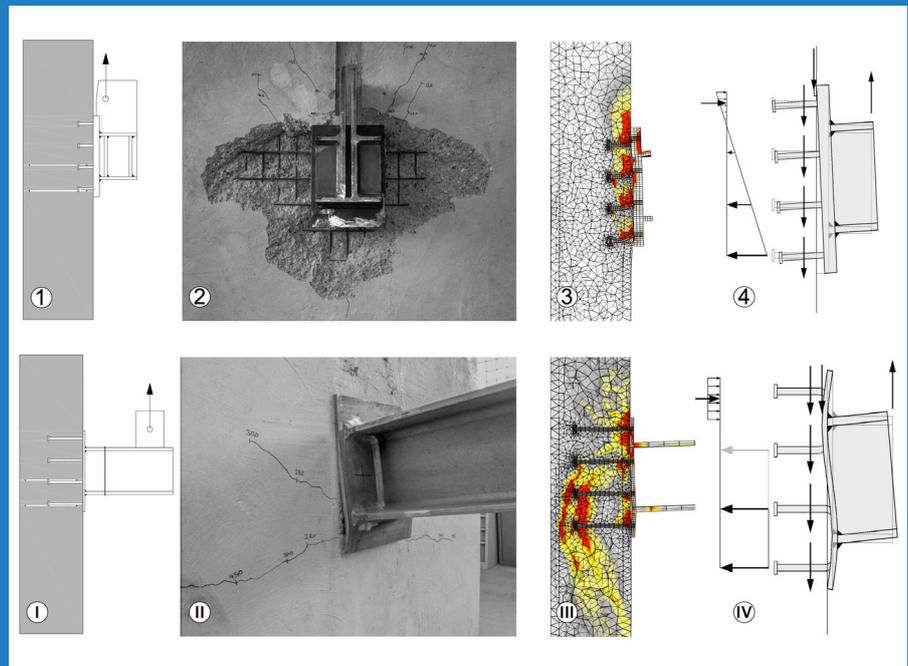


5/2017

Forschungsbericht

Modell zur Erfassung der
Rissbreiten bei durchlaufenden
Stahlverbundträgern mit
Teil- und Ganzfertigteilen

18257 N



Urheberbezeichnung (Copyright); Haftungsausschluss

Dieses Werk und dessen Inhalte sind urheberrechtlich geschützt. Die Nutzungs- und Verwertungsrechte liegen beim Deutschen Ausschuss für Stahlbau e.V. DASt (Sohnstraße 65, 40237 Düsseldorf). Verstöße gegen das Urheberrecht (z.B. das unberechtigte Kopieren von Texten) sind gemäß §§ 106 ff. UrhG strafbar und wird mit Freiheitsstrafe oder Geldstrafe bestraft. Der Versuch ist ebenfalls strafbar. Daneben könne zivilrechtliche Schadensersatz und Vergütungsansprüche bestehen.

Bei der Erstellung dieses Werkes wurde mit größter Sorgfalt vorgegangen. Trotzdem können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden. Für fehlerhafte Angaben und deren Folgen kann daher keine Haftung übernommen werden; dies gilt nicht für Vorsatz oder grobe Fahrlässigkeit. Rechtsansprüche aus der Benutzung der Daten sind insoweit ausgeschlossen.

Angaben über Normen beziehen sich auf den Veröffentlichungszeitpunkt.

Für alle Hinweise und Verbesserungsvorschläge sind wir stets dankbar.

Herausgeber:
Deutscher Ausschuss für Stahlbau DASt,
Düsseldorf

Vertrieb:
Stahlbau Verlags- und Service GmbH,
Düsseldorf

Oktober 2021

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Forschungsvereinigung **Deutscher Ausschuß für Stahlbau e.V.
DAST**

Forschungsstelle **Technische Universität Berlin
Institut für Bauingenieurwesen**

**Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren
- Stahlbau**

Prof. Dr.-Ing. Karsten Geißler

Dipl.-Ing. Matthias Mager

IGF-Nummer **18257 N**

DAST-Homepage **www.stahlbauforschung.de**

Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben „Modell zur Erfassung der Rissbreiten bei durchlaufenden Stahlverbundträgern mit Teil- und Ganzfertigteilen“, IGF-Projekt Nr. 18257 N, der Forschungsvereinigung Deutscher Ausschuß für Stahlbau, Sohnstraße 65, 40237 Düsseldorf wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

1. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse im Berichtszeitraum

Im Bewilligungszeitraum wurden die folgenden Arbeiten aus den Arbeitsschritten (a), (b) und (c) (vgl. Arbeitsdiagramm im Punkt 3.3 des Forschungsantrages) durchgeführt:

Arbeit	Zeitraum	Erläuterung
Beschaffung Stahlträger	08/14	Beschaffung von 12 Stahlträgern mit Kopfbolzendübeln als vorhabenbezogene Sachleistung (Fa. Goldbeck)
Ausschreibung/Beauftragung Baufirma	08/14-09/14	Für die Vergabe der „Herstellung Verbundträger“ (s. Pkt. C1 des EfP) musste eine beschränkte Ausschreibung durchgeführt und die Auftragsvergabe begründet werden
Erstellung Messkonzept	08/14-09/14	Sensorbelegung, Messanlage, Konfigurationen, Beschaffungsliste
Fortschreibung Versuchskonzept	08/14-10/14	Detailplanung für die Versuchsdurchführung; Anpassungen im zeitlichen Ablauf
BE für Verbundträgerherstellung	09/14	Schaffung einer Baustellenfläche von ~100m ² für die Durchführung der Bauarbeiten; Koordination mit anderen Forschungsstellen
Beschaffung Messtechnik	09/14	Vergleichsangebote + Bestellung für DMS, Kabel, T-Sensoren
Gerätebeschaffung	09/14	Vergleichsangebote + Bestellung für Messverstärkerkarten (vgl. Punkt B des EfP)
AP für Herstellung Versuchskörper	09/14-12/14	Schalung, Bewehrung, Detailplanung, Bauablauf
Erweiterung Messanlage	10/14-11/14	Einbindung der neuen Messtechnik in die vorhandene Messanlage
Herstellung Versuchskörper 1-3	10/14-11/14	Betonage TFT d=6cm im Werk, Herstellung OB-Ergänzung in der Peter-Behrens-Halle
Dauermessung 1-3	11/14-12/14	Schwinden+Hydratation
Reparatur u. Umbau Aufspannfeld	11/14-12/14	Ersatzteilbestellung Servoventil für Prüfzylinder, Herrichtung Prüfraumen
Herstellung Versuchskörper 4-6	11/14-12/14	Betonage TFT d=9cm im Werk, Herstellung OB-Ergänzung in der Peter-Behrens-Halle
Dauermessung 4-6	12/14	Schwinden + Hydratation
Versuch 1-3	12/14	Versuchsdurchführung unter Last
Betonproben	10/14-12/14	Herstellung und Prüfung von Betonproben zur Ermittlung der Festbetoneigenschaften Träger 1-6 (FT- und Ort beton)
Auswertung	12/14	Überwachung und stichprobenartige Auswertung der durchgeführten Dauer- und Lastmessungen; Erarbeitung von Auswertungsroutinen
Dauermessung 4-6	01/15	Schwinden + Hydratation
Versuch 4-6	01/15	Versuchsdurchführung unter Last
Herstellung Versuchsträger 7-9	01/15-02/15	Betonage GFT d=18cm in der Peter-Behrens-Halle, Herstellung OB-Ergänzung in der Peter-Behrens-Halle
Dauermessung 7-9	02/15-03/15	Schwinden + Hydratation
Versuch 7-9	03/15	Versuchsdurchführung unter Last
Herstellung Versuchsträger 10-12	04/15	Betonage GFT d=18cm in der Peter-Behrens-Halle, Herstellung OB-Ergänzung in der Peter-Behrens-Halle
Dauermessung 10-12	04/15-05/15	Schwinden + Hydratation
Versuch 10-12	05/15-06/15	Versuchsdurchführung unter Last

Betonproben	02/15-06/15	Herstellung und Prüfung von Betonproben zur Ermittlung der Festbetoneigenschaften Träger 7-12 (FT- und Ortbeton)
Auswertung	01/15-06/15	Überwachung und stichprobenartige Auswertung der durchgeführten Dauer- und Lastmessungen; Erarbeitung von Auswertungsroutinen
Auswertung	06/15-12/15	Systematische Auswertung der Versuche 1-12
Gegenrechnung	09/15-12/15	Vergleich der Versuchsergebnisse mit den Ergebnissen des Berechnungsmodells für reine Ortbetonquerschnitte
Erweiterung Berechnungsmodell	10/15-12/15	Analyse der Besonderheiten bei Verwendung von Fertigteilen; Formulierung von Lösungsansätzen
Grundlagen	10/16-12/16	Überprüfung der Voraussetzungen für die Anwendbarkeit des Urmodells auf die gefundenen Besonderheiten; Ausräumen von Unstimmigkeiten und Erweiterungen der bisherigen Betrachtung
Erweiterung Berechnungsmodell	10/16-12/16	Formulierung der Bestimmungsgleichungen
Auswertung	10/16-12/16	Gezielte Betrachtung ausgewählter Aspekte im Zusammenhang mit der Erweiterung des Berechnungsmodells
Parameterstudie	12/16	Beginn gezielter Untersuchungen zur Sensitivität des erweiterten Modells
Zusammenführung	12/16	Beginn der Zusammenführung aller Ergebnisse

Die Arbeiten wurden nach Ende des Bewilligungszeitraums fortgesetzt. Derzeit laufen noch letzte Untersuchungen.

2. Verwendung der Zuwendung

- wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)
19 Personenmonate für den wissenschaftlichen Mitarbeiter
- Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)
- Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Durchführung der Großversuche erfolgte wie geplant am Anfang des Forschungsvorhabens und stellte einen wesentlichen Bestandteil desselben dar. Zugleich waren die Großversuche bzw. die Auswertung die Grundlage für die weiteren Arbeitsschritte. Aufgrund der sorgfältigen Planung konnte die Durchführung der Versuche wie vorgesehen abgeschlossen werden.

Im gesamten Bewilligungszeitraum fielen zahlreiche verwaltungstechnische Arbeiten an, die zu Mehraufwand und zeitlichen Verschiebungen führten bzw. war zur Vermeidung von zeitlichen Verschiebungen bei der Durchführung der Großversuche Mehraufwand zu betreiben. Diese Arbeiten werden in Abschnitt 1 nicht gesondert aufgeführt. Die zielgerichtete Auswertung der Versuche wurde daher nicht versuchsbegleitend begonnen, sondern erst nach dem planmäßigen Abschluss der Bauteilversuche. Während der Versuche wurden nur begleitende bzw. beobachtende Auswertungen durchgeführt, um die Versuche überwachen und ggf. Anpassungen oder Änderungen vornehmen zu können. Weiterhin zeigte sich im Zuge der Versuchsauswertung, dass die „überschneidend-chronologische“ Reihenfolge der

Arbeitsschritte aus Abschnitt 3.3 des Forschungsantrages (Auswertung-Vergleichsrechnung-Modellbildung-Überprüfung) nur bedingt durchführbar ist. Konkret zeigte die begonnene Auswertung eine Vielzahl von Ergebnissen, die zwar zunächst beschrieben werden konnten aber erst nach bzw. im Zuge der theoretischen Analyse sinnvoll interpretierbar waren.

Aufgrund des verschobenen Projektbeginns sowie des aufgetretenen Mehraufwandes wurde zunächst die kostenneutrale Verlängerung des Bewilligungszeitraums um vier Monate bis zum 30.04.2016 beantragt und bewilligt. Da der projektbearbeitende wissenschaftliche Mitarbeiter sich zwischenzeitlich in Elternzeit befand, wurde eine weitere Verlängerung des Bewilligungszeitraums bis zum 31.12.2016 beantragt und bewilligt.

Im Zuge der Durchführung der Trägerversuche und der ersten Auswertungen wurde offensichtlich, dass die – als Idealfall anzusehende – Erweiterung des mechanischen Urmodells nicht in einfacher Form umgesetzt werden kann. Im weiteren Verlauf waren ergänzende Analysen und Untersuchungen erforderlich, die teilweise über das ursprünglich skizzierte Arbeitsprogramm hinausgehen. Derzeit laufen letzte abschließende Berechnungen zu diesen Fragestellungen, deren Ergebnisse teilweise noch ausstehen. Die Erweiterung des Arbeitsumfanges wurde auf eigene Kosten realisiert. Sie ist aus technischer Sicht alternativlos. Der in Anlage zu diesem Schlussbericht übergebende Forschungsbericht dokumentiert den aktuellen Stand. Die abschließende Dokumentation erfolgt im Zuge einer Dissertationsschrift

4. Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen

Durch eine umfassende Systematisierung für die beiden Hauptanwendungsfälle für Fertigteilverbundträger - Verbundträger mit Teilfertigteilen (TFT) und Verbundträger mit Ganzfertigteilen (GFT) – konnten spezifische Fragestellungen zur Konstruktion und Bemessung der genannten Bauweisen, die bislang nicht oder nicht hinreichend beantwortet werden konnten, formuliert werden.

Es wurden Berechnungsmodelle erarbeitet, mit denen auf Grundlage der bestehenden mechanischen Modellierung für herkömmliche Verbundträger eine erweiterte Beschreibung auch für Verbundträger mit Teil- und Ganzfertigteilen möglich ist.

Die hinsichtlich der untersuchten Bauweisen bislang bestehenden Lücken in den Berechnungsansätzen werden geschlossen. Damit sind die Voraussetzungen erfüllt, um das hohe Innovationspotential dieser Bauweise künftig noch stärker und mit der erforderlichen Sicherheit und Wirtschaftlichkeit ausnutzen zu können.

Das Bauprodukt durchlaufender Fertigteilverbundträger wird system- und damit wettbewerbsfähiger. Eine Ausklammerung dieser Entwurfsvariante infolge der Rissproblematik kann künftig vermieden werden. Insbesondere kann damit die Fertigung von Verbundkonstruktionen wieder in stärkerem Umfang gesamtunternehmerisch an die Stahlbaubetriebe angegliedert werden. Das führt zu Vorteilen für kleine und mittlere Unternehmen im Allgemeinen sowie solche aus der stahlverarbeitenden Branche im Besonderen.

5. Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Der mit dem Zwischenbericht 2015 vorgelegte Plan zum Ergebnistransfer wird fortgeschrieben.

Geplante spezifische Transfermaßnahmen während der Laufzeit des Vorhabens:

	Ziel	Rahmen	Datum / Zeitraum
A: Weiterbildung/ Transfer der Projektergebnisse in die Industrie über FV/FS Fachveranstaltungen	Weiterbildung von Mitarbeitern von KMU ohne eigene Forschungskapazitäten	A1 Diskussionen bei Weiterbildungen, Vorträgen, Symposien	laufend
		A2 20. DAST-Forschungskolloquium Essen	9.3.2016
B: Gremienarbeit, Einbeziehung von Multiplikatoren	Der Leiter der FST ist aktives Mitglied in zahlreichen Gremien. Die aufgeführten Gremien tagen ca. 2- bis 3-mal pro Jahr, so dass die Ergebnisse bereits während der Laufzeit einer Vielzahl von Experten präsentiert bzw. diskutiert werden können.	B1 DAST	zweimal jährlich
B2 NA Bau – Lenkungsausschuss 08			
B3 VPI			
B4 Spiegelausschuss Eurocode 3-2			
C: Akademische Lehre und berufliche Weiterbildung	Vermittlung der Ergebnisse aus erster Hand an die Studierenden durch die enge Verzahnung von Forschung und Lehre	C1 Lehrtätigkeit an der TU Berlin	laufend
C2 Studentische Abschlussarbeiten		1xDiplom 2xMaster	
D: Projektbegleitender Ausschuss PA	Die Forschungsergebnisse sollen fortlaufend im PA ausführlich diskutiert werden.	D1 Vorstellung des Projektes und Diskussion der geplanten Arbeiten; Karlsruhe, 52. Sitzung	11.5.2015
		D2 Vorstellung der ersten Ergebnisse und Diskussion des weiteren Vorgehens ; Aachen, 53. Sitzung	20.11.2015
		D3 Aktueller Arbeitsstand und Diskussion des abschließenden Vorgehens ; Bielefeld, 55. Sitzung	11.11.2016

Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach Abschluss des Vorhabens:

	Ziel	Rahmen	Datum / Zeitraum
E: Weiterbildung/ Transfer der Projektergebnisse in die Industrie über FV/FS Fachveranstaltungen	Weiterbildung von Mitarbeitern von KMU ohne eigene Forschungskapazitäten	E1 TU -Forschungskolloquium	laufend
		E2 Studentische Abschlussarbeiten	1xMaster
F: Veröffentlichung	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	F1 Beitrag zum Tagungsband des 20. DAST-Forschungskolloquiums in Essen	März 2016
		F2 Dissertation	III/2017

		F3	Bericht auf der Homepage des FG Stahlbau der TU Berlin	IV. Quartal 2017
		F4	Beitrag im Stahlbau	2018
G: Transfer in die Industrie durch Verband	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	G1	Zusammenfassende Darstellung im Forschungsreport und Verbreitung durch die Forschungsvereinigung in Industrie	April 2017
H: Beratung der Industrie basierend auf erzielten Forschungsergebnissen	Maßgeschneiderter Transfer der Forschungsergebnisse in die Praxis	H1	Abschlusspräsentation beim AA „Verbundbau“, 57. Sitzung	November 2017
		H2	Einbringen der Ergebnisse in den AA „Verbundbau“ des BFS/DSTV	2018
		H3	Bei Bedarf weiterer Transfer der Ergebnisse in die betriebliche Praxis	laufend

Fakultät VI Planen Bauen Umwelt

Institut für Bauingenieurwesen

Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren - **Stahlbau**

Prof. Dr.-Ing. Karsten Geißler

Sekretariat TIB 1 - B 1

Raum 416

Gustav-Meyer-Allee 25

13355 Berlin

Telefon +49 (0)30 314-72120

Bericht 17-01

**Modell zur Erfassung der Rissbreiten bei durchlaufenden
Stahlverbundträgern mit Teil- und Ganzfertigteilen
(IGF 18257)**

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Matthias Mager

Technische Universität Berlin
Institut für Bauingenieurwesen
Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren - Stahlbau
Prof. Dr.-Ing. Karsten Geißler

April 2017

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	i
1 Einleitung.....	1
1.1 Problemstellung.....	1
1.2 Methodischer Ansatz und geplante Vorgehensweise	3
1.3 Anpassungen an der Vorgehensweise	4
2 Allgemeine Grundlagen	5
2.1 Materialeigenschaften	5
2.1.1 Baustoffe	5
2.1.2 Zeitabhängiges Verhalten des Betons.....	6
2.1.3 Verbund zwischen Beton und Bewehrung	9
2.2 Risstheorie	11
2.2.1 Phasen der Rissbildung.....	11
2.2.2 Geschlossene verbundorientierte Lösung	12
2.2.3 Empirische Lösung mit gemittelten Werten	15
2.3 Anwendung für herkömmliche Verbundträger	20
2.3.1 Erstriss	20
2.3.2 Fortschreitende Erstrissbildung	21
2.3.3 Abgeschlossene Erstrissbildung.....	23
2.3.4 Berücksichtigung des Schwindens	24
2.3.5 Momenten-Krümmungsbeziehung.....	25
3 Versuche	27
3.1 Versuchskonzept.....	27
3.2 Versuche an Teilfertigteilträgern.....	31
3.2.1 Belastungsversuche	31
3.2.2 Eigenspannungen.....	39
3.3 Versuche an Ganzfertigteilträgern	42
3.3.1 Belastungsversuche	42
3.3.2 Eigenspannungen.....	45
4 Teilprobleme.....	47
4.1 Allgemeines	47
4.2 Teilfertigteile	48
4.2.1 Zustand I/II	48
4.2.2 Kerbwirkung	48
4.2.3 Eigenspannungen.....	49
4.3 Ganzfertigteile	50

4.3.1	Sammelrissbildung	50
4.3.2	Eigenspannungen.....	51
5	Berechnungsmodell	52
5.1	Anforderungen	52
5.2	Berechnungsmodell für Verbundträger mit Teilfertigteilen	52
5.3	Berechnungsmodell für Verbundträger mit Ganzfertigteilen	54
6	Parameteruntersuchungen	57
6.1	Teilfertigteile	57
6.2	Ganzfertigteile	58
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	59
	Literaturverzeichnis.....	61
Anhang A	Versuchsaufbau und -durchführung	63
Anhang B	Momenten-Krümmungsbeziehungen	70
Anhang C	Rissbreiten	76
Anhang D	Rissbilder	81

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Die Vorteile des Verbundbaus sind allgemein bekannt und zeigen sich besonders bei einfeldrigen Systemen, bei denen Druck im Beton und Zug im Stahlträger entsteht. Die Erweiterung auf durchlaufende Systeme und Rahmentragwerke, wie es im Brückenbau aus rein systemimmanenten Anforderungen und im Hochbau zur Reduzierung der Feldmomente nötig ist, führt zu Zugbeanspruchungen des Betongurtes und im Regelfall zur Rissbildung.

Diese ist im Rahmen der Bemessung unmittelbar durch die rechnerischen Nachweise der Rissbreitenbegrenzung zu verfolgen sowie auch mittelbar bei der Berechnung von Verformungen und Schnittkräften. Für herkömmliche Stahlverbundträger mit reiner Ortbetonplatte ist das Betonverhalten bei Zugbeanspruchung seit Jahrzehnten ausreichend bekannt und kann mit einigen verbundträgerspezifischen Anpassungen durch das für Stahlbetontragwerke hergeleitete Rechenmodell *Erstrissbildung – abgeschlossene Erstrissbildung* erfahrungsgemäß sehr gut abgebildet werden.

Durch die Verwendung von Fertigteilen in Stahlverbundträgern lassen sich die bekannten Vorteile der Fertigteilbauweise für den Verbundbau ausnutzen. Aufgrund der werkseitigen Herstellung und der Trennung der Bauvorgänge können Bauzeit, Qualität und Materialeigenschaften verbessert und so die Baukosten verringert werden. Anwendungsgebiete liegen dabei sowohl im Hochbau, beispielsweise bei Parkhäusern, als auch im Brückenbau. Die Erfahrungen bei der Verwendung von Fertigteilen in Verbundträgerkonstruktionen reichen mehrere Jahrzehnte zurück. Aus der konstruktiven Anforderung, die Fertigteile mittels geeigneter Herstellungs- und Montageverfahren schubfest mit dem Stahlträger zu verbinden, haben sich dabei verschiedene Bauweisen entwickelt. Grundsätzlich kann dabei nach

- Art der Fertigteile (Teilfertigteile, Ganzfertigteile),
- Zeitpunkt des Verbundes (nachträglicher Verbund, sofortiger Verbund),
- Art des Verbundes (starrer Verbund, löslicher Verbund)

unterschieden werden. Die wichtigsten Bauweisen sind

- Teilfertigteile mit Aufbeton; der Verbund zwischen Teilfertigteil (TFT) und Stahlträger wird nachträglich durch die Ortbetonergänzung hergestellt,
- VFT-Träger; Sonderfall des Teilfertigteilträgers, bei denen die Fertigteile bereits im Werk auf den Stahlträger aufbetoniert werden,
- Preflexträger; Doppelverbundträger mit werkseitiger Vorspannung des kammerbetonierten Unterflansches,
- Ganzfertigteilträger; der Verbund zwischen Ganzfertigteil (GFT) und Stahlträger wird nachträglich durch die Ortbetonergänzung in den Fugen hergestellt; Varianten mit löslichem Verbund durch HV-Schrauben existieren (eher historisch).



Abb. 1-1: Fertigteile in Verbundträgern [11]

Der Entwurf wird wesentlich durch die Abmessungen der Fertigteilelemente bestimmt. Bedingt durch Konstruktion, Herstellung, Transport und Montage sind die Abmessungen der Fertigteile begrenzt. Die Begrenzungsflächen schneiden daher in die Kubatur des Verbundträgergurtcs ein. Damit Fertigteile und Ortbetonergänzung im Endzustand planmäßig zusammen wirken, müssen die Beanspruchungen des Betongurtcs über die Begrenzungsflächen der Fertigteile übertragen werde. Das lokale Tragverhalten dieser Fugenbereiche muss somit gesondert beschrieben werden. Entsprechend der Orientierung im lokalen Koordinatensystem des Verbundträgers sind – in Ergänzung zur Verbundfuge zwischen Betongurt und Stahlträger - die folgenden Fugenarten zu beachten:

- Längsfuge in der x-z-Ebene (parallel zur Haupttragrichtung),
- Querfuge in der y-z-Ebene (quer zur Haupttragrichtung),
- Verbundfuge in der x-y-Ebene (in Dickenrichtung zwischen TFT und Ortbeton).

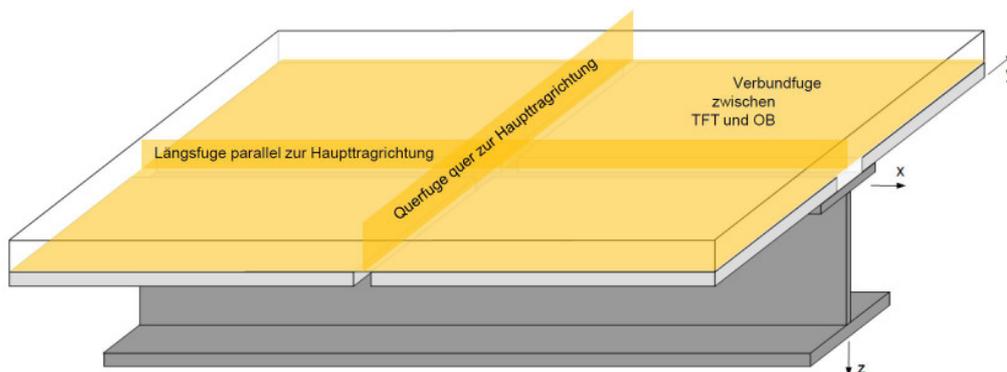


Abb. 1-2: Teilfertigteilträger mit Fugenbereichen [13]

Aus der Analyse der Voraussetzungen für die Anwendung des herkömmlichen Rechenmodells und der fertigteilspezifischen Besonderheiten ergeben sich diverse offene Fragestellungen. Bislang gab es keine allgemeingültigen Untersuchungen, ob und in welcher Form sich Fertigteilverbundträger im Innenstützenbereich von herkömmlichen

Verbundträgern unterscheiden und mit den bekannten Rechenmodellen ausreichend sicher beschrieben werden können. Die Klärung dieser Fragestellungen war Anlass für das hier beschriebene Forschungsvorhaben.

1.2 Methodischer Ansatz und geplante Vorgehensweise

Der methodische Ansatz zur grundsätzlichen Erfassung der Problematik bestand darin, in mehreren Bauteilversuchen sowie durch Messungen an Bauwerken die Entwicklung der Spannungen am Verbundträgerquerschnitt zeitlich durchgängig über den gesamten Herstellungs- und Belastungsverlauf zu erfassen. Hierfür wurde ein Versuchsprogramm entwickelt, mit dem für insgesamt zwölf Teil- und Ganzfertigteilträger in unterschiedlichen Konstruktionsvarianten die Rissbildung und der zugehörige Beanspruchungszustand unter schrittweise gesteigerter äußerer Lastaufbringung dokumentiert werden konnte. Zusätzlich wurden für den Zeitraum zwischen Herstellung und Lastaufbringung auch die Eigenspannungen infolge verhinderter Schwinddehnungen und abfließender Hydratationswärme erfasst.

In die Konzeption des Versuchs- und Messprogramms flossen Erfahrungen aus den in den Jahren 2012 und 2013 durchgeführten Vorversuchen [4], [19] ein. Erfahrungen und Erkenntnisse während der Versuchsdurchführung wurden unmittelbar berücksichtigt und die entsprechenden Anpassungen für das weitere Versuchsprogramm umgesetzt.

Folgende Fragen waren dabei zu beantworten:

1. Für TFT und GFT: Wann tritt der Erstriss auf und wann ist das Rissbild abgeschlossen? Gibt es eine Abhängigkeit zum Fertigteilanteil an der maßgebenden Querfuge?
2. Für TFT: Bei welcher Stahlspannung unter Berücksichtigung einer Teilvorspannung durch abfließende Hydratationswärme nach Betonieren des Ortbetons und behinderter Dehnung am Übergang Ortbeton zu Fertigteil tritt die Erstrissbildung auf? Ist dieser zunächst günstige Effekt rechnerisch zu beachten?
3. Für TFT und GFT: Wie verteilen sich die Risse abhängig vom Fertigteilgrad? Wie groß ist die Gefahr eines Sammelrisses an der Querfuge von Ganzfertigteilen, und mit welcher Rissbreite ist dieser verbunden? Kann beziehungsweise muss man diesen Sammelriss mit einem ‚Modell mit örtlicher Umlagerung‘ rechnerisch erfassen?

Die weitere Vorgehensweise sah nach der Auswertung der Trägerversuche den Vergleich mit dem mechanischen Urmodell [7] und im Idealfall bei entsprechender Übereinstimmung die Erweiterung des Modells um den Einfluss der Fertigteile und die Anwendung auf die Versuche vor. Anschließend sollten weitere Einflussgrößen, die im Rahmen der Versuche nicht variiert werden konnten, in einer Parameterstudie systematisch untersucht werden.

Nach einer weiteren Verifizierung des Modells durch Vergleich mit den Ergebnissen von Bauwerksmessungen und einer Zusammenführung der Ergebnisse sollte abschließend ein praxistauglicher Vorschlag für ein erweitertes Bemessungsmodell formuliert werden.

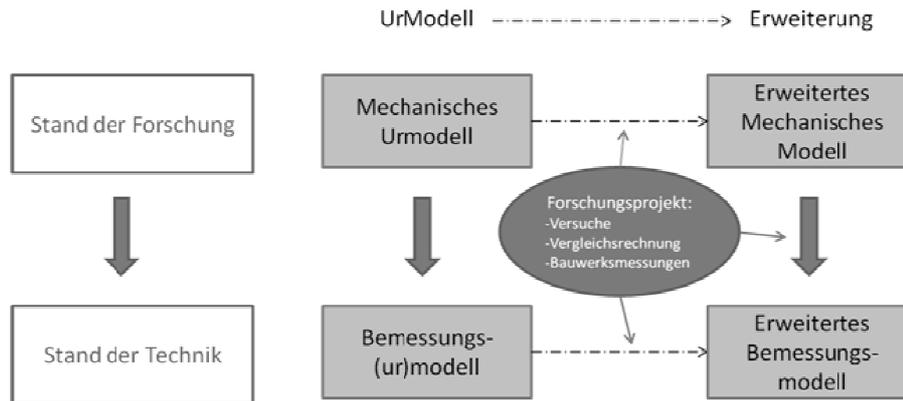


Abb. 1-3: Methodischer Ansatz und Vorgehensweise [5]

1.3 Anpassungen an der Vorgehensweise

Im Zuge der Durchführung der Trägerversuche und der ersten Auswertungen wurde offensichtlich, dass die – als Idealfall anzusehende – Erweiterung des mechanischen Urmodells nicht in einfacher Form umgesetzt werden kann. Für die weitere Betrachtung waren die folgenden Erkenntnisse zu berücksichtigen:

1. Teil- und Ganzfertigteilträger stellen grundsätzlich unterschiedliche Bauweisen dar. Der Ganzfertigteilträger kann nicht als Teilfertigteilträger mit einem Teilfertigungsgrad von 100 % betrachtet werden. Für alle Betrachtungen muss zwischen den beiden Bauweisen differenziert werden.
2. Die Fugenbereiche (F-Bereiche) sind wie erwartet die markanten Stellen. Allerdings bedürfen auch die Bereiche außerhalb des Einflusses der Fugen – s. g. K-Bereiche – einer gesonderten Beschreibung. Dieser Effekt ist insbesondere für Teilfertigteilträger zu beachten.
3. Zwischen der Rissbildung in F- und K-Bereichen bestehen Wechselwirkungen, die für die Beschreibung des mittleren Bauteilverhaltens berücksichtigt werden müssen.
4. Zur Berücksichtigung des Einflusses von Eigenspannungen muss sowohl die Beanspruchung auf der Querschnittsebene als auch das lokale hygroskopische Verhalten beschrieben werden.

Zur Beschreibung der genannten Aspekte waren ergänzende Analysen und Untersuchungen erforderlich, die teilweise über das ursprünglich skizzierte Arbeitsprogramm hinausgehen. Derzeit laufen letzte abschließende Berechnungen zu diesen Fragestellungen, deren Ergebnisse teilweise noch ausstehen. Der vorliegende Bericht dokumentiert den momentanen Stand. Die abschließende Dokumentation erfolgt im Zuge einer Dissertationsschrift [14]. Die Veröffentlichung ist für das dritte Quartal 2017 geplant.

Die geplanten Bauwerksmessungen konnten zwar vorbereitet werden. Eine gezielte Auswertung mit Hinblick auf die identifizierten Fragestellungen ließ sich jedoch nicht realisieren.

2 Allgemeine Grundlagen

2.1 Materialeigenschaften

Die Beschreibung der Rissbildung in Stahlbeton- und Stahlverbundkonstruktionen ist vor allem von den Materialeigenschaften des Betons abhängig. Zunächst erfolgt daher eine kurze Beschreibung der maßgeblichen Eigenschaften. Eine ausführliche Darstellung kann [14] entnommen werden.

2.1.1 Baustoffe

Die Verbundpartner unterscheiden sich in den einzelnen Materialkennwerten zum Teil deutlich. Für die Berechnung in den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit (GZG) ist vor allem der unterschiedliche Elastizitätsmodul von Stahl und Beton zu beachten. Für die elastische Berechnung können die Querschnittswerte des Betons durch Bezug auf den E-Modul des Stahls reduziert und so in einen äquivalenten Stahlquerschnitt umgerechnet werden. Der Index ‚0‘ verweist auf das Betonalter bei Belastungsbeginn. In gleicher Weise kann auch die Differenzierung zwischen Bau- und Betonstahl berücksichtigt werden.

$$n_0 = \frac{E_a}{E_c} \quad (2.1)$$

$$n_{st} = \frac{E_a}{E_s} \quad (2.2)$$

Ein weiteres wesentliches Merkmal ist die Zugfestigkeit des Betons. Im zugbeanspruchten Beton führt die im Vergleich zur Druckfestigkeit signifikant geringere Zugfestigkeit bereits im niedrigeren Gebrauchslastniveau zur Rissbildung und damit zum zunehmenden Verlust der Steifigkeit. Das Bauteilverhalten des zugbeanspruchten Betons kann somit nur sehr eingeschränkt durch die Steifigkeiten im ungerissenen Zustand beschrieben werden. Das Versagen des Betons im Riss stellt jedoch im eigentlichen Sinne kein Querschnittsversagen dar, sondern vielmehr den definierten Übergang des Verbundwerkstoffs Stahlbeton vom ungerissenen in den gerissenen Zustand. Die Zugfestigkeit kann für normalfeste Betone durch die von *Heilmann* [8] formulierte Korrelation zwischen Druck- und Zugfestigkeit beschrieben werden.

$$f_{ctm} = 0,30 \cdot f_{ck}^{2/3} \quad (2.3)$$

Für die wirklichkeitsnahe Erfassung des Trag- und Verformungsverhaltens im Grenzzustand der Tragfähigkeit muss die Mitwirkung des Betons zwischen den Rissen zutreffend beschrieben werden. Im Rissquerschnitt findet zunächst eine vollständige Umlagerung der Betonbeanspruchung auf den Betonstahl statt. Infolge der Verbundwirkung (vgl. 2.1.3) wird der Beton mit zunehmendem Abstand zum Riss jedoch wieder am Lastabtrag beteiligt, so dass die Stahlspannung im Mittel über mehrere Riss stets kleiner ist als im Rissquerschnitt. Dieser als Mitwirkung des Betons auf Zug zwischen den Rissen oder einfacher Zugversteifung bezeichnete wichtige und nachfolgend noch ge-

nauer zu beschreibende Mechanismus kann vereinfachend durch eine modifizierte Arbeitslinie des Betonstahls berücksichtigt werden.

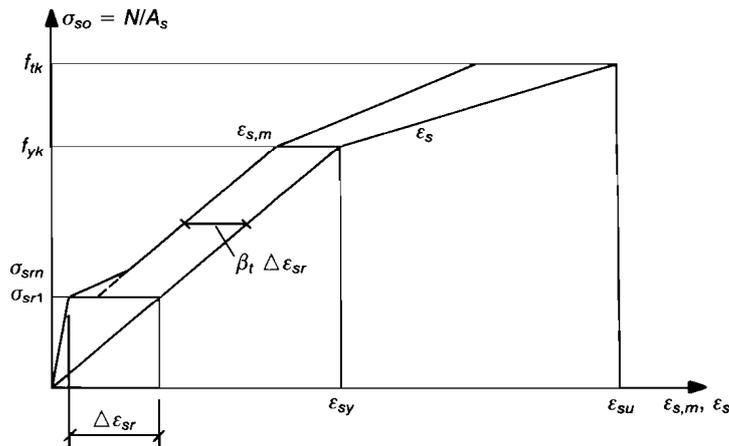


Abb. 2-1: Modifizierte Arbeitslinie des Betonstahls [1]

Schließlich muss auf die große Streuung der Betonkennwerte Bezug genommen werden. Die Verteilung der Betonzugfestigkeit unterliegt einer Normalverteilung. Der Variationskoeffizient kann unabhängig von der Betongüte konstant mit 0,20 angenommen werden. Für die Modellbildung ist daher zu prüfen, ob eine Anwendung analytisch exakter Berechnungsansätze sinnvoll und erforderlich ist, oder ob ggf. auch Näherungsansätze angewendet werden können.

2.1.2 Zeitabhängiges Verhalten des Betons

Verformungskomponenten

Der Beanspruchungszustand eines Bauteils kann zweckmäßig durch seine Verformungen beschrieben werden. Die Gesamtdehnung eines unter konstanter (Druck-)beanspruchung stehenden Stahlbetonquerschnittes kann nach Gleichung (2.4) in die Anteile elastische Dehnung, Schwinddehnung und Kriechdehnung sowie Temperaturdehnung zerlegt werden.

$$\epsilon_c(t) = \epsilon_{ci}(t_0) + \epsilon_{cs}(t, t_s) + \epsilon_{cc}(t, t_0) + \epsilon_{cT}(t) \quad (2.4)$$

Hinsichtlich der Ursachen kann zwischen lastunabhängigen – Schwinden und Temperatur – und lastabhängigen – elastische Verformung und Kriechen – unterschieden werden. Für die Beschreibung des Dehnungszustandes auf Querschnitts- und Bauteilebene sind vor allem Schwinden und Kriechen relevant.

Schwinden

Unter Schwinden versteht man eine lastunabhängige Volumenverminderung des Betons, die zu einer Verkürzung in allen Richtungen führt. Nach dem Zeitpunkt des Auftretens lassen sich die vier Schwindkomponenten Kappilarschwinden, Schrumpfen, Trocknungsschwinden und Karbonatisierungsschwinden unterscheiden. Die beiden maßgebenden Komponenten sind das Schrumpfen oder auch Grundschwinden genannt und das Trocknungsschwinden infolge einer Austrocknung des Bauteils.

Das Grundschrumpfen ist als chemischer Prozess weitgehend unabhängig von den Umgebungsbedingungen verläuft und erreicht seinen Endwert relativ schnell. Hingegen wird das Trocknungsschrumpfen maßgeblich durch die Umgebungsbedingungen und die Bauteilgeometrie beeinflusst. Die Bauteilgeometrie wird für die Bestimmung des Trocknungsschrumpfmaßes durch die Angabe einer wirksamen Bauteildicke h_0 erfasst, die das Verhältnis zwischen Volumen und Oberfläche und somit den Weg beim Feuchte-transport vom Bauteilinneren in die Umgebung beschreibt.

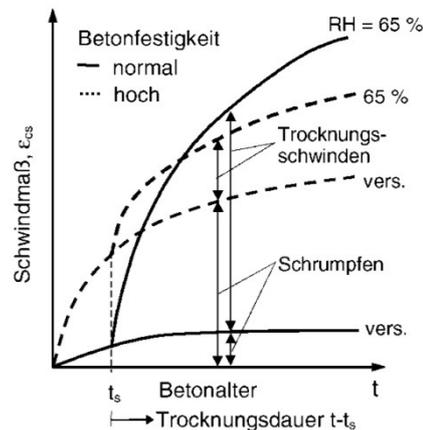


Abb. 2-2: Zeitlicher Verlauf des Schwindens [16]

Am Stahlbetonquerschnitt wird das Schrumpfen durch die Bewehrung verhindert, so dass ein primärer Eigenspannungszustand mit Zug im Beton und Druck im Stahl entsteht. Unsymmetrische Querschnitte mit lagenweise unterschiedlicher Bewehrung erfahren durch den Versatz zwischen den Schwindkräften am Beton und am Verbundquerschnitt eine zusätzliche Biegebeanspruchung. Für Verbundträger ist das stets der Fall. Die Bilanzierung kann mit dem in Abb. 2-3 dargestellten Schwindmodell erfolgen.

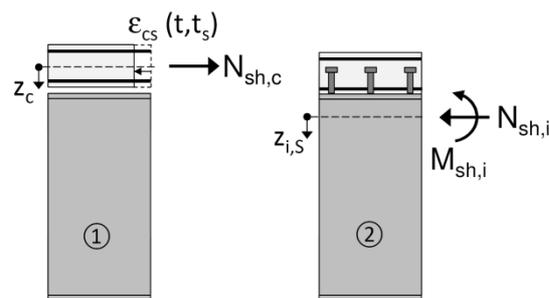


Abb. 2-3: Modell zur Bestimmung der primären Schwindbeanspruchungen [14]

Im ersten Schritt ist der Betongurt losgelöst vom Stahlträger und kann sich somit gegenüber diesem um das freie Schwindmaß ϵ_{cs} verkürzen. Diese Unverträglichkeit wird durch Aufbringen einer Schwindnormalkraft $N_{sh,c}$ auf den Betongurt repariert. Im zweiten Schritt wird nun der Betongurt gedanklich mit dem Stahlträger verdübelt. Das Gleichgewicht der inneren Kräfte muss gewahrt bleiben. Somit wird die Festhaltekraft im Betongurt mit einer gleichgroßen Kraft $N_{sh,i}$ umgekehrten Vorzeichens auf den Verbundquerschnitt überlagert. Aus dem Versatz der Wirkungslinien der beiden Normalkräfte resultiert weiterhin ein Moment $M_{sh,i}$, welches ebenfalls auf den Verbundquerschnitt wirkt.

$$N_{sh,c} = -\varepsilon_{cs}(t, t_s) \cdot E_a \cdot \frac{A_c}{n_s} = -N_{sh,i} \quad (2.5)$$

$$M_{sh,i} = -N_{sh,c} \cdot z_{i,c,s} \quad (2.6)$$

An statisch unbestimmten Tragwerken führt die Verhinderung der Schwinddehnungen zusätzlich zu Zwängungen (sekundäre Eigenspannungen) und damit zu Schnittgrößen. Der Grad der Schwindverhinderung steht in unmittelbarem Zusammenhang zum Grad der Rissbildung. Im Riss löst sich der primäre Eigenspannungszustand vollständig auf. Die frei werdenden Schwinddehnungen sind dann bei der Berechnung der Rissbreiten zu berücksichtigen.

Kriechen

Unter dem Kriechen des Betons versteht man die zeitliche Zunahme der Dehnung bei konstanter dauerhafter Belastung. Kriechen ist damit zeit- und lastabhängig. Die Ursache liegt überwiegend im Kriechen des Zementsteins infolge von Umlagerungsvorgängen der im Zementstein eingebundenen Wassermoleküle. Ähnlich wie beim Schwinden kann zwischen den beiden Anteilen Grundkriechen und Trocknungskriechen unterschieden werden.

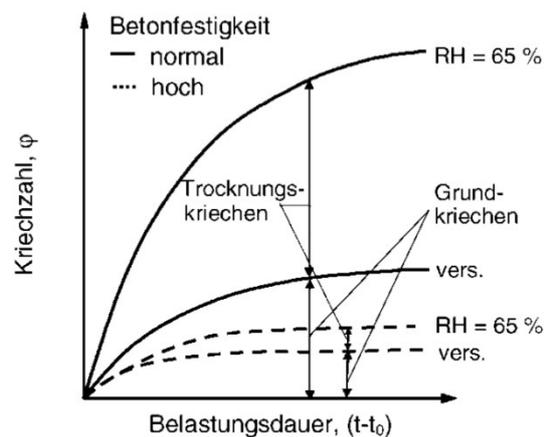


Abb. 2-4: Zeitlicher Verlauf des Kriechens [16]

Die verzögerte elastische Verformung infolge des Kriechens wird beim Verbundträger durch den Stahlteil behindert und führt infolge der Verträglichkeitsforderung somit zu einer zeitabhängigen teilweisen Umlagerung der Beanspruchung von der Betonplatte auf den Stahlträger. Hierdurch wird ein primärer Eigenspannungszustand erzeugt. Bei (äußerlich) statisch unbestimmten Systemen führen die Kriechverformungen zusätzlich zu Zwängungen (sekundäre Eigenspannungen) und damit zu Schnittgrößen, die wiederum neue Kriechdehnungen hervorrufen.

Für die elastische Tragwerksberechnung existieren verschiedene Berechnungsmethoden, die den Einfluss des Kriechens in unterschiedlicher Weise abbilden. In der Praxis kommen überwiegend zwei gleichwertige Verfahren zur Anwendung: das Teilschnittgrößenverfahren und das Gesamtquerschnittsverfahren.

Das Berechnungsverfahren mit Teilschnittgrößen wurde von *Sattler* [18] in zusammengefasster Form beschrieben. Die Teilschnittgrößen setzen sich aus den beanspruchungsinduzierten Verteilungsgrößen und den kriechinduzierten Umlagerungsgrößen zusammen. Die Umlagerungsgrößen werden dabei direkt berechnet.

Für das Gesamtquerschnittsverfahren, dass vor allem mit der Arbeit von *Haensele* [6] verknüpft ist, wird die verzögerte elastische Verformung des Betons durch einen 'fiktiven Beton-Formänderungsmodul' bei der Berechnung der Gesamtquerschnittswerte erfasst. Beide Verfahren weisen spezifische Vorteile auf. Das Verfahren mit Teilschnittgrößen ist analytisch klarer, da die Beanspruchungen den einzelnen Verbundpartnern zugewiesen werden können. Das ist insbesondere von Vorteil, wenn für spezifische Fragestellungen, wie beispielsweise der Berechnung der Rissbreiten, die Beanspruchungen in Querschnittsteilen oder Baustoffen herausgelöst werden sollen. Das Gesamtquerschnittsverfahren hingegen ist mechanisch einfacher, da Spannungen und Verformungen unmittelbar aus der Gesamtschnittgröße bestimmt werden können. Da auch der Einfluss des Kriechens sehr viel einfacher erfasst werden kann, ist es daher für die Anwendung in der Praxis von größerer Bedeutung.

2.1.3 Verbund zwischen Beton und Bewehrung

Die Grundidee der Stahlbetonbauweise besteht in einer schubfesten Verbindung zwischen Beton und Bewehrung und somit einer Dehnungsgleichheit der Verbundpartner. Diese Verträglichkeitsbedingung gilt natürlich nur näherungsweise, bildet aber in Form der Bernoulli-Hypothese die Grundlage der linearen Elastizitätstheorie. Aufgrund der geringen Zugfestigkeit des Betons bilden sich schon unter geringer Zugbeanspruchung Risse heraus und es kommt zu Relativverschiebungen zwischen Stahl und Beton. Im Riss findet eine vollständige Umlagerung der Betonspannungen auf den Stahl statt. Gleichzeitig werden durch die Relativverschiebungen Schubspannungen zwischen Beton und Stahl aktiviert, die bewirken, dass der Beton mit zunehmendem Abstand vom Riss wieder am Lastabtrag beteiligt wird. Dieses Verhalten wird allgemein als Verbund bezeichnet und beschreibt das Tragverhalten einbetonierter Stäbe im Bereich von Verankerungen, Übergreifungen, Lasteinleitungen, bei zeitabhängigen Betonverformungen und vor allem bei der Rissbildung.

Die Verbundwirkung beruht auf den drei Mechanismen Haftverbund, Reibung und Scherverbund. Bei profilierten Betonstählen dominiert der Scherverbund infolge der mechanischen Verzahnung der Betonstahlrippen mit den schrägen Betonkonsolen. Die Verbundwirkung hängt von einer Vielzahl von Einflussfaktoren wie beispielsweise Betongüte, Stabprofilierung oder Lage der Bewehrungsstäbe ab. Der Zusammenhang zwischen Verbundwirkung und Relativverschiebung kann durch so genannte Verbundgesetze mathematisch beschrieben werden. Die Bestimmung erfolgt experimentell an Auszieh- oder Dehnproben. Es lässt sich stets nur ein Teil der Einflussfaktoren berücksichtigen. Auch existieren unterschiedliche Verfahrensweisen zur Ableitung der Verbundwirkung aus den Versuchsergebnissen, so dass eine Vielzahl von Formulierungen existiert, die sich quantitativ zum Teil deutlich unterscheiden. Qualitativ entsprechen jedoch die meisten Verbundgesetze der allgemeinen Form

$$\tau_s(x) = C \cdot f_c^\beta \cdot s(x)^\alpha \quad (2.7)$$

mit der Proportionalitätskonstante C und dem Exponenten α als Verbundparametern. Damit lassen sich für definierte Verbundbedingungen die Verbundspannungen in Abhängigkeit der Relativverschiebungen schreiben.

Die Rissbildung des Betons bei Überschreiten der Zugfestigkeit führt entlang der Riss-einflusszone zu Relativverschiebungen zwischen Stahl und Beton und damit zu Umlagerungen der inneren und äußeren Kräfte. Zur Veranschaulichung der Gleichgewichtsbeziehung dient das in Abb. 2-5 dargestellte differentielle Verbundelement. Die Gleichgewichtsbedingung besagt, dass sowohl die Änderung der auf den Stahlquerschnitt wirkenden Stahlkräfte als auch die Änderung der auf den Betonquerschnitt wirkenden Betonkräfte über die auf der Mantelfläche des differentiellen Betonelements wirkenden Verbundspannungen ausgedrückt werden kann.

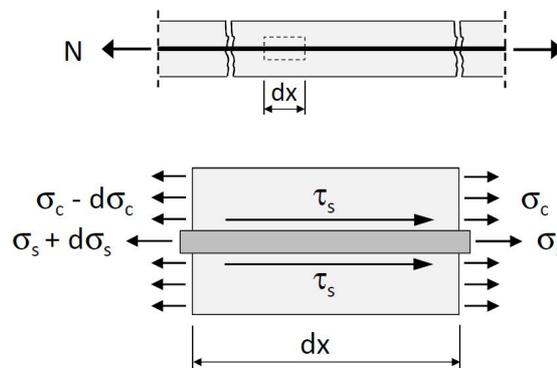


Abb. 2-5: Verbundelement und Gleichgewichtsformulierung [14]

Nach Ausformulieren, Ableiten und Umformen ergibt sich die nachstehende Formulierung für die so genannte Differentialgleichung des verschieblichen Verbundes.

$$\frac{d^2s}{dx^2} = \frac{1+\rho_s \cdot n_0}{E_s} \cdot \frac{4}{d_s} \cdot \tau_s(x) \quad (2.8)$$

Mit der Lösung dieser nicht-linearen Differentialgleichung zweiter Ordnung und den entsprechenden Ableitungen können die Verläufe für den Schlupf s , die Spannungen s' und die Verbundspannung s'' über die Stablänge geschlossen angegeben werden. Für die in [9] hergeleitete und in [7] erweiterte Rissbreitentheorie wird auf das Verbundgesetz nach *Martin/Noakowski/Janovic* zurückgegriffen. Der Vorteil liegt in der einfachen mathematischen Formulierung, mit der unterschiedliche Verbundbedingungen durch die Verbundparameter A und N erfasst werden. Als Lösung erhält man dann

$$s(x) = \left[\frac{2 \cdot (1 + \rho_s \cdot n_0)}{E_s \cdot d_s} \cdot A \cdot \beta_w \cdot \frac{(1-N)^2}{1+N} \right]^{\frac{1}{1-N}} \cdot x^{\frac{2}{1-N}} \quad (2.9)$$

mit $A = 0,58$ (0,60) für normalen (guten) Verbund

$N = 0,30$ (0,20) für normalen (guten) Verbund

2.2 Risstheorie

2.2.1 Phasen der Rissbildung

Vor dem Einstieg in die eigentliche Risstheorie muss zunächst eine begriffliche Einordnung für die einzelnen Phasen der Rissbildung vorgenommen werden. Sowohl für die Bezeichnung als auch die Berücksichtigung der einzelnen Rissbildungsphasen existieren unterschiedliche ‚Auffassungen‘. Vielfach wurde und wird nur grob zwischen den beiden Risszuständen Einzelriss und abgeschlossenes Rissbild unterschieden, wobei die Rissbreite des Einzelrisses als maßgebend für Zwang und die des abgeschlossenen Rissbildes als maßgebend für Last angesehen wird. Diese Einteilung ist mit Hinblick auf die praktische Anwendbarkeit in halbempirischen oder empirischen Risstheorien durchaus nachvollziehbar. Andererseits kann für die analytische Betrachtung der Rissbildung weder zwischen Last und Zwang noch zwischen Einzelriss und abgeschlossenem Rissbild unterschieden werden, sondern muss vielmehr fallweise das konkrete Beanspruchungsniveau berücksichtigt werden.

Durch *Krips* [9] wurde auf Grundlage von [17] ein Lösungsansatz entwickelt, mit dem die klare Trennung aufgehoben wird und die Rissbreiten in allgemeiner Form in Abhängigkeit der Erstrissbreite und mit Berücksichtigung des Beanspruchungsniveaus und des Rissabstandes angegeben werden können. Im allgemeinen Sprachgebrauch werden die Phasen der Rissbildung im Regelfall mit Zustand I - Erstrissbildung - abgeschlossene Rissbildung bezeichnet. Dabei werden als Erstrisse jene Risse angesehen, die sich in Bereichen bis dahin noch ungestörten Verbundes ausbilden. Dabei muss zwischen dem primären Erstriss am bis dahin noch ungerissenen Querschnitt und späteren Erstrissen, für die dann bereits der Einfluss des primären Erstrisses auf das mittlere Bauteilverhalten zu beachten ist, unterschieden werden. Hier kann dann weiterhin zwischen benachbarten Rissen und Rissen ohne gegenseitige Beeinflussung unterschieden werden. Entscheidend ist der Rissabstand und somit die Frage, ob sich die Einleitungslängen benachbarter Risse überschneiden.

Die Erstrissbildung ist prinzipiell abgeschlossen, wenn kein ungestörter Verbund mehr vorliegt. Für die praktische Anwendung wird dieser Zusammenhang in guter Näherung durch den 95%-Quantilwert der Betonzugfestigkeit beschrieben. Die Gleichsetzung des Abschlusses der Erstrissbildung mit der abgeschlossenen Rissbildung stellt für die praktische Anwendung eine brauchbare Näherung dar, da oberhalb des Erstrissniveaus zumindest unter Gebrauchslasten kaum noch weitere Risse auftreten. Die Gleichsetzung ist in erster Linie auf die häufige Verwendung eines starr-plastischen Verbundgesetzes, d. h. konstante mittlere Verbundspannungen in der klassischen Risstheorie zurückzuführen. Die Bildung weiterer Risse oberhalb des Erstrissniveaus in Bereichen gestörten Verbundes kann dann nicht beschrieben werden. Das tatsächliche Verbundverhalten ermöglicht aber bei weiter ansteigenden Relativverschiebungen ein Anwachsen der Verbundkräfte und somit das Erreichen der Betonzugfestigkeit auch in Bereichen gestörten Verbundes. Dies führt zur fortschreitenden Teilung der vorhandenen Erstrisse in Rissabstandsmitteln, der s. g. sukzessiven Risstheilung [9]. Für die nachfolgenden Erläuterungen werden die in Abb. 2-6 gewählten Bezeichnungen Erstrissbildung - fortschreitende Erstrissbildung - abgeschlossene Erstrissbildung verwendet.

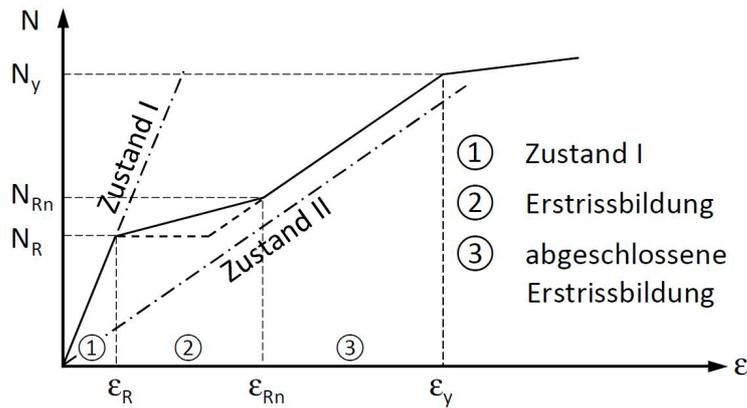


Abb. 2-6: Phasen der Rissbildung [14]

2.2.2 Geschlossene verbundorientierte Lösung

Die Differentialgleichung des verschieblichen Verbundes bildet die Grundlage für die geschlossene stetige Ermittlung der Rissbreiten und die Beschreibung des mittleren Bauteilverhaltens. Die Vorgehensweise geht im Wesentlichen auf *Noakowski* [17] zurück. Durch *Krips* [9] wurden die Ansätze konsequent weitergeführt und dabei eine weitgehend geschlossene mathematische Formulierung vorgenommen, mit der die Rissbildung in allgemeingültiger Form und ohne frühzeitige Vereinfachungen oder empirische Anpassung an Versuchsergebnisse ausgehend vom Erstriss beschrieben werden kann.

Erstrisszustand

Mit der Lösung der Differentialgleichung des verschieblichen Verbundes kann der in Abb. 2-7 dargestellte Zusammenhang zwischen der Rissbildung und dem Verlauf der Stahl- und Betonspannungen beschrieben werden.

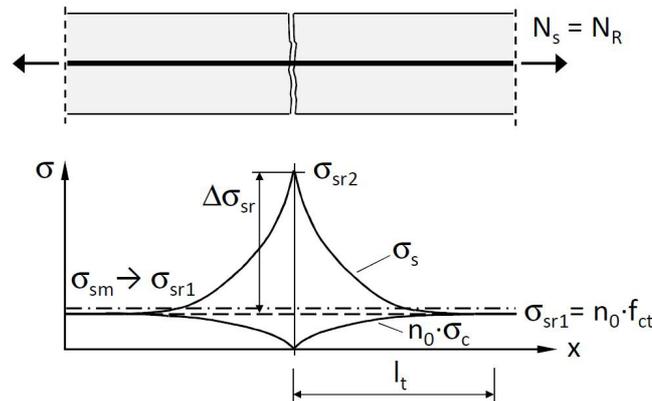


Abb. 2-7: Spannungen im Bereich des Erstrisses [14]

$$\sigma_s(x) = \sigma_{sr1} + \frac{ds}{dx} \cdot \frac{E_s}{1 + \rho_s \cdot n_0} \quad (2.10)$$

Der Spannungssprung $\Delta\sigma_{sr}$ beschreibt die Differenz zwischen der Stahlspannung σ_{sr2} im Riss unter Erstrissbeanspruchung und der Stahlspannung σ_{sr1} im ungestörten Verbundbereich. Er kann aus der Umlagerung der Betonspannungen bestimmt werden.

$$\Delta\sigma_{sr} = \sigma_{sr2} - \sigma_{sr1} = \frac{\sigma_{sr2}}{1 + \rho_s \cdot n_0} \quad (2.11)$$

Der Abstand vom Riss, in dem sich das Bauteil wieder vollständig im Zustand I befindet, wird als Einleitungslänge l_t bezeichnet. Sie beschreibt den verschiebungswirksamen, das heißt für die Bestimmung der Rissbreiten relevanten Bereich gestörten Verbundes. Sie kann aus den Randbedingungen für den Verlauf der Stahlspannungen abgeleitet werden.

$$\sigma_s(x = l_t) = \sigma_{sr2} \quad (2.12)$$

$$l_t = \frac{2}{1-N} \cdot \left[\left(\frac{E_s}{\sigma_{sr2}} \right)^N \cdot \Delta\sigma_{sr} \cdot \frac{1+N}{A \cdot \beta_w} \cdot \frac{d_s}{8} \right]^{\frac{1}{1+N}} \quad (2.13)$$

Damit kann die Erstrissbreite aus dem zweifachen Wert der Verschiebung am Ende der Einleitungslänge – d. h. durch Addition der Verschiebungen an den beiden Rissufern – bestimmt werden.

$$w_r = 2 \cdot s(x = l_t) = 2 \cdot \left[\frac{\sigma_{sr2}}{E_s} \cdot \Delta\sigma_{sr} \cdot \frac{1+N}{A \cdot \beta_w} \cdot \frac{d_s}{8} \right]^{\frac{1}{1+N}} \quad (2.14)$$

Das mittlere Bauteilverhalten kann unter Berücksichtigung der Mitwirkung des Betons zwischen den Rissen durch die mittlere Stahlspannung in der Risseinflusszone ausgedrückt werden.

$$\sigma_{sm,r} = \frac{1}{l_t} \cdot \int_0^{l_t} \sigma_s(x) dx = \sigma_{sr2} - \frac{1+N}{2} \cdot \Delta\sigma_{sr} \quad (2.15)$$

Mit den Verbundparametern aus Gleichung (2.9) ergibt sich ein Anteil der Betonmitwirkung von rund 0,6.

Fortschreitende Erstrissbildung – Einzelrisse

Wird die Beanspruchung weiter gesteigert, führt das Erreichen der Zugfestigkeit in Bereichen ungestörter Verbundes zur Bildung weiterer Erstrisse. Liegen diese ausreichend weit auseinander, so dass sich ihre Einleitungslängen nicht überschneiden, können sie als Einzelrisse nach den zuvor hergeleiteten Zusammenhängen beschrieben werden. Die Steigerung der Beanspruchung kann unmittelbar aus der Streuung der Betonzugfestigkeit abgeleitet werden, so dass sich Rissspannung, Spannungssprung, Einleitungslänge und Rissbreite nach [9] durch den Proportionalitätsfaktor

$$\alpha = \left(\frac{\sigma_{s2}}{\sigma_{sr2}} \right)^{\frac{1-N}{1+N}} \quad (2.16)$$

ausdrücken lassen. Für die Rissbreite folgt dann

$$w = w_r \cdot \alpha^{\frac{2}{1-N}}. \quad (2.17)$$

Fortschreitende Erstrissbildung – benachbarte Risse

Liegen die Risse so dicht beieinander, dass sich ihre Einleitungslängen überschneiden, kommt es zur gegenseitigen Beeinflussung der Relativverschiebungen. Dieses Verhalten kann durch einen additiven Verschiebungsanteil in der Differentialgleichung des

verschieblichen Verbundes beschrieben werden. Man erhält einen verhältnismäßig unübersichtlichen mathematischen Ausdruck, der an dieser Stelle nicht weiter dargestellt werden soll. Es wird auf die ursprüngliche Lösung in [9] sowie die weiterführenden Betrachtungen in [14] verwiesen. Vereinfachend kann die reduzierende Wirkung durch die gegenseitige Beeinflussung durch ein Abzugsglied $\delta = f(x, \alpha, \eta)$ erfasst werden, dass den Beanspruchungszustand und den bezogenen Rissabstand $\eta = s_r/l_t$ beschreibt.

$$s_2(x) = s_1(x) \cdot (1 - \delta(x, \alpha, \eta)) \tag{2.18}$$

Die Rissbreite kann dann wieder unter Bezug auf die Erstrissbreite angegeben werden.

$$w = w_r \cdot \alpha^{1-N} \cdot (1 - \delta) = w_r \cdot f(\alpha, \eta) \tag{2.19}$$

Abgeschlossene Erstrissbildung

Nach Entstehung des ‘letzten’ Erstrisses ist ein Zustand erreicht, in dem durchgängig gestörter Verbund vorliegt und sich die Risseinflusszonen gegenseitig beeinflussen. Für die Beschreibung der Rissbreite einzelner Risse mit Gleichung (2.19) müsste also in jedem Fall der Rissabstand – genauer die Abstände zu den beiden angrenzenden Rissen – bekannt sein.

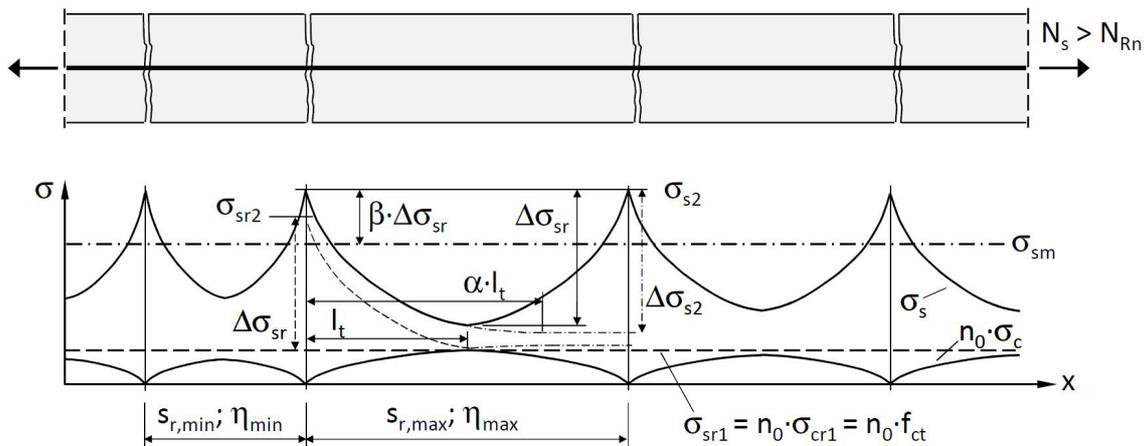


Abb. 2-8: Spannungen bei abgeschlossener Erstrissbildung [14]

Das ist praktisch nicht möglich aber auch nicht erforderlich. Das Bemessungskonzept hinter der Rissbreitenbegrenzung beruht vielmehr darauf, dass die Rissbreiten im Mittel eingehalten werden. Weitet man die Beschreibung des mittleren Bauteilverhaltens auf Rissabstände und Rissbreiten aus, so kann für eine gegebene Verteilung der Rissabstände zunächst ein mittlerer Rissabstand angegeben und damit anschließend die Rissbreite und das mittlere Bauteilverhalten bestimmt werden.

Der maximal mögliche Rissabstand η_{max} kann aus der Bedingung bestimmt werden, dass die Betonspannung in Rissabstandsmitte die lokale Betonzugfestigkeit $f_{ct,eff}$ gerade nicht mehr erreicht. Der minimale Rissabstand η_{min} folgt daraus durch Teilung. Geht man näherungsweise davon aus, dass sich der Spannungssprung und damit die Einlei-

tungslänge unabhängig von der Beanspruchung nicht ändern – was zugleich eine der Grundannahmen für die nachfolgend beschriebene empirische Lösung darstellt (Herleitung s. [14]) – so gilt dann

$$\{\eta_{min}; \eta_{max}\} = \{1; 2\}. \quad (2.20)$$

Die Verteilung der Rissabstände wird von *Krips* [9] durch eine hyperbolische Verteilung angegeben, was zu einem mittleren Rissabstand $\eta_m = 1/\ln 2$ führt. Die Auswertung von Gleichung (2.19) kann im relevanten Beanspruchungsbereich, d.h. vom Ende der Erstrissbildung bis zum Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit, in guter Näherung durch die folgende lineare Beziehung ausgedrückt werden.

$$w_m = w_r \cdot (2,2 \cdot \alpha - 1,05) \quad (2.21)$$

Von *Hanswille* [7] wird für Verbundträger wegen der Umlagerungen der Gurtkraft ein größerer Mittelwert $\eta_m = 1,8$ begründet. Grundlage des Bemessungskonzeptes in den Eurocodes ([1], [2], [3]) ist ein mittlerer bezogener Rissabstand $\eta_m = 4/3$.

Der charakteristische Wert der Rissbreite wird meist als 95%-Fraktile angenommen und kann aus den Verteilungsparametern bestimmt werden. Näherungsweise gilt [10]:

$$w_k = 1,5 \cdot w_m. \quad (2.22)$$

Unter der zuvor beschriebenen Annahme, dass die Rissbildung durch einen einheitlichen Bezugszustand bei Erstrissbildung beschrieben werden kann, erhält man für die mittlere Stahlspannung im Bauteil – also unter Ansatz des mittleren Rissabstandes – nach einigem Umformen

$$\sigma_{sm} = \sigma_{sm,r}(\eta = \eta_m) = \sigma_{s2} - \Delta\sigma_{sr} \cdot 0,36 \cdot \left(1 + \frac{N}{1+N} \cdot \frac{\sigma_{sr2}}{\sigma_{s2}}\right). \quad (2.23)$$

Bei Erreichen des abgeschlossenen Erstrissbildes ergibt sich für $\sigma_{s2} = 1,3 \cdot \sigma_{sr2}$ mit den Verbundparametern aus Gleichung (2.9) ein Anteil der Betonmitwirkung von rund 0,4.

2.2.3 Empirische Lösung mit gemittelten Werten

Für die praktische Anwendung ist es nicht erforderlich, Spannungen und Verschiebungen lokal, d. h. verbundorientiert zu bestimmen. Es ist ausreichend, die integrale Verschiebung, sprich die Rissbreite sowie die Stahlspannungen im Riss zu beschreiben. Für die Verformungsberechnung und die Berechnung der Steifigkeiten in innerlich unbestimmten Querschnitten (Stahlverbundträger, Spannbetonbauteile) ist ohnehin das Bauteilverhalten über mehrere Risse hinweg entscheidend. Es ist daher sinnvoll und zulässig, die lokale verbundorientierte Beschreibung der Dehnungs- und Spannungsverläufe durch Angabe mittlerer Dehnungen und mittlerer Verbundspannungen zu ersetzen [14].

Abb. 2-9 zeigt die Zuordnungen zwischen den Dehnungs- und Verbundspannungsverläufen und den gemittelten Werten. Die allgemeine Bestimmungsgleichung der Rissbreite

$$w = 2 \cdot \int_0^{l_{t,eff}} (\varepsilon_s(x) - \varepsilon_c(x)) dx \quad (2.24)$$

vereinfacht sich damit zu

$$w = 2 \cdot l_{t,eff} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}). \quad (2.25)$$

Die wirksame Einleitungslänge $l_{t,eff}$ entspricht bei Einzelrissen der freien Einleitungslänge l_t und bei abgeschlossener Rissbildung dem halben Rissabstand $s_r/2$ [14].

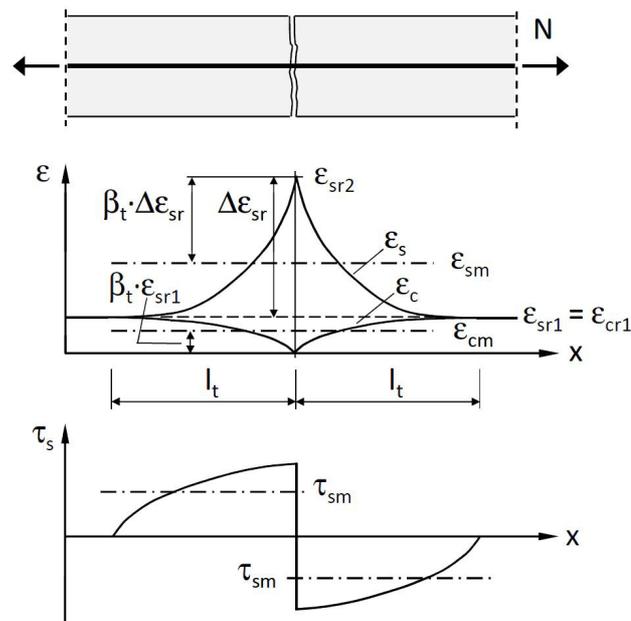


Abb. 2-9: Erstriss mit gemittelten Dehnungen und Verbundspannungen [14]

Einzelrissbildung

Die Einleitungslänge l_t kann aus dem Gleichgewicht der inneren und äußeren Kräfte nach Abb. 2-10 bestimmt werden.

$$l_t = \frac{f_{ct,eff} \cdot d_s}{4 \cdot \tau_{sm} \cdot \rho_s} = \frac{\sigma_{sr2} \cdot d_s}{4 \cdot \tau_{sm} \cdot (1 + \rho_s \cdot n_0)} = \frac{\Delta \sigma_{sr} \cdot d_s}{4 \cdot \tau_{sm}} \quad (2.26)$$

Die mittleren Dehnungen in Stahl und Beton bzw. allgemeiner die Mitwirkung des Betons zwischen den Rissen können über den Völligkeitsbeiwert β_t ausgedrückt werden.

$$\varepsilon_{sm} = \varepsilon_{sr2} - \beta_t \cdot \Delta \varepsilon_{sr} \quad (2.27)$$

$$\varepsilon_{cm} = \beta_t \cdot \varepsilon_{cr1} = \beta_t \cdot \varepsilon_{cr1} \quad (2.28)$$

Durch Einsetzen in (2.25) ergibt sich für die Rissbreite eines Einzelrisses

$$w_r = \frac{\Delta \sigma_{sr} \cdot d_s}{2 \cdot E_s \cdot \tau_{sm}} \cdot \sigma_{sr2} \cdot (1 - \beta_t) = \frac{f_{ct,eff}^2 \cdot d_s}{2 \cdot E_s \cdot \tau_{sm} \cdot \rho_s^2} \cdot (1 - \beta_t) \cdot (1 + \rho_s \cdot n_0). \quad (2.29)$$

Der Zusammenhang zwischen Rissbreite und Zugfestigkeit lässt sich nur für symmetrisch bewehrte, zentrisch gezogene Querschnitte ableiten, ist also für Verbundträger nur eingeschränkt anwendbar.

Die Werte für τ_{sm} und β_t können aus Tab. 2-1 abgelesen werden.

Tab. 2-1: Werte für τ_{sm} und β_t nach [1]

	Einzelrisse	abgeschlossenes Rissbild
kurzzeitige Belastung	$\tau_{sm} = 1,8 * f_{ctm}$ $\beta_t = 0,6$	$\tau_{sm} = 1,8 * f_{ctm}$ $\beta_t = 0,6$
langandauernde und wiederholte Belastung	$\tau_{sm} = 1,35 * f_{ctm}$ $\beta_t = 0,6$	$\tau_{sm} = 1,8 * f_{ctm}$ $\beta_t = 0,4$

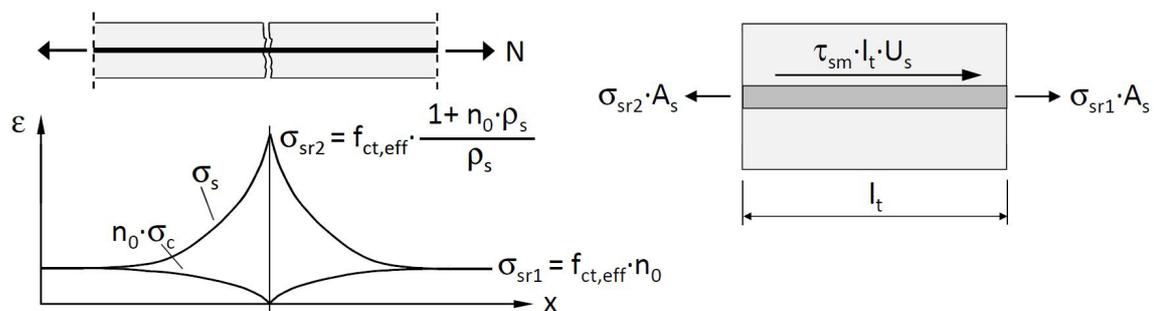


Abb. 2-10: Spannungen und Gleichgewicht entlang der Einleitungslänge [14]

Abgeschlossenes Rissbild

Für das abgeschlossene Rissbild kann die Beschreibung der Rissbreiten mit Abb. 2-11 vorgenommen werden. Die Werte für τ_{sm} und β_t können aus Tab. 2-1 abgelesen werden. Das Rissbreitenkonzept der Eurocodes basiert anders als zuvor in Unterabschnitt 2.2.2 beschrieben nicht auf der Ableitung einer charakteristischen Rissbreite aus der Verteilung der Rissbreiten. Stattdessen wird der charakteristische Wert der Rissbreite unmittelbar aus dem rechnerisch maximalen Rissabstand abgeleitet, so dass gilt $w_k = w_{max}$. Entsprechend ist für die Bestimmung der maximalen Rissbreite in Tab. 2-1 die Spalte für den Einzelriss anzuwenden.

Als Annahme wird vorausgesetzt, dass sich die gesamte Erstrissbildung durch einen einheitlichen Bezugszustand beim Entstehen des ersten Risses beschreiben lässt. Praktisch wird unterstellt, dass der Spannungssprung, die Einleitungslänge, sowie das Spannungsniveau am Ende der Einleitungslänge sich bei steigender Beanspruchung nicht ändern. Da ja gerade alle Zustandsgrößen am Riss proportional mit der Beanspruchung und miteinander verknüpft sind, wäre diese Annahme nur zutreffend, wenn angenommen bzw. gelten würde, dass die gesamte Rissbildung unter einem konstanten Lastniveau ablaufen würde.

2.3 Anwendung für herkömmliche Verbundträger

Für biegebeanspruchte Verbundträger können die im vorangegangenen Abschnitt aufgezeigten Beziehungen zur Beschreibung der Rissbildung grundsätzlich übertragen werden. Der Betongurt wird dabei als exzentrisch beanspruchter Zugstab betrachtet. Die Besonderheit liegt in der Ermittlung der Gurtbeanspruchungen. Die Beanspruchung durch ein äußeres Biegemoment wird nach den Steifigkeiten auf die Teilquerschnitte verteilt. Im Wesentlichen erfolgt die Aufteilung dabei auf ein Kräftepaar zwischen der Betongurtkraft N_c und der damit im Gleichgewicht stehenden Kraft auf den Stahlträger N_a sowie ein Biegemoment auf den Stahlträger M_a . Diese Redundanz bzw. Überzähligkeit [14] des Lastabtrags kann als innere statische Unbestimmtheit beschrieben werden. Die Ermittlung der Beanspruchungen im Betongurt setzt also die Kenntnis des mittleren Bauteilverhaltens und somit die Beschreibung des Risszustandes voraus. Dabei ist die Berücksichtigung der Mitwirkung des Betons zwischen den Rissen von wesentlicher Bedeutung. Der Zusammenhang zwischen Beanspruchung und Verformung kann anschaulich durch das Aufstellen einer Momenten-Krümmungsbeziehung beschrieben werden. Die wesentlichen Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet wurden durch *Hanswille* [7] und *Maurer* [15] verfasst.

2.3.1 Erstriss

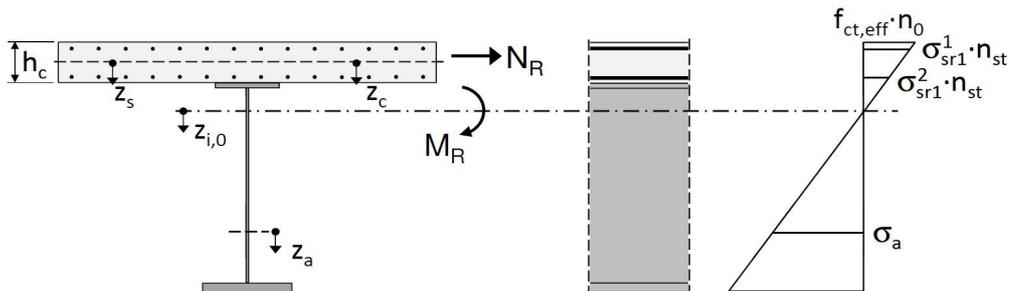


Abb. 2-14: Gleichgewicht am ungerissenen Querschnitt [14]

Der Erstrisszustand wird durch das Erreichen der effektiven Betonzugfestigkeit in der äußeren Randfaser des Betongurtes charakterisiert. Das zugehörige Rissmoment M_R kann aus der Betrachtung des Gleichgewichts am ungerissenen Querschnitt nach Abb. 2-14 gefunden werden. Da die Rissbildung im Regelfall zeitig einsetzt und/oder maßgeblich unter dem Einfluss veränderlicher Einwirkungen stattfindet, ist es gerechtfertigt, die Berechnung mit den Querschnittswerten für kurzzeitige Einwirkungen durchzuführen.

$$M_R = \frac{I_{i,0} \cdot n_0}{z_{i,c,0}} \cdot f_{ct,eff} \cdot \frac{1}{1 + h_c / (2 \cdot |z_{i,c,0}|)} \quad (2.34)$$

Die Rissnormalkraft N_R , d. h. die zu M_R gehörige Beanspruchung des Stahlbetongurtes kann entsprechend bestimmt werden.

$$N_R = N_{c,r} + N_{s,r} = A_c \cdot f_{ct,eff} \cdot (1 + \rho_s \cdot n_0) \cdot k_{c,M} \quad (2.35)$$

mit
$$k_{c,M} = \frac{1}{1 + h_c / (2 \cdot |z_{i,c,0}|)}$$

Der Hilfwert $k_{c,M}$ ist ein Querschnittsparameter, der das Verhältnis zwischen Plattendicke und Lage der Nulllinie bzw. die Völligkeit der Betonzugspannungen ausdrückt. Oft wird als Näherung angenommen, dass die Bewehrung in der Schwerachse des Betongurtes konzentriert ist. Die Stahlspannungen und der Spannungssprung lassen sich dann einfach mit den Teilschnittgrößen nach Gleichung (2.35) ableiten.

$$\sigma_{sr1} = \frac{N_{s,r}}{A_s} = f_{ct,eff} \cdot n_0 \cdot k_{c,M} \quad (2.36)$$

$$\Delta\sigma_{sr} = \frac{N_{c,r}}{A_s} = \frac{f_{ct,eff}}{\rho_s} \cdot k_{c,M} \quad (2.37)$$

$$\sigma_{sr2} = \sigma_{sr1} + \Delta\sigma_{sr} = f_{ct,eff} \cdot \frac{1+\rho_s \cdot n_0}{\rho_s} \cdot k_{c,M} \quad (2.38)$$

Zumindest das mittlere Bauteilverhalten wird durch diese Vereinfachung sehr gut angenähert. Bei der Ermittlung der Rissbreiten ist die Genauigkeit dieses Verfahrens hingegen stark vom Dehnungsgradienten im Verbundträgergurt und auch vom Verhältnis der Bewehrungslagen abhängig. Insbesondere für kompakte Hochbauquerschnitte mit entsprechend steilen Dehnungsgradienten kann es erforderlich sein, eine genauere Ermittlung mit Berücksichtigung der einzelnen Bewehrungslagen und dann auch der Teilschnittgröße M_c durchzuführen. Insbesondere für Verbundträger mit Teilfertigteilen muss in jedem Fall die genaue Berechnung durchgeführt werden.

$$\sigma_{sr1} = \frac{M_R}{I_{i,0} \cdot n_{st}} \cdot z_{i,i,0} \quad (2.39)$$

$$\Delta\sigma_{sr} = \frac{N_{c,r}}{A_s} + \frac{M_{c,r} + N_{c,r} \cdot (z_c - z_s)}{I_s} \cdot z_{i,i,0} \quad (2.40)$$

Für die Rissbreite des Einzelrisses gilt dann in Analogie zu Gleichung (2.29)

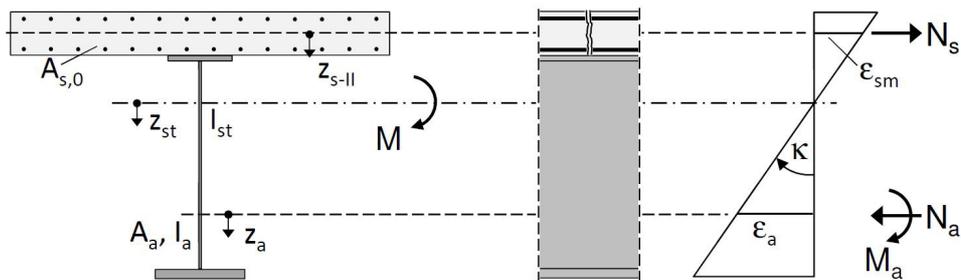
$$w_r = \frac{\Delta\sigma_{sr} \cdot d_s}{2 \cdot E_s \cdot \tau_{sm}} \cdot \sigma_{sr2} \cdot (1 - \beta_t) = \frac{f_{ct,eff}^2 \cdot d_s}{2 \cdot E_s \cdot \tau_{sm} \cdot \rho_s^2} \cdot k_{c,M}^2 (1 - \beta_t) \cdot (1 + \rho_s \cdot n_0). \quad (2.41)$$

Der Zusammenhang zwischen Rissbreite und Zugfestigkeit ist nur mit den genannten Einschränkungen anwendbar. Für die Darstellung in der Momenten-Krümmungsbeziehung kann die Krümmung des ungerissenen Querschnittes unmittelbar aus der Steifigkeit des ungerissenen Gesamtquerschnittes bestimmt werden.

$$\kappa_R = \frac{M_R}{E_a \cdot I_{i,0}} \cong \frac{M_R - N_R \cdot (z_a - z_c)}{E_a \cdot I_a} \quad (2.42)$$

2.3.2 Fortschreitende Erstrissbildung

Die fortschreitende Rissbildung führt zum zunehmenden Steifigkeitsverlust des Verbundträgergurtes und zur Umlagerung der Beanspruchungen innerhalb des Verbundquerschnittes. Die Verteilung der Beanspruchungen am gerissenen Querschnitt kann mit Hilfe der mittleren Stahldehnungen bestimmt werden. Das mittlere Bauteilverhalten kann anschaulich mit Abb. 2-15 beschrieben werden.


Abb. 2-15: Gleichgewicht und Verträglichkeit am gerissenen Querschnitt [14]

Mit den Beziehungen für das Gleichgewicht der inneren und äußeren Kräfte

$$M = M_a + N_s \cdot z_{a,s-II} \quad (2.43)$$

$$N_s = -N_a \quad (2.44)$$

und die Verträglichkeit der inneren Weggrößen

$$\epsilon_{sm} = \epsilon_a + \kappa \cdot z_{a,s-II} \quad (2.45)$$

$$\kappa = \frac{M_a}{E_a \cdot I_a} \quad (2.46)$$

kann die Grundgleichung zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen mittlerer Stahldehnung ϵ_{sm} , Gurtkraft N_s und äußerer Beanspruchung M aufgestellt werden.

$$\epsilon_{sm} + \frac{N_s}{E_a \cdot A_a} + \frac{N_s \cdot z_{a,s-II}^2}{E_a \cdot I_a} = \frac{M \cdot z_{a,s-II}}{E_a \cdot I_a} \quad (2.47)$$

Für die mittlere Stahldehnung kann mit (2.27) in allgemeiner Form

$$\epsilon_{sm} = \epsilon_{s2} - \beta_{t,m} \cdot \Delta \epsilon_{sr} \quad (2.48)$$

geschrieben werden. Für die Gurtkraft gilt

$$N_s = \sigma_{s2} \cdot A_s \quad (2.49)$$

Nach Einsetzen von (2.48) und (2.49) in (2.47) und Umformen erhält man

$$\sigma_{s2} \cdot \left(1 + \frac{A_s}{A_a} + \frac{A_s \cdot z_{a,s-II}^2}{I_a} \right) = \frac{M}{I_a \cdot n_{st}} \cdot z_{a,s-II} + \beta_{t,m} \cdot \Delta \sigma_{sr} \quad (2.50)$$

Der Klammerausdruck kann durch den Querschnittsparameter α_{st} ersetzt werden, den im Riss wirksamen Restquerschnitt – hier also der Bewehrungsquerschnitt – mit dem Querschnitt des Stahlträgers ins Verhältnis setzt. Damit kann die Spannungsermittlung in der ideellen Schwerachse des Verbundträgergurttes am Baustahl- und Gesamtstahlquerschnitt transformiert werden.

$$\sigma_{s2} = \frac{M}{I_{st} \cdot n_{st}} \cdot z_{st,s-II} + \beta_{t,m} \cdot \frac{\Delta \sigma_{sr}}{\alpha_{st}} = \sigma_{sII} + \Delta \sigma_{ts} \quad (2.51)$$

Für die Beschreibung der Betonmitwirkung ist hier nicht der - lokale – Völligkeitsbeiwert β_t maßgebend sondern ein globaler Wert $\beta_{t,m}$. Dieser kann in der in Abb. 2-16 dargestellten Form approximiert werden. Der untere Grenzwert von 0,4 ergibt sich für das abgeschlossene Rissbild mit einem mittleren bezogenen Rissabstand $\eta_m = 4/3$. Für den oberen Grenzwert muss berücksichtigt werden, dass bereits der erste Riss zu einer signifikanten Umlagerung innerhalb des Verbundquerschnittes führt. In Anlehnung an den Umlagerungsbeiwert k_s im Eurocode 4 [3], der auf diesbezügliche Untersuchungen von *Maurer* [15] zurückgeht, kann der obere Grenzwert mit 0,9 abgeschätzt werden.

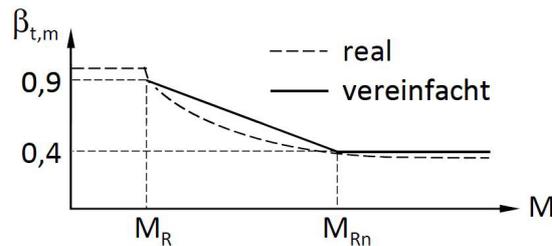


Abb. 2-16: Mitwirkung des Betons bei fortschreitender Erstrissbildung [14]

Die Rissbreite kann mit

$$w_{II} = \frac{\Delta\sigma_{sr} \cdot d_s}{2 \cdot E_s \cdot \tau_{sm}} (\sigma_{s2} - \beta_t \cdot \sigma_{sr2}) \quad (2.52)$$

bestimmt werden. Für die Krümmung folgt aus (2.43) und (2.46)

$$\kappa_{II} = \frac{M - N_s \cdot z_{a,s-II}}{E_a \cdot I_a} \quad (2.53)$$

2.3.3 Abgeschlossene Erstrissbildung

Die Berechnung der Rissbreiten kann vollständig nach den Beziehungen aus dem vorherigen Unterabschnitt 2.3.2 durchgeführt werden. Die Abgrenzung zwischen den beiden Risszuständen erfolgt durch das Moment bei abgeschlossener Erstrissbildung M_{Rn} . Dieses kann mit der Randbedingung $\sigma_{s2}(M = M_{Rn}) = 1,3 \cdot \sigma_{sr2}$ durch Umformen von (2.51) bestimmt werden.

$$M_{Rn} = [1,3 \cdot \sigma_{sr2} \cdot \alpha_{st} - 0,4 \cdot \Delta\sigma_{sr}] \cdot \frac{I_a \cdot n_{st}}{z_{a,s-II}} \quad (2.54)$$

Der Gültigkeitsbereich der gemachten Betrachtungen wird durch das Fließen der Bewehrung – im Regelfall in der oberen Lage – begrenzt. Für das zugehörige Moment gilt

$$M_y = [f_{yd} \cdot \alpha_{st} - 0,4 \cdot \Delta\sigma_{sr}] \cdot \frac{I_a \cdot n_{st}}{z_{a,s1}} \quad (2.55)$$

2.3.4 Berücksichtigung des Schwindens

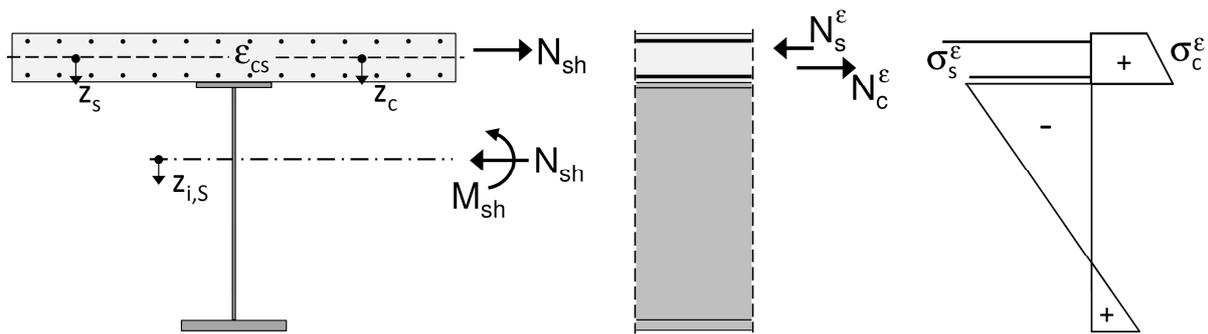


Abb. 2-17: Beanspruchungszustand infolge Schwindens [14]

Schwinden bewirkt, dass die Erstrissbildung unter einem geringeren Beanspruchungsniveau erfolgt und sich die mittlere Dehnungsdifferenz um das Maß der im Riss frei werdenden Schwinddehnung vergrößert.

Erstrissbildung

Die Verringerung des Erstrissmomentes kann in einfacher Form aus den Schwindspannungen in der Betonrandfaser abgeleitet werden.

$$M_R^{M+\epsilon} = \frac{I_{i,0} \cdot n_0}{z_{i,c,0}} \cdot (f_{ct,eff} - \sigma_c^{\epsilon,c-OK}) \cdot \frac{1}{1+h_c/(2 \cdot |z_{i,c,0}|)} = M_R \cdot \left(1 - \frac{\sigma_c^{\epsilon,c-OK}}{f_{ct,eff}}\right) \quad (2.56)$$

Die Schwindspannungen in Beton und Bewehrung und die zugehörigen Teilschnittgrößen (mit $j = s; c$) können mit Hilfe der ideellen Gesamtquerschnittswerte für den Lastfall Schwinden wie folgt berechnet werden.

$$\sigma_c^\epsilon = \frac{N_{sh}}{A_c} \cdot \left(1 - \frac{A_{c,S}}{A_{i,S}} - \frac{A_{c,S} \cdot z_{i,c,S}}{I_{i,S}} \cdot z_{i,i,S}\right) \quad (2.57)$$

$$\sigma_s^\epsilon = \frac{N_{sh}}{A_s} \cdot \left(1 - \frac{A_{s,0}}{A_{i,S}} - \frac{A_{s,0} \cdot z_{i,c,S}}{I_{i,S}} \cdot z_{i,i,S}\right) \quad (2.58)$$

$$N_j^\epsilon = \sigma_j^\epsilon \cdot A_j \quad (2.59)$$

$$M_j^\epsilon = -N_{sh} \cdot z_{i,c,S} \cdot \frac{I_{j,S}}{I_{i,S}} \quad (2.60)$$

Der Schwindeinfluss auf die Beanspruchung im Beton kann durch den Formbeiwert

$$k_{c,\epsilon} = \frac{N_c^\epsilon - A_c \cdot \sigma_c^{\epsilon,c-OK} \cdot k_{c,M}}{A_c \cdot f_{ct,eff}} \quad (2.61)$$

ausgedrückt werden. Vereinfachend darf nach [3] auf Untersuchungen von *Maurer* [15] zurückgehend $k_{c,\epsilon} = 0,3$ geschrieben werden. Die Völligkeit des resultierenden Spannungsverlaufes im Betongurt wird dann durch $k_c = k_{c,M} + k_{c,\epsilon}$ ausgedrückt.

Unter der vereinfachten Annahme einer in der Gurtschwerachse konzentrierten Bewehrung gilt dann für die Stahlspannungen und den Spannungssprung im Riss

$$\sigma_{sr1} = f_{ct,eff} \cdot n_0 \cdot k_c + \varepsilon_{cs} \cdot E_s \quad (2.62)$$

$$\Delta\sigma_{sr} = \frac{f_{ct,eff}}{\rho_s} \cdot k_c \quad (2.63)$$

$$\sigma_{sr2} = \sigma_{sr1} + \Delta\sigma_{sr} = f_{ct,eff} \cdot \frac{1+\rho_s \cdot n_0}{\rho_s} \cdot k_c + \varepsilon_{cs} \cdot E_s \quad (2.64)$$

Die Rissbreite für den Erstriss unter Berücksichtigung des Schwindens kann nach Gleichung (2.32) berechnet werden. Es gilt auch hier, dass sich die Rissbreite gegenüber dem schwindfreien Fall nicht ändert.

$$w_r = \frac{\Delta\sigma_{sr} \cdot d_s}{2 \cdot E_s \cdot \tau_{sm}} \cdot (\sigma_{sr2} - \varepsilon_{cs} \cdot E_s) \cdot (1 - \beta_t) \quad (2.65)$$

Gegebenenfalls können die resultierenden Spannungen analog der Gleichungen (2.39) und (2.40) genauer aus den Teilschnittgrößen bestimmt werden. Es wird sich dann im Regelfall ein geringer Einfluss auch für die Rissbreite des Erstrisses einstellen.

Die Krümmung kann mit den Gleichungen (2.42) und (2.56) bestimmt werden. Zusätzlich ist die Krümmung infolge Schwindens zu bilanzieren.

$$\kappa_\varepsilon = \frac{N_{sh} \cdot Z_{i,c,s}}{E_a \cdot I_{i,s}} \quad (2.66)$$

Fortschreitende und abgeschlossene Erstrissbildung

Mit fortschreitender Rissbildung wird der Eigenspannungszustand infolge Schwindens abgebaut und kann bei der Beschreibung des mittleren Bauteilverhaltens zunehmend vernachlässigt werden. Der Einfluss auf die Rissbreiten bleibt erhalten, da der Abbau des Zwangs im Bereich der Risse zur Vergrößerung der Dehnungsdifferenz führt.

$$w_{II} = \frac{\Delta\sigma_{sr} \cdot d_s}{2 \cdot E_s \cdot \tau_{sm}} (\sigma_{s2} - \beta_t \cdot \sigma_{sr2} - \varepsilon_{cs} \cdot E_s) \quad (2.67)$$

2.3.5 Momenten-Krümmungsbeziehung

Das Aufstellen der Momenten-Krümmungsbeziehung liefert eine anschauliche Darstellung des mittleren Bauteilverhaltens im gerissenen Zustand. Es zeigt die Abnahme der Dehnsteifigkeit des gezogenen Verbundträgergurtes infolge der Rissbildung auf.

Die Rissbildung ist mit einem Steifigkeitsverlust verbunden, der sich bei kraftgesteuerter Beanspruchung als Wegsprung und bei weggesteuerter Beanspruchung als Kraftsprung darstellt. Unter Berücksichtigung der Streuung der Betonzugfestigkeit ergeben sich die in Abb. 2-18 dargestellten Verläufe der Arbeitslinien. Die Verläufe nähern sich mit zunehmender Rissbildung asymptotisch an den reinen Zustand II an. Praktisch ist die Rissbildung räumlich durch die Rippenabstände und physikalisch durch das Fließen des Betonstahls begrenzt, so dass die Annäherung gegen einen endlichen Wert läuft.

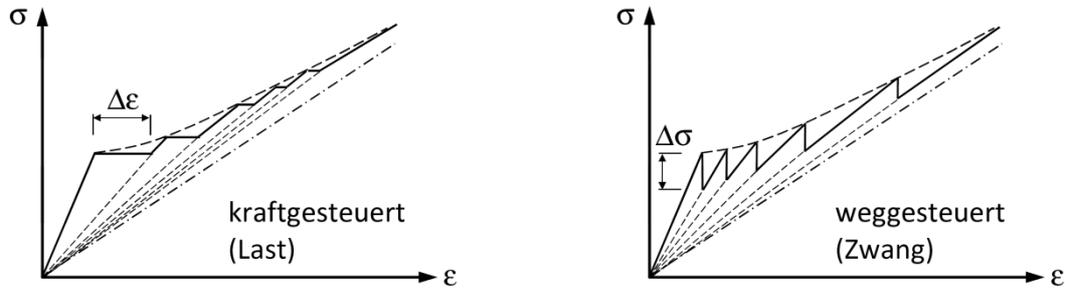


Abb. 2-18: Arbeitslinien für Last und Zwang [14]

Der treppen- bzw. zahnartig abgestufte Verlauf kann bei Betrachtung des mittleren Bauteilverhaltens ohne Verlust an Genauigkeit durch die obere Einhüllende ersetzt werden. Man erkennt, dass der Verlauf für beide Beanspruchungsformen gleich ist. Es spielt also für die weitere analytische Betrachtung keine Rolle, ob die Rissbildung durch Last oder Zwang ausgelöst wird.

Als weitere Näherung bietet es sich an, den Verlauf der Arbeitslinie nach Bildung des ersten Risses durch einen bilinearen Verlauf zu approximieren. Man erhält dann den bekannten Verlauf mit der Einteilung in die drei Bereiche Zustand I, Erstrissbildung und abgeschlossene Erstrissbildung.

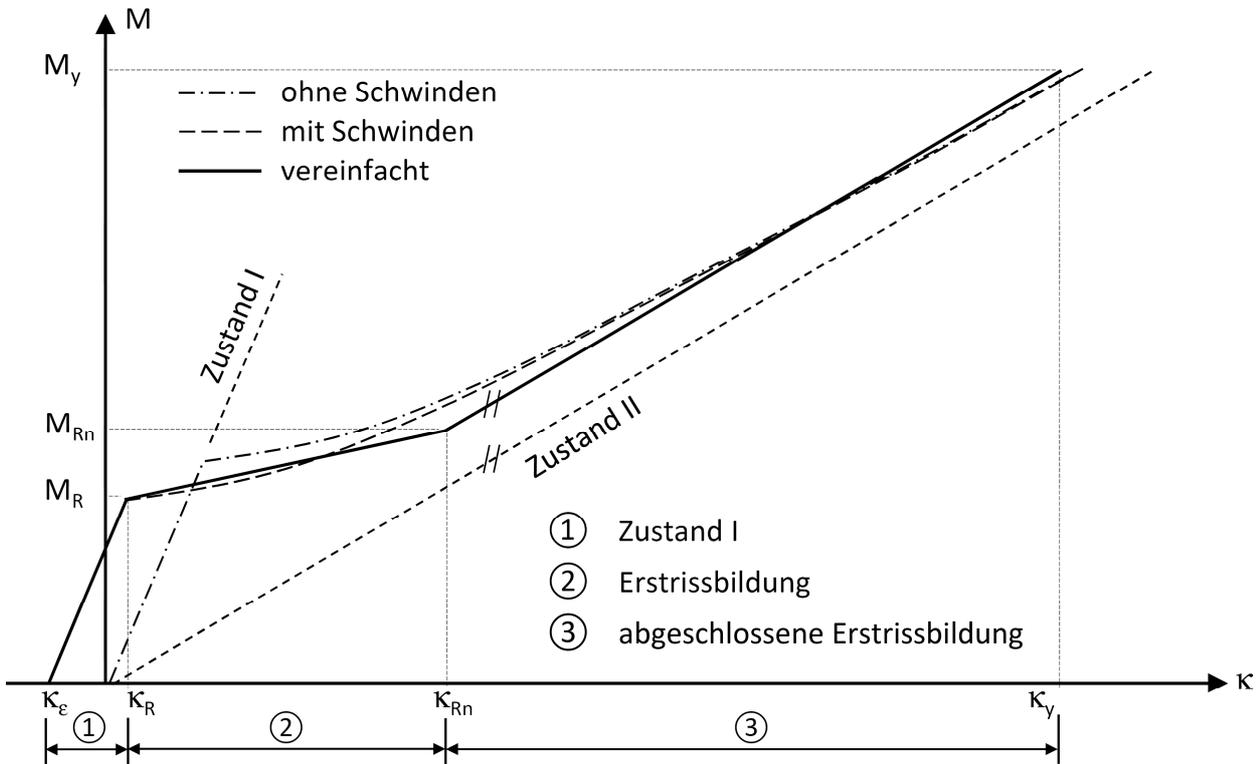


Abb. 2-19: Vereinfachte Momenten-Krümmungsbeziehung [14]

3 Versuche

3.1 Versuchskonzept

Motivation

Wie bereits erwähnt, bilden die Trägerversuche den methodischen Ansatz für die hier beschriebenen Untersuchungen. Entsprechend des überarbeiteten Konzeptes werden mit der Durchführung und Auswertung zwei Ziele verfolgt. Zunächst werden die wesentlichen Fragestellungen identifiziert, die für die Beschreibung der Rissbildung an Fertigteilverbundträgern zu beantworten sind. Anschließend können die aufgestellten Berechnungsansätze in einer zweiten detaillierteren Stufe der Auswertung mit den Versuchsergebnissen validiert und kalibriert werden.

Die wesentlichen Anforderungen an die Versuchsplanung waren erstens möglichst realitätsnahe Versuche in großem Maßstab, zweitens die Abbildung eines möglichst breiten Variantenspektrums mit Berücksichtigung wesentlicher Konstruktionsdetails und zugleich drittens die Möglichkeit einer statistischen Auswertung durch Herstellung gleichartiger Träger sowie schließlich viertens die Herstellung und Untersuchung aller Versuchsträger unter prinzipiell gleichen Randbedingungen.

Versuchsprogramm

Es wurden zwölf Stahlverbundträger mit unterschiedlicher Konstruktion des Betongurtes bei grundsätzlich gleichen Abmessungen hergestellt und untersucht. Die Stahlträger für die Versuche wurden dankenswerterweise durch die Firma Goldbeck zur Verfügung gestellt. Die wesentlichen Abmessungen können Abb. 3-1 und Tab. 3-1 entnommen werden. Die Wahl der Konstruktion erfolgte in für Verbundträger des Hoch- und Brückenbaus typischer Weise mit starrer Verdübelung und zweilagiger Bewehrungsführung sowie höherer Güte des Fertigteilbetons. Die Abmessungen wurden so gewählt, dass die Versuchsträger in den zur Verfügung stehenden Prüfmaschinen bis zur gewünschten Beanspruchung im GZG belastet werden konnten.

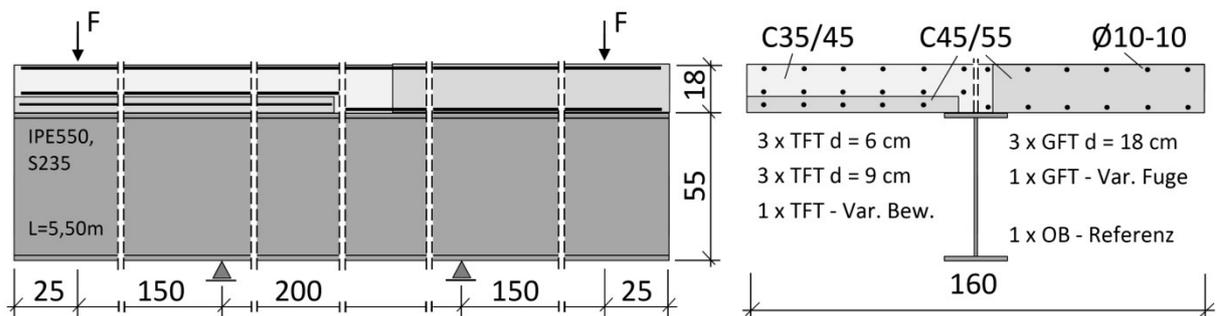


Abb. 3-1: Versuchsprogramm [14]

Es wurden Versuche an Verbundträgern mit Teil- und Ganzfertigteilen durchgeführt. Um eine möglichst breite Datenbasis zu erhalten und typische von untypischen Effekten abgrenzen zu können, wurden je Trägertyp jeweils drei gleiche Versuchsträger herge-

Tab. 3-1: Versuchsprogramm [14]

	Charge	Name	Typ	Beschreibung
1	Charge 1	Tr. 1-1	TFT d/3	$h_{cp} \approx 6 \text{ cm}$, $h_{cs} \approx 12 \text{ cm}$, $l_{QF} = 4 \text{ cm}$
2		Tr. 1-2		
3		Tr. 1-3		
4	Charge 2	Tr. 2-1	TFT d/2	$h_{cp} \approx 9 \text{ cm}$, $h_{cs} \approx 9 \text{ cm}$, $l_{QF} = 6 \text{ cm}$
5		Tr. 2-2		
6		Tr. 2-3		
7	Charge 3	Tr. 3-1	GFT	$h_{cp} = h_{cs} = 18 \text{ cm}$, $l_{QF} = 36 \text{ cm}$
8		Tr. 3-2		
9		Tr. 3-3		
10	Charge 4	Tr. 4-1	GFT	$h_{cp} = h_{cs} = 18 \text{ cm}$, $l_{QF} = 46 \text{ cm}$
11		Tr. 4-2	TFT d/3	Variation der Bewehrung: halbseitig $A_{s2}=0$, halbseitig A_{sq} mit $Var = 0,25$; Alter der TFT $\sim 3,5 \text{ a}$
12		Tr. 4-3	OB	Referenz; Bewehrung wie GFT

gestellt und untersucht. Die erste Charge sind Teilfertigteilträger mit einer Teilfertigteilstärke von rund einem Drittel der Verbundplatte, was somit den typischen Anwendungsfall für Verbundträger dieser Bauweise darstellt. In einer zweiten Charge wurden ebenfalls Teilfertigteile verbaut, allerdings mit einer mittleren Stärke von rund der Hälfte der Verbundplatte. Diese Variante ist in der Praxis eher nicht anzutreffen, zeigt jedoch den grundsätzlichen Einfluss der Teilfertigteilstärke auf das Verhalten im Gebrauchszustand. In der dritten Charge wurden Ganzfertigteile verbaut. Charakteristisches Merkmal dieser Konstruktion ist die Ausbildung der Quer- und Längsfugen, da die Durchlaufwirkung der Zugbewehrung nicht wie bei Teilfertigteilträgern in der Ortbetonschicht hergestellt werden kann, sondern durch Übergreifung der Fertigteilbewehrung, was entsprechend große Querfugenbreiten erfordert. Die Wahl der Querfugenbreite erfolgte so, dass die statisch erforderliche Übergreifungslänge für die gewählte Bewehrung gerade erreicht wird. In der vierten Charge wurden 3 Einzelträger untersucht, das heißt Träger unterschiedlicher Konstruktion. Zunächst wurde in Ergänzung zur dritten Charge ein weiterer Ganzfertigteilträger mit größerer Querfugenabmessung bei ansonsten identischer Konstruktion und Abmessungen hergestellt. Weiterhin wurde ein weiterer Teilfertigteilträger mit einer Teilfertigteilstärke von rund einem Drittel der Verbundplatte hergestellt. Dabei wurde die Bewehrungsführung der Längs- und Querbewehrung gegenüber den sonst ähnlichen Trägern der ersten Versuchscharge variiert, um diesbezügliche Einflüsse zu erkennen. Weiterhin wurden hier Fertigteile mit einem Betonalter von rund 3,5 Jahren verbaut, die noch von früheren Untersuchungen vorhanden waren. Schließlich wurde noch ein Träger in reiner Ortbetonbauweise hergestellt, um den Vergleich zu den beiden Fertigteilbauweisen zu haben.

Der Bauablauf und die Versuchsdurchführung wurden so geplant und durchgeführt, dass für alle Träger möglichst gleiche Bedingungen vorlagen. Bewusste Ausnahme war die Verwendung der älteren TFT am Träger 4-2. Eine Übersicht kann Tab. 3-2 entnommen werden.

Tab. 3-2: Bauablauf [14]

Typ	Herstellung FT C45/55	Herstellung OB C35/45	Belastung
Charge 1	t = 0 d	t = 14 d	t = 42 d / 44 d / 47 d
Charge 2	t = 0 d	t = 14 d	t = 42 d / 44 d / 46 d
Charge 3	t = 0 d	t = 14 d	t = 42 d / 44 d / 46 d
Tr. 4-1	t = 0 d	t = 14 d	t = 43 d
Tr. 4-2	t = -1215 d	t = 14 d	t = 45 d
Tr. 4-3	---	t = 14 d	t = 49 d

Die Wahl der Baustoffe – für die Fertigteile C45/55, für den Ortbeton C35/45 – erfolgte ebenfalls unter dem Grundsatz identischer Bedingungen für alle Versuchsträger. Hier wurde insbesondere mit dem Fertigteilwerk besondere Sorgfalt vereinbart, da in früheren Versuchen teilweise sehr große Überfestigkeiten aufgetreten waren [4]. Eine Übersicht der im Labor bestimmten Betonkennwerte zeigt Tab. 3-3.

Tab. 3-3: Materialkennwerte [14]

1)	Charge 1		Charge 2		Charge 3		Charge 4 ²⁾	
	OB	FT	OB	FT	OB	FT	OB	FT
$f_{cm,cube}$ [N/mm ²]	44	61	48	61	39	59	53	60
$f_{ck,cube}$ [N/mm ²]	42	58	47	59	37	55	52	58
f_{ck} [N/mm ²]	34	48	39	48	30	45	43	48
Klasse	C34/42	C48/58	C39/47	C48/59	C30/37	C45/55	C43/52	C48/58
E_{cm} [N/mm ²]	33000	35400	36000	36400	33500	33000	35000	37500
Klasse	C31/37	C41/50	C44/53	C46/56	C33/40	C31/37	C39/48	C51/62

1) Materialkennwerte wurden jeweils im Betonalter von 28d und nach Abschluss der Versuche (t=49d) bestimmt. Die angegebenen Werte approximieren das Betonalter bei Versuchsdurchführung.

2) Für die TFT des Tr. 4-2 wurden im Alter von ~ 28 d Betonkennwerte $f_{ck,cube}=60$ N/mm² und $E_{cm}=35900$ N/mm² bestimmt [4]. Unter Ansatz der Festigkeitsentwicklung kann somit mindestens C50/60 angenommen werden.

Die Versuchsdurchführung ist in zwei Phasen unterteilt. Zunächst wurden beginnend mit der Betonage der Ortbetoneergänzung in einer Dauermessung die Beanspruchungen infolge Hydratation und Schwindens des Betons bzw. der Betone erfasst.

Anschließend wurden der Beanspruchungszustand und die Rissentstehung infolge einer äußeren Last untersucht. Die Belastungsversuche sind als 4-Punkt-Biegeversuch konzipiert (s. Abb. 3-1). Aus der weggesteuert aufgebrachten Last ergibt sich zwischen den innenliegenden Auflagern auf einer Länge von 2,00 m ein konstantes Biegemoment vom Betrag $M = 1,5m \cdot F [kN]$.

Messprogramm

Der Beanspruchungszustand am Verbundquerschnitt wurde vorwiegend durch die sensorische Messung der Zustandsgrößen erfasst. Im Wesentlichen wurden die Dehnungen im Beton- und Bewehrungsstahl sowie auf der Betonoberfläche mittels Dehnmessstreifen (DMS) erfasst. Zur ergänzenden Messung der mittleren Dehnungen im Betongurt sowie zur Kontrolle der Durchbiegungen und des Schlupfes in der Verbundfuge wurden induktive (IWA) und potentiometrische (WA) Wegaufnehmer verwendet. Weiterhin wurde der Temperaturverlauf während der Hydratation des jungen Betons sowie auch während der Belastungsversuche gemessen.

Die Kontrolle der Rissbildung erfolgte laststufenweise durch visuelle Kontrolle und Anzeichnen der Risse sowie durch Risslupenmessung an ausgewählten Rissen.

Um die Festbetoneigenschaften für die späteren Vergleichsrechnungen hinreichend genau zu erfassen, wurden für alle Betoniergänge würfel- und zylinderförmige Probekörper hergestellt, mit denen die Betondruckfestigkeit und der Elastizitätsmodul bestimmt wurden. Die Bestimmung erfolgte jeweils analog der Normfestigkeiten im Alter von 28 Tagen sowie nochmals zum Zeitpunkt der Belastungsversuche. Für Beton- und Baustahl wurde wegen der vergleichsweise geringen Streuung auf eine labormäßige Bestimmung der Baustoffkennwerte verzichtet.

Abmessungen einzelner Bauteile sowie die Lage der Bewehrung wurden bei der Herstellung der Versuchsträger stichprobenartig überwacht.

Eine Übersicht aller erfassten Messgrößen kann Abb. 3-2 und Tab. 3-4 entnommen werden.

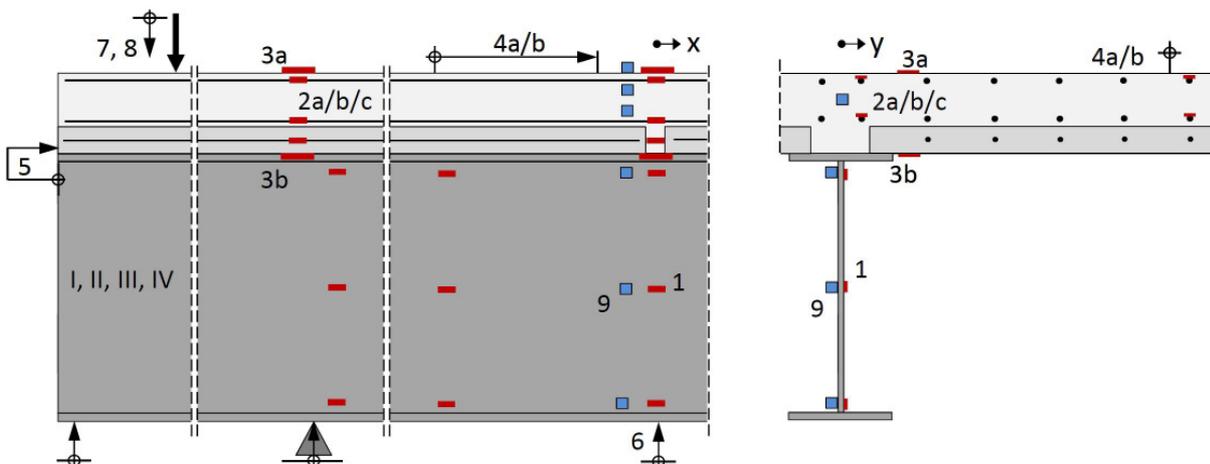


Abb. 3-2: Messprogramm [14]

Alle sensorischen Messgrößen wurden zeitlich durchgängig erfasst. Die Anordnung der Messstellen ist so gewählt, dass sowohl F- als auch K-Bereiche (Erläuterung s. nachfolgendes Kapitel 4) erfasst werden. Die Messstellen werden in vier Bereichen – jeweils zwei im F- und im K-Bereich – gruppiert angeordnet. Dabei sind die Messstellen an den Fugen konzentriert, da hier die maßgeblichen Effekte erwartet werden. Erwartbare Effekte aus der doppelten Symmetrie der Verbundträgerplatte wurden ausgenutzt, um die Anzahl der Messstellen zu optimieren.

Tab. 3-4: Übersicht Messprogramm [14]

Typ	Bezeichnung	Bemerkung	Anzahl je Träger
1	DMS Baustahl		7-9
2	DMS Betonstahl	a,b,c: Bewehrungslagen s1, s2, s3	15-28
3	DMS Beton	a,b: Oberseite, Unterseite	3-7
4	IWA längs	a: Messlänge 50 cm, b: Messlänge 5 cm	6
5	IWA Schlupf		2
6	WA		5
7	Kraft	an den Prüfzylindern	2
8	Weg	an den Prüfzylindern	2
9	Temperatur		2-9
I	Rissbreiten	Risslupe und Rissmaßstab	
II	Rissbilder		
III	Labor Beton	Druckfestigkeit + E-Modul	
IV	Geometrie	stichprobenartige Überwachung	

Der Anhang A enthält ausgewählte Darstellungen zu Vorbereitung, Aufbau und Durchführung der Versuche.

3.2 Versuche an Teilfertigteilträgern

3.2.1 Belastungsversuche

Mittleres Bauteilverhalten

Das mittlere Bauteilverhalten kann wie in Unterabschnitt 2.3.5 erläutert, anschaulich durch die Darstellung der Momenten-Krümmungsbeziehung beschrieben werden. Die folgenden Abbildungen zeigen die Momenten-Krümmungsbeziehung für jeweils einen Versuchsträger der Chargen 1 (TFT d/3) und 2 (TFT d/2). Dargestellt ist der Krümmungsverlauf mit Beginn der Belastung, das heißt ohne Eigenspannungen und unter Vernachlässigung des Eigengewichtes. Momente und Krümmungen sind jeweils mit (-1) skaliert. Die Angabe der Messschnitte – $x=0,00$ m, $x=0,50$ m und $x=1,00$ m – bezieht sich auf die Symmetrieachse der Versuchsträger in der Quertuge (s. Abb. 3-2). Die Darstellung der Verläufe aller Versuchsträger ist im Anhang B enthalten.

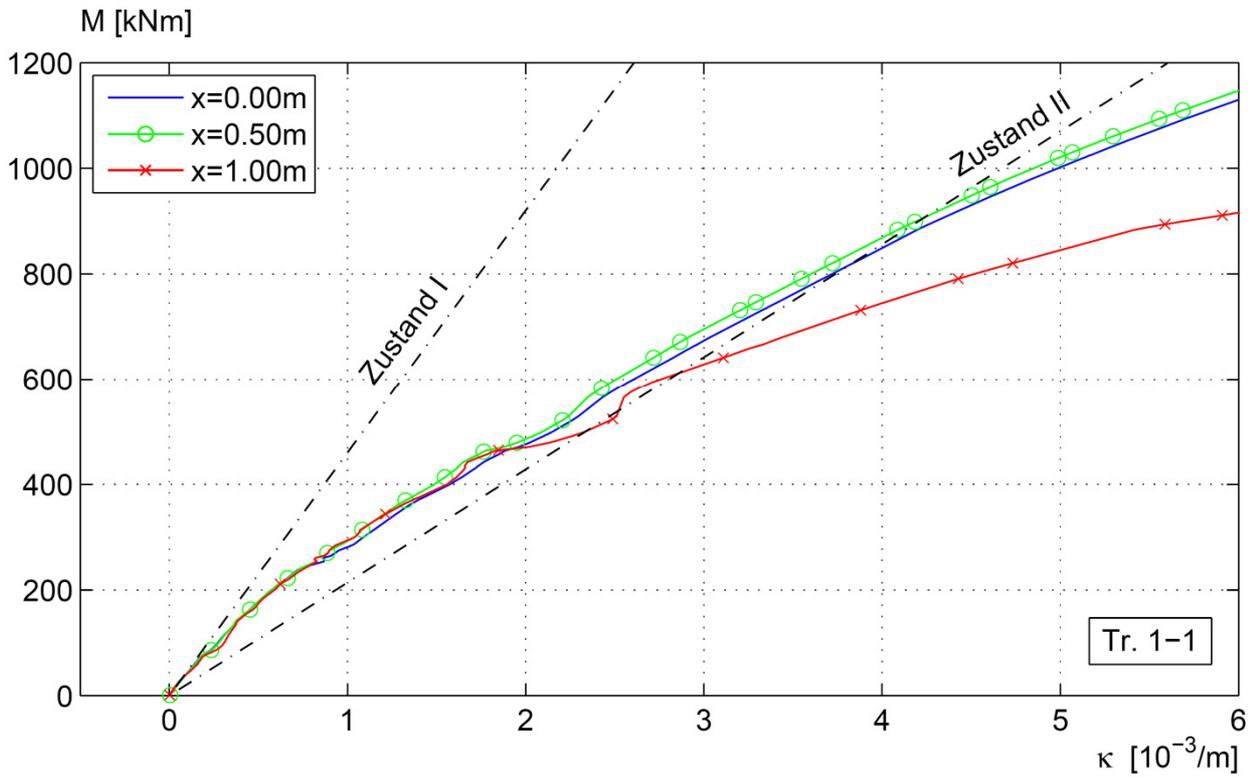


Abb. 3-3: Momenten-Krümmungsbeziehung TFT d/3 (Tr. 1-1) [14]

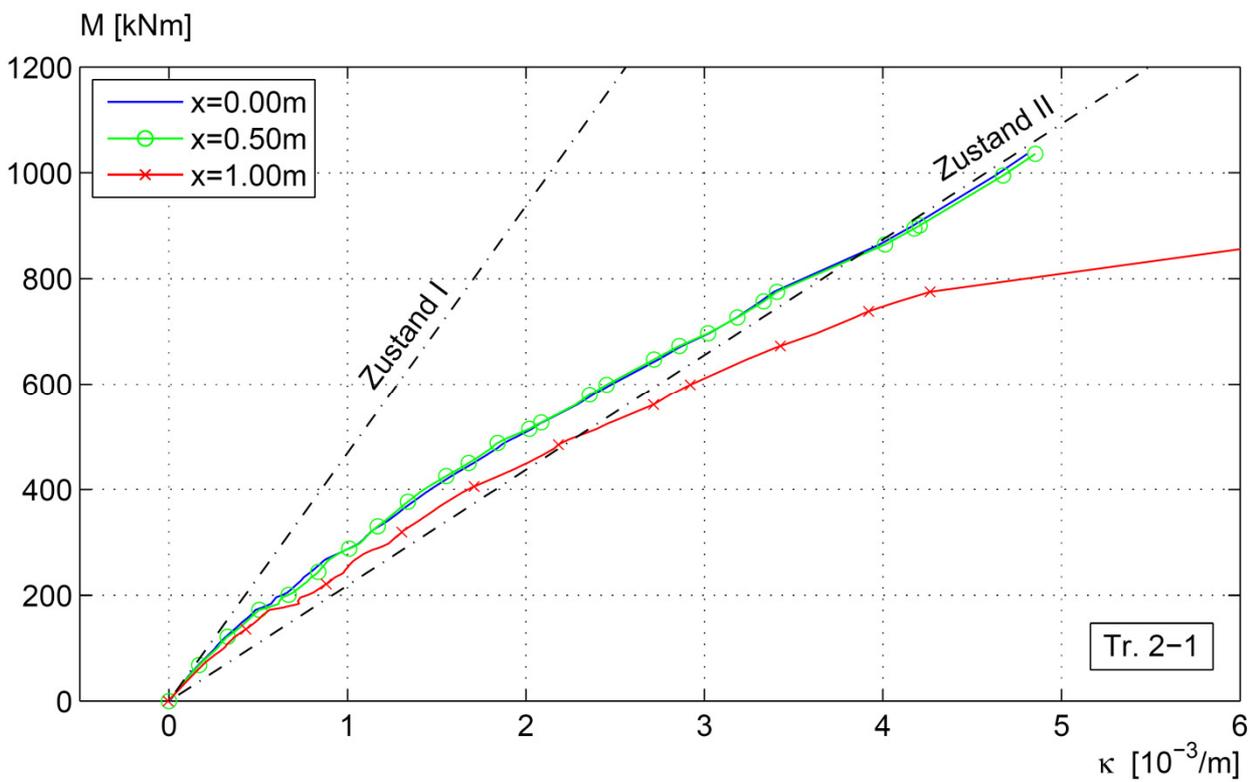


Abb. 3-4: Momenten-Krümmungsbeziehung TFT d/2 (Tr. 2-1) [14]

Lokale Effekte

Im nächsten Schritt der Auswertung wird nun das Verhalten auf der Querschnittsebene untersucht. Für jeweils einen Versuchsträger der Chargen 1 (TFT d/3) und 2 (TFT d/2) sind die Verläufe der Betonstahldehnungen jeweils im K- und im F-Bereich (Erläuterung s. nachfolgendes Kapitel 4) dargestellt. Die Angabe der Koordinaten x , y bezieht sich auf die Symmetrieachsen der Versuchsträger in der Quer- und Längsfuge (s. Abb. 3-2). Für die Interpretation ist der jeweilige Betrag der gemessenen Dehnung nicht von entscheidender Bedeutung, da er von der Lage der Messstelle zum Riss abhängig und somit nicht vergleichbar ist. Maßgeblich ist hingegen der qualitative Verlauf.

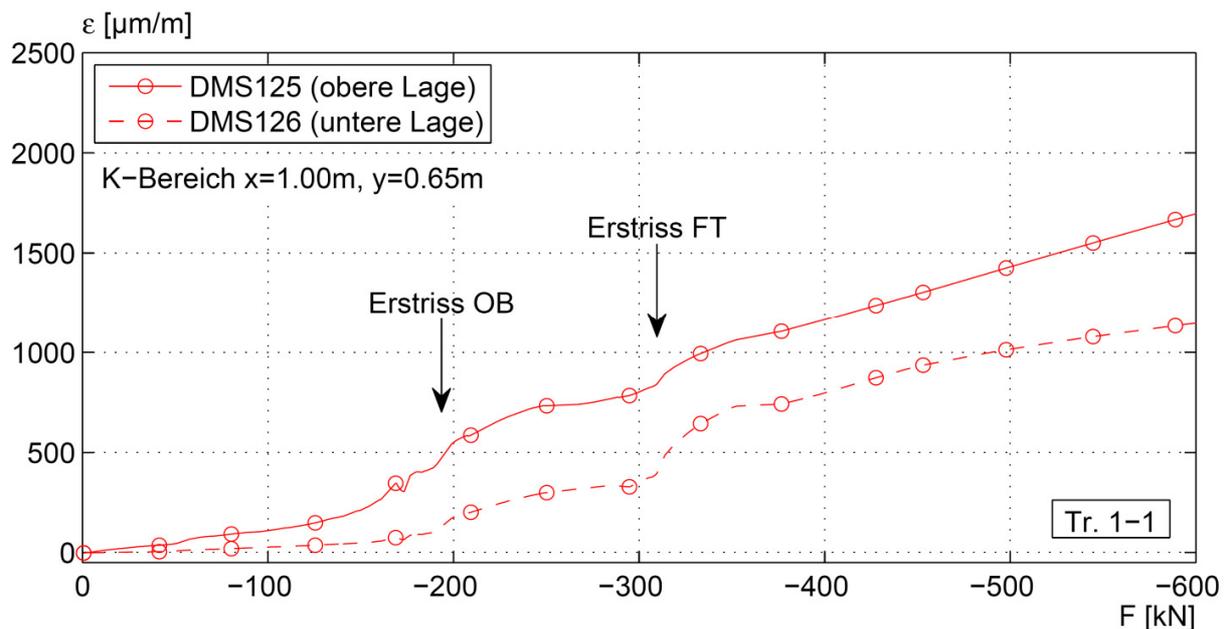


Abb. 3-5: K-Bereich TFT d/3 (Tr. 1-1) [14]

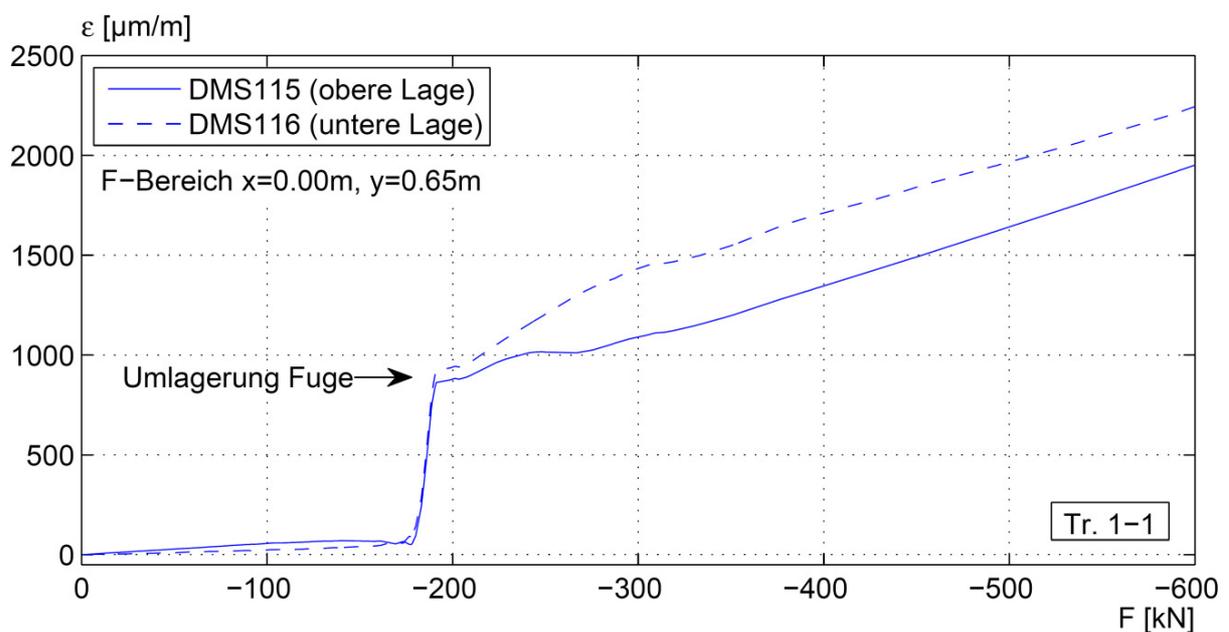


Abb. 3-6: F-Bereich TFT d/3 (Tr. 1-1) [14]

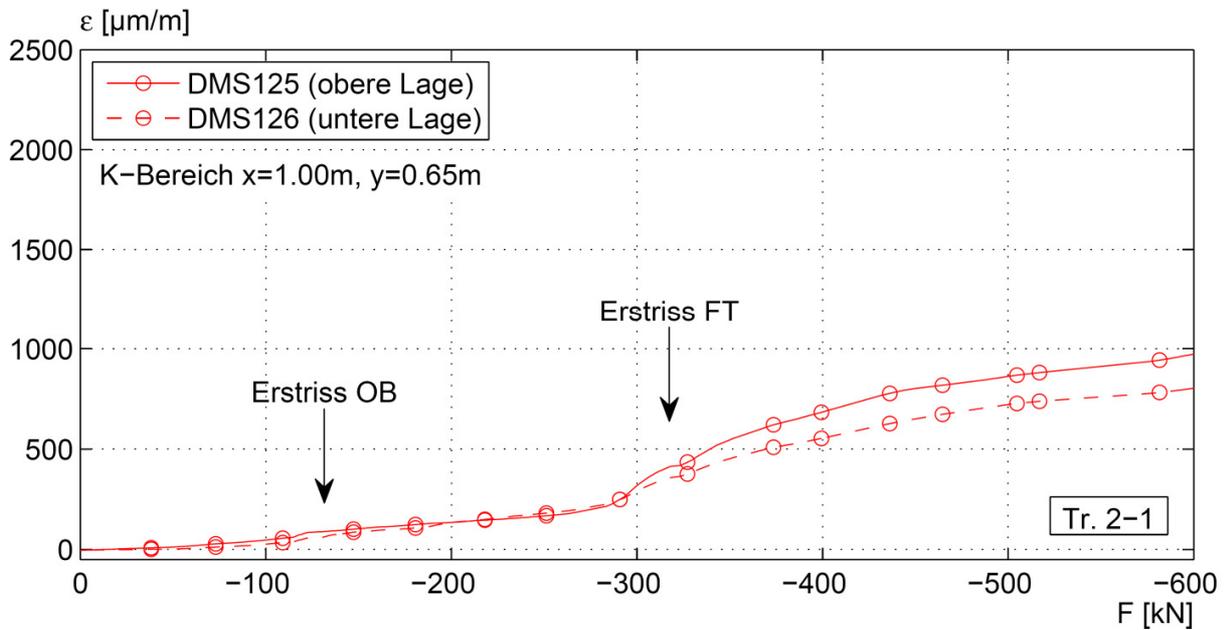


Abb. 3-7: K-Bereich TFT d/2 (Tr. 2-1) [14]

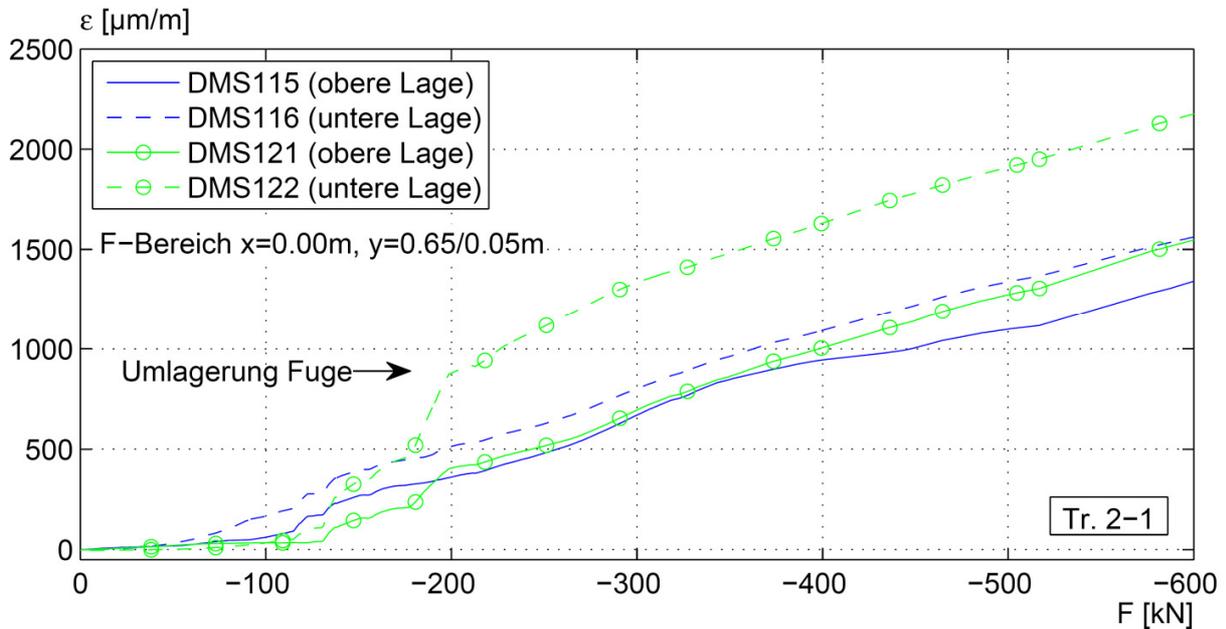


Abb. 3-8: F-Bereich TFT d/2 (Tr. 2-1) [14]

Rissbilder

Für die Interpretation der globalen und lokalen Effekte ist die Analyse der Rissbildung von großem Nutzen. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen zu den zuvor dargestellten lokalen Dehnungsverläufen jeweils den zugehörigen Bereich der Verbundträgerplatte mit der Rissbildentwicklung im maßgeblichen Beanspruchungsbereich. Zusätzlich sind jeweils die Rissbilder an den seitlichen Plattenrändern dargestellt. Eine Laststufe entspricht einer Zylinderlast von 10 kN, so dass gilt $F = LS \cdot 10kN$. Die ausführliche Darstellung der Rissbilder aller Versuchsträger ist im Anhang D enthalten. Zur besseren Erkennbarkeit ist für alle Träger der Plattenbereich im Bereich von $x = -1,50\text{ m}$ bis $+1,50\text{ m}$ und $y = +0,80\text{ m}$ bis $-0,80\text{ m}$ mit einem 10 cm-Raster überzogen.

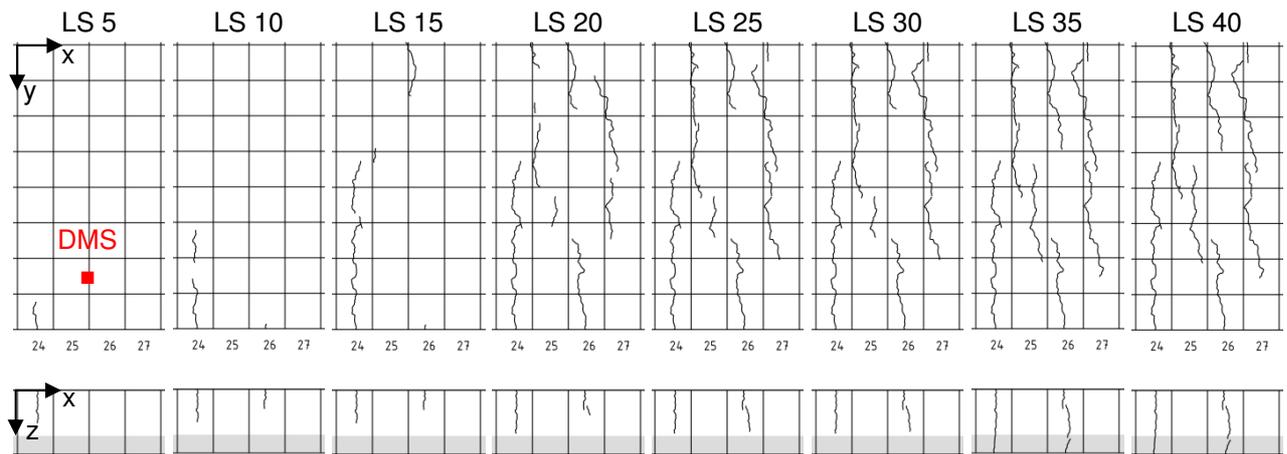


Abb. 3-9: Rissbilder K-Bereich TFT d/3 (Tr. 1-1) $x=0,80\text{ m}/y=0,00\text{ m}$ [14]

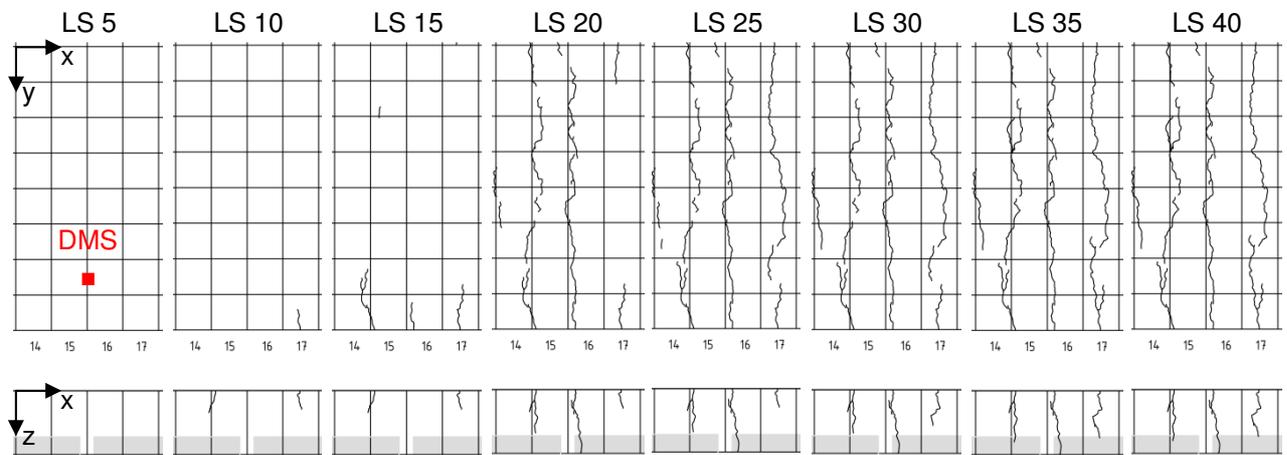


Abb. 3-10: Rissbilder F-Bereich TFT d/3 (Tr. 1-1) $x=-0,20\text{ m}/y=0,00\text{ m}$ [14]

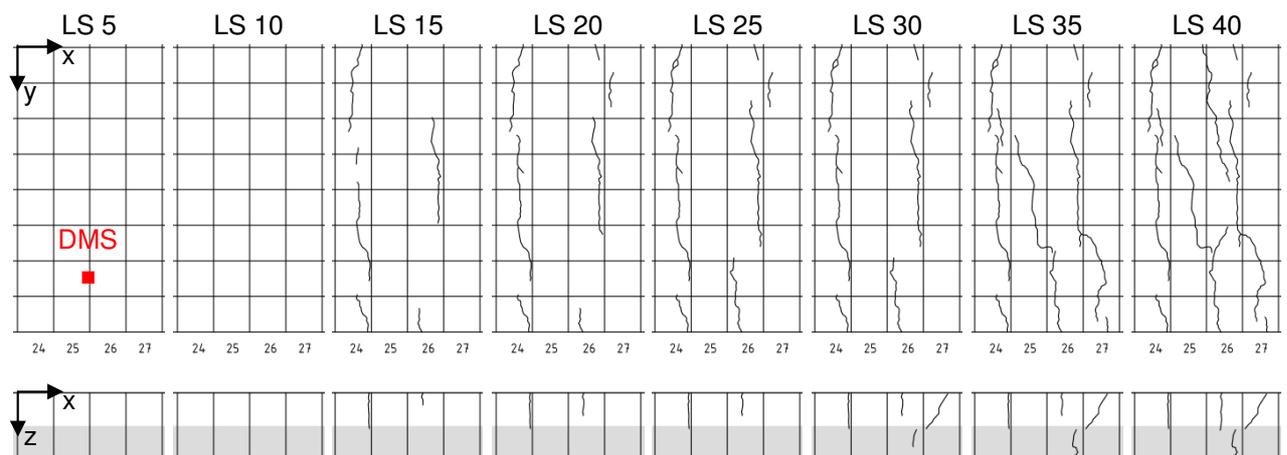


Abb. 3-11: Rissbilder K-Bereich TFT d/2 (Tr. 2-1) $x=0,80\text{ m}/y=0,00\text{ m}$ [14]

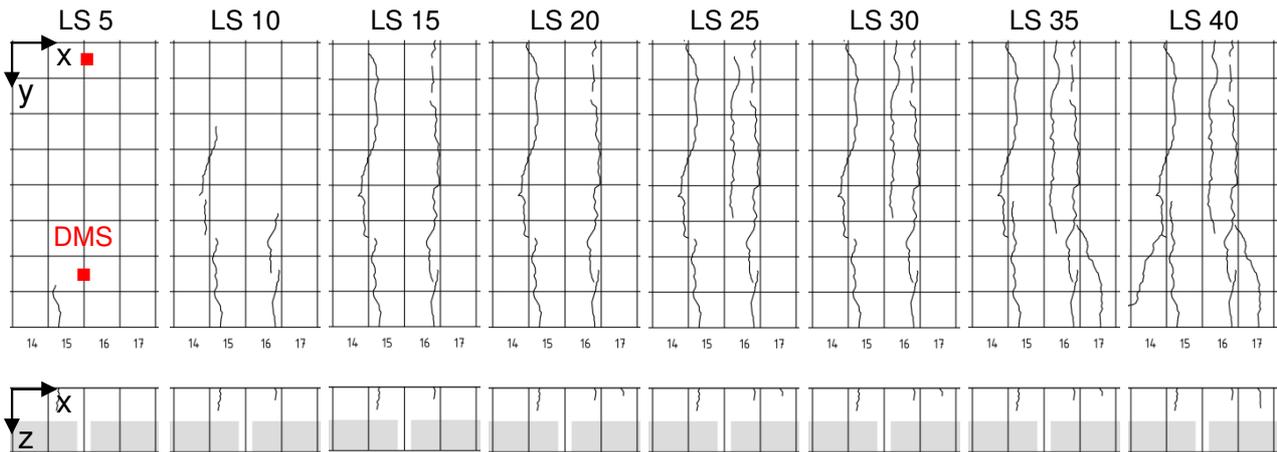


Abb. 3-12: Rissbilder F-Bereich TFT d/2 (Tr. 2-1) $x=-0,20\text{ m}/y=0,00\text{ m}$ [14]

Rissbreiten

Die Bestimmung der Rissbreiten kann sowohl durch direkte Messung als auch durch Auswertung der sensorischen Weggrößen erfolgen. Ein Überblick über die Verfahren wird in [11] gegeben.

Für die Versuchsträger der Charge 1 wurde keine direkte Messung der Rissbreiten vorgenommen. Es kann gezeigt werden, dass Rissbreiten aus direkter Messung gut mit auf der Betonoberfläche gemessenen Dehnungen korrelieren, wenn der Riss relativ mittig durch den Beton-DMS läuft. Die so bestimmten Rissbreiten für die TFT-Träger der Charge 1 sind in Abb. 3-13 dargestellt.

Die Rissbreiten für Charge 2 wurden durch direkte Messung bestimmt.

Die vollständige Darstellung aller gemessenen Rissbreiten zeigt Anhang C.

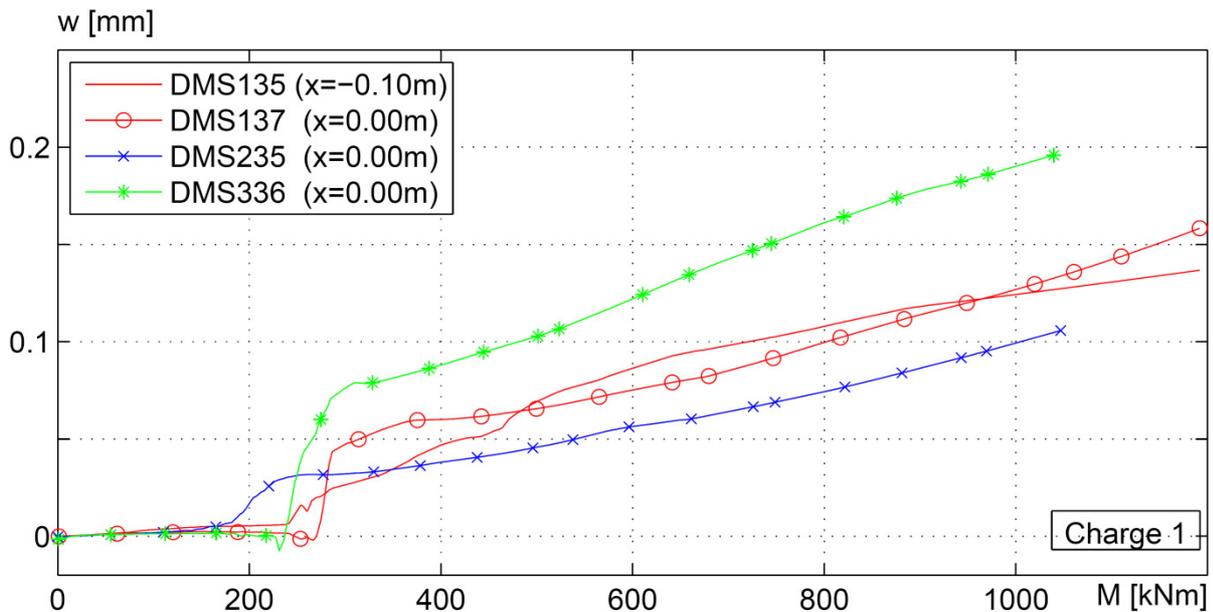


Abb. 3-13: Rissbreiten aus Beton-DMS TFT d/3 (Charge 1) [14]

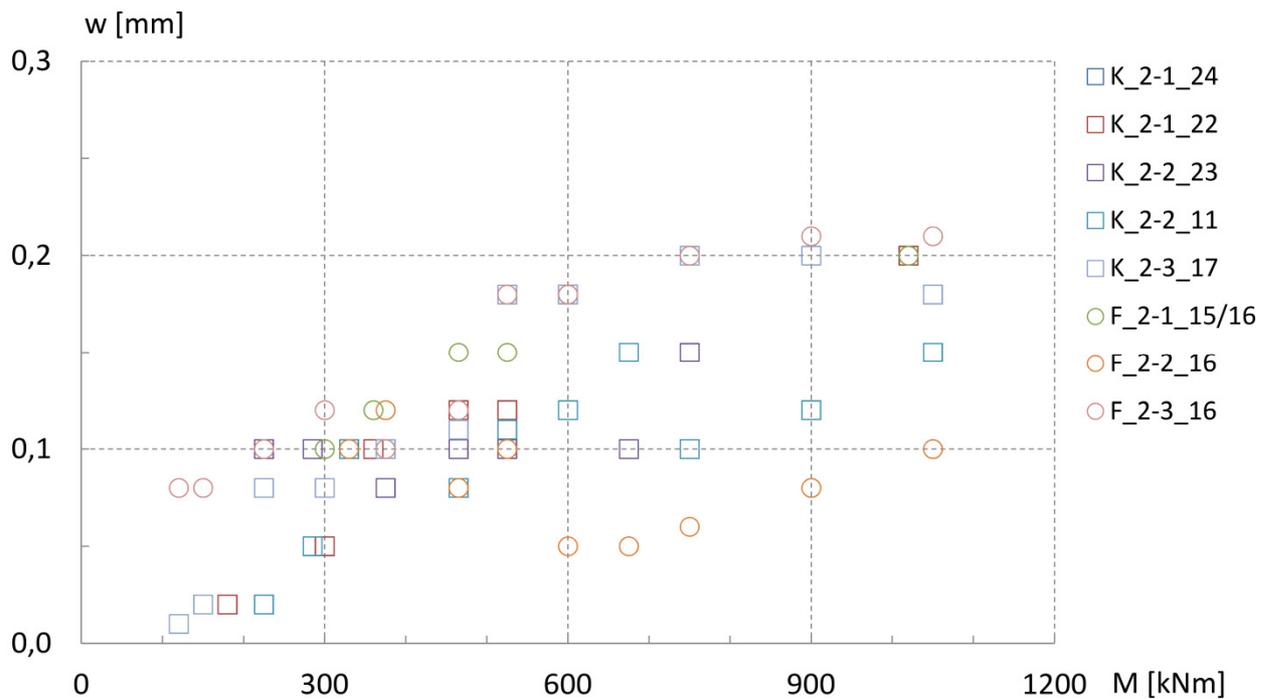


Abb. 3-14: Rissbreiten aus Risslupenmessung TFT $d/2$ (Charge 2) [14]

Ergänzende Untersuchungen

Querbewehrung

Für alle Versuchsträger zeigt sich der – bekannte – Effekt, dass die Lage der Risse weitgehend mit der Lage der Querbewehrung übereinstimmt. Der Grund dieses Zusammenhanges ist die Störung des monolithischen Gefüges im Bereich der Quereisen. Im vorliegenden Fall wird der Einfluss durch die relativ geringe Betondeckung noch verstärkt. Um den Zusammenhang deutlicher aufzuzeigen, wurde die Querbewehrung am Teilfertigteilträger 4-2 auf der in Längsrichtung gesehen rechten Trägerhälfte mit unregelmäßigem Abstand eingebaut. Der mittlere Abstand beträgt wie auf der linken Hälfte $\mu_s = 20 \text{ cm}$. Die Standardabweichung beträgt $\sigma_s = 5 \text{ cm}$, also $Var = 0,25$. Der Zusammenhang zwischen Rissbildung und Querbewehrung ist in Abb. 3-15 dargestellt.

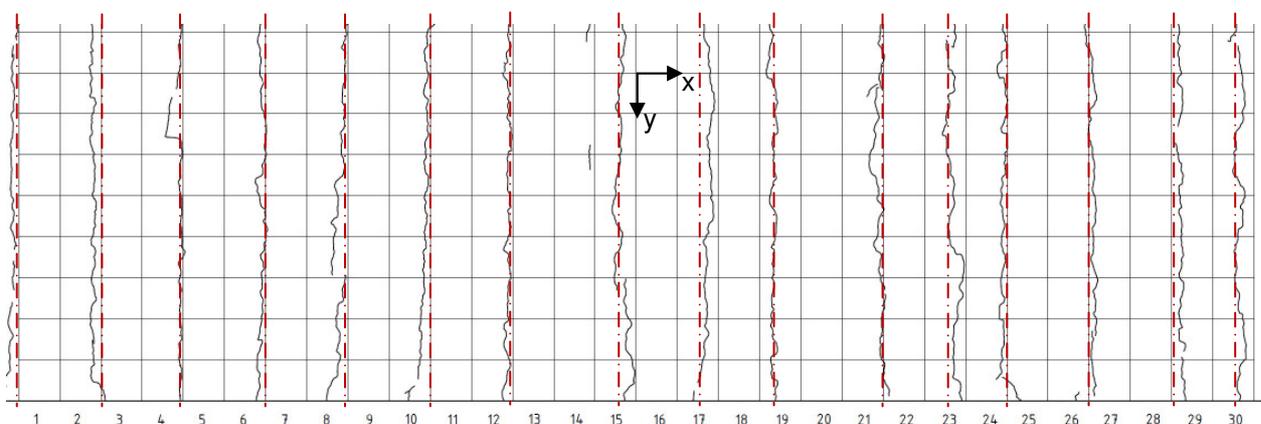


Abb. 3-15: Tr. 4-2 mit abgeschlossenem Erstrissbild und Lage der Querbewehrung [14]

Längsbewehrung

Verbundträger mit Teilfertigteilen weisen innerhalb des gerissenen bzw. teilgerissenen Gurtes ein ausgeprägtes Umlagerungsverhalten auf (s. nachfolgendes Kapitel 4). Um Rückschlüsse auf den Einfluss des Längsbewehrungsgrades ziehen zu können, wurde die Längsbewehrung der Ortbetonergänzung am Teilfertigteilträger 4-2 auf der in Querrichtung gesehen linken Trägerhälfte nur einlagig eingebaut. Den Zusammenhang zwischen Bewehrungsgrad und Rissentstehung sowie Risswachstum zeigt Abb. 3-16. Die Einflüsse auf die Rissbreiten sind in Abb. 3-17 zu erkennen.

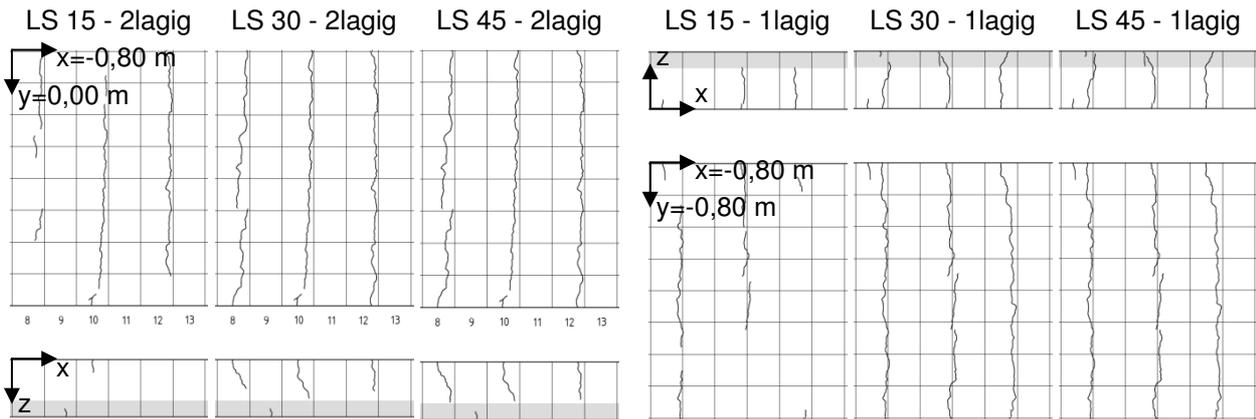


Abb. 3-16: Einfluss des Bewehrungsgrades auf die Rissbildung: links $A_{s2}=A_{s1}$, rechts $A_{s2}=0$ [14]

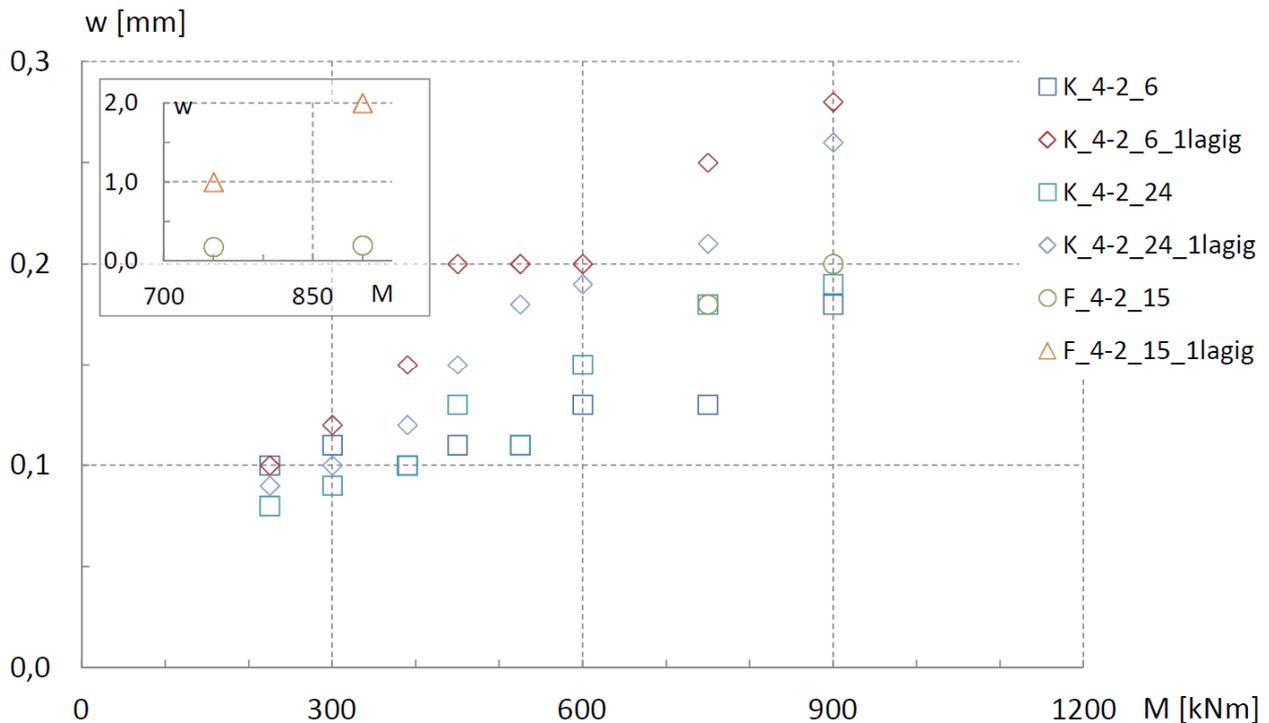


Abb. 3-17: Einfluss des Bewehrungsgrades auf die Rissbreiten [14]

Lastwiederholungen

Das Versuchskonzept und der Arbeitsplan des Forschungsprojektes sahen keine experimentellen Untersuchungen zum Einfluss langandauernder oder wiederholter Belastungen vor bzw. wären diese in die letztlich zerstörenden Belastungsversuche auch nicht einzugliedern gewesen. Um den grundsätzlichen Einfluss zumindest für wiederholte Beanspruchungen und zumindest im Ansatz aufzuzeigen, wurden an ausgewählten Trägern mehrstufige Ent- und Wiederbelastungen im Prüflastbereich zwischen 500 und 100 kN aufgebracht. Der Zeitpunkt dieser zusätzlichen Untersuchungen wurde so gewählt, dass die Erstrissbildung abgeschlossen war. Der Einfluss lässt sich anschaulich durch die Trägerverformungen darstellen.

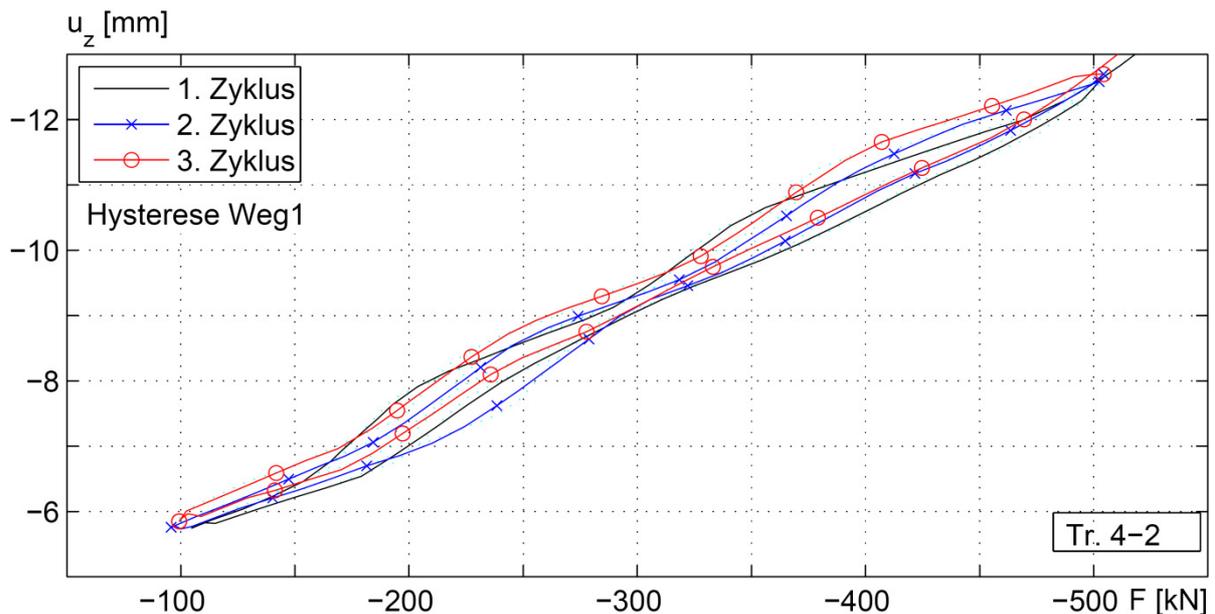


Abb. 3-18: Enddurchbiegung unter Einfluss von Lastwiederholungen ($x=2,50$ m) [14]

Schwinden

Zur Beschreibung der Schwindbeanspruchungen müssen die beiden Betone separat berücksichtigt werden (s. nachfolgendes Kapitel 4). Der resultierende Beanspruchungszustand ist maßgeblich vom Alter der Teilfertigteile bei Herstellung des Verbundes abhängig. Zur Untersuchung des Einflusses dieses möglicherweise wichtigen Entwurfsparameters wurden am Teilfertigteilträger 4-2 Fertigteile mit einem großen Betonalter von rund 3,5 Jahren verwendet.

3.2.2 Eigenspannungen

Die Lage der Dehn- und Temperaturmessstellen an den untersuchten Teilfertigteilträgern ist in Abb. 3-19 exemplarisch für Träger 1-3 dargestellt. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Hydrations- und Schwinddehnungen für ausgewählte Träger der Chargen 1 und 2. Zu beachten ist der lokale Schwindgradient am Träger 2-1.

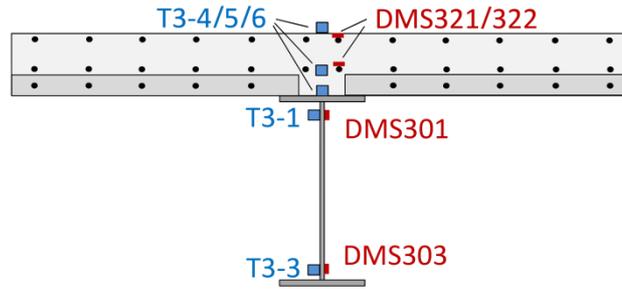


Abb. 3-19: Lage der Messstellen am Träger 1-3 [14]

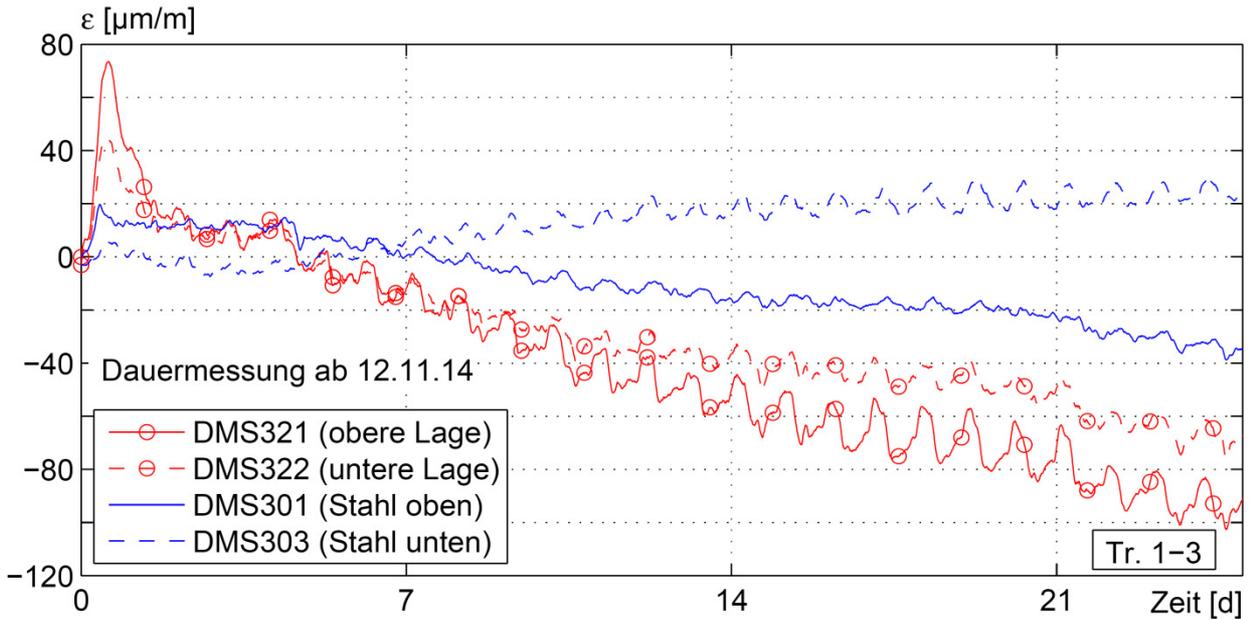


Abb. 3-20: Dehnungen infolge Hydratation und Schwinden TFT d/3 (Tr. 1-3, x=0,00 m) [14]

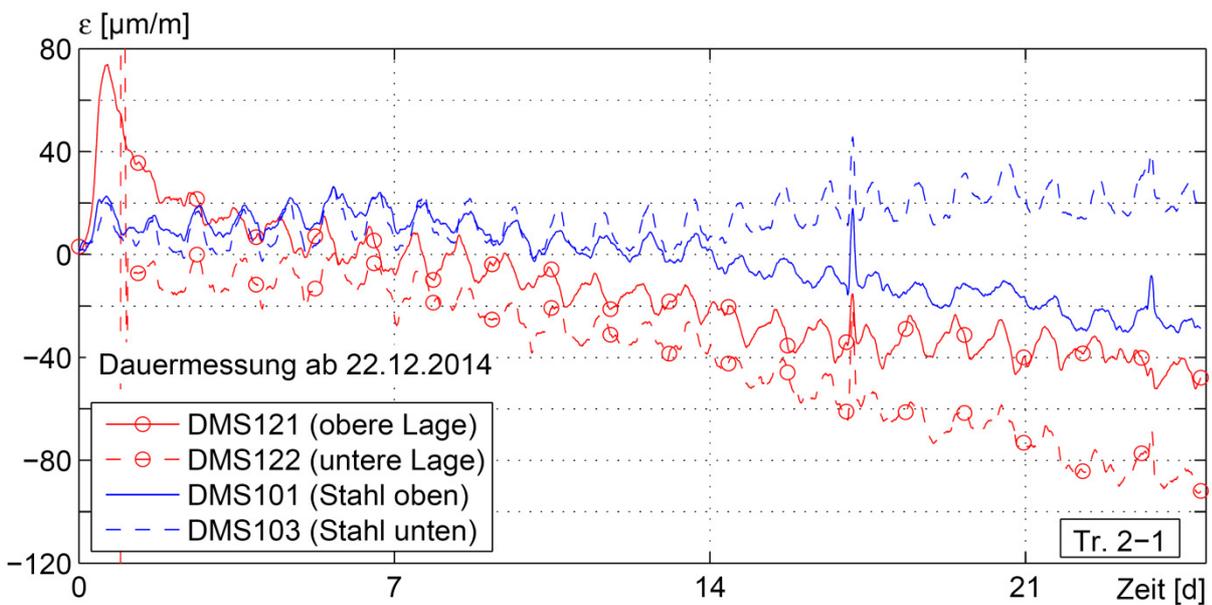


Abb. 3-21: Dehnungen infolge Hydratation und Schwinden TFT d/2 (Tr. 2-1, x=0,00 m) [14]

Die folgenden Abbildungen zeigen die Temperaturgradienten an ausgesuchten Trägern der Chargen 1 und 2 für das Ein- und Abfließen der Hydratationswärme. Zusätzlich ist der Gang der Tagestemperaturen dargestellt.

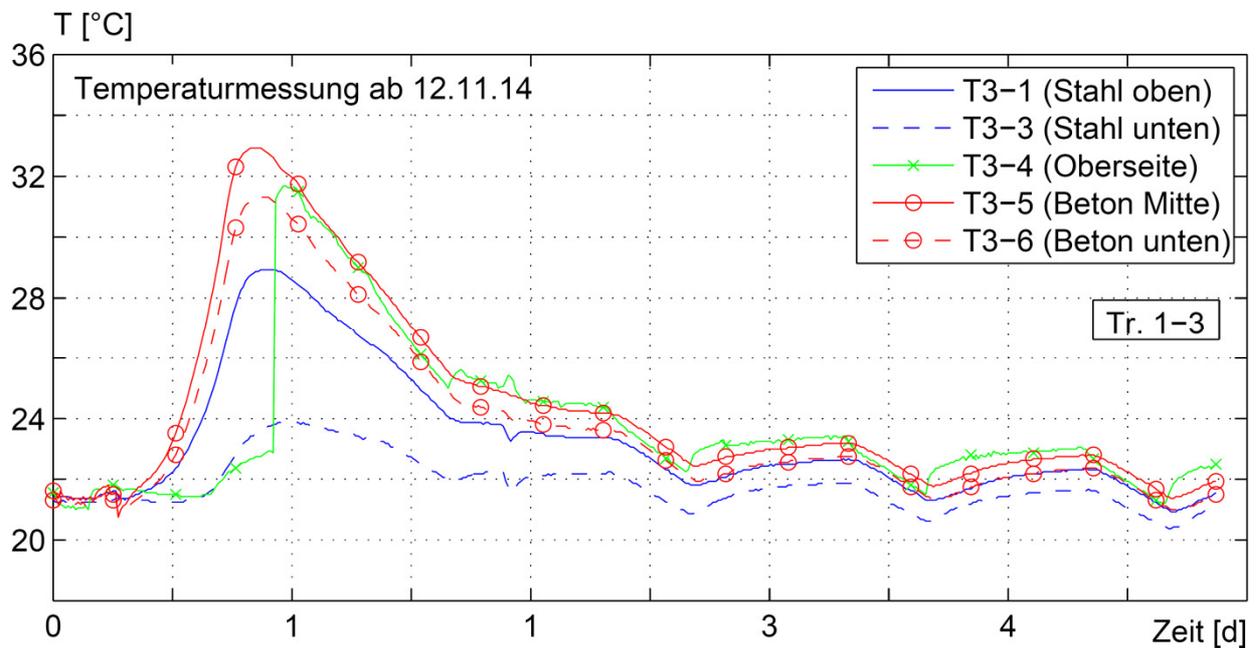


Abb. 3-22: Temperaturverlauf TFT d/3 (Tr. 1-3, $x=0,00$ m) [14]

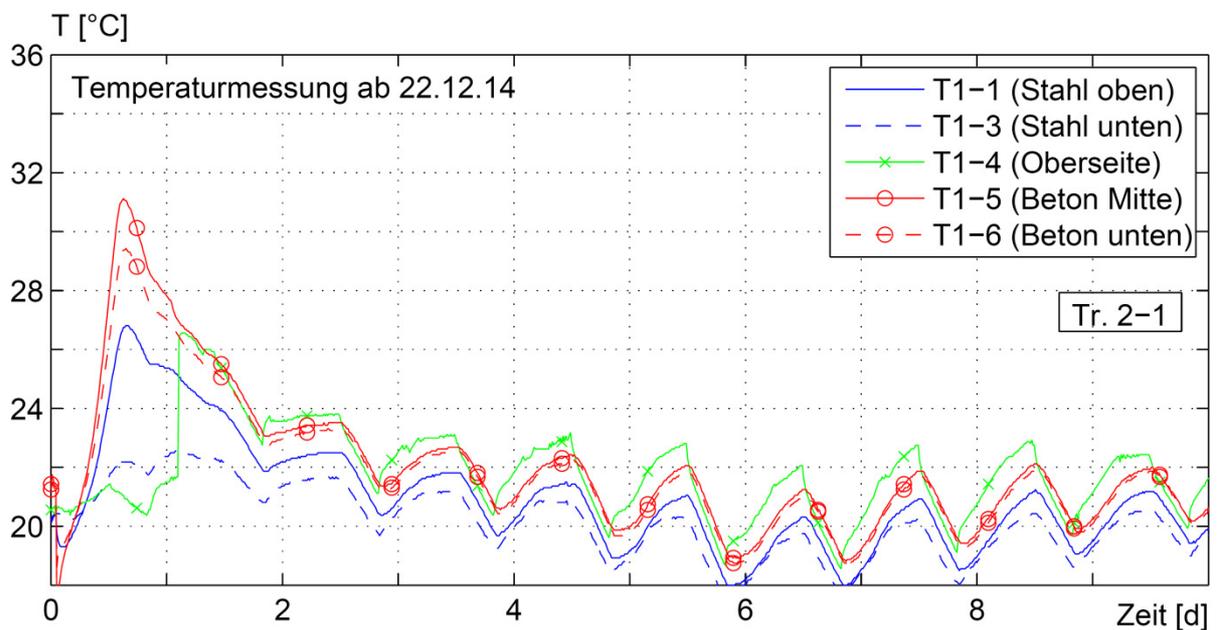


Abb. 3-23: Temperaturverlauf TFT d/2 (Tr. 2-1, $x=0,00$ m) [14]

3.3 Versuche an Ganzfertigteilträgern

3.3.1 Belastungsversuche

Mittleres Bauteilverhalten

Die folgende Abbildung zeigt die Momenten-Krümmungsbeziehung für einen GFT-Träger der Charge 3 (vgl. Abschnitt 3.2). Weitere Verläufe sind im Anhang B enthalten.

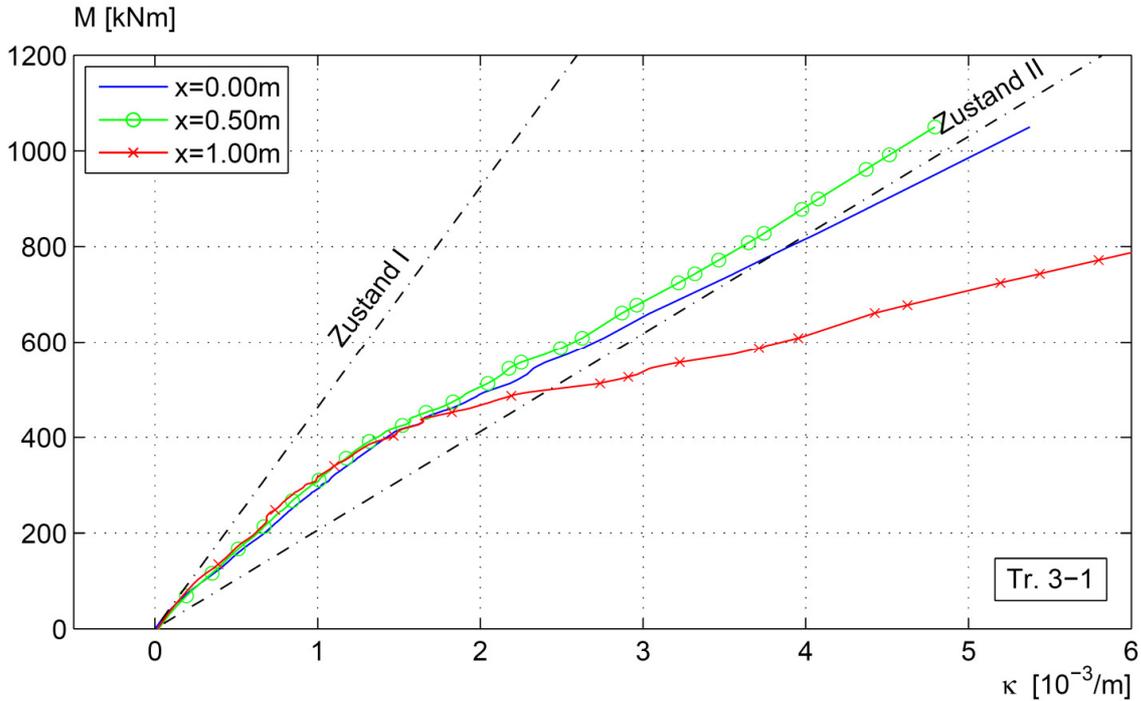


Abb. 3-24: Momenten-Krümmungsbeziehung GFT (Tr. 3-1) [14]

Lokale Effekte

Die folgenden Abbildungen zeigen die Verläufe der Betonstahldehnungen für einen GFT-Träger der Charge 3 jeweils im K- und im F-Bereich (vgl. Abschnitt 3.2).

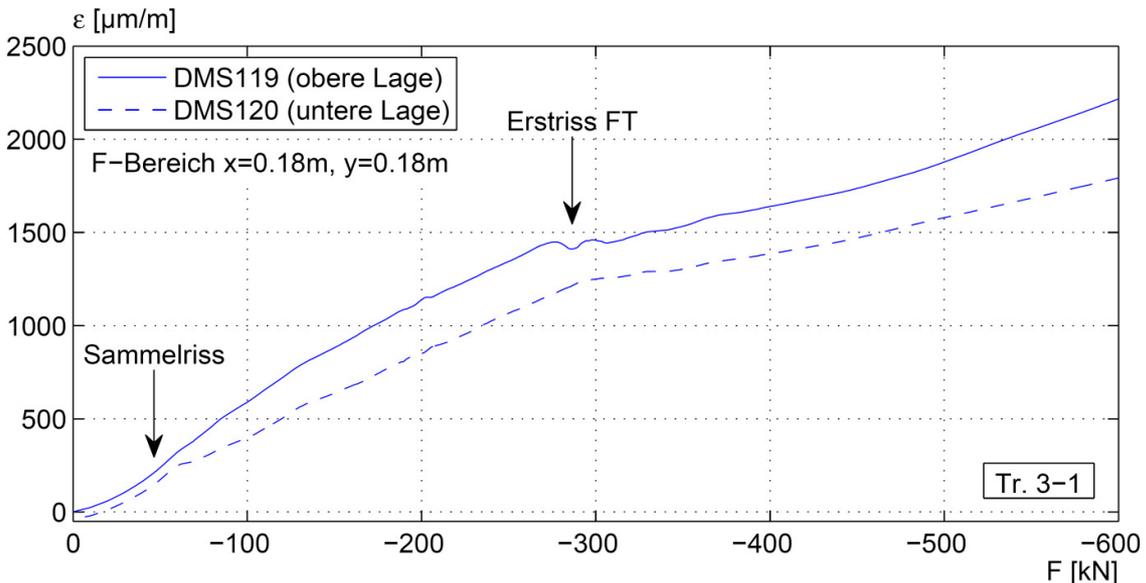


Abb. 3-25: K-Bereich GFT (Tr. 3-1) [14]

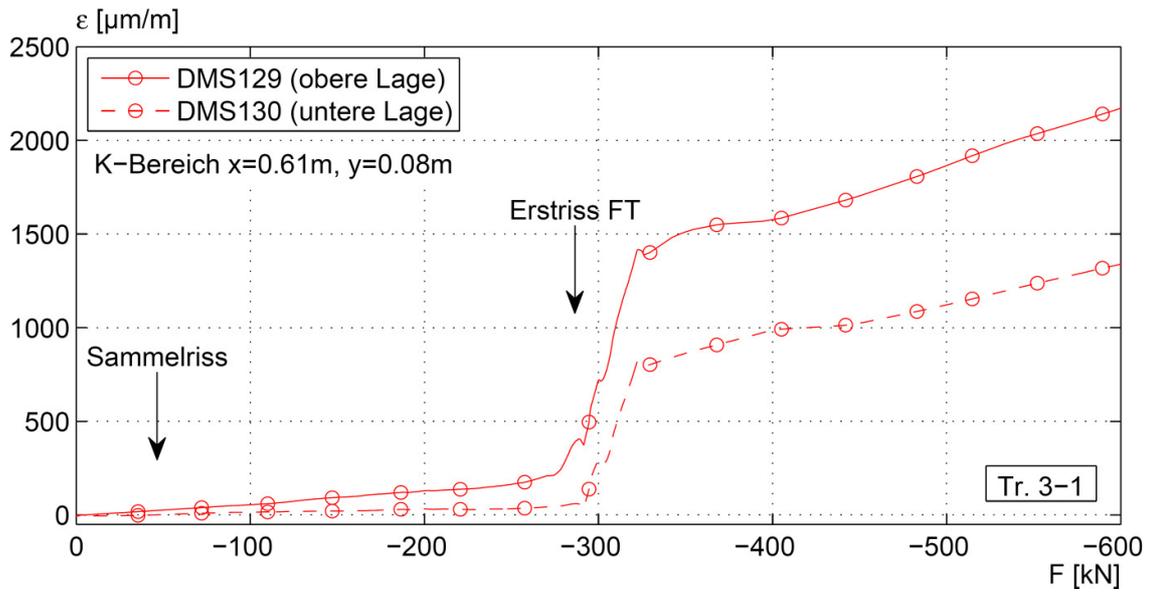


Abb. 3-26: F-Bereich GFT (Tr. 3-1) [14]

Rissbilder

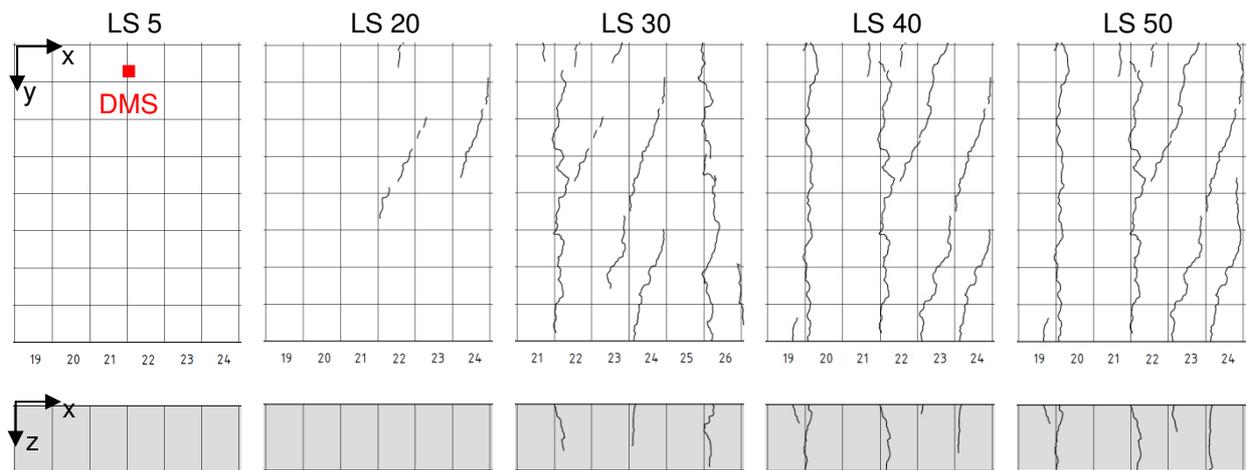


Abb. 3-27: Rissbilder K-Bereich GFT (Tr. 3-1) $x=0,30\text{ m}/y=0,00\text{ m}$ [14]

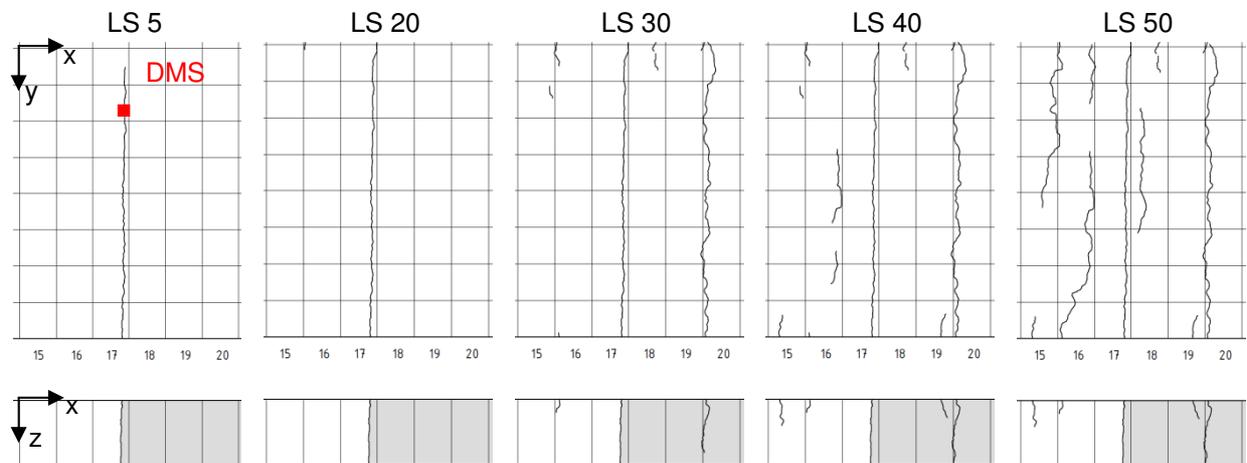


Abb. 3-28: Rissbilder F-Bereich GFT (Tr. 3-1) $x=-0,10\text{ m}/y=0,00\text{ m}$ [14]

Die vorstehenden Abb. 3-27 und Abb. 3-28 zeigen zu den zuvor dargestellten lokalen Dehnungsverläufen jeweils den zugehörigen Bereich der Verbundträgerplatte mit der Rissbildentwicklung im maßgeblichen Beanspruchungsbereich (vgl. Abschnitt 3.2).

Rissbreiten

Die Rissbreiten für Charge 3 wurden durch direkte Messung bestimmt (Abb. 3-29).

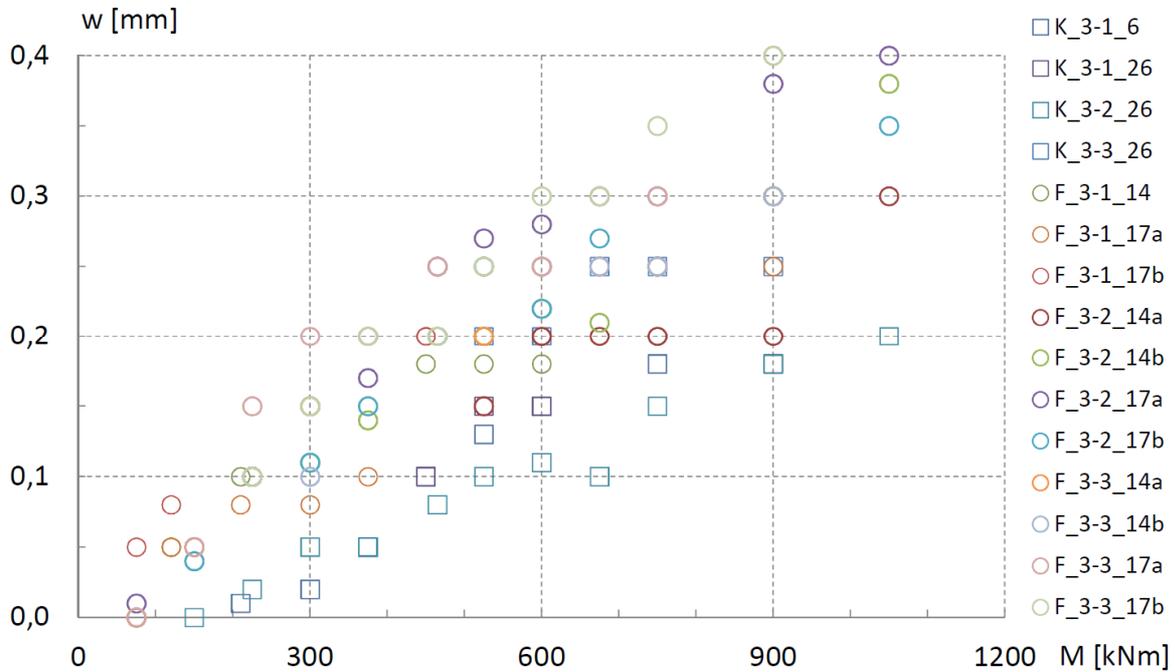


Abb. 3-29: Rissbreiten GFT (Charge 3) [14]

Ergänzende Untersuchungen

Lastwiederholungen

Den Einfluss von Lastwiederholungen veranschaulicht Abb. 3-30 (vgl. Abschnitt 3.2).

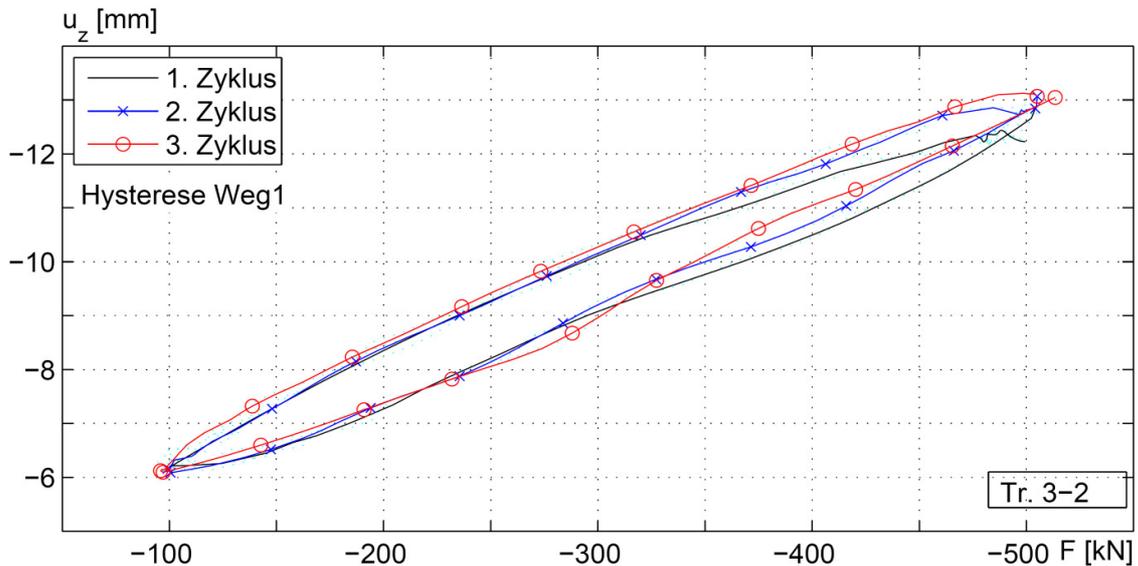


Abb. 3-30: Enddurchbiegung unter Einfluss von Lastwiederholungen (x=2,50 m) [14]

Fugengeometrie

Um den grundsätzlichen Einfluss der Fugenabmessung zumindest im Ansatz aufzuzeigen, wurde ein GFT-Träger mit vergrößerter Querfugenbreite untersucht. Den Vergleich der Rissbilder mit einem GFT-Träger normaler Querfugenbreite zeigt Abb. 3-31.

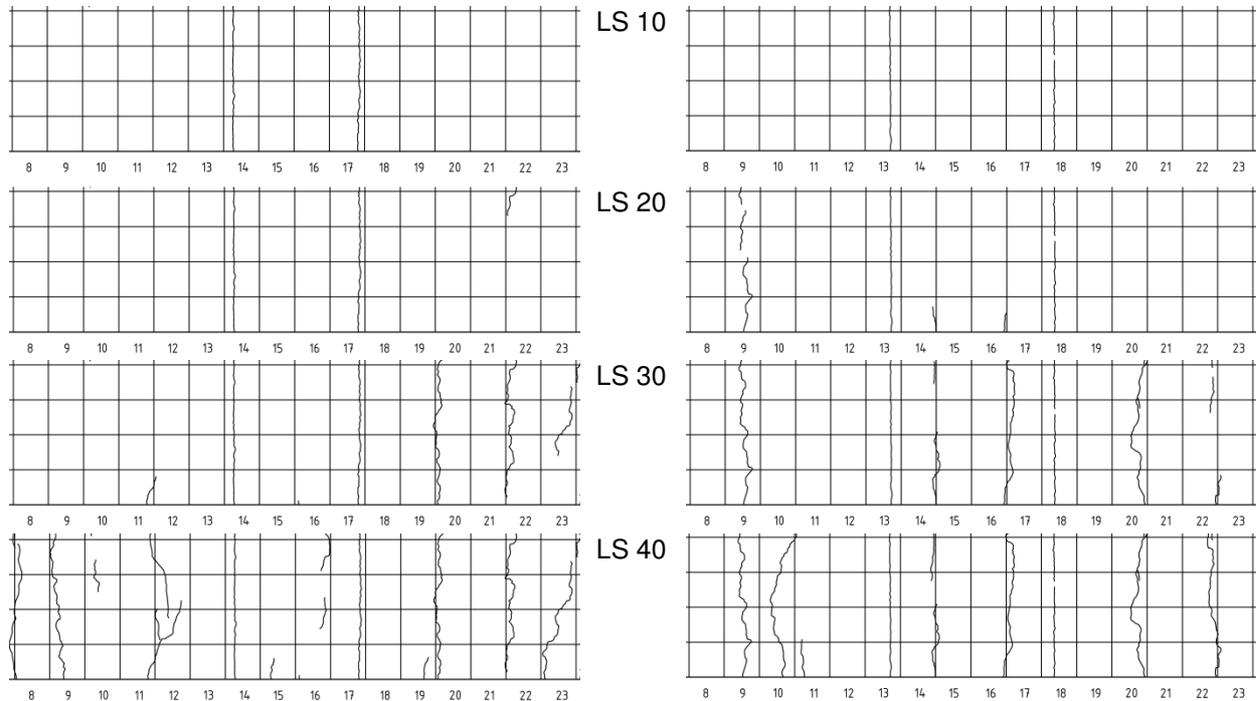


Abb. 3-31: Einfluss der Fugengeometrie links: Tr.3-1, rechts: Tr.4-1 [14]

3.3.2 Eigenspannungen

Die Lage der Dehn- und Temperaturmessstellen an den untersuchten Ganzfertigteilträgern ist in Abb. 3-32 dargestellt. Die nachfolgenden Abbildungen Abb. 3-33, Abb. 3-34 und Abb. 3-35 zeigen die Hydrations- und Schwinddehnungen jeweils im F- und im K-Bereich sowie den Temperaturgradienten.

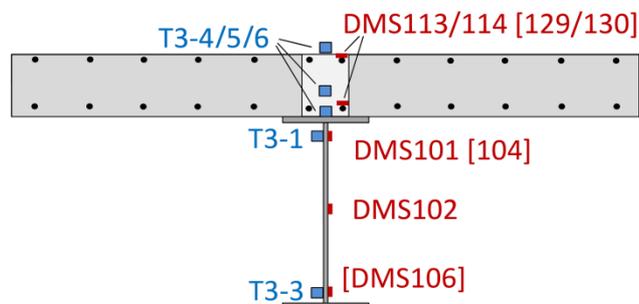


Abb. 3-32: Lage der Messstellen an den Trägern 3-1 und 3-3 [14]

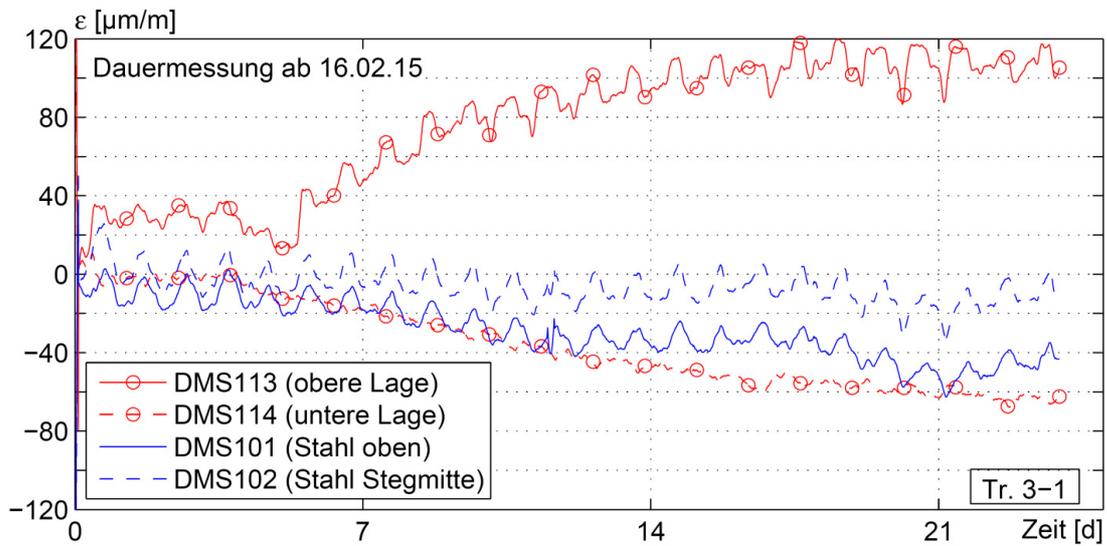


Abb. 3-33: Dehnungen infolge Hydratation und Schwinden GFT (Tr. 3-1, x=-0,18 m) [14]

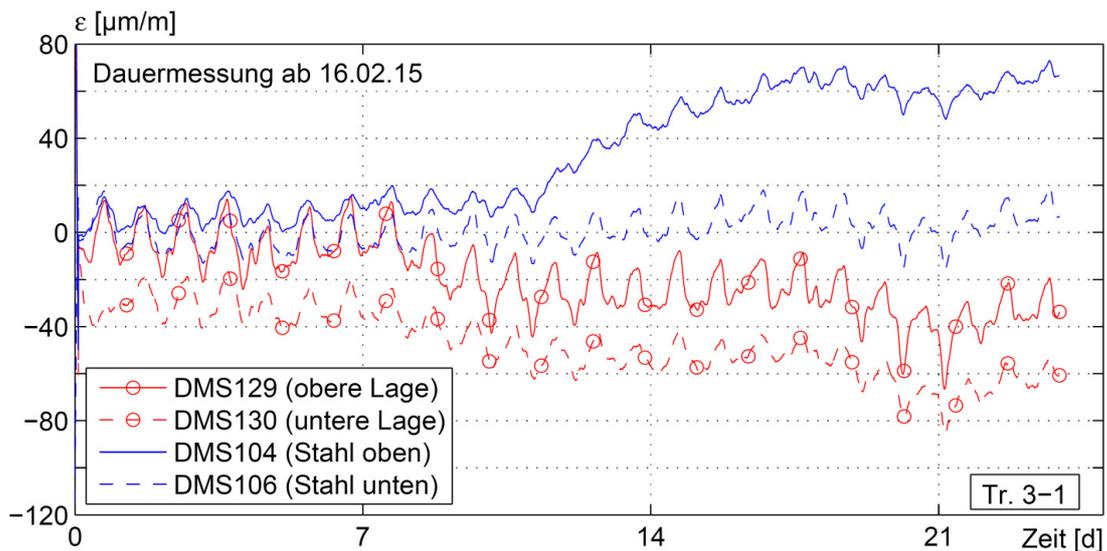


Abb. 3-34: Dehnungen infolge Hydratation und Schwinden GFT (Tr. 3-1, x=0,61 m) [14]

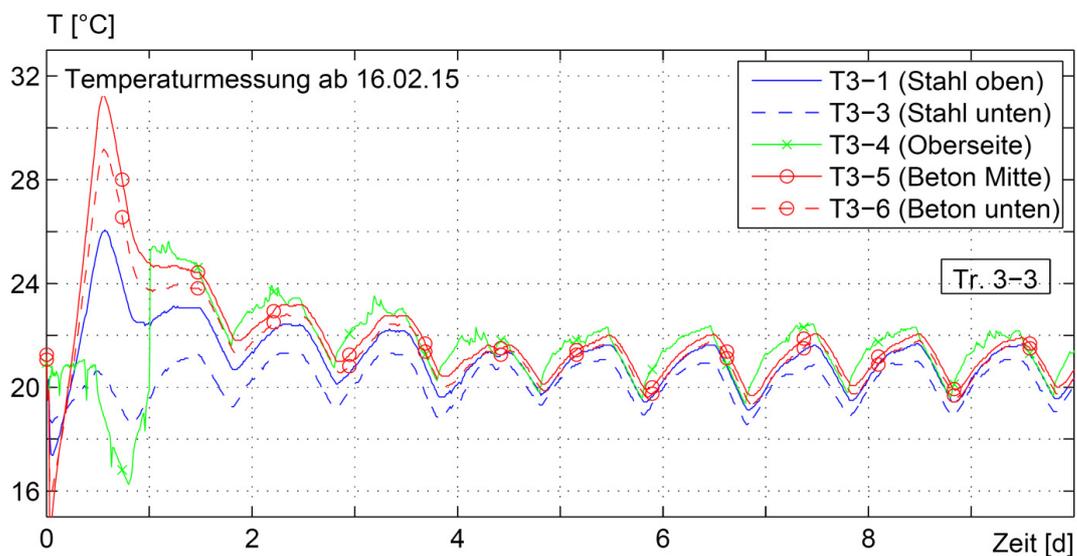


Abb. 3-35: Temperaturverlauf GFT (Tr. 3-3, x=0,00 m) [14]

4 Teilprobleme

4.1 Allgemeines

Die Darstellung der Versuchsergebnisse in Kapitel 3 zeigt zunächst, dass sich das Tragverhalten von Verbundträgern mit Fertigteilen im Gebrauchszustand nicht grundlegend von herkömmlichen Verbundträgern unterscheidet. Es gibt jedoch spezifische Merkmale sowohl auf globaler Ebene – d. h. im mittleren Bauteilverhalten – als auch im lokalen Bereich – also auf Querschnittsebene – die genauer analysiert werden müssen. Hierüber wurde bereits in [12], [13] berichtet.

Zunächst muss grundsätzlich zwischen den beiden Konstruktionsformen Verbundträger mit Teilfertigteilen (TFT) und Verbundträger mit Ganzfertigteilen (GFT) unterschieden werden. Weiterhin muss innerhalb des Bauteils zwischen den Fugengebieten (F) und Bereichen außerhalb des Einflusses der Fugen unterschieden werden. Letztere weisen in Trägerlängsrichtung eine kontinuierliche Dehnungsverteilung auf und werden als Kontinuitätsbereiche (K) bezeichnet. Somit ergibt sich die in Abb. 4-1 dargestellte Unterteilung.

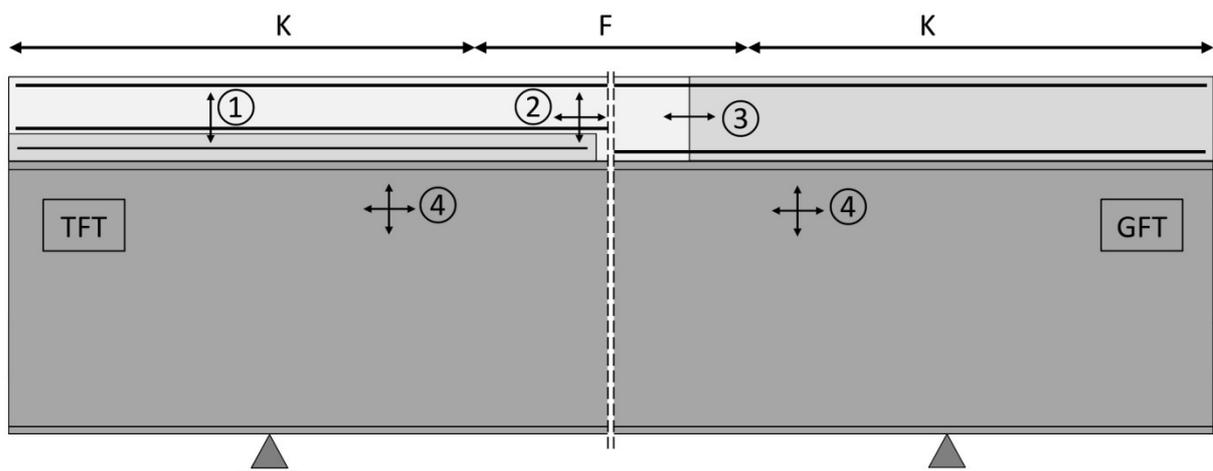


Abb. 4-1: Übersicht [14]

Auf Grundlage dieser Strukturierung lassen sich nach genauer Analyse der Versuchsergebnisse die folgenden 4 Teilprobleme identifizieren:

1. Zustand I/II (TFT),
2. Kerbwirkung (TFT),
3. Sammelrissbildung (GFT),
4. Eigenspannungen (TFT, GFT).

Die wesentlichen Merkmale dieser Teilprobleme werden nachfolgend kurz beschrieben. Eine ausführlichere Analyse kann [14] entnommen werden.

4.2 Teilfertigteile

4.2.1 Zustand I/II

Die Rissbilder an den Flanken der Versuchsträger mit Teilfertigteilen zeigen, dass die Rissentstehung nicht mit der herkömmlichen Modellvorstellung eines durchlaufenden Trennrisses beschrieben werden kann. Die Rissbildung in den Teilfertigteilen erfolgt unter einem deutlichen höheren Beanspruchungsniveau. Für die nachfolgenden Beschreibungen ist es daher sinnvoll, die im Abschnitt 2.2 vorgenommene Begriffsbestimmung zu erweitern. Dies geschieht durch eine Differenzierung des gerissenen Zustands II nach zwei Unterzuständen I/II und II/II.

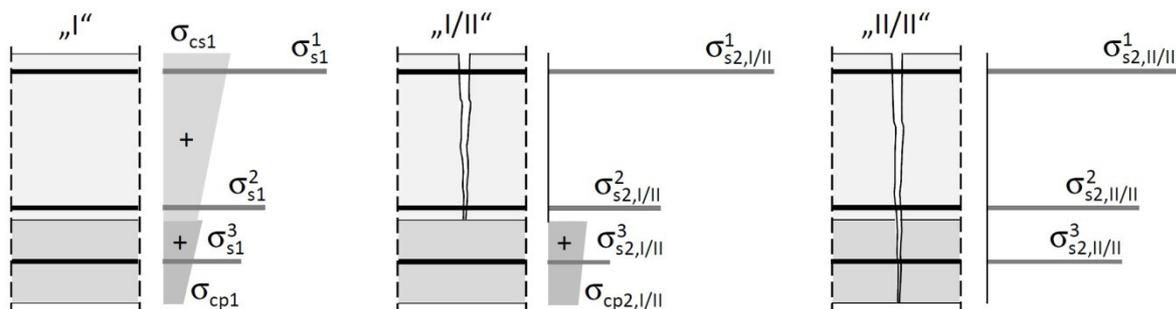


Abb. 4-2: Phasen der Erstrissbildung - links: Zustand I/II, rechts: Zustand II/II [14]

Die Abnahme der Rissfortschrittsneigung an der Verbundfuge wird im Wesentlichen durch drei Aspekte hervorgerufen [14]:

- die bezogene Festigkeit (Verhältnis aus Zugfestigkeit und Steifigkeit),
- Eigenspannungen,
- Mikroschlupf.

Zur rechnerischen Erfassung sind folgende Fragestellungen zu beantworten:

- Wie kann die verzögerte Rissbildung der Teilfertigteile bei der Bilanzierung der Umlagerungen im Riss berücksichtigt werden?
- Wie wirkt sich die versteifende Wirkung der noch ungerissenen Fertigteile auf das mittlere Bauteilverhalten aus?
- Wie kann der Erstrisszustand im Teilfertigteil beschrieben werden?
- Wie kann das mittlere Bauteilverhalten bei fortschreitender Erstrissbildung in den Teilfertigteilen erfasst werden?

4.2.2 Kerbwirkung

An den Stößen der Teilfertigteile wird die Bewehrung meist nicht durchgeführt. Die auf das Teilfertigteil entfallende Gurtkraft muss also an der Fuge auf den Restgurtquerschnitt umgelagert werden. Dieser Umlagerungseffekt entspricht in Ursache und Wirkung einer *Kerbe* und kann wie in Abb. 4-3 dargestellt beschrieben werden.

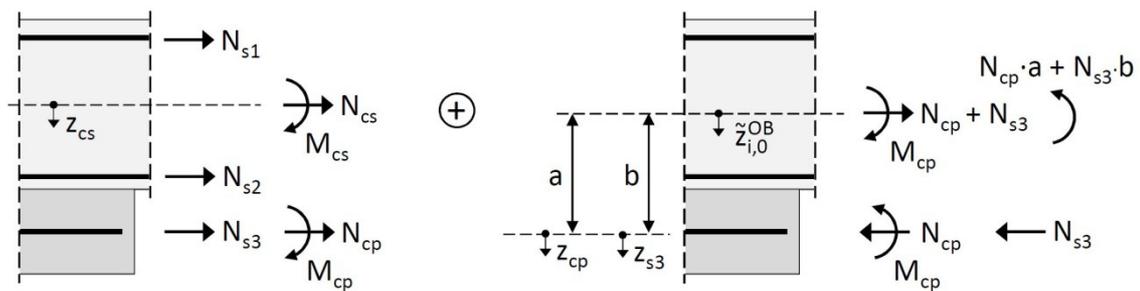


Abb. 4-3: Fugenbereich mit Gleichgewicht und Umlagerung [14]

Die Stahl- und Betonspannungen in der Fuge können dann durch Überlagerung der Ausgangsspannungen mit den Umlagerungsspannungen bestimmt werden.

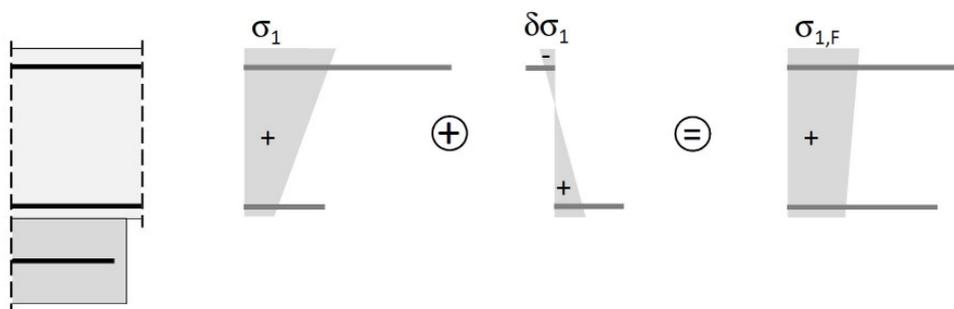


Abb. 4-4: Spannungen [14]

Zur rechnerischen Erfassung sind folgende Fragestellungen zu beantworten:

- Wie kann der Erstrisszustand aus dem Gleichgewicht und der Umlagerung beschrieben werden? Wie kann die Umlagerung auf Querschnittsebene bilanziert werden?
- Unter welchen Umständen treten Risse in den Fugen erst nach Erstrissbildung in den K-Bereichen auf, wie in den Bauteilversuchen beobachtet? Wie können dann Einflüsse aus Zustand I/II berücksichtigt werden?
- Wie wirken sich Fugenriss als Erstrisse auf das mittlere Bauteilverhalten aus? Wie kann der Zwischenzustand bis zur Bildung weiterer Erstrisse in den K-Bereichen erfasst werden?

4.2.3 Eigenspannungen

Das Schwinden des Betons beeinflusst zunächst durch die resultierenden Eigenspannungen das zur Erstrissbildung führende Beanspruchungsniveau und führt anschließend zur Vergrößerung der Rissbreiten entsprechend des Schwindmaßes.

Für Verbundträger mit Teilfertigteilen ist der zusätzliche Beton zu berücksichtigen. Weiterhin ist für den Fertigteilbeton die Änderung der Schwindrandbedingungen beim Einbau der Ortbetonergänzung zu beachten. Die gesamte Schwindbeanspruchung setzt sich dann aus den folgenden drei Schwindzuständen zusammen:

1. Schwinden des Teilfertigteils vor Einbau der Ortbetonergänzung (FT*)
2. Schwinden des Teilfertigteils nach Einbau der Ortbetonergänzung (FT)
3. Schwinden des Ortbetons (OB)

Zur rechnerischen Erfassung sind folgende Fragestellungen zu beantworten:

- Wie lassen sich die Umgebungsbedingungen (Luftfeuchte, Bauteiloberfläche) der einzelnen Schwindzustände erfassen? Wie kann dabei insbesondere die Kontaktfläche zwischen TFT und OB berücksichtigt werden?
- Wie lässt sich für das TTF der Übergang zwischen den Schwindzuständen (analog auch für das Kriechen) beim Übergang FT*-FT beschreiben?
- Wie können Teilschnittgrößen und Spannungen für die einzelnen Schwindzustände bilanziert werden?

4.3 Ganzfertigteile

4.3.1 Sammelrissbildung

Als *Sammelriss* bezeichnet man üblicherweise breitere Risse, die außerhalb des Wirkungsbereiches der rissverteilenden Bewehrung liegen und durch das Zusammenlaufen mehrerer benachbarter Einzelrisse entstehen. Bei Ganzfertigteilverbundträgern tritt der gleiche Effekt durch frühe singuläre Einzelrisse an den Rändern der Fugenbereiche auf. Die Ursache liegt in der materiellen Diskontinuität mit unterschiedlichen Betonen in Ganzfertigteile und Querfuge vor allem jedoch in der strukturellen Diskontinuität, die durch die nicht-monolithische Herstellung der beiden Betonteile hervorgerufen wird.

In Abb. 4-5 ist der Übergangsbereich eines Ganzfertigteilträgers mit der Verteilung der Materialeigenschaften sowie der Herstellungsqualität als zusätzlicher Kenngröße dargestellt.

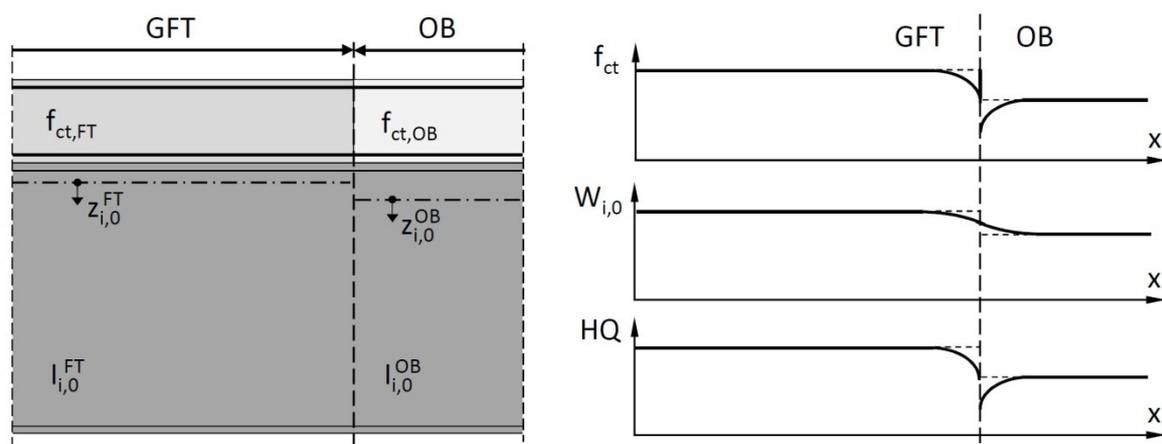


Abb. 4-5: Ursachen der Sammelrissbildung [14]

Zur rechnerischen Erfassung sind folgende Fragestellungen zu beantworten:

- Wie kann die frühe Sammelrissbildung infolge einer stark reduzierten lokalen Betonzugfestigkeit beschrieben werden? Wie lassen sich die lokalen Materialeigenschaften bei der Berechnung der Rissbreiten erfassen?
- Wie kann das mittlere Bauteilverhalten bis zum Entstehen weiterer Erstrisse erfasst werden?
- Wie muss der Bezugszustand für die Beschreibung der Rissbreiten in den Sammelrissen bei steigender Beanspruchung definiert werden?
- Wie lassen sich die unterschiedlichen Materialeigenschaften in der Risseinflusszone bei der Berechnung der Rissbreiten berücksichtigen?

4.3.2 Eigenspannungen

Die Bilanzierung des Schwindens kann für Ganzfertigteilträger grundsätzlich mit dem in Abschnitt 2.1 gezeigten Schwindmodell erfolgen. Eine Erweiterung der Bilanzierung wie bei Teilfertigteilträgern ist auf Querschnittsebene im Wesentlichen nicht erforderlich. Jedoch ist die durch die unterschiedlichen Betone hervorgerufene Unstetigkeit auf Bauteilebene zu beachten.

Zur rechnerischen Erfassung sind folgende Fragestellungen zu beantworten:

- Wie kann das lokale Schwindverhalten an den Fugenrändern insbesondere mit Hinblick auf die Sammelrissbildung beschrieben werden?
- Wie lassen sich die unterschiedlichen Materialeigenschaften in der Risseinflusszone bei der Berechnung der Rissbreiten berücksichtigen?
- Welchen Einfluss hat das Schwinden der Ganzfertigteile vor dem Einbau (FT*)?

5 Berechnungsmodell

5.1 Anforderungen

Die Anforderungen an das zu entwickelnde Modell werden nachfolgend stichpunktartig erläutert.

1. Verwendung des bestehenden Konzeptes: die Stahlspannungen und damit die Rissbreiten werden aus den Beziehungen für Gleichgewicht und Verträglichkeit am gerissenen Querschnitt hergeleitet.
2. Betrachtung eines mittleren Bauteilverhaltens unter Berücksichtigung der Mitwirkung des Betons zwischen den Rissen.
3. Beschreibung aller Umlagerungen sowohl am Querschnitt als auch auf Träger-ebene durch differenzierte Erfassung lokaler Effekte.
4. Berücksichtigung des Schwindens.
5. Anwendung und Erweiterung der vereinfachten Beziehungen zur Beschreibung des mittleren Bauteilverhaltens nach Abb. 2-1. Somit erfüllt das Berechnungsmodell bereits die grundsätzlichen Anforderungen an eine vereinfachte Berechnung (Bemessungsmodell).

5.2 Berechnungsmodell für Verbundträger mit Teilfertigteilen

Aus den genannten Grundüberlegungen heraus wurde ein Berechnungsmodell entwickelt, mit dem alle relevanten Effekte auf lokaler und globaler Ebene beschrieben werden können. Die ausführliche Herleitung und Beschreibung kann [14] entnommen werden. Die folgende Abbildung zeigt schematisch die wesentlichen Bestandteile.

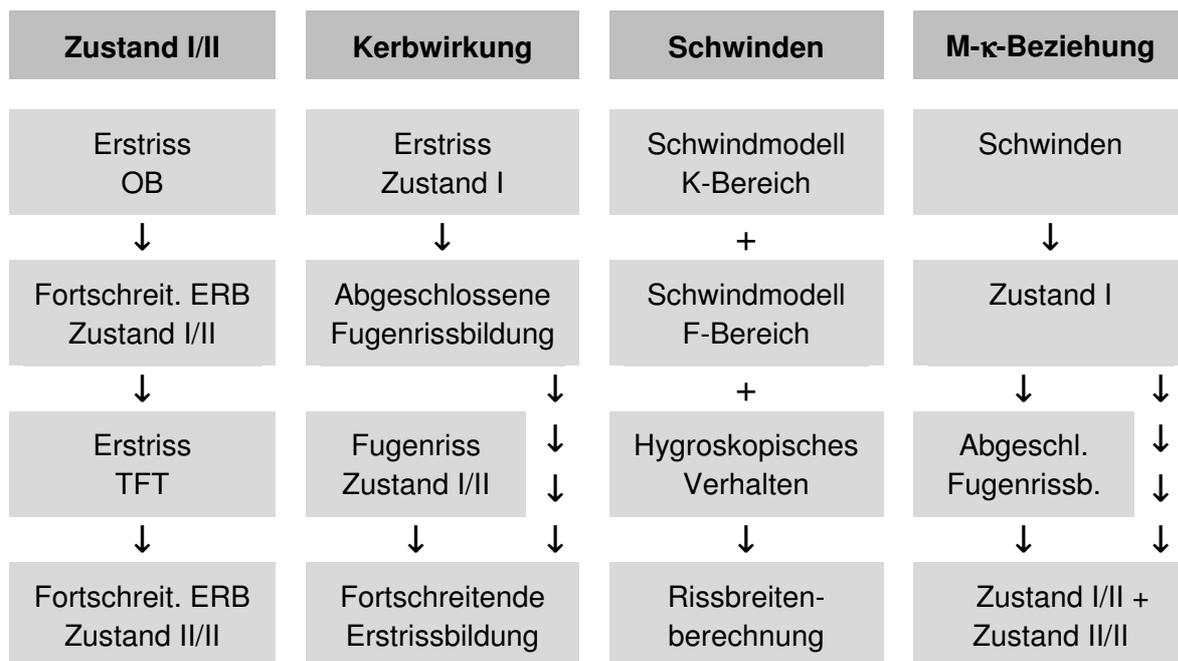


Abb. 5-1: Berechnungsmodell TFT-Träger – schematische Übersicht [14]

Exemplarisch werden die Gleichung zur Bestimmung der Stahlspannung im Riss sowie der Rissbreiten – mit und ohne Einfluss des Schwindens – für fortschreitende Erstrissbildung im Zustand I/II angeschrieben.

$$\sigma_{s2,I/II}^i = \frac{M}{I_{st}^{I/II} \cdot n_{st}} \cdot z_{st,i}^{I/II} + \beta_{I/II} \cdot \Delta\sigma_{sr,I/II}^i \cdot (1 - a_{I/II}) \quad (5.1)$$

$$w_{I,II} = \frac{\Delta\sigma_{sr,I/II} \cdot d_s}{2 \cdot E_s \cdot \tau_{sm}} (\sigma_{s2,I/II} - \beta_t \cdot \sigma_{sr2,I/II}) \quad (5.2)$$

$$w_{I,II} = \frac{\Delta\sigma_{sr,I/II} \cdot d_s}{2 \cdot E_s \cdot \tau_{sm}} (\sigma_{s2,I/II} - \beta_t \cdot \sigma_{sr2,I/II} - \varepsilon_{cs} \cdot E_s \cdot (1 - \beta_{t,\varepsilon})) \quad (5.3)$$

Im Folgenden wird die Funktionalität des Berechnungsmodells durch Vergleich mit den Bauteilversuchen gezeigt. In Abb. 5-2 ist der Vergleich der Momenten-Krümmungsbeziehung für den Versuchsträger 2-1 gezeigt. Die Krümmung infolge von Eigenspannungen kann aus Abb. 3-21 – der Abstand der Stahl-DMS beträgt 41 cm – zu $\kappa_\varepsilon \approx 0,17 \cdot 10^{-3} m^{-1}$ bestimmt werden.

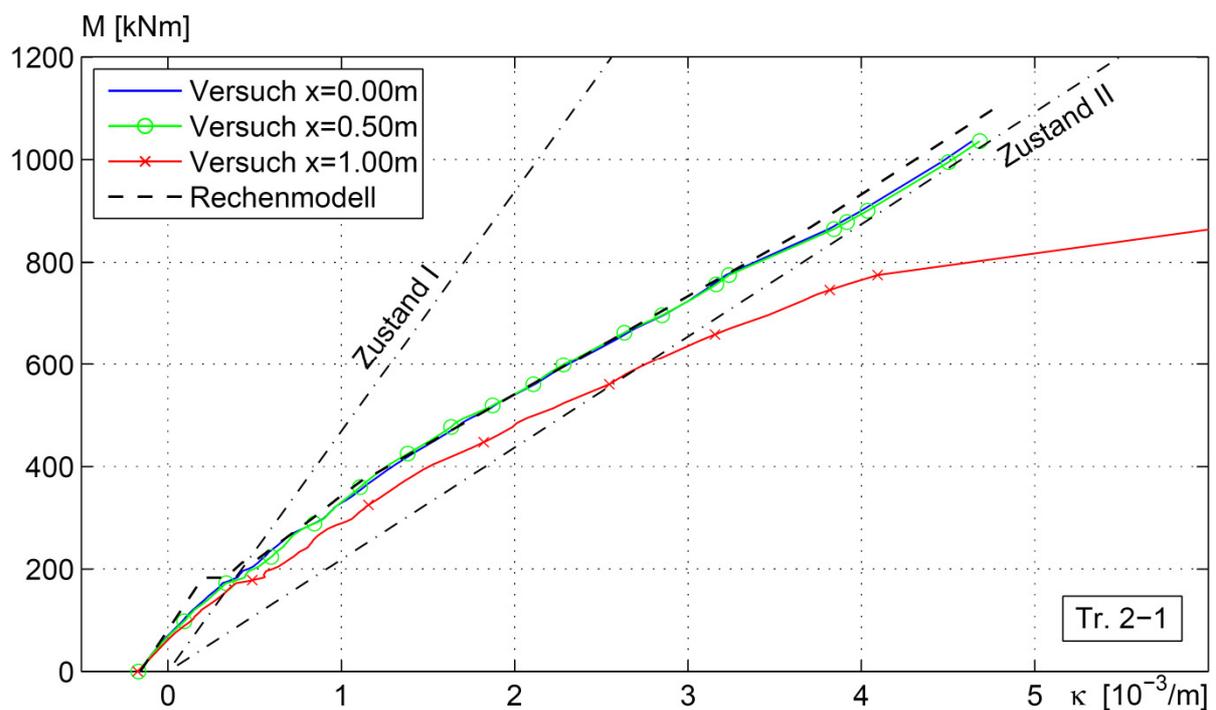


Abb. 5-2: Rechnerische und gemessene M-κ-Beziehung Versuchsträger 2-1 (TFT d/2) [14]

Den Vergleich der Rissbreiten zeigt Abb. 5-3 jeweils für F- und K-Bereiche. Dargestellt sind die gemessenen Rissbreiten an der Betonoberfläche (vgl. Abb. 3-14) sowie die rechnerischen Rissbreiten auf Höhe der ersten und zweiten Bewehrungslage.

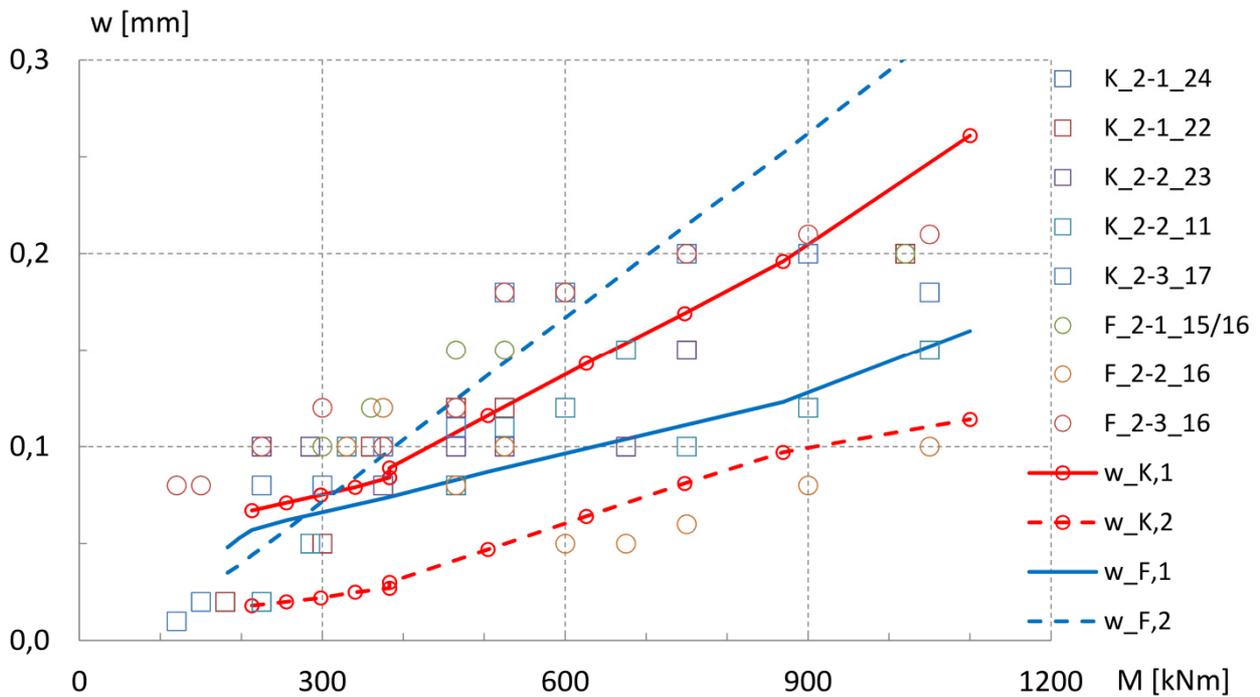


Abb. 5-3: Rechnerische und gemessene Rissbreiten Versuchsträger Charge 2 (TFT d/2) [14]

5.3 Berechnungsmodell für Verbundträger mit Ganzfertigteilen

Die folgende Abbildung zeigt schematisch die wesentlichen Bestandteile des Berechnungsmodells für Ganzfertigteilträger (vgl. 5.2). Eine ausführliche Erläuterung findet sich in [14].

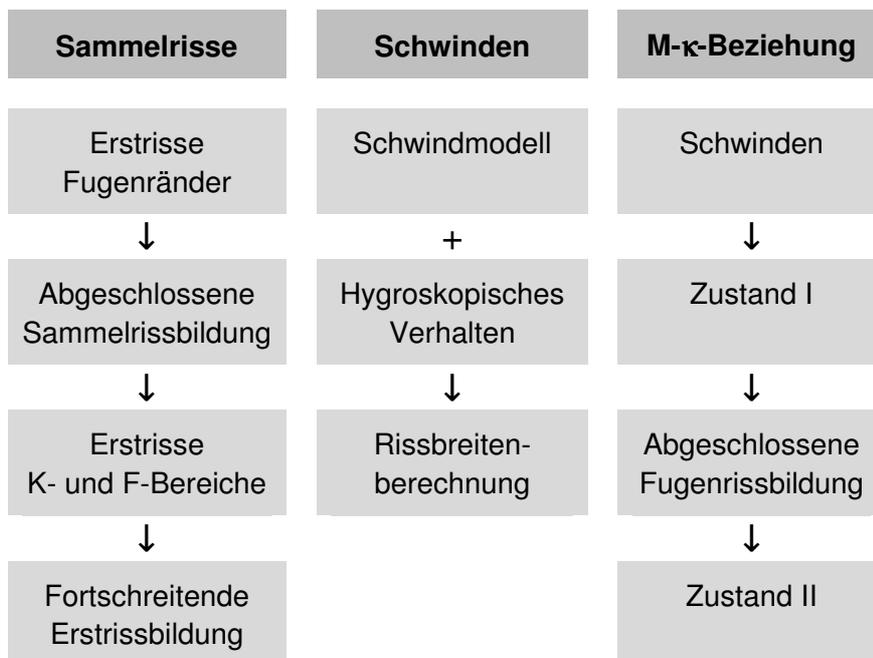


Abb. 5-4: Berechnungsmodell GFT-Träger – schematische Übersicht [14]

Exemplarisch werden die Gleichung zur Bestimmung der Stahlspannung im Riss sowie der Rissbreiten – mit und ohne Einfluss des Schwindens – für Sammelrisse im Zustand der abgeschlossenen Sammelrissbildung angeschrieben.

$$\sigma_{s2,SR}^i = \frac{M}{I_{st} \cdot n_{st}} \cdot z_{st,i} + \beta_F \cdot \Delta\sigma_{s2,SR}^i \cdot (1 - a_{SR}) \quad (5.4)$$

$$w_{SR} = \frac{\Delta\sigma_{s2,SR} \cdot d_s}{2 \cdot k_t \cdot E_s \cdot \tau_{sm}} \cdot \sigma_{s2,SR} \cdot (1 - k_\beta \cdot \beta_t) \quad (5.5)$$

$$w_{SR} = \frac{\Delta\sigma_{s2,SR} \cdot d_s}{2 \cdot k_t \cdot E_s \cdot \tau_{sm}} \cdot (\sigma_{s2,SR} - \varepsilon_{cs,SR} \cdot E_s) \cdot (1 - k_\beta \cdot \beta_t) \quad (5.6)$$

Die Funktionalität des Berechnungsmodells wird durch Vergleich mit den Bauteilversuchen gezeigt. In Abb. 5-5 ist der Vergleich der Momenten-Krümmungsbeziehung für den Versuchsträger 3-1 gezeigt. Die Krümmung infolge von Eigenspannungen kann aus Abb. 3-33 und Abb. 3-34 zu $\kappa_\varepsilon \approx 0,13 \cdot 10^{-3} m^{-1}$ bestimmt werden.

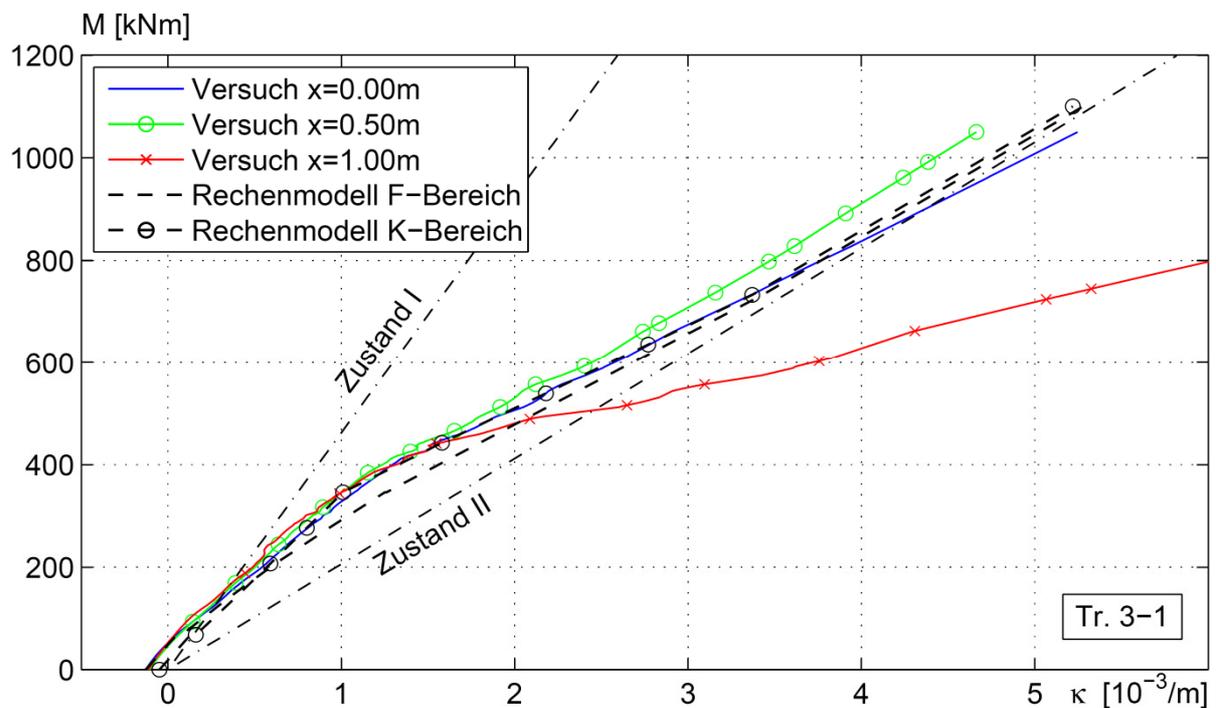


Abb. 5-5: Rechnerische und gemessene M- κ -Beziehung Versuchsträger 3-1 (TFT d/2) [14]

Den Vergleich der Rissbreiten zeigt Abb. 5-6 jeweils für Sammelrisse und Risse im K-Bereich. Dargestellt sind die gemessenen Rissbreiten an der Betonoberfläche (vgl. Abb. 3-29) sowie die rechnerischen Rissbreiten auf Höhe der ersten und zweiten Bewehrungslage.

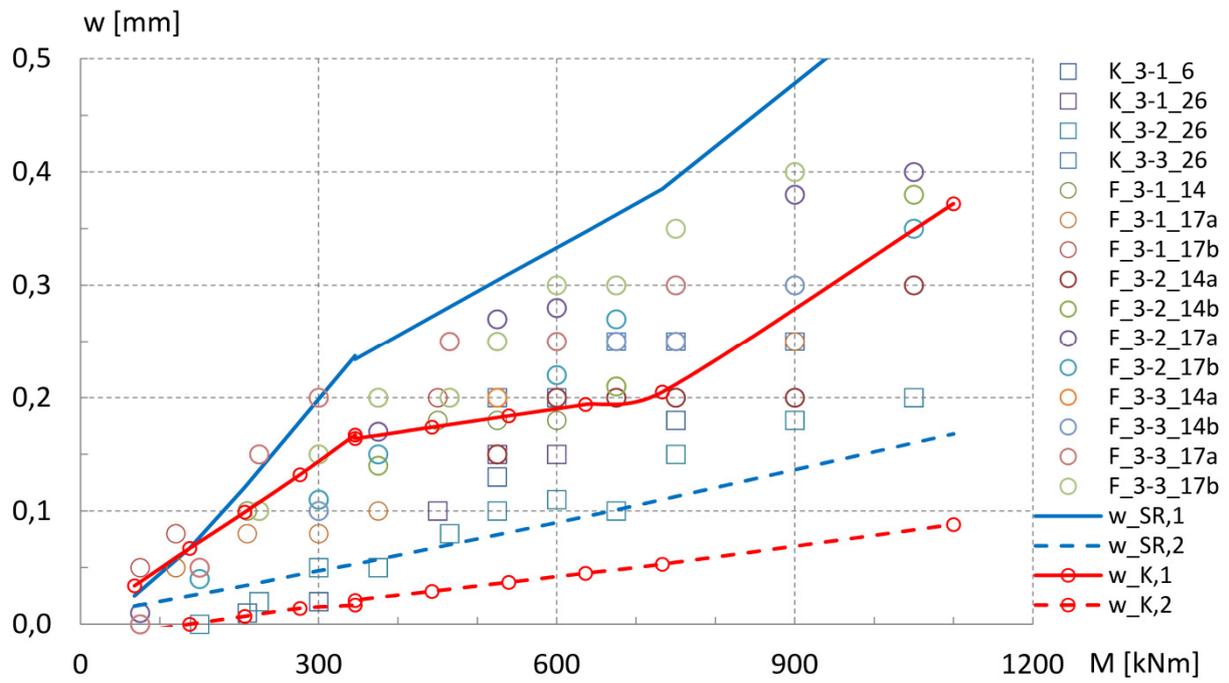


Abb. 5-6: Rechnerische und gemessene Rissbreiten Versuchsträger Charge 3 (GFT) [14]

6 Parameteruntersuchungen

Die Beschreibung des mittleren Bauteilverhaltens und die Berechnung der Rissbreiten ist von zahlreichen Einflussgrößen abhängig. Grundsätzlich kann zwischen geometrischen, materialbezogenen und mechanischen Einflussgrößen unterschieden werden.

Durch die Variation der maßgeblichen Einflussgrößen können die Auswirkungen aufgezeigt werden, die diese auf die Berechnung haben. Für die Untersuchungen wird je Bauweise jeweils ein typischer Querschnitt des Brückenbaus und des Hochbaus ausgewählt. Die Material- und Querschnittskenngößen entsprechen mit geringfügigen Änderungen grundsätzlich den Beispielen in [7] und [15], so dass zugleich der Vergleich zu herkömmlichen Verbundträgern hergestellt werden kann.

Das Hauptaugenmerk liegt auf dem grundsätzlichen Einfluss. Je untersuchtem Parameter werden daher jeweils drei Varianten betrachtet. Vom Basisquerschnitt ausgehend wird im Regelfall nach oben und unten variiert. Die Untersuchungen sind derzeit noch nicht abgeschlossen. Für ausführliche Beschreibungen sowie Ergebnisse wird auf [14] verwiesen.

6.1 Teilfertigteile

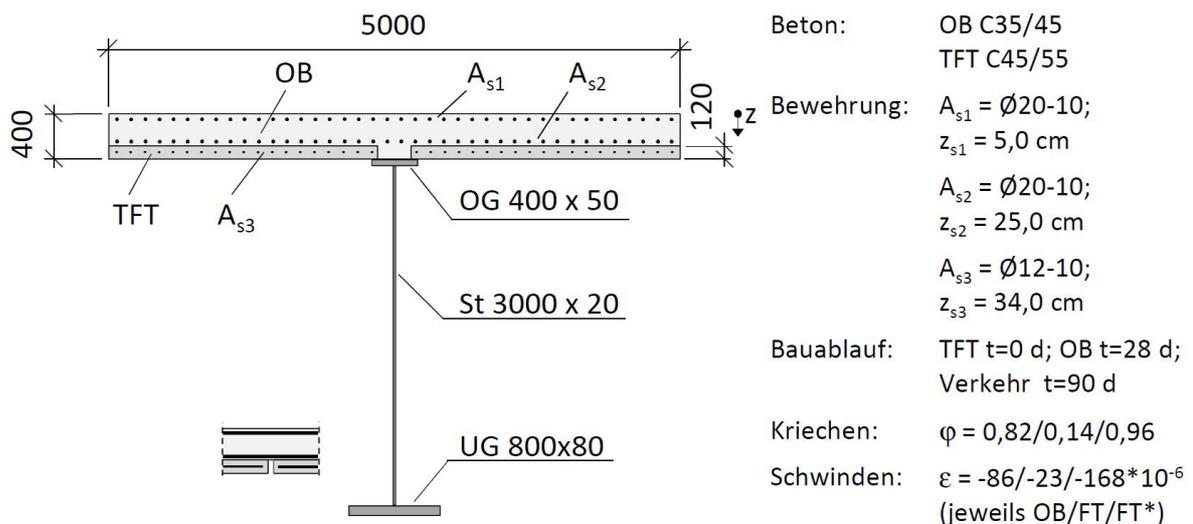


Abb. 6-1: Brückenbauquerschnitt mit Teilfertigteilen [14]

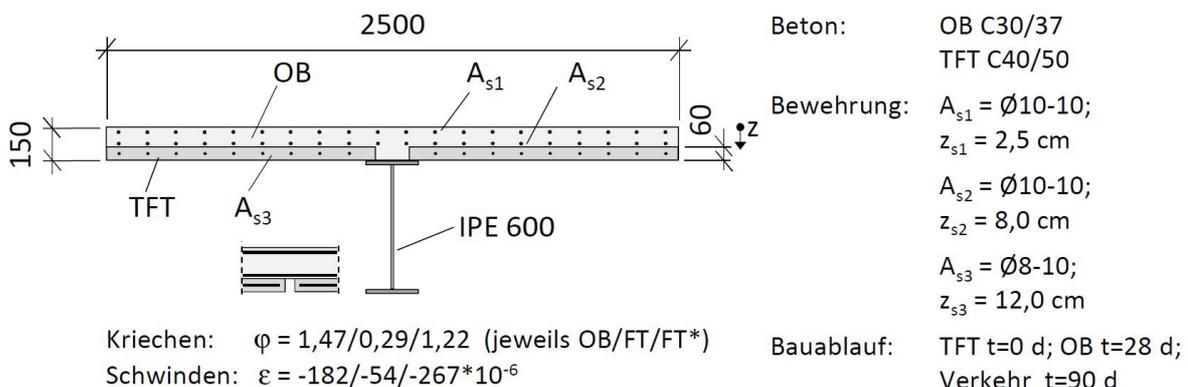
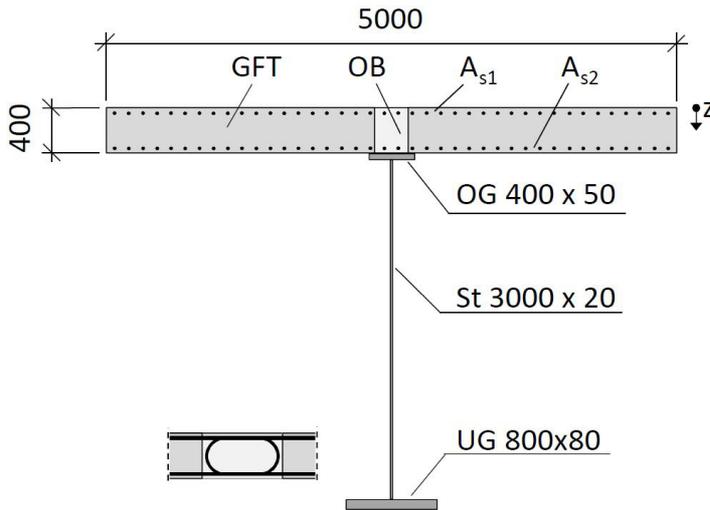


Abb. 6-2: Hochbauquerschnitt mit Teilfertigteilen [14]

Variiert werden die folgenden Einflussgrößen:

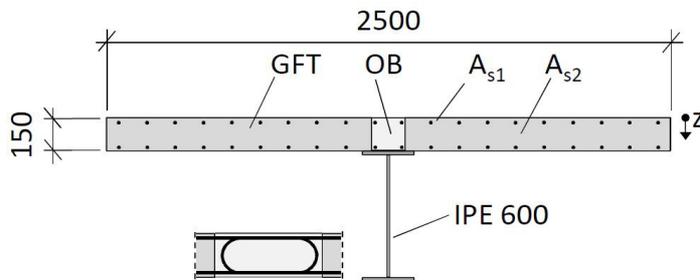
- Betongüte OB, FT
- Verhältnis der Betongüten (OB-FT)
- Fertigteilgrad h_{cs}/h_c
- Bewehrungsgrad $A_{s,OB}$, $A_{s,FT}$
- Bewehrungsverhältnis OB A_{s1}/A_{s2}
- Dehnungsgradient $z_{i,c,0}/h_c$
- Anpassungsfaktor $\eta_{FT,eff}$
- Anpassungsfaktor $\eta_{OG,eff}$
- Schwindgrad
- Schwindverhältnis OB-FT

6.2 Ganzfertigteile



Beton:	OB C35/45 GFT C45/55
Bewehrung:	$A_{s1} = \emptyset 20-10$; $z_{s1} = 5,0$ cm $A_{s2} = \emptyset 20-10$; $z_{s2} = 35,0$ cm
Bauablauf:	GFT $t=0$ d; OB $t=28$ d; Verkehr $t=90$ d
Kriechen:	$\varphi = 0,90/0,19/0,71$
Schwinden:	$\varepsilon = -98/-33/-95 \cdot 10^{-6}$ (jeweils OB/FT/FT*)

Abb. 6-3: Brückenbauquerschnitt mit Ganzfertigteilen [14]



Beton:	OB C30/37 TFT C30/37
Bewehrung:	$A_{s1} = \emptyset 10-10$; $z_{s1} = 2,5$ cm $A_{s2} = \emptyset 10-10$; $z_{s2} = 12,5$ cm
Kriechen:	$\varphi = 1,53/0,47/1,22$
Schwinden:	$\varepsilon = -205/-92/-146 \cdot 10^{-6}$ (jeweils OB/FT/FT*)

Bauablauf: GFT $t=0$ d; OB $t=28$ d; Verkehr $t=90$

Abb. 6-4: Hochbauquerschnitt mit Ganzfertigteilen [14]

Variiert werden die folgenden Einflussgrößen:

- Betongüte OB, FT
- Verhältnis der Betongüten (OB-FT)
- Fertigteilgrad h_{cs}/h_c
- Dehnungsgradient $z_{i,c,0}/h_c$
- Anpassungsfaktor η_{ct}
- Schwindgrad
- Schwindverhältnis OB-FT

7 Zusammenfassung und Ausblick

Der vorliegende Forschungsbericht dokumentiert die durchgeführten Untersuchungen zum Rissverhalten an Fertigteilverbundträgern und zeigt die wesentlichen Ergebnisse.

Es werden die wesentlichen theoretischen Grundlagen vorgestellt, wobei vor allem auf das spezifische Materialverhalten des Werkstoffs Beton eingegangen wird. Die beiden grundlegenden Risstheorien und vor allem der Übergang von der genauen zur vereinfachten Methode werden erläutert. Zu den durchgeführten experimentellen Untersuchungen wird ein Überblick der wichtigsten Ergebnisse gegeben. Ausführlichere Darstellungen sind außerdem in den Anhängen dieses Forschungsberichts enthalten. Ausgehend von den Versuchsergebnissen werden die wesentlichen Fragestellungen formuliert. Es wird ein Überblick über die entwickelten Berechnungsmodelle gegeben. Die wesentliche Funktionalität wird anhand von zwei Beispielen durch Vergleich mit den Versuchsergebnissen aufgezeigt. Für die derzeit noch nicht vollständig abgeschlossenen Parameteruntersuchungen wird ein Überblick über die untersuchten Parameter und die verwendeten Querschnitte gegeben.

Das Fazit der Untersuchungen fällt mit Blick auf die formulierten Zielstellungen positiv aus. Es wurde eine umfassende Systematisierung für die beiden Hauptanwendungsfälle für Fertigteilverbundträger - Verbundträger mit Teilfertigteilen (TFT) und Verbundträger mit Ganzfertigteilen (GFT) - erstellt. Spezifische Fragestellungen zur Konstruktion und Bemessung der genannten Bauweisen, die bislang nicht oder nicht hinreichend beantwortet werden konnten, wurden formuliert. Es wurden Berechnungsmodelle erarbeitet, mit denen auf Grundlage der bestehenden mechanischen Modellierung für herkömmliche Verbundträger eine erweiterte Beschreibung auch für Verbundträger mit Teil- und Ganzfertigteilen möglich ist. Damit sind die Voraussetzungen erfüllt, um das hohe Innovationspotential dieser Bauweise künftig noch stärker und mit der erforderlichen Sicherheit und Wirtschaftlichkeit ausnutzen zu können.

Zugleich haben sich im Zuge der Bearbeitung zahlreiche neue Fragestellungen bzw. Ansätze für weiterführende Untersuchungen ergeben. Einigen dieser Fragestellungen wird derzeit noch nachgegangen. Entsprechende Ergebnisse wie auch umfangreiche Erläuterungen zu hier nur verkürzt darstellbaren Zusammenhängen finden sich in einer derzeit noch unveröffentlichten Dissertation [14]. Andere Fragestellungen sollten Anlass zu ergänzender Forschung sein. Exemplarisch sollen hier die Durchführung von Bauwerksmessungen – die hier vorbereitet waren aber nicht abschließend ausgewertet werden konnten – , die Durchführung von Kleinversuchen zu lokalen Effekten insbesondere in den Fugenbereichen sowie weitere numerische Untersuchungen zu ausgewählten Aspekten genannt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] CEB-FIB Model Code 1990: Design Code (Final Draft 1991). Bulletin 213+214. Lausanne : CEB, 1993
- [2] DIN EN 1992-1-1:2011-01 – Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau. Berlin: Beuth-Verlag 2011
- [3] DIN EN 1994-1-1:2010-12 – Eurocode 4: Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Anwendungsregeln für den Hochbau. Berlin: Beuth-Verlag 2010
- [4] Geißler, K.; Schneider, F.; Mager, M.: Bauteilversuche an Verbundträgern mit Fertigteilen – interne Forschungsberichte (unveröffentlicht) TU Berlin 2013 + 2014
- [5] Geißler, K.: Forschungsantrag ‚Modell zur Erfassung der Rissbreiten durchlaufender Verbundträger mit Teil- und Ganzfertigteilen‘. TU Berlin 2013
- [6] Haensel, J.: Praktische Berechnungsverfahren für Stahlträgerverbundkonstruktionen unter Berücksichtigung neuerer Erkenntnisse zum Betonzeitverhalten. Techn.-Wiss. Mitteilungen Nr. 75-2. Institut für konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universität Bochum, Dissertation, 1975
- [7] Hanswille, G.: Zur Rißbreitenbeschränkung bei Verbundträgern. Techn.-Wiss. Mitteilungen Nr. 86-1. Institut für konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universität Bochum, Dissertation, 1986
- [8] Heilmann, H. G.: Beziehungen zwischen Zug- und Druckfestigkeit des Betons. In: Beton 19 (1969), Heft 2, S. 68-70
- [9] Krips, M.: Rißbreitenbeschränkung im Stahlbeton und Spannbeton. Mitteilungen aus dem Institut für Massivbau der Technischen Hochschule Darmstadt ; Heft 33. Berlin: Verlag Ernst & Sohn, 1985
- [10] Leonhardt, F.; Mönning, E.: Vorlesungen über Massivbau. 4. Nachweis der Gebrauchsfähigkeit: Rissebeschränkung, Formänderungen, Momentenumlagerung und Bruchlinientheorie im Stahlbetonbau. 2. Aufl. Berlin: Springer Verlag, 1978
- [11] Lindner, M.: Vergleichende Untersuchungen zur experimentellen und rechnerischen Bestimmung der Rissbreiten an Verbundträgern in Fertigteilbauweise. TU Berlin, Masterarbeit, 2016
- [12] Mager, M.; Geißler, K.: Rissbreitenbegrenzung durchlaufender Stahlverbundträger mit Teil- und Ganzfertigteilen. Tagungsband 20. DAST-Forschungskolloquium. Düsseldorf: DAST 2016
- [13] Mager, M.: Rissbreitenbegrenzung durchlaufender Stahlverbundträger mit Teil- und Ganzfertigteilen. 20. DAST-Forschungskolloquium. Vortrag Essen 09.03.2016
- [14] Mager, M.: Zur Erfassung der Rissbreiten an durchlaufenden Stahlverbundträgern mit Teil- und Ganzfertigteilen. TU Berlin, Dissertation, geplant III/2017
- [15] Maurer, R.: Grundlagen zur Bemessung des Betongurtes von Stahlverbundträgern. TH Darmstadt, Dissertation, 1992
- [16] Müller, H. S.; Kvitsel, V.: Kriechen und Schwinden von Beton. In: Beton und Stahlbetonbau 97 (2002), Heft 1, S. 8-19

- [17] Noakowski, P.: Die Bewehrung von Stahlbetonbauteilen bei Zwangsbeanspruchung infolge Temperatur - DAFStb-Heft 296. Berlin: Verlag Ernst & Sohn, 1978
- [18] Sattler, K.: Theorie der Verbundkonstruktionen (Band I+II). Berlin: Verlag Ernst & Sohn, 1959
- [19] Schneider, F.: FE-Modelle zur Vorhersage der Rissbreitenentwicklung bei Verbundträgern mit Teilfertigteilen. TU Berlin, Masterarbeit, 2014

Anhang A Versuchsaufbau und -durchführung

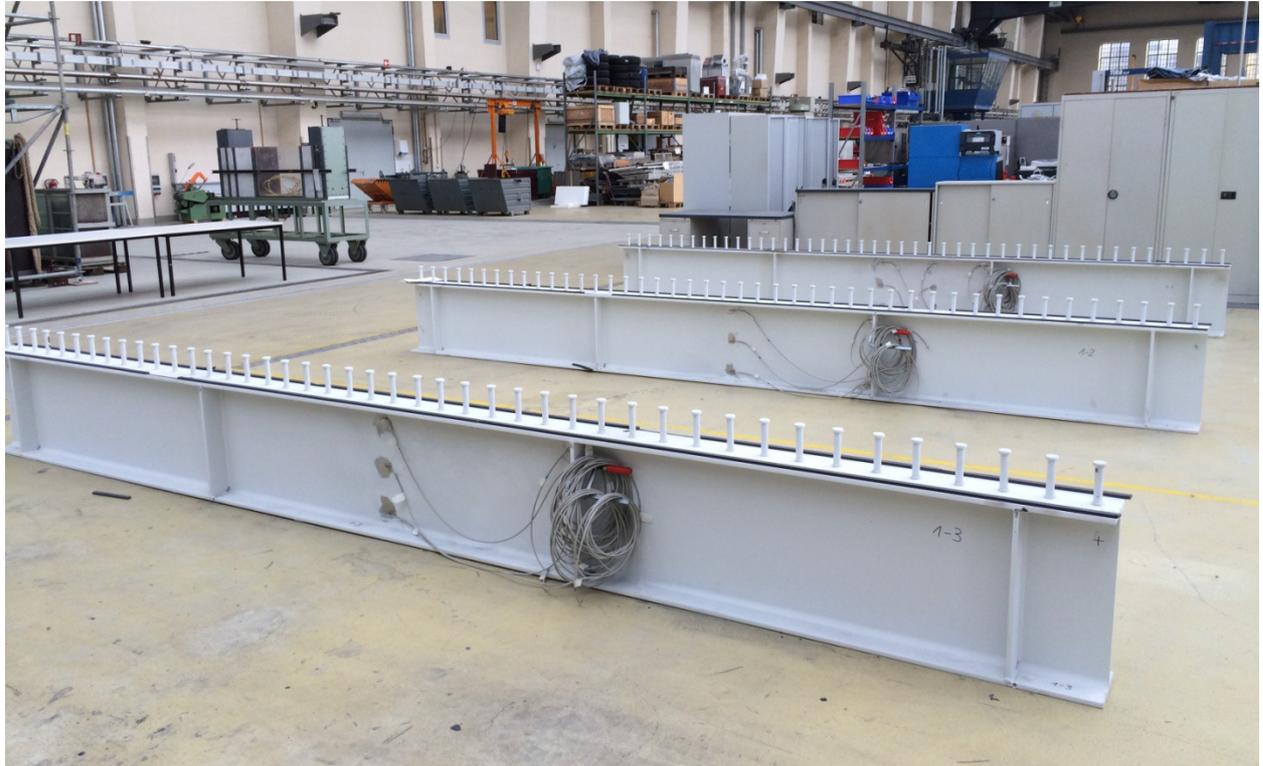


Abb. A-1: Stahlträger Charge 1 mit DMS



Abb. A-2: Herstellung TFT im Werk Hennickendorf



Abb. A-3: Teilfertigteilträger TFT d/3 vor Einbau Ortbeton



Abb. A-4: Teilfertigteilträger TFT d/3 Einbau Ortbeton



Abb. A-5: Fugbereich TFT-Träger mit Messtechnik



Abb. A-6: Herstellung GFT in der Peter-Behrens-Halle



Abb. A-7: Ganzfertigteilträger vor Einbau Ortbeton



Abb. A-8: Ganzfertigteilträger Einbau Ortbeton



Abb. A-9: Fugenbereich GFT-Träger mit Messtechnik



Abb. A-10: Laborprüfung E-Modul



Abb. A-11: Laborprüfung Druckfestigkeit



Abb. A-12: Versuchsträger und Prüfeinrichtung mit Übersicht Messtellen

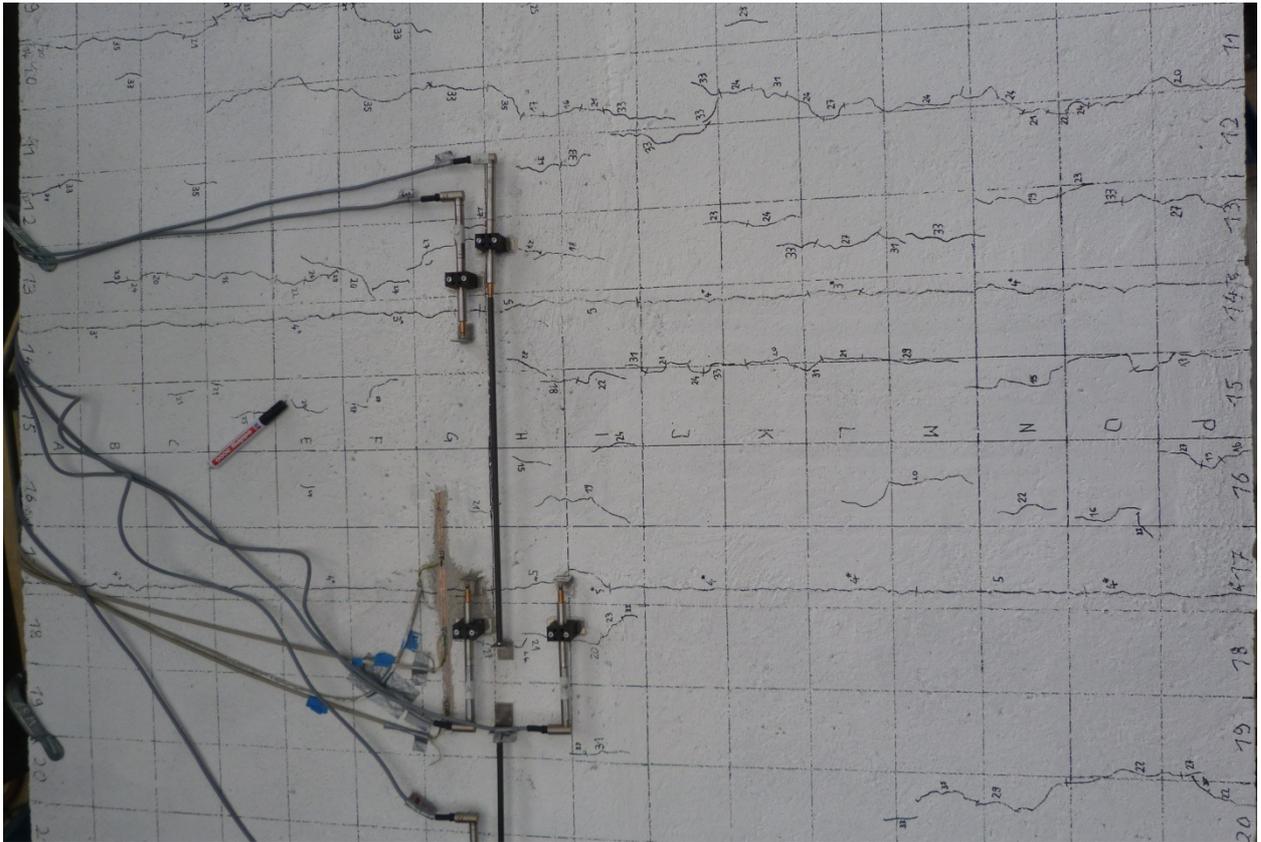


Abb. A-13: Draufsicht Trägergurt mit Rissbild und Messtechnik

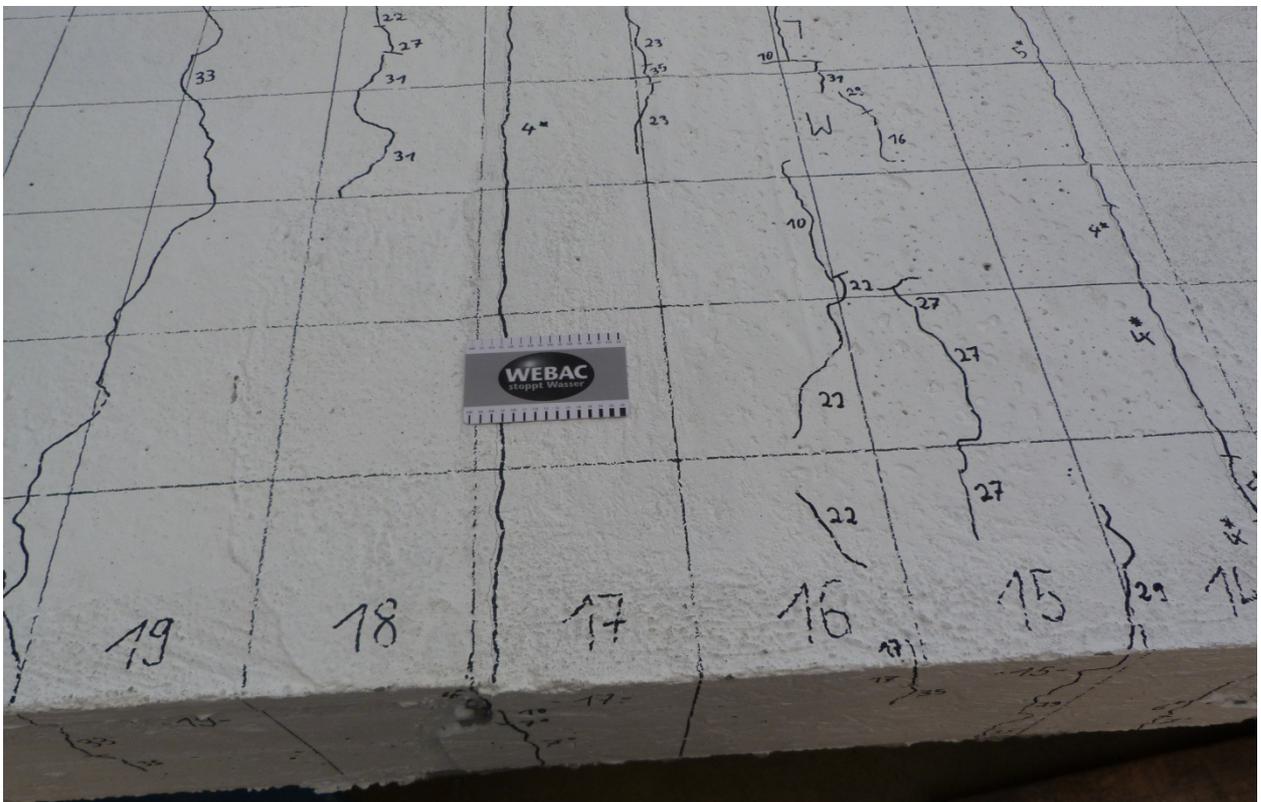


Abb. A-14: Kontrolle der Rissbreiten

Anhang B Momenten-Krümmungsbeziehungen

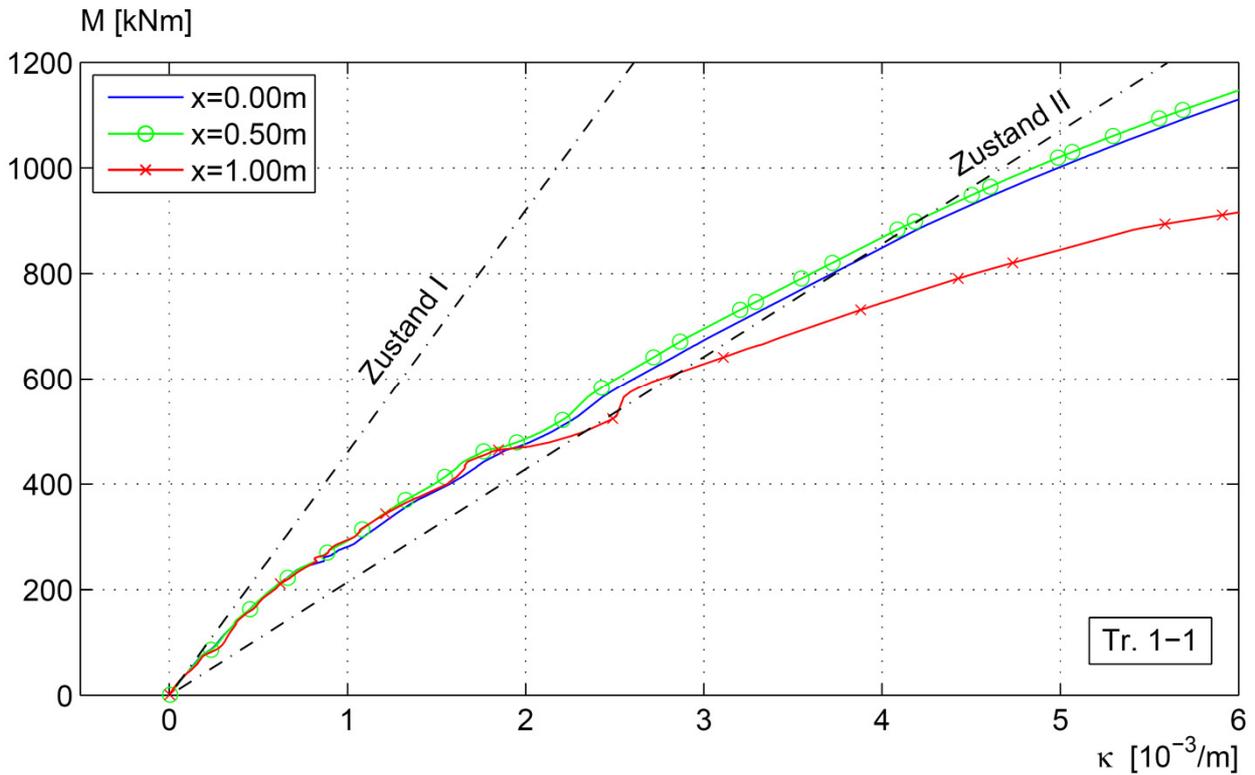


Abb. B-1: Momenten-Krümmungsbeziehung Versuchsträger Tr. 1-1 (TFT d/3)

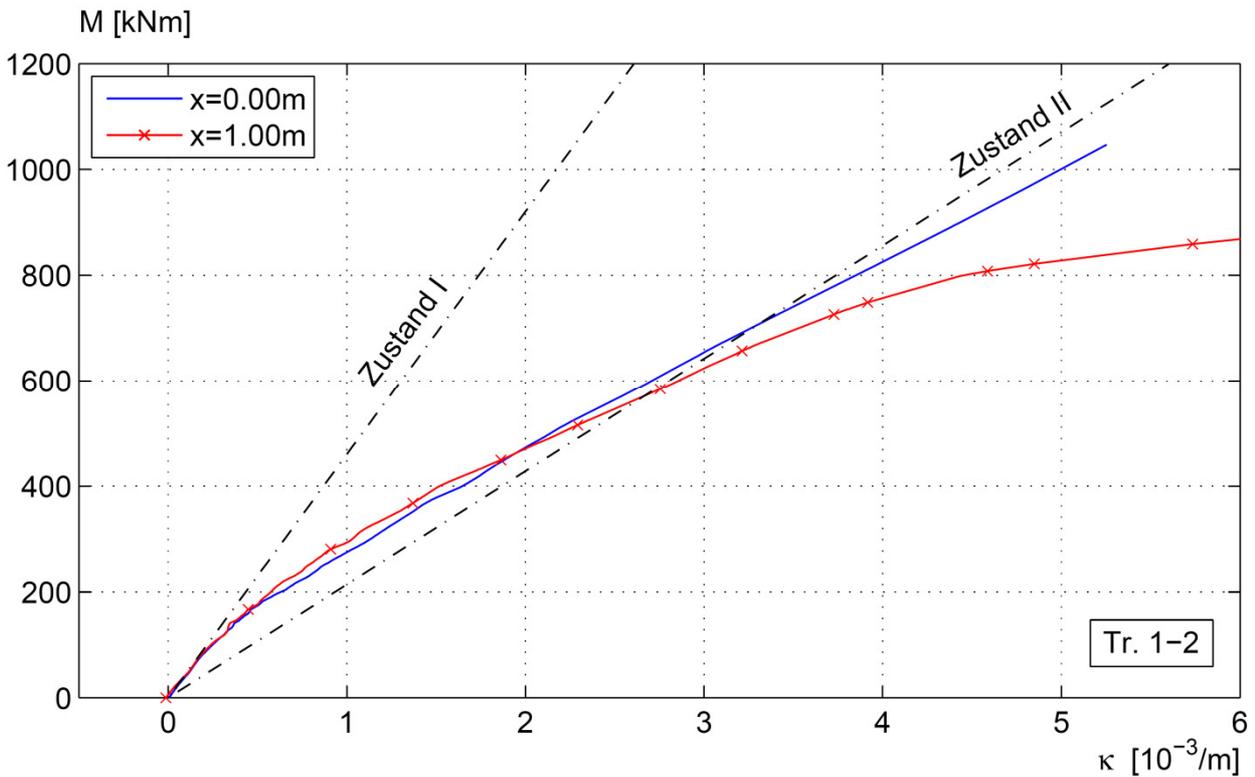


Abb. B-2: Momenten-Krümmungsbeziehung Versuchsträger Tr. 1-2 (TFT d/3)

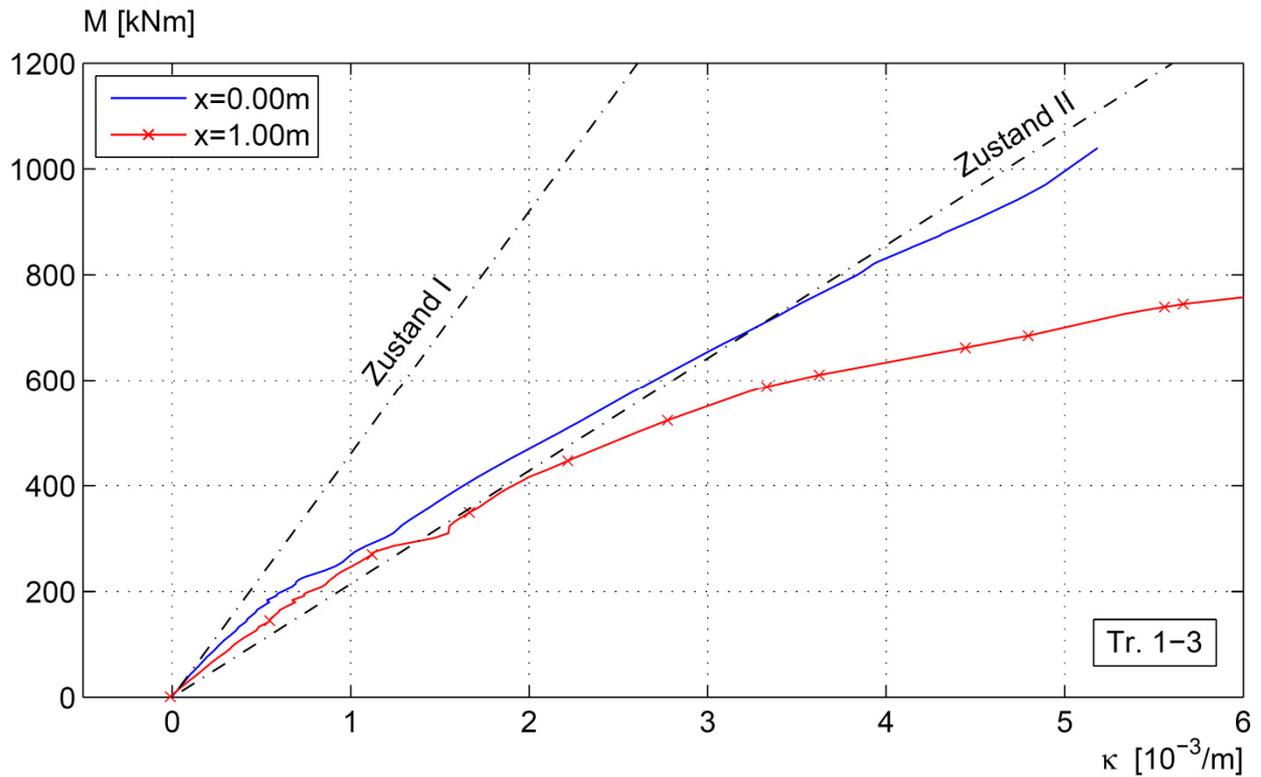


Abb. B-3: Momenten-Krümmungsbeziehung Versuchsträger Tr. 1-3 (TFT d/3)

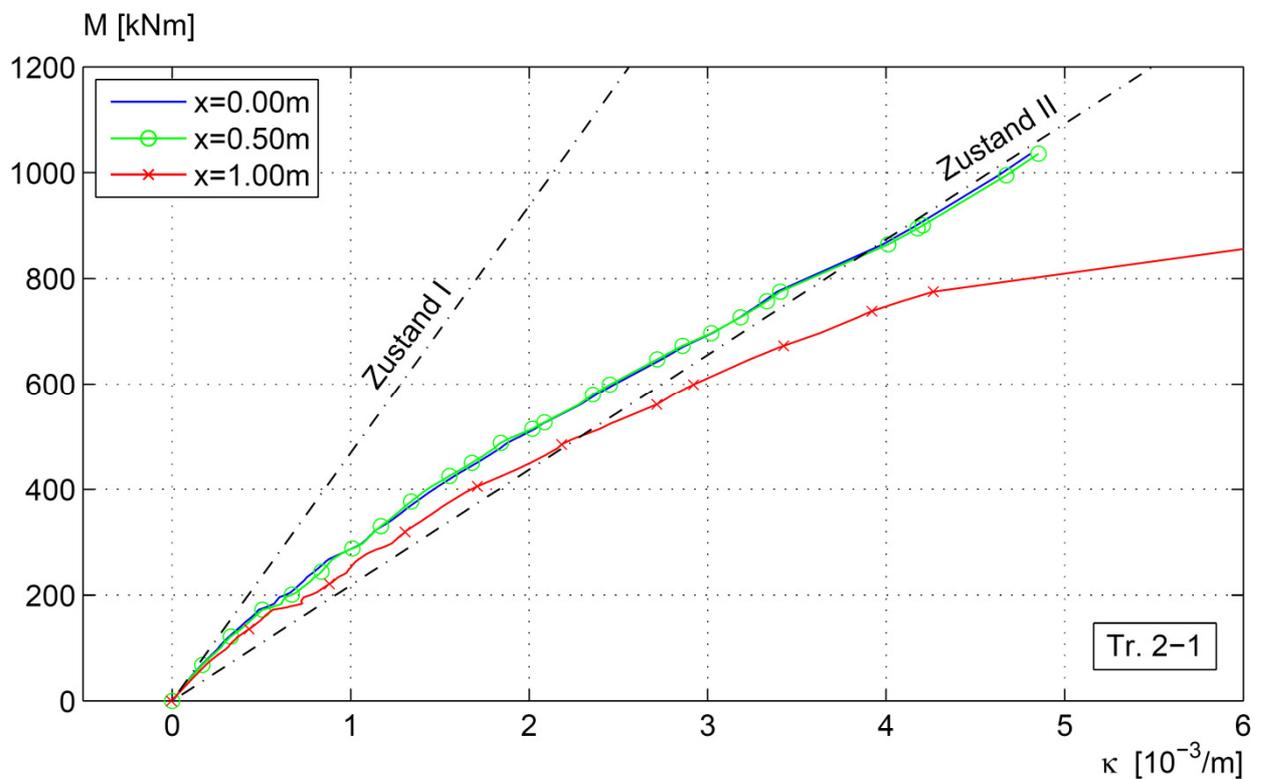


Abb. B-4: Momenten-Krümmungsbeziehung Versuchsträger Tr. 2-1 (TFT d/2)

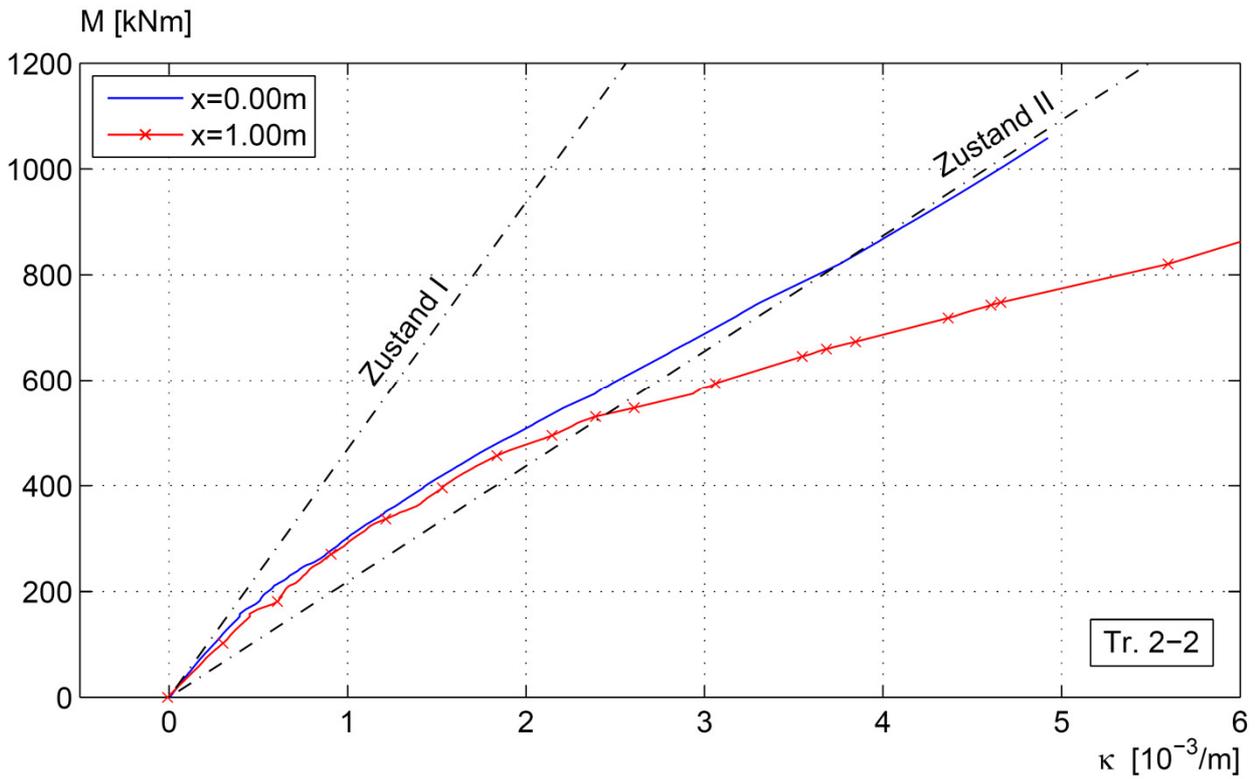


Abb. B-5: Momenten-Krümmungsbeziehung Versuchsträger Tr. 2-2 (TFT d/2)

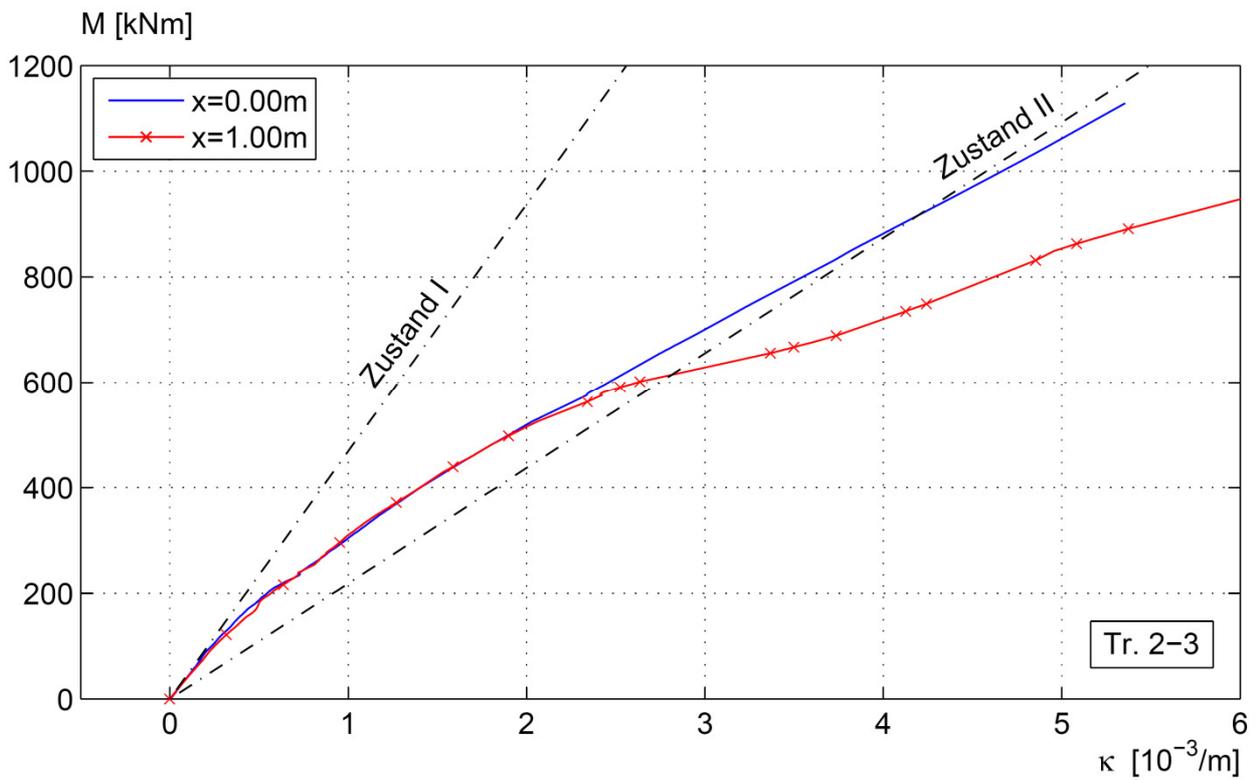


Abb. B-6: Momenten-Krümmungsbeziehung Versuchsträger Tr. 2-3 (TFT d/2)

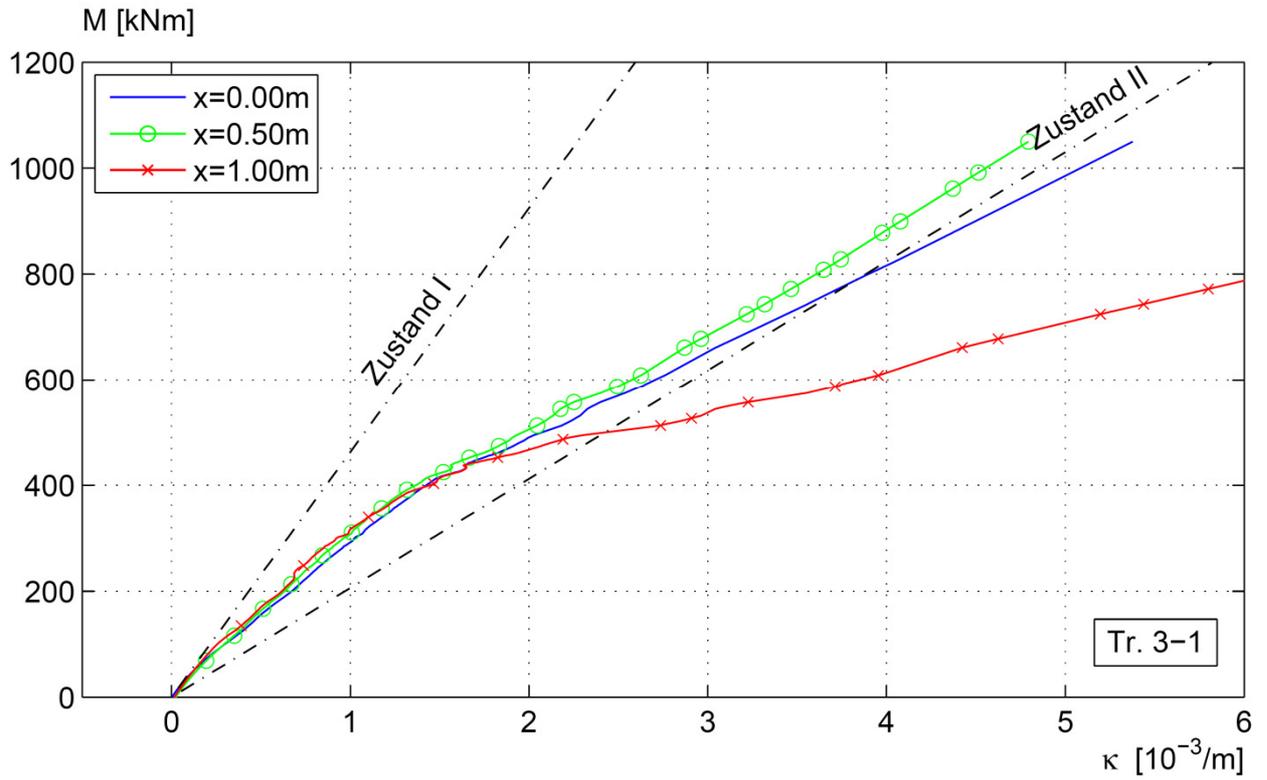


Abb. B-7: Momenten-Krümmungsbeziehung Versuchsträger Tr. 3-1 (GFT)

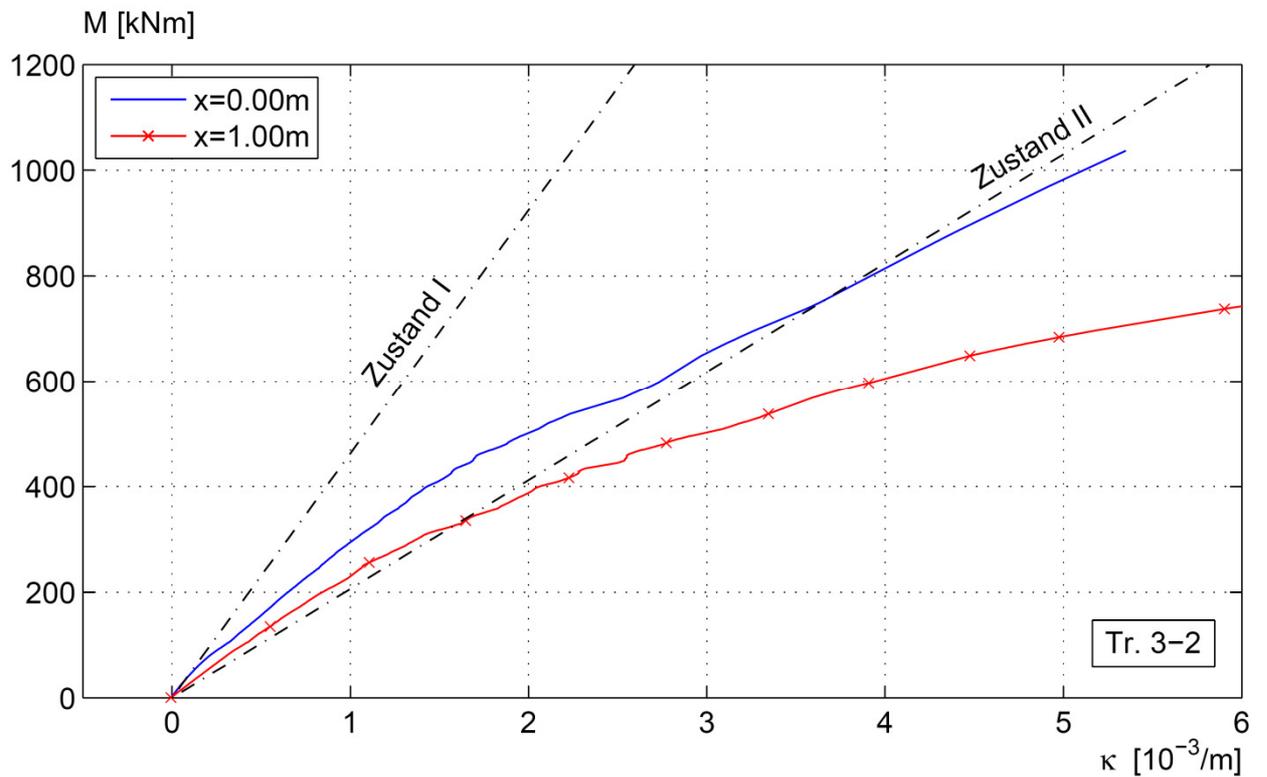


Abb. B-8: Momenten-Krümmungsbeziehung Versuchsträger Tr. 3-2 (GFT)

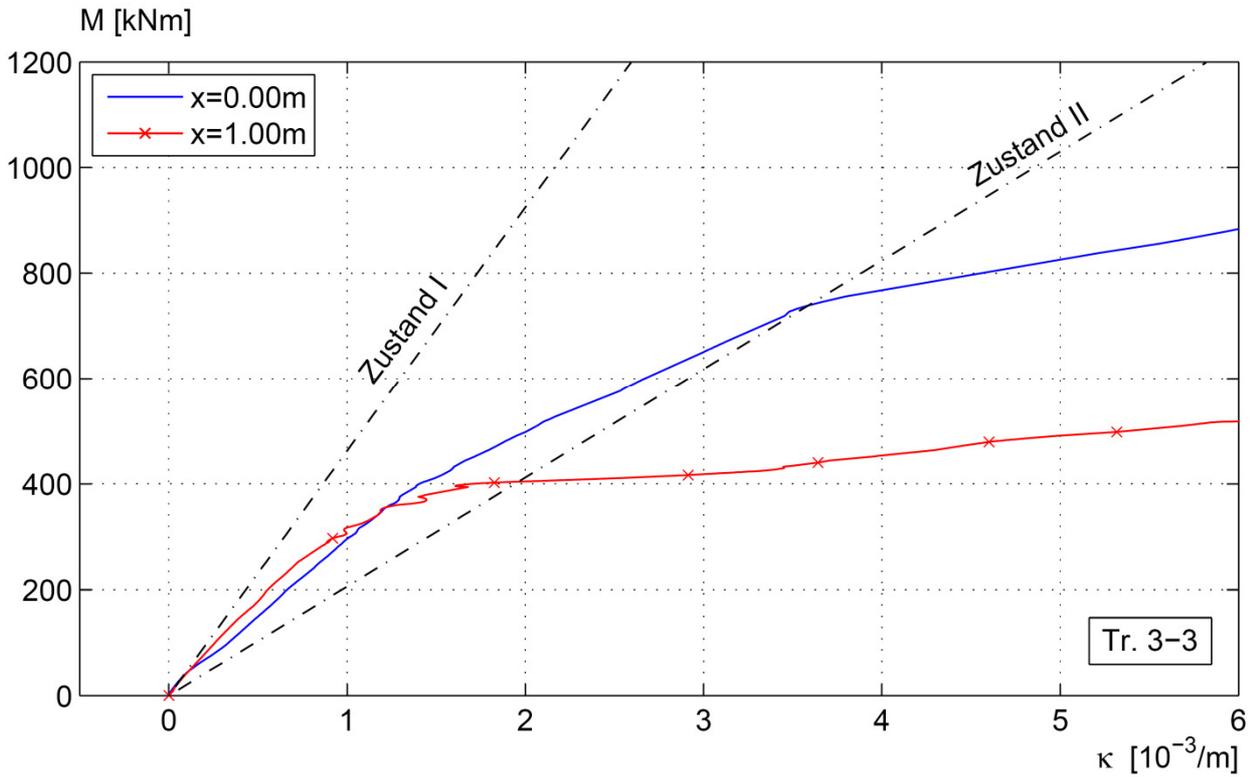


Abb. B-9: Momenten-Krümmungsbeziehung Versuchsträger Tr. 3-3 (GFT)

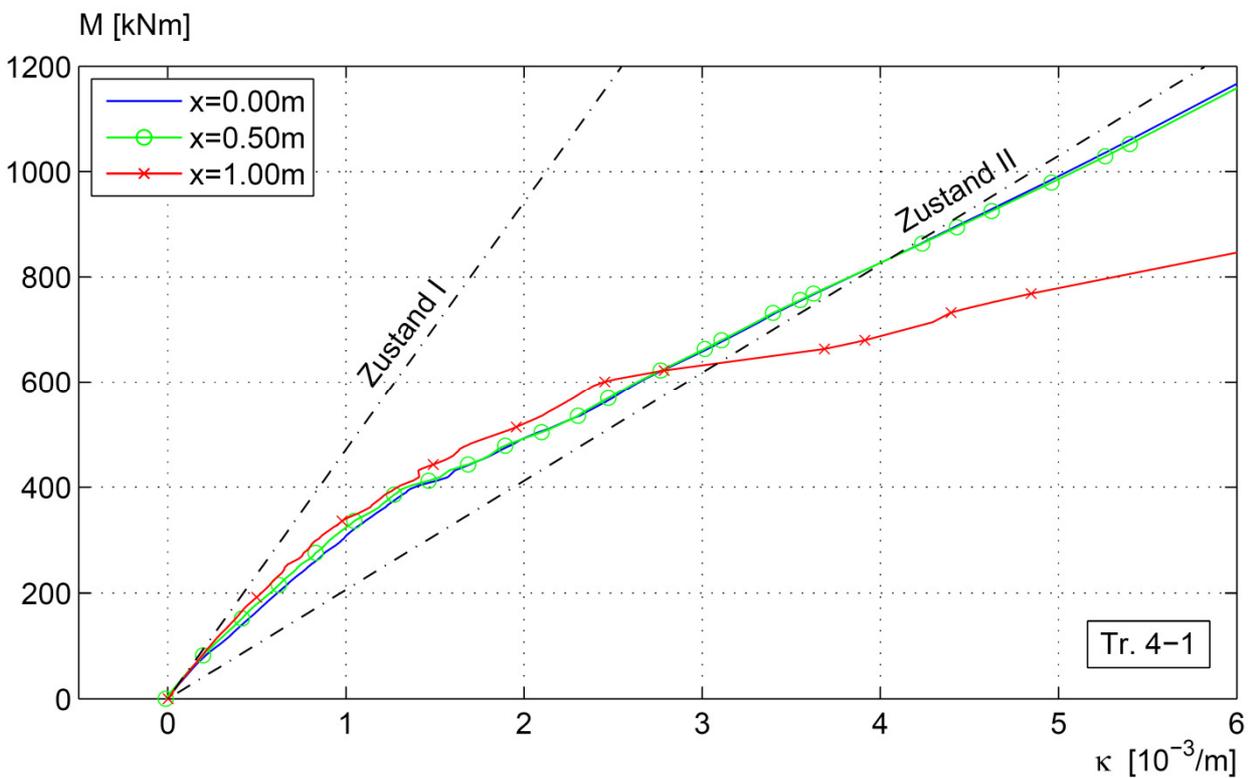


Abb. B-10: Momenten-Krümmungsbeziehung Versuchsträger Tr. 4-1 (GFT-Fuge)

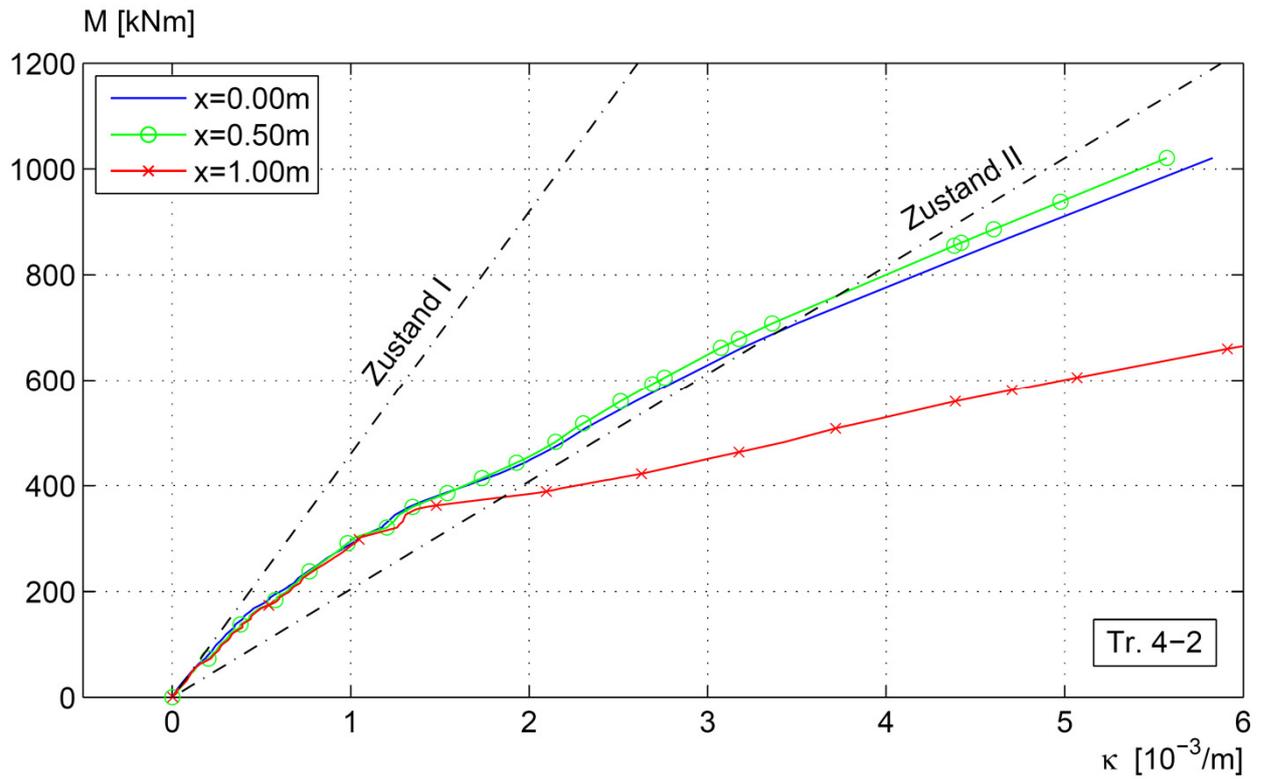


Abb. B-11: Momenten-Krümmungsbeziehung Versuchsträger Tr. 4-2 (TFT-Bewehrung)

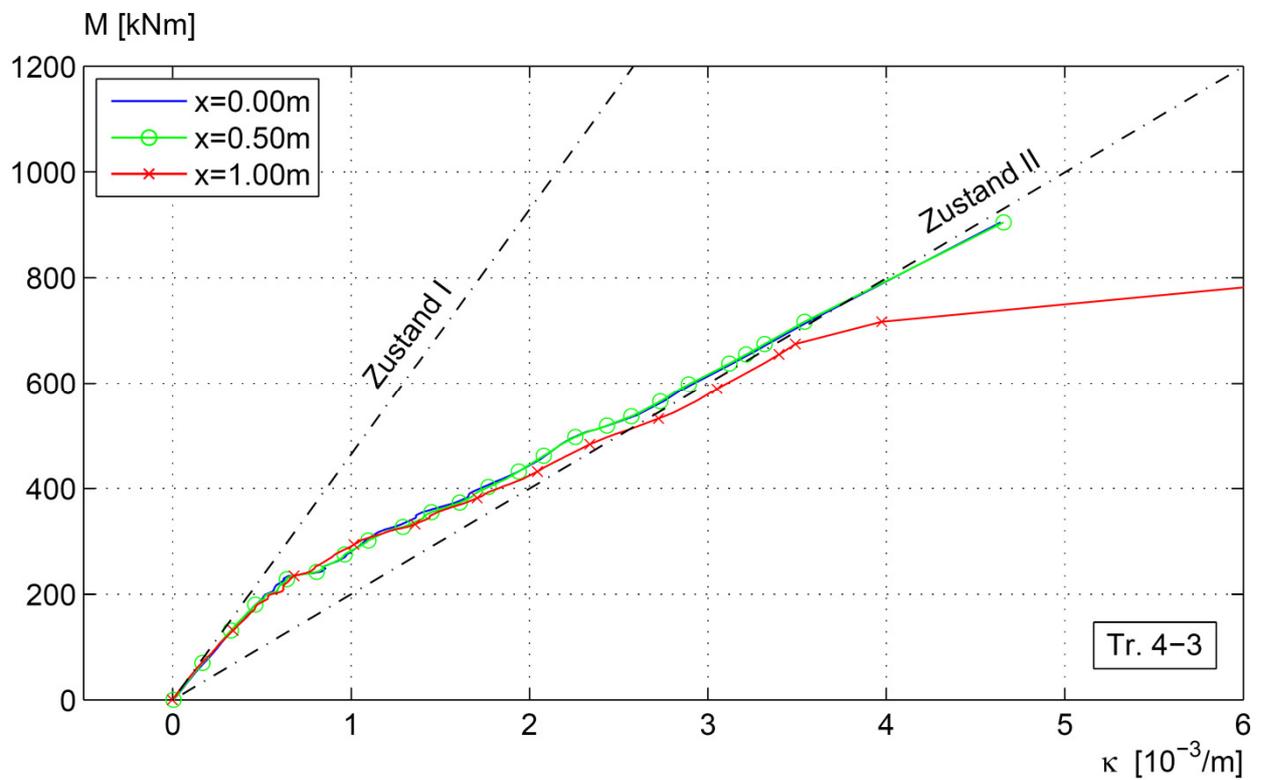


Abb. B-12: Momenten-Krümmungsbeziehung Versuchsträger Tr. 4-3 (OB)

Anhang C Rissbreiten

Grafische und tabellarische Übersicht der gemessenen Rissbreiten [14]

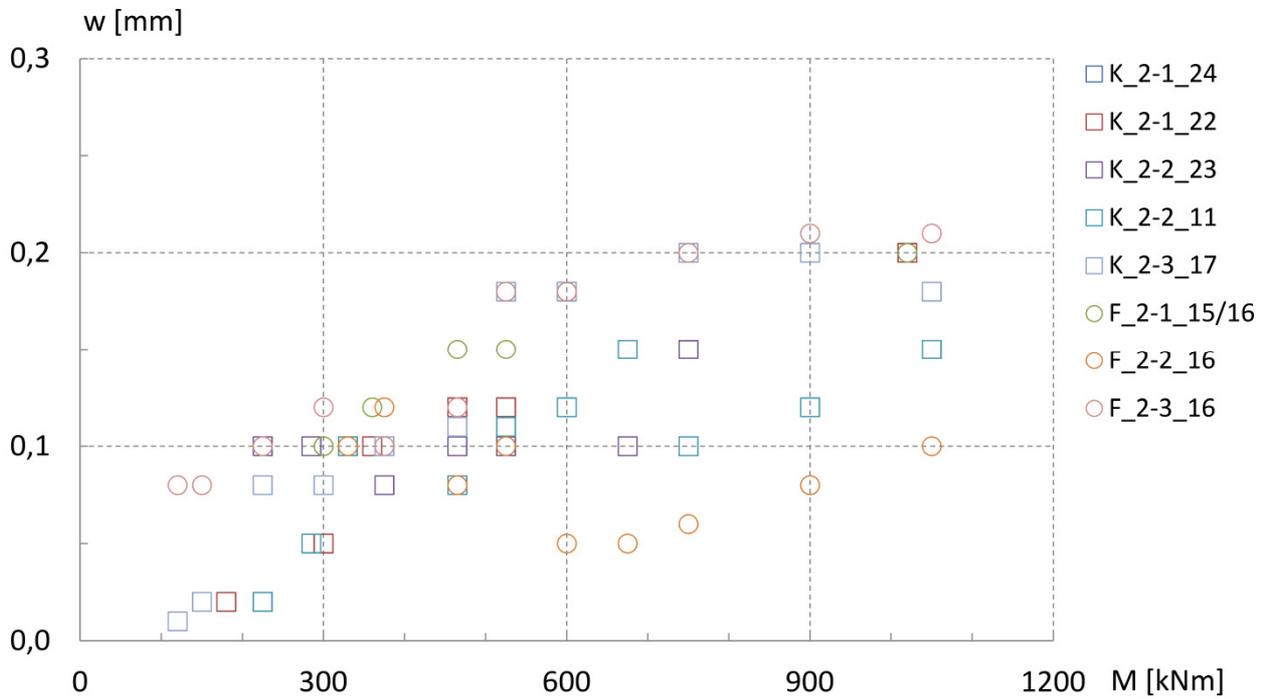


Abb. C-1: Rissbreiten Versuchsträger Charge 2 (TFT d/2)

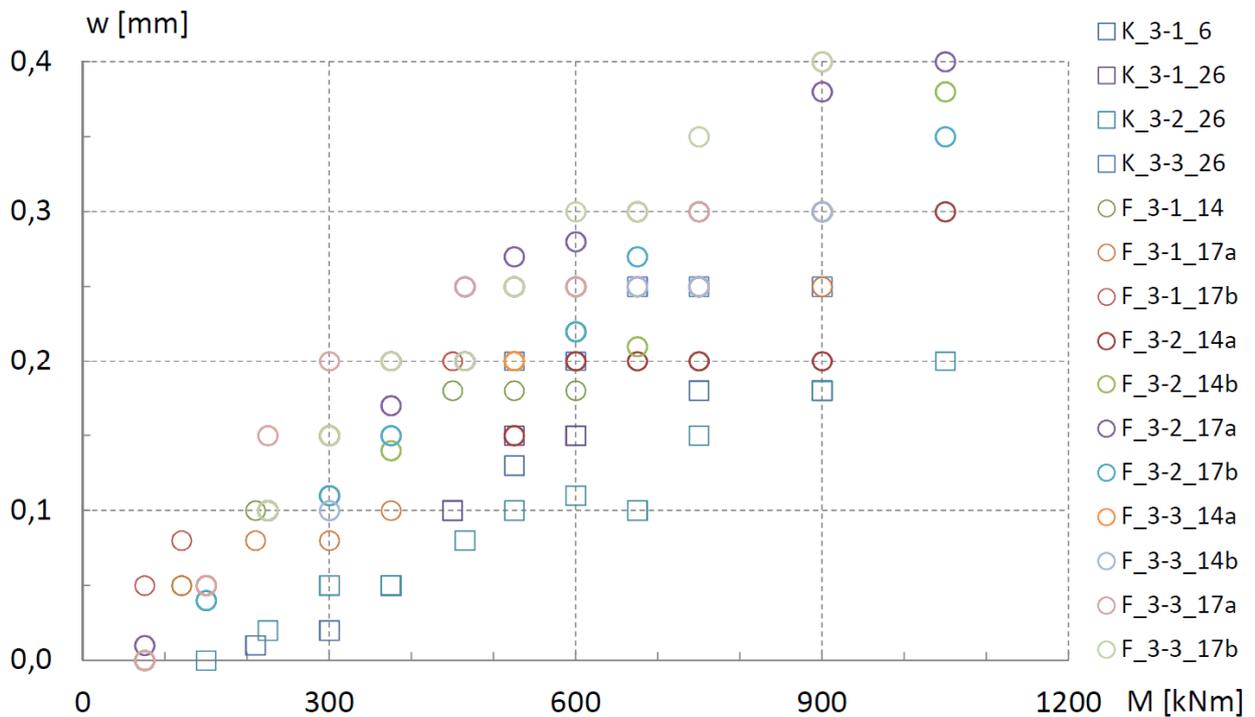


Abb. C-2: Rissbreiten Versuchsträger Charge 3 (GFT)

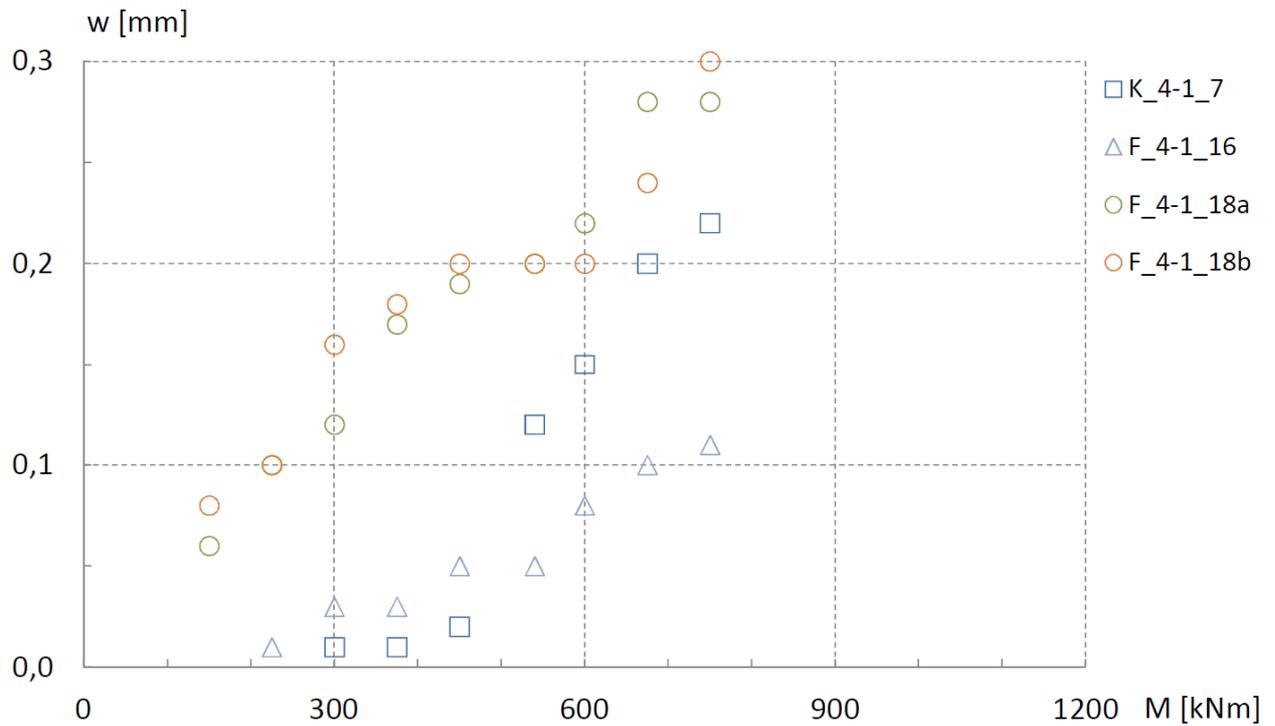


Abb. C-3: Rissbreiten Versuchsträger 4-1 (GFT-Fuge)

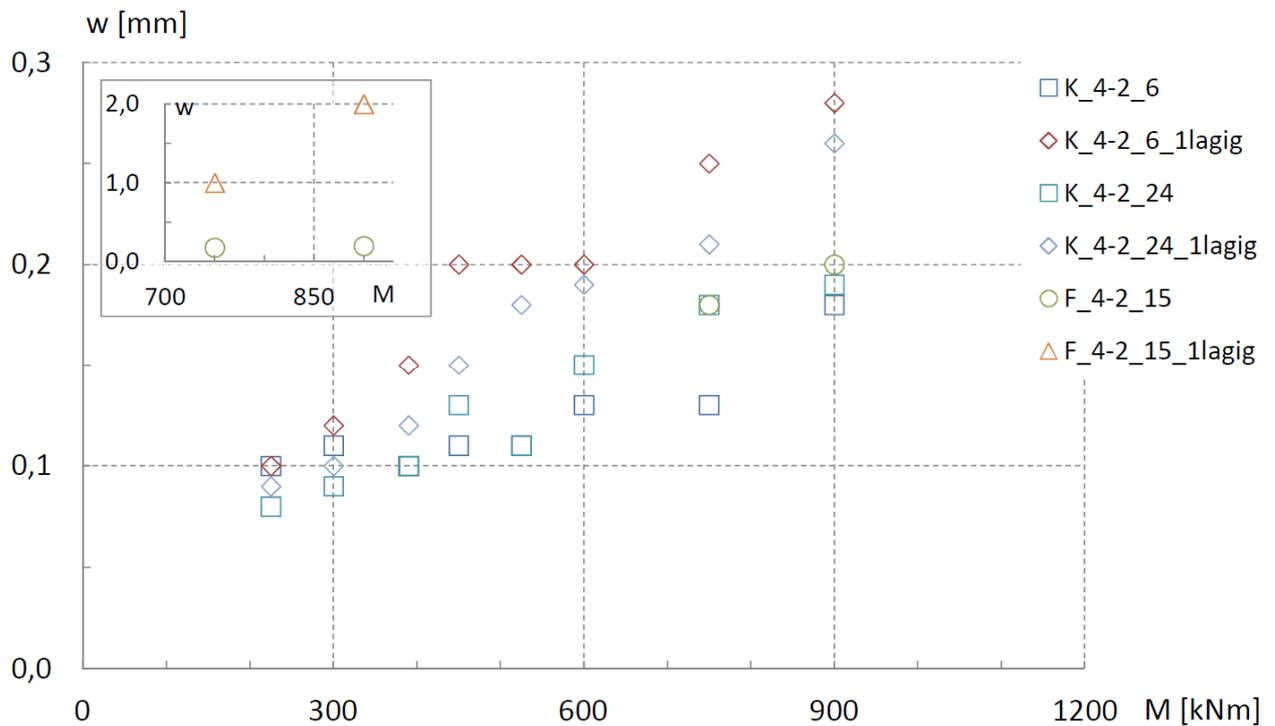


Abb. C-4: Rissbreiten Versuchsträger 4-2 (TFT-Bewehrung)

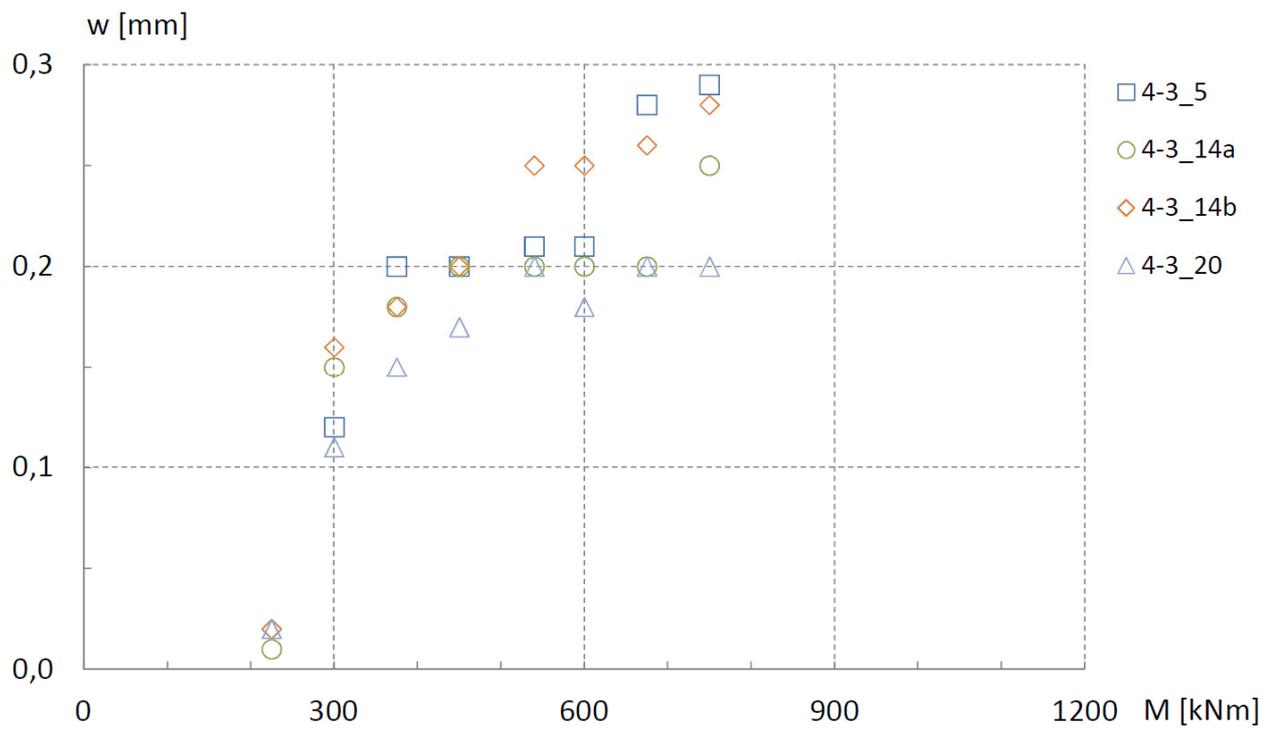


Abb. C-5: Rissbreiten Versuchsträger 4-3 (OB)

Tab. C-1: Rissbreiten Versuchsträger Charge 2 (TFT d/2)

Versuch : 2-1 Datum: 19.01.2015

Risskoordinaten			Rissbreite in [mm] abhängig von Laststufe (LS)											
Nr.	von	bis	LS 12	LS 15	LS 20	LS 24	LS 31	LS 35	LS 40	LS 68				
24	I	P	0,02	0,02	0,05	0,10	0,12	0,12	0,18	0,20				
22	I	P	0,02	0,02	0,05	0,10	0,12	0,12	0,18	0,20				
15-16	I	P			0,10	0,12	0,15	0,15	0,18	0,20				
15-16	Seitenfläche								0,25	0,40				

Versuch : 2-2 Datum: 21.01.2015

Risskoordinaten			Rissbreite in [mm] abhängig von Laststufe (LS)											
Nr.	von	bis	LS 15	LS 19	LS 22	LS 25	LS 31	LS 35	LS 40	LS 45	LS 50	LS 60	LS 70	
23	K	P	0,1	0,10	0,10	0,08	0,10	0,10	0,18	0,10	0,15	0,20	0,18	
11	O	P	0,02	0,05	0,10	0,10	0,08	0,11	0,12	0,15	0,10	0,12	0,15	
16	K	P			0,10	0,12	0,08	0,10	0,05	0,05	0,06	0,08	0,10	

Versuch : 2-3 Datum: 23.01.2015

Risskoordinaten			Rissbreite in [mm] abhängig von Laststufe (LS)											
Nr.	von	bis	LS 8	LS 10	LS 15	LS 20	LS 25	LS 31	LS 35	LS 40	LS 50	LS 60	LS 70	
17	P	P	0,01	0,02	0,08	0,08	0,10	0,11	0,18	0,18	0,20	0,20	0,18	
16	N	P	0,08	0,08	0,10	0,12	0,10	0,12	0,18	0,18	0,20	0,21	0,21	

Tab. C-2: Rissbreiten Versuchsträger Charge 3 (GFT)

Versuch : 3-1 Datum: 16.03.2015

Risskoordinaten			Rissbreite in [mm] abhängig von Laststufe (LS)											
Nr.	von	bis	LS 5*	LS 8	LS 14	LS 20	LS 25	LS 30	LS 35	LS 40	LS 50	LS 60		
14	I	P	0,01	0,05	0,10	0,11	0,15	0,18	0,18	0,18	0,20			
17	I	P		0,05	0,08	0,08	0,10	0,20	0,20	0,20	0,25	0,25		
17	A	H	0,05	0,08		0,15	0,20	0,20	0,20	0,22	0,25	0,30		
6	M	P			0,01	0,02	0,05	0,10	0,13	0,15	0,18			
26	A	H						0,10	0,15	0,15		0,18		

Versuch : 3-2 Datum: 18.03.2015 *: nach Lasthysterese

Risskoordinaten			Rissbreite in [mm] abhängig von Laststufe (LS)												
Nr.	von	bis	LS 5	LS 10	LS 15	LS 20	LS 25	LS 31	LS 35	LS 40	LS 45	LS 50	LS 50*	LS 60	LS70
17	I	P	> 0,01	0,04	0,10	0,11	0,15	0,20	0,25	0,22	0,27	0,25	0,28	0,30	0,35
14	J	P	> 0,01	0,04	0,10	0,11	0,14	0,20	0,20	0,22	0,21	0,25	0,26	0,30	0,38
17	A	H	0,01	0,05	0,10	0,15	0,17	0,25	0,27	0,28	0,30	0,30	0,35	0,38	0,40
26	H	I		> 0,01	0,02	0,05	0,05	0,08	0,10	0,11	0,10	0,15	0,14	0,18	0,20
14	A							0,15	0,15	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,30

Versuch : 3-3 Datum: 20.03.2015

Risskoordinaten			Rissbreite in [mm] abhängig von Laststufe (LS)											
Nr.	von	bis	LS 5	LS 10	LS 15	LS 20	LS 25	LS 31	LS 35	LS 40	LS 45	LS 50	LS 60	
14	C	C	> 0,01	0,05	0,10	0,15	0,20	0,20	0,20	0,25	0,25	0,25	0,30	
17	C	C	> 0,01	0,05	0,15	0,20	0,20	0,25	0,25	0,25	0,30	0,30	0,40	
14	N	N			0,10	0,10	0,20	0,20	0,25	0,25	0,25	0,25	0,30	
17	O	O			0,10	0,15	0,20	0,20	0,25	0,30	0,30	0,35	0,40	
26	J	J				0,05	0,10	0,15	0,20	0,20	0,25	0,25	0,25	

Tab. C-3: Rissbreiten Versuchsträger 4-1 (GFT-Fuge)

Versuch : 4-1

Datum: 26.05.2015

*: nach Lasthysterese

Risskoordinaten			Rissbreite in [mm] abhängig von Laststufe (LS)												
Nr.	von	bis	LS 10	LS 15	LS 20	LS 25	LS 30	LS 36	LS 40	LS 45	LS 50	LS 50*	LS 76	Entlastet	
18	O	P	0,08	0,10	0,16	0,18	0,20	0,20	0,20	0,24	0,30	0,30		0,04	
18	A	B	0,06	0,10	0,12	0,17	0,19	0,20	0,22	0,28	0,28	0,30		0,05	
16	P	P		0,01	0,03	0,03	0,05	0,05	0,08	0,10	0,11	0,11		0,01	
7	P	O			0,01	0,01	0,02	0,12	0,15	0,20	0,22	0,25		0,06	

Tab. C-4: Rissbreiten Versuchsträger 4-2 (TFT-Bewehrung)

Versuch : 4-2

Datum: 28.05.2015

Risskoordinaten			Rissbreite in [mm] abhängig von Laststufe (LS)												
Nr.	von	bis	LS 15	LS 20	LS 26	LS 30	LS 35	LS 40	LS 50	LS 60					
6	C	C	0,10	0,11	0,10	0,11	0,11	0,13	0,13	0,18					
6	O	O	0,10	0,12	0,15	0,20	0,20	0,20	0,25	0,28					
24	D	D	0,08	0,09	0,10	0,13	0,11	0,15	0,18	0,19					
24	N	N	0,09	0,10	0,12	0,15	0,18	0,19	0,21	0,26					
15	B	B							0,18	0,20					
15	O	O							1,00	2,00					

Tab. C-5: Rissbreiten Versuchsträger 4-3 (OB)

Versuch : 4-3

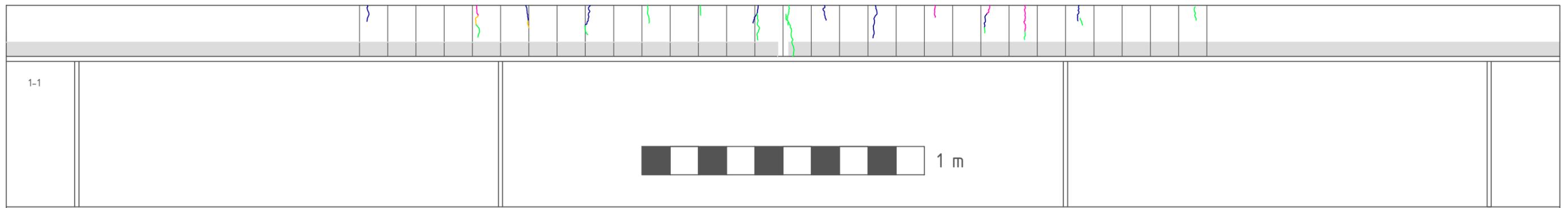
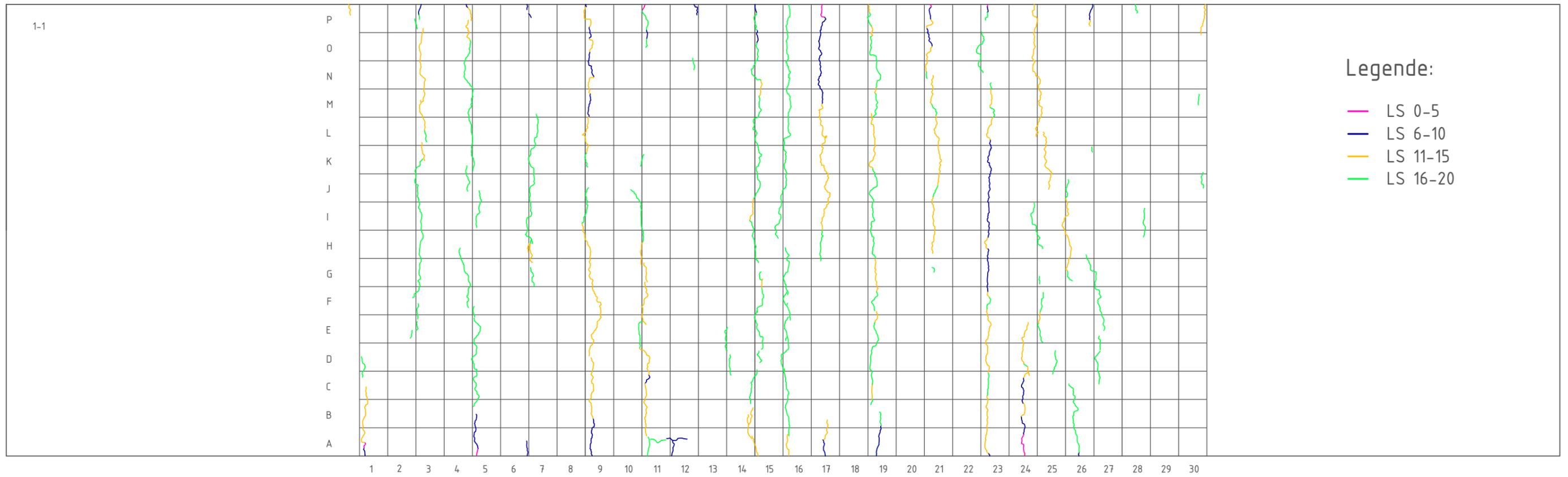
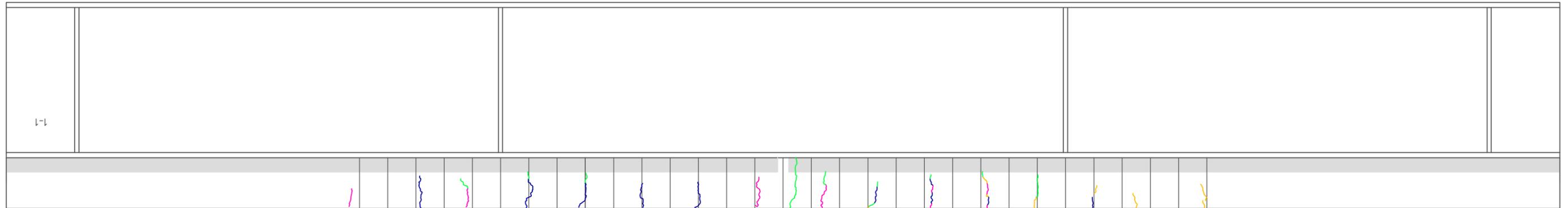
Datum: 01.06.2015

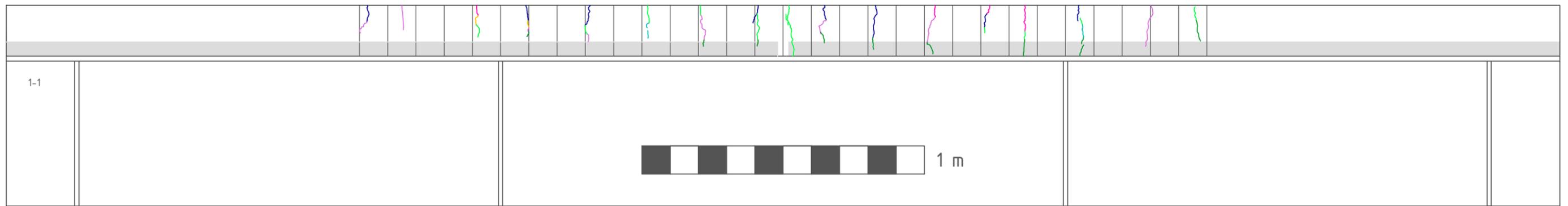
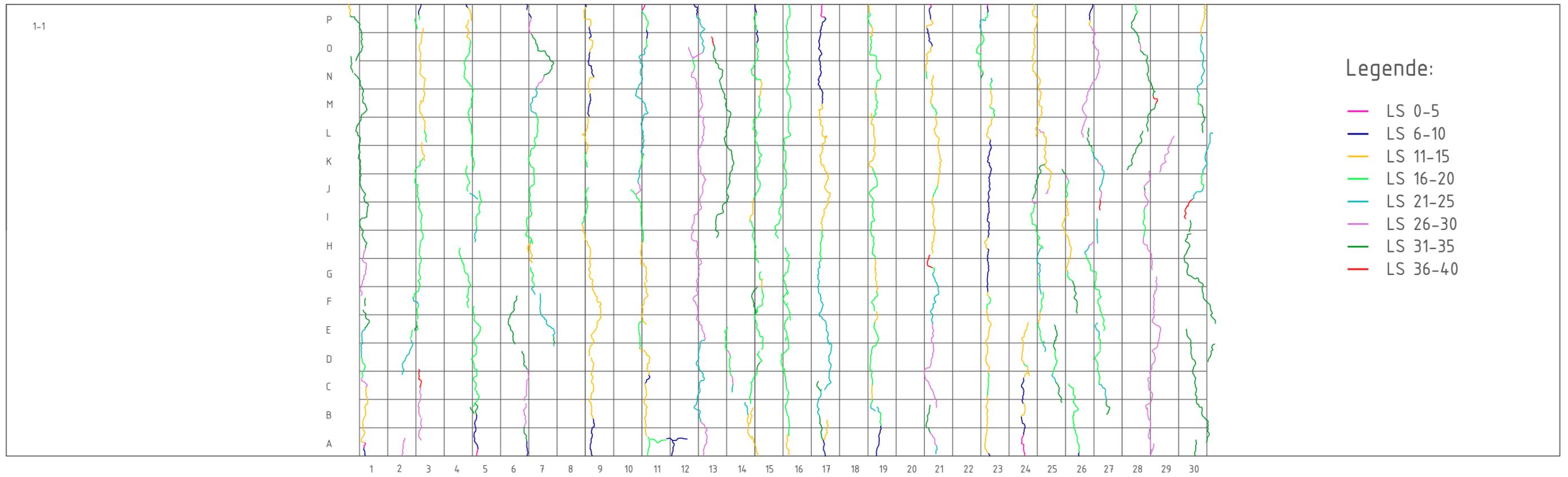
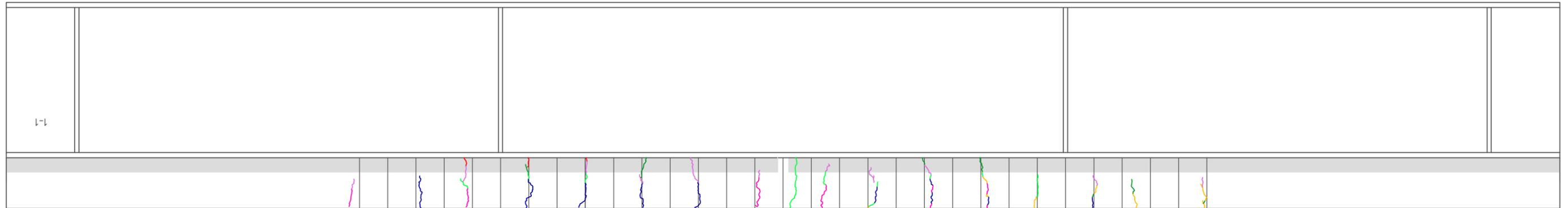
Risskoordinaten			Rissbreite in [mm] abhängig von Laststufe (LS)												
Nr.	von	bis	LS 15	LS 20	LS 25	LS 30	LS 36	LS 40	LS 45	LS 50	LS 60				
20	B	B	0,02	0,11	0,15	0,17	0,20	0,18	0,20	0,20	0,20				
14	K	K	0,01	0,15	0,18	0,20	0,20	0,20	0,20	0,25	0,28				
14	O	O	0,02	0,16	0,18	0,20	0,25	0,25	0,26	0,28	0,35				
5	O	O		0,12	0,20	0,20	0,21	0,21	0,28	0,29	0,35				

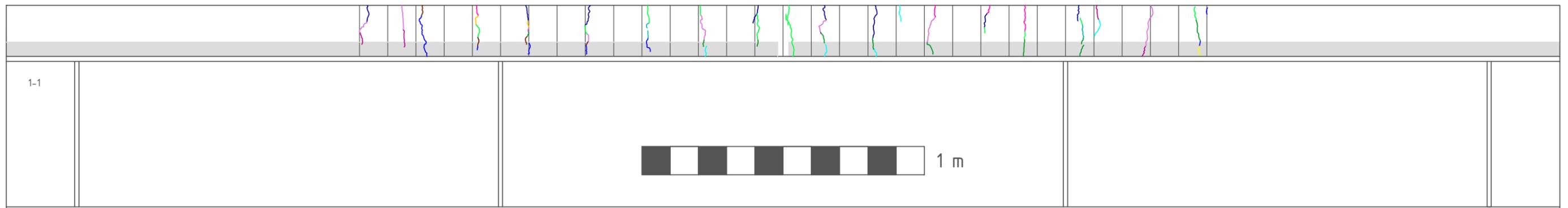
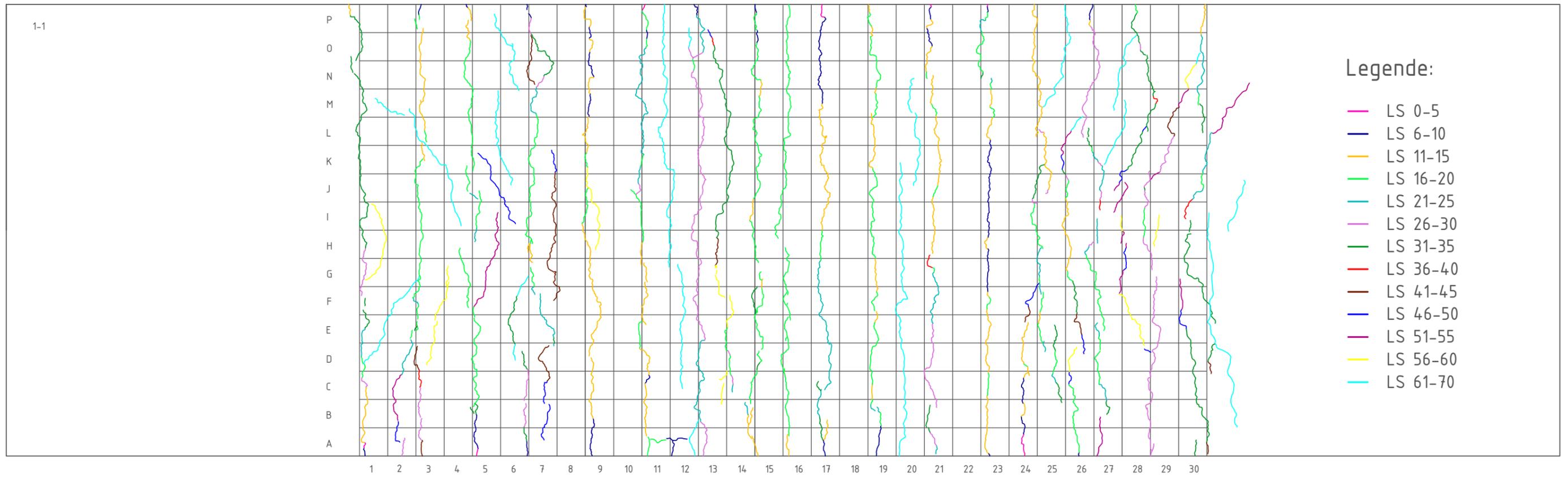
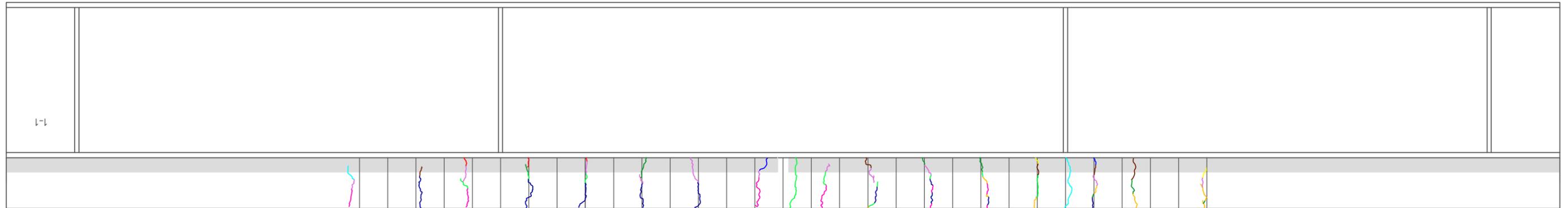
Anhang D Rissbilder

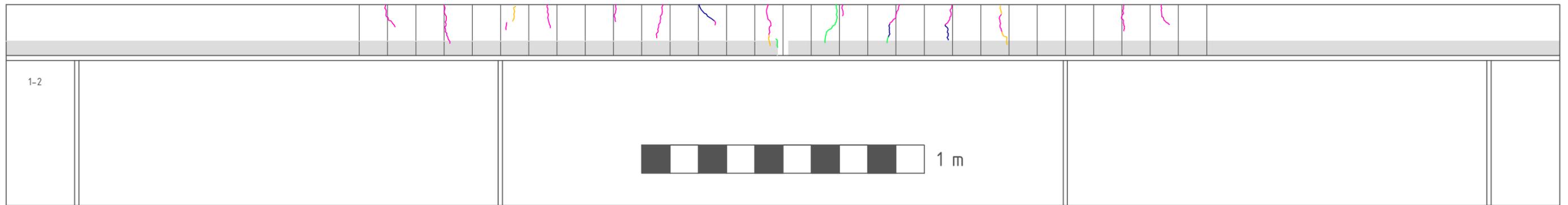
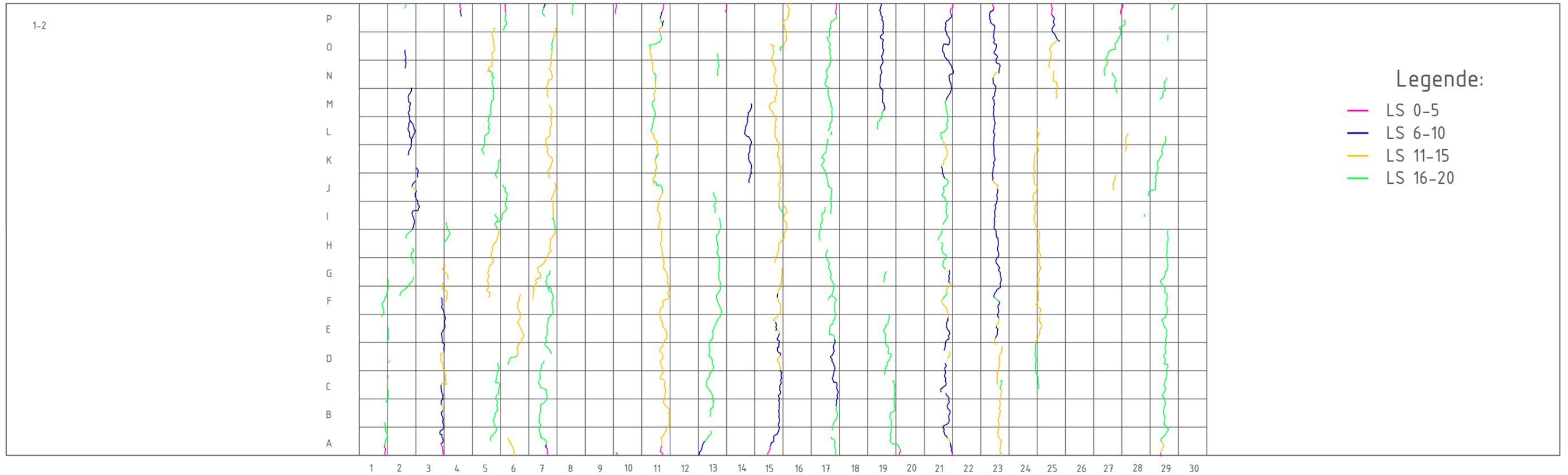
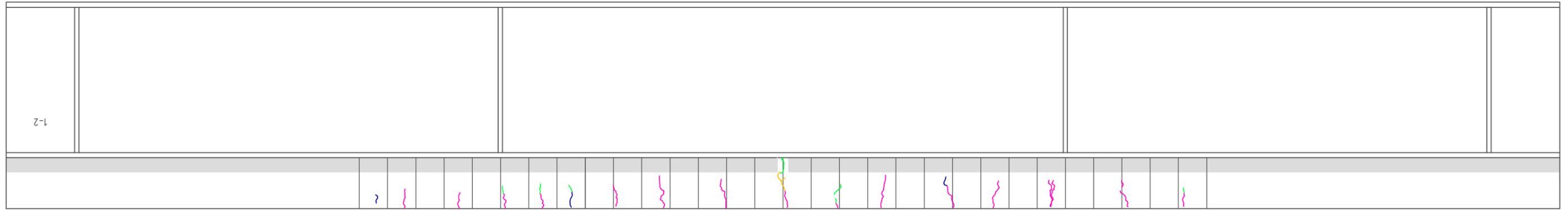
Rissbilder in farbiger Darstellung; Rastermaß 10 cm [14]

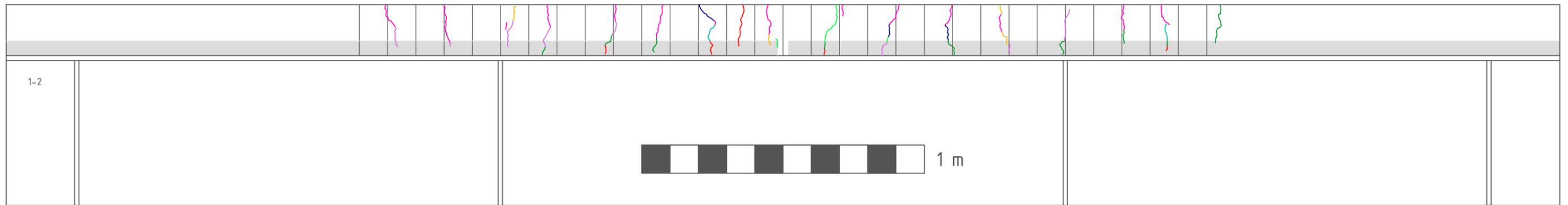
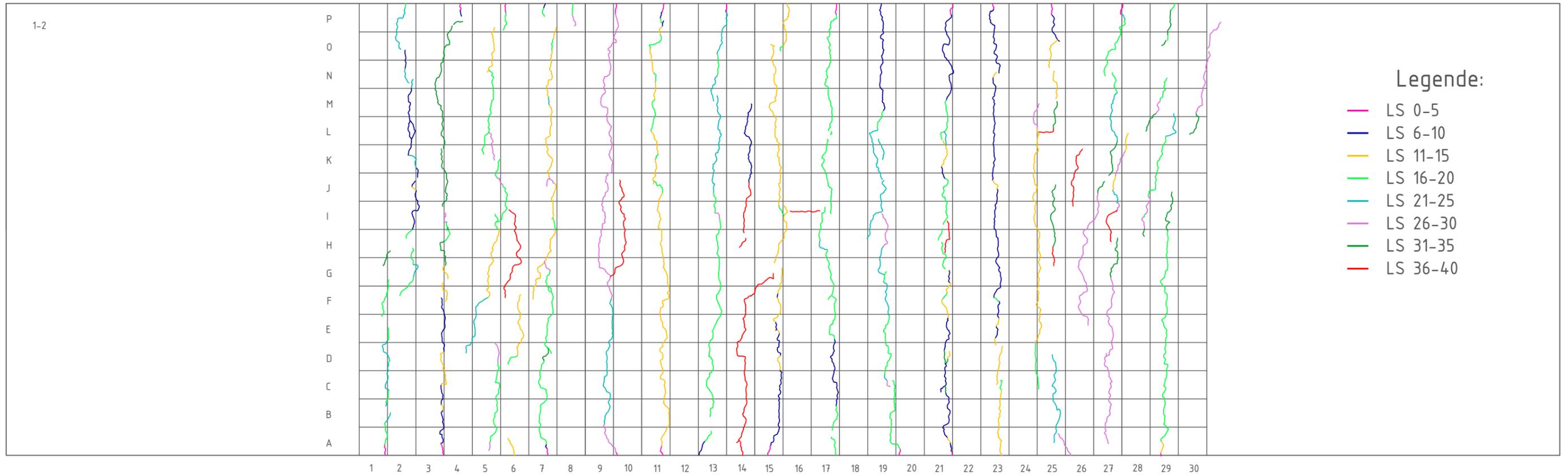
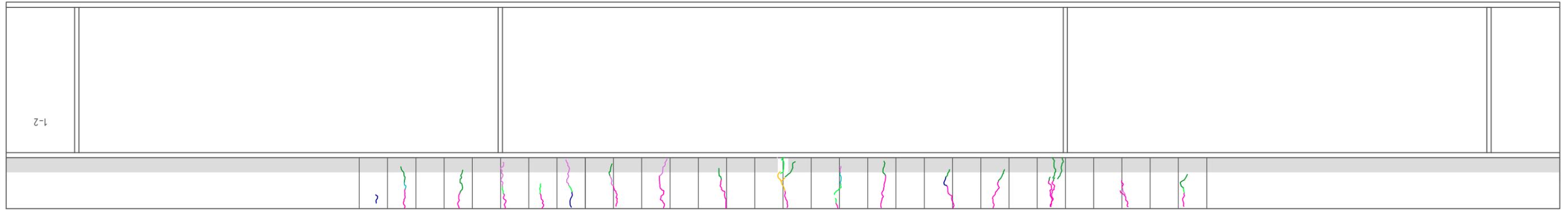
		Laststufe	Seite
Charge 1	Träger 1-1	LS 20	83
		LS 40	84
		LS 70	85
	Träger 1-2	LS 20	86
		LS 40	87
		LS 70	88
	Träger 1-3	LS 20	89
		LS 40	90
		LS 70	91
Charge 2	Träger 2-1	LS 20	92
		LS 40	93
		LS 70	94
	Träger 2-2	LS 20	95
		LS 40	96
		LS 70	97
	Träger 2-3	LS 20	98
		LS 40	99
		LS 70	100
Charge 3	Träger 3-1	LS 20	101
		LS 45	102
		LS 70	103
	Träger 3-2	LS 20	104
		LS 45	105
		LS 70	106
	Träger 3-3	LS 20	107
		LS 45	108
		LS 70	109
Charge 4	Träger 4-1	LS 20	110
		LS 45	111
		LS 70	112
	Träger 4-2	LS 20	113
		LS 40	114
		LS 70	115
	Träger 4-3	LS 20	116
		LS 40	117
		LS 70	118

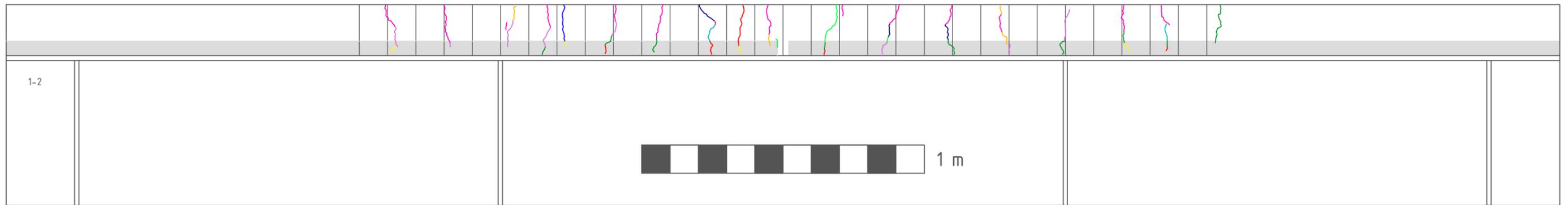
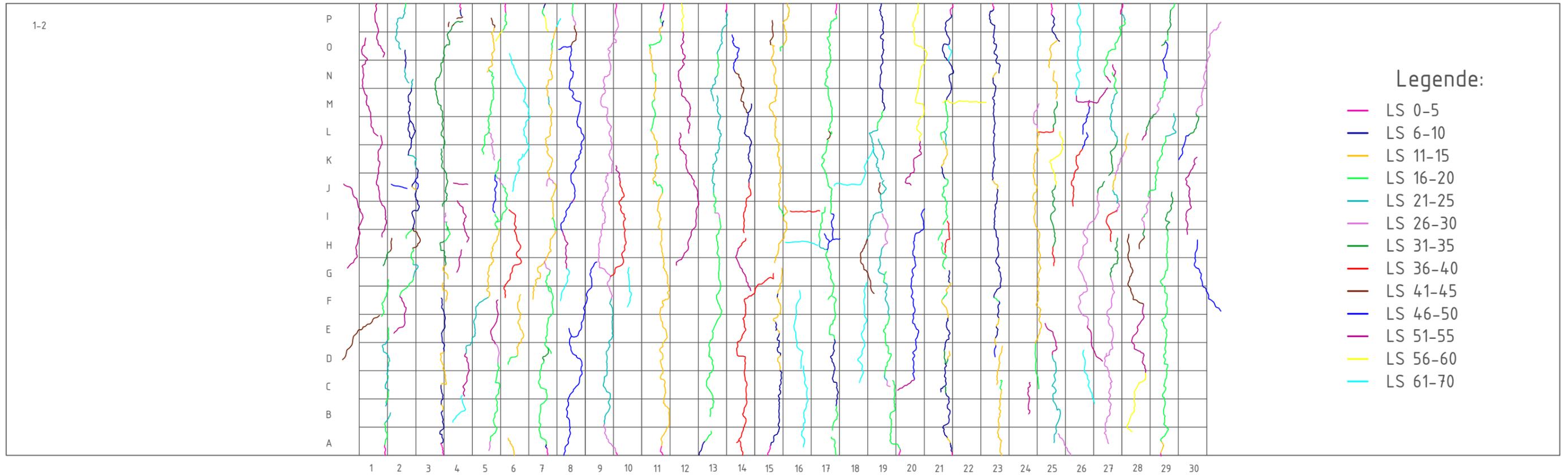
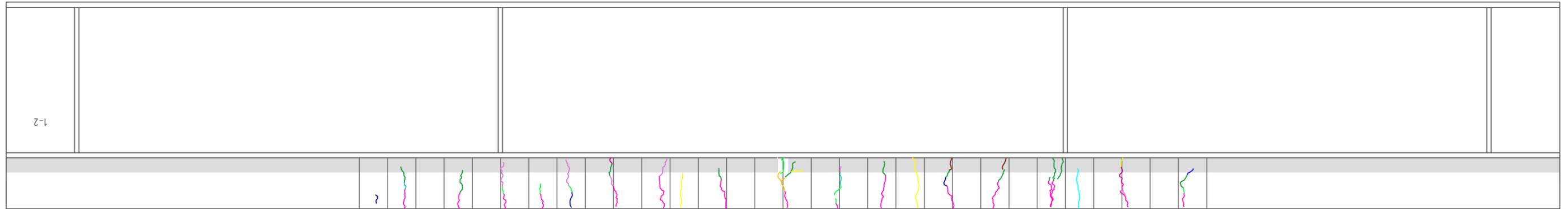


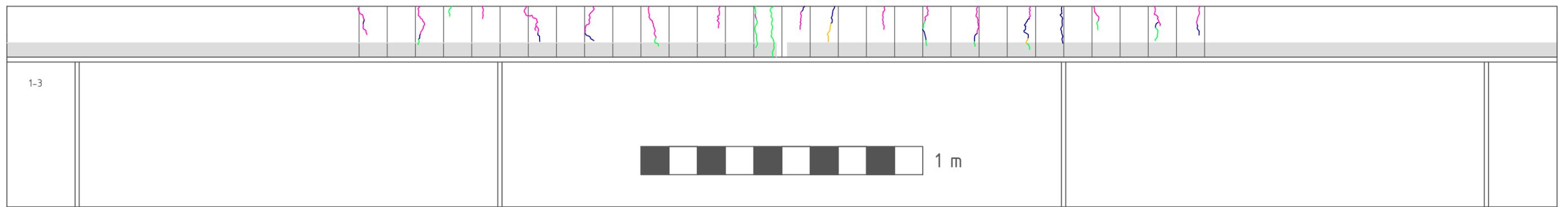
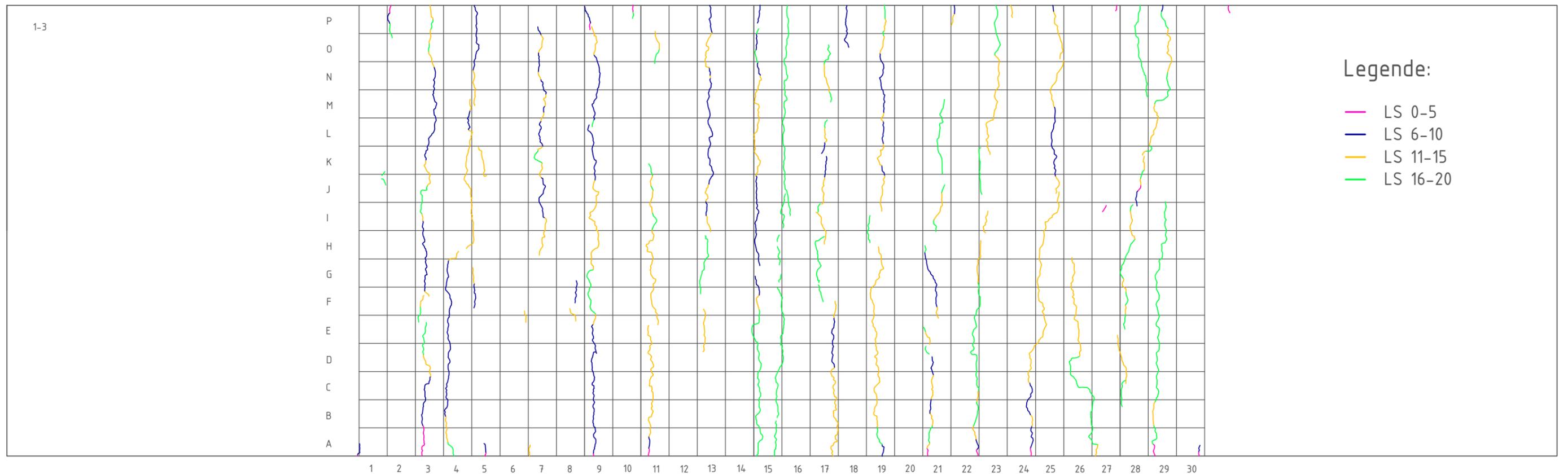
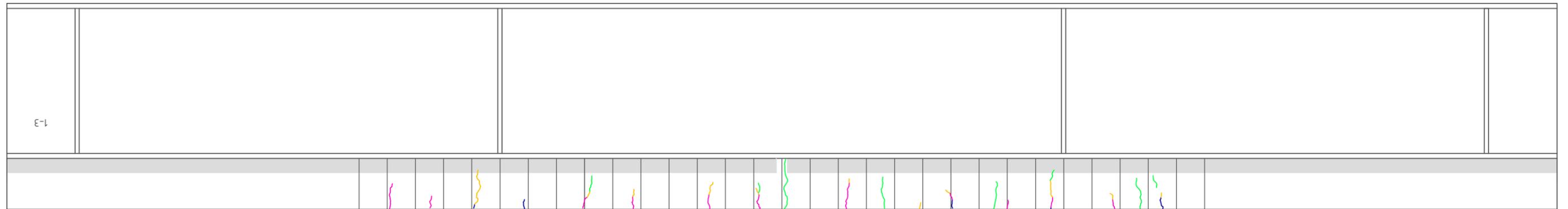


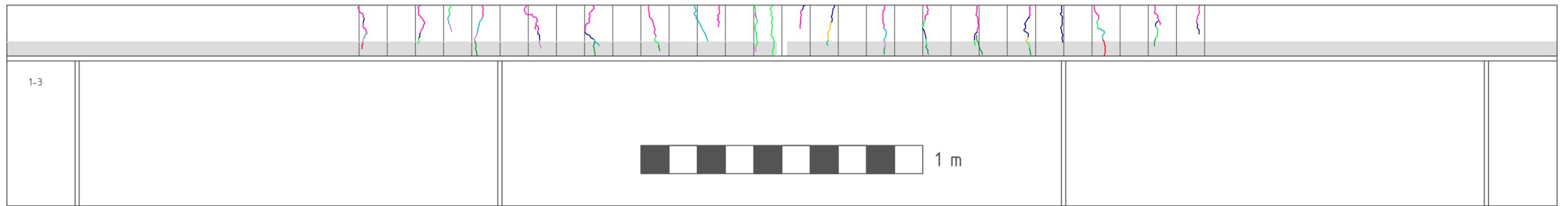
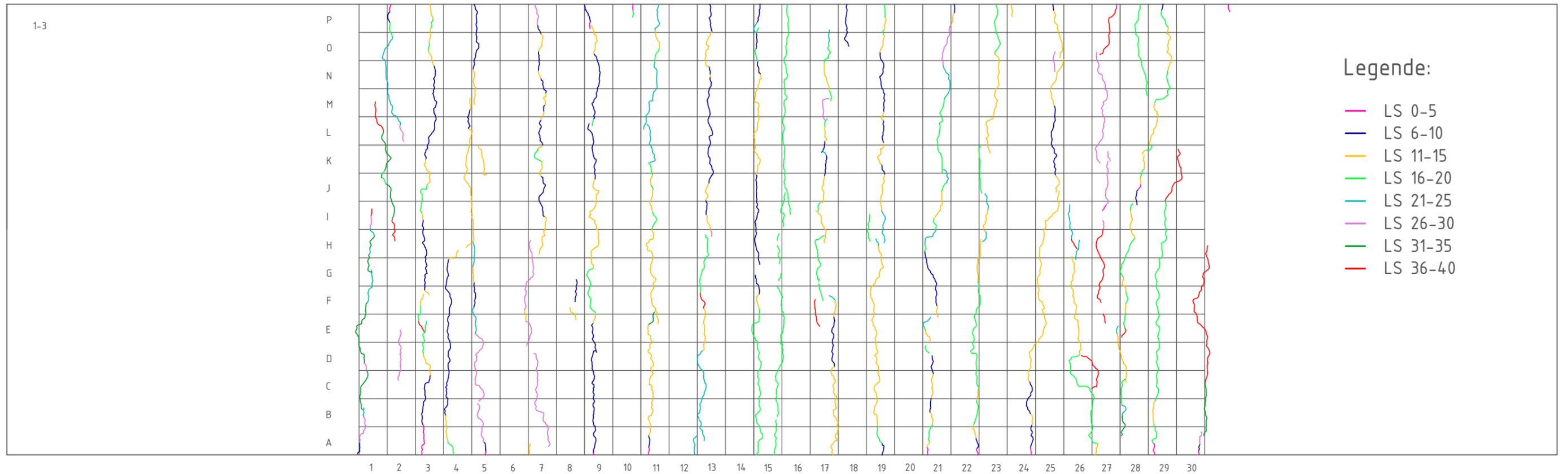
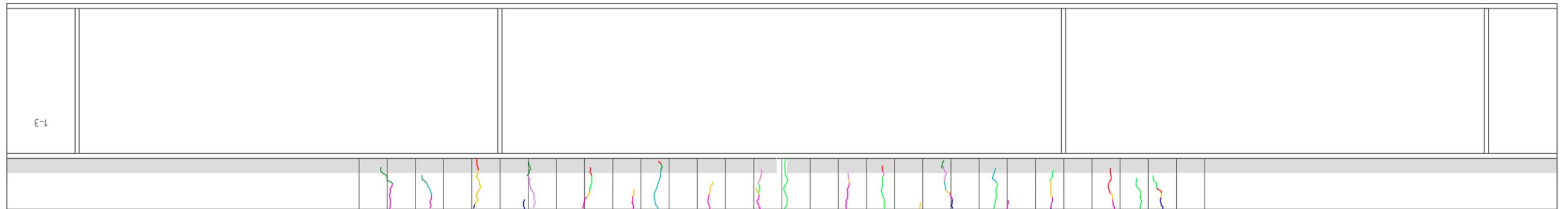


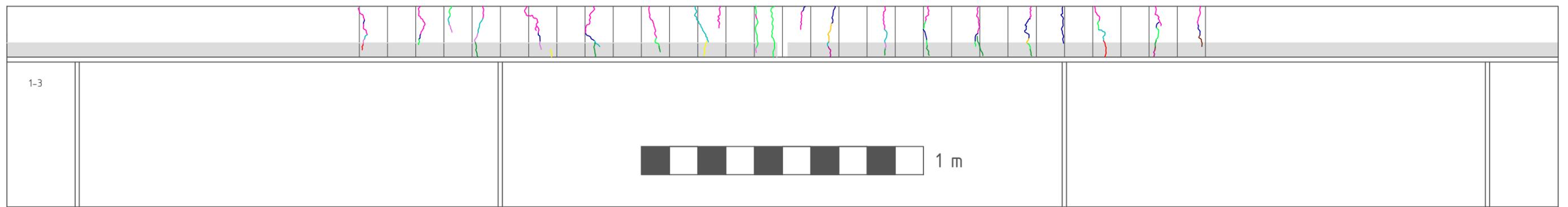
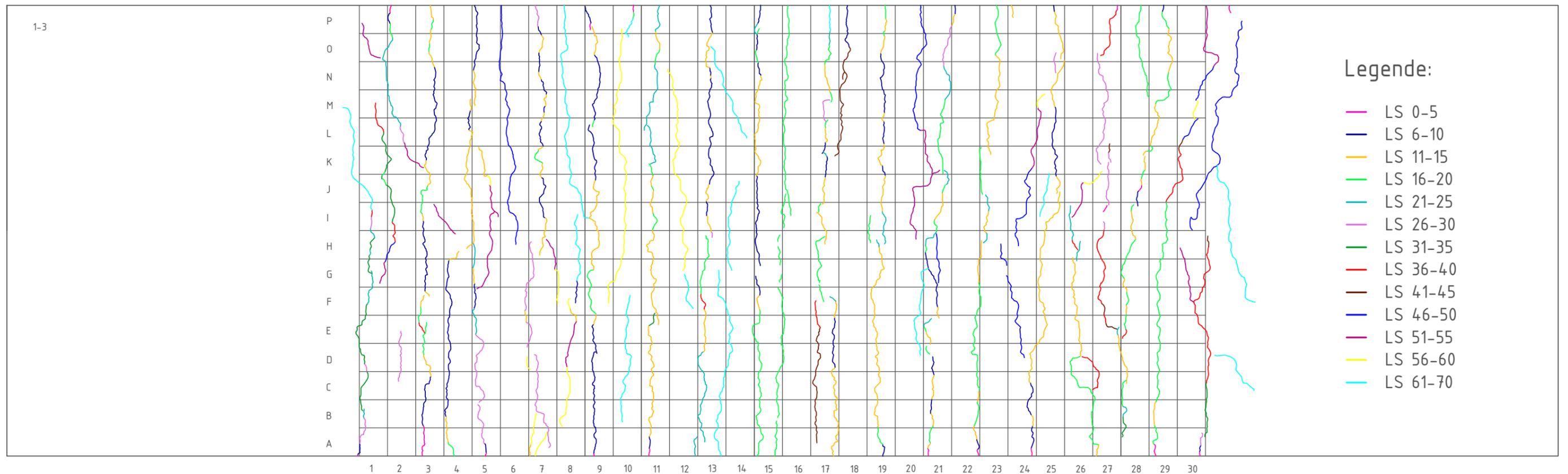
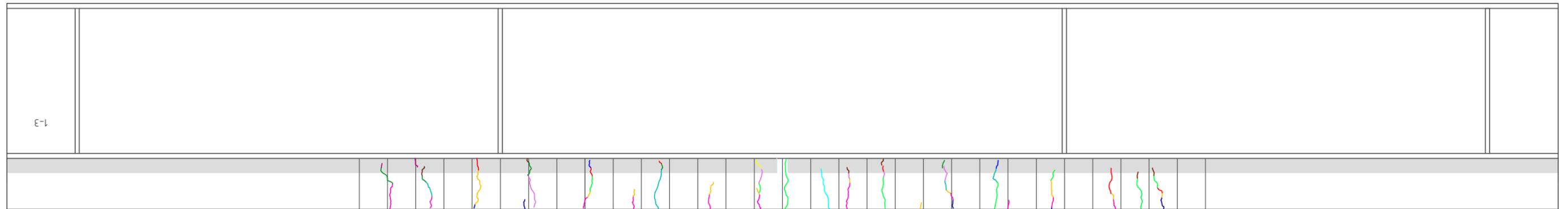


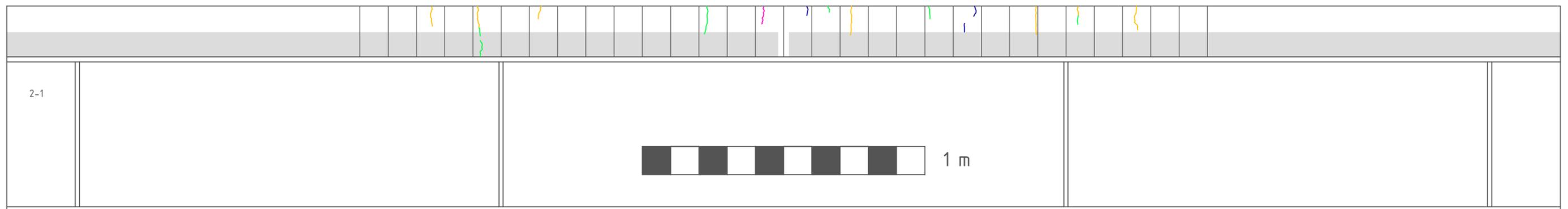
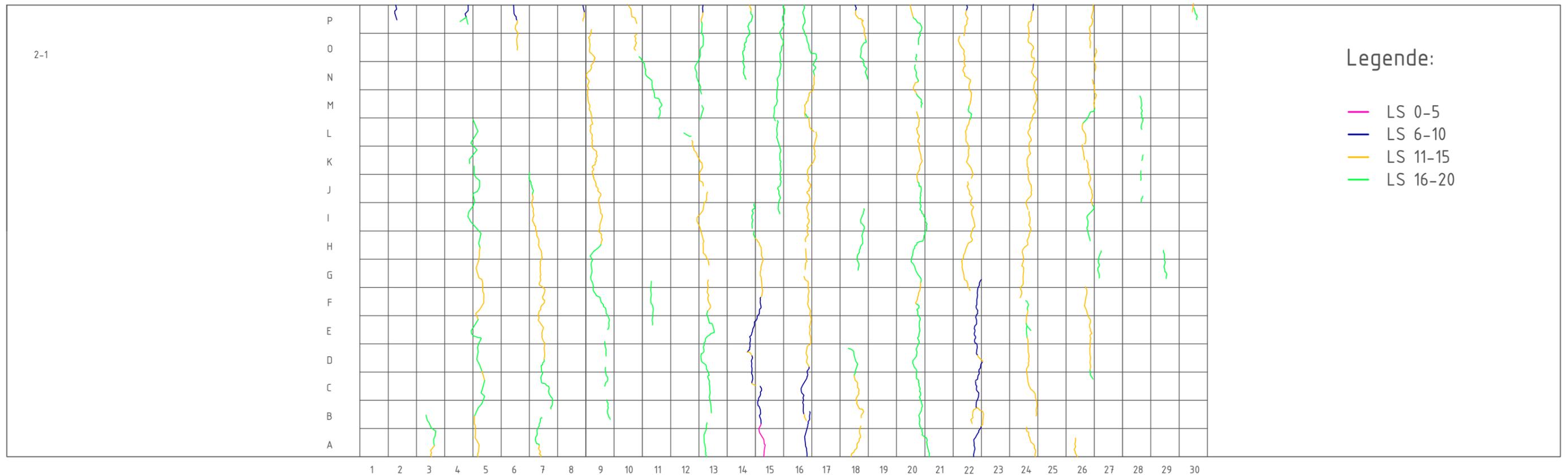
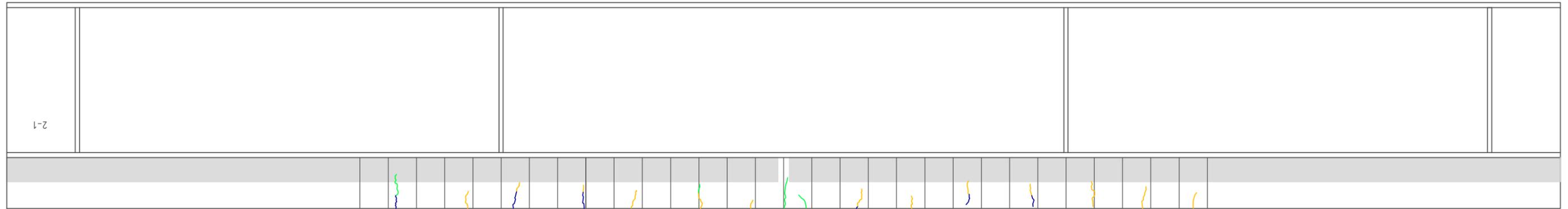


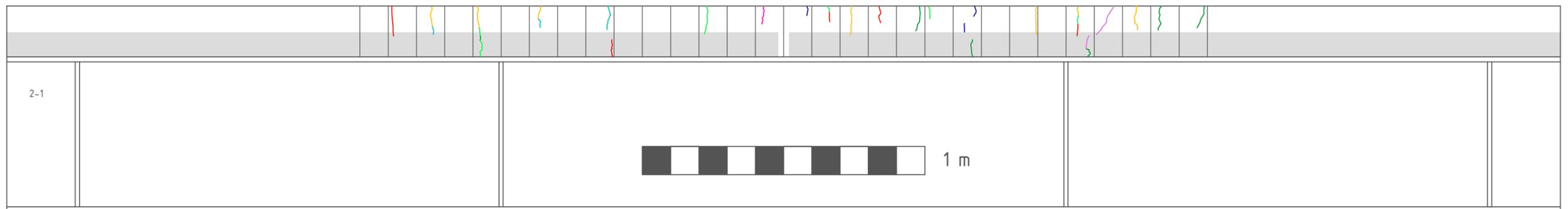
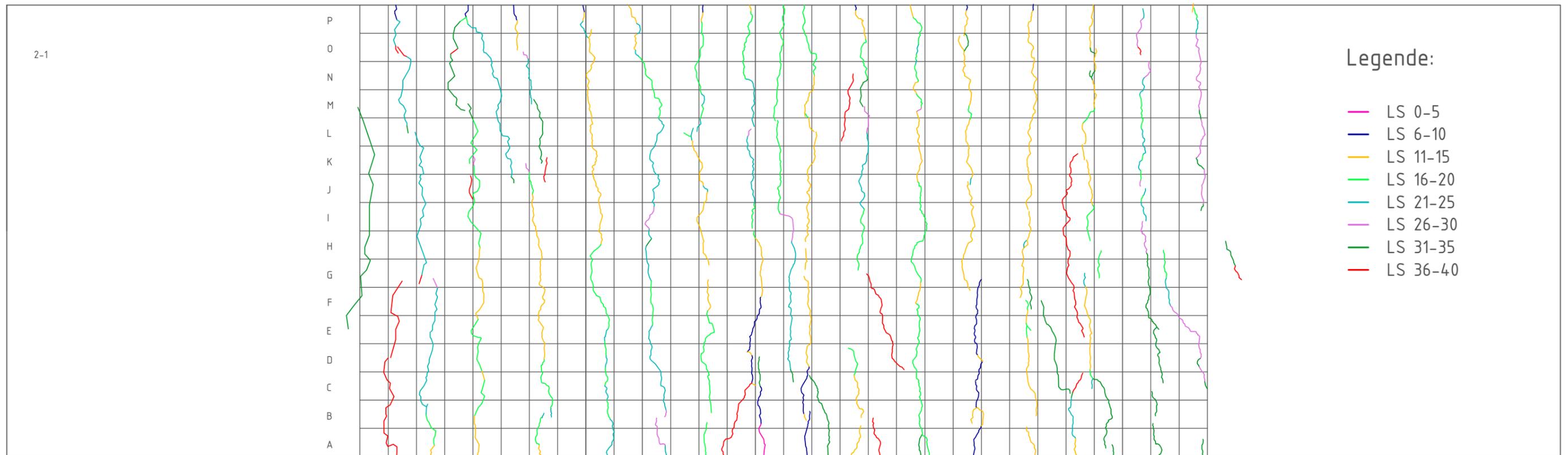
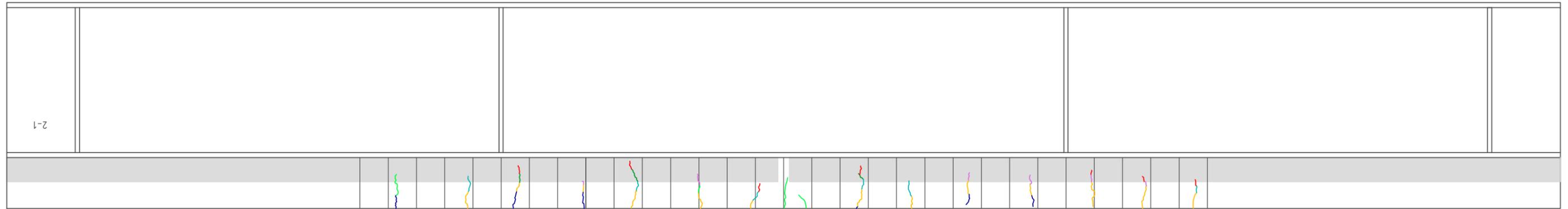


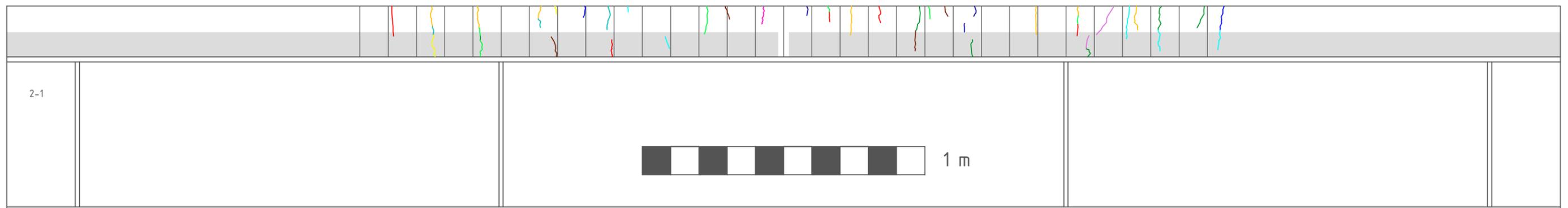
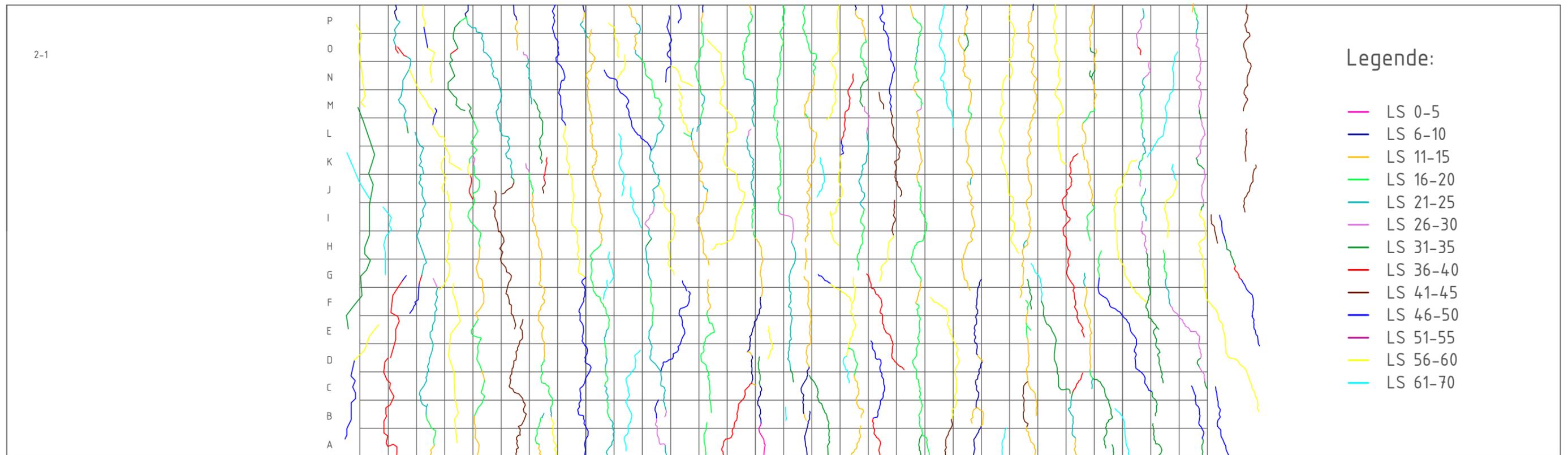
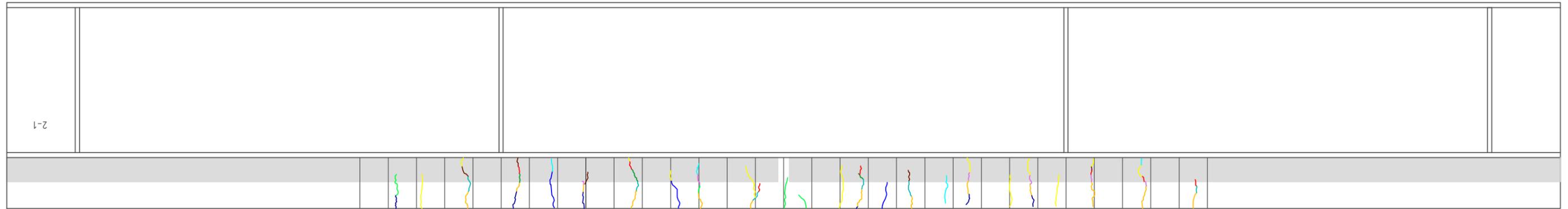


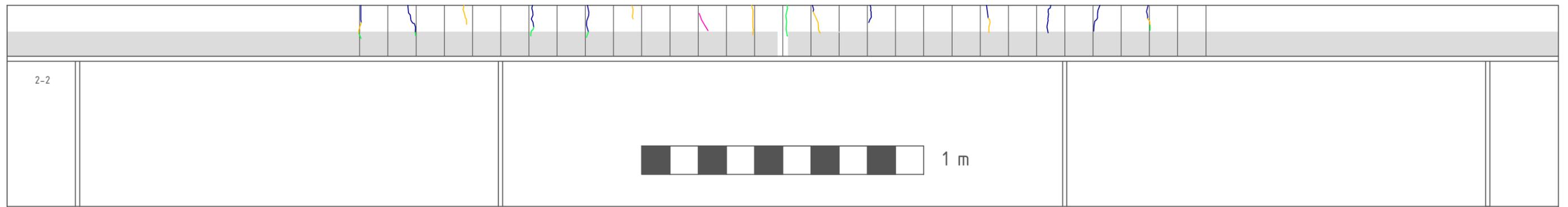
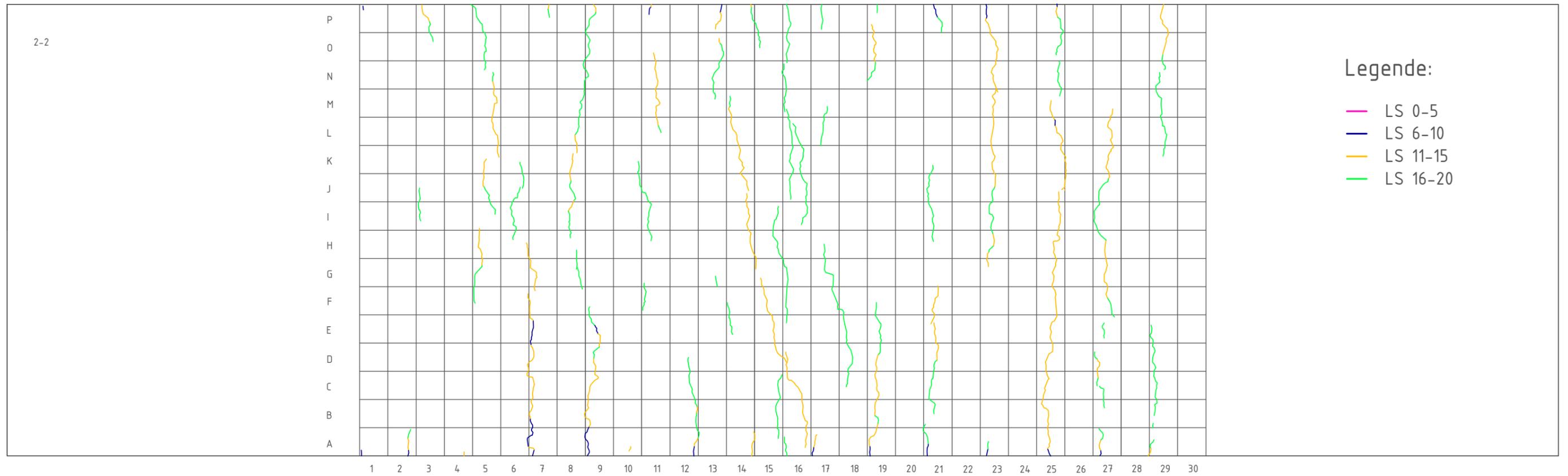
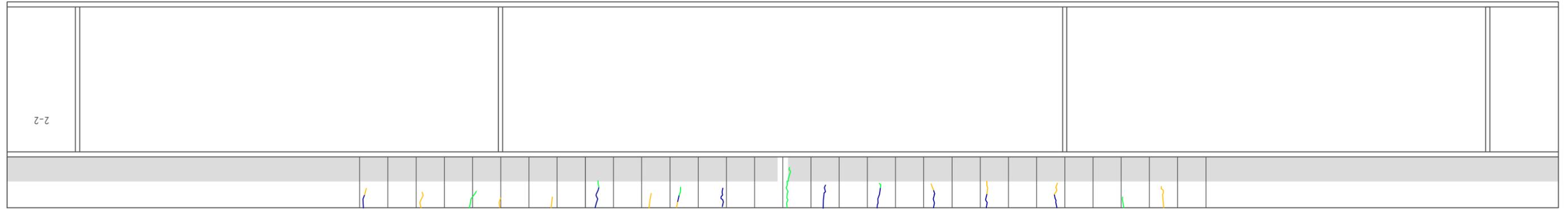


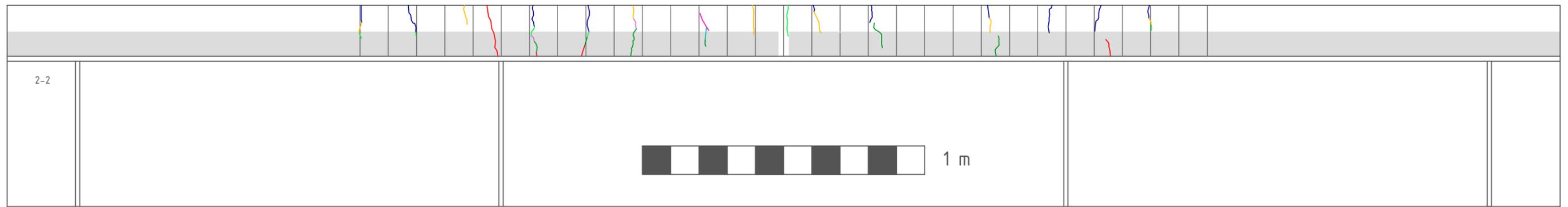
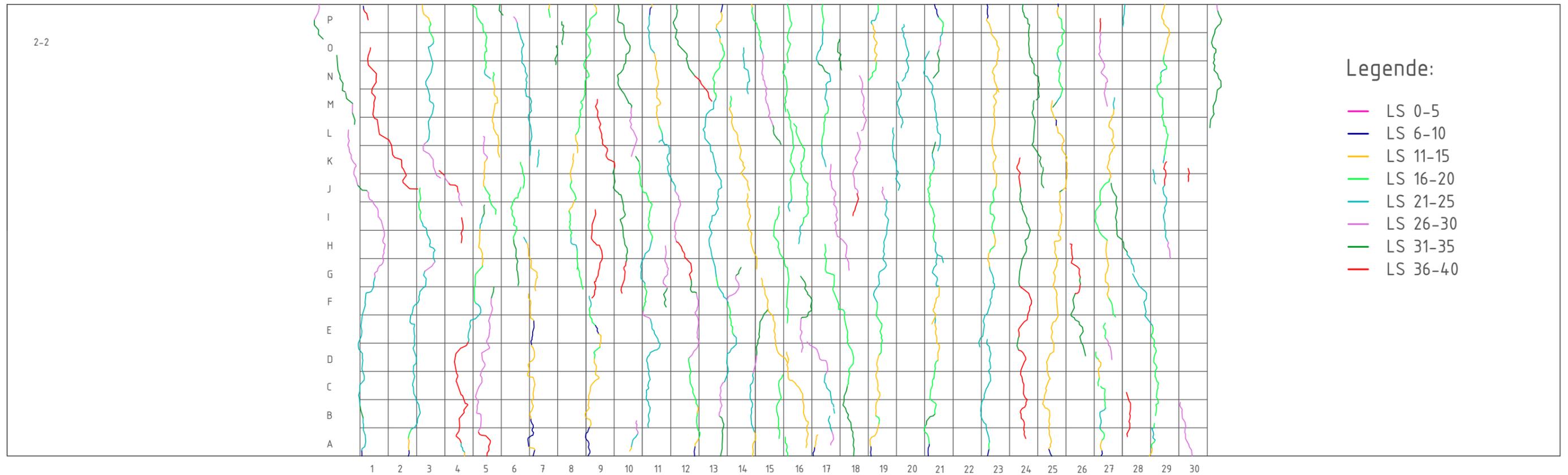
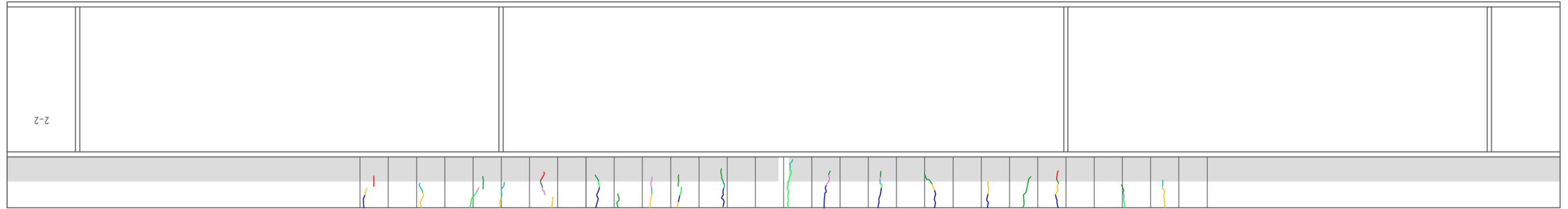


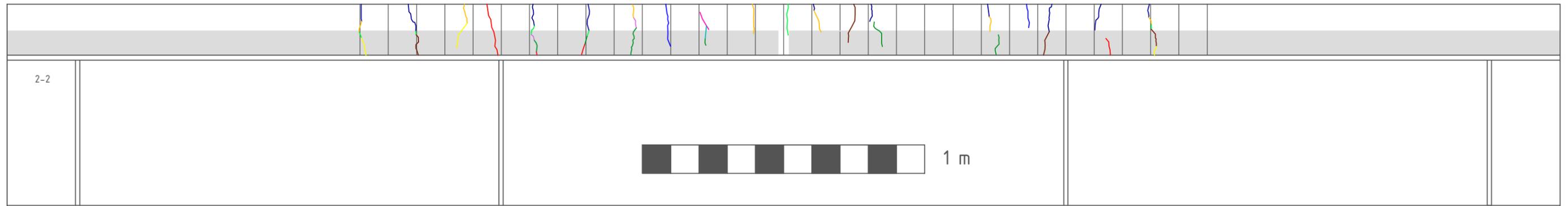
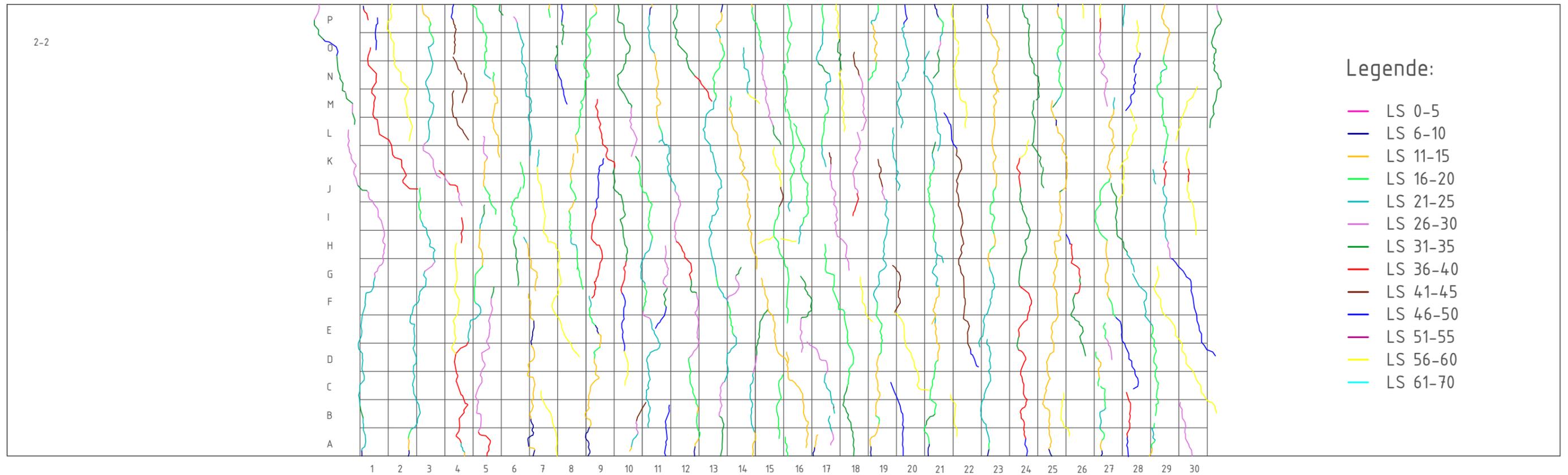
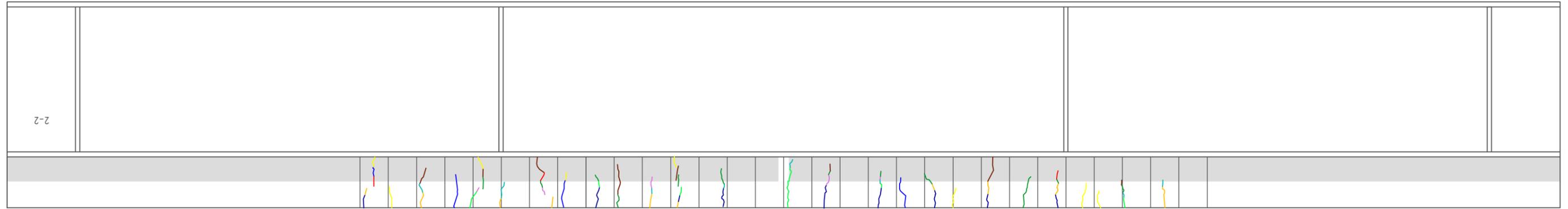


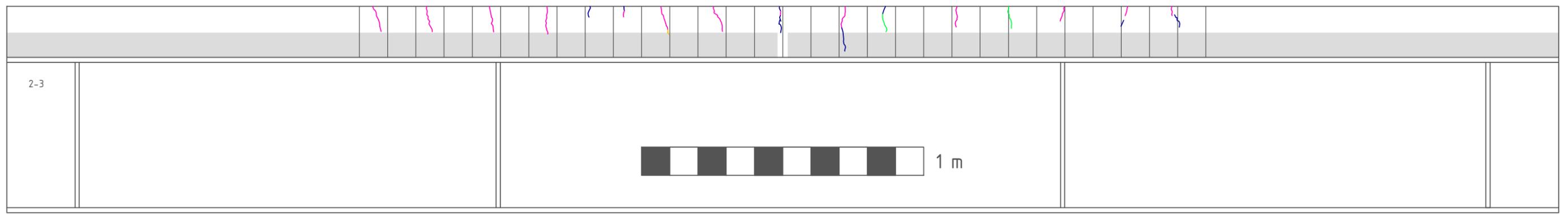
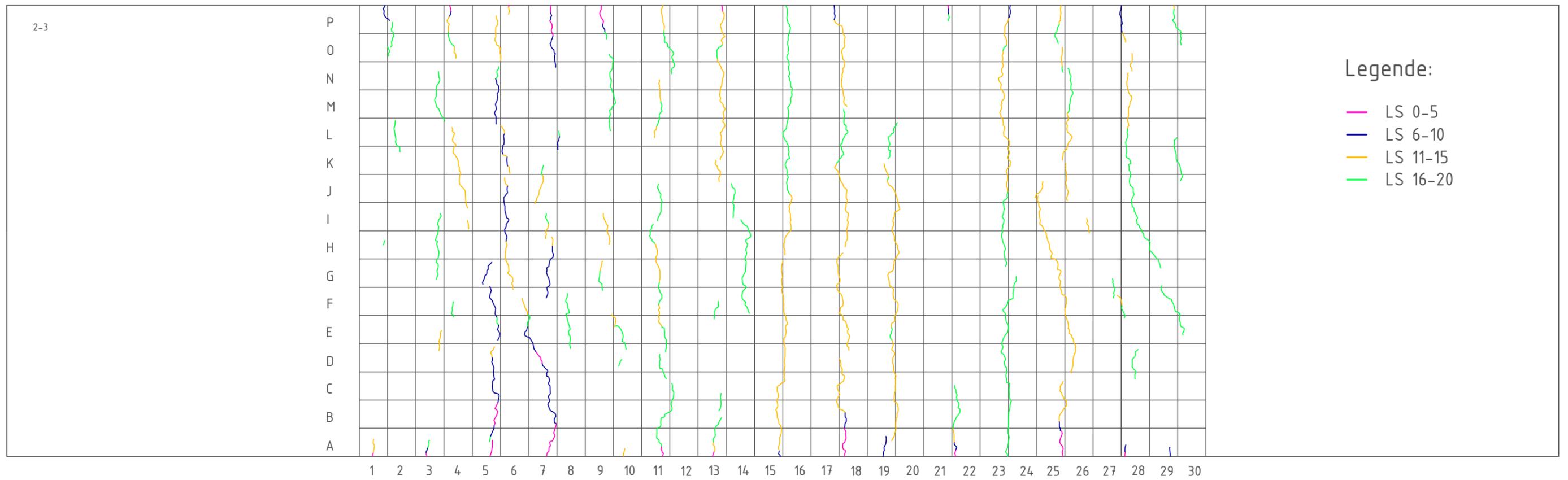
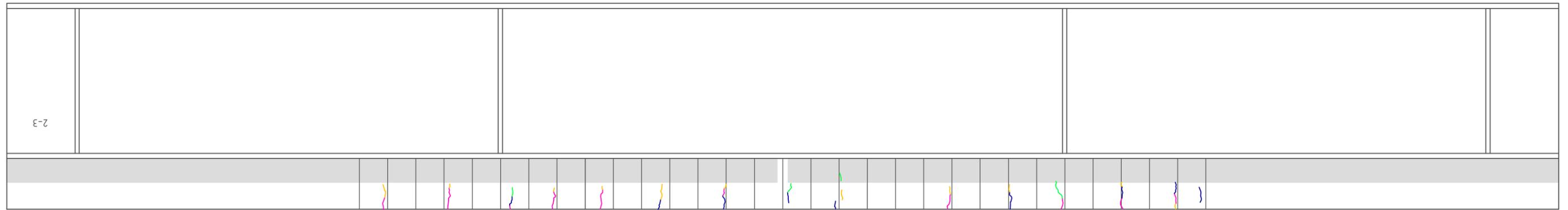


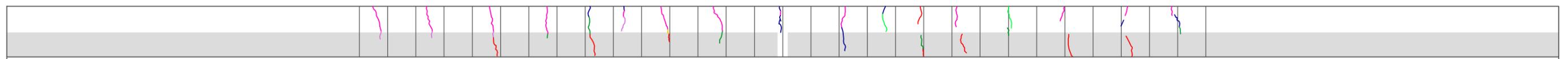
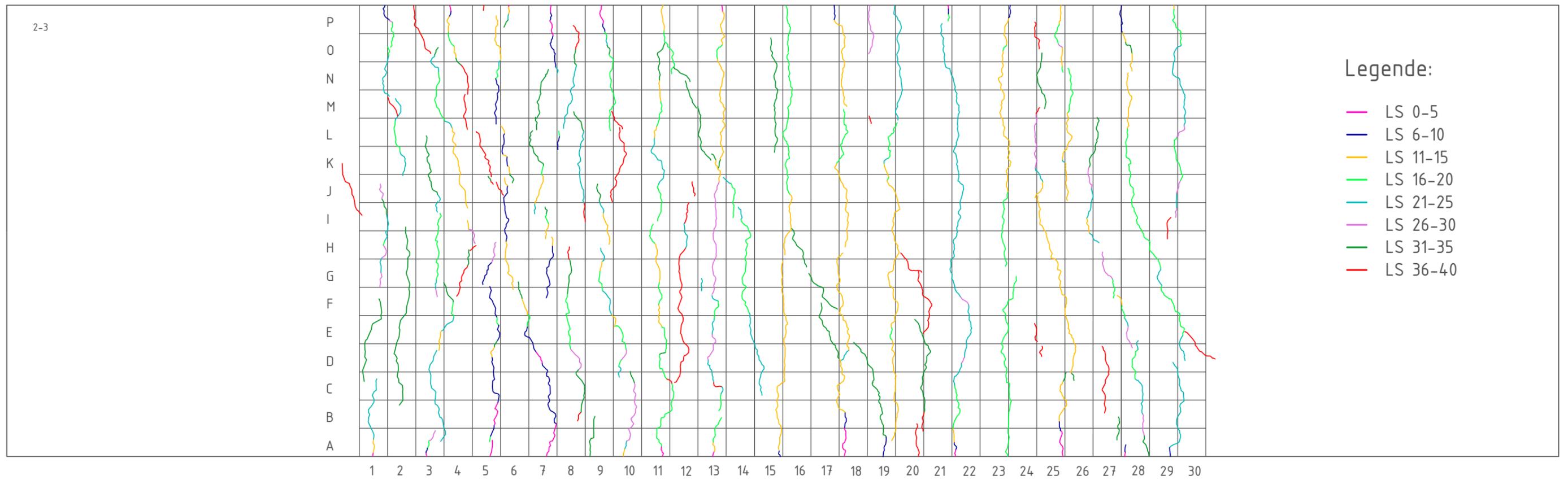
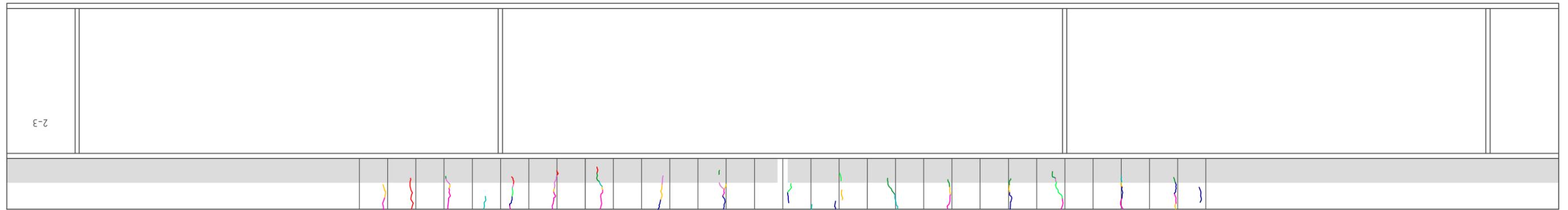


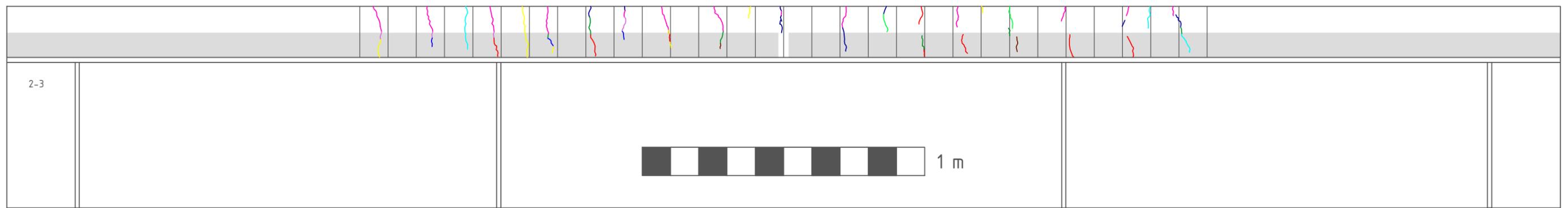
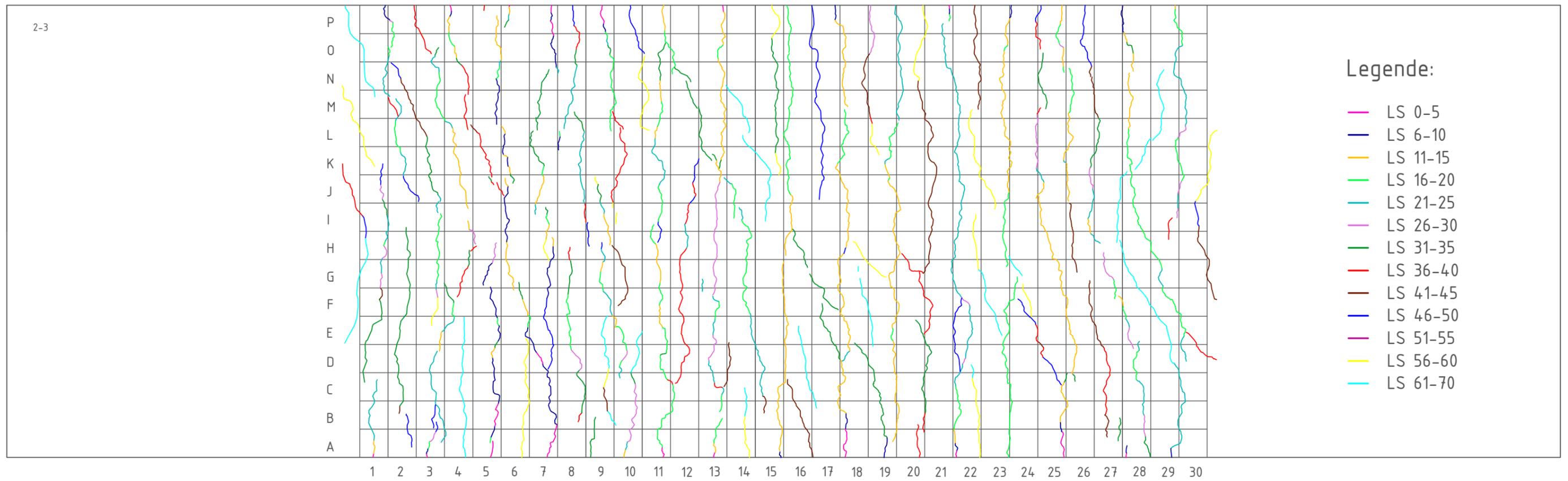
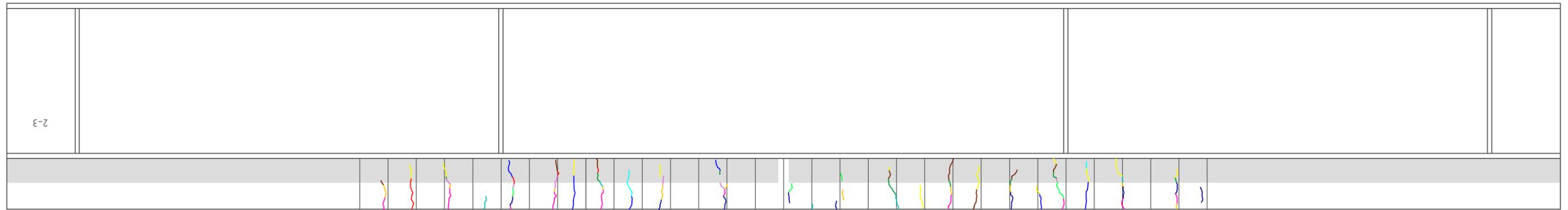


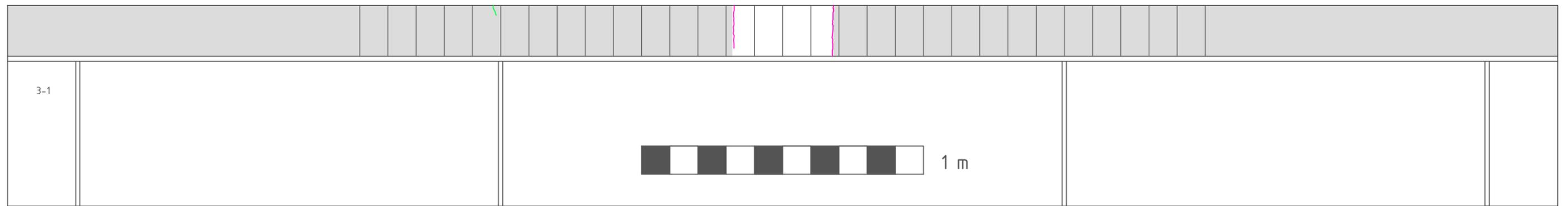
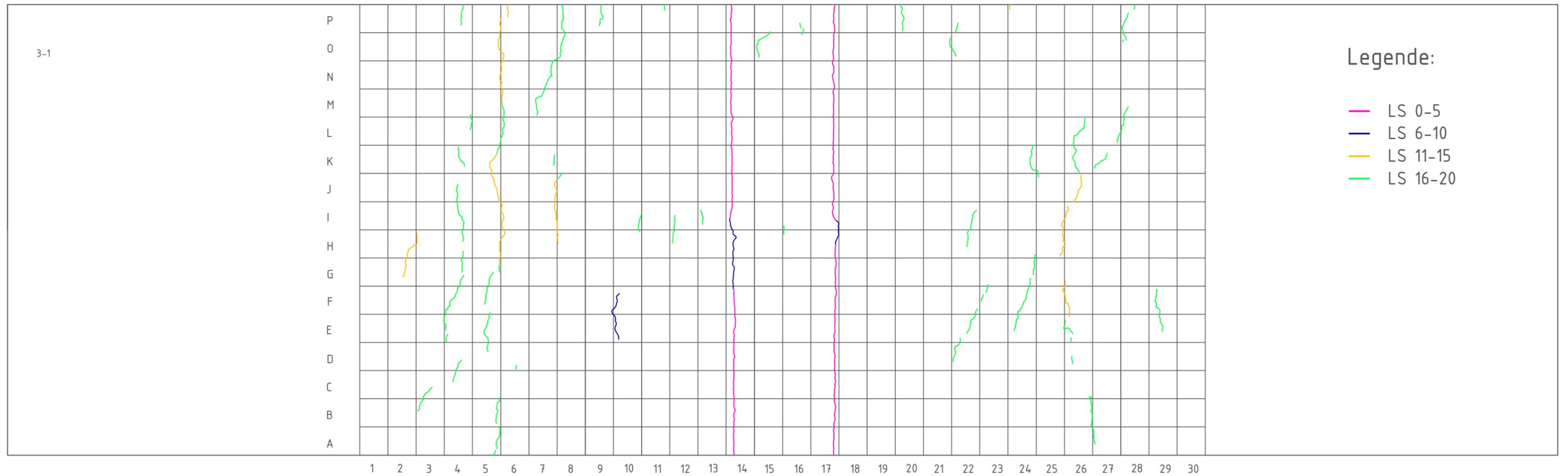
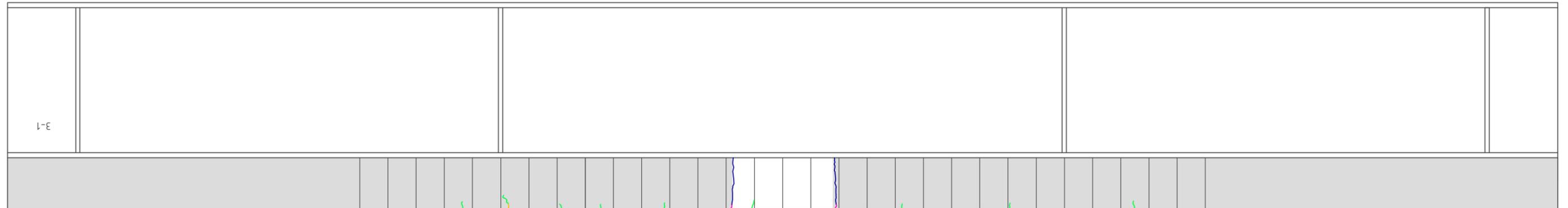


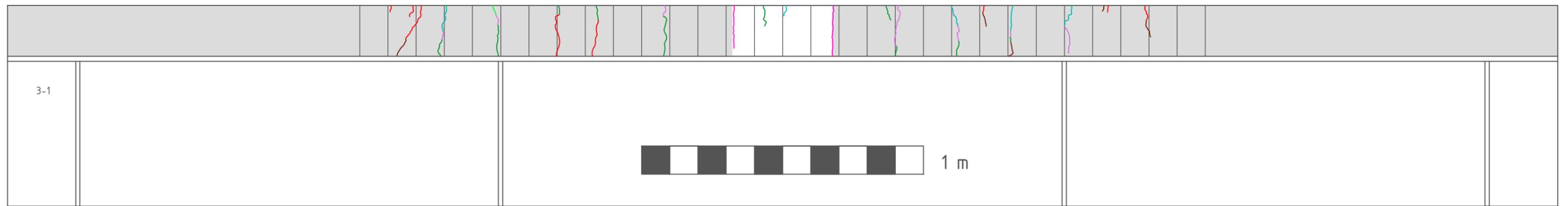
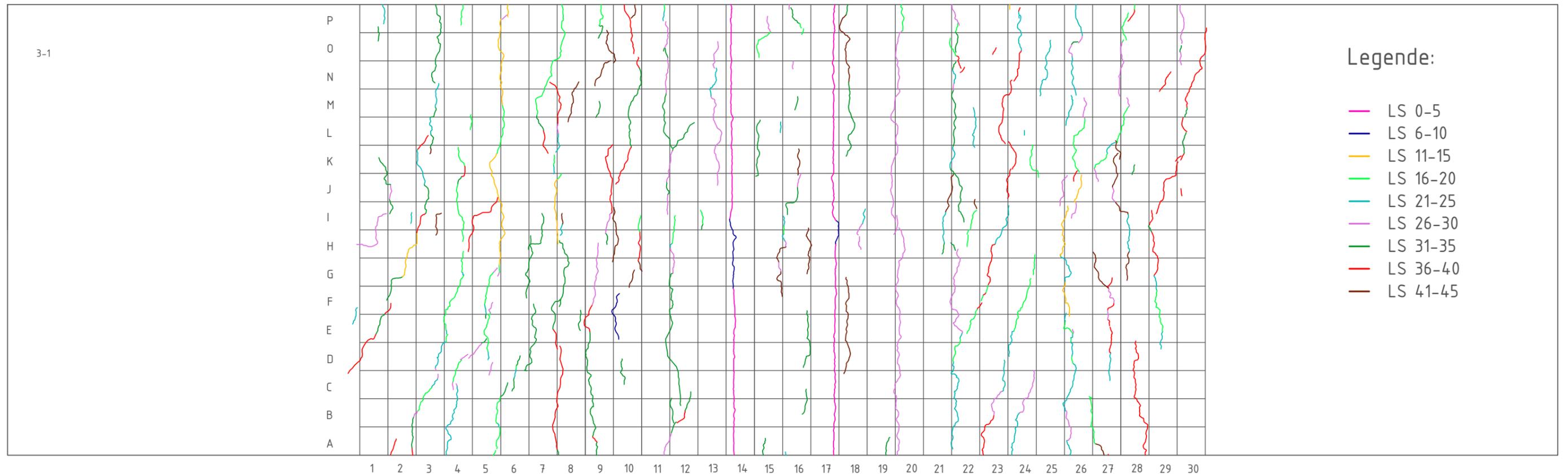
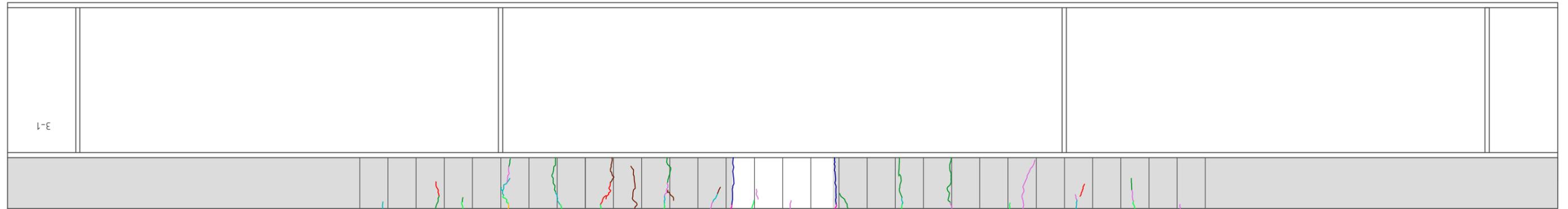


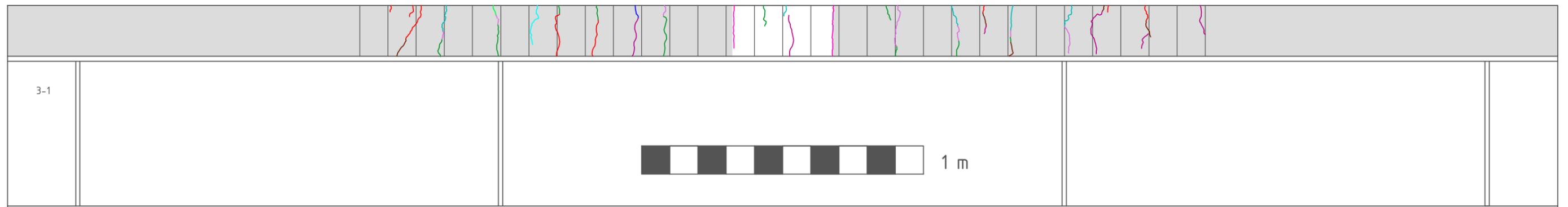
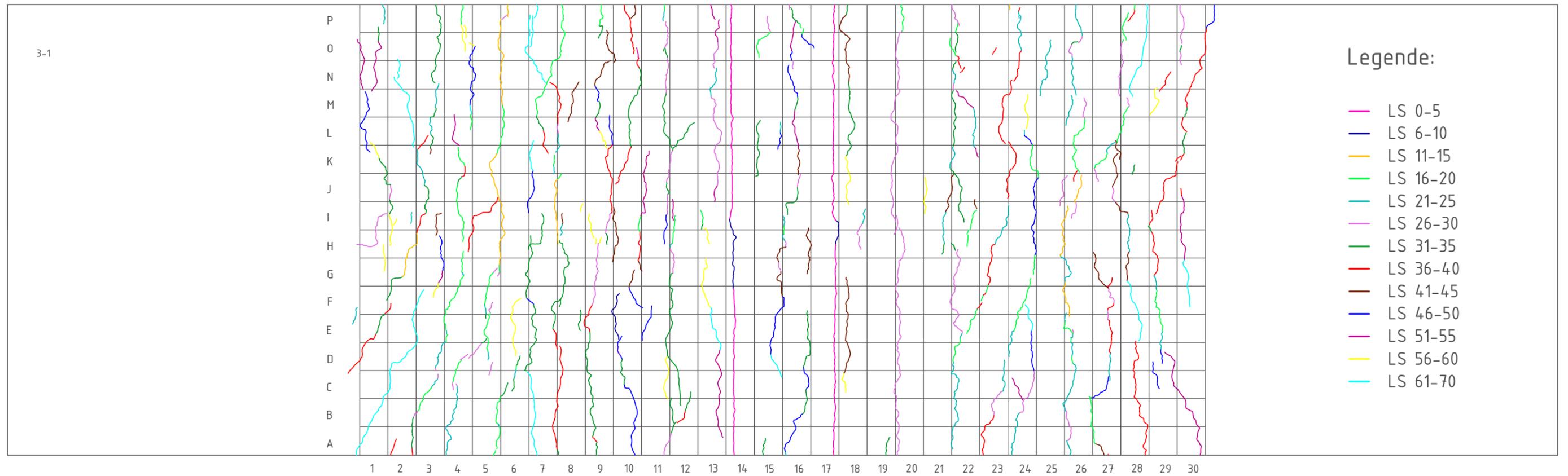
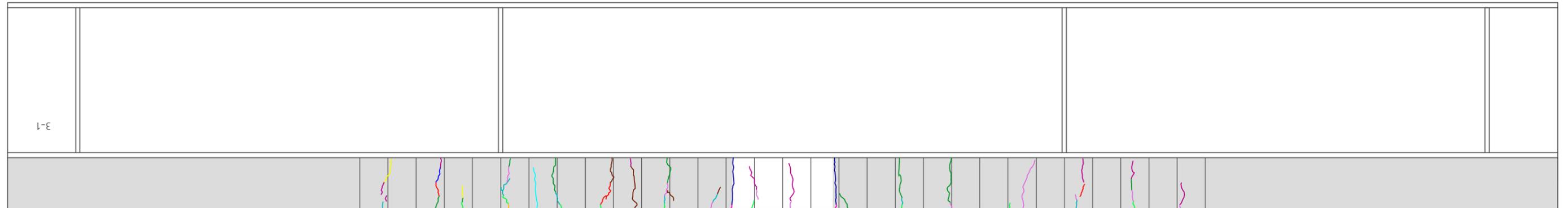


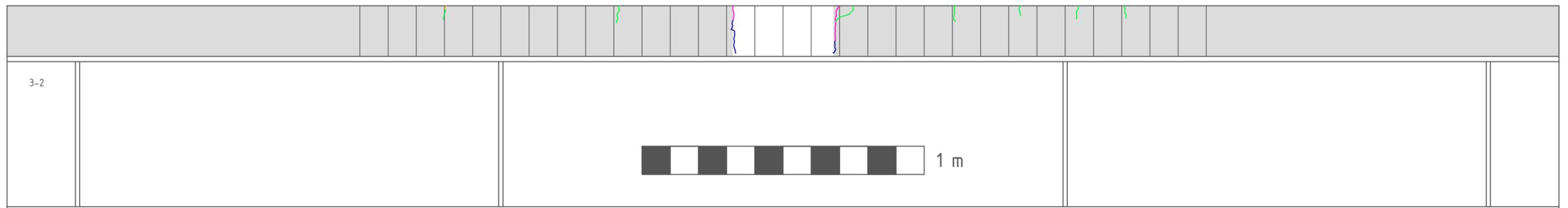
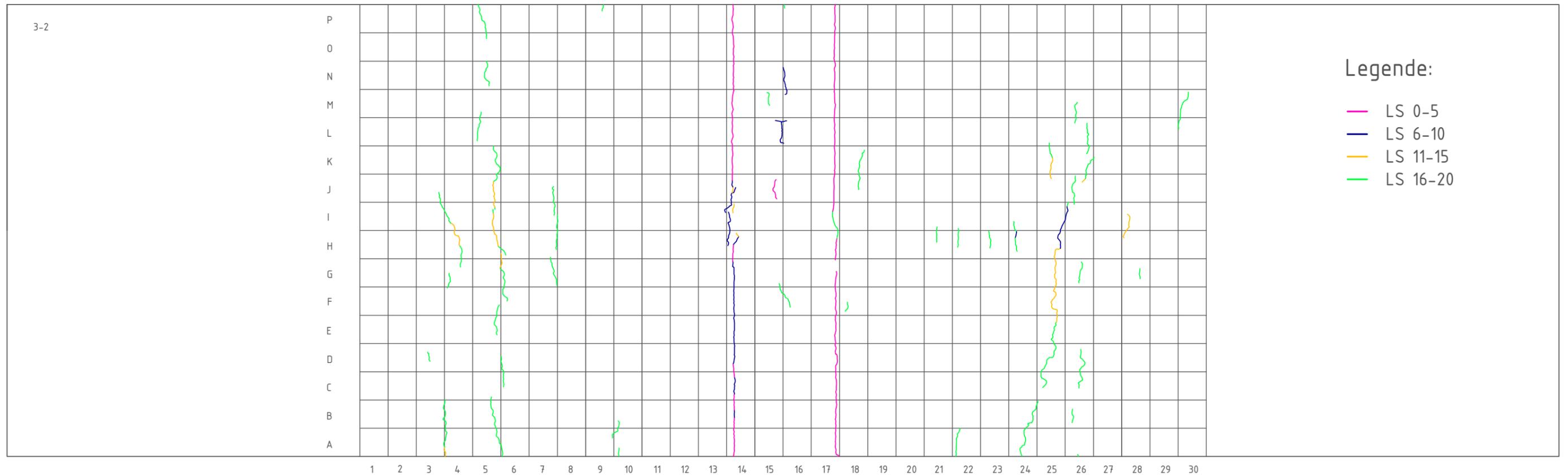
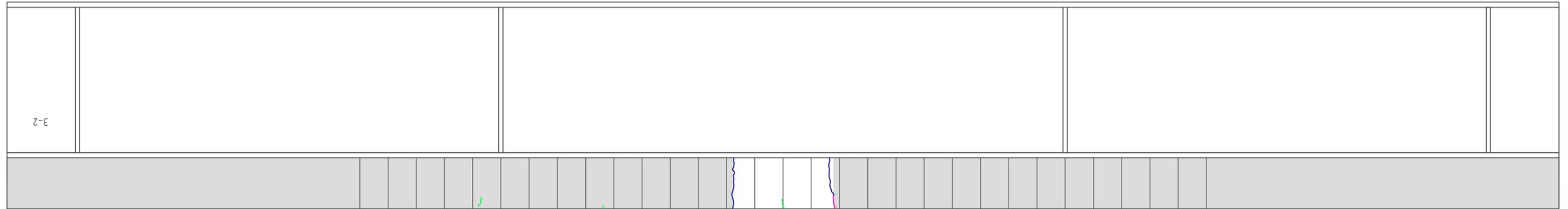


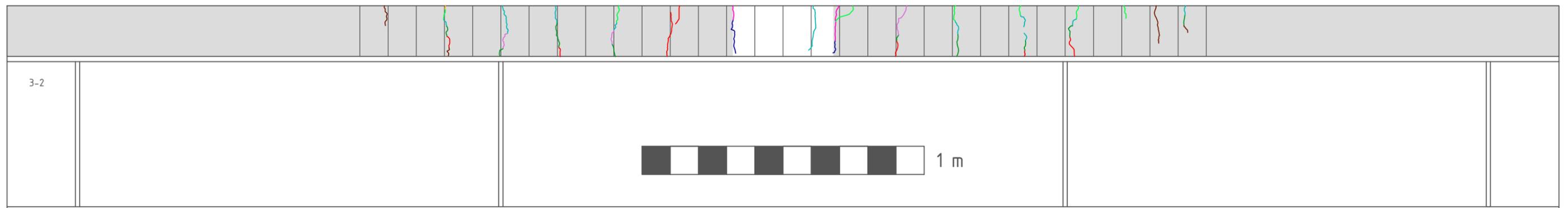
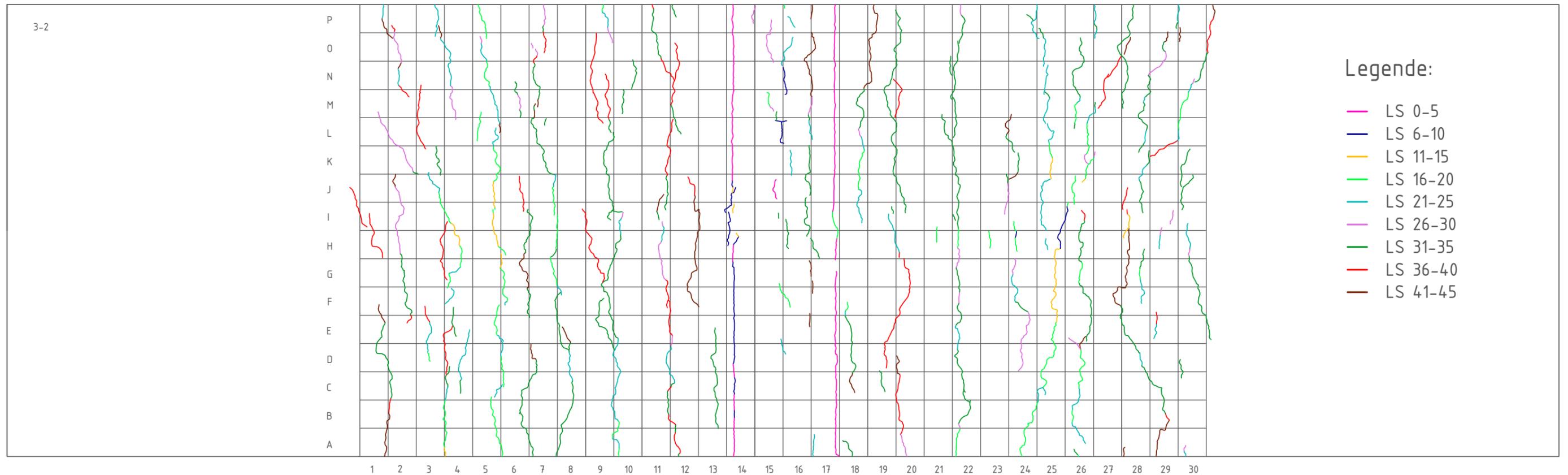
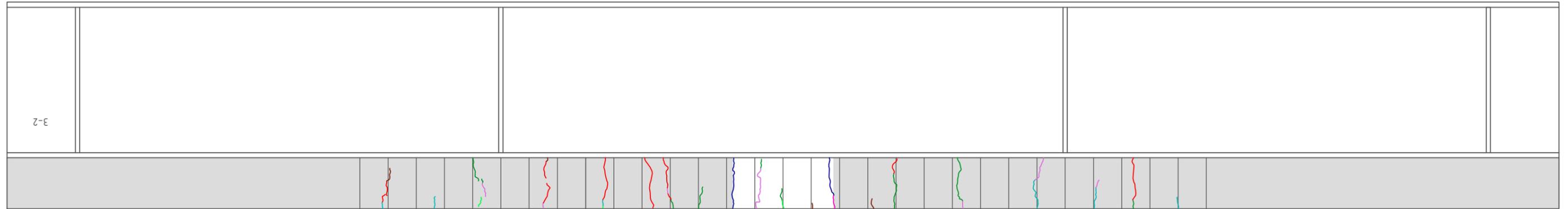


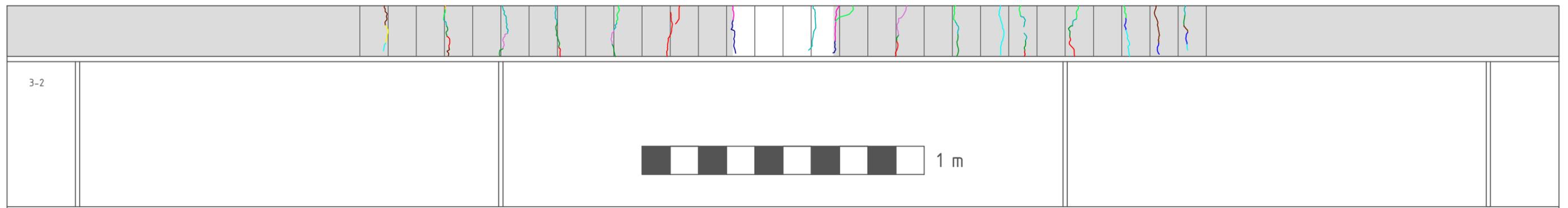
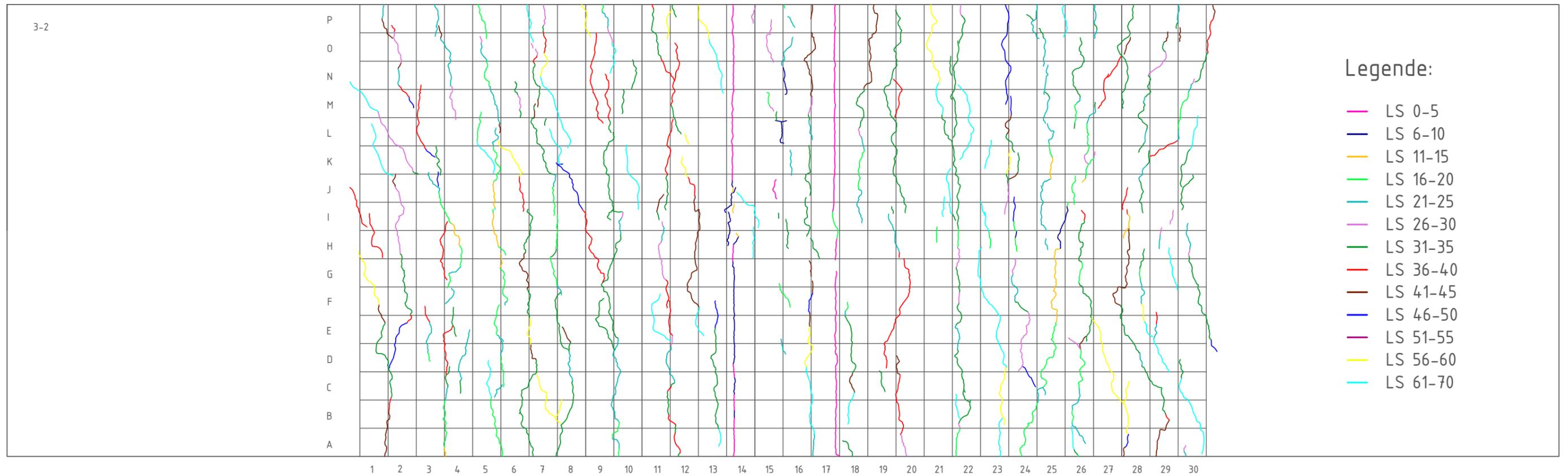
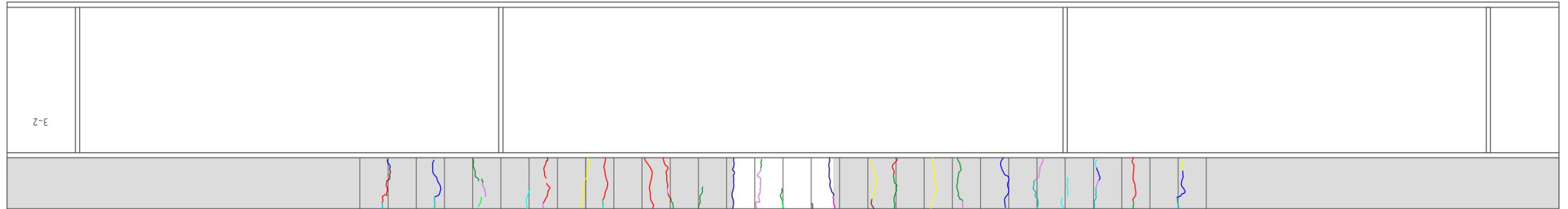


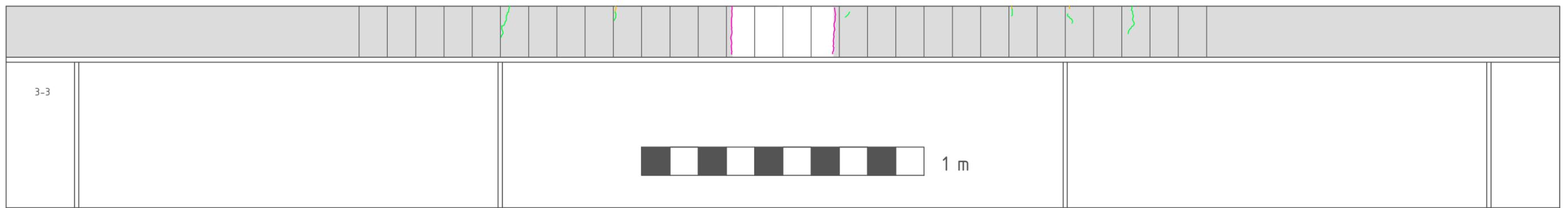
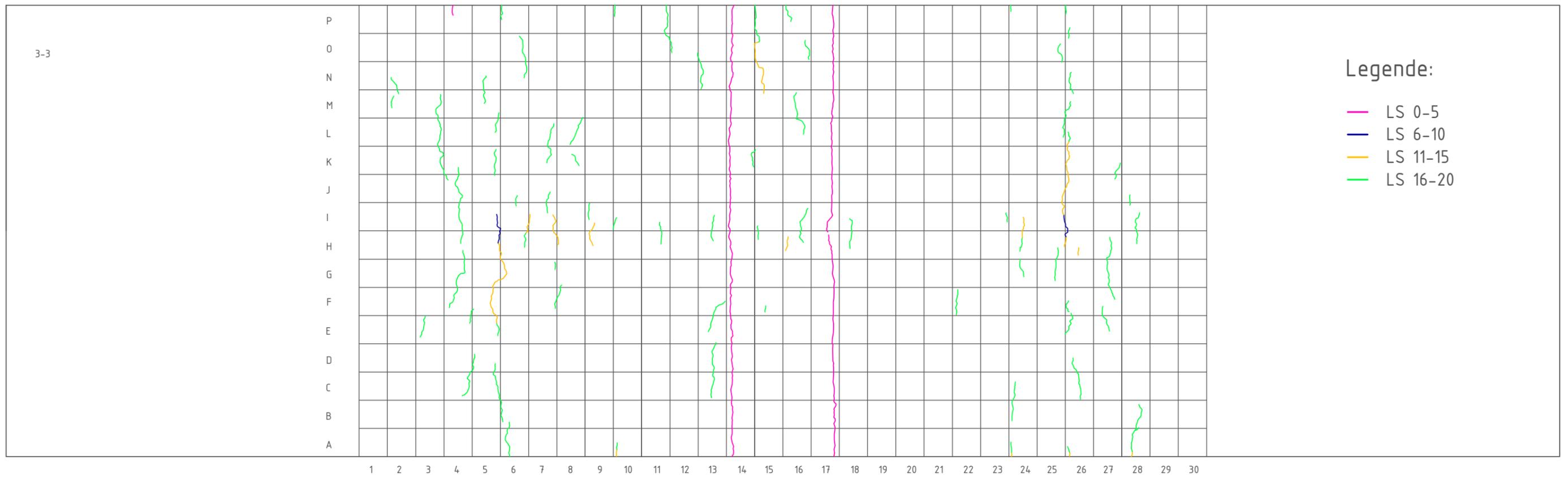
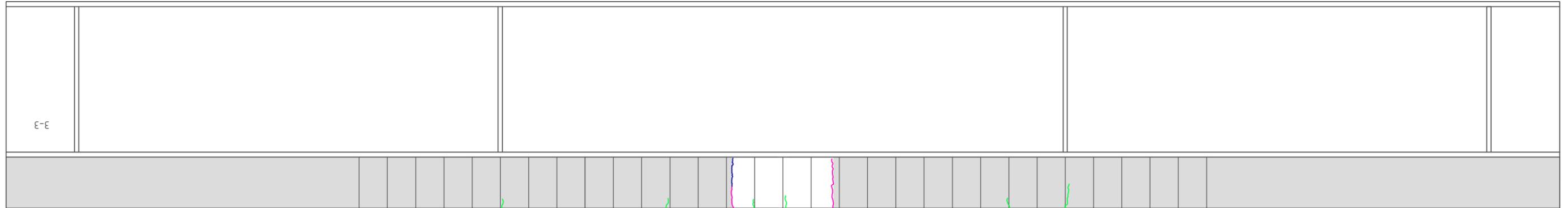


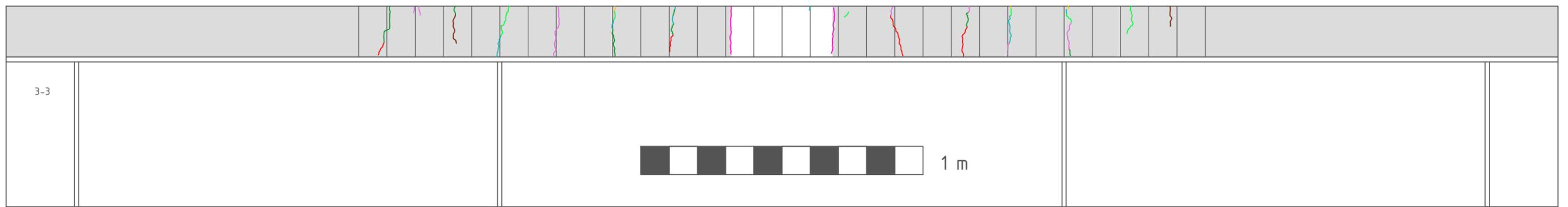
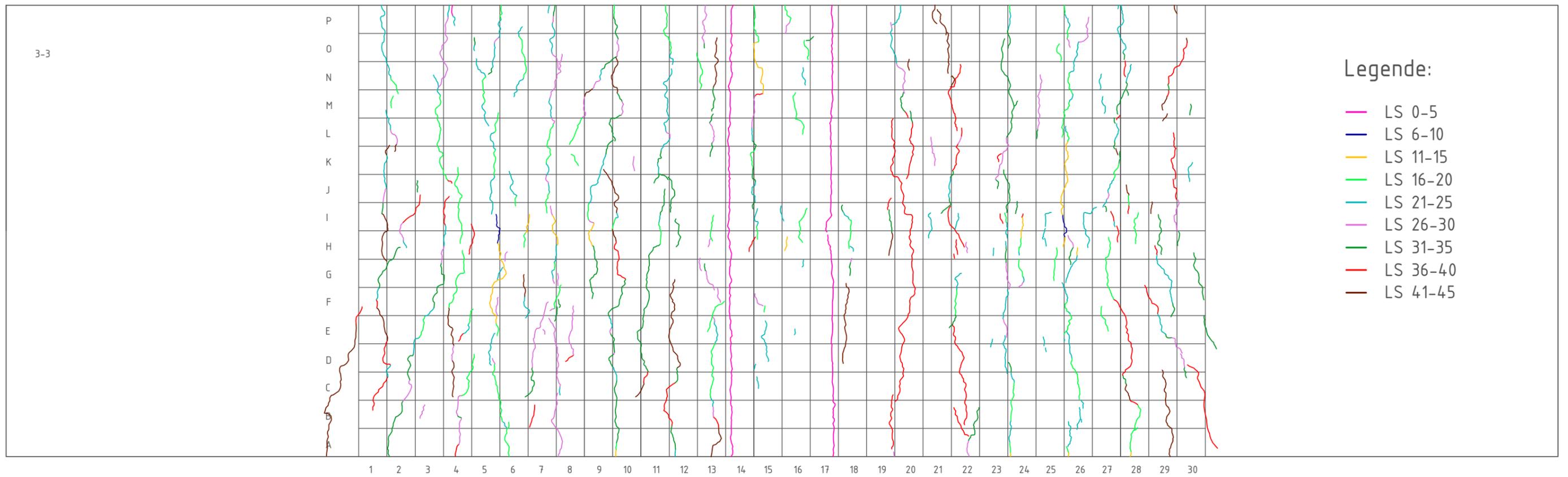
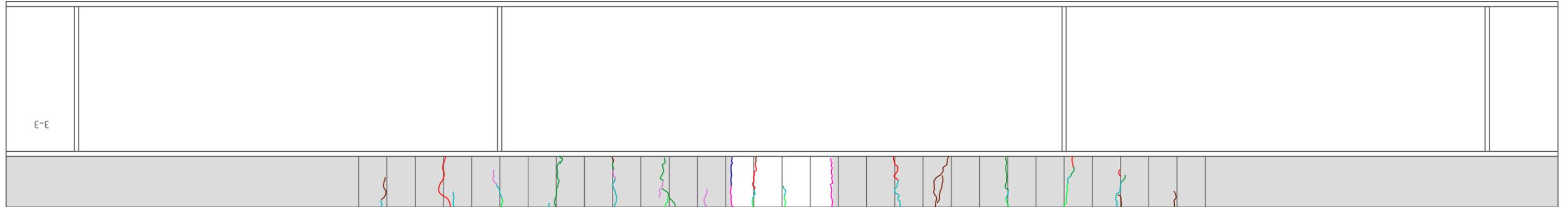


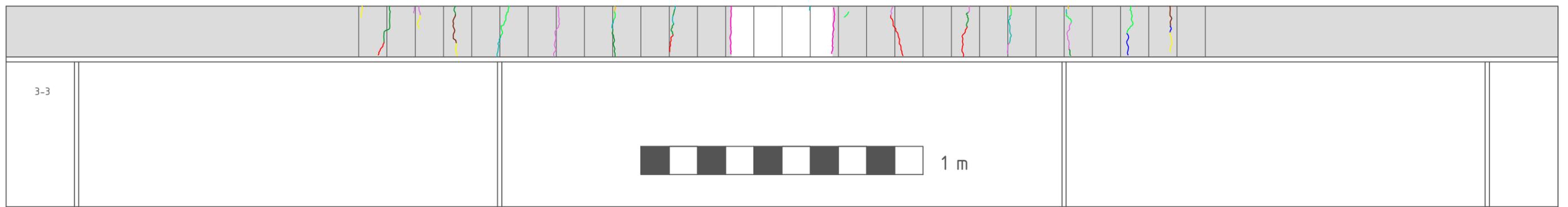
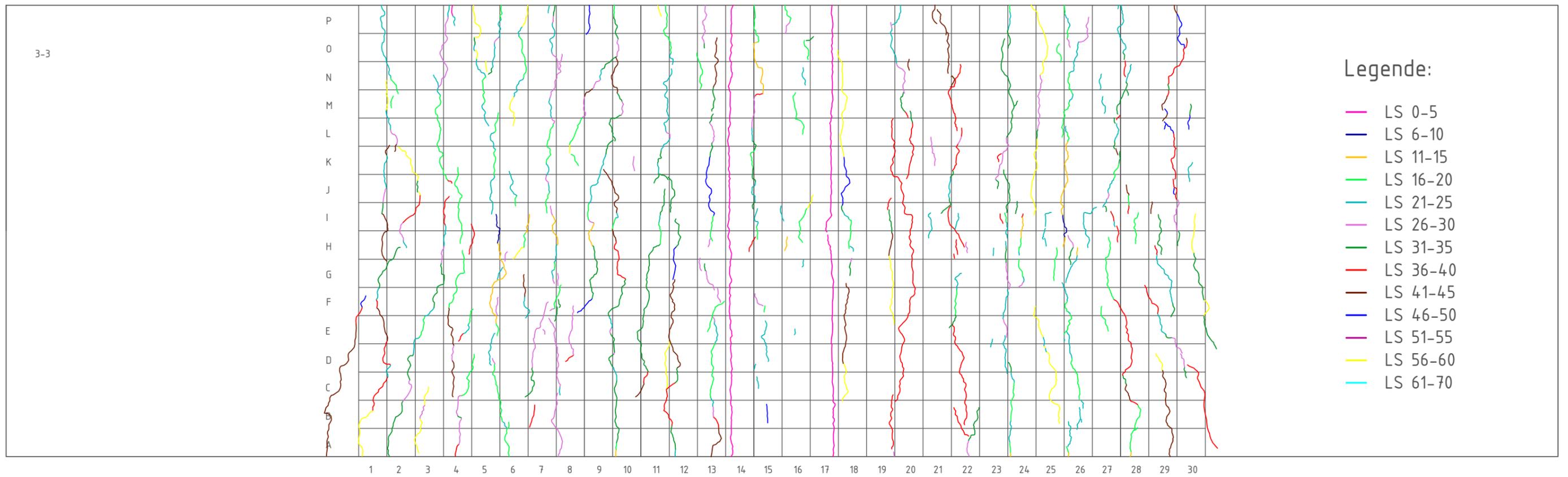
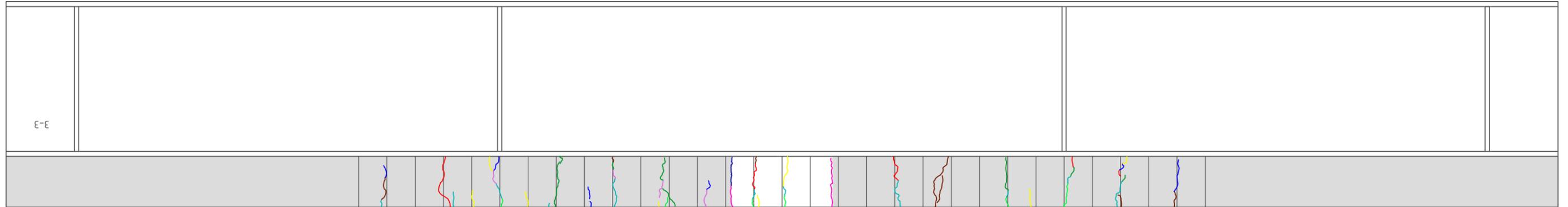


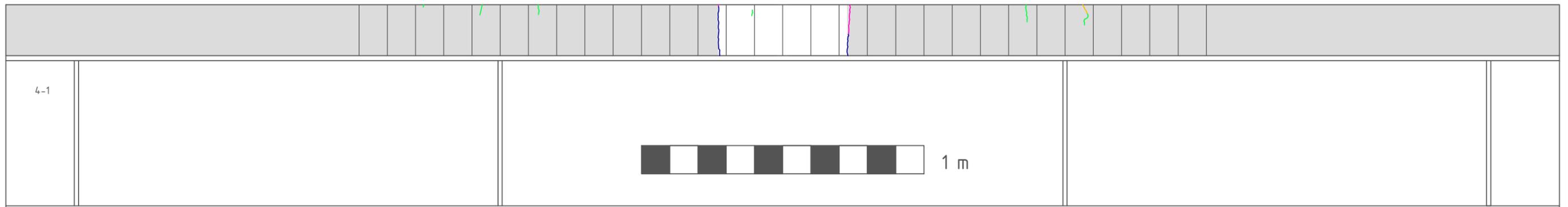
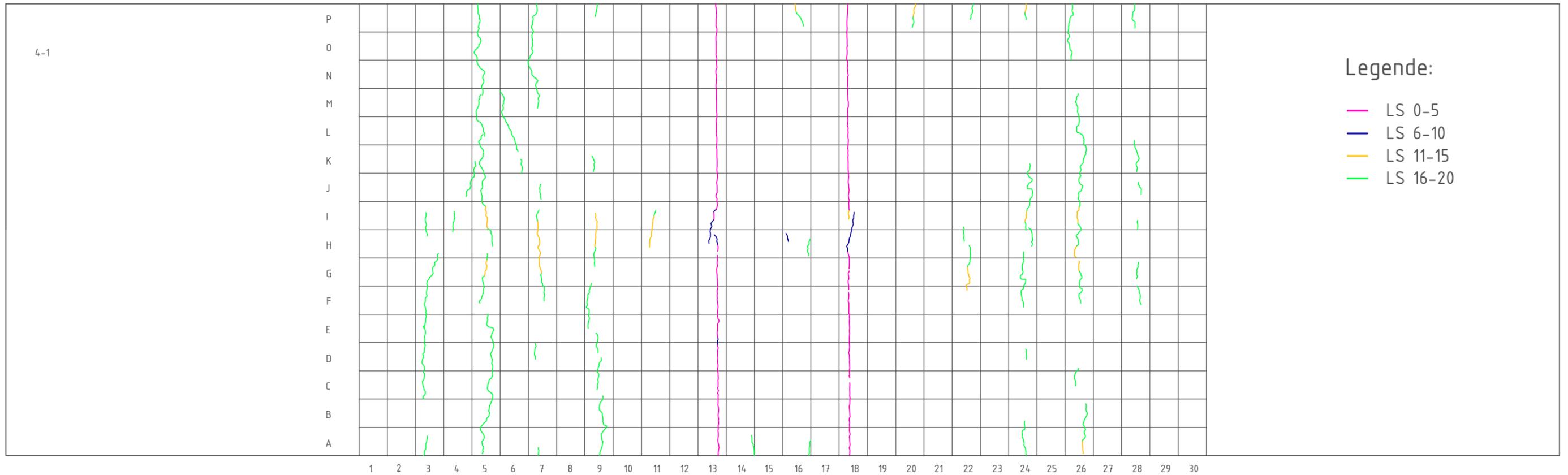
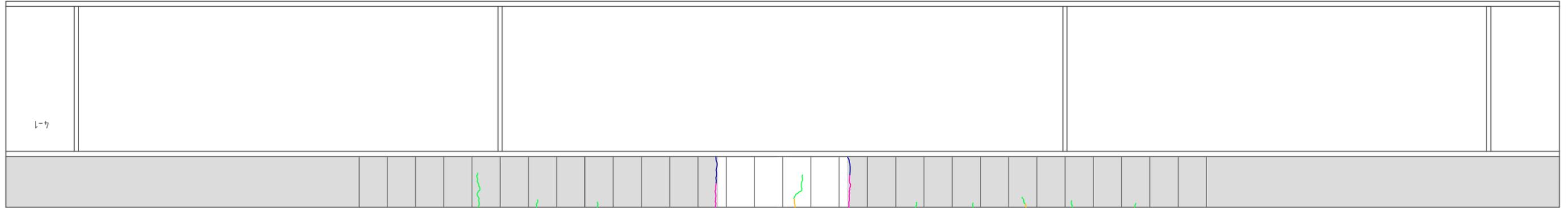


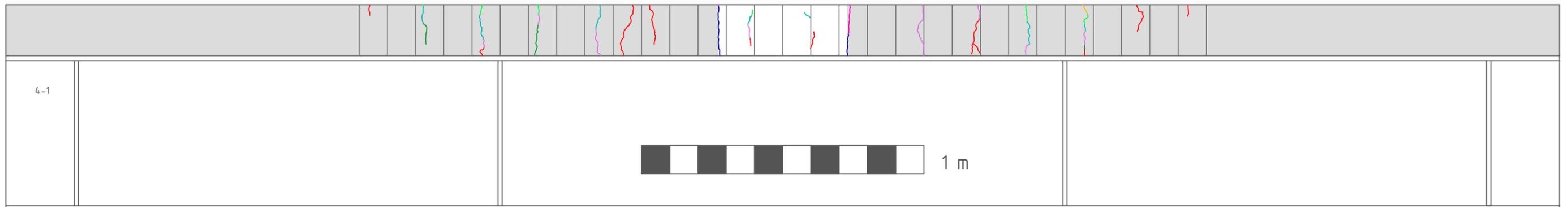
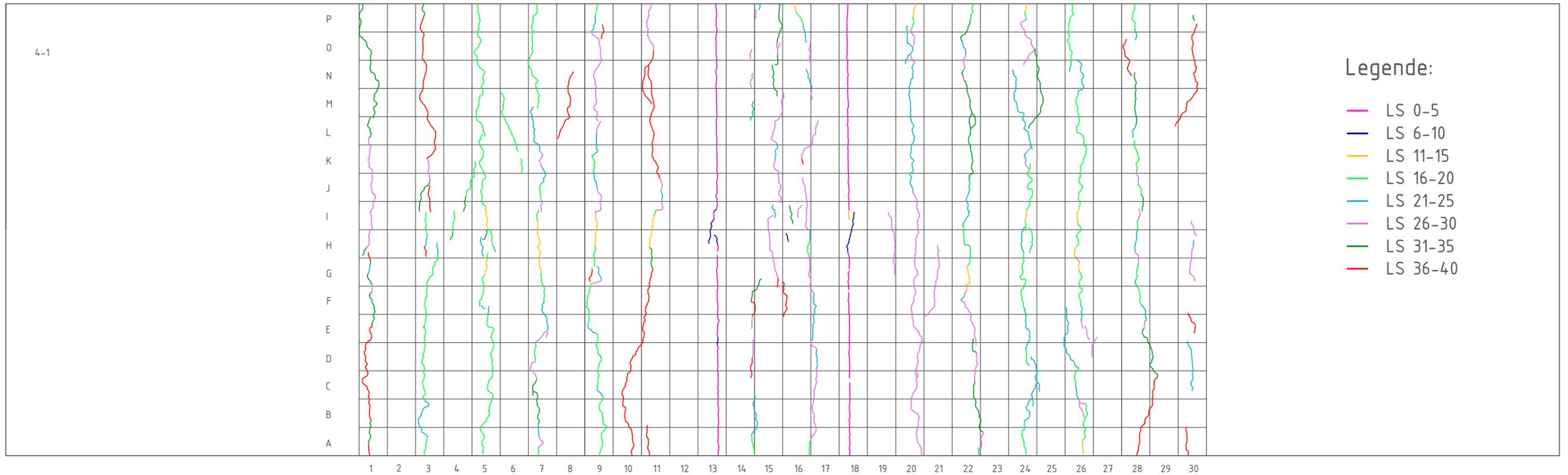
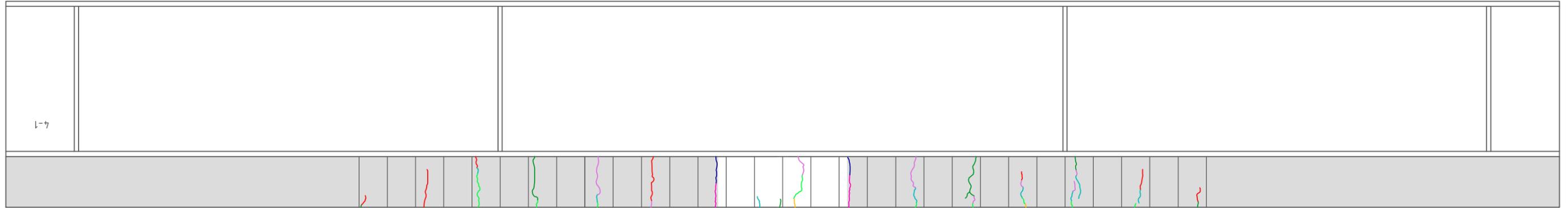


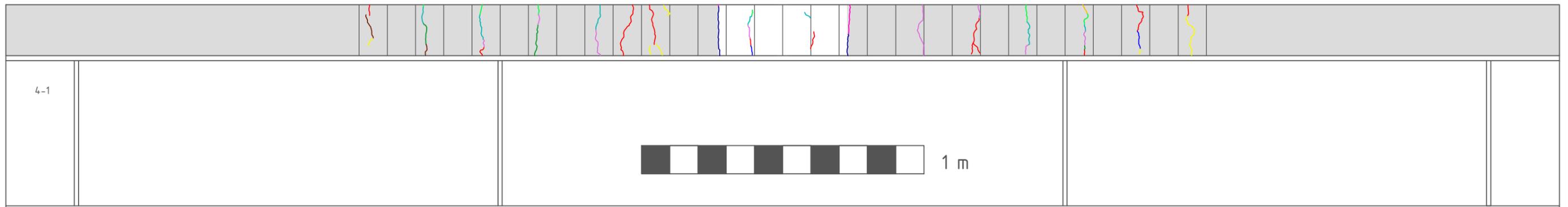
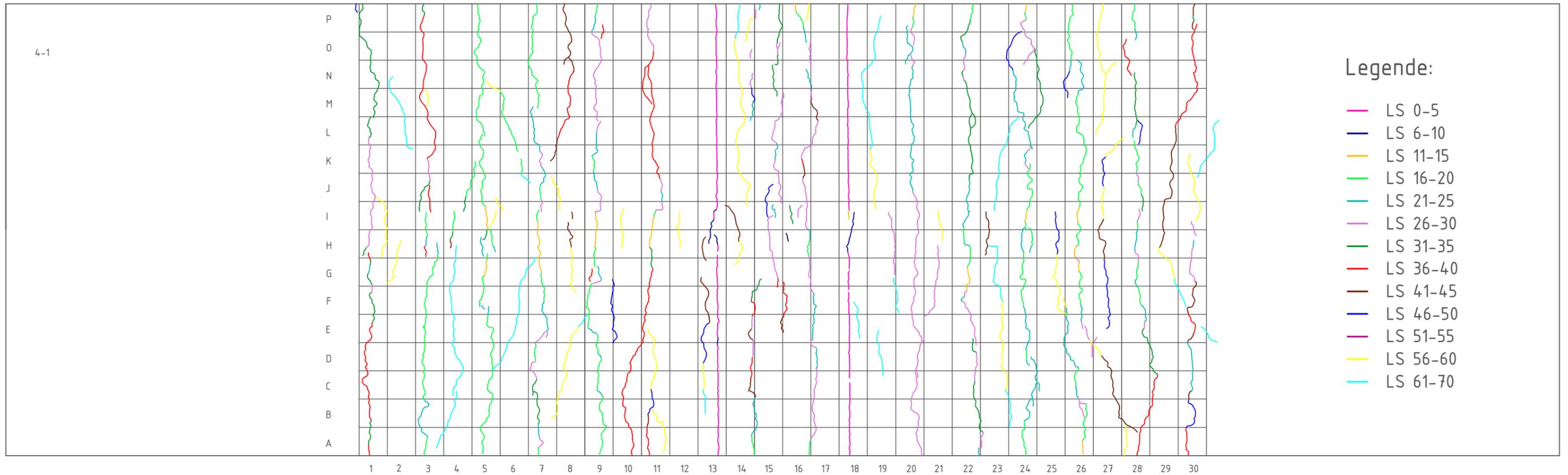
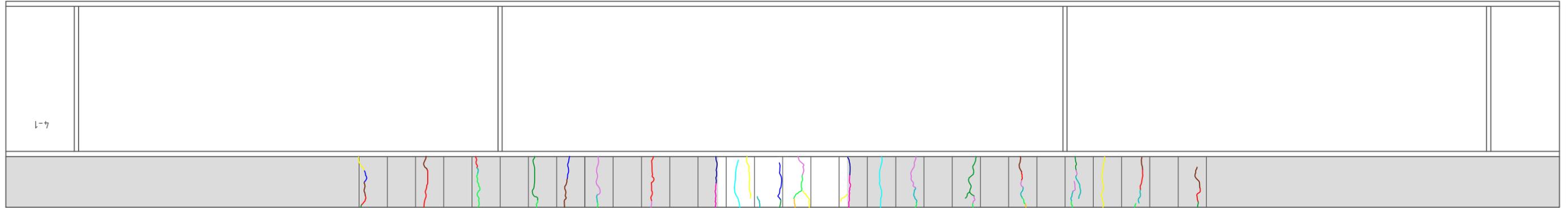


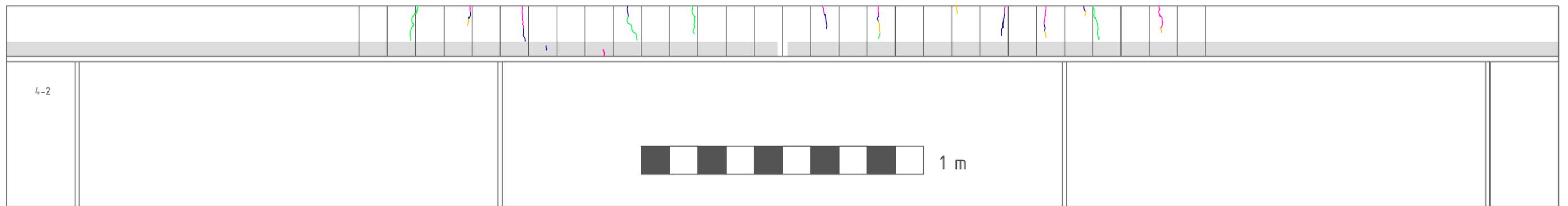
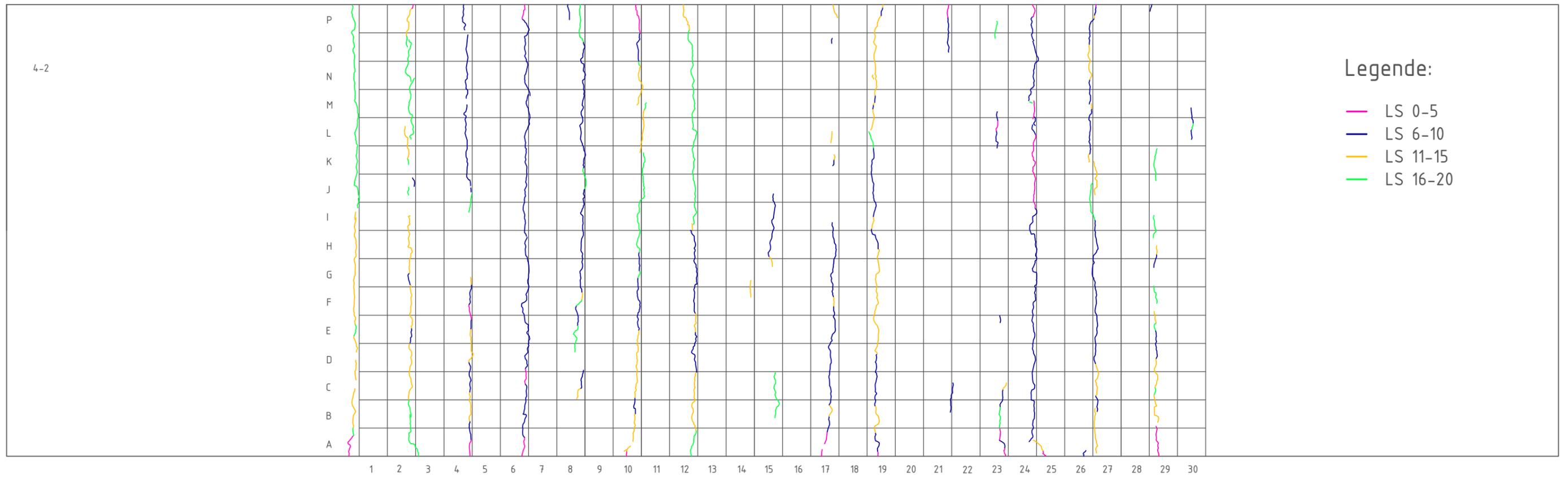
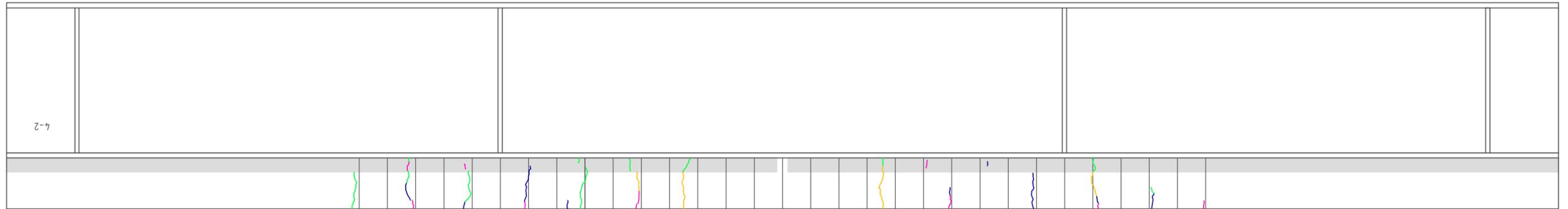


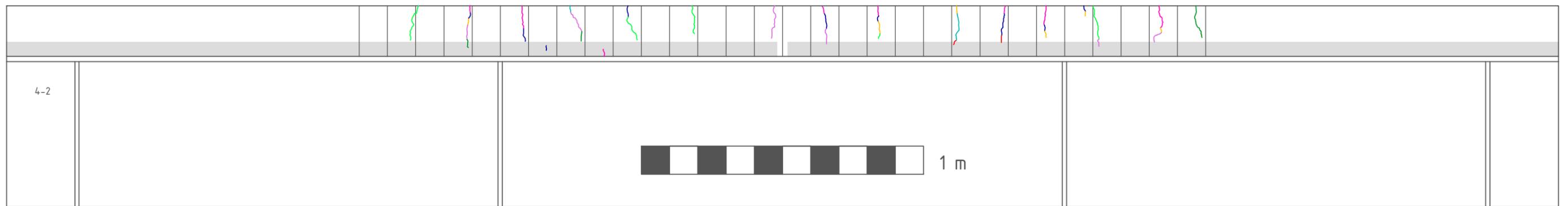
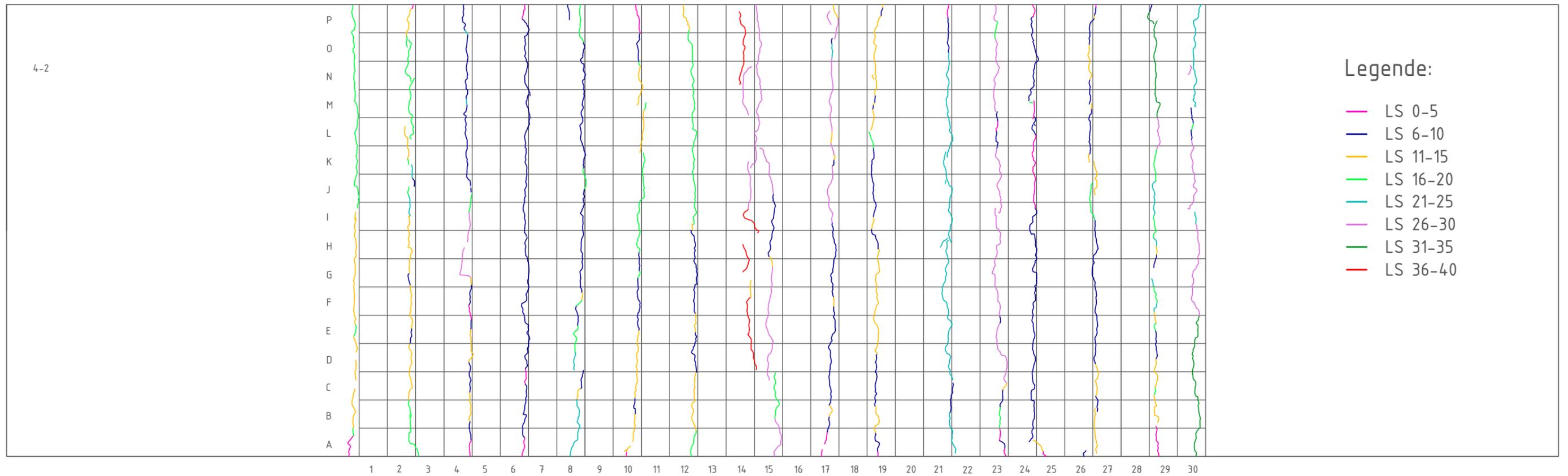
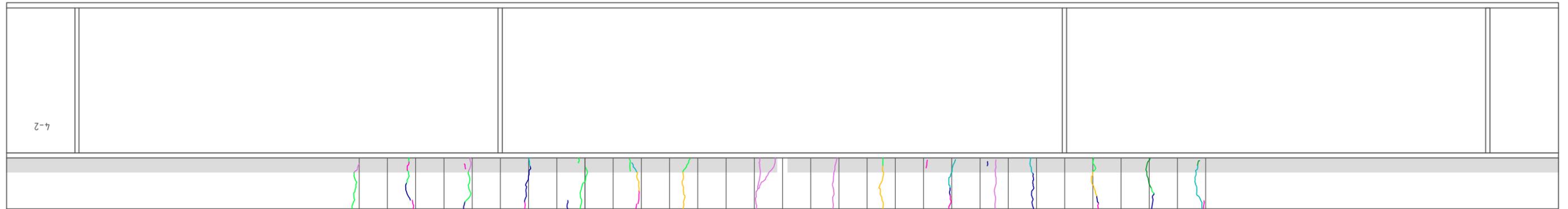


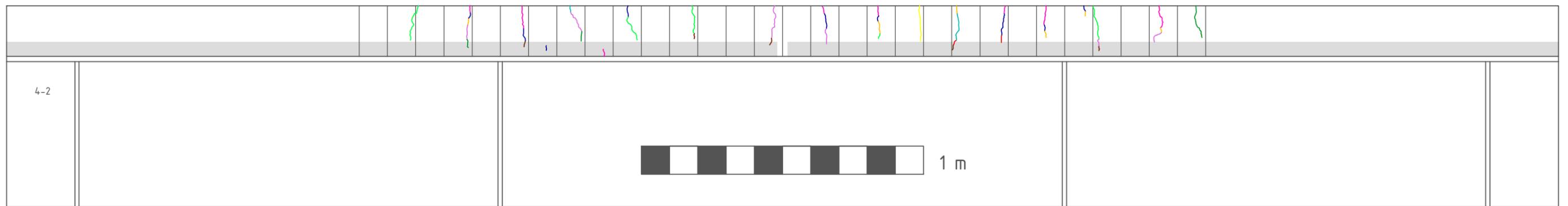
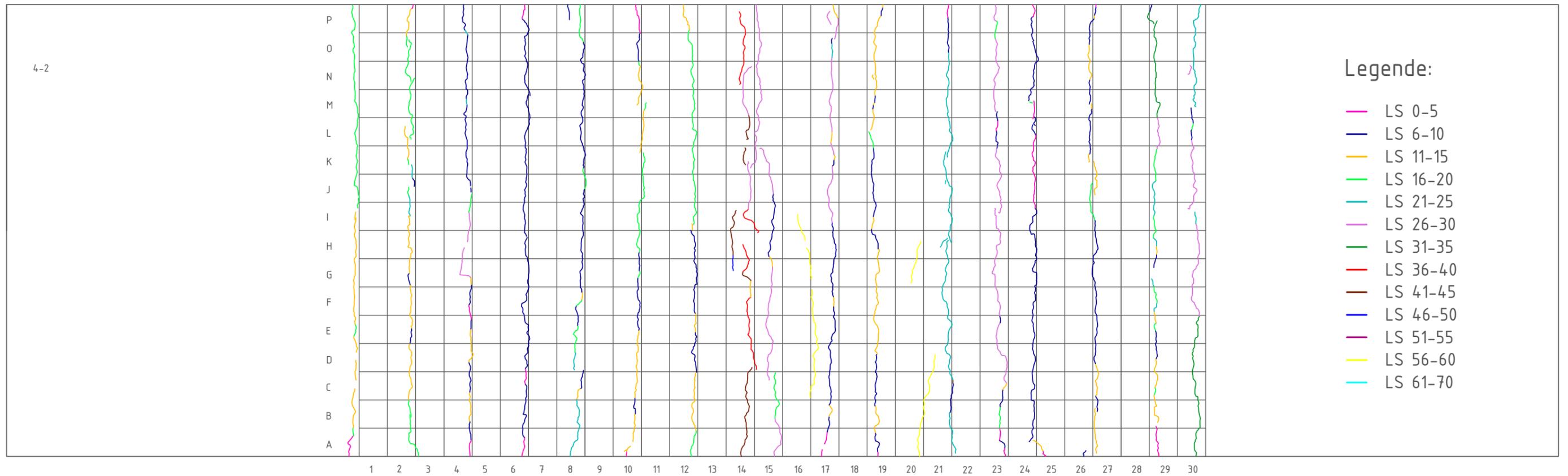
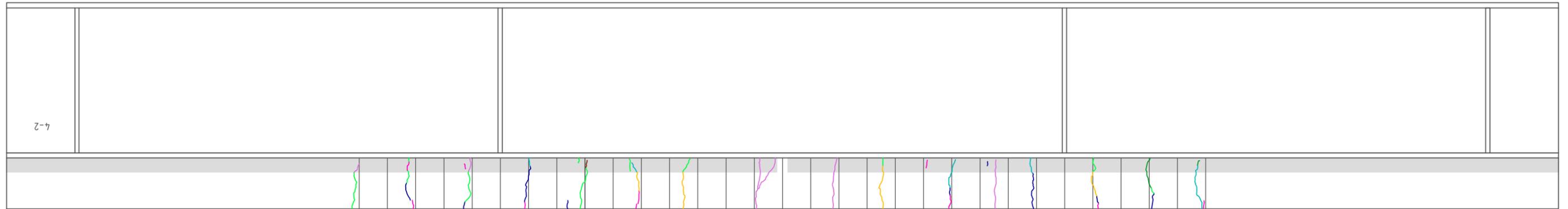


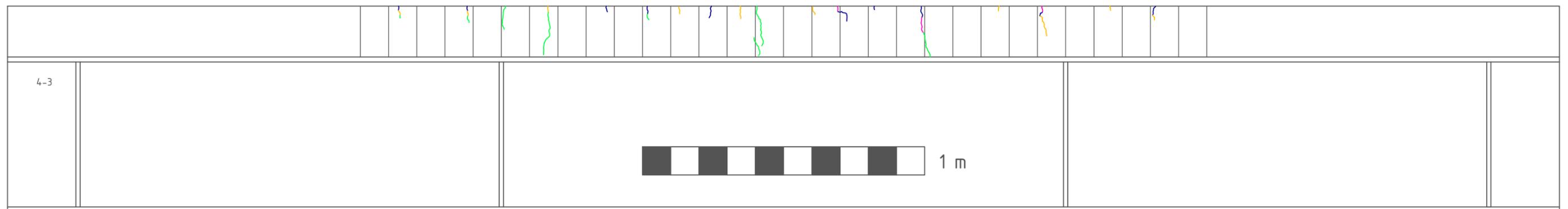
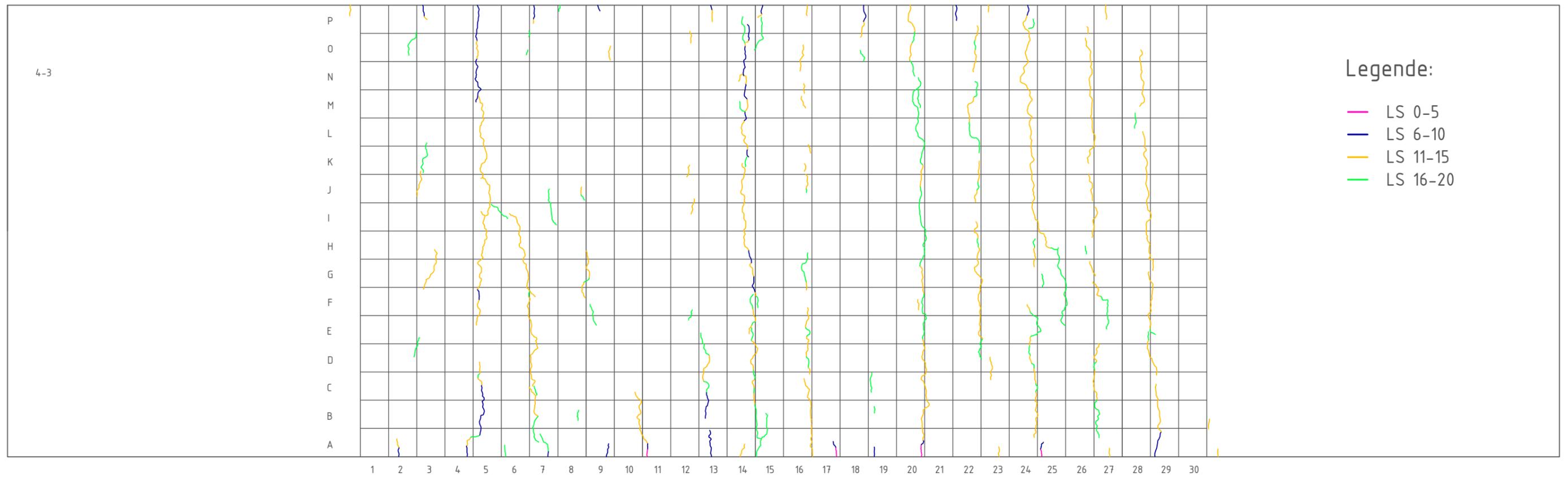
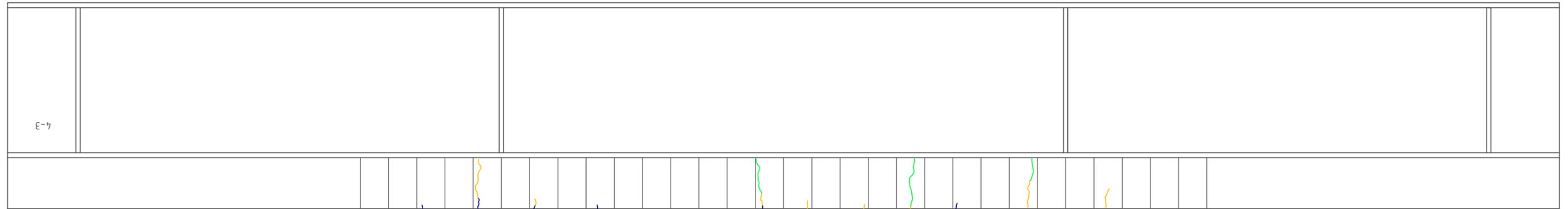


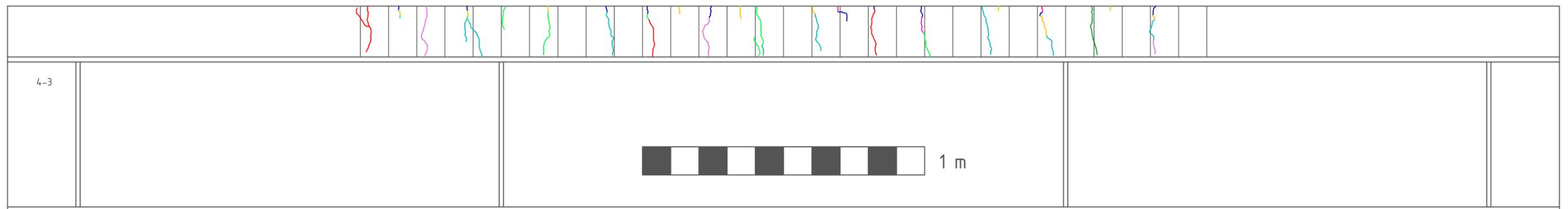
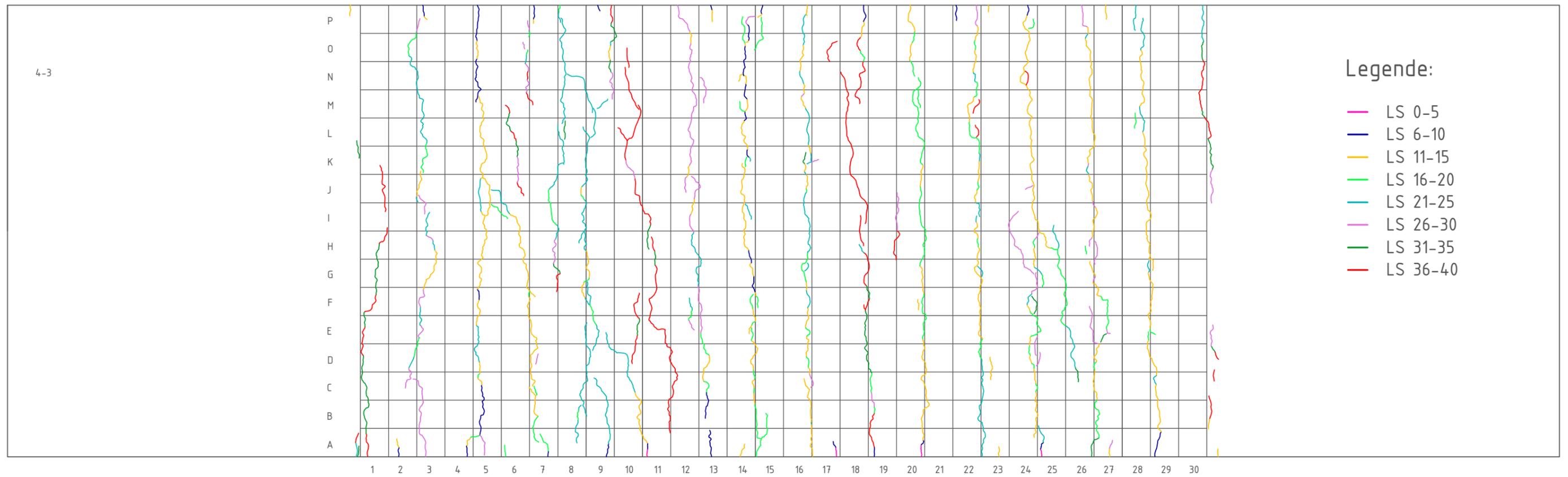
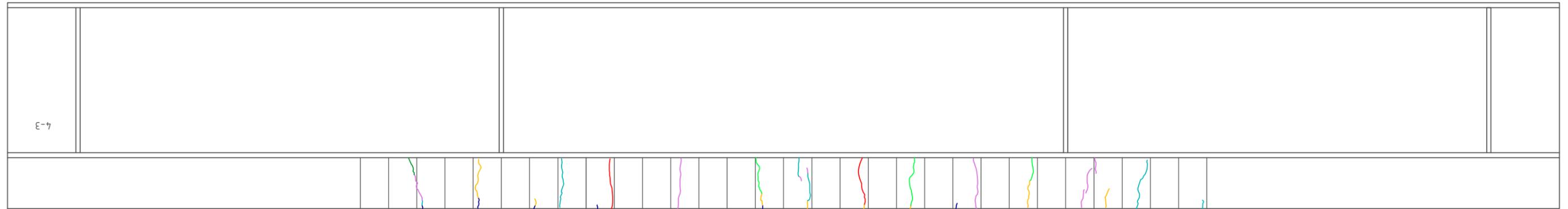


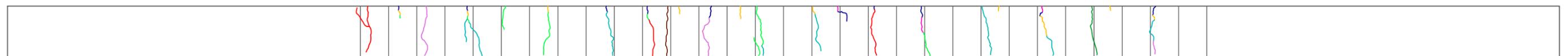
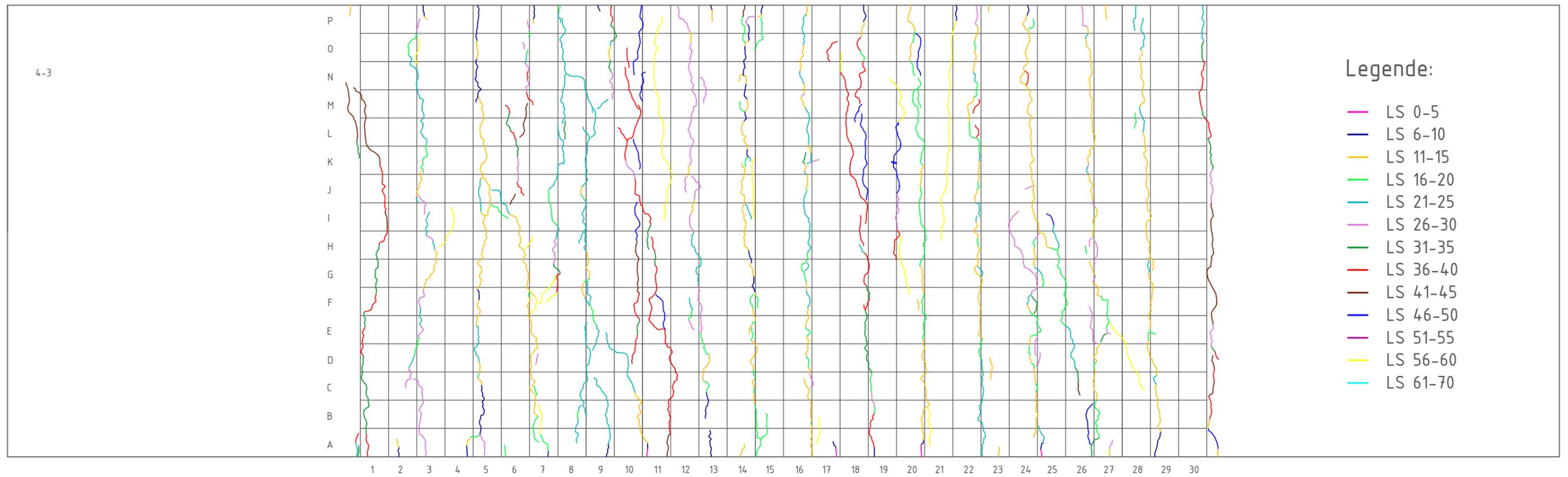
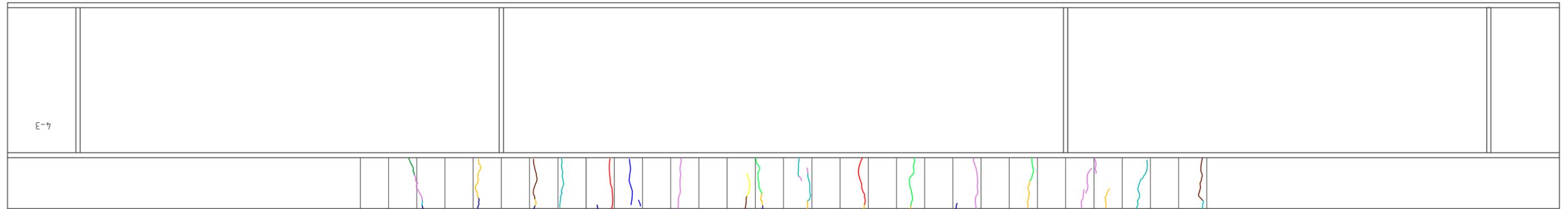












[DAST-Richtlinien \(deutscherstahlbau.de\)](http://deutscherstahlbau.de)

[Forschungsberichte \(deutscherstahlbau.de\)](http://deutscherstahlbau.de)

