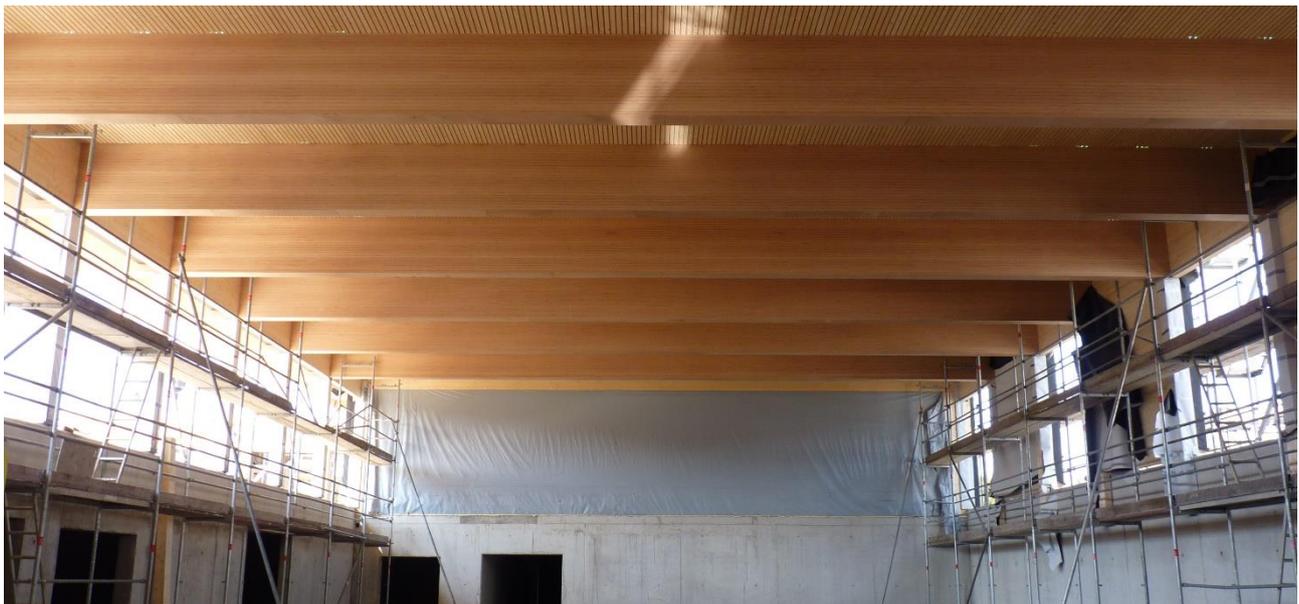


Abb. 88: Bauvorhaben 2021-KW12 zum Zeitpunkt der Messung

Auffälligkeiten Messergebnisse:

- Vorkrümmungen:
  - fast alle Binder in die gleiche Richtung vorgekrümmt
  - Form  $e_y$  eines Binders annähernd eine sinus-Halbwellen
  - Maximalwert ca. in Feldmitte, im Betrag allerdings teils recht unterschiedlich (0,001 - 0,007 m)
- Vortordierungen:
  - fast alle Binder in die gleiche Richtung vortordiert
  - gesamtes  $e_\beta$  eines Binders in gleiche Richtung
  - oft Maximalwerte an den Auflagern
  - zwischen den Auflagern meist annähernd linearer Verlauf

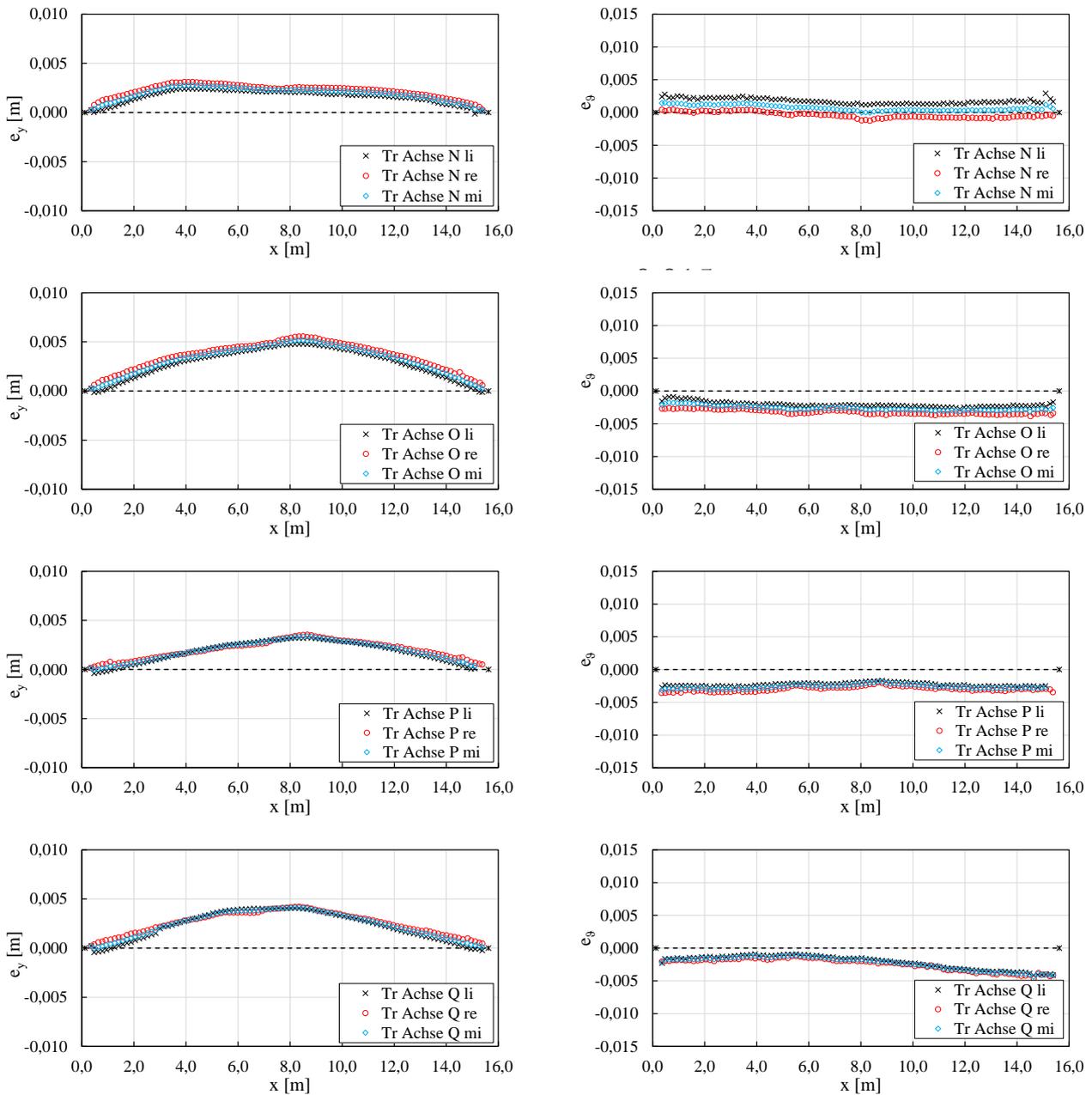


Abb. 89: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der FSH Binder des BV 2021-KW12

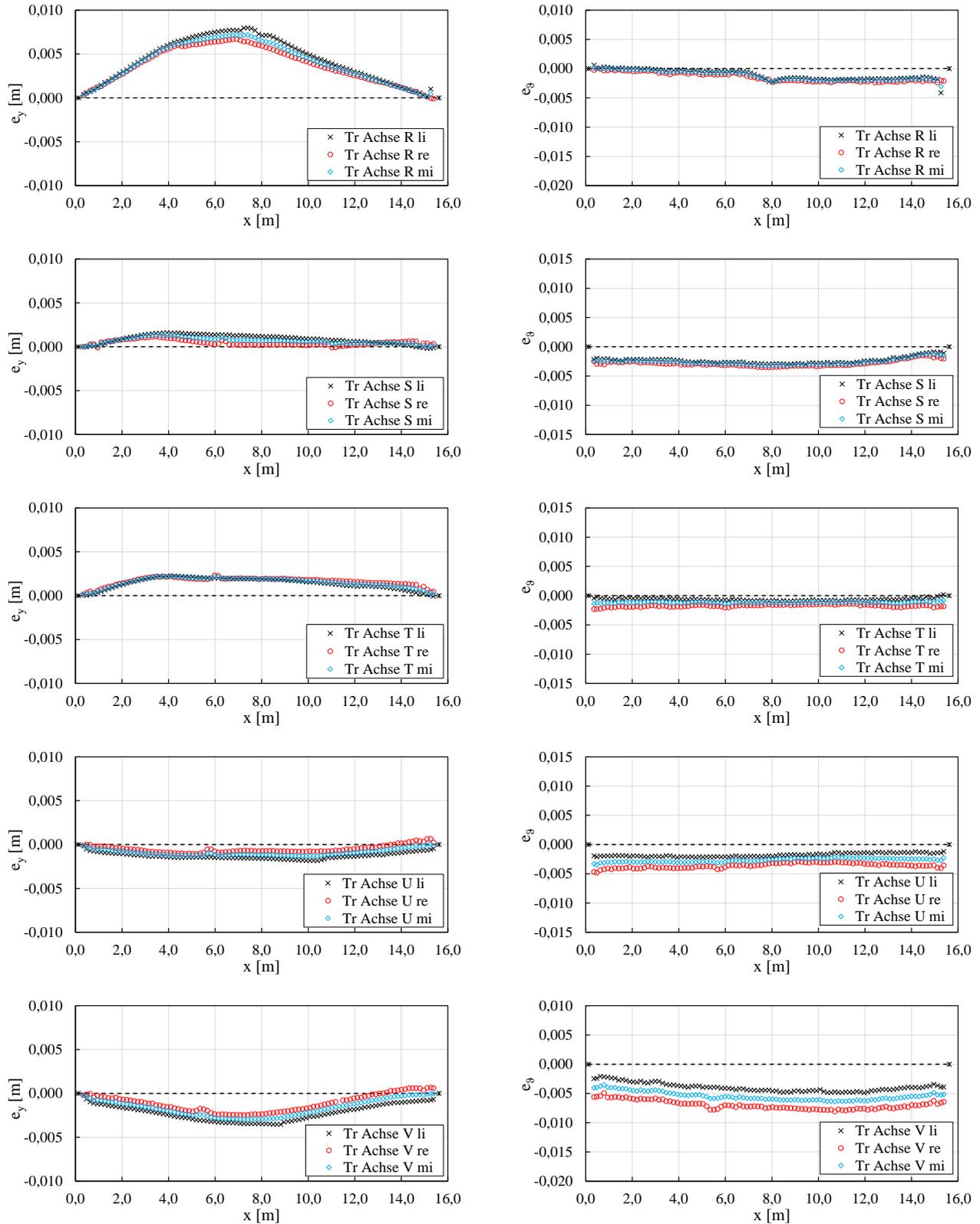


Abb. 90: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der FSH Binder des BV 2021-KW12

**A.16 Messergebnisse – Bauvorhaben 2021-KW16**

Bauort	88353 Kisslegg						
Messdatum	22.04.2021						
Hersteller Holzbauteile	H_E						
Montagefirma	M_E						
<b>Bauteile</b>	<b>Anzahl</b>	<b>Form</b>	<b>L</b>	<b>H<sub>max</sub></b>	<b>H<sub>min</sub></b>	<b>Breite</b>	<b>Material</b>
			[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	
	11	 Satteldachträger mit gekrümmter UK	20.700	2.440	1.000	220	GL 28c
Aussteifungstyp	Dachverbände (Achsen 2-3, 7-8, 11-12)						
Gabellagerung	Stahlbeton Auflagertaschen (Achse F, x = L), Beihölzer (Achse A, x = 0)						
Belastung (zum Zeitpunkt d. Messung)	Eigengewicht der Holzbauteile, Dachscheibe (Sandwichelemente)						
Lufttemperatur (ca. 1,0 m über GOK)	14,1 °C						
Luftfeuchtigkeit (ca. 1,0 m über GOK)	57,5 %						
Holzfeuchtigkeit	9,3 % (Binder Achse 9), 9,5 % (Binder Achse 10), 8,9 % (Binder Achse 11)						
Bemerkungen	-						

**Beschreibung des Bauvorhabens** Es handelt sich um den Neubau einer eingeschossigen Reithalle mit ca. 20,7 m spannenden BSH Bindern mit zweiseitigem Kragarm auf BSH/Stahlbeton Stützen. Die Aussteifung erfolgt über Dach- und Wandverbände.



**Abb. 91:** Bauvorhaben 2021-KW16 zum Zeitpunkt der Messung

Auffälligkeiten Messergebnisse:

- Vorkrümmungen:
  - alle Binder in die gleiche Richtung vorgekrümmt
  - Form  $e_y$  eines Binders annähernd eine sinus-Halbwellen
  - Maximalwert ca. in Feldmitte, im Betrag teils allerdings recht unterschiedlich (0,006 - 0,019 m)
  - keine geringeren Vorkrümmungen an Dachverbandsbindern
- Vortordierungen:
  - nur geringer Zusammenhang zwischen benachbarten Bindern
  - $e_\vartheta$  wechselt teils das Vorzeichen über die Länge
  - größere Vortordierungen am Auflager  $x = L$  (Stahlbetonaufлагertasche) im Vergleich zu Auflager  $x = 0$  (Beihölzer)

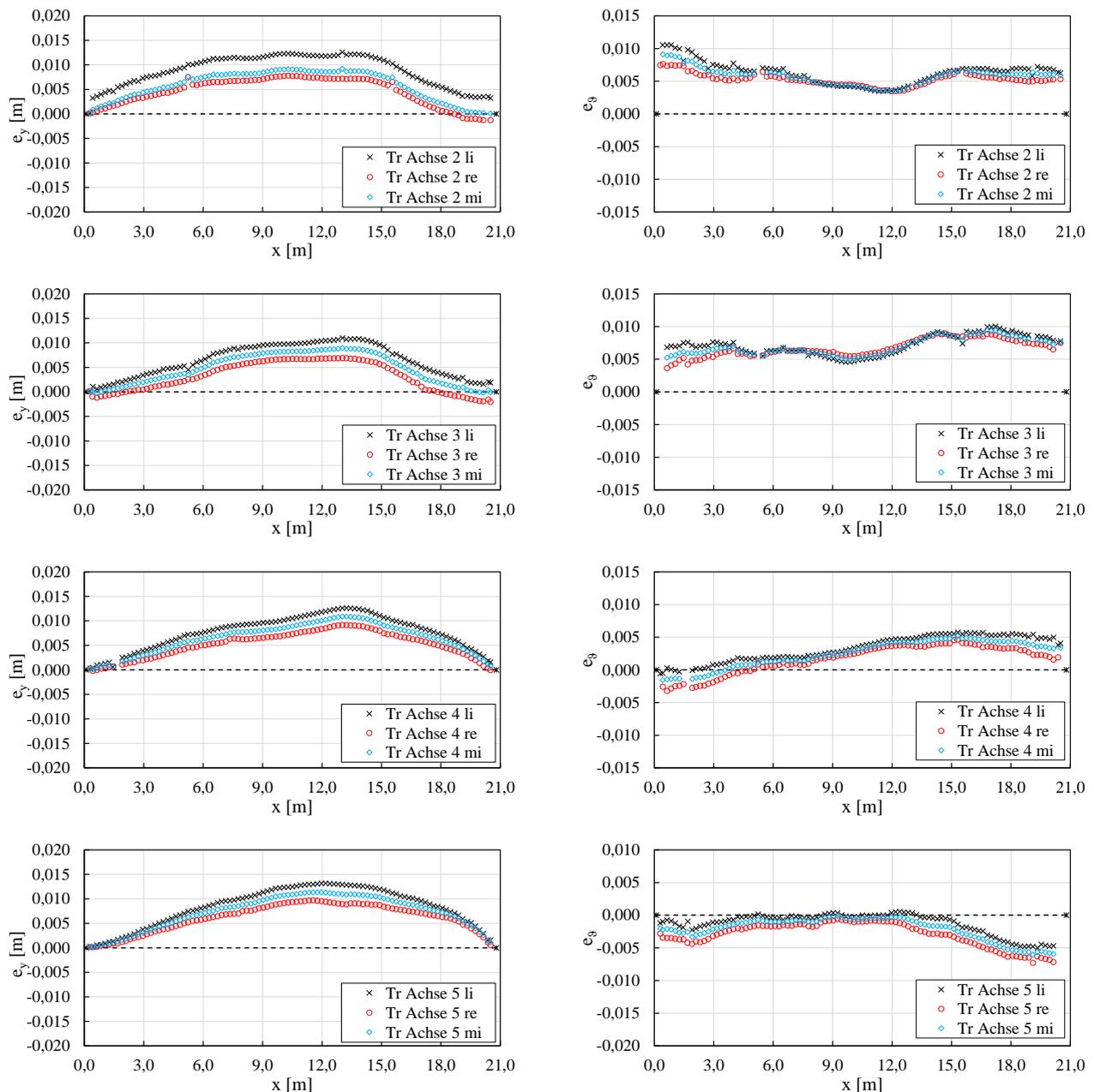


Abb. 92: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der BSH Binder des BV 2021-KW16

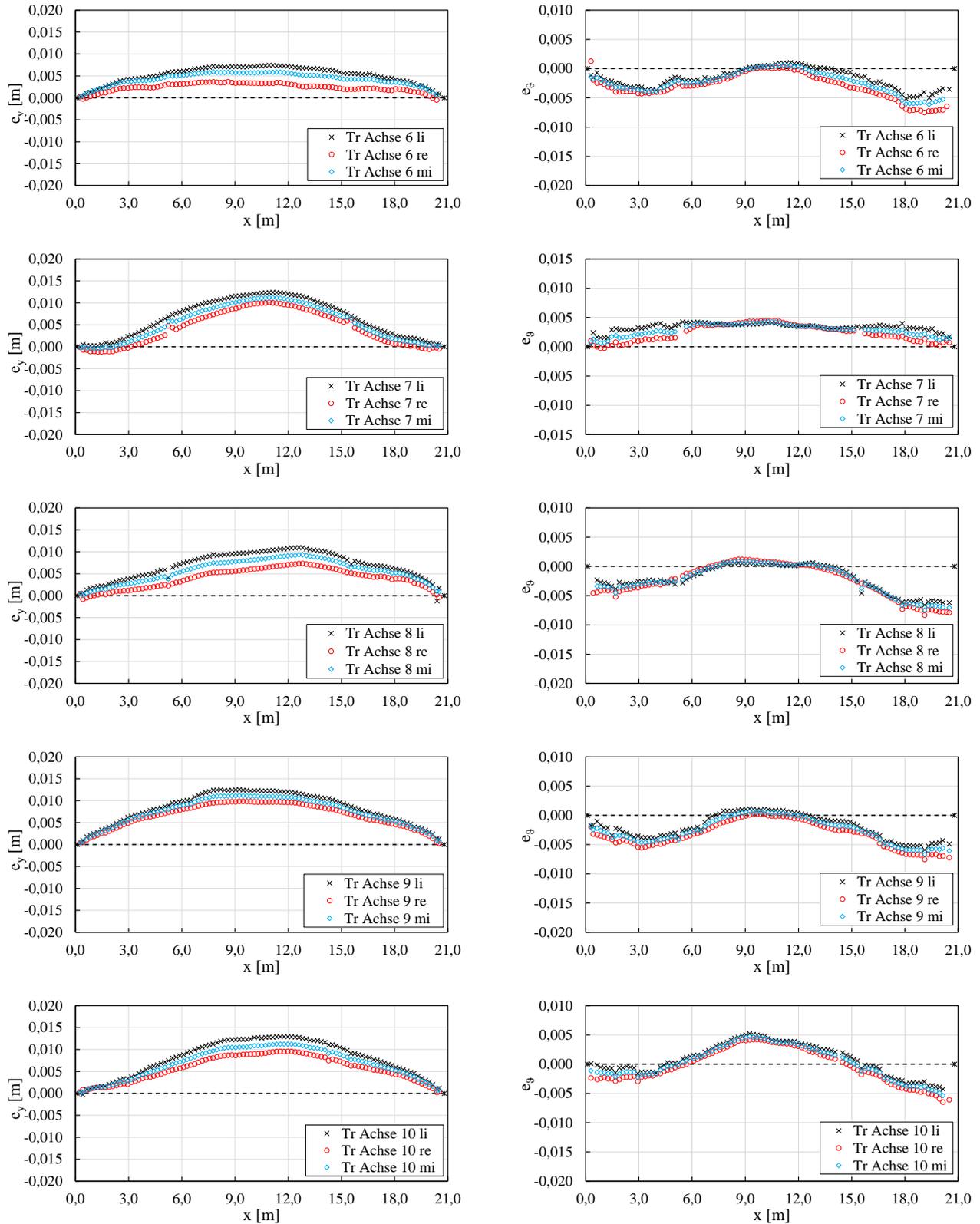


Abb. 93: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der BSH Binder des BV 2021-KW16

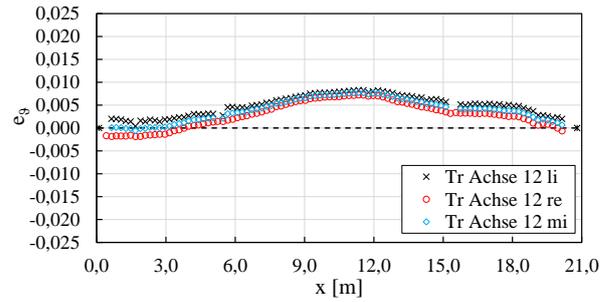
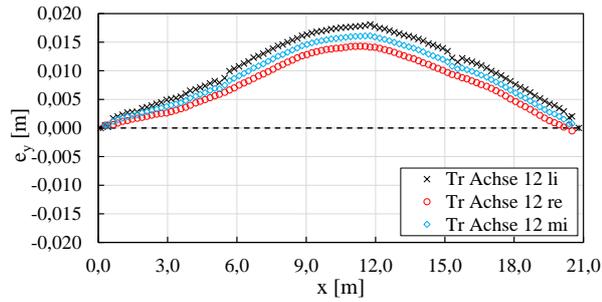
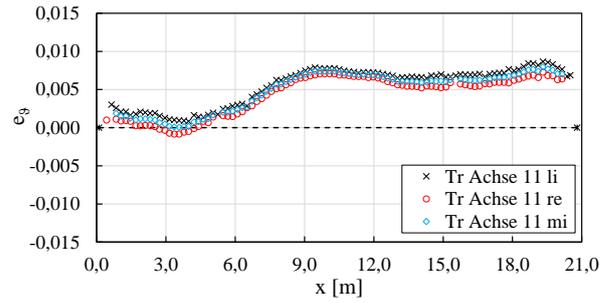
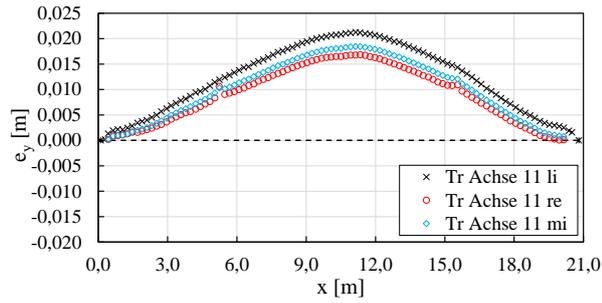


Abb. 94: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der BSH Binder des BV 2021-KW16

### A.17 Messergebnisse – Bauvorhaben 2021-KW22

Bauort	8041 Zürich						
Messdatum	31.05.2021						
Hersteller Holzbauteile	H_D						
Montagefirma	unbekannt						
<b>Bauteile</b>	<b>Anzahl</b>	<b>Form</b>	<b>L</b>	<b>H<sub>max</sub></b>	<b>H<sub>min</sub></b>	<b>Breite</b>	<b>Material</b>
			[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	
	11	 Parallelgurträger	16.300	1.920	-	240	GL75
Aussteifungstyp	Holzbetonverbunddecke						
Gabellagerung	Randträger						
Belastung (zum Zeitpunkt d. Messung)	Eigengewicht der Holzbauteile, Dachscheibe, temporäre Dachkonstruktion						
Lufttemperatur (ca. 1,0 m über GOK)	18 - 20 °C						
Luftfeuchtigkeit (ca. 1,0 m über GOK)	40 - 45 %						
Holzfeuchtigkeit	-						
Bemerkungen	-						

**Beschreibung des Bauvorhabens** Es handelt sich um den Neubau eines Schulgebäudes mit integrierter Sporthalle im UG+EG mit ca. 16,3 m spannenden FSH Bindern auf FSH Stützen. Die Aussteifung erfolgt über eingespannte Stützen, Wand- und Dachscheiben.

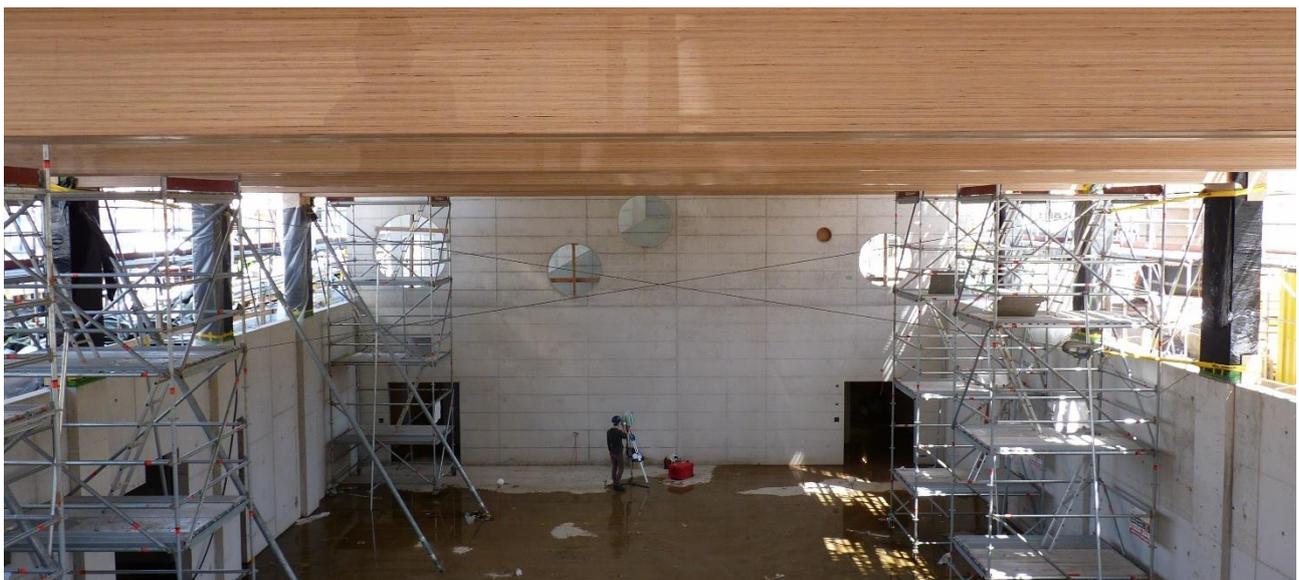


Abb. 95: Bauvorhaben 2021-KW22 zum Zeitpunkt der Messung

Auffälligkeiten Messergebnisse:

- Vorkrümmungen:
  - nebeneinander liegender Binder sind in der Regel in die gleiche Richtung vorgekrümmt
  - Form  $e_y$  eines Binders annähernd eine sinus-Halbwellen
  - Maximalwert ca. in Feldmitte und sehr gering (0,001 - 0,003 m)
- Vortordierungen:
  - kein Zusammenhang zwischen benachbarten Bindern
  - gesamtes  $e_\beta$  eines Binders i.d.R. in gleiche Richtung (2x Vorzeichenwechsel)
  - oft Maximalwerte an den Auflagern
  - zwischen den Auflagern meist annähernd linearer Verlauf

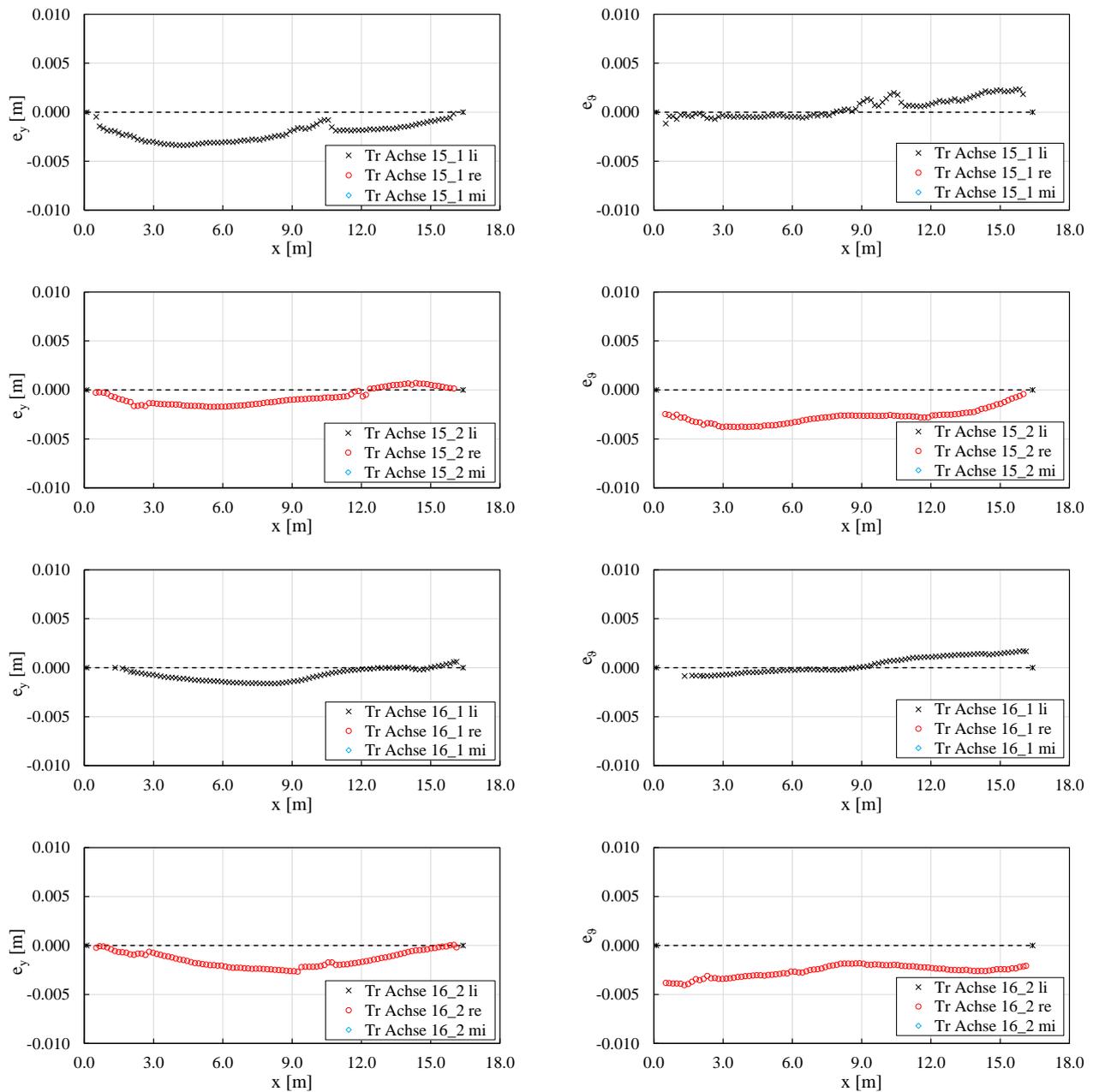


Abb. 96: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der FSH Binder des BV 2021-KW22

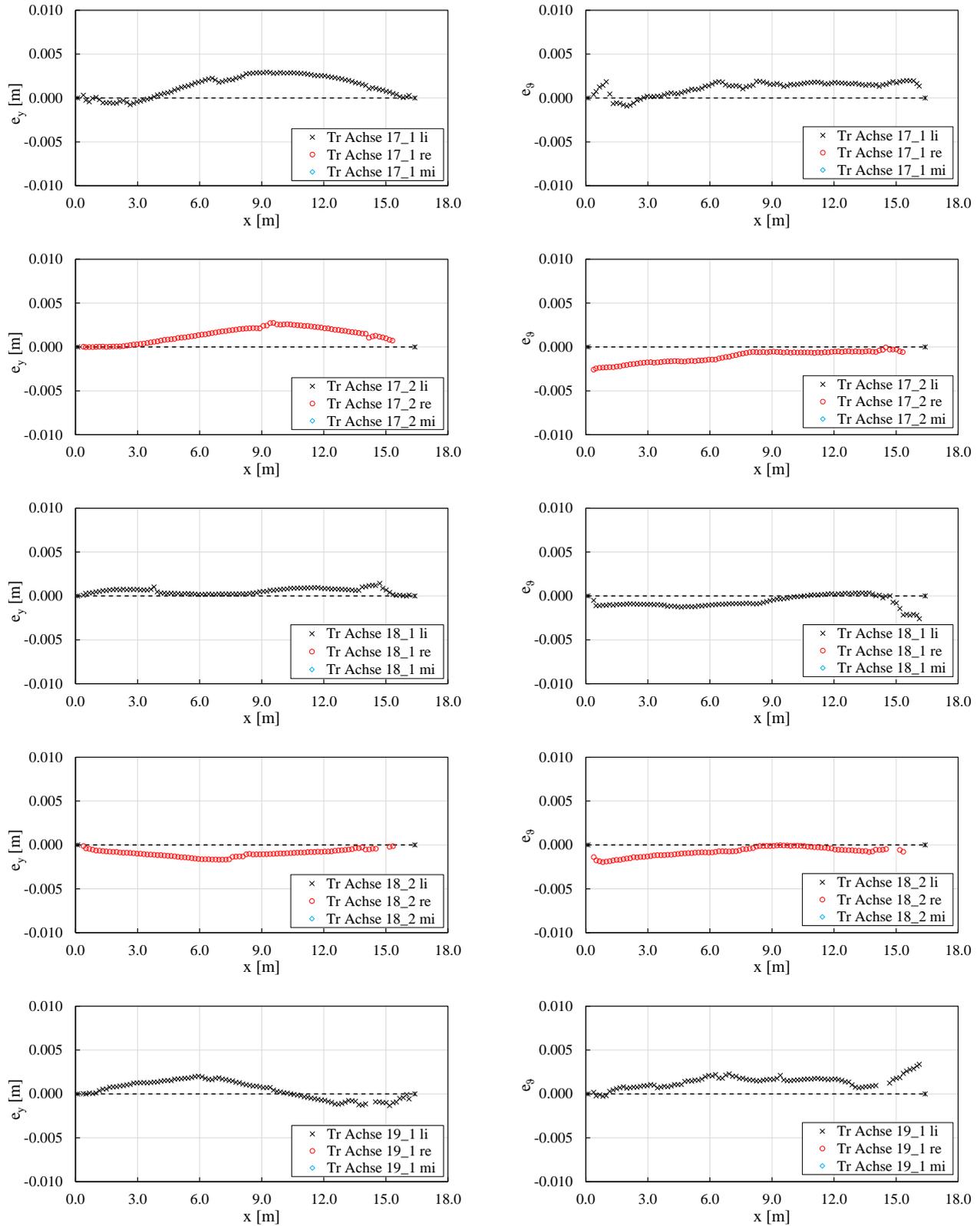


Abb. 97: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der FSH Binder des BV 2021-KW22

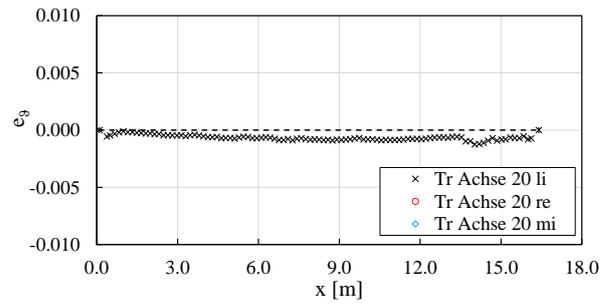
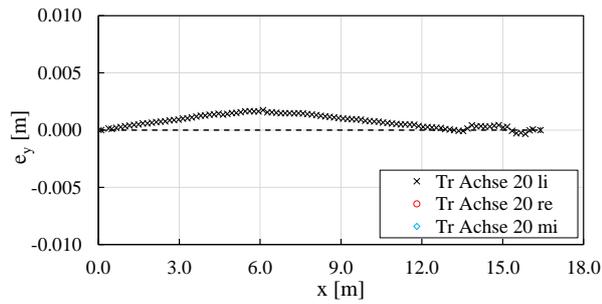
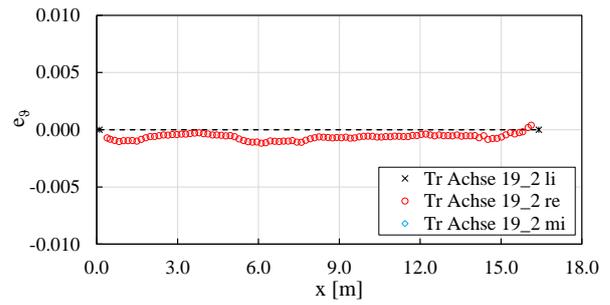
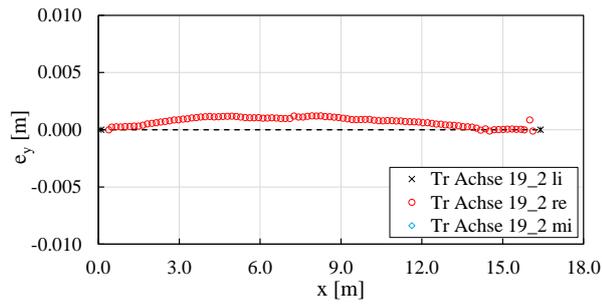


Abb. 98: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der FSH Binder des BV 2021-KW22

**A.18 Messergebnisse – Bauvorhaben 2021-KW24**

Bauort 82140 Olching

Messdatum 14.06.2021

Hersteller Holzbauteile H\_A

Montagefirma M\_F

Bauteile	Anzahl	Form	L [mm]	H <sub>max</sub> [mm]	H <sub>min</sub> [mm]	Breite [mm]	Material
	2		42.660	2.250	1.830	260	GL 30c
	5						GL 28c

Aussteifungstyp Dachverband (Achsen 9-10)

Gabellagerung Stahlbeton Auflagertaschen (Achse C, x = 0), Beihölzer (Achse A, x = L)

Belastung Eigengewicht der Holzbauteile, Trapezblech  
 (zum Zeitpunkt d. Messung)

Lufttemperatur 19,1 °C  
 (ca. 1,0 m über GOK)

Luftfeuchtigkeit 54,3 %  
 (ca. 1,0 m über GOK)

Holzfeuchtigkeit 14,6 % (Stütze Achse 8/A), 14,9 % (Stütze Achse 12/A), 14,7 % (Stütze Achse 13/B)

Bemerkungen -

**Beschreibung des Bauvorhabens** Es handelt sich um den Neubau einer eingeschossigen Industriehalle mit ca. 42 m spannenden BSH Bindern auf BSH/Stahlbeton Stützen. Die Aussteifung erfolgt über Dachverbände und eingespannte Stützen.



**Abb. 99:** Bauvorhaben 2021-KW24 zum Zeitpunkt der Messung

Auffälligkeiten Messergebnisse:

- Vorkrümmungen:
  - alle Binder in die gleiche Richtung vorgekrümmt
  - Form  $e_y$  eines Binders annähernd eine sinus-Halbwellen
  - Maximalwert ca. in Feldmitte, im Betrag teils allerdings recht unterschiedlich (0,009 - 0,025 m)
  - keine geringeren Vorkrümmungen an Dachverbandsbindern
  - Vorkrümmungen nehmen von Achse 6 zu 12 zu
- Vortordierungen:
  - maximale Vortordierung aller Binder in die gleiche Richtung, aber nur geringer Zusammenhang der Form zwischen benachbarten Bindern
  - es wechselt teils das Vorzeichen über die Länge
  - größere Vortordierungen am Auflager  $x = L$  (Stahlbetonaufлагertasche) im Vergleich zu Auflager  $x = 0$  (Beihölzer)

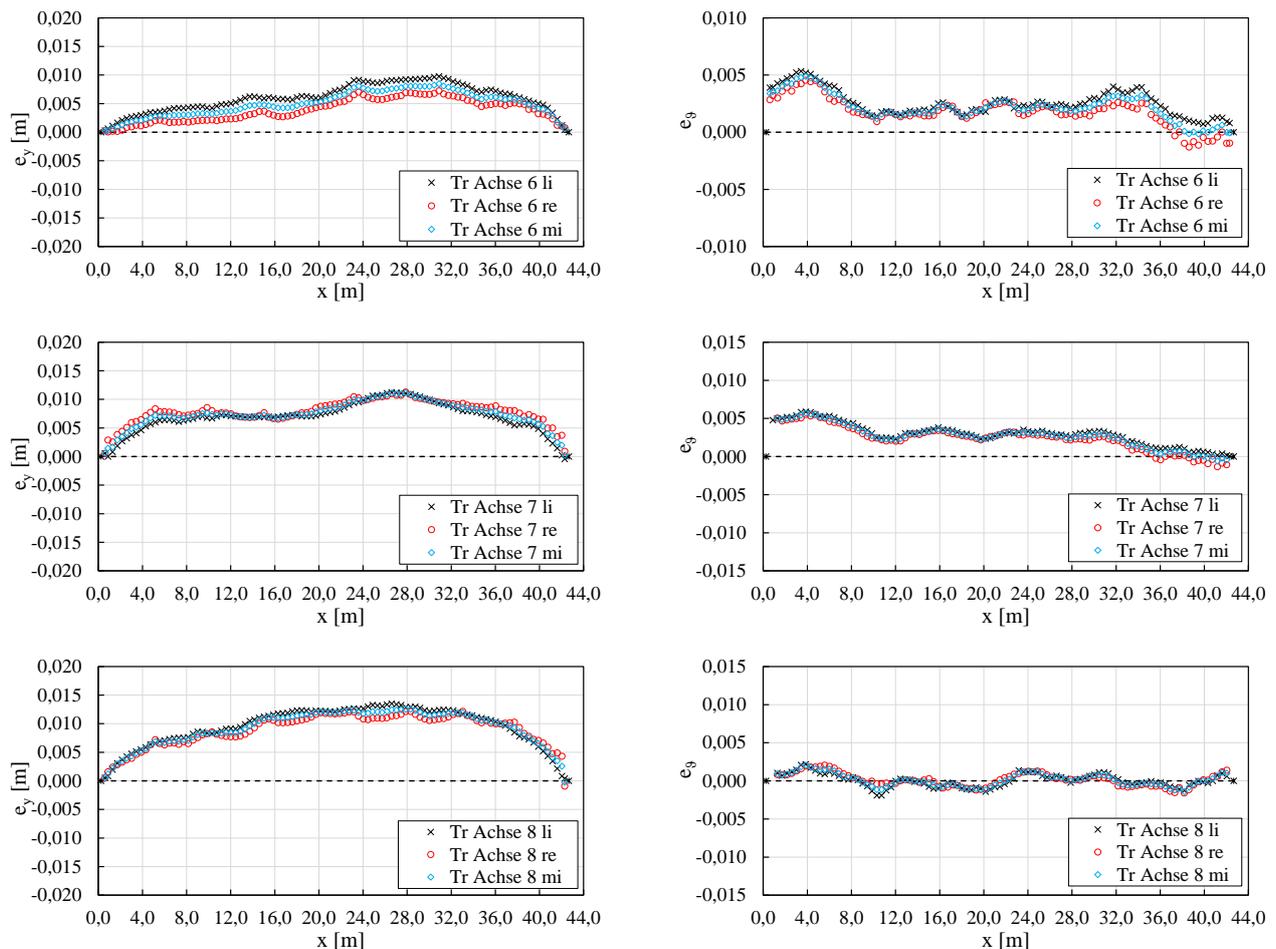


Abb. 100: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der BSH Binder des BV 2021-KW24

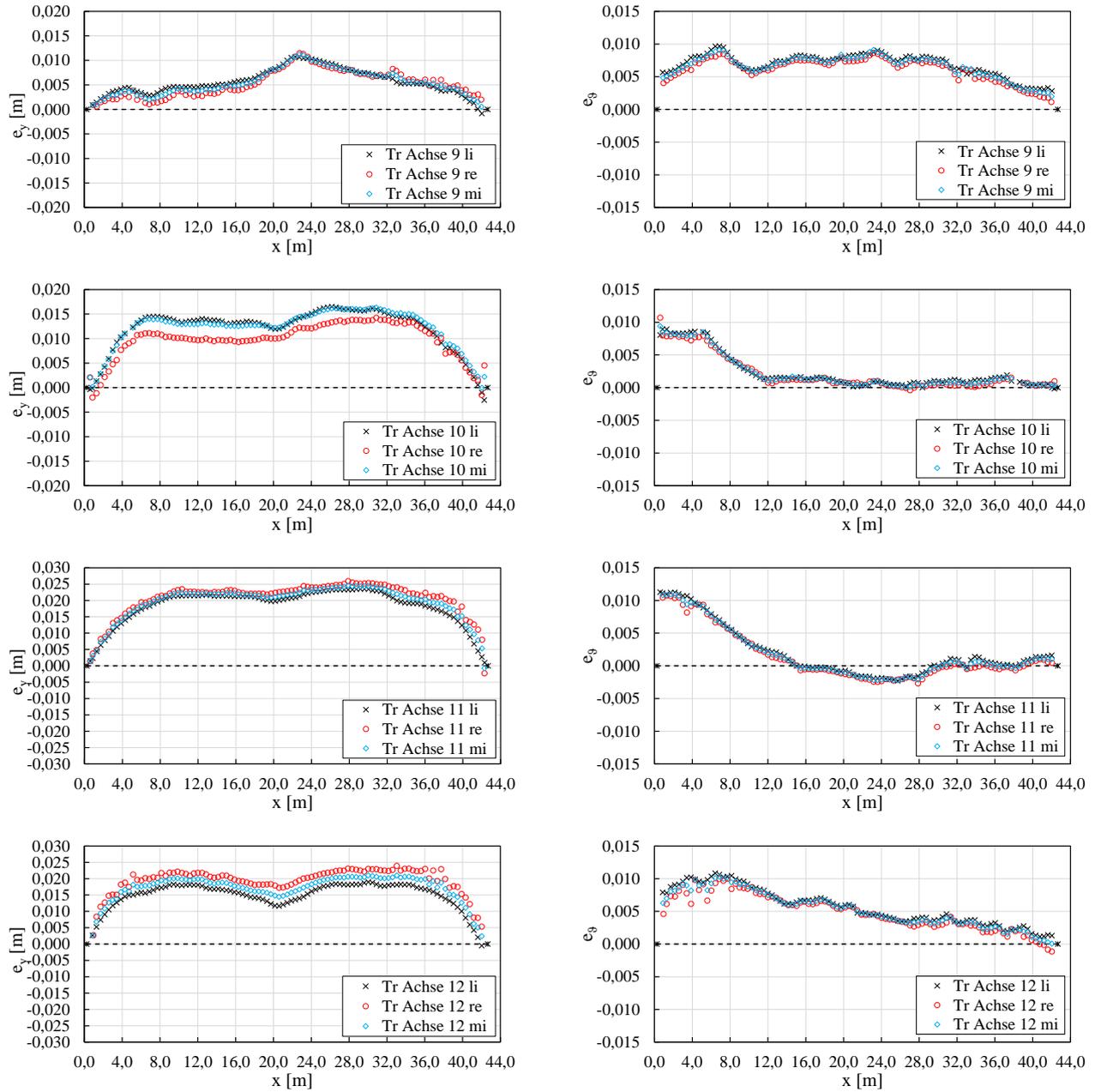


Abb. 101: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der BSH Binder des BV 2021-KW24

### A.19 Messergebnisse – Bauvorhaben 2021-KW25

Bauort	8400 Winterthur							
Messdatum	22.06.2021							
Hersteller Holzbauteile	H_D							
Montagefirma	-							
<b>Bauteile</b>	<b>Anzahl</b>	<b>Form</b>	<b>L</b>	<b>H<sub>max</sub></b>	<b>H<sub>min</sub></b>	<b>Breite</b>	<b>Material</b>	
			[mm]	[mm]	[mm]	[mm]		
Träger	8		Parallelgurtbinder	11.480	640 + 600	-	320 + 300	GL75
Stützen	38			3.780 - 3.140	480 - 320	-	320	GL75
Aussteifungstyp	Holzbetonverbunddecke							
Gabellagerung	OK + UK Binder horizontal gehalten							
Belastung (zum Zeitpunkt d. Messung)	Eigengewicht der Holzbauteile, Deckenscheibe.							
Lufttemperatur (ca. 1,0 m über GOK)	22,0 °C							
Luftfeuchtigkeit (ca. 1,0 m über GOK)	64 %							
Holzfeuchtigkeit	-							
Bemerkungen	-							

**Beschreibung des Bauvorhabens** Es handelt sich um den Neubau eines 7 geschossigen Bürogebäudes ohne Unterkellerung mit FSH Stützen und Trägern, Holzbetonverbunddecken und zwei Stahlbetonkernen. Die Aussteifung erfolgt über die Deckenscheibe und die Stahlbetonkerne. Es wird das Erdgeschoss vermessen.



Abb. 102: Bauvorhaben 2021-KW25 zum Zeitpunkt der Messung

Auffälligkeiten Messergebnisse:

- Vorkrümmungen:
  - meist kein Zusammenhang zwischen benachbarten Bindern
  - Form  $e_y$  eines Binders annähernd eine sinus-Halbwellen
  - Maximalwert ca. in Feldmitte und sehr gering (0,0008 - 0,0023 m)
- Vortordierungen:
  - kein Zusammenhang zwischen benachbarten Bindern
  - gesamtes  $e_\theta$  eines Binders meist in gleiche Richtung (2x Vorzeichenwechsel)
  - oft Maximalwerte an den Auflagern, die das Gesamtbild der Form prägen
  - zwischen den Auflagern annähernd linearer Verlauf

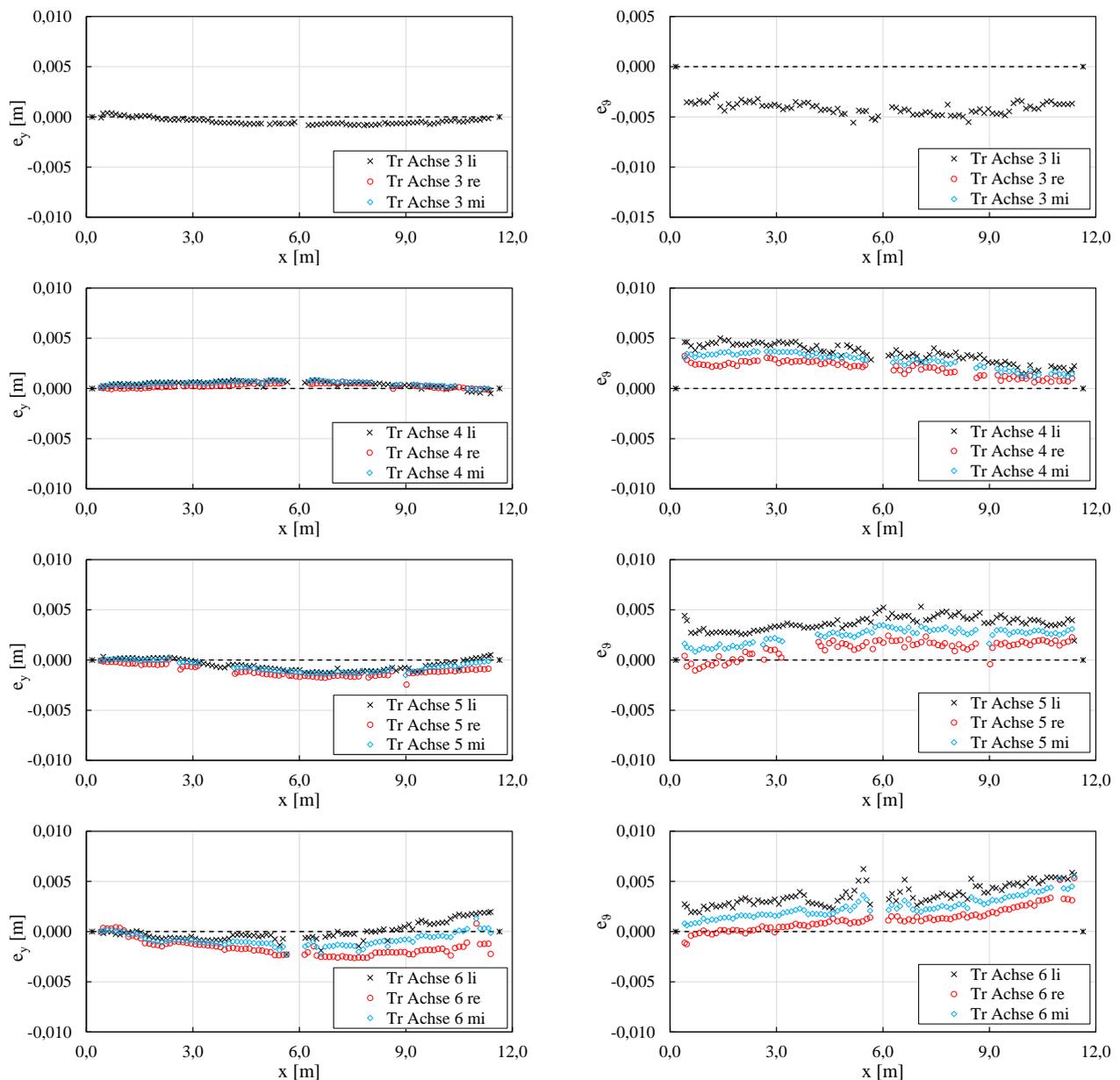


Abb. 103: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der FSH Binder des BV 2021-KW25

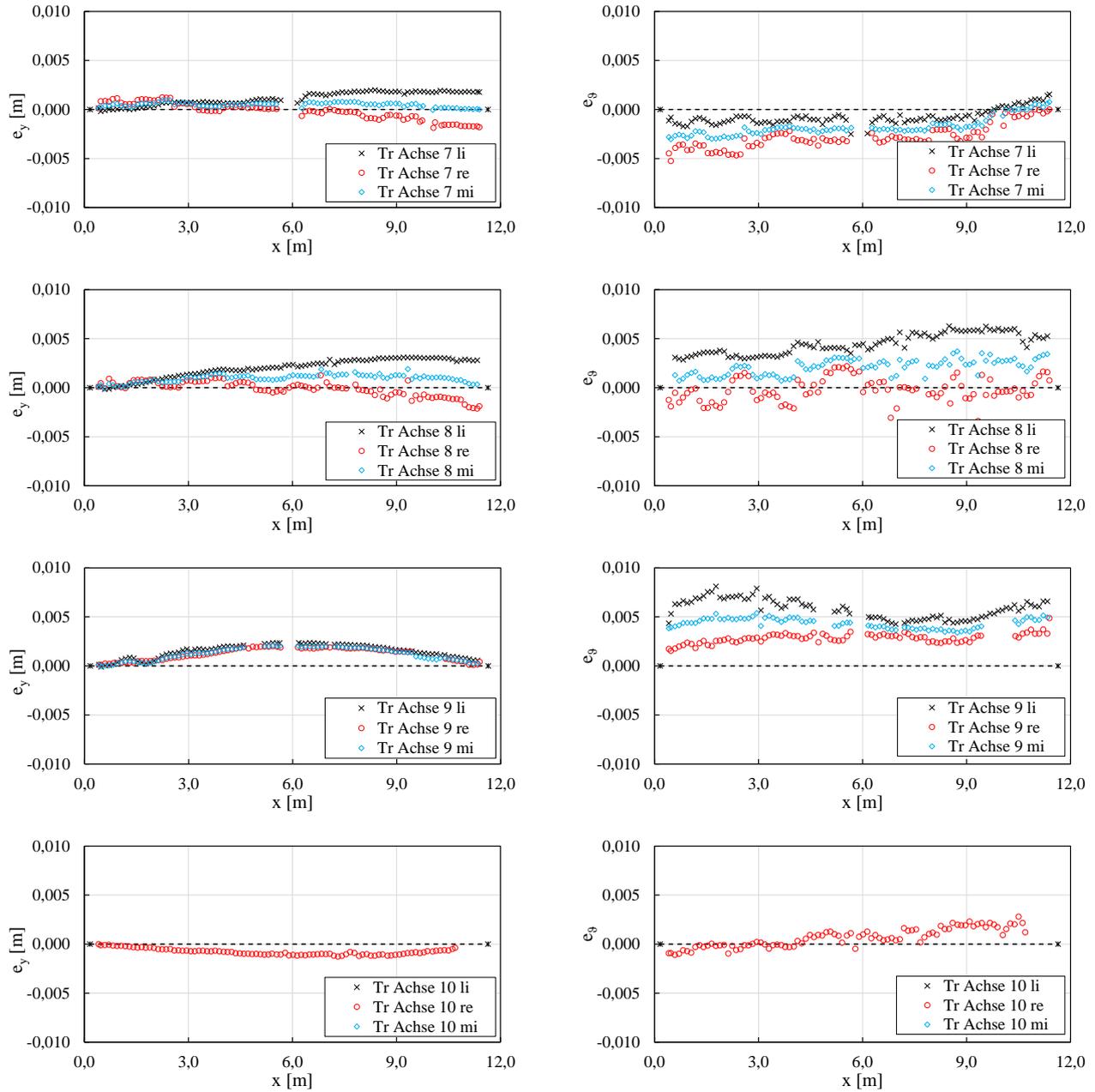


Abb. 104: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der FSH Binder des BV 2021-KW25



## Zusammenfassung der Ergebnisse FSH Stützen des BV 2021-KW25:

Stütze	max. Vorkrümmung $e_y$ (über $L = 2,75$ m)	max. Vorkrümmung $e_z$ (über $L = 2,75$ m)	max. Schiefstellung $e_{\phi,y}$	max. Schiefstellung $e_{\phi,z}$
<b>Achse A/4</b>	- 1,2 mm = - $L / 2.714$	0,4 mm = $L / 7.153$	- 0,0013 = - $1 / 797$	0,0005 = $1 / 1.927$
<b>Achse A/5</b>	- 2,6 mm = - $L / 1.195$	0,6 mm = $L / 5.190$	0,0002 = $1 / 5.348$	0,0000 = $1 / 100.000$
<b>Achse A/6</b>	0,5 mm = $L / 5.826$	-0,4 mm = - $L / 7.696$	-0,0006 = - $1 / 1.548$	0,0022 = $1 / 453$
<b>Achse A/7</b>	-0,3 mm = - $L / 10.717$	0,8 mm = $L / 3.935$	-0,0001 = - $1 / 11.628$	0,0013 = $1 / 749$
<b>Achse A/8</b>	-0,4 mm = - $L / 8.241$	0,6 mm = $L / 5.024$	-0,0017 = - $1 / 596$	0,0006 = $1 / 1.761$
<b>Achse A/9</b>	-1,6 mm = - $L / 1.982$	-0,8 mm = - $L / 3.867$	-0,0010 = - $1 / 1.018$	0,0053 = $1 / 189$
<b>Achse A/10</b>	-0,8 mm = - $L / 4.072$	0,2 mm = $L / 19.157$	-0,0001 = - $1 / 9.434$	0,0000 = $1 / 45.455$
<b>Achse B/3</b>	0,0 mm = - $L / 80.513$	0,2 mm = $L / 13.249$	0,0011 = $1 / 904$	- 0,0015 = - $1 / 658$
<b>Achse B/4</b>	1,7 mm = $L / 1.868$	0,2 mm = $L / 13.956$	0,0000 = - $1 / 100.000$	0,0020 = $1 / 503$
<b>Achse B/5</b>	0,8 mm = $L / 3.975$	0,1 mm = $L / 34.130$	0,0012 = $1 / 831$	- 0,0001 = - $1 / 10.526$
<b>Achse B/7</b>	0,7 mm = $L / 4.624$	- 0,8 mm = - $L / 3.985$	0,0003 = $1 / 3.049$	0,0007 = $1 / 1.473$
<b>Achse B/8</b>	0,6 mm = $L / 4.883$	0,3 mm = $L / 9.544$	- 0,0023 = - $1 / 428$	- 0,0008 = - $1 / 1.186$
<b>Achse B/9</b>	- 0,3 mm = - $L / 10.129$	0,8 mm = $L / 3.829$	0,0007 = $1 / 1.372$	- 0,0010 = - $1 / 1.029$
<b>Achse B/10</b>	0,4 mm = $L / 7.621$	- 0,5 mm = - $L / 6.169$	- 0,0008 = - $1 / 1.269$	0,0009 = $1 / 1.151$
<b>Achse B/11</b>	- 0,2 mm = - $L / 19.895$	- 0,3 mm = - $L / 11.317$	- 0,0014 = - $1 / 708$	0,0009 = $1 / 1.110$
<b>Achse B/12</b>	1,7 mm = $L / 2.224$	- 0,3 mm = - $L / 11.489$	- 0,0012 = - $1 / 854$	0,0005 = $1 / 1.887$
<b>Achse B/13</b>	- 0,4 mm = - $L / 9.130$	- 0,2 mm = - $L / 22.500$	- 0,0002 = - $1 / 4.016$	0,0008 = $1 / 1.242$
<b>Achse B/14</b>	- 0,5 mm = - $L / 7.621$	- 0,2 mm = - $L / 20.000$	- 0,0007 = - $1 / 1.466$	- 0,0010 = - $1 / 1.031$
<b>Achse C/11</b>	- 0,7 mm = - $L / 4.456$	- 1,0 mm = - $L / 3.430$	- 0,0014 = - $1 / 704$	0,0002 = $1 / 6.579$
<b>Achse C/12</b>	- 0,1 mm = - $L / 33.200$	0,1 mm = $L / 34.583$	0,0006 = $1 / 1.567$	- 0,0009 = - $1 / 1.157$
<b>Achse C/13</b>	0,2 mm = $L / 15.962$	0,5 mm = $L / 7.124$	- 0,0003 = - $1 / 3.145$	- 0,0001 = - $1 / 16.667$
<b>Achse C/14</b>	- 0,4 mm = - $L / 8.997$	0,4 mm = $L / 8.973$	- 0,0017 = - $1 / 581$	- 0,0003 = - $1 / 3.289$
<b>Achse D/1</b>	1,3 mm = $L / 2.633$	- 0,9 mm = - $L / 3.539$	- 0,0001 = - $1 / 9.009$	0,0002 = $1 / 5.348$
<b>Achse D/2</b>	- 1,9 mm = - $L / 1.772$	- 0,2 mm = - $L / 13.719$	- 0,0006 = - $1 / 1.808$	0,0001 = $1 / 11.905$
<b>Achse D/6</b>	0,3 mm = $L / 9.794$	- 0,1 mm = - $L / 23.217$	0,0009 = $1 / 1.140$	- 0,0005 = - $1 / 1.894$
<b>Achse D/7</b>	0,3 mm = $L / 11.900$	- 0,4 mm = - $L / 9.146$	- 0,0001 = - $1 / 10.000$	- 0,0009 = - $1 / 1.148$



## Zusammenfassung der Ergebnisse FSH Stützen des BV 2021-KW25 (Fortsetzung):

<b>Achse D/11</b>	- 1,1 mm = - L / 3.126	- 0,4 mm = - L / 7.632	- 0,0022 = - 1 / 449	- 0,0010 = - 1 / 1.050
<b>Achse D/14</b>	- 0,4 mm = - L / 9.171	- 0,1 mm = - L / 32.871	0,0013 = 1 / 795	- 0,0003 = - 1 / 3.425
<b>Achse E/1</b>	- 0,1 mm = - L / 35.000	0,7 mm = L / 5.331	0,0008 = 1 / 1.196	0,0011 = 1 / 949
<b>Achse E/2</b>	- 0,3 mm = - L / 11.489	- 0,1 mm = - L / 26.809	0,0001 = 1 / 7.143	- 0,0001 = - 1 / 11.111
<b>Achse E/3</b>	0,2 mm = L / 23.625	0,1 mm = L / 70.000	- 0,0006 = - 1 / 1.645	- 0,0007 = - 1 / 1.422
<b>Achse E/4</b>	- 0,7 mm = - L / 5.600	1,1 mm = L / 3.559	0,0003 = 1 / 3.690	- 0,0003 = - 1 / 3.717
<b>Achse E/5</b>	- 0,4 mm = - L / 10.328	0,3 mm = L / 14.824	0,0002 = 1 / 4.032	0,0001 = 1 / 7.463
<b>Achse E/6</b>	- 0,2 mm = - L / 23.924	0,2 mm = L / 21.850	- 0,0007 = - 1 / 1.362	- 0,0004 = - 1 / 2.336
<b>Achse E/7</b>	- 0,6 mm = - L / 6.726	0,2 mm = L / 24.868	- 0,0005 = - 1 / 1.984	0,0005 = 1 / 2.020
<b>Achse E/9</b>	- 0,2 mm = - L / 19.791	1,4 mm = L / 2.632	0,0005 = 1 / 1.946	0,0016 = 1 / 639
<b>Achse E/10</b>	- 0,1 mm = - L / 30.240	- 0,1 mm = - L / 33.451	0,0008 = 1 / 1.326	0,0013 = 1 / 768
<b>Achse E/11</b>	0,2 mm = L / 13.891	0,8 mm = L / 3.938	- 0,0014 = - 1 / 734	0,0004 = 1 / 2.538

**A.20 Messergebnisse – Bauvorhaben 2021-KW30\_1**

Bauort 23879 Mölln

Messdatum 30.07.2021

Hersteller Holzbauteile H\_F

Montagefirma M\_G

Bauteile	Anzahl	Form	L [mm]	H <sub>max</sub> [mm]	H <sub>min</sub> [mm]	Breite [mm]	Material
	1		24.750	1.480	970	220	GL 30c
	8					260	

Aussteifungstyp Dachverbände (Achsen 4-5, 8-9)

Gabellagerung Wandtafeln in Holzbauweise

Belastung Eigengewicht der Holzbauteile; Trapezblech, Dämmung, Dachabdichtung.  
 (zum Zeitpunkt d. Messung)

Lufttemperatur 23,5 °C  
 (ca. 1,0 m über GOK)

Luftfeuchtigkeit 49,9 %  
 (ca. 1,0 m über GOK)

Holzfeuchtigkeit 11,5 % (Träger Achse 3)

Bemerkungen -

**Beschreibung des Bauvorhabens** Es handelt sich um den Neubau eines eingeschossigen Einkaufsmarktes mit ca. 25 m spannenden BSH Bindern und Stb.+MW Wänden. Die Aussteifung erfolgt über Dachverbände und die Wände.



**Abb. 105:** Bauvorhaben 2021-KW30\_1 zum Zeitpunkt der Messung

Auffälligkeiten Messergebnisse:

- Vorkrümmungen:
  - alle Binder mit signifikanter Vork. in die gleiche Richtung vorgekrümmt
  - Form  $e_y$  eines Binders teils eine sinus-Halbwellen, teils Durchschlagen (Achsen 8, 9, 10)
  - Maximalwert ca. in Feldmitte, im Betrag teils allerdings recht unterschiedlich (0,002 - 0,020 m).
  - kein Zusammenhang zur Lage der Dachverbände erkennbar
  - Vorkrümmung nehmen von Achse 2 zu 10 hin ab
- Vortordierungen:
  - kein Zusammenhang erkennbar
  - es wechselt teils das Vorzeichen über die Länge
  - teils Maximalwerte an Auflagern, die das Gesamtbild der Form prägen

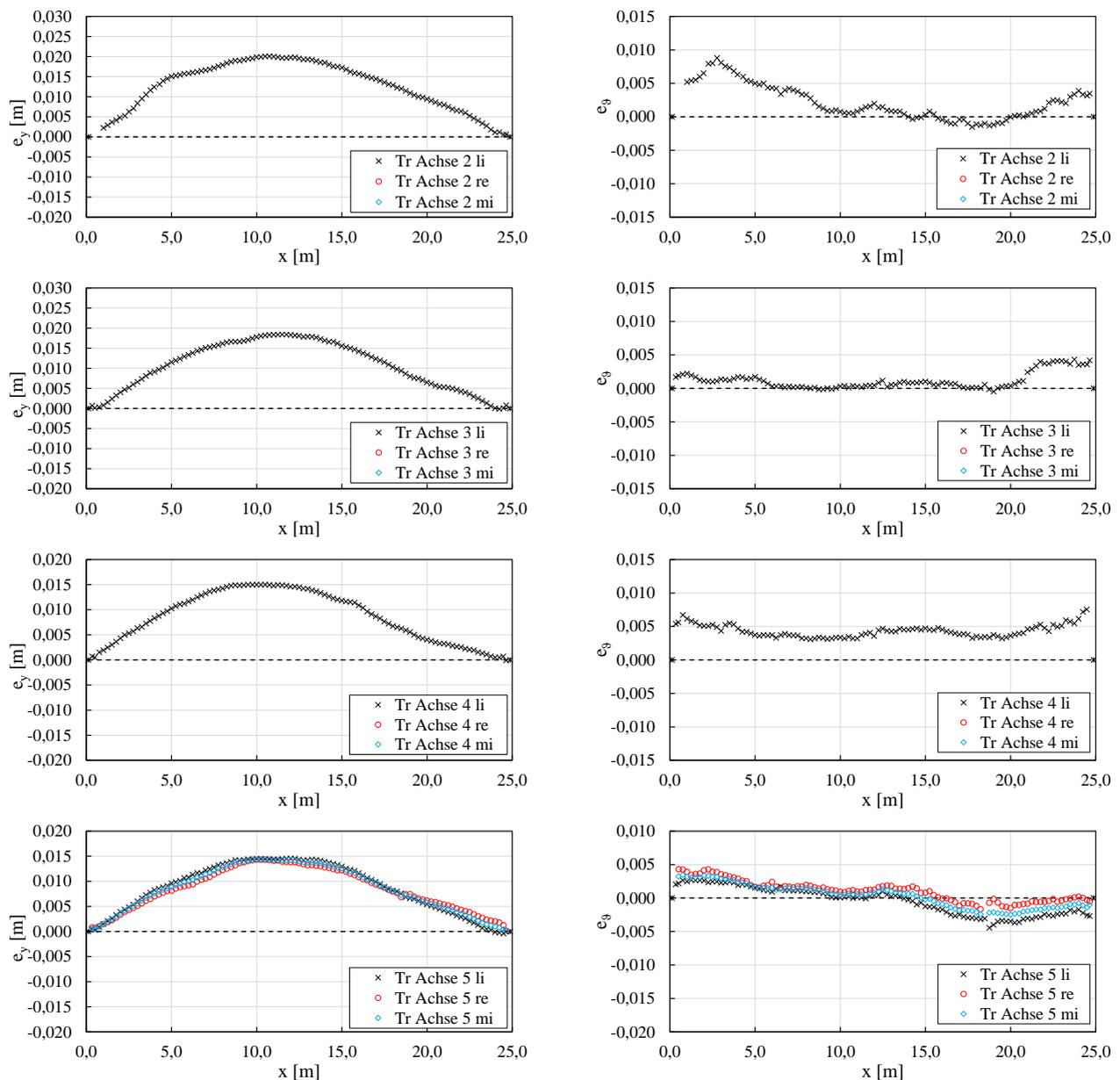


Abb. 106: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der BSH Binder des BV 2021-KW30\_1

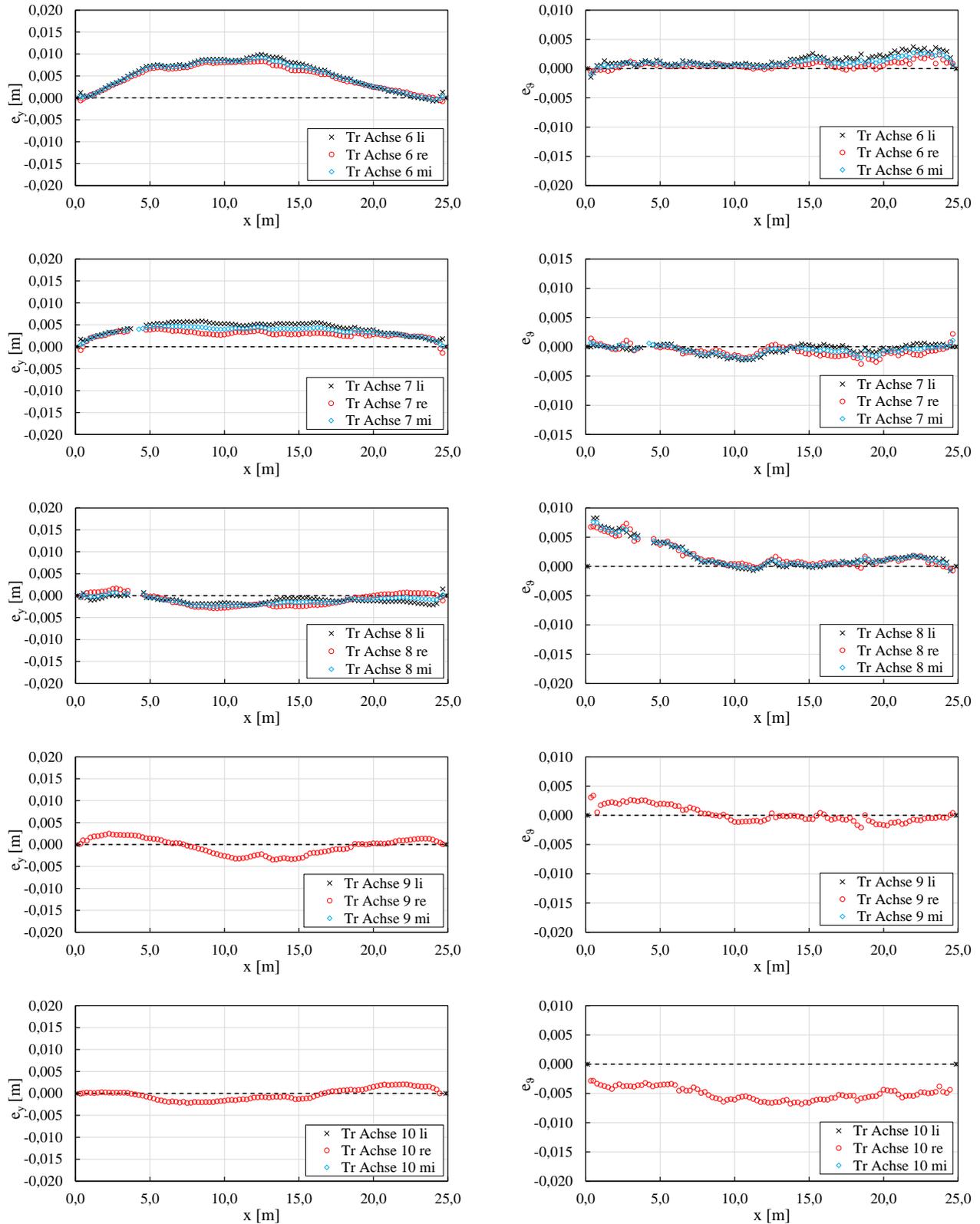


Abb. 107: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der BSH Binder des BV 2021-KW30\_1

### A.21 Messergebnisse – Bauvorhaben 2021-KW30\_2

Bauort 23869 Elmenhorst

Messdatum 30.07.2021

Hersteller Holzbauteile H\_F

Montagefirma M\_G

Bauteile	Anzahl	Form	L [mm]	H <sub>max</sub> [mm]	H <sub>min</sub> [mm]	Breite [mm]	Material
	7		24.800	1.560	1.000	180	GL 30c

Aussteifungstyp Trapezblech

Gabellagerung Stahlbeton Auflagertaschen

Belastung Eigengewicht der Holzbauteile, Netz zur Absturzsicherung  
 (zum Zeitpunkt d. Messung)

Lufttemperatur 25,3 °C  
 (ca. 1,0 m über GOK)

Luftfeuchtigkeit 38,5 %  
 (ca. 1,0 m über GOK)

Holzfeuchtigkeit 11,8 % (Träger Achse 1), 12,4 % (Träger Achse 3), 10,5 % (Träger Achse 5)

Bemerkungen -

**Beschreibung des Bauvorhabens** Es handelt sich um den Neubau eines eingeschossigen Einkaufsmarktes mit ca. 25 m spannenden BSH Bindern und Stb.+MW Wänden. Die Aussteifung erfolgt über das Dachtrapezblech als schubstarre Scheibe und die Wände.



Abb. 108: Bauvorhaben 2021-KW30\_2 zum Zeitpunkt der Messung

Auffälligkeiten Messergebnisse:

- Vorkrümmungen:
  - alle Binder in die gleiche Richtung vorgekrümmt
  - Form  $e_y$  eines Binders annähernd eine sinus-Halbwellle
  - Maximalwert ca. in Feldmitte, im Betrag teils allerdings recht unterschiedlich (0,005 - 0,020 m). Deutlicher Sprung zwischen Achse 2-5 und Achse 6-8
  - Vorkrümmungen nehmen von Achse 6 zu Achse 12 hin zu
- Vortordierungen:
  - maximale Vortordierung fast aller Binder in die gleiche Richtung und i.d.R. eine ähnliche Form bei benachbarten Bindern
  - es wechselt teils das Vorzeichen über die Länge
  - oft Maximalwerte an den Auflagern, die das Gesamtbild der Form der Vortordierung prägen

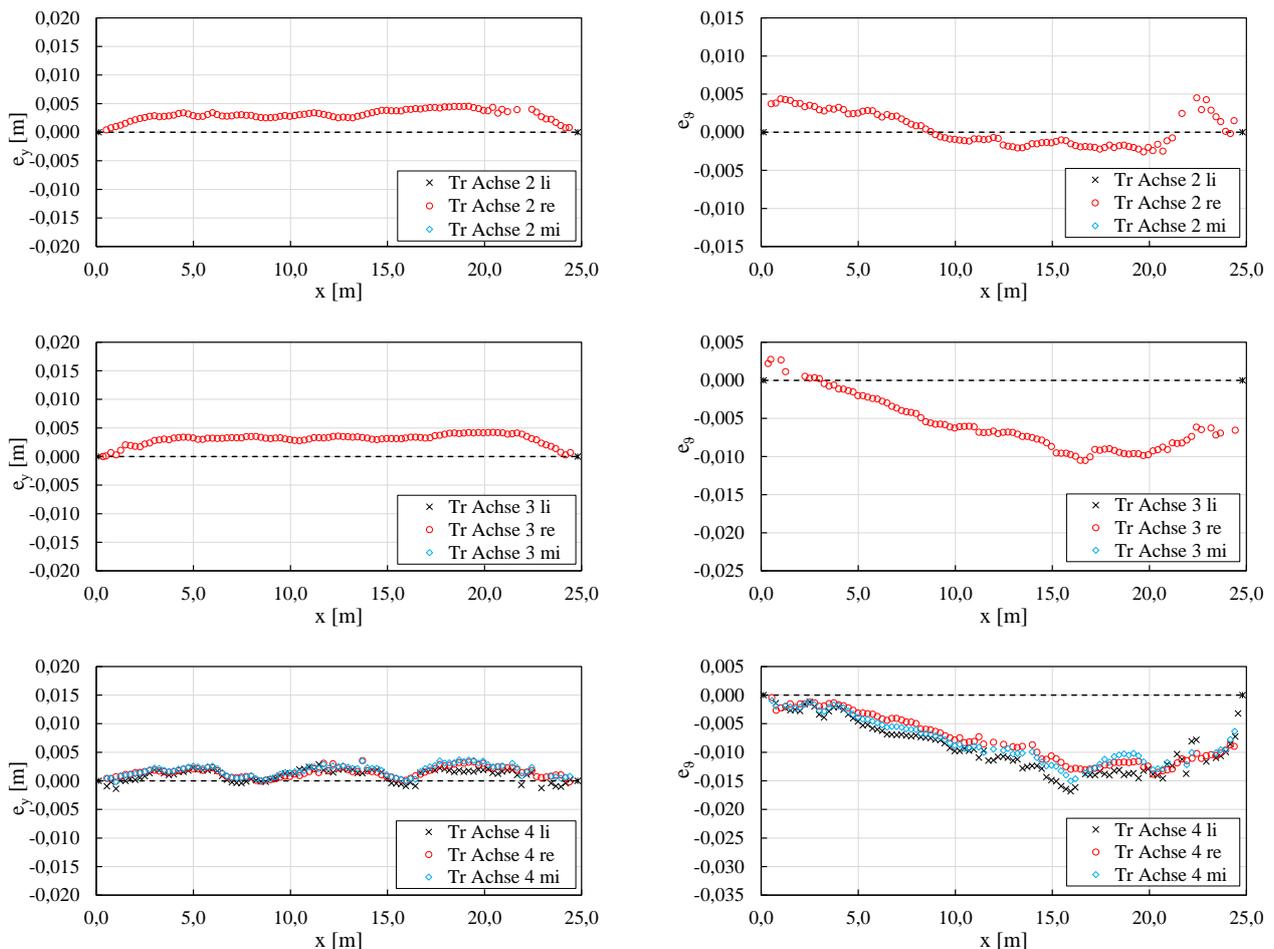


Abb. 109: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der BSH Binder des BV 2021-KW30\_2

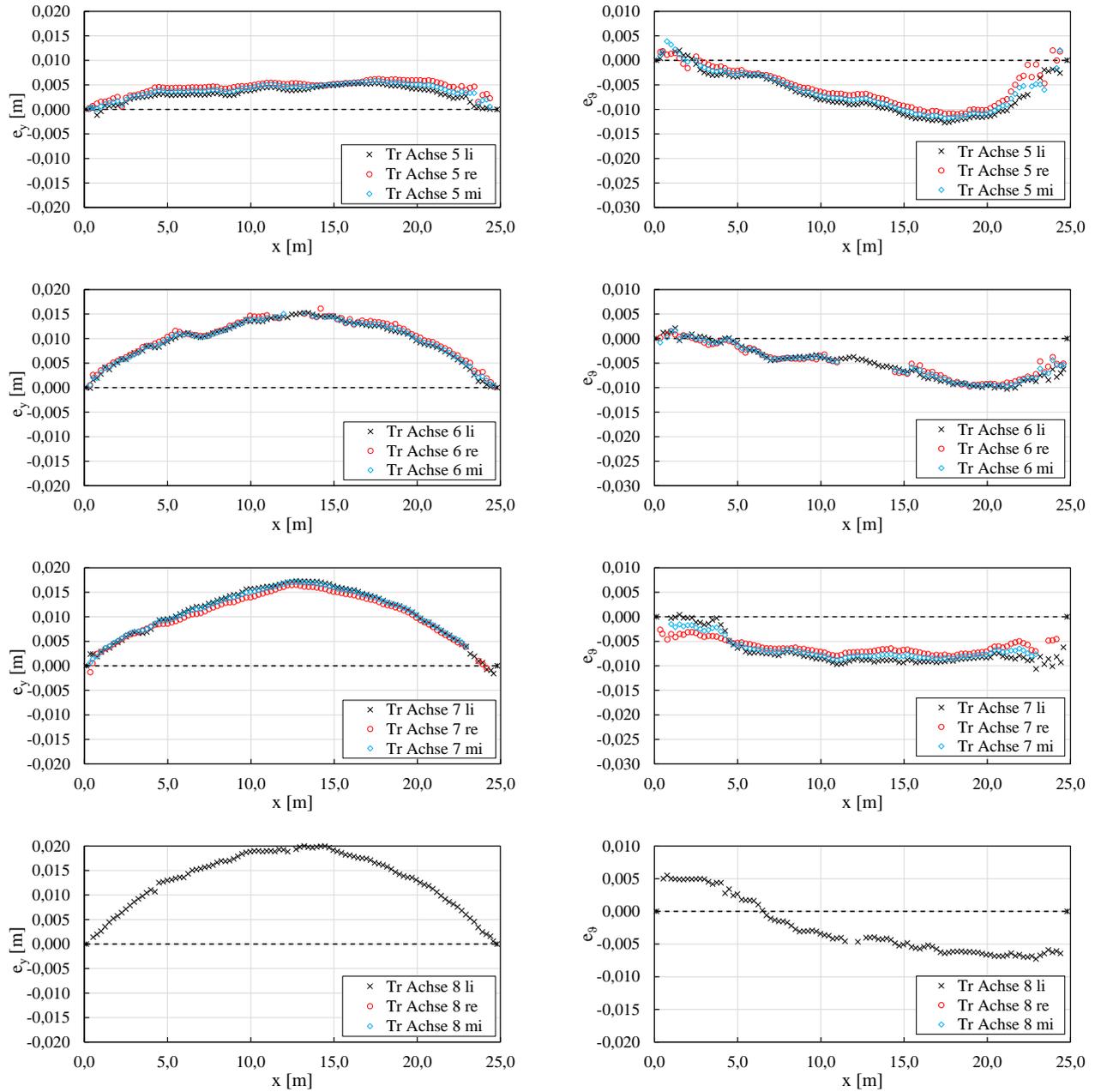


Abb. 110: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der BSH Binder des BV 2021-KW30\_2

### A.22 Messergebnisse – Bauvorhaben 2021-KW30\_3

Bauort 21147 Hamburg

Messdatum 30.07.2021

Hersteller Holzbauteile H\_F

Montagefirma M\_G

Bauteile	Anzahl	Form	L [mm]	H <sub>max</sub> [mm]	H <sub>min</sub> [mm]	Breite [mm]	Material
	1		24.750	1.560	990	200	GL 30c
	6					220	

Aussteifungstyp Dachverbände (Achsen 3-4, 8-9)

Gabellagerung Stahlbeton Auflagertaschen

Belastung Eigengewicht der Holzbauteile  
 (zum Zeitpunkt d. Messung)

Lufttemperatur 23,5 °C  
 (ca. 1,0 m über GOK)

Luftfeuchtigkeit 49,9 %  
 (ca. 1,0 m über GOK)

Holzfeuchtigkeit 12,0 % (Träger Achse 3), 12,7 % (Träger Achse 5), 12,0 % (Träger Achse 7)

Bemerkungen -

**Beschreibung des Bauvorhabens** Es handelt sich um den Neubau eines eingeschossigen Einkaufsmarktes mit ca. 25 m spannenden BSH Bindern und Stb.+MW Wänden. Die Aussteifung erfolgt über Dachverbände und die Wände.



Abb. 111: Bauvorhaben 2021-KW30\_3 zum Zeitpunkt der Messung

Auffälligkeiten Messergebnisse:

- Vorkrümmungen:**
  - alle Binder in an einem Verband angeschossen sind, sind in die gleiche Richtung vorgekrümmt
  - Form  $e_y$  eines Binders teils eine sinus-Halbwellen, teils Höckerform (Achsen 3 und 5), teils Durchschlagen (Achsen 7, 8, 10)
  - Maximalwert ca. in Feldmitte, im Betrag teils allerdings recht unterschiedlich (0,002 - 0,011 m). Binder Achse 2 ist ein Ausreißer.
  - geringere Vorkrümmungen an Dachverbandsbindern
- Vortordierungen:**
  - maximale Vortordierung fast aller Binder in die gleiche Richtung und eine meist ähnliche Form bei benachbarten Bindern
  - $e_y$  wechselt teils das Vorzeichen über die Länge
  - teils Maximalwerte an Auflagern, die das Gesamtbild der Form prägen

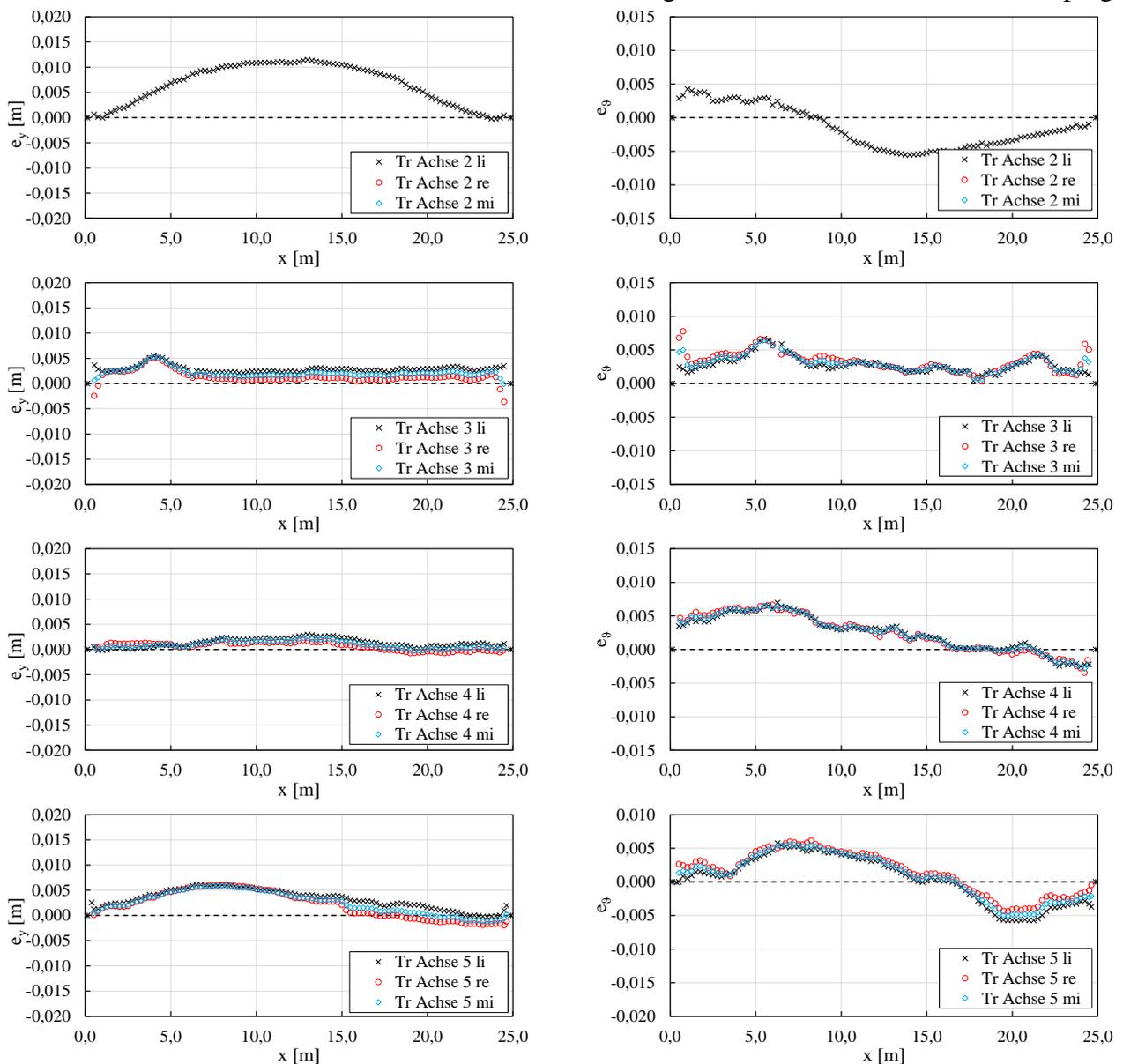


Abb. 112: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der BSH Binder des BV 2021-KW30\_3

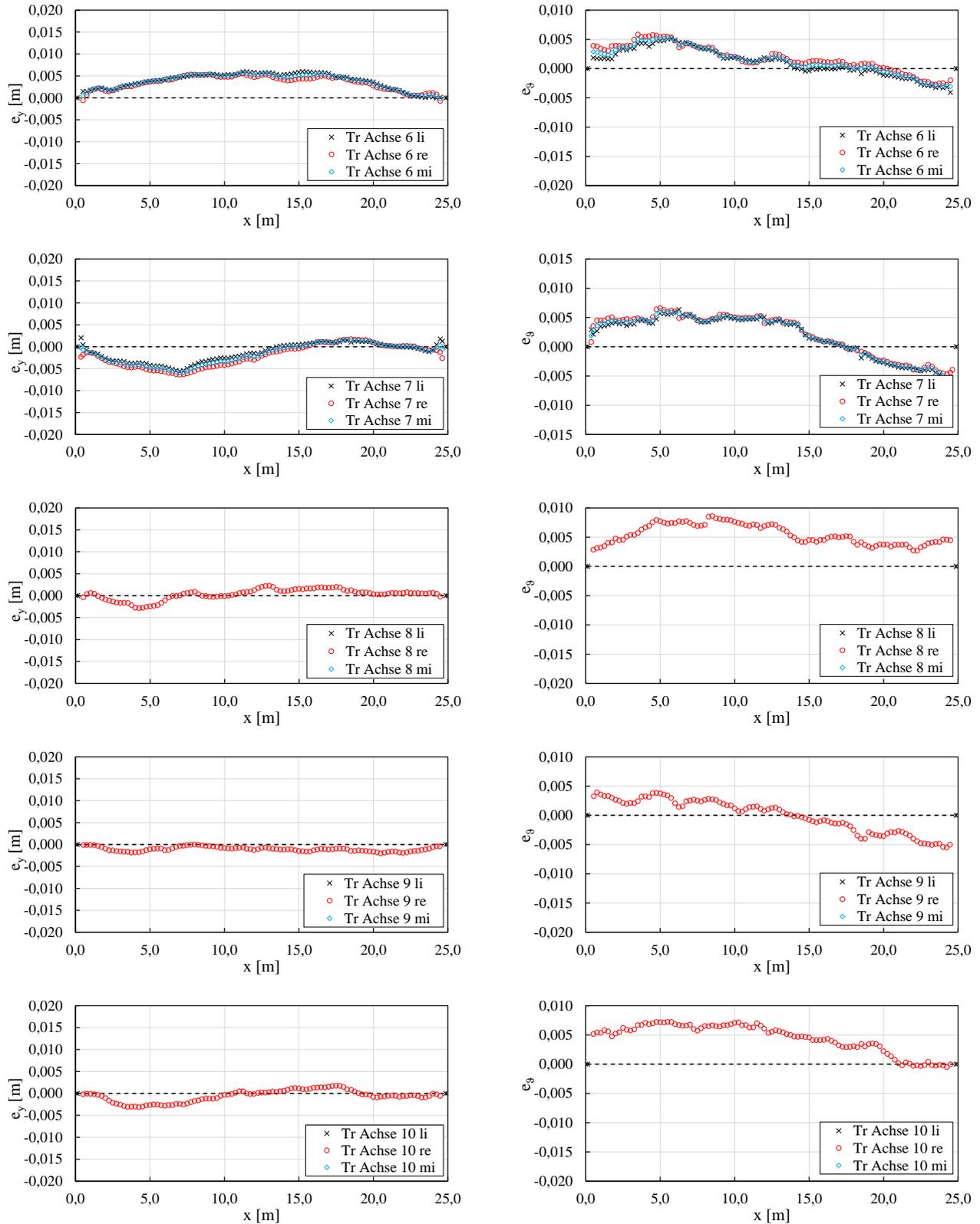


Abb. 113: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der BSH Binder des BV 2021-KW30\_3

### A.23 Messergebnisse – Bauvorhaben 2021-KW33

Bauort	72297 Seewald-Besenfeld							
Messdatum	13.08.2021							
Hersteller Holzbauteile	H_C							
Montagefirma	M_H							
<b>Bauteile</b>	<b>Anzahl</b>	<b>Form</b>	<b>L</b>	<b>H<sub>max</sub></b>	<b>H<sub>min</sub></b>	<b>Breite</b>	<b>Material</b>	
			[mm]	[mm]	[mm]	[mm]		
Achse A - B	9		Fischbauchträger	25.380	1.830	1.500	240	GL 28c
C - D	11			28.380	2.020	1.500	260	
Aussteifungstyp	Dachverbände (Achsen 23-24, 31-32)							
Gabellagerung	Beihölzer (x = 0) und Stahlbeton Auflagertaschen (x = L)							
Belastung (zum Zeitpunkt d. Messung)	Eigengewicht der Holzbauteile, Trapezblech, Dämmung, Dachabdichtung, teilweise Netz.							
Lufttemperatur (ca. 1,0 m über GOK)	24,9 °C							
Luftfeuchtigkeit (ca. 1,0 m über GOK)	57,2 %							
Holzfeuchtigkeit	13,4 % (Stütze Achse A/27), 13,8 % (Stütze Achse C/33), 14,8 % (Stütze Achse D/29)							
Bemerkungen	-							

**Beschreibung des Bauvorhabens** Es handelt sich um den Neubau einer eingeschossigen dreischiffigen Produktionshalle mit ca. 25,5 und 28,5 m spannenden BSH Bindern und Holz-/Stahlbetonstützen. Die Aussteifung erfolgt über Dach-/Wandverbände und eingespannte Stützen.



Abb. 114: Bauvorhaben 2021-KW33 zum Zeitpunkt der Messung

Auffälligkeiten Messergebnisse Achse A-B:

- Vorkrümmungen:
  - alle Binder in die gleiche Richtung vorgekrümmt
  - Form  $e_y$  eines Binders meist eine sinus-Halbwelle und einmal eine Höckerform (Achse 27)
  - Maximalwert ca. in Feldmitte, im Betrag teils recht unterschiedlich (0,005 - 0,018 m).
  - kein Zusammenhang zur Lage der Dachverbände erkennbar
  - Vorkrümmung nehmen von Achse 24 zu 27 hin ab und dann wieder zu
- Vortordierungen:
  - oft ähnliche Verläufe benachbarter Binder
  - es wechselt teils das Vorzeichen über die Länge
  - teils Maximalwerte an Auflagern, die das Gesamtbild der Form prägen

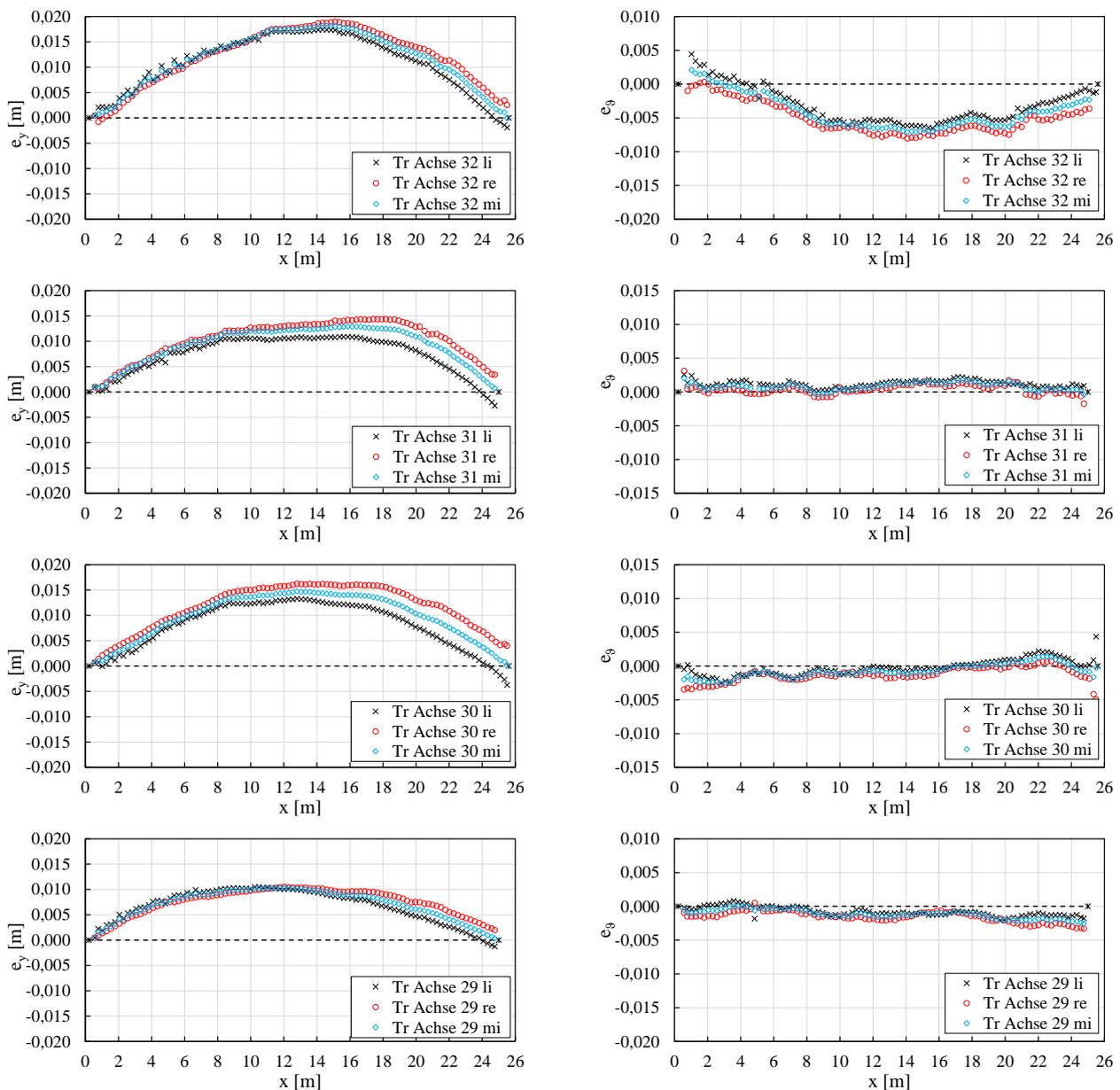


Abb. 115: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen BSH Binder des BV 2021-KW33, Achse A-B

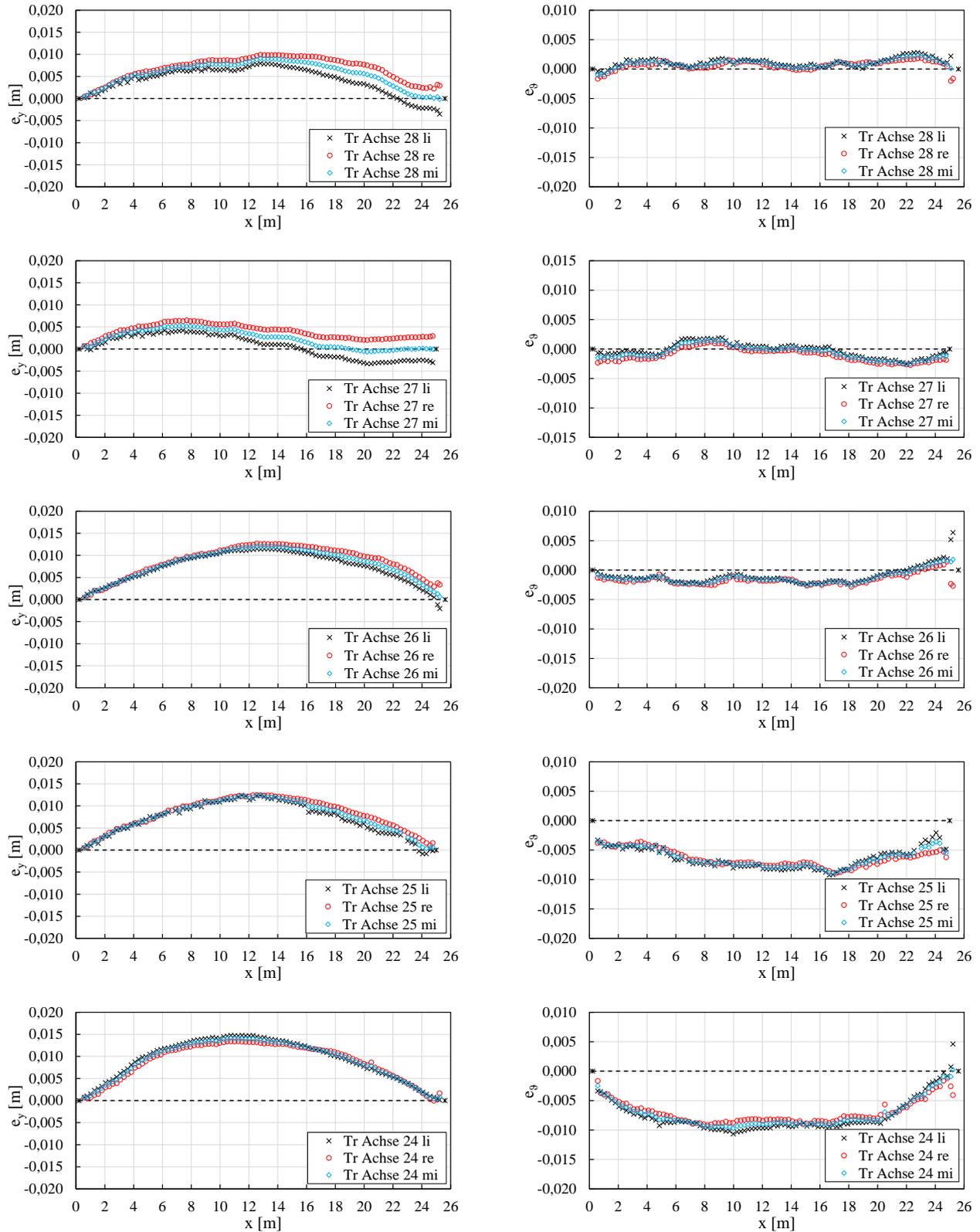


Abb. 116: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen BSH Binder des BV 2021-KW33, Achse A-B

Auffälligkeiten Messergebnisse Achse C-D:

- Vorkrümmungen:
  - alle Binder ausgenommen Achsen 24, 25, 32 in die gleiche Richtung vorgekrümmt
  - Form  $e_y$  eines Binders teils eine sinus-Halbwellen, eine Höckerform (Achsen 25, 27, 29) und Durchschlagen (Achse 24).
  - Maximalwert ca. in Feldmitte, im Betrag teils recht unterschiedlich (0,002 - 0,010 m).
  - kein Zusammenhang zur Lage der Dachverbände erkennbar
- Vortordierungen:
  - oft ähnliche Verläufe benachbarter Binder
  - es wechselt teils das Vorzeichen über die Länge
  - größere Vortordierungen am Auflager  $x = L$  (Stahlbetonaufлагertasche) im Vergleich zu Auflager  $x = 0$  (Beihölzer)

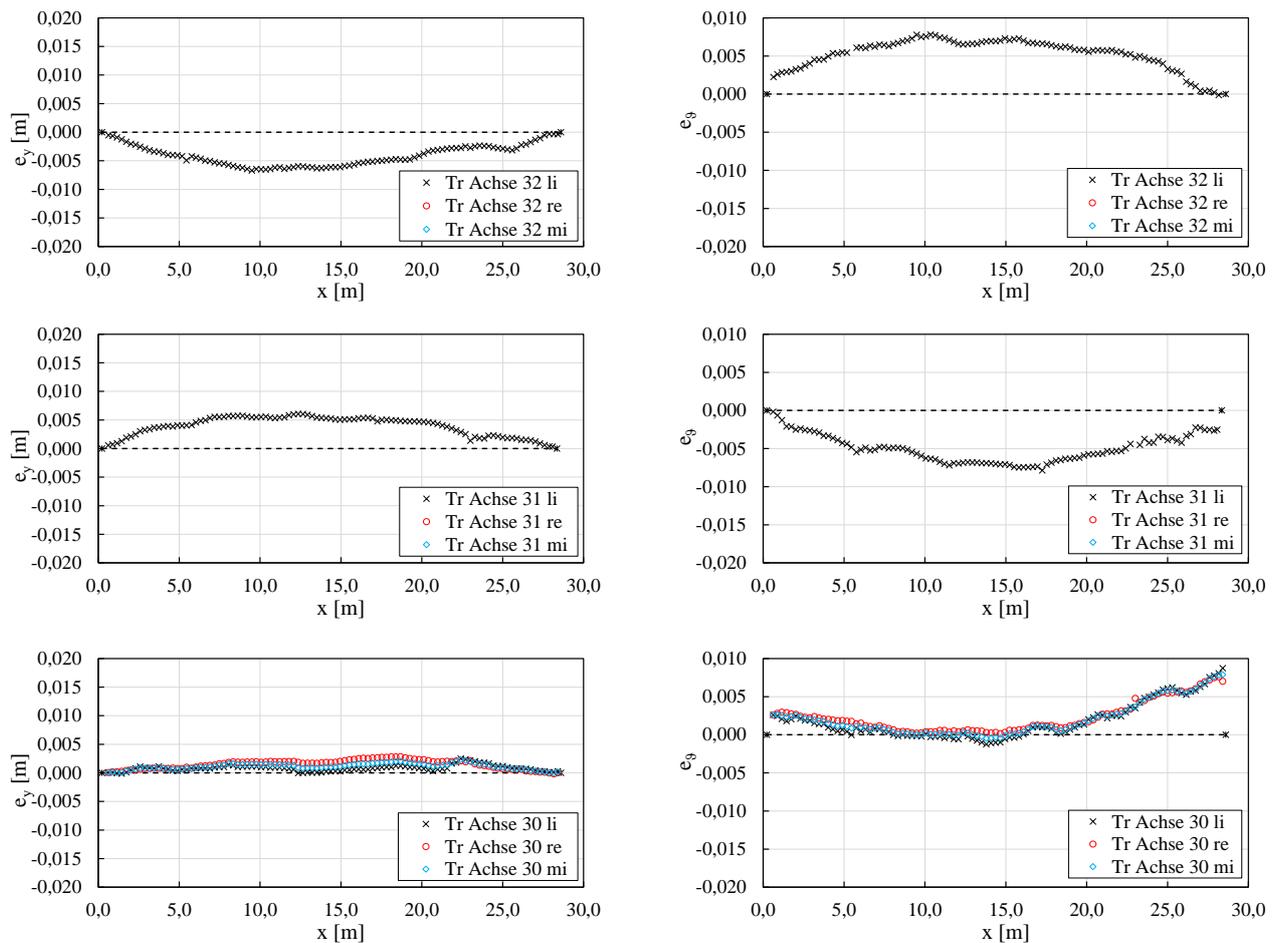


Abb. 117: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen BSH Binder des BV 2021-KW33, Achse C-D

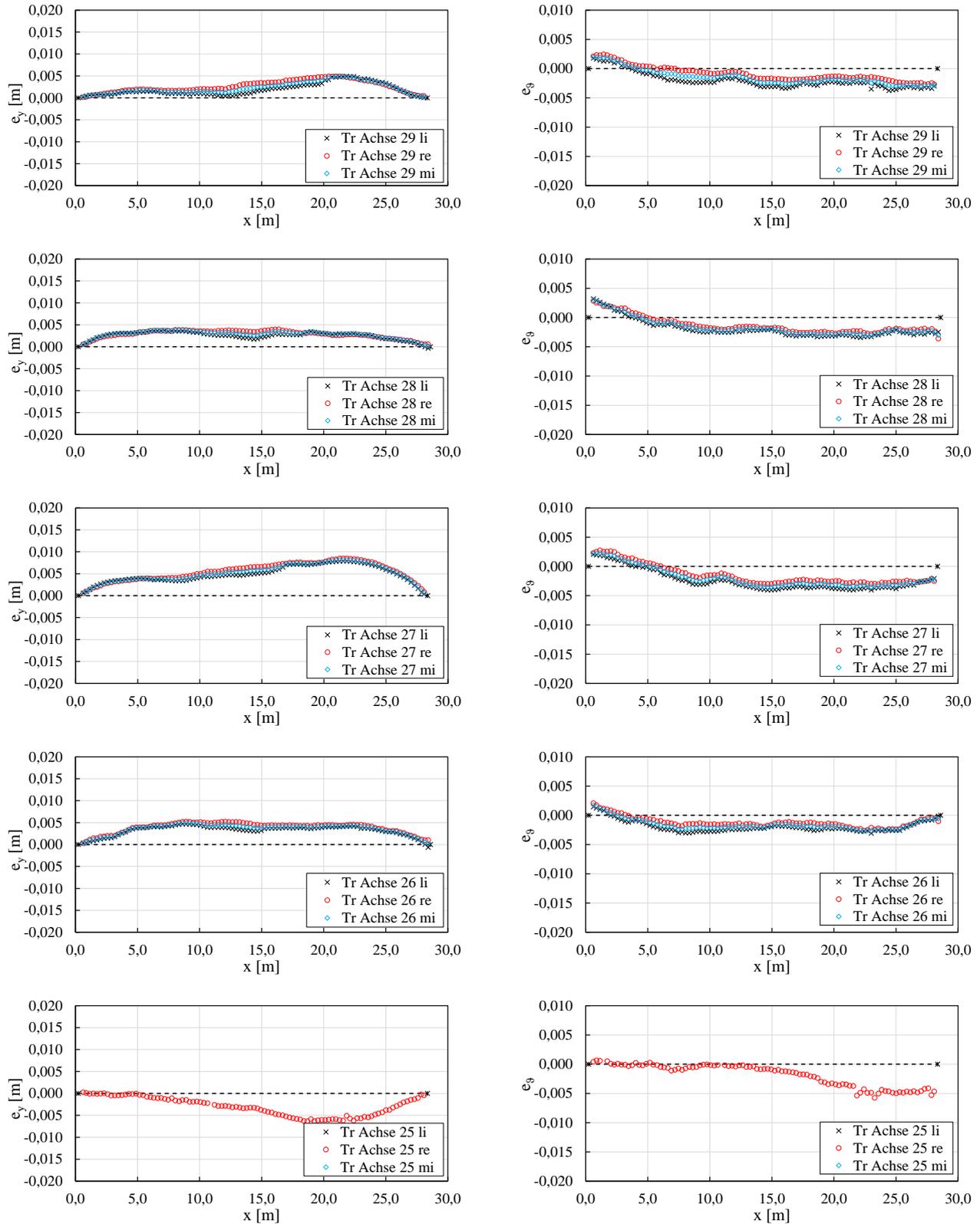


Abb. 118: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen BSH Binder des BV 2021-KW33, Achse C-D

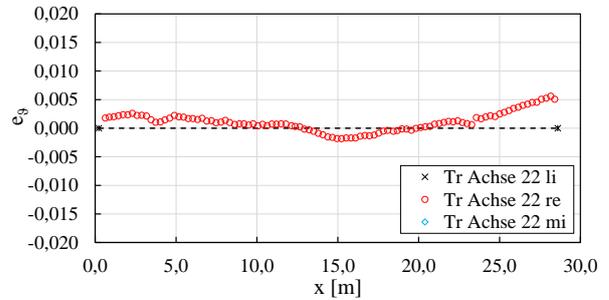
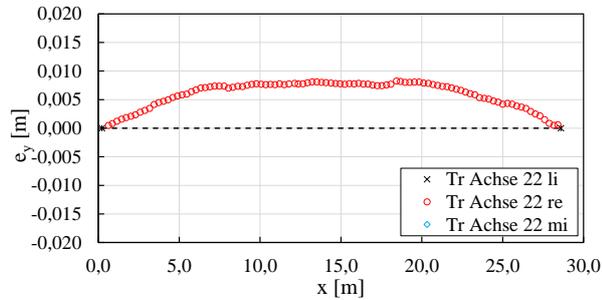
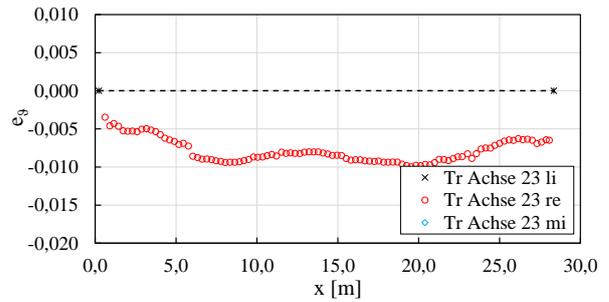
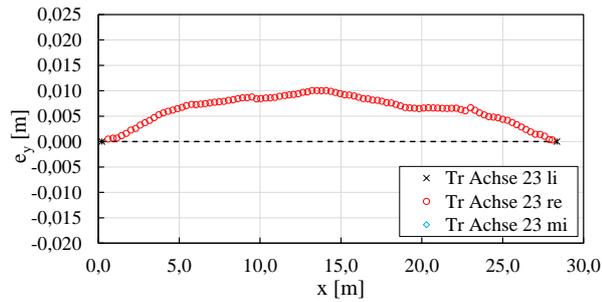
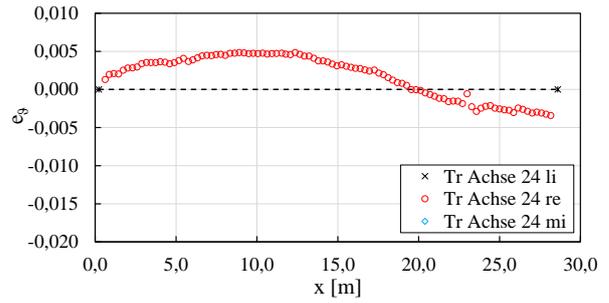
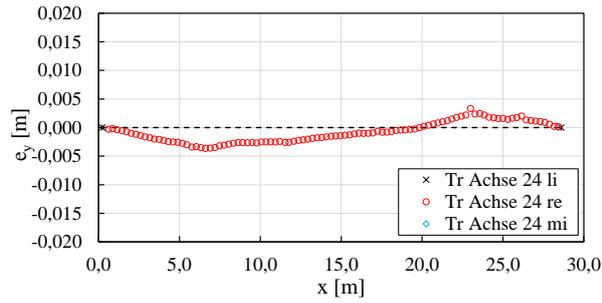
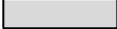


Abb. 119: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen BSH Binder des BV 2021-KW33, Achse C-D



### A.24 Messergebnisse – Bauvorhaben 2022-KW15

Bauort	70192 Stuttgart						
Messdatum	13.04.2022						
Hersteller Holzbauteile	H_D						
Montagefirma	unbekannt						
<b>Bauteile</b>	<b>Anzahl</b>	<b>Form</b>	<b>L</b>	<b>H<sub>max</sub></b>	<b>H<sub>min</sub></b>	<b>Breite</b>	<b>Material</b>
			[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	
Träger	10		Parallelgurtbinder	16.660	880	-	GL75
Stützen	20			2.750	240	-	GL75
Aussteifungstyp	Ligno Block Q3 Dachscheibe						
Gabellagerung	Schlitzbleche mit Stabdübeln						
Belastung <i>(zum Zeitpunkt d. Messung)</i>	Eigengewicht der Holzbauteile, Dachscheibe, Dämmung, Dachabdichtung.						
Lufttemperatur <i>(ca. 1,0 m über GOK)</i>	15,0 °C						
Luftfeuchtigkeit <i>(ca. 1,0 m über GOK)</i>	60 %						
Holzfeuchtigkeit	-						
Bemerkungen	-						

**Beschreibung des Bauvorhabens** Es handelt sich um den Neubau der Sporthalle einer Schule ca. 16,7 m spannenden FSH Bindern auf FSH Stützen. Die Aussteifung erfolgt über die stirnseitigen Stahlbetonwände und den angeschlossenen Massivbau der Schule.

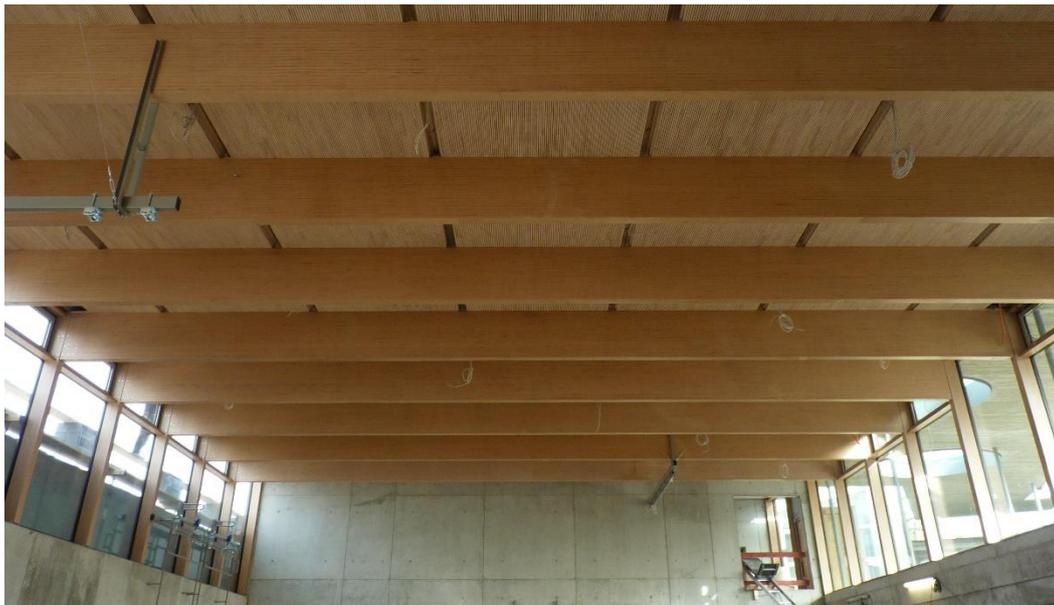


Abb. 120: Bauvorhaben 2022-KW15 zum Zeitpunkt der Messung

Auffälligkeiten Messergebnisse:

- Vorkrümmungen:
  - meist kein Zusammenhang zwischen benachbarten Bindern
  - Form  $e_y$  eines Binders annähernd eine sinus-Halbwellen
  - Maximalwert ca. in Feldmitte und streut stark (0,002 - 0,015 m)
- Vortordierungen:
  - kein Zusammenhang zwischen benachbarten Bindern
  - gesamtes  $e_\varphi$  eines Binders immer in gleiche Richtung
  - teils Maximalwerte an den Auflagern, die das Gesamtbild der Form prägen
  - zwischen den Auflagern meist annähernd linearer Verlauf

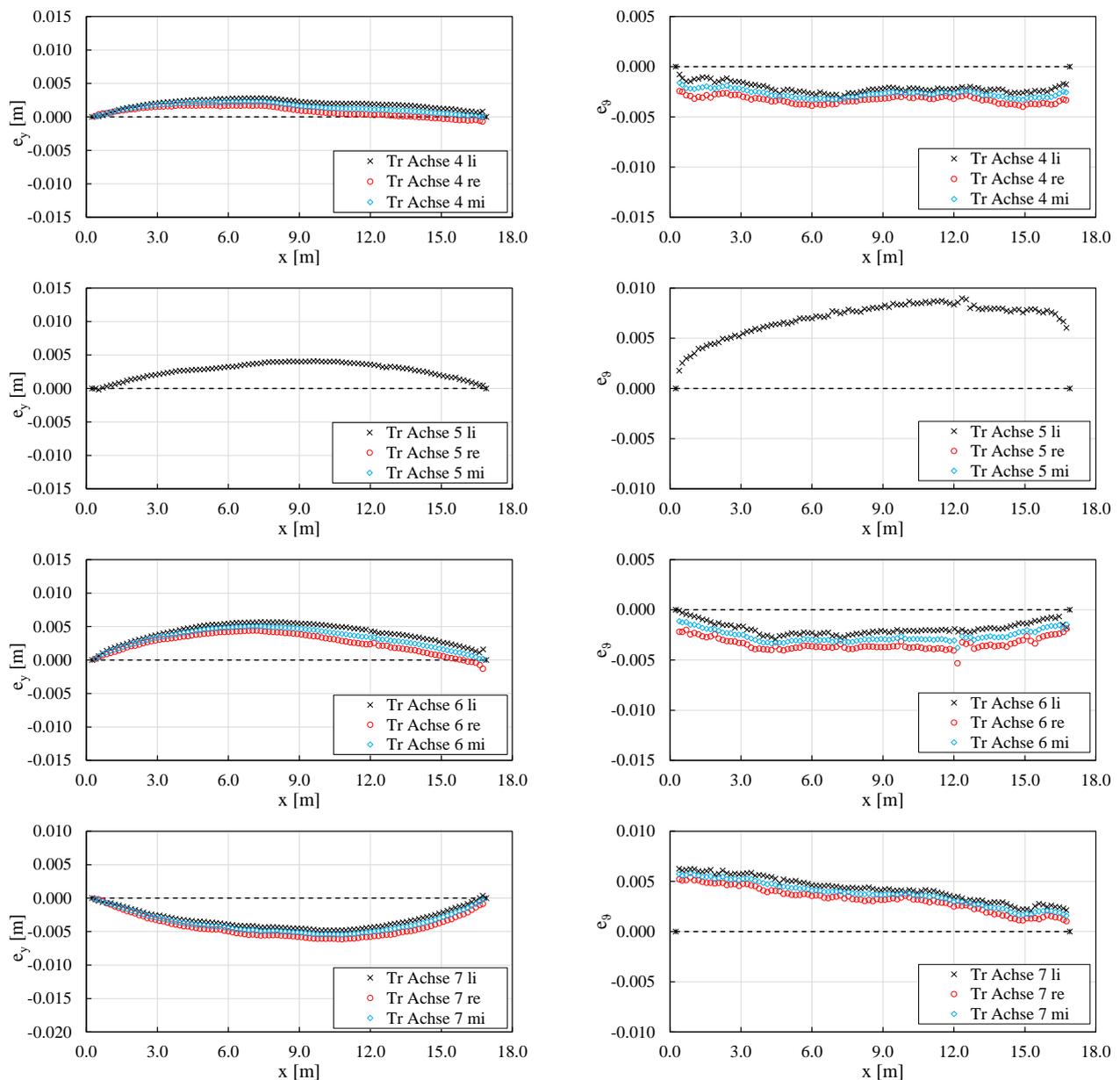


Abb. 121: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der FSH Binder des BV 2022-KW15

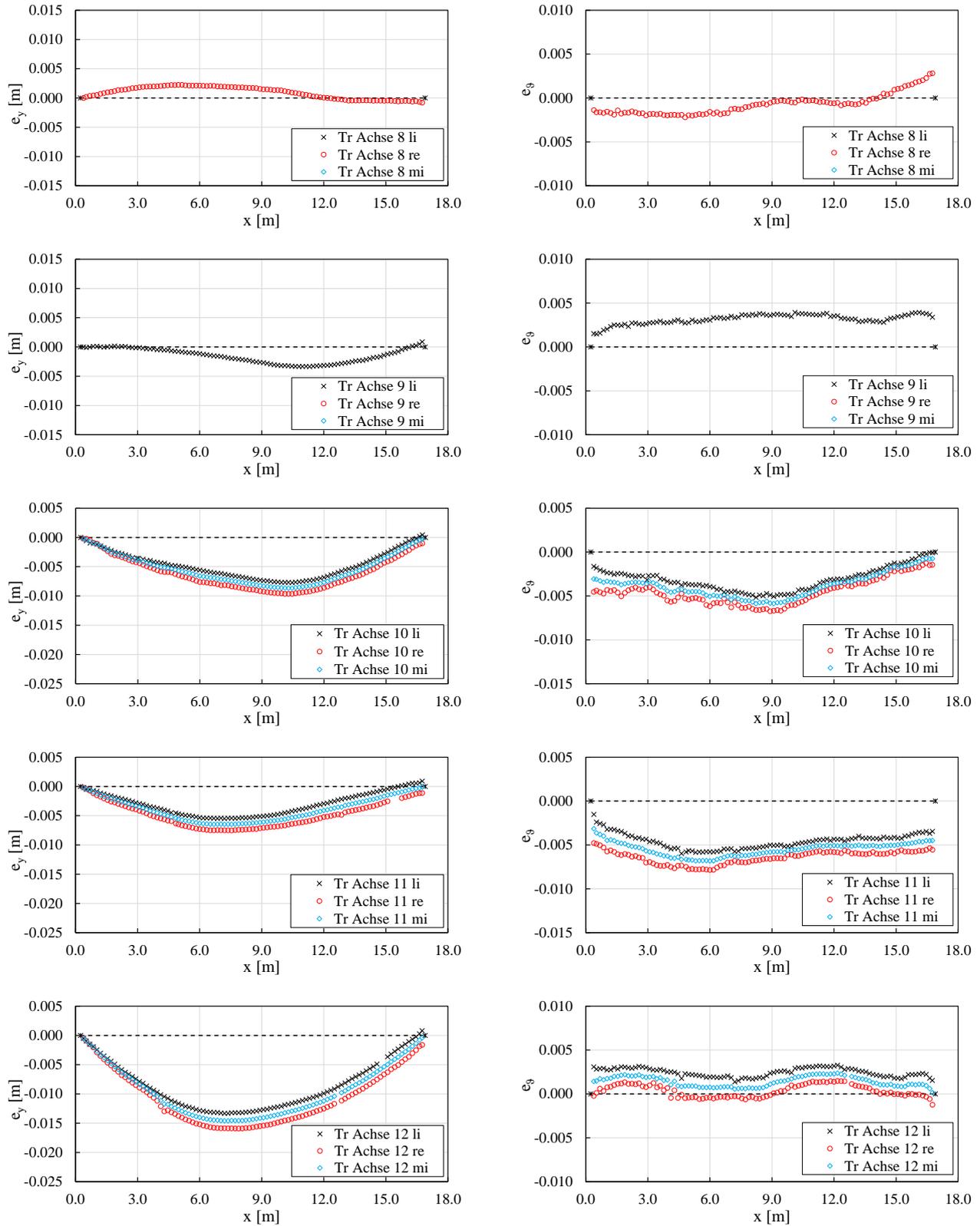


Abb. 122: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der FSH Binder des BV 2022-KW15

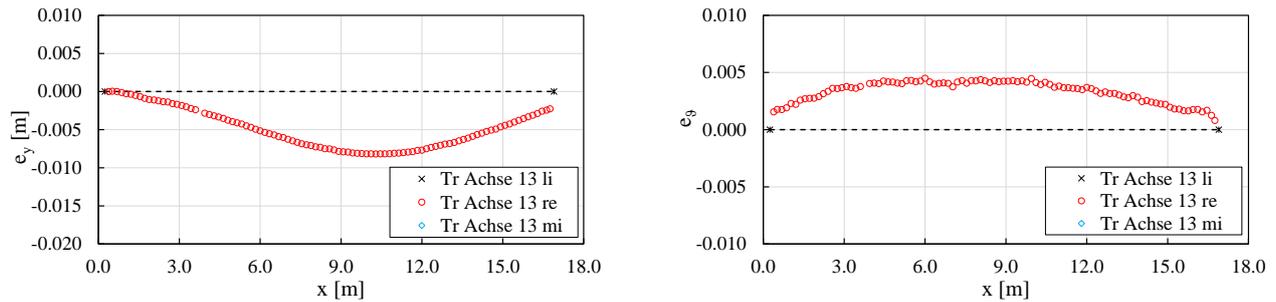


Abb. 123: Gemessene Vorkrümmungen und Vortordierungen der FSH Binder des BV 2022-KW15

Zusammenfassung der Ergebnisse FSH Stützen des BV 2022-KW15:

Stütze	max. Vorkrümmung $e_y$ (über $L = 2,75$ m)	max. Vorkrümmung $e_z$ (über $L = 2,75$ m)	max. Schiefstellung $e\phi_y$	max. Schiefstellung $e\phi_z$
<b>Achse A/4</b>	ca. - 0,7 mm = - L / 3.691	- 1,49 mm = - L / 1.846	0,0009 = 1 / 1.148	- 0,0029 = - 1 / 345
<b>Achse A/5</b>	ca. - 1,5 mm = - L / 1.806	0,17 mm = L / 16.667	-0,0003 = - 1 / 3.021	- 0,0026 = - 1 / 380
<b>Achse A/6</b>	ca. - 1,0 mm = - L / 2.717	- 1,02 mm = - L / 2.688	-0,0017 = - 1 / 602	- 0,0021 = - 1 / 471
<b>Achse A/7</b>	ca. 1,3 mm = L / 2.052	- 0,27 mm = - L / 10.223	-0,0003 = - 1 / 3.546	- 0,0013 = - 1 / 741
<b>Achse A/8</b>	ca. - 1,2 mm = - L / 2.292	- 0,24 mm = - L / 11.506	-0,0022 = - 1 / 456	- 0,0025 = - 1 / 408
<b>Achse A/9</b>	ca. 0,7 mm = L / 3.890	- 0,58 mm = - L / 4.717	-0,0013 = - 1 / 757	- 0,0023 = - 1 / 441
<b>Achse A/10</b>	ca. - 1,2 mm = - L / 2.202	- 0,82 mm = - L / 3.337	0,0003 = 1 / 3.861	- 0,0032 = - 1 / 311
<b>Achse A/11</b>	ca. 0,3 mm = L / 10.073	- 0,41 mm = - L / 6.724	0,0001 = 1 / 9.615	0,0014 = 1 / 703
<b>Achse A/12</b>	ca. 0,3 mm = L / 9.450	0,93 mm = L / 2.967	0,0005 = 1 / 2.020	0,0002 = 1 / 4.484
<b>Achse A/13</b>	ca. 0,8 mm = L / 3.412	- 0,32 mm = - L / 8.594	-0,0006 = - 1 / 1.704	0,0013 = 1 / 742
<b>Achse D/5</b>	0,4 mm = L / 6.425	0,38 mm = L / 7.294	0,0003 3.195	0,0007 = 1 / 1.357
<b>Achse D/6</b>	- 0,4 mm = - L / 6.194	1,05 mm = L / 2.632	0,0012 822	0,0004 = 1 / 2.326
<b>Achse D/7</b>	0,4 mm = L / 6.858	1,08 mm = L / 2.544	0,0008 1.302	0,0014 = 1 / 694
<b>Achse D/8</b>	1,6 mm = L / 1.728	0,83 mm = L / 3.329	-0,0001 -7.752	0,0027 = 1 / 376
<b>Achse D/9</b>	0,9 mm = L / 2.910	0,56 mm = L / 4.919	0,0012 847	0,0020 = 1 / 499
<b>Achse D/10</b>	0,3 mm = L / 8.041	1,19 mm = L / 2.319	0,0009 1.065	0,0017 = 1 / 603
<b>Achse D/11</b>	- 0,9 mm = - L / 2.898	- 1,21 mm = - L / 2.267	-0,0009 -1.166	- 0,0028 = - 1 / 351
<b>Achse D/12</b>	0,2 mm = L / 13.033	- 1,05 mm = - L / 2.624	-0,0010 -1.017	- 0,0037 = - 1 / 273
<b>Achse D/13</b>	- 0,1 mm = - L / 26.190	- 1,94 mm = - L / 1.415	-0,0017 -589	- 0,0014 = - 1 / 703