



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Bewertung des Zustandes von Spanngliedern der Korrosionsschutz-Kat. b und c

**Evaluation de l'état des câbles de précontrainte des
catégories de protection contre la corrosion b et c**

**Condition assessment of post-tensioning tendons
in corrosion protection categories b and c**

TFB AG

Yves Schiegg
Björn Mühlan
Niccolò Macchi

SVTI Schweizerischer Verein für technische Inspektionen

Daniel Algernon
Aurélia Muller
Leonardo Rössler
Markus Suess
Caterina Sulis
Claudia Thurnherr

Forschungsprojekt BGT_20_06B_02
auf Antrag des Bundesamtes für Strassen ASTRA
April 2026 | 1821

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet. Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière. Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima. Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee. Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)

Bewertung des Zustandes von Spanngliedern der Korrosionsschutz-Kat. b und c

**Evaluation de l'état des câbles de précontrainte des
catégories de protection contre la corrosion b et c**

**Condition assessment of post-tensioning tendons
in corrosion protection categories b and c**

TFB AG

Yves Schiegg
Björn Mühlan
Niccolò Macchi

SVTI Schweizerischer Verein für technische Inspektionen

Daniel Algernon
Aurélia Muller
Leonardo Rössler
Markus Suess
Caterina Sulis
Claudia Thurnherr

**Forschungsprojekt BGT_20_06B_02
auf Antrag des Bundesamtes für Strassen ASTRA
April 2026 | 1821**

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Yves Schiegg

Mitglieder

Daniel Algernon

Niccolò Macchi

Björn Mühlan

Aurélia Muller

Leonardo Rössler

Yves Schiegg

Markus Suess

Caterina Sulis

Claudia Thurnherr

Begleitkommission

Präsident

Hans-Rudolf Ganz

Mitglieder

Ueli Angst

Dave Corbett

Eckhart Hars

Marc Kaufmann

Dominik Meyer

Dimitrios Papastergiou

Antragsteller

Bundesamt für Strassen ASTRA

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von
<https://www.mobilityplatform.ch/>
heruntergeladen werden.

April 2026

Inhaltsverzeichnis

Impressum	4
Abbildungsverzeichnis	7
Tabellenverzeichnis	12
Zusammenfassung	13
Résumé	19
Summary	25
1 Einleitung	31
2 Mängel bei Spanngliedern	33
2.1 Hohlstellen in Spanngliedern.....	33
2.2 Wasserabsonderungen und Segregation von Füllgut..	35
2.2.1 Segregation von Füllgut.....	36
2.3 Bauwerke in der Schweiz mit Spanngliedern vom Typ b und c	39
3 Detektion von Hohlstellen in Spanngliedern	41
3.1 Allgemeines zur Detektion	41
3.2 Vorgehen der Forschungsstelle	42
3.2.1 Zerstörungsfreie Prüfverfahren	42
3.2.2 Ultraschallprüfverfahren	43
3.2.3 Impakt-Echo.....	46
3.2.4 Radar	48
3.2.5 Visualisierungstechniken.....	50
3.2.6 Laborprüfkörper	52
3.2.7 Vorgehensweise zu Datenaufnahme und - analyse an den Laborprüfkörpern	54
3.2.8 Ergebnisse der Messungen an den Laborprüfkörpern.....	55
3.2.9 Fazit Prüfkörperuntersuchungen	69
4 Untersuchung an Bauwerken	71
4.1 Auswahl und Beschrieb der Bauwerke	71
4.2 Messungen Reppischtalbrücke.....	71
4.2.1 Messstelle 1.....	71
4.2.2 Messstelle 2.....	81
4.2.3 Messstelle 3.....	84
4.2.4 Stelle 4	92
4.3 Messungen Rampenbrücke Wiese.....	96
4.3.1 Messfeld A	96
4.3.2 Messfeld B.....	102
4.3.3 Messfeld C.....	107

4.3.4 Messfeld D.....	112
4.3.5 Messfeld E.....	117
4.3.6 Gesamtbewertung der Messungen an Rampenbrücke Wiese	120
5 Diskussion und Folgerungen	121
6 Ausblick.....	125
Literaturverzeichnis	128
Datenverwendung	131
Anhang	132
Projektabschluss	141

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematischer Vergleich der Typen b und c	31
Abbildung 2: Häufigste Schwachstellen und Gefährdungsbilder bei Spanngliedern in Brücken [7]. 1: Risse im Belag/2: Fehlende oder schadhafte Randabschlüsse/3: Schadhafte Entwässerung/4: Falsche Ausbildung von Entwässerungsröhrchen/6: Schadhafte Arbeits-/Elementfugen/7: Einlagen z.B. Leitplanken, Geländer/8: Poröser Überdeckungsбетон, zu geringe Überdeckung. Nicht im Bild 5: Undichte Fahrbahnübergänge/9: Offener Entlüftungsröhrchen/10: Korrodierte Hüllrohre/11: Poröser Nischenбетон/12: Mangelhafte Injektion im Verankerungsbereich und bei Hoch- und Tiefpunkten	34
Abbildung 3: Birkkopfsteig, Basel/Birsfelden. Längsriss im Hüllrohr und Korrosion an den darunter liegenden Spanndrähten bei den Schrägseilen. Bruch eines Schrägseils unterhalb der oberen Verankerung am 22.6.2007 ohne Einsturz der Brücke. Gesamter Restquerschnitt vor dem Bruch: ca. 42 % [8]	34
Abbildung 4: Nicht oder nur teilweise injizierte Spannkanäle und Korrosion an Spanndrähten [7]	35
Abbildung 5: Hohlraumbildung durch instabiles Füllgut an Kabelhochpunkten [15]	36
Abbildung 6: Soft-Grout bei vertikalen Spanngliedern mit starker Korrosion des Spannstahls	37
Abbildung 7: Linkes Bild, Versuchsaufbau auf Stahlblechen 100 x 100 mm, Zementstein links, Ponte Tieda-Füllgut rechts. Rechtes Bild, Angriffsbild mit Korrosionsprodukten nach Entfernen der Füllgutprobe	38
Abbildung 8: VCSensor von VSL zur Qualitätsüberwachung des Füllguts, aus [15] 39	
Abbildung 9: Ultraschall-Arrayprüftechnik gemäss Full Matrix Capture (FMC) und Total Focussing Method (TFM). FMC-Prinzip der Datenerfassung, Bild: Screeningeagle.	44
Abbildung 10: Ultraschall-System-1 bestehend aus Gerät Pundit 250 Pro Array (links) und Analysesoftware ECHOLYST (rechts)	45
Abbildung 11: Ultraschall-System-2 bestehend aus Gerät MIRA 3D Pro (oben) und Analysesoftware Mira Neo (unten)	45
Abbildung 12: Messprinzip des Impakt-Echo-Verfahrens.	46
Abbildung 13: Impakt-Echo-System bestehend aus Sensor (Germann Instruments) und Echolyt Software (SVTI).	48
Abbildung 14: Radar-System-1 bestehend aus Datenerfassungseinheit SIR 3000 und Palm-Antenne der Firma GSSI.	49
Abbildung 15: Radar-System-2 bestehend aus GP8100-Gerät und zugehöriger Software App (iPad) der Firma Screening Eagle.	50
Abbildung 16: Grundliegende Visualisierung von Daten zerstörungsfreier Prüfungen anhand von A-, B- und C-Bildern (Scans).	51
Abbildung 17: Schema der Prüfkörper.	52
Abbildung 18: Darstellung von Prüfkörper Uno. Links: Darstellung der Hüllrohre (Metall/Kunststoff). Rechts: Darstellung des Hüllrohrinnern.	53
Abbildung 19: Darstellung von Prüfkörper Dos. Links: Darstellung der Hüllrohre (Metall/Kunststoff). Rechts: Darstellung des Hüllrohrinnern.	53

Abbildung 20: Schalung der Prüfkörper Uno (links) und Dos (rechts) mit Bewehrung und Spanngliedern.....	53
Abbildung 21: Prüfkörper Uno (links) und Dos (rechts) mit angezeichneten Messrastern von 2 x 2 cm.....	54
Abbildung 22: Orientierung von Vorder- und Rückseite der Prüfkörper Uno (links) und Dos (rechts).....	54
Abbildung 23: Impakt-Echo-Profildarstellung für Prüfkörper Uno bei Messung von der Vorderseite.....	57
Abbildung 24: Ultraschall-Ergebnisdarstellung für Prüfkörper Uno bei Messung von der Vorderseite.....	58
Abbildung 25: Impakt-Echo-Profildarstellung für Prüfkörper Uno bei Messung von der Rückseite.....	60
Abbildung 26: Ultraschall-Ergebnisdarstellung für Prüfkörper Uno bei Messung von der Rückseite.....	62
Abbildung 27: Impakt-Echo-Profildarstellung für Prüfkörper Dos bei Messung von der Vorderseite.....	64
Abbildung 28: Ultraschall-Ergebnisdarstellung für Prüfkörper Dos bei Messung von der Vorderseite.....	66
Abbildung 29: Impakt-Echo-Profildarstellung für Prüfkörper Dos bei Messung von der Rückseite.....	68
Abbildung 30: Ultraschall-Ergebnisdarstellung für Prüfkörper Dos bei Messung von der Rückseite.....	69
Abbildung 31: Messstelle 1 an der Reppischtalbrücke. Links: Situation gemäss Plan. Rechts: Foto der Messstelle.....	72
Abbildung 32: Messstelle 1 an der Reppischtalbrücke. Tiefenprofildarstellung unter Verwendung eines eingeschränkten Betrachtungsbereiches von $z = [10, 40]$ cm.	73
Abbildung 33: Messstelle 1 an der Reppischtalbrücke. Exemplarische Signale entlang der Anzeigen von Spannkanaal α/β (links) sowie γ (rechts).....	74
Abbildung 34: Übersichtsdarstellung von B-, C- und D-Projektionen während der Analyse in der Software Echolyst. Oben: Einstellungen optimiert für Spannkanaal α/β . Unten: Einstellungen optimiert für Spannkanaal γ	76
Abbildung 35: Amplitudenbasierte Analyse anhand B- und C-Projektionen während der Analyse in der Software Echolyst. Linke Spalte: Einstellungen optimiert für Spannkanaal α/β . Rechte Spalte: Einstellungen optimiert für Spannkanaal γ . Obere Reihe: 3D-Darstellung der jeweiligen C-Projektion. Mittlere Reihe: C-Projektion. Untere Reihe: B-Projektion.....	77
Abbildung 36: Ultraschall-Ergebnisdarstellung Reppischtalbrücke Messfeld 1. Oben: Auswertung des Tiefenprofils als 3D-Darstellung (rechts), Überlagerung mit Situationsplan und Histogramm (links). Unten: Amplitudenbasiertes C-Bild als 3D-Darstellung (rechts) und Überlagerung mit Situationsplan (links).	79
Abbildung 37: Ultraschall (System-2) Übersichtsdarstellung für Messfeld 1 an der Reppischtalbrücke. Links: Überlagerung des amplitudenbasierten C-Bildes im relevanten Tiefenbereich der Spannglieder. Rechts: Ausrichtung des Ultraschallgerätes entlang vertikaler Messlinien.....	80
Abbildung 38: C-Bildprojektion des für die Spannkanaäle relevanten Tiefenbereiches, gewonnen mit Ultraschall (System-2) für Messfeld 1 an der Reppischtalbrücke.....	81

Abbildung 39: Messstelle 2 an der Reppischtalbrücke. Links: Detailsituation gemäss Plan. Mitte Orientierungsfoto der Messstelle. Rechts: Detailfoto mit angezeichnetem Spannglied.	82
Abbildung 40: Mittelung aller FFT-Amplitudenspektren entlang einer exemplarischen vertikalen Messlinie an Stelle 1, gemessen mit dem System Impakt-Echo.	83
Abbildung 41: Ultraschall (System-2)-Übersichtsdarstellung für Messfeld 1 an der Reppischtalbrücke. Überlagerung des amplitudenbasierten C-Bildes im relevanten Tiefenbereich der Spannglieder.	84
Abbildung 42: C-Bildprojektionen des Ultraschallsystems-2 an Messfeld 2. Links: $z = [0; 105]$ cm. Rechts: $z = [15; 35]$ cm.	84
Abbildung 43: Messstelle 3 an der Reppischtalbrücke.	85
Abbildung 44: Ultraschall-Ergebnisdarstellung Reppischtalbrücke Messfeld 3. Oben: Auswertung des Tiefenprofils als 3D-Darstellung (rechts), Überlagerung mit Situationsplan und Histogramm (links). Unten: Amplitudenbasiertes C-Bild als 3D-Darstellung (rechts) und Überlagerung mit Situationsplan (links).	87
Abbildung 45: Ultraschall (System-2) Übersichtsdarstellung für Messfeld 3 an der Reppischtalbrücke. Überlagerung des integralen amplitudenbasierten C-Bildes mit der fotografischen Aufnahme der Messstelle.	88
Abbildung 46: C-Bildprojektionen des Ultraschallsystems-2 an Messfeld 3. Links: $z = [0; 105]$ cm. Rechts: $z = [10; 15]$ cm.	88
Abbildung 47: Tiefenprofilardarstellung der Impakt-Echo-Untersuchung an Messstelle 3 der Reppischtalbrücke.	89
Abbildung 48: Charakteristische FFT-Amplitudenspektren gewonnen an Messpositionen entlang der beiden Spannglieder in Messfeld 3.	90
Abbildung 49: C-Bildprojektion der Spannglieder in Messfeld 3.	91
Abbildung 50: Messstelle 4 an der Reppischtalbrücke.	92
Abbildung 51: Ultraschall-Ergebnisdarstellung Reppischtalbrücke Messfeld 4. Oben: Auswertung des Tiefenprofils als 3D-Darstellung (rechts), Überlagerung mit Situationsplan und Histogramm (links). Unten: Amplitudenbasiertes C-Bild als 3D-Darstellung (rechts) und Überlagerung mit Situationsplan (links).	94
Abbildung 52: C-Bildprojektionen des Ultraschallsystems-2 an Messfeld 4. Links: $z = [0; 60]$ cm. Rechts: $z = [10; 15]$ cm.	95
Abbildung 53: Messstelle A an der Rampenbrücke Wiese	96
Abbildung 54: Messungen mit dem Prüfsystem Radar-2 (GP8100).	97
Abbildung 55: Resultatbilder der Radarmessungen an der Messstelle A der Rampenbrücke Wiese. Links: C-Bilddarstellung, rechts: volumetrisches 3D-Rendering.	97
Abbildung 56: Tiefen bzw. Laufzeitprofilardarstellungen der Ultraschallmessungen mit System 1 an der Messstelle A der Rampenbrücke Wiese. Links: 3D-Darstellung des Profils, Mitte: Bildliche Überlagerung mit dem Foto der Messfläche, rechts: Histogramm Darstellung der ermittelten Tiefenwerte.	98
Abbildung 57: Amplitudendarstellung in Form einer C-Projektion parallel zur Messoberfläche im relevanten Tiefenbereich. Links: 3D-Darstellung, rechts: bildliche Überlagerung mit einem Foto der Messstelle A.	98
Abbildung 58: Ultraschallergebnisse für System 2 an in Messstelle A in Form von Amplitudendarstellungen als C-Bildprojektionen über Tiefenbereiche von jeweils 7 – 15 cm für beide Spannkanaäle α und β	99

Abbildung 59: Impakt-Echo-Ergebnisse an Messstelle A in Form von Amplitudendarstellungen als C-Bildprojektionen über den Tiefenbereich der Spannkänäle.	100
Abbildung 60: Tiefenprofilardarstellung der Impakt-Echo-Untersuchung an Messstelle A der Wiesenbrücke, unter Verwendung eines eingeschränkten Frequenzbereiches.	101
Abbildung 61: Messstelle A an der Wiesenbrücke. Exemplarische Signale entlang der Anzeigen von Spannkanal α/β (links) sowie γ (rechts).	101
Abbildung 62: Messstelle B an der Rampenbrücke Wiese.	102
Abbildung 63: Resultatbilder der Radarmessungen (System 2) an der Messstelle B der Rampenbrücke Wiese. Links: C-Bilddarstellung, rechts: volumetrisches 3D-Rendering.	103
Abbildung 64: Tiefen bzw. Laufzeitprofilardarstellungen der Ultraschallmessungen mit System 1 an der Messstelle B der Rampenbrücke Wiese. Links: 3D-Darstellung des Profils, Mitte: Bildliche Überlagerung mit dem Foto der Messfläche, rechts: Histogramm Darstellung der ermittelten Tiefenwerte.	103
Abbildung 65: Amplitudendarstellung in Form einer C-Projektion parallel zur Messoberfläche im relevanten Tiefenbereich. Links: 3D-Darstellung, rechts: bildliche Überlagerung mit einem Foto der Messstelle B.	104
Abbildung 66: Ultraschallergebnisse für System 2 an in Messstelle B in Form von Amplitudendarstellungen als C-Bildprojektionen über Tiefenbereiche von jeweils 7 – 15 cm für beide Spannkänäle α und β	104
Abbildung 67: Impakt-Echo-Ergebnisse an Messstelle B in Form von Amplitudendarstellungen als C-Bildprojektionen über den Tiefenbereich der Spannkänäle.	105
Abbildung 68: Tiefenprofilardarstellung der Impakt-Echo-Untersuchung an Messstelle B der Wiesenbrücke, unter Verwendung eines eingeschränkten Frequenzbereiches.	105
Abbildung 69: Messstelle A an der Wiesenbrücke. Exemplarische Signale entlang der Anzeigen von Spannkanal α/β (links) sowie γ (rechts).	106
Abbildung 70: Messstelle C an der Rampenbrücke Wiese.	107
Abbildung 71: Resultatbilder der Radarmessungen an der Messstelle C der Rampenbrücke Wiese. Links: C-Bilddarstellung, rechts: volumetrisches 3D-Rendering.	107
Abbildung 72: Tiefen bzw. Laufzeitprofilardarstellungen der Ultraschallmessungen mit System 1 an der Messstelle C der Rampenbrücke Wiese. Links: 3D-Darstellung des Profils, Mitte: Bildliche Überlagerung mit dem Foto der Messfläche, rechts: Histogrammdarstellung der ermittelten Tiefenwerte.	108
Abbildung 73: Amplitudendarstellung in Form einer C-Projektion parallel zur Messoberfläche im relevanten Tiefenbereich. Links: 3D-Darstellung, rechts: bildliche Überlagerung mit einem Foto der Messstelle C.	108
Abbildung 74: Ultraschallergebnisse für System 2 an in Messstelle C in Form von Amplitudendarstellungen als C-Bildprojektionen über Tiefenbereiche von jeweils 7 - 15 cm für beide Spannkänäle α und β	109
Abbildung 75: Impakt-Echo-Ergebnisse an Messstelle C in Form von Amplitudendarstellungen als C-Bildprojektionen über den Tiefenbereich der Spannkänäle.	109

Abbildung 76: Tiefenprofildarstellung der Impakt-Echo-Untersuchung an Messstelle C der Wiesenbrücke, unter Verwendung eines eingeschränkten Frequenzbereiches.	110
Abbildung 77: Messstelle C an der Wiesenbrücke. Exemplarische Signale entlang der Anzeigen von Spannkanaal α/β (links) sowie γ (rechts).	110
Abbildung 78: Messstelle D an der Rampenbrücke Wiese.	112
Abbildung 79: Resultatbilder der Radarmessungen an der Messstelle D der Rampenbrücke Wiese. Links: C-Bilddarstellung, rechts: volumetrisches 3D-Rendering.	112
Abbildung 80: Tiefen bzw. Laufzeitprofildarstellungen der Ultraschallmessungen mit Ultraschallsystem 1 an der Messstelle D der Rampenbrücke Wiese. Links: 3D-Darstellung des Profils, Mitte: Bildliche Überlagerung mit dem Foto der Messfläche, rechts: Histogramm Darstellung der ermittelten Tiefenwerte.	113
Abbildung 81: Amplitudendarstellung in Form einer C-Projektion parallel zur Messoberfläche im relevanten Tiefenbereich. Links: 3D-Darstellung, rechts: bildliche Überlagerung mit einem Foto der Messstelle D.	113
Abbildung 82: Ultraschallergebnisse für System 2 an Messstelle D in Form von Amplitudendarstellungen als C-Bildprojektionen über Tiefenbereiche von jeweils 7 – 15 cm für beide Spannkanaäle α und β	114
Abbildung 83: Impakt-Echo-Ergebnisse an Messstelle D in Form von Amplitudendarstellungen als C-Bildprojektionen über den Tiefenbereich der Spannkanaäle.	114
Abbildung 84: Tiefenprofildarstellung der Impakt-Echo-Untersuchung an Messstelle D der Wiesenbrücke, unter Verwendung eines eingeschränkten Frequenzbereiches.	115
Abbildung 85: Messstelle D an der Wiesenbrücke. Exemplarische Signale entlang der Anzeigen von Spannkanaal β (links) sowie δ (rechts).	116
Abbildung 86: Messstelle E an der Rampenbrücke Wiese.	117
Abbildung 87: Resultatbilder der Radarmessungen an der Messstelle E der Rampenbrücke Wiese. Links: C-Bilddarstellung, rechts: volumetrisches 3D-Rendering.	117
Abbildung 88: Tiefen bzw. Laufzeitprofildarstellungen der Ultraschallmessungen mit System 1 an der Messstelle E der Rampenbrücke Wiese. Links: 3D-Darstellung des Profils, Mitte: Bildliche Überlagerung mit dem Foto der Messfläche, rechts: Histogramm Darstellung der ermittelten Tiefenwerte.	118
Abbildung 89: Amplitudendarstellung in Form einer C-Projektion parallel zur Messoberfläche im relevanten Tiefenbereich. Links: 3D-Darstellung, rechts: bildliche Überlagerung mit einem Foto der Messstelle E.	118
Abbildung 90: Ultraschallergebnisse für System 2 an in Messstelle E in Form von Amplitudendarstellungen als C-Bildprojektionen über Tiefenbereiche von jeweils 7 – 15 cm für beide Spannkanaäle α und β	119
Abbildung 91: Impakt-Echo-Ergebnisse an Messstelle E in Form von Amplitudendarstellungen als C-Bildprojektionen über den Tiefenbereich der Spannkanaäle.	119

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die für vertiefte Untersuchungen infrage kommenden Bauwerke mit Spanngliedern vom Typ b oder c	40
Tabelle 2: Anhaltswerte der akustischen Impedanzen Z hinsichtlich der Ermittlung des Injektionszustandes relevanter Medien.	43
Tabelle 3: Impakt-Echo-Analyse der Spannkandalindikationen gegenüber Referenzwerten aus Gl. 3 und Gl, 4 zwecks Orientierung.	75
Tabelle 4: Impakt-Echo-Analyse der Spannkandalindikationen in Messfeld 3 gegenüber Referenzwerten aus Gl. 3 und Gl, 4 zwecks Orientierung.	90
Tabelle 5: Impakt-Echo-Analyse der Spannkandalindikationen in Messfeld A gegenüber Referenzwerten aus Gl. 3 und Gl, 4 zwecks Orientierung.	102
Tabelle 6: Impakt-Echo-Analyse der Spannkandalindikationen in Messfeld A gegenüber Referenzwerten aus Gl. 3 und Gl, 4 zwecks Orientierung.	106
Tabelle 7: Impakt-Echo-Analyse der Spannkandalindikationen in Messfeld A gegenüber Referenzwerten aus Gl. 3 und Gl, 4 zwecks Orientierung.	111
Tabelle 8: Impakt-Echo-Analyse der Spannkandalindikationen in Messfeld A gegenüber Referenzwerten aus Gl. 3 und Gl, 4 zwecks Orientierung.	116

Zusammenfassung

Zielsetzung und Hintergrund

Spannglieder bilden ein tragendes Element zahlreicher Ingenieurbauwerke – insbesondere von Brücken und Kunstbauten. Ihre Dauerhaftigkeit und Funktionstüchtigkeit sind entscheidend für die Gebrauchstauglichkeit und Sicherheit dieser Bauwerke. Seit den frühen 1990er-Jahren werden in der Schweiz vermehrt Spannsysteme der Korrosionsschutzkategorien b und c eingesetzt. Im Unterschied zur klassischen Kategorie a mit Stahlblechhüllrohren verwenden diese Systeme Kunststoffhüllrohre (PE oder PP), die einen verbesserten Korrosionsschutz durch das Material selbst (Typ b und c) sowie eine elektrische Isolation (Typ c) bieten. Dadurch gelten sie als dauerhaftere und qualitativ hochwertigere Lösung.

In den vergangenen Jahrzehnten wurden national und international mehrere Schadensfälle dokumentiert, die auf unvollständige oder fehlerhafte Injektion der Spannglieder zurückzuführen sind. Bekannte Beispiele in der Schweiz sind der Bruch eines Schrägseils am Birskopfsteig in Basel (2007) sowie die schwerwiegenden Korrosionsschäden an der Ponte Moesa in Roveredo. Beide Fälle belegen, dass bei unvollständiger Verfüllung oder Segregation des Füllgutes Korrosionsprozesse am hochfesten Spannstahl erstaunlich schnell einsetzen können – mit potenziell katastrophalen Folgen für die Tragsicherheit.

Trotz dieser Risiken sind bis heute keine zerstörungsfreien Prüfmethode bekannt, die den Injektionszustand von Kunststoffhüllrohren zuverlässig beurteilen können. Diese Lücke stellt eine erhebliche Herausforderung für die Instandhaltung und Zustandsbeurteilung bestehender Kunstbauten dar.

Das vorliegende Forschungsprojekt verfolgte in diesem Kontext drei übergeordnete Ziele:

- Gewinnung eines Überblicks über die in der Schweiz verbauten Spannglieder der Kategorien b und c (Bestandsaufnahme, Bauwerksregister)
- Bewertung geeigneter zerstörungsfreier Prüfverfahren (ZfP) zur Detektion von Fehlstellen und Injektionsmängeln
- Beurteilung des tatsächlichen Zustandes von Spanngliedern anhand von Labor- und Felduntersuchungen an repräsentativen Schweizer Bauwerken

Für die Bestandsaufnahme wurden Daten des ASTRA und des Vereins Schweizerischer Vorspannfirmer (VSV) zusammengeführt. Aus insgesamt rund 140 Bauwerken wurden zunächst 40 und schliesslich 18 Kunstbauten identifiziert, die für vertiefte Untersuchungen geeignet erschienen. Als Kriterien galten unter anderem die geografische Erreichbarkeit sowie die Zugänglichkeit der Spannglieder vor Ort.

Typische Schadensbilder und Mängel bei Spanngliedern

Die Auswertung von Fallstudien und Fachliteratur zeigt, dass sich Mängel bei Spanngliedern vornehmlich in zwei Kategorien manifestieren: Hohlstellen infolge unvollständiger Verfüllung sowie Entmischungsphänomene des Injektionsgutes.

Hohlstellen durch Luft einschüsse

Kleine Luft einschüsse innerhalb des Hüllrohrs sind bei Drahtbündeln weitgehend unvermeidbar und gelten grundsätzlich als unkritisch, da die Fähigkeit des Füllgutes, alle inneren Bereiche vollständig zu durchdringen, bauartbedingt limitiert ist. Kritisch werden hingegen grössere, zusammenhängende Hohlräume, die sich bevorzugt an Hochpunkten des Spanngliedverlaufs sowie in Verankerungsbereichen ausbilden. An solchen Stellen entfällt der alkalische Korrosionsschutz des Spannstahls.

Ebenfalls zu beachten ist die Blutwasserbildung. Während des Abbindeprozesses trennt sich primär an Hoch- und Endpunkten Wasser vom Füllgut. Dieses Wasser kann später vom Zementstein wieder aufgenommen werden, was Hohlstellen hinterlässt. Je nach Wassermenge kann die Flüssigkeit auch über längere Zeit bestehen bleiben und am Übergang zwischen Wasser und Luft Korrosion auslösen.

Segregation des Füllguts (Soft-Grout)

Ein weiteres, in jüngerer Zeit verstärkt dokumentiertes Phänomen ist die lokale Entmischung (Segregation) des Füllgutes. Dabei bildet sich eine weissliche, pastöse Masse mit erhöhten Sulfat-, Natrium- und Kaliumgehalten – der sogenannte «Soft-Grout». Diese Masse bietet keinen ausreichenden Korrosionsschutz und verhindert die Passivierung der Stahloberfläche. Laborversuche der TFB AG zeigten, dass Spannstahl in Kontakt mit Soft-Grout bereits nach kurzer Zeit deutliche Korrosionserscheinungen aufweist. Die Ursache liegt in der Ausbildung von Makroelementen zwischen dem normkonformen und dem entmischten Füllgut, welche die Korrosion beschleunigen und innert kurzer Zeit zu Drahtbrüchen führen können.

In der Schweiz ist bislang ein gesicherter Fall von Soft-Grout bei internen Spanngliedern dokumentiert (Ponte Tiieda). Die Ursachen dieses Phänomens sind noch nicht abschliessend erforscht. Begünstigende Faktoren sind unter anderem Restwasser in den Hüllrohren, lange Injektionsetappen sowie eine unzureichende Durchmischung des Füllgutes beim Einpressvorgang.

Injektionsmängel lassen sich bei visuellen Inspektionen wie Endoskopie in aller Regel nicht erkennen. Die Feststellung solcher Mängel, bevor Korrosion zu erheblichen Schäden führt, stellt deshalb eine besonders anspruchsvolle Prüfaufgabe dar.

Untersuchte zerstörungsfreie Prüfverfahren (ZfP)

Für die Bewertung des Injektionszustandes von Spanngliedern wurden drei zerstörungsfreie Prüfverfahren eingesetzt und miteinander verglichen. Dabei ist zu beachten, dass sich die Erfahrungen mit diesen Methoden bisher vorwiegend auf Spannglieder mit metallischen Hüllrohren stützen. Aufgrund der unterschiedlichen akustischen Materialeigenschaften von Metall- und Kunststoffhüllrohren kann nicht ohne Weiteres von der Eignung für Stahlhüllrohre auf jene für Kunststoffrohre geschlossen werden.

Ultraschallprüfung

Die Ultraschallprüfung basiert auf der Anregung und Erfassung elastischer Wellen, die an Grenzflächen unterschiedlicher akustischer Impedanz reflektiert werden. In diesem Projekt wurden zwei moderne Array-Systeme eingesetzt, die nach dem Prinzip der Full Matrix Capture (FMC) mit anschliessender Total Focusing Method (TFM) arbeiten.

Diese Technik ermöglicht eine hochauflösende bildgebende Darstellung des Spannkanaalbereiches. Ausgewertet wurden einerseits Tiefenprofile auf Basis der Signallaufzeiten sowie amplitudenbasierte C-Bilder, die eine flächenhafte Darstellung des Spannkanaalzustandes erlauben.

Impakt-Echo

Das Impakt-Echo-Verfahren beruht auf der Analyse mechanisch angeregter Schwingungen. Ein Impuls, meist durch eine Stahlkugel erzeugt, versetzt das Bauteil in Schwingung, deren Frequenzspektrum Aufschluss über die Schichtdickenresonanz und damit über den Zustand des Hüllrohrs gibt. Unterschiede zwischen vollständig und unvollständig verfüllten Bereichen spiegeln sich in charakteristischen Frequenzverschiebungen wider.

Radar

Zusätzlich wurden Radarmessungen (Ground Penetrating Radar, GPR) benutzt, um die Lage der Spannglieder zu detektieren. Die Anwendung in diesem Projekt ist aber auf die Lokalisation der Spannglieder beschränkt, es wurde nicht versucht mit GPR-Bildern eine Aussage über den Zustand der Verfüllung oder der Spannglieder zu erstellen.

Labor- und Felduntersuchungen

Die experimentellen Untersuchungen gliederten sich in zwei aufeinander aufbauende Phasen: Laborversuche an eigens hergestellten Prüfkörpern sowie Feldmessungen an zwei realen Schweizer Brückenbauwerken.

Laboruntersuchungen an Prüfkörpern

Im Rahmen der Untersuchungen wurden zunächst Laborprüfkörper herangezogen, um die eingesetzten Verfahren unter kontrollierten Bedingungen zu validieren. Die Ergebnisse unter kontrollierten Bedingungen zeigten, dass sowohl das Ultraschall- als auch das Impakt-Echo-Verfahren grundsätzlich in der Lage sind, Unterschiede im Verfüllzustand zu erkennen. Besonders bei eindeutigen Verhältnissen (vollständig verfüllt vs. vollständig unverfüllt) und bei oberflächenparallel verlaufenden Hüllrohren konnte eine hohe Korrelation zwischen dem Messbefund und dem tatsächlichen Zustand festgestellt werden. Beim Impakt-Echo-Verfahren zeigte sich ein etwas geringerer Kontrast bei Kunststoffhüllrohren im Vergleich zu metallischen Hüllrohren, was auf den geringeren akustischen Impedanzunterschied zwischen Beton und Kunststoff zurückzuführen ist. Für Tiefenprofile (Laufzeitauswertung) erwiesen sich die Ultraschallmessungen als aussagekräftiger als die amplitudenbasierten Auswertungen.

Felduntersuchungen an Bauwerken

Die Felduntersuchungen wurden an der Reppischtalbrücke (Birmensdorf, Kanton Zürich) und der Rampenbrücke Wiese (Basel) durchgeführt. Beide Bauwerke verfügen über Spannglieder der Korrosionsschutzkategorien b und c. Insgesamt wurden 9 Messbereiche (4 an der Reppischtalbrücke, 5 an der Rampenbrücke Wiese) mit den verschiedenen ZfP-Systemen untersucht.

Die Lokalisierung der Spannkanaäle gelang mit Radar und Ultraschall in allen Messbereichen zuverlässig. Die Interpretation der Messdaten hinsichtlich des

Verfüllzustandes gestaltete sich im Feld jedoch deutlich anspruchsvoller als unter Laborbedingungen. Erschwerend wirkten komplex überlagerte Signale durch dicht liegende Bewehrung, variierende Oberflächenqualitäten sowie die eingeschränkte Zugänglichkeit kritischer Bereiche wie Hoch- und Tiefpunkte bei Hohlkastenbrücken.

In keinem der untersuchten Messbereiche konnten eindeutige Indizien für das Vorliegen von Injektionsmängeln identifiziert werden. Dies lässt sich plausibel damit erklären, dass in den gewählten Messbereichen (keine Hochpunkte) eine geringe Wahrscheinlichkeit bestand, tatsächlich auf unvollständig verfüllte Hüllrohre oder entmischtes Füllgut zu treffen. Auf eine zerstörende Verifikation (Sondagen) wurde bewusst verzichtet, um den bestehenden Korrosionsschutz der untersuchten Spannglieder nicht zu gefährden.

Diskussion, Folgerungen

Die Gesamtübersicht der Ergebnisse aus Labor- und Felduntersuchungen erlaubt eine differenzierte Beurteilung der eingesetzten Prüfverfahren sowie der diagnostischen Möglichkeiten und Grenzen.

Obwohl im Feld keine Injektionsfehler nachgewiesen wurden, lieferten die kombinierten ZfP-Methoden ein homogenes und konsistentes Befundbild ohne auffällige Häufung von Fehlanzeigen (falsum positivum). Damit belegen die Ergebnisse, dass die Verfahren in der Lage sind, einen unauffälligen Zustand von Spannkämen zuverlässig darzustellen. Für die belastbare Validierung ihrer Detektionsfähigkeit bei tatsächlichen Fehlstellen wären jedoch Untersuchungen an Bauwerken mit bekanntem Defektbestand notwendig – idealerweise bestätigt durch gezielte Öffnungen und Probenentnahmen.

Bezüglich der Methodik lassen sich folgende Erkenntnisse festhalten: Das Ultraschallverfahren weist eine höhere Reproduzierbarkeit auf und ermöglicht durch den direkten Zusammenhang zwischen Signallaufzeit und Tiefe eine unmittelbarere Interpretation der Daten. Das Impakt-Echo-Verfahren ist demgegenüber stärker von der konkreten Anregung, der Sensorkopplung und der Wahl des Auswertungsansatzes abhängig. Eine vollständige Auswertung erfordert die gleichzeitige Berücksichtigung von Frequenz- und Amplitudenaspekten sowie unterschiedlicher physikalischer Effekte.

Für die Praxis bedeutsam ist die Feststellung, dass beide Verfahren grundsätzlich auch bei Kunststoffhüllrohren anwendbar sind. Der direkte Vergleich im Prüfkörper Uno zeigte zwar eine marginal klarere Anzeige bei Stahlblechhüllrohren, doch fiel der Unterschied moderat aus. Damit erweist sich die Detektion unverfüllter Bereiche in Kunststoffhüllrohren als grundsätzlich machbar.

Aus methodischer Sicht ist die Kombination beider Verfahren besonders bei kritischen Fragestellungen empfehlenswert, da keines der beiden Verfahren alleine eine vollständige Detektion gewährleisten kann. Eine ausreichend dichte Messpunktverteilung ist für beide Verfahren unabdingbar, was den praktischen Aufwand erheblich erhöht und eine flächendeckende Anwendung in manueller Form kaum realistisch erscheinen lässt.

Als wichtige Folgerung für die Bau- und Planungspraxis wird eine «prüfgerechte Bauweise» empfohlen: Potenziell kritische Bereiche von Spannkanälen (Hochpunkte, Verankerungszonen) sollten so konzipiert werden, dass sie für ZfP-Techniken optimal zugänglich bleiben. Übereinander angeordnete Spannkanäle in Wanddickenrichtung erschweren die Prüfung erheblich und sollten vermieden werden. Der Einbau dauerhafter Sensorik zur kontinuierlichen Überwachung ist ergänzend in Betracht zu ziehen.

Ausblick

Die Ergebnisse dieser Studie bilden eine solide Grundlage für weiterführende Entwicklungen in der Diagnostik von Injektionsmängeln. Verschiedene Ansätze erscheinen dabei besonders vielversprechend:

Nutzung von Rückbauobjekten als Forschungsgelegenheit

Der Abbruch vorgespannter Bauwerke bietet die einmalige Gelegenheit, Spannkanäle direkt zu öffnen und den tatsächlichen Verfüllungs- und Korrosionszustand systematisch zu dokumentieren. Solche Untersuchungen würden wertvolle Referenzdaten liefern und eine direkte Validierung der ZfP-Methoden ermöglichen. Öffentliche Bauherren wie das ASTRA sowie die Kantone sind aufgefordert, diese Chance künftig verstärkt zu nutzen.

Phasenanalyse der Ultraschallechos

Eine vertiefte Auswertung der Ultraschallechos mittels Phasenanalyse verspricht eine deutlich präzisere Interpretation der Reflexionssignale. Dieser Ansatz war im Rahmen des vorliegenden Projekts aus zeitlichen Gründen nicht realisierbar, stellt jedoch ein prioritäres Feld für weiterführende Forschung dar.

Full Waveform Inversion (FWI) und simulationsgestützte Rekonstruktion

Simulationsgestützte Rekonstruktionstechniken wie die Full Waveform Inversion (FWI) bieten erhebliches Potenzial für eine deutlich verbesserte diagnostische Aussagekraft. Auf Basis eines digitalen Zwillings und numerischer Wellenfeldsimulationen ermöglicht FWI eine quantitative Bestimmung elastischer Materialparameter und damit eine präzisere Lokalisierung von Hohlstellen und Injektionsmängeln. Diese Technologie wird im laufenden Forschungsprojekt BGT_20_08C_01 durch die Firma Mondaic weiterentwickelt.

Ergänzende Bildgebungsverfahren

Röntgenbasierte Techniken ermöglichen eine direkte Visualisierung von Fehlinjektionen, die mit akustischen Verfahren nur indirekt erschliessbar sind. Sie eignen sich besonders für die gezielte Abklärung von Verdachtsstellen, die durch Ultraschall oder Impakt-Echo lokalisiert wurden. Eine grossflächige Anwendung ist aufgrund des technischen Aufwands und der Kosten allerdings kaum wirtschaftlich realisierbar. Langfristiges Potenzial birgt auch die Myonentomografie, die natürliche kosmische Strahlung nutzt, um voluminöse und stark bewehrte Bauteile ohne aktive Anregung tomografisch zu untersuchen.

Mechanisierung und Robotik

Der erhebliche manuelle Aufwand für die Datenerfassung stellt derzeit eine der grössten praktischen Hürden bei der Anwendung beider Messverfahren dar. Die Entwicklung mechanisierter oder robotisierter Messsysteme könnte hier eine signifikante

Effizienzsteigerung bewirken und gleichzeitig die Reproduzierbarkeit der Messdaten verbessern.

Qualitätssicherung und Normierung

Im Bereich der Bauausführung empfiehlt sich eine konsequentere Umsetzung bestehender Qualitätssicherungsmaßnahmen. Dazu gehören regelmässige Eignungsprüfungen und Produktionskontrollen des Füllgutes gemäss SN EN 446 sowie – bei hohen Anforderungen (Ausführungsklasse 3) – die Einbindung einer unabhängigen Drittpartei zur Fremdüberwachung auf der Baustelle. Besondere Aufmerksamkeit verdient zudem der Schutz der Entlüftungsröhrchen vor mechanischen Beschädigungen, da über Risse an diesen Stellen unkontrolliert Wasser in den Spannkanal eindringen kann.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse des vorliegenden Forschungsprojekts, dass sowohl methodische als auch bautechnische und systemtechnische Weiterentwicklungen ein erhebliches Potenzial bieten, die Diagnostik von Injektionsmängeln in Spanngliedern der Kategorien b und c in den kommenden Jahren deutlich voranzutreiben und damit einen wesentlichen Beitrag zur Sicherheit und Langlebigkeit von Ingenieurbauwerken in der Schweiz zu leisten.

Résumé

Objectif et contexte

Les câbles de précontrainte constituent un élément porteur de nombreux ouvrages d'art — notamment les ponts et ouvrages spéciaux. Leur durabilité et leur aptitude au service sont déterminantes pour la serviceabilité et la sécurité de ces ouvrages. Depuis le début des années 1990, la Suisse recourt de plus en plus aux systèmes de précontrainte des catégories de protection contre la corrosion b et c. Contrairement à la catégorie classique a, qui utilise des gaines en tôle d'acier, ces systèmes emploient des gaines en matière plastique (PE ou PP) offrant une protection améliorée contre la corrosion par le matériau lui-même (types b et c), ainsi qu'une isolation électrique (type c). Ils sont donc considérés comme une solution plus durable et de meilleure qualité.

Au cours des dernières décennies, plusieurs cas de dommages ont été documentés en Suisse et à l'étranger, imputables à une injection incomplète ou défectueuse des câbles de précontrainte. Parmi les exemples connus en Suisse figurent la rupture d'un câble haubané au Birschkopfsteig de Bâle (2007) et les graves dommages par corrosion du Ponte Moesa à Roveredo. Ces deux cas démontrent que des processus corrosifs peuvent s'amorcer très rapidement sur l'acier à haute résistance en cas de remplissage incomplet ou de ségrégation du produit d'injection — avec des conséquences potentiellement catastrophiques pour la sécurité structurale.

Malgré ces risques, il n'existe à ce jour aucune méthode de contrôle non destructif permettant d'évaluer de manière fiable l'état d'injection des gaines en matière plastique. Cette lacune représente un défi considérable pour la maintenance et l'évaluation de l'état des ouvrages d'art existants.

Le présent projet de recherche poursuivait dans ce contexte trois objectifs principaux :

- Établir un inventaire des câbles de précontrainte des catégories b et c installés en Suisse (recensement, registre des ouvrages).
- Évaluer les méthodes de contrôle non destructif (CND) appropriées pour détecter les défauts et les manques d'injection.
- Apprécier l'état réel des câbles de précontrainte à l'aide d'essais en laboratoire et d'investigations sur le terrain sur des ouvrages suisses représentatifs

Pour l'inventaire, les données de l'OFROU et de l'Association suisse des entreprises de précontrainte (VSV) ont été regroupées. Sur environ 140 ouvrages au total, 40 puis 18 ouvrages d'art ont été sélectionnés comme susceptibles de faire l'objet d'investigations approfondies. Les critères retenus comprenaient notamment l'accessibilité géographique et l'accessibilité des câbles sur place.

Dommages et défauts typiques des câbles de précontrainte

Les études de cas et les analyses bibliographiques documentées dans le rapport montrent que les défauts des éléments de précontrainte se manifestent principalement dans deux domaines : les cavités dues aux poches d'air et les problèmes de ségrégation du matériau de remplissage.

Vides dus à des inclusions d'air

De petites inclusions d'air à l'intérieur de la gaine sont pratiquement inévitables avec les faisceaux de fils et sont considérées comme non critiques dans l'ensemble, car la capacité du produit d'injection à pénétrer tous les espaces intérieurs est limitée par la conception. En revanche, des vides plus importants et continus, qui se forment préférentiellement aux points hauts du tracé du câble ainsi que dans les zones d'ancrage, deviennent critiques. À ces endroits, la protection alcaline contre la corrosion de l'acier de précontrainte est absente.

Il convient également de noter la formation d'eau de ressuage. Pendant le processus de prise, de l'eau se sépare du produit d'injection principalement aux points hauts et aux extrémités. Cette eau peut être réabsorbée ultérieurement par la pierre de ciment, laissant des vides. Selon la quantité d'eau, celle-ci peut également subsister pendant une période prolongée et provoquer une corrosion à l'interface eau-air.

Ségrégation du produit d'injection (soft-grout)

Un autre phénomène de plus en plus documenté ces dernières années est la ségrégation locale du produit d'injection. Il se forme alors une masse blanchâtre et pâteuse avec des teneurs élevées en sulfates, sodium et potassium — le «soft-grout». Cette masse n'offre pas une protection suffisante contre la corrosion et empêche la passivation de la surface de l'acier. Des essais en laboratoire de TFB AG ont montré que l'acier de précontrainte en contact avec du soft-grout présente des signes de corrosion marqués en peu de temps. La cause réside dans la formation de macro-éléments entre le produit d'injection conforme aux normes et le produit ségrégué, qui accélèrent la corrosion et peuvent conduire à des ruptures de fils en peu de temps.

En Suisse, un seul cas avéré de soft-grout dans des câbles de précontrainte internes est documenté à ce jour (Ponte Tieda). Les causes de ce phénomène ne sont pas encore entièrement élucidées. Les facteurs favorisants comprennent notamment l'eau résiduelle dans les gaines, de longues étapes d'injection et un malaxage insuffisant du produit d'injection lors de la mise en place.

Les défauts d'injection sont en règle générale non détectables lors d'inspections visuelles telles que l'endoscopie. La détection de tels défauts avant que la corrosion ne cause des dommages importants constitue donc une tâche de contrôle particulièrement exigeante.

Méthodes de contrôle non destructif (CND) étudiées

Pour l'évaluation de l'état d'injection des câbles de précontrainte, trois méthodes de contrôle non destructif ont été utilisées et comparées entre elles. Il convient de noter que l'expérience acquise avec ces méthodes repose jusqu'à présent principalement sur des câbles de précontrainte à gaines métalliques. En raison des propriétés acoustiques différentes des gaines métalliques et plastiques, l'aptitude aux gaines en acier ne peut pas être directement transposée aux gaines en matière plastique.

Contrôle par ultrasons

Le contrôle par ultrasons est basé sur l'excitation et la détection d'ondes élastiques qui sont réfléchies aux interfaces d'impédance acoustique différente. Dans ce projet, deux

systèmes à réseau modernes ont été utilisés, fonctionnant selon le principe de la Full Matrix Capture (FMC) avec Total Focusing Method (TFM) subséquente. Cette technique permet une représentation imagée haute résolution de la zone du conduit de précontrainte. Les profils de profondeur basés sur les temps de propagation des signaux et les images C basées sur l'amplitude, permettant une représentation surfacique de l'état du conduit, ont été analysés.

Impact-écho

La méthode impact-écho repose sur l'analyse des vibrations mécaniquement excitées. Une impulsion, généralement produite par une bille d'acier, met l'élément en vibration, dont le spectre de fréquences renseigne sur la résonance d'épaisseur de couche et donc sur l'état de la gaine. Les différences entre les zones complètement et incomplètement remplies se reflètent dans des décalages de fréquence caractéristiques.

Radar

Des mesures radar (Ground Penetrating Radar, GPR) ont également été utilisées pour détecter l'emplacement des câbles de précontrainte. L'application dans ce projet est cependant limitée à la localisation des câbles ; aucune tentative n'a été faite pour évaluer l'état du remplissage ou des câbles à partir des images GPR.

Investigations en laboratoire et sur le terrain

Les investigations expérimentales se sont articulées en deux phases consécutives : des essais en laboratoire sur des éprouvettes spécialement fabriquées et des mesures sur le terrain sur deux ouvrages de ponts suisses réels.

Investigations en laboratoire sur des éprouvettes

Dans le cadre des investigations, des éprouvettes de laboratoire ont d'abord été utilisées pour valider les méthodes employées dans des conditions contrôlées. Les résultats obtenus dans ces conditions ont montré que la méthode ultrasonore et la méthode impact-écho sont toutes deux en mesure, dans leur principe, de détecter des différences dans l'état de remplissage. Une forte corrélation entre le résultat de la mesure et l'état réel a pu être constatée, particulièrement dans des conditions non ambiguës (complètement rempli vs complètement vide) et pour des gaines orientées parallèlement à la surface. La méthode impact-écho a montré un contraste légèrement moins marqué pour les gaines en matière plastique par rapport aux gaines métalliques, ce qui est dû à la différence d'impédance acoustique moindre entre le béton et la matière plastique. Pour les profils de profondeur (analyse des temps de propagation), les mesures ultrasonores se sont révélées plus informatives que les analyses basées sur l'amplitude.

Investigations sur le terrain sur des ouvrages

Les investigations sur le terrain ont été réalisées sur le viaduc de la Reppischtal (Birmensdorf, canton de Zurich) et le pont d'accès Wiese (Bâle). Les deux ouvrages disposent de câbles de précontrainte des catégories de protection contre la corrosion b et c. Au total, 9 zones de mesure (4 sur le viaduc de la Reppischtal, 5 sur le pont d'accès Wiese) ont été examinées avec les différents systèmes CND.

La localisation des conduits de précontrainte a été réalisée de manière fiable par radar et ultrasons dans toutes les zones de mesure. L'interprétation des données de mesure

concernant l'état de remplissage s'est toutefois révélée nettement plus exigeante sur le terrain qu'en conditions de laboratoire. Les signaux complexes superposés par des armatures densément disposées, les qualités de surface variables ainsi que l'accessibilité limitée des zones critiques telles que les points hauts et bas dans les ponts à caisson creux ont été des facteurs aggravants.

Dans aucune des zones de mesure examinées, des indices clairs de défauts d'injection n'ont pu être identifiés. Cela peut s'expliquer de manière plausible par le fait que dans les zones de mesure choisies (sans points hauts), la probabilité d'y trouver effectivement des gaines incomplètement remplies ou un produit d'injection ségrégué était faible. Une vérification destructive (sondages) a délibérément été évitée afin de ne pas compromettre la protection contre la corrosion des câbles de précontrainte examinés.

Discussion et conclusions

L'aperçu global des résultats des investigations en laboratoire et sur le terrain permet une évaluation différenciée des méthodes d'examen utilisées ainsi que des possibilités et limites diagnostiques.

Bien qu'aucun défaut d'injection n'ait été mis en évidence sur le terrain, les méthodes CND combinées ont fourni un tableau homogène et cohérent sans accumulation notable d'indications erronées (faux positifs). Les résultats démontrent ainsi que les méthodes sont capables de représenter de manière fiable un état non problématique des conduits de précontrainte. Pour une validation robuste de leur capacité de détection en cas de défauts réels, des investigations sur des ouvrages présentant des défauts connus seraient nécessaires — idéalement confirmés par des ouvertures ciblées et des prélèvements d'échantillons.

Sur le plan méthodologique, les enseignements suivants peuvent être retenus : la méthode ultrasonore présente une reproductibilité plus élevée et permet, grâce à la relation directe entre le temps de propagation du signal et la profondeur, une interprétation plus immédiate des données. La méthode impact-écho dépend davantage de l'excitation concrète, du couplage du capteur et du choix de l'approche d'évaluation. Une évaluation complète nécessite la prise en compte simultanée des aspects fréquentiels et d'amplitude ainsi que de différents effets physiques.

Pour la pratique, il est important de constater que les deux méthodes sont également applicables en principe aux gaines en matière plastique. La comparaison directe sur l'éprouvette Uno a certes montré une indication marginalement plus nette pour les gaines en tôle d'acier, mais la différence est restée modérée. La détection des zones non remplies dans les gaines en matière plastique s'avère donc fondamentalement faisable.

D'un point de vue méthodologique, la combinaison des deux méthodes est particulièrement recommandée pour les questions critiques, car aucune des deux méthodes ne peut à elle seule garantir une détection complète. Une distribution suffisamment dense des points de mesure est indispensable pour les deux méthodes, ce qui augmente considérablement la charge pratique et rend une application manuelle à grande échelle peu réaliste.

Comme conclusion importante pour la pratique de la construction et de la planification, une « conception adaptée au contrôle » est recommandée : les zones potentiellement critiques des conduits de précontrainte (points hauts, zones d'ancrage) devraient être conçues de manière à rester optimalement accessibles aux techniques CND. Les conduits de précontrainte disposés les uns sur les autres dans le sens de l'épaisseur de paroi compliquent considérablement le contrôle et devraient être évités. L'installation d'une instrumentation permanente pour une surveillance continue est également à envisager.

Perspectives

Les résultats de cette étude constituent une base solide pour des développements ultérieurs dans le diagnostic des défauts d'injection. Plusieurs approches paraissent particulièrement prometteuses à cet égard :

Utilisation des démolitions comme opportunité de recherche

La démolition d'ouvrages précontraints offre l'occasion unique d'ouvrir directement les conduits de précontrainte et de documenter systématiquement l'état réel de remplissage et de corrosion. De telles investigations fourniraient des données de référence précieuses et permettraient une validation directe des méthodes CND. Les maîtres d'ouvrage publics tels que l'OFROU ainsi que les cantons sont invités à saisir davantage cette opportunité à l'avenir.

Analyse de phase des échos ultrasonores

Une analyse approfondie des échos ultrasonores par analyse de phase promet une interprétation nettement plus précise des signaux de réflexion. Cette approche n'était pas réalisable dans le cadre du présent projet pour des raisons de temps, mais constitue un domaine prioritaire pour des recherches ultérieures.

Full Waveform Inversion (FWI) et reconstruction assistée par simulation

Les techniques de reconstruction assistées par simulation telles que la Full Waveform Inversion (FWI) offrent un potentiel considérable pour une capacité diagnostique nettement améliorée. Sur la base d'un jumeau numérique et de simulations numériques de champ d'ondes, la FWI permet une détermination quantitative des paramètres élastiques des matériaux et donc une localisation plus précise des vides et des défauts d'injection. Cette technologie est développée dans le projet de recherche en cours BGT_20_o8C_01 par la société Mondaic.

Méthodes d'imagerie complémentaires

Les techniques à base de rayons X permettent une visualisation directe des défauts d'injection, qui ne sont qu'indirectement accessibles par les méthodes acoustiques. Elles conviennent particulièrement à la clarification ciblée des points suspects localisés par ultrasons ou impact-écho. Une application à grande échelle est toutefois difficile à réaliser économiquement en raison de l'effort technique et des coûts. La tomographie par muons, qui utilise les rayonnements cosmiques naturels pour examiner tomographiquement des éléments volumineux et fortement armés sans excitation active, présente également un potentiel à long terme.

Mécanisation et robotique

L'effort manuel considérable pour l'acquisition des données représente actuellement l'un des principaux obstacles pratiques à l'application des deux méthodes de mesure. Le développement de systèmes de mesure mécanisés ou robotisés pourrait apporter une amélioration significative de l'efficacité tout en améliorant simultanément la reproductibilité des données de mesure.

Assurance qualité et normalisation

Dans le domaine de l'exécution des travaux, une mise en œuvre plus systématique des mesures d'assurance qualité existantes est recommandée. Cela inclut des essais d'aptitude et des contrôles de production réguliers du produit d'injection conformément à la norme SN EN 446 ainsi que — pour les exigences élevées (classe d'exécution 3) — l'intégration d'une tierce partie indépendante pour la surveillance externe sur le chantier. Une attention particulière mérite également la protection des tubes de ventilation contre les dommages mécaniques, car des fissures à ces endroits peuvent permettre une infiltration incontrôlée d'eau dans le conduit de précontrainte.

Dans l'ensemble, les résultats du présent projet de recherche montrent que tant les développements méthodologiques que techniques et systémiques offrent un potentiel considérable pour faire avancer significativement le diagnostic des défauts d'injection dans les câbles de précontrainte des catégories b et c dans les années à venir, contribuant ainsi de manière essentielle à la sécurité et à la longévité des ouvrages d'art en Suisse.

Summary

Objectives and Background

Post-tensioning tendons are a load-bearing element of numerous engineering structures, particularly bridges and civil engineering works. Their durability and proper functioning are critical for the serviceability and safety of these structures. Since the early 1990s, Switzerland has increasingly used post-tensioning systems of corrosion protection categories b and c. Unlike the classic category a, which uses steel sheet ducts, these systems employ plastic ducts (PE or PP) that provide improved corrosion protection through the material itself (types b and c) as well as electrical isolation (type c). They are therefore regarded as a more durable and higher-quality solution.

Over recent decades, several damage cases have been documented nationally and internationally that can be attributed to incomplete or defective grouting of post-tensioning tendons. Well-known examples in Switzerland are the cable rupture at the Birschpfsteg in Basel (2007) and the severe corrosion damage at the Ponte Moesa in Roveredo. Both cases demonstrate that corrosion processes in high-strength prestressing steel can begin surprisingly quickly in the event of incomplete grouting or segregation of the grout — with potentially catastrophic consequences for structural safety.

Despite these risks, no non-destructive testing methods are currently known that can reliably assess the grouting condition of plastic ducts. This gap presents a significant challenge for the maintenance and condition assessment of existing structures.

In this context, the present research project pursued three overarching objectives:

- Gaining an overview of the post-tensioning tendons of categories b and c installed in Switzerland (inventory, structure register)
- Evaluating suitable non-destructive testing (NDT) methods for the detection of defects and grouting deficiencies
- Assessing the actual condition of post-tensioning tendons through laboratory and field investigations on representative Swiss structures

For the inventory, data from the ASTRA and the Association of Swiss Prestressing Companies (VSV) were merged. From a total of approximately 140 structures, first 40 and then finally 18 engineering structures were identified as suitable for in-depth investigations, based on criteria including geographical accessibility and on-site access to the tendons.

Typical Damage Patterns and Defects in Post-Tensioning Tendons

The analysis of case studies and technical literature shows that defects in post-tensioning tendons manifest primarily in two categories: voids resulting from incomplete grouting and segregation phenomena of the grout.

Voids due to air entrapment

Small air inclusions within the duct are largely unavoidable in wire bundles and are generally considered non-critical, as the ability of the grout to penetrate all internal

areas completely is inherently limited by the construction type. However, larger, interconnected voids become critical, forming preferentially at high points along the tendon profile and in anchorage zones. At such locations, the alkaline corrosion protection of the prestressing steel is lost.

Bleed water formation must also be taken into account. During the setting process, water separates from the grout primarily at high and end points. This water can later be reabsorbed by the cement stone, leaving voids. Depending on the amount of water, the liquid may persist for extended periods and trigger corrosion at the water-air interface.

Segregation of grout (Soft-Grout)

Another phenomenon that has been increasingly documented in recent years is the local segregation of the grout material. A whitish, pasty mass forms with elevated levels of sulfate, sodium, and potassium — the so-called 'Soft-Grout'. This mass does not provide adequate corrosion protection and prevents the passivation of the steel surface. Laboratory tests by TFB AG showed that prestressing steel in contact with Soft-Grout exhibits clear signs of corrosion after a short period. The cause lies in the formation of macro-elements between the specification-compliant grout and the segregated material, which accelerates corrosion and can lead to wire fractures within a short time.

In Switzerland, one confirmed case of Soft-Grout in internal post-tensioning tendons has been documented to date (Ponte Tieda). The causes of this phenomenon have not yet been conclusively researched. Contributing factors include residual water in the ducts, long grouting stages, and insufficient mixing of the grout during the injection process.

Grouting deficiencies generally cannot be identified during visual inspections such as endoscopy. Detecting such deficiencies before corrosion causes significant damage is therefore a particularly challenging testing task.

Non-Destructive Testing (NDT) Methods Investigated

Three non-destructive testing methods were used and compared to assess the grouting condition of post-tensioning tendons. It should be noted that experience with these methods has so far been based primarily on tendons with metallic ducts. Due to the different acoustic material properties of metal and plastic ducts, the suitability established for steel ducts cannot be directly assumed to apply to plastic ducts.

Ultrasonic testing

Ultrasonic testing is based on the excitation and detection of elastic waves that are reflected at interfaces of differing acoustic impedance. In this project, two modern array systems were used, operating on the principle of Full Matrix Capture (FMC) with subsequent Total Focusing Method (TFM). This technique enables high-resolution imaging of the post-tensioning duct zone. Both depth profiles based on signal transit times and amplitude-based C-scans, which allow an areal representation of the duct condition, were evaluated.

Impact-echo

The impact-echo method is based on the analysis of mechanically excited vibrations. An impulse, typically generated by a steel ball, causes the component to vibrate, and the resulting frequency spectrum provides information about the layer thickness resonance and thus the condition of the duct. Differences between completely and incompletely grouted areas are reflected in characteristic frequency shifts.

Radar

Radar measurements (Ground Penetrating Radar, GPR) were also used to detect the location of the tendons. However, the application in this project was limited to the localization of the tendons; no attempt was made to use GPR images to make statements about the grouting condition or the state of the tendons.

Laboratory and Field Investigations

The experimental investigations were divided into two successive phases: laboratory tests on specially manufactured test specimens and field measurements on two real Swiss bridge structures.

Laboratory investigations on test specimens

Laboratory test specimens were first used to validate the methods under controlled conditions. Results under controlled conditions showed that both the ultrasonic and impact-echo methods are fundamentally capable of detecting differences in the grouting condition. A high correlation between the measurement result and the actual condition was found, particularly under clear conditions (completely grouted vs. completely ungrouted) and for ducts running parallel to the surface. The impact-echo method showed a slightly lower contrast for plastic ducts compared to metallic ducts, which is attributable to the lower acoustic impedance difference between concrete and plastic. For depth profiles (transit time evaluation), ultrasonic measurements proved more informative than amplitude-based evaluations.

Field investigations on structures

The field investigations were carried out at the Reppischtal viaduct (Birmensdorf, Canton of Zurich) and the Wiese ramp bridge (Basel). Both structures have post-tensioning tendons of corrosion protection categories b and c. A total of 9 measurement areas (4 at the Reppischtal viaduct, 5 at the Wiese ramp bridge) were examined using the various NDT systems.

The localization of the post-tensioning ducts was achieved reliably using radar and ultrasonics in all measurement areas. However, the interpretation of the measurement data with respect to the grouting condition proved considerably more demanding in the field than under laboratory conditions. Complicating factors were complex overlapping signals from closely spaced reinforcement, varying surface quality, and limited accessibility of critical areas such as high and low points in hollow box bridges.

No clear evidence of grouting deficiencies could be identified in any of the examined measurement areas. This can plausibly be explained by the fact that in the chosen measurement areas (no high points), the probability of actually encountering incompletely grouted ducts or segregated grout was low. Destructive verification (probing)

was deliberately avoided so as not to compromise the existing corrosion protection of the investigated tendons.

Discussion and Conclusions

The overall overview of the results from laboratory and field investigations allows a differentiated assessment of the testing methods used and the diagnostic possibilities and limitations.

Although no grouting defects were demonstrated in the field, the combined NDT methods provided a homogeneous and consistent set of findings without a notable accumulation of false indications (false positives). The results thus demonstrate that the methods are capable of reliably depicting a normal condition of post-tensioning ducts. For robust validation of their detection capability in the presence of actual defects, investigations on structures with known defects would be necessary – ideally confirmed by targeted openings and sample extraction.

Regarding methodology, the following findings can be noted: the ultrasonic method has higher reproducibility and allows more direct interpretation of data due to the direct relationship between signal transit time and depth. The impact-echo method is more dependent on the specific excitation, sensor coupling, and choice of evaluation approach. A complete evaluation requires the simultaneous consideration of frequency and amplitude aspects as well as different physical effects.

Of practical significance is the finding that both methods are fundamentally applicable to plastic ducts. The direct comparison in the test specimen showed a marginally clearer indication for steel sheet ducts, but the difference was moderate. Thus, the detection of ungrouted areas in plastic ducts proves to be fundamentally feasible.

From a methodological perspective, the combination of both methods is particularly recommended for critical questions, as neither method alone can guarantee complete detection. A sufficiently dense distribution of measurement points is indispensable for both methods, which considerably increases the practical effort and makes areal coverage in manual form hardly realistic.

As an important conclusion for construction and planning practice, 'inspection-friendly design' is recommended: potentially critical areas of post-tensioning ducts (high points, anchorage zones) should be designed so that they remain optimally accessible to NDT techniques. Stacked post-tensioning ducts in the wall thickness direction make testing considerably more difficult and should be avoided. The installation of permanent sensors for continuous monitoring should also be considered.

Outlook

The results of this study provide a solid foundation for further developments in the diagnosis of grouting deficiencies. Several approaches appear particularly promising:

Using demolition projects as research opportunities

The demolition of prestressed structures offers a unique opportunity to directly open post-tensioning ducts and systematically document the actual grouting and corrosion

condition. Such investigations would provide valuable reference data and enable direct validation of the NDT methods. Public clients such as ASTRA and the cantons are called upon to make greater use of this opportunity in the future.

Phase analysis of ultrasonic echoes

In-depth evaluation of ultrasonic echoes using phase analysis promises significantly more precise interpretation of the reflection signals. This approach could not be realized within the scope of the present project for time reasons, but represents a priority field for further research.

Full Waveform Inversion (FWI) and simulation-supported reconstruction

Simulation-supported reconstruction techniques such as Full Waveform Inversion (FWI) offer considerable potential for significantly improved diagnostic capability. Based on a digital twin and numerical wave field simulations, FWI enables quantitative determination of elastic material parameters and thus more precise localization of voids and grouting deficiencies. This technology is being further developed in the ongoing research project BGT_20_08C_01 by the company Mondaic.

Supplementary imaging methods

X-ray-based techniques enable direct visualization of grouting deficiencies that can only be indirectly inferred with acoustic methods. They are particularly suitable for the targeted investigation of suspected areas identified by ultrasound or impact-echo. Large-scale application is, however, hardly economically feasible due to the technical effort and costs. Muon tomography, which uses natural cosmic radiation to tomographically examine voluminous and heavily reinforced components without active excitation, also holds long-term potential.

Mechanization and robotics

The considerable manual effort required for data acquisition is currently one of the greatest practical hurdles in the application of both measurement methods. The development of mechanized or robotic measurement systems could bring about a significant increase in efficiency while simultaneously improving the reproducibility of measurement data.

Quality assurance and standardization

In the area of construction execution, more consistent implementation of existing quality assurance measures is recommended. This includes regular suitability tests and production checks of the grout in accordance with SN EN 446 as well as — for high requirements (execution class 3) — the involvement of an independent third party for external monitoring on the construction site. Particular attention should also be paid to protecting the vent tubes from mechanical damage, as cracks at these points can allow water to enter the post-tensioning duct in an uncontrolled manner.

Overall, the results of the present research project show that methodological, technical, and systemic further developments offer considerable potential to significantly advance the diagnosis of grouting deficiencies in post-tensioning tendons of categories b and c in the coming years, thereby making an essential contribution to the safety and longevity of engineering structures in Switzerland.

1 Einleitung

Spannglieder sind ein wichtiges Tragelement vieler Kunstbauten. Seit den 1990er Jahren werden Spannlitzen oder Drähte in den Kategorien b und c mit Füllgut und einem Kunststoffhüllrohr umhüllt, um einen ausreichenden Korrosionsschutz zu gewährleisten. Diese Rohre aus PE oder PP wirken als wirksame Barriere gegen Schadstoffe und Streuströme.

Weitere Anforderungen an die Dauerhaftigkeit von Spannsystemen sind in den Ziffern 3.4.2 ff der Norm SIA 262 [1] festgelegt.

Bei Spanngliedern mit Verbund werden in Bezug auf den Korrosionsschutz drei Kategorien unterschieden (Abbildung 1):

- Kategorie a: Spannglied mit Stahlblechhüllrohr
- Kategorie b: Spannglied mit Kunststoffhüllrohr
- Kategorie c: Elektrische Isolation der Spannglieder inklusive Verankerungselemente

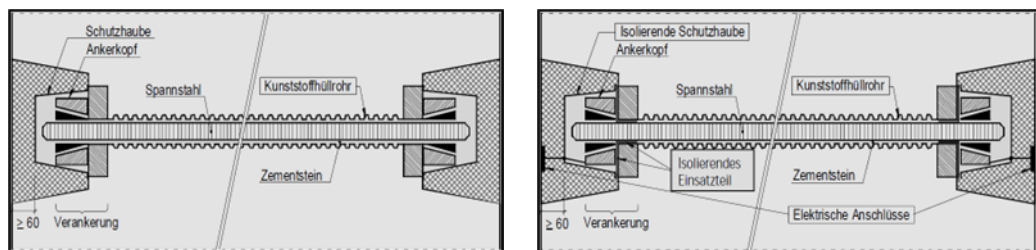


Abbildung 1: Schematischer Vergleich der Typen b und c

Spannsysteme, welche den Eignungs- und Konformitätsnachweis gemäss SIA 262 erbringen, werden in der Schweiz im Register «Spannsysteme» aufgeführt (www.sia.ch). Die Vorspann-Firmen sind verpflichtet, jährlich die Nachweise für die Fremdüberwachung des Spannsystems, die QM-System Zertifizierung, die nationale Umsetzung CWA 14646, die Normkonformität des Füllguts und die Normkonformität der verarbeiteten Spannstähe an den zuständigen Fachexperten der Arbeitsgruppe Spannstahl und Spannsysteme der Normkommission SIA 262 Betonbau einzureichen. Die Normkommission SIA 262 entscheidet anschliessend über die weitere Gültigkeit des Eintrags.

Bei der Verwendung von Kunststoffhüllrohren können während des Bauprozesses Schäden auftreten, da der Kunststoff weniger widerstandsfähig ist als man das von den Metallhüllrohren gewohnt war. Zum Beispiel können bereits leichte Bewegungen der Litzen im Hüllrohr (z.B. beim Spannprozess) oder Schleifen des Hüllrohrs auf der Bewehrungsstäben zu Löchern im Kunststoff führen. Zum Schutz vor solchem Schleifen werden inzwischen Halbschalen zum zusätzlichen Schutz der Hüllrohre verwendet. Die anfänglichen Pilotprojekte der Kat. c wurden ohne Halbschalen ausgeführt (z.B. Seebücke Luzern 1996). In der Schweiz wurden Anfang der 2000er Jahre erste Halbschalen genutzt, damals aber aus Stahlblech. Halbschalen aus Kunststoff kamen erst

Mitte der 00er Jahre zum Einsatz und sind auch erst seit diesem Zeitraum am Markt erhältlich. In der revidierten Version der ASTRA Richtlinie 12 010 von 2007 [2] sind nebst der Stahlversion die ersten zu PT-Plus passenden Kunststoffschalen aufgeführt.

Seit Mitte der 1990er Jahre wurden im Ausland und vereinzelt auch in der Schweiz Fälle von Korrosion am Spannstahl aufgrund von Entmischungen (Segregation) im Füllgut festgestellt. Die Korrosionsgeschwindigkeiten können unerwartet hoch sein. Injektionsmängel können durch die Eigenschaften des Füllgutes, die Geometrie (insbesondere das Verhältnis des Querschnitts des Hüllrohrs zur Menge der Spannstähle) oder die Länge des injizierten Spanngliedabschnitts beeinflusst werden. Das Injektionsgut spielt jedoch eine entscheidende Rolle. In der Schweiz hat die TFB AG verschiedene Fälle untersucht. Beispielsweise kann eine unvollständige Füllung des Hüllrohrs oder eine unzureichende Qualität des Injektionsgutes zu lokalen Korrosionsangriffen im Inneren des Spanngliedes führen. Solche Korrosionsprozesse sind bei visuellen Inspektionen (z. B. Endoskopie) und Zustandsuntersuchungen nur schwer oder gar nicht zu erkennen.

Die Feststellung von Injektionsmängeln, bevor Korrosion zu erheblichen Schäden führt, ist eine besonders anspruchsvolle Prüfaufgabe. In der Vergangenheit wurden verschiedene zerstörungsfreie Prüfmethoden (NDT) eingesetzt, wie z.B. Ultraschallecho und Impact-Echo. Beide Verfahren sind empfindlich auf Lufteinschlüsse, die durch Injektionsmängel entstehen können. Eine Herausforderung besteht darin, dass sich diese Einschlüsse im Inneren des Hüllrohrs befinden, das aus einem anderen Material (z. B. Stahl oder Kunststoff) besteht als das Injektionsgut. Im Bericht zum ASTRA Forschungsprojekt AGB 2012/16 [3] wurde ein möglicher Ansatz mittels Phasenauswertung vorgestellt, um solche Signalantworten zu analysieren. Der Erfolg dieses Ansatzes konnte bisher nur unter Laborbedingungen an eigens dafür hergestellten Probekörpern simuliert werden. Im Rahmen einer Zustandsuntersuchung an einer vorgespannten Dachkonstruktion führte die TFB ein Vorprojekt zur Detektion solcher Hohlstellen in kleinformatischen Probekörpern mit Ultraschallecho durch [4].

Das vorliegende Forschungsprojekt zielte darauf ab, einen Überblick über Spannglieder der Korrosionsschutz-Kategorien b und c zu erhalten, die in der Schweiz seit den frühen 1990er Jahren verbaut wurden und bei denen es möglicherweise zu Injektionsmängeln gekommen sein könnte. Durch den Einsatz aussagekräftiger zerstörungsfreier Prüfmethoden und gezielte stichprobenartige Untersuchungen an ausgewählten Kunstbauten sollte eine Aussage über den Zustand der Spannglieder ermöglicht werden.

2 Mängel bei Spanngliedern

2.1 Hohlstellen in Spanngliedern

Kleine Hohlräume in einem injizierten Spannglied sind praktisch unvermeidbar. Bei Vorspannung mit Drahtsystemen werden nur die äusseren Drähte mit Füllgut mehr oder weniger vollständig umhüllt. Die Hohlräume im Innern des Drahtbündels sind meist nur mit Luft gefüllt. Im Fall von Litzen vermag das Füllgut wegen den spiralförmig angeordneten Litzendrähnen besser in die Hohlräume zwischen den Litzen einzudringen [5].

Bei der Europabrücke in Zürich wurden aufgrund zahlreicher Sondagen viele Überlegungen zur Korrosion von Drahtbündeln bei seitlichem Korrosionsangriff infolge von Chlorideindringungen an den Hohlkastenstegen angestellt. Dabei wurde festgehalten, dass die inneren Drähte nicht besonders stark korrosionsgefährdet sind, da die Chloride durch die dünnen Schichten von Füllgut zwischen den aussen liegenden zu den weiter innen liegenden Drähnen vordringen müssen, was zu einer starken Reduktion der diffusionsfähigen Querschnittsfläche führt. Dies bremst nicht nur den Chlorideintrag, sondern reduziert auch den Chloridgehalt im innen liegenden Füllgut und damit die Korrosionsgefahr erheblich. Weiter fehlt im Innern des Drahtbündels der für die Korrosion notwendige Elektrolyt. Ist teilweise Füllgut vorhanden, welches die Funktion des Elektrolyten übernehmen kann, ist ein Stromfluss zwar möglich, wegen des geringen Volumens ist der elektrische Widerstand aber relativ hoch und der mögliche Stromfluss deshalb stark begrenzt [5].

Aus eigener Erfahrung der Forschungsstelle wurden bei innen liegenden Spanndrähnen z.T. Anrostungen und oberflächliche Rostablagerungen beobachtet, intensive Korrosion mit messbaren Querschnittsverluste jedoch noch nie. Vielfach waren die Spanndrähte blank, d.h. ohne jegliche Korrosions- oder Injektionsspuren.

Eine andere Situation liegt vor, wenn ein grösseres Segment des Hüllrohrs kein Füllgut enthält, insbesondere bei Hochpunkten und selten bei Tiefpunkten (Abbildung 2). In diesem Fall besteht das Risiko eines Feuchtetransports entlang dem Spannglied. Der Transport des Wassers in Längsrichtung ist selbstverständlich abhängig von der Längsneigung. Beim Projekt «79R Brücke Stadtergasse» [6] war dies gut zu sehen. Chloridhaltiges Wasser ist an einem Hochpunkt ins Spannglied eingedrungen und von dort infolge Schwerkraft im Hohlraum zwischen Füllgutspiegel und Hüllrohrwandung an den Tiefpunkt geflossen, wo es «gefangen» war und nicht austrocknen konnte. Nach einiger Zeit kam es von innen zur Durchkorrosion des metallischen Hüllrohrs und einer Durchfeuchtung des Längsträgers. Zum Zeitpunkt der Untersuchungen waren an der besagten Stelle Rostflecken an der Betonoberfläche vorhanden. Von aussen konnte eine Chloridkontamination ausgeschlossen werden. Erst die Ausführung einer Sonde ergab den korrekten Hinweis auf den ablaufenden Korrosionsmechanismus, ausgehend von einem Spannglied am Tiefpunkt.

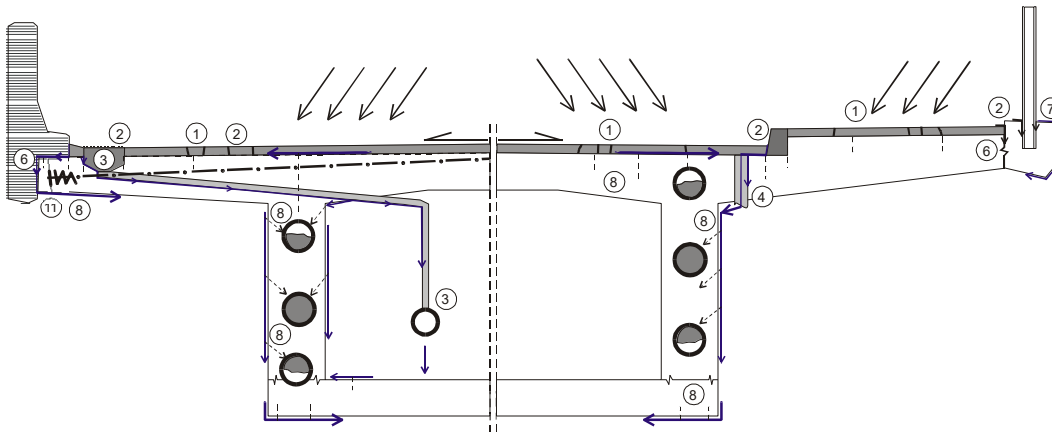


Abbildung 2: Häufigste Schwachstellen und Gefährdungsbilder bei Spanngliedern in Brücken [7].
 1: Risse im Belag/2: Fehlende oder schadhafte Randabschlüsse/3: Schadhafte Entwässerung/4: Falsche Ausbildung von Entwässerungsröhrchen/6: Schadhafte Arbeits-/Elementfugen/7: Einlagen z.B. Leitplanken, Geländer/8: Poröser Überdeckungsбетon, zu geringe Überdeckung. Nicht im Bild 5: Undichte Fahrbahnübergänge/9: Offener Entlüftungsröhrchen/10: Korrodierte Hüllrohre/11: Poröser Nischenбетon/12: Mangelhafte Injektion im Verankerungsbereich und bei Hoch- und Tiefpunkten

Eine kritische Stelle liegt auch im Bereich der Verankerung, v.a. bei Schrägseilen, stark geneigten oder vertikalen Spanngliedern. Am Ende der Injektionsstrecke kann es zu Absetzungen des Füllguts und/oder der Bildung von Blutwasser kommen. In beiden Fällen bildet sich ein Hohlraum, in dem sich Feuchtigkeit und eventuell auch Schadstoffe ansammeln können.

In diesem Zusammenhang kam es beim Birskopfsteg bei Basel zu einem gravierenden Schadenfall. Am 22. Juni 2007 versagte eines der sechs Schrägseile infolge Korrosion (Abbildung 3).



Abbildung 3: Birskopfsteg, Basel/Birsfelden. Längsriß im Hüllrohr und Korrosion an den darunter liegenden Spanndrähten bei den Schrägseilen. Bruch eines Schrägseils unterhalb der oberen Verankerung am 22.6.2007 ohne Einsturz der Brücke. Gesamter Restquerschnitt vor dem Bruch: ca. 42 % [8]

Nach einer etwa 40-jährigen Nutzung der Brücke wurden mehrere klaffende Risse in den Hüllrohren aus Polyethylen (vermutliche Ursachen: hoher Druck während der Injektion und Alterung des HDPE) und Korrosion an den darunter liegenden Spanndrähten festgestellt [8]. Darüber hinaus wurden zahlreiche Stellen mit Injektionsmängeln gefunden. Die Korrosion der Vorspannung bewirkte Brückenverformungen, welche die den Personensteg funktionsuntüchtig machten. Es kam jedoch glücklicherweise weder zu einem Einsturz noch zu Personenschäden. Der Hauptgrund für diesen Schadenfall

war die Einwirkung von Wasser und Sauerstoff im nicht vollständig mit Zementinjektion verfüllten Bereich gerade unterhalb der Seilverankerung am Pylonkopf [9].

Einer in der Schweiz am besten dokumentierte Schadenfall mit nicht oder nur teilweise injizierten Spanngliedern (Abbildung 4) betrifft die Brücke Ponte Moesa in Roveredo GR [7]. Obwohl das Bauwerk über 50 Jahre alt war, hat sich gezeigt, mit welcher gravierenden Korrosionsschäden an der Vorspannung zu rechnen ist, wenn der Spannstahl ohne zementösen Korrosionsschutz im Hüllrohr vorliegt und gleichzeitig eindringendem Wasser und Chloriden ausgesetzt ist. Ursache der Fehl-/Hohlstellen im Füllgut war hauptsächlich die ungünstige Anordnung der Spanndrähte im Hüllrohr. Durch die hohe Packungsdichte berührten sich die Drähte gegenseitig und lagen mehr oder weniger direkt am Hüllrohr an. Eine ausreichende Umhüllung mit Füllgut war demzufolge kaum möglich.

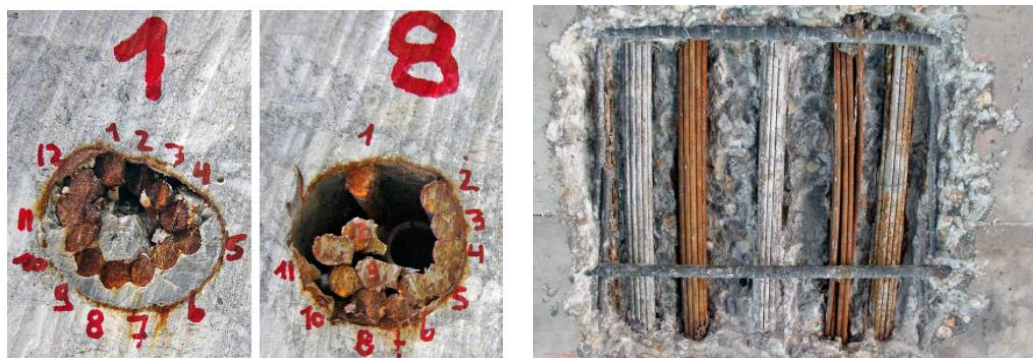


Abbildung 4: Nicht oder nur teilweise injizierte Spanngliedern und Korrosion an Spanndrähten [7]

Korrosionsprozesse in Spanngliedern können unterschiedlich lang ablaufen und demzufolge auch unterschiedlich starke Auswirkungen haben. Wenn die Korrosion z.B. nur in einem sehr kleinen Hohlraum (z.B. in einer Wasserlinse infolge segregiertem Füllgut) stattfindet, kann der Prozess nach wenigen Jahren zum Erliegen kommen. Solche Korrosionsangriffe führen im allgemeinen nur zu oberflächlichen Rostpunkten auf lokal freiliegenden Spanndrähten oder an metallischen Hüllrohren, die unbedeutend sind. Je nach Grösse und Art des Hohlraums bzw. Beschaffenheit des Füllguts kann aber auch eine Makroelementbildung resultieren, die in ungünstigen Fällen zu ernststen Korrosionsschäden führen kann [10]. Bei grösseren Hohlräumen durch nicht vollständig oder gar nicht ausinjizierte Spanngliedern kann im verbleibenden Hohlraum eine atmosphärische Korrosion stattfinden, deren Verlauf vom Wasserangebot im Inneren des Hohlraums abhängt [6], [11].

2.2 Wasserabsonderungen und Segregation von Füllgut

Füllgut (wird häufig auch als Einpressmörtel oder Injektionsgut bezeichnet) besteht aus einer Suspension von Zement in Wasser plus Zusatzmittel. Der ausgehärtete Zementstein ist hoch alkalisch und bildet den primären Korrosionsschutz für den hochfesten Stahl. Bei den Zusatzmitteln kommen in der Regel Fließmittel und Stabilisierer zum Einsatz. Ziel ist eine niedrig viskose, d.h. fließ- und pumpfähige, Mischung mit tiefem w/z-Faktor (meist < 0.4) ohne Neigung zu Blutwasserbildung und Entmischung

(Segretation). Das Verhalten des Füllguts kann mit Zusatzmitteln beeinflusst werden (z.B. Fliessmittel für gutes Fliessverhalten bei tiefen w/z-Werten). Die richtige Dosierung kann z.B. mit der Bestimmung des Fliessvermögens gemäss [12] geprüft und optimiert werden. Es gibt auch Hersteller von Füllgut, die zusätzlich Stabilisatoren einmischen, um die Wasserabsonderungen (Bluten) und Entmischung zu begrenzen. Instabilitäten im Füllgut entstehen oft durch übermässige Wasserabsonderung und Setzen (Segregation) des Füllguts (Abbildung 5). Dies tritt verstärkt bei Hochpunkten und Endverankerungen im Spanngliedprofil auf. Während dem Injektionsvorgang kann sich Blutwasser bei Hochpunkten oder am Spanngliedende bilden. Dieses Wasser wird vom abbindenden Zementstein in der Regel wieder aufgenommen, und es bildet sich anschliessend eine Hohlstelle.

Für den Eintrag ins SIA-Register «Spannsysteme» benötigt ein Hersteller eine separate Zertifizierung seines Füllguts gemäss den Normen SN EN 445 [12], 446 [13] und 447 [14]. Nebst den Materialeigenschaften werden im Rahmen von jährlichen Audits auch die Verfüllarbeiten auf der Baustelle geprüft und bewertet.

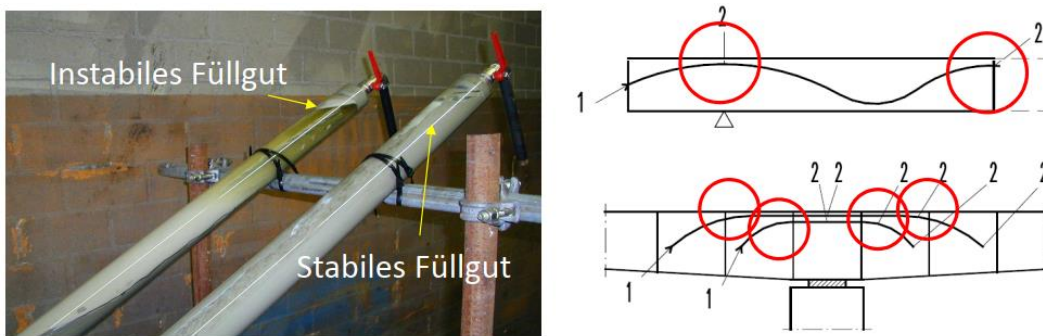


Abbildung 5: Hohlraumbildung durch instabiles Füllgut an Kabelhochpunkten [15]

2.2.1 Segregation von Füllgut

Das Phänomen der Entmischung (Segregation) von Füllgut ist ein verhältnismässig «neues» Phänomen und wird meist bei Spanngliedern mit Kunststoffhüllrohren beobachtet, kann aber auch bei metallischen Hüllrohren auftreten. Bei dieser Entmischung entsteht eine weissliche, weiche Masse mit deutlich erhöhten Sulfat-, Kalium- und Natriumgehalten, die auch als «Soft-Grout» bezeichnet wird. Wie man in verschiedenen Fällen festgestellt hat, ist der Spannstahl in dieser Masse nicht beständig und zeigt schon nach kurzer Zeit deutliche bis starke Korrosionserscheinungen (Abbildung 6).



Abbildung 6: Soft-Grout bei vertikalen Spanngliedern mit starker Korrosion des Spannstahls

Das Phänomen solcher Segregationen ist noch nicht vollständig geklärt, wird aber gemäss Literatur auch in anderen Ländern beobachtet [16], [17], [18]. In der Schweiz gibt es ebenfalls wenige Beispiele von Segregation des Füllguts [10], [19], [20].

Beim Ponte Tieda wurden interne Spannglieder im Verbund eingebaut [10]. Dabei wurde festgestellt, dass das Füllgut am Spanngliedende auf einer Länge von etwa 2 m nicht ausgehärtet war (lehmartige, weisse Masse). Bei der Zusammensetzung dieser Masse handelt es sich im Wesentlichen um Calciumsulfat (Gips), angereichert mit Na_2O und K_2O , was einen erhöhten pH-Wert > 11 zur Folge hat.

Die Korrosivität dieses Füllguts wurde anhand eines einfachen Korrosionsversuchs im Labor der TFB AG näher untersucht. Um das Auftreten eines Makroelementes zwischen Stahl in normkonformen Füllgut und «Soft-Grout» zu prüfen, wurde auf der einen von zwei voneinander isolierten Stahlplatten ein Block aus Zementstein gegossen und dieser mit dem mangelhaften Füllgut in Kontakt gebracht. Wie die korrosionstechnischen Messungen gezeigt haben, entstand ein Makroelement mit deutlichen Korrosionsangriffen am Stahl unter dem Füllgut (Abbildung 7). Das schlechte Füllgut hat offensichtlich keine passivierende, korrosionsschützende Wirkung. Nach Versuchsende wurde die lehmartige Masse entfernt. Es zeigte sich, dass der Stahlabtrag nicht flächig verteilt war, sondern einen eher lokalen Charakter aufwies. Nach Entfernen der Korrosionsprodukte waren deutliche Anfrassungen auf der Stahloberfläche erkennbar, was auf eine hohe Korrosionsgeschwindigkeit schliessen lässt.

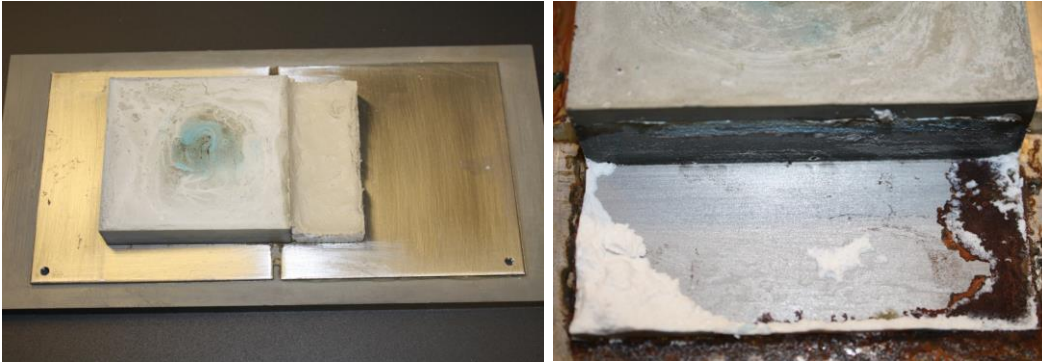


Abbildung 7: Linkes Bild, Versuchsaufbau auf Stahlblechen 100 x 100 mm, Zementstein links, Ponte Tiieda-Füllgut rechts. Rechtes Bild, Angriffsbild mit Korrosionsprodukten nach Entfernen der Füllgutprobe

Aufgrund der vorhandenen Alkalität wäre selbst im entmischten Füllgut eine Passivierung der Stahloberflächen zu erwarten, was offensichtlich aber nicht der Fall ist, so dass die Spanndrähte im feuchten, pastösen Mörtel korrodieren. Die genaue Ursache der Korrosionsangriffe wird auch gemäss Literatur weiterhin untersucht. Es wird vermutet, dass die erhöhten Sulfatgehalte die Passivierung des Stahls behindern oder sogar ganz verhindern [16]. Auch geringe Mengen Chloride in Binde- oder Zusatzmitteln oder dem Anmachwasser können nicht in jedem Fall ausgeschlossen werden. Eine Rolle spielen dürfte auch die spaltenreiche Umgebung (aneinander liegen der Drähte), was zur Folge hat, dass der Stofftransport in den Spalten behindert ist, was zu Potentialdifferenzen, Störung der Passivierung und vorzeitiger (Spalt-)Korrosion führen kann. Nicht auszuschliessen ist auch die Anwesenheit geringer Mengen an Chloriden, die vom Anmachwasser oder Zusatzmitteln stammen könnten. Da der pastöse Mörtel an normal erhärtetes Füllgut anschliesst, kommt es in den Übergangszonen zusätzlich zu einer Makroelementbildung («Batterie»), was den Korrosionsfortschritt im Soft-Grout markant erhöht und schon nach kurzer Zeit zu Drahtbrüchen führen kann.

Es gibt Bestrebungen, einen Sensor zu entwickeln, mit dem man eine Aussage zur Qualität des Füllguts nach der Injektion treffen kann. Der drahtförmige Sensor könnte bei Entlüftungsröhrchen und an den Verankerungspunkten in den Spanngliedkanal eingeführt werden, wo er von Füllgut umspült wird und Daten zur Qualität des Frischmörtels und später des Festmörtels liefert. Es wird vermutet, dass hierzu Impedanzmessungen zielführend sein könnten. Dies müsste in einer separaten Forschungsarbeit genauer untersucht werden.

Der VCSensor (Abbildung 8) wird verwendet, um durch Messung in ausgewählten Querschnitten entlang eines Kabels bestätigen zu können, ob die Verankerung oder das Hüllrohr voll mit Zementmörtel gefüllt ist, und ob der Stahl durch das Injektionsgut passiviert wurde. Der Sensor wird vor dem Betonieren an potenziell kritischen Stellen des Kabels installiert. Er gibt an, ob die Alkalität unzureichend ist oder ob während der Injektion eine Chloridkontamination des Mörtels erfolgte. Darüber hinaus kann er das Vorhandensein von Blutwasser erkennen. Als Ergebnis bestätigt er das Vorhandensein von Mörtel mit ausreichenden alkalischen Eigenschaften an kritischen Stellen des Kabels und ermöglicht während der Installation eine direkte Qualitätskontrolle des im Kabel eingebauten Zementmörtels. Der VSL Grout Void Sensor ist patentrechtlich geschützt. Seine Effizienz wurde in Labortests, Tests an einem grossformatigen Modell und auf einem Brückenreparaturprojekt in England bestätigt.



Abbildung 8: VCsensor von VSL zur Qualitätsüberwachung des Füllguts, aus [15]

Aus den Forschungsprojekten zu Korrosionsschäden an Spanngliedern und gespannten Ankern im In- und Ausland [5], [21] konnten wertvolle Erkenntnisse über die Ursache und Art der Schäden sowie Schwachstellen von Spannsystemen gewonnen werden. Auch konnte gezeigt werden, an welchen Stellen von vorgespannten Brücken, Schrägseilbrücken oder Ankern mit einem erhöhten Risiko für Fehlstellen oder Korrosionsangriffen zu rechnen ist. Dieses Wissen kann auch für das vorliegende Forschungsprojekt genutzt werden, insbesondere für die Phase der Untersuchungen an Kunstbauten.

2.3 Bauwerke in der Schweiz mit Spanngliedern vom Typ b und c

Um einen Überblick über die in der Schweiz erstellten Bauwerke zu erhalten, die über Spannglieder des Typs b oder c verfügen, wurden Daten vom ASTRA und vom VSV (Verein Schweizerischer Vorspannfirmer) abgefragt.

Die Liste vom VSV enthielt 117 in der gesamten Schweiz erstellte Bauwerke. Die Liste vom ASTRA enthielt 23 Bauwerke. Teilweise waren Objekte auf beiden Listen vorhanden bzw. mussten die Listen auf Objekte, die definitiv Spannglieder des Typs b oder c enthielten, überprüft werden.

Aus den ca. 140 Bauwerken (siehe Anhang) wurden erst 40 und schliesslich 18 Kunstbauten (Tabelle 1) herausgefiltert, die für eine Untersuchung vor Ort in Frage kommen konnten. Wichtige Kriterien waren u.a. die Distanz von Wildegg bzw. vom Raum Zürich ans Objekt und die generelle Zugänglichkeit an die Spannglieder.

Infrage kommende Bauwerke mit Spanngliedern Typ b oder c			
Nr.	Name	Bauteil mit Vorspannung	Ort
1	Talbrücke Dättwil		Dättwil
2	Brücke FBZG Reuss Kt.Grenze AG/ZG	Vollwandträger	
3	Objekt Nr. 8.443 Rampenbrücke Wiese	Fahrbahnplatte, Hohlkasten	Basel
4	A2 Nordtangente, Abschnitt 4, Horburg Tunnel Rhein-Klybeck, Tunnel Horburg-West		Basel
5	Nordtangente Abschnitt 2 Tunnel St. Johann Mitte Haupttunnel		Basel
6	Brücke Wilddurchlass Henkelgiessen	Plattenbalken	Bilten
7	Brücke Anschluss Bilten + Linthkanal	Einzelstütze	Bilten
8	Rötibrücke		Solothurn
9	Brücke Städlerwald	Fahrbahnplatte	Cham
10	UEF Schulstrasse, Opfikon	Fahrbahnplatte, Steg	Opfikon
11	Brücke Sihlhochstrasse, Enge	Randborde	Zürich
12	Brücke B Glatt Süd, Verzweigung ZH Nord	Bodenanker	Opfikon
13	UEF Ottenbachstrasse	Fahrbahnplatte	Affoltern a.A.
14	UEF Dachlissen	Fahrbahnplatte	Mettmenstetten
15	UEF Obere Wangenstrasse	Mehrfacher Plattenbalken	Brütisellen
16	UEF Rampe Werft Richtung ZH Mitte	Fahrbahnplatte	Kloten
17	UEF Butzenbüelring Ost, Fracht	Platte	Kloten
18	Brücke Reppischtal	Fahrbahnplatte, Hohlkasten	Birmensdorf

Tabelle 1: Übersicht über die für vertiefte Untersuchungen infrage kommenden Bauwerke mit Spanngliedern vom Typ b oder c

3 Detektion von Hohlstellen in Spanngliedern

3.1 Allgemeines zur Detektion

Die TFB war in der Vergangenheit in die Beurteilung von Injektionsmängeln bei Windkraftanlagen im Ausland involviert. Bei diesem Projekt wurden ebenfalls Ultraschallechomessungen an realen Bauwerken (Windkrafttürmen) durchgeführt. Teilweise konnten mittels Ultraschallecho Injektionsmängel festgestellt werden.

Die Untersuchung des Verfüllungszustandes von Spannkälen mit Verfahren der ZfP ist in der Grundlagenforschung thematisiert worden [22]. Aufgrund der metallischen Beschaffenheit der Hüllrohre, und dem Detektionsziel «Luft» im Innern des Hüllrohres haben sich insbesondere solche Verfahren als prädestiniert gezeigt, welche auf der Nutzung elastischer Wellen basieren. Insbesondere sind dies das Ultraschallverfahren sowie das Impakt-Echo-Verfahren. Während Vorgehensweisen mit dem Impakt-Echo-Verfahren bereits in den 90er Jahren entwickelt wurden (Carino, 1992), zeigte sich die praktische Umsetzung als deutliche Herausforderung. Die ursprüngliche Literatur beschrieb insbesondere den Ansatz beruhend auf einer direkten Reflexion am Hüllrohr. Dabei wurde von einer Reflexion am weichen Ende im unverfüllten Zustand (Luft im Hüllrohrinnern, Verfüllfehler) bzw. Reflexion am festen Ende (Spannstahl im Hüllrohrinnern ohne Luft) im intakten Zustand ausgegangen. Dieser Ansatz war jedoch in vielen praktischen Fällen nicht zuverlässig und die theoretische Basis mitunter umstritten. Deutlich stabiler erweist sich hingegen die Beurteilung von Effekten in der dominanten Bauteilresonanz (Rückwandanzeige) (Wiggenhauser, 2005), (Olson, 2011). Diese zeigt an der Position des Hüllrohres eine Verringerung, die im unverfüllten Zustand stärker ausfällt als im intakten Zustand. Während die Nutzung dieses Effektes die derzeit empfohlene Vorgehensweise darstellt, [23] gilt sie weiterhin als herausfordernd und nicht gesichert. Es ist davon auszugehen, dass der Erfolg stark von den jeweiligen Randbedingungen abhängt. Deren systematische Untersuchung ist eine wichtige Voraussetzung für die Erzielung von Fortschritten in der praktischen Anwendbarkeit.

Die fortschreitende Entwicklung der Ultraschallprüfung hat dieses Verfahren zu einer wichtigen Option in der Injektionsfehlerdiagnostik werden lassen. So bestehen auf Basis trocken angekoppelter Transversalwellenprüfkopfspitzen sowohl Puls-Echo-Prüfköpfe als auch vollständige Full Matrix Capture (FMC)- bzw. Sampling Phased Array-Einheiten zur Verfügung. Zu den als am effektivsten geltenden Vorgehensweisen hinsichtlich der Detektion luftgefüllter (unverfüllte) Bereiche im Hüllrohrinnern gehört insbesondere die Phasenanalyse. Diese geht von einem Unterschied in der Phasenlage des am Spannkanaal reflektierten Impulses aus, wenn es sich im Hüllrohrinnern um eine Reflexion an Luft (unverfüllt) handelt, gegenüber der Reflexion an den Spannstahlritzen im intakten Falle. Während diese Vorgehensweise vor allem in Laborversuchen demonstriert werden konnte, haben auch praktische Anwendungen bereits

stattgefunden. Für eine gesicherte Anwendung ist eine systematische Studie, welche insbesondere wichtige Randbedingungen einbezieht, von hoher Relevanz.

Insbesondere bestehen mit der fortschreitenden Entwicklung der Künstlichen Intelligenz (KI) auf Basis von Machine Learning [24], [25] derzeit neue und wertvolle Möglichkeiten, auf Basis dieser Technologie einen erheblich grösseren Informationsgehalt aus aufgenommenen Daten zu extrahieren und zuverlässigere Diagnosen zu stellen.

3.2 Vorgehen der Forschungsstelle

3.2.1 Zerstörungsfreie Prüfverfahren

Die vorliegende Untersuchung fokussiert sich auf die hinsichtlich der Problemstellung zentralen ZfP-Verfahren [26], [27], [28], [29]. Im Mittelpunkt stehen somit Ansätze, die auf der Ausbreitung elastischer Wellen basieren, wie Ultraschallprüftechniken und das Impakt-Echo-Verfahren.

Charakteristisch für diese Verfahren ist ihre Sensitivität gegenüber Unterschieden in der akustischen Impedanz Z an Materialgrenzflächen. Die Intensität der Reflexion elastischer Transversalwellen ergibt sich aus dem Impedanzkontrast ΔZ an der jeweiligen Grenzfläche (1).

$$R = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad \begin{array}{l} R: \quad \text{reflektierter Anteil} \\ Z_1: \quad \text{Akustische Impedanz Medium} \\ \quad \quad \text{vor der Grenzfläche} \\ Z_2: \quad \text{Akustische Impedanz Medium} \\ \quad \quad \text{hinter der Grenzfläche} \end{array} \quad (1)$$

Hinsichtlich der Beurteilung des Verfüllungszustandes sind folgende Grenzflächen relevant:

bei vollständiger Injektion:

- Beton/Kunststoffrohr,
- Kunststoffrohr/Füllgut,
- Füllgut/Stahllitzenbündel;

bei fehlender oder unvollständiger Injektion:

- Beton/Kunststoffrohr,
- Kunststoffrohr/Luft.

Die Tabelle 2 fasst Anhaltswerte der diesbezüglich relevanten Impedanzen Z zusammen.

Akustische Impedanzen			
Material	Dichte (kg/m³)	Schallgeschwindigkeit (m/s)	Akustische Impedanz Z (kg/(m²×s))
Luft	1.3	330	429
Beton	2400	4000	9.6
Stahl	7850	5920	46.5
Kunststoff	1000	2300	2.3

Tabelle 2: Anhaltswerte der akustischen Impedanzen Z hinsichtlich der Ermittlung des Injektionszustandes relevanter Medien.

Daraus ergibt sich ein maximaler Impedanzunterschied zwischen Beton und Luft mit einem reflektierten Anteil von $R \approx 100\%$. Es ist ausserdem festzustellen, dass an der Grenzfläche Beton/Kunststoff eine Reflexion mit $R = 61\%$ und an der Grenzfläche Beton/Stahl eine Reflexion mit $R = -66\%$ auftritt. Dies hat Bedeutung für die Überlegungen zur Prüfbarkeit eines Spannkanales mit Kunststoffhüllrohr im Vergleich zu einem Hüllrohr aus Stahl. Die Reflektivität liegt betragsmässig in einem ähnlichen Bereich. Der Unterschied in den Vorzeichen weist auf eine abweichende Phasenlage hin. Im nachfolgenden Abschnitt werden die aufgeführten Verfahren und Prüftechniken erläutert.

3.2.2 Ultraschallprüfverfahren

Aus der vorliegenden Prüfaufgabe ergibt sich die Anwendung des Ultraschallverfahrens Puls-Echo-Anordnung bzw. als Array-Technik (Full Matrix Capture (FMC)) [30] [31], [32]. Der Begriff Puls-Echo bezeichnet zunächst, dass Sender und Empfänger auf der gleichen Oberfläche des Prüfobjektes angeordnet sind und die diesbezügliche zeitliche Erfassung elastischer Wellenimpulse [33]. Es können hierbei sowohl Longitudinal- als auch Transversalwellen zur Anwendung kommen. Moderne Systeme nutzen trocken angekoppelte Transversalwellen-Punktkontaktprüfköpfe, die sowohl blockweise zu Sende- und Empfangsgruppen parallelgeschaltet in reiner Sender-Empfänger-Konfiguration als auch innerhalb sequenzieller FMC-Sendefolge betrieben werden können [34].

Generell beinhaltet eine Puls-Echo-Prüftechnik die Messung der Laufzeit eines elastischen Wellenpulses zwischen Aussendung und Detektion, typischerweise unter Einsatz horizontal polarisierter Transversalwellen [31]. Anders als konventionelle, mit Kopplungsmedium betriebene Prüfköpfe finden zunehmend trocken angekoppelte Transversalwellen-Punktkontaktprüfköpfe Verwendung.

Im Fokus der Untersuchung steht der Einsatz der Array-Prüftechniken. Die Abbildung 9 illustriert das Prinzip der FMC-Datenerfassung (links) sowie die in dieser Studie verwendeten Gerätetypen. Es erfolgt eine schrittweise Pulsaussendung durch unterschiedliche Reihen, während die übrigen Elemente jeweils empfangen. Dadurch wird eine Vielzahl an Schallwegen generiert, welche die Grundlage für eine bildgebende Rekonstruktion von Reflektoren im diskretisierten Volumen bietet, üblicherweise als Total Focusing Method (TFM) oder auch Sampling-Phased-Array bezeichnet. Im Zusammenhang mit der FMC-Datenerfassung sind somit die spezifischen TFM-Algorithmen

und deren Implementierungen von Bedeutung. Für diese Studie kamen die Softwarelösungen Echolyst sowie ergänzend MiraNeo zum Einsatz. Abbildung 10 zeigt exemplarisch die Benutzeroberfläche von Echolyst.

Durch die Kombination von FMC und TFM ergeben sich weitreichende Einsatzmöglichkeiten des Ultraschallverfahrens insbesondere für die Diagnostik und Strukturanalyse von Betongefügen [32].

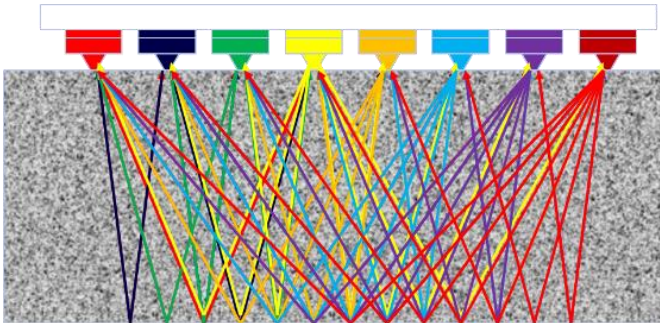


Abbildung 9: Ultraschall-Arrayprüftechnik gemäss Full Matrix Capture (FMC) und Total Focussing Method (TFM). FMC-Prinzip der Datenerfassung, Bild: Screeningeagle.

In dieser Studie kamen zwei verschiedene Systeme für die Ultraschallprüfung zum Einsatz.

3.2.2.1 Ultraschall – System-1

Dieses System basiert auf dem Gerät Pundit 250 Array, das nach dem Prinzip der Full Matrix Capture (FMC)-Datenerfassung arbeitet. Das System verfügt über insgesamt 24 Prüfkopfspitzen, die in Form eines Rasters aus 8 Spalten und 3 Reihen angeordnet sind. Alle Prüfkopfspitzen einer Spalte bilden jeweils eine Gruppe, sodass sich ein lineares Array mit 8 Gruppen ergibt. Die Mittenfrequenz des Systems beträgt 50 kHz. Die Datenaufnahme erfolgt über ein Tablet (iPad), welches bereits grundlegende Visualisierungsfunktionen bereitstellt. Die Erfassung selbst wird als Linienscan durchgeführt, wobei jede Messlinie eines Rasters einem einzelnen Linienscan entspricht.

Die aufgezeichneten Daten werden anschliessend exportiert und in die Software Echolyst eingelesen. Dort werden die einzelnen Linienscans zu einem vollständigen Messraster zusammengeführt. Insbesondere wird in Echolyst die Rekonstruktion auf Basis des Total Focusing Method (TFM)-Algorithmus durchgeführt. Für die Analyse stehen verschiedene Visualisierungstechniken zur Verfügung, darunter Tiefenprofile, B-, C- und D-Projektionsbilder sowie die Überlagerung der Ergebnisbilder mit fotografischen Aufnahmen oder weiteren Referenzdarstellungen.



Abbildung 10: Ultraschall-System-1 bestehend aus Gerät Pundit 250 Pro Array (links) und Analysesoftware ECHOLYST (rechts).

3.2.2.2 Ultraschall-System-2

Als zweites Ultraschallsystem kam das in Abbildung 11 gezeigte MIRA 3D Pro der Firma ACS gemeinsam mit der Software Mira-Neo für die Datenanalyse zum Einsatz. Das Gerät verfügt über ein Array von insgesamt 64 Prüfkopfspitzen, angeordnet in einer Matrix von 16×4 Elementen. Während das System prinzipiell auch im Matrixmodus betrieben werden kann, wurde es im Rahmen dieser Studie im bewährten Linearmodus eingesetzt, da sich dieser insbesondere für die Lokalisierung länglicher Objekte wie Spannglieder eignet. In diesem Modus werden jeweils vier benachbarte Prüfkopfspitzen in Querrichtung zusammengeschaltet, sodass sich ein lineares Array aus zwölf Gruppen ergibt.

Die Datenaufnahme erfolgte entlang definierter Messlinien, wobei jeder Linearscan den Verlauf einer Messlinie abbildet. Die einzelnen Scans wurden in der Software Mira Neo verarbeitet, die Visualisierungen in B-, C- und D-Bildprojektionen ermöglicht.

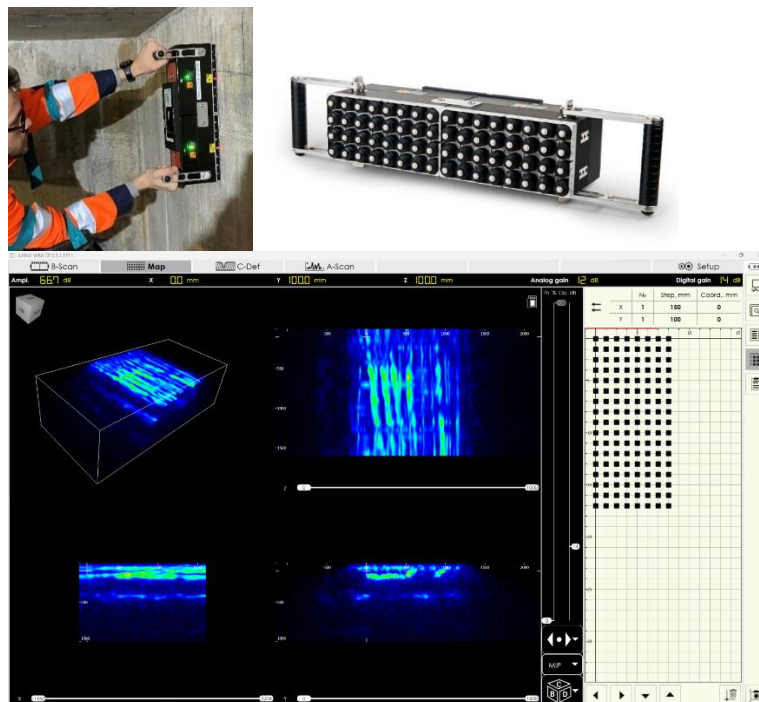


Abbildung 11: Ultraschall-System-2 bestehend aus Gerät MIRA 3D Pro (oben) und Analysesoftware Mira Neo (unten).

3.2.3 Impakt-Echo

Weiter wird das Impakt-Echo-Verfahren herangezogen, welches ebenfalls auf elastischen Wellen basiert [35], [36], [37]. Das Verfahren beruht auf der Analyse mechanisch angeregter elastischer Wellen im Frequenzbereich [35]. Die Anregung erfolgt durch einen mechanischen Impuls, klassischerweise eine kleine Stahlkugel (ca. 10 mm), die impulsartig auf das Bauteil geschlagen wird [38]. Ein nahe der Anregung platzierter Sensor registriert resultierende Auslenkungen bzw. Beschleunigungen der Bauteiloberfläche (Abbildung 12). Gebräuchlich kommen hierbei piezoelektrische Beschleunigungssensoren zur Anwendung [39].

Durch die Fast-Fourier-Transformation [40] des Zeitsignals in den Frequenzbereich wird die Schichtdickenresonanz, welche die Grundlage für das Verfahren darstellt, anhand dominanter Amplituden identifiziert. Eine einfache Beziehung überführt die gemessene Schichtdickenresonanz f in eine Schichtdicke d anhand der Schallausbreitungsgeschwindigkeit c_p elastischer Longitudinalwellen (2):

$$d = c_p / 2f \quad c_p: \text{ Longitudinalwellengeschwindigkeit} \quad (2)$$

$$f: \text{ Resonanzfrequenz}$$

Obwohl die Anwendung gemäss (2) einem augenscheinlich einfachen Zusammenhang folgt, gestaltet sich die Interpretation in der Praxis häufig komplexer, da die angestrebte Dickenresonanz f durch weitere Effekte bzw. Resonanzen überlagert werden kann [37]. Besonders hervorzuheben sind Geometrieeffekte, d.h. Randeinflüsse infolge von Reflexionen der Oberflächenwellen an den seitlichen Begrenzungen des Bauteils [41].

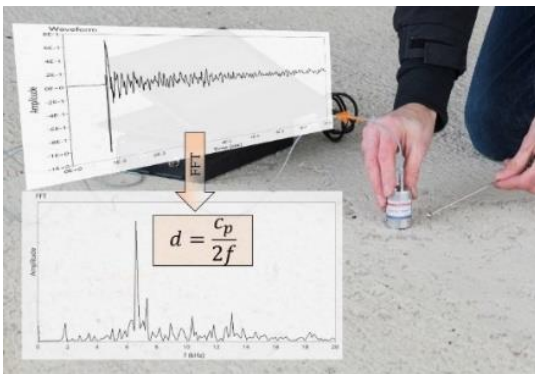


Abbildung 12: Messprinzip des Impakt-Echo-Verfahrens.

Die Analyse des Verfüllzustandes von Spanngliedern mittels Impakt-Echo-Verfahren basiert auf verschiedenen und in gewissen Teilen sich ergänzenden physikalischen Prinzipien. Im Rahmen der ursprünglich angenommenen Theorie wird davon ausgegangen, dass sich die stehende Welle am losen Ende bei einem unverfüllten Spannglied und am festen Ende im verfüllten Zustand dementsprechend unterschiedlich ausprägt. So gelten im Fall eines unverfüllten Spannglieds vergleichbare Bedingungen wie bei der Messung der Bauteildicke, wie in (2) dargestellt. Für den verfüllten Spannglied hingegen entspricht bei einer stehenden Welle am festen Ende die Wellenlänge dem Vierfachen der Schichtdicke oberhalb des Spannglieds. Daraus resultiert für einen

Spannkanal in einer Tiefe d (Schichtdicke d oberhalb des Kanals) eine Frequenz gemäss (3) (Grenzschicht zu Stahl) beziehungsweise für den unverfüllten Fall eine Frequenz gemäss (4) (Grenzschicht zu Luft).

$$f_{steel} = \frac{0.96 c_p}{4d} \quad (3)$$

$$f_{Air} = \frac{0.96 c_p}{2d} \quad (4)$$

Obwohl Studien existieren, die dieses Prinzip unterstützen, ist in der Praxis häufig umstritten, ob sich ein Zustand gemäss (3) und insbesondere dessen Unterscheidung zu dem in (4) beschriebenen Zustand zuverlässig erwarten lässt und als belastbares Kriterium verwendet werden kann [42]. Ein weiterer Effekt ist oft deutlicher ausgeprägt: Die Resonanzfrequenz, die knapp unterhalb der Bauteildicke an Messstellen oberhalb des Spannkanals liegt. Dieser Effekt tritt grundsätzlich auch dann auf, wenn die Verfüllung vollständig ist. Bei fehlender Verfüllung verstärkt sich dieser Effekt, das heisst, die gemessene dominante Frequenz liegt bei fehlender Verfüllung unterhalb jener bei vollständiger Verfüllung.

Die Anwendung dieses Effekts beziehungsweise Prinzips erweist sich in der Praxis als zuverlässiger als das Vorgehen nach (3) und (4); dennoch handelt es sich eher um ein relatives als um ein quantitativ exakt messbares Kriterium. Dies erschwert die Umsetzung und verringert die Praktikabilität.

3.2.3.1 Beschreibung des Messsystems

Das Impakt-Echo-Verfahren kam in dieser Studie unter Einsatz des nachfolgend beschriebenen Systems zur Anwendung (Abbildung 13). Die Datenaufnahme erfolgte manuell mit einem Sensor Mark IV der Firma *Germann Instruments* sowie einer manuellen Impaktanregung mittels Kugelimpaktor mit einem Kugeldurchmesser von in der Regel 10 mm.

Die Signalerfassung wurde mit der Software Echolyst des SVTI durchgeführt, betrieben auf einem Notebook-PC. Die Digitalisierung der Signale erfolgte über eine externe Oszilloskopkarte der Firma NI, mit einer Abtastrate von 250 kHz, entsprechend einem zeitlichen Abtastintervall von 4 μ s.

Die Messungen wurden üblicherweise entlang definierter Messraster durchgeführt, gemäss der Konvention der Echolyst-Software. Für die Auswertung kam das Analysemodul ProAnalysis von Echolyst zur Anwendung. Hierbei wurden die Daten mithilfe etablierter Visualisierungstechniken interpretiert, darunter Tiefenprofile, B-, C- und D-Schnittbilder sowie Überlagerungen mit fotografischen Aufnahmen und weiteren Plänen oder Zeichnungen.

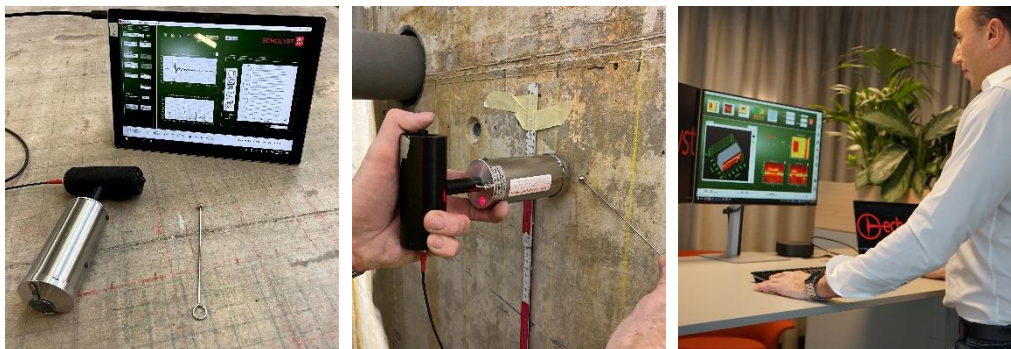


Abbildung 13: Impakt-Echo-System bestehend aus Sensor (Germann Instruments) und Echolyst Software (SVTI).

Während die genannten Methoden an Hüllrohren aus Stahlblech getestet wurden, liegen nur wenige Erfahrungen im Hinblick auf deren Anwendung an Spannkänen mit Hüllrohren aus Kunststoff vor. Aus diesem Grund sind die Untersuchungen in der vorliegenden Studie von besonderer Relevanz.

3.2.4 Radar

Das Radarverfahren (Ground Penetrating Radar, GPR) gehört zu den zentralen Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung von Betonbauteilen. Es basiert auf der Aussendung elektromagnetischer Impulse im Hochfrequenzbereich und der Erfassung der an Materialgrenzen reflektierten Signale. Die Laufzeit und Amplitude dieser Reflexionen werden ausgewertet, um Rückschlüsse auf die innere Struktur des Bauteils zu ziehen.

Als elektromagnetisches Verfahren ist Radar insbesondere sensitiv gegenüber Kontrasten der dielektrischen Permittivität sowie der elektrischen Leitfähigkeit. Dies bedeutet, dass das Verfahren eine sehr hohe Empfindlichkeit gegenüber metallischen Einlagen (z. B. Bewehrungsstäbe, Spannglieder, metallische Hüllrohre) besitzt, die starke Reflexionen erzeugen. Demgegenüber ist die Detektion von luftgefüllten Hohlräumen oder Kavitäten deutlich schwieriger, da Luft im Vergleich zum Beton nur einen geringen dielektrischen Kontrast erzeugt. Solche Inhomogenitäten werden im Radarbild oft weniger deutlich oder indirekt abgebildet.

Die erzielbare Auflösung und Eindringtiefe sind massgeblich von der eingesetzten Antennenfrequenz abhängig: Antennen mit höheren Frequenzen (z. B. 2–3 GHz) liefern eine hohe Detailauflösung für oberflächennahe Strukturen, während niedrigere Frequenzen (z. B. 1 GHz) eine grössere Eindringtiefe ermöglichen, jedoch auf Kosten der Auflösung. Für die Untersuchung von Spannkänen haben sich Frequenzen im Bereich von 1,5–3 GHz als optimal erwiesen, da sie eine gute Balance zwischen Tiefenerfassung und Auflösung bieten.

Neben klassischen Radargrammen aus Linienabtastungen können durch Rastermessungen auch C-Bild-Darstellungen erzeugt werden, die eine flächenhafte Abbildung des inneren Gefüges ermöglichen. Moderne Systeme erlauben zudem eine dreidimensionale Rekonstruktion, bei der Spannglieder im Kontext der Bewehrungslagen visualisiert werden können.

Das Verfahren zeichnet sich durch eine hohe Messgeschwindigkeit aus, wodurch sich grosse Bauteilflächen effizient erfassen lassen. So dient das Verfahren in dieser Studie primär der Vorbereitung und Orientierung für die Verfahren Ultraschall und Impakt-Echo im Sinne einer initialen Lokalisierung der Spannglieder an den jeweiligen Messstellen der Bauwerke.

Es kommen hier zwei Radarsysteme zum Einsatz, die im Folgenden beschrieben werden.

3.2.4.1 Radar-System-1

Als Radarsystem-1 kam ein Gerät der Firma GSSI (Geophysical Survey Systems, Inc.) zum Einsatz, bestehend aus einer Palm-Antenne in Kombination mit der Auswerteeinheit SIR-3000 (Abbildung 14). Es handelt sich dabei um ein klassisches Impulsradarsystem (GPR). Die Palm-Antenne arbeitet mit einer zentralen Betriebsfrequenz von etwa 2,6 GHz und ermöglicht dadurch eine Erfassung oberflächennaher Strukturen, insbesondere der Bewehrungslagen. In Verbindung mit der SIR-3000-Einheit erfolgt eine Aufzeichnung der Radargramme, die anschliessend weiterverarbeitet und visualisiert werden können.

Die Datenerfassung wurde entlang definierter vertikaler Messlinien durchgeführt. Ziel war es, die Positionen der Spannglieder zuverlässig zu lokalisieren und diese unmittelbar an der Bauteiloberfläche zu markieren.

Im Rahmen dieser Studie diente das System somit in erster Linie der vorbereitenden Untersuchung für die nachfolgenden Ultraschall- und Impakt-Echo-Messungen.



Abbildung 14: Radar-System-1 bestehend aus Datenerfassungseinheit SIR 3000 und Palm-Antenne der Firma GSSI.

3.2.4.2 Radar-System-2

Als zweites Radarsystem kam das GP8100 der Firma *Proceq ScreeningEagle* zum Einsatz. Das Gerät arbeitet mit einer integrierten Dualantennen-Anordnung bei einer Mittelfrequenz von rund 2 GHz. Dadurch wird eine hohe Auflösung bei gleichzeitig ausreichender Eindringtiefe erzielt, die es erlaubt, sowohl oberflächennahe Bewehrungselemente als auch tieferliegende Spannglieder zuverlässig zu erfassen (Abbildung 15).

Die Datenerfassung erfolgt auf einem Tablet (Ipad) mit der zugehörigen Software-App, die eine Echtzeitdarstellung der Radargramme ermöglicht und zusätzlich Werkzeuge zur weiterführenden Rekonstruktion und Visualisierung bereitstellt. So lassen sich die Spannkanaäle lokalisieren und im Gesamtzusammenhang mit der vorhandenen Bewehrung abbilden.



Abbildung 15: Radar-System-2 bestehend aus GP8100-Gerät und zugehöriger Software-App (iPad) der Firma Screening Eagle.

3.2.5 Visualisierungstechniken

Für die Auswertung experimenteller Daten aus der zerstörungsfreien Prüfung stehen verschiedene Visualisierungstechniken zur Verfügung. Unabhängig vom zugrunde liegenden Verfahren, etwa Ultraschall mit konventioneller Laufzeittechnik, Array-Prüftechnik oder Impakt-Echo, basieren diese Darstellungsformen auf der systematischen Erfassung von Signalen entlang von Messrastern und der Ableitung räumlicher Informationen aus Laufzeiten (Ultraschall und Radar) bzw. Frequenzen (Impakt-Echo) sowie Amplituden. Die Darstellungsformen gemäss Abbildung 16 sind nachfolgend erklärt. Sie dienen dazu, innere Strukturen, Materialinhomogenitäten und potenzielle Fehlstellen sichtbar zu machen und erlauben eine gezielte qualitative sowie quantitative Analyse der Messdaten.

Als Ausgangspunkt dient jeweils ein einzelnes Zeitbereichssignal, das die Antwort des Mediums auf eine punktuelle oder lokalisierte Anregung wiedergibt. Dieses wird als A-Bild bezeichnet und kann ein Ultraschallsignal oder das FFT-Amplitudenspektrum eines Impakt-Echo-Signals sein. Die Tiefe oder Entfernung reflektierender oder streuender Strukturen ergibt sich aus der Laufzeit (Ultraschall und Radar) bzw. Frequenz (Impakt-Echo) mit bekannter oder kalibrierter Ausbreitungsgeschwindigkeit.

Durch das Erfassen solcher Einzelsignale entlang vorgegebener Linien, Raster oder Flächen entstehen Datensätze, aus denen zweidimensionale und dreidimensionale Bildrepräsentationen gewonnen werden können. Die drei zentralen Darstellungsformen sind B-Bilder, C-Bilder und D-Bilder.

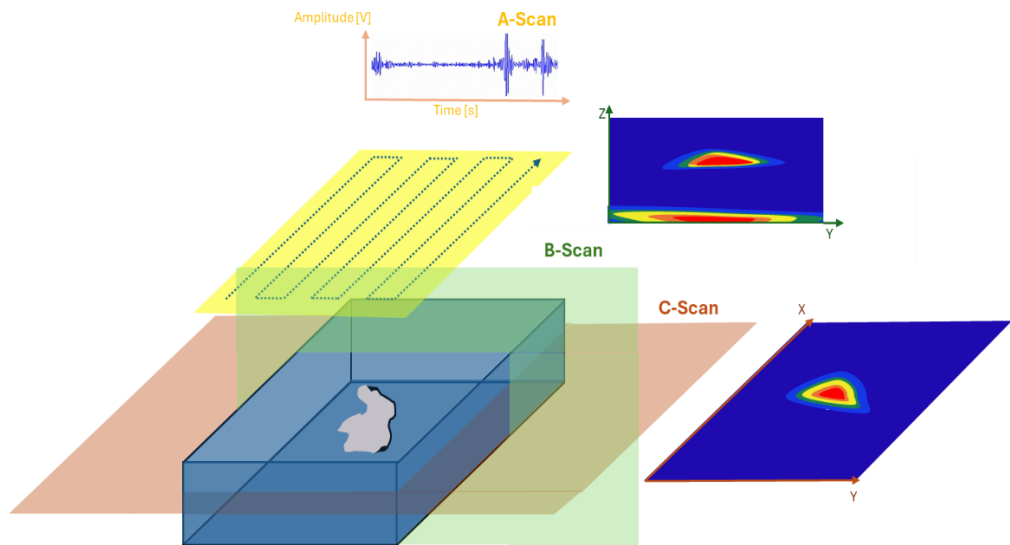


Abbildung 16: Grundlegende Visualisierung von Daten zerstörungsfreier Prüfungen anhand von A-, B- und C-Bildern (Scans).

3.2.5.1 B-Bilddarstellung

Das B-Bild stellt einen zweidimensionalen Schnitt durch das Bauteil oder die untersuchte Struktur dar. Es entsteht, indem entlang einer Linie oder eines schmalen Sektors die darin enthaltenen Einzelsignale hinsichtlich ihrer Laufzeit bzw. Frequenz und Amplitude ausgewertet werden.

Die horizontale Achse beschreibt dabei die Messposition entlang der Oberfläche. Die vertikale Achse repräsentiert die Tiefe entsprechend Laufzeit bzw. Frequenz. Die Intensität von Reflexionen oder Streuungen wird gemäss einer Farbskala codiert. Das B-Bild bildet somit einen Schnitt ähnlich einer tomographischen Queransicht und eignet sich für die Detektion lokaler Störungen entlang einer Linie.

B-Bilder ermöglichen eine präzise Einschätzung der Tiefenlage von Strukturen.

3.2.5.2 C-Bilddarstellung

Das C-Bild zeigt die laterale Ausdehnung von Strukturen in einer gewählten Tiefenlage. Diese Darstellung entsteht durch die Auswertung amplitudenspezifischer Merkmale in einem definierten Zeit- bzw. Frequenzfenster.

Die x- und y-Achsen bilden die Abtastfläche auf dem Bauteil ab. Für jede Position wird ein Wert aus dem Zeitbereichssignal extrahiert, häufig die maximale Amplitude oder eine charakteristische Größe innerhalb eines interessierenden Tiefenfensters.

Die Tiefe selbst wird nicht direkt dargestellt, sondern indirekt über die Wahl der Laufzeit- bzw. Frequenzbereiche. C-Bilder sind somit hilfreich für die flächige Identifikation von Strukturen.

3.2.5.3 Tiefenprofildarstellung

Diese Darstellung stellt eine volumetrische Erweiterung des C-Bildes dar. Es besteht aus einer Folge von C-Bildern, die über unterschiedliche Laufzeitfenster oder rekonstruierte Tiefenebenen erstellt werden. Dadurch kann die räumliche Verteilung von Strukturen innerhalb eines relevanten Volumens analysiert werden.

Die Darstellung entsteht dadurch, dass je Messposition bzw. x-/y-Koordinate die Tiefe (Laufzeit/Frequenz) geplottet wird, an welcher die maximale Amplitude auftritt.

Zusammenfassend ergänzen sich die genannten Darstellungsarten. B-Bilder erlauben schnittartige Einblicke und dienen der Tiefenanalyse. C-Bilder zeigen die laterale Verteilung von Auffälligkeiten. Tiefenprofile vermitteln ein volumetrisches Verständnis von Strukturen. Im Rahmen der folgenden Auswertungen werden diese Bildtypen angewendet, um Messdaten zu interpretieren und Aussagen über potenzielle Anomalien innerhalb der untersuchten Strukturen abzuleiten.

3.2.6 Laborprüfkörper

Auf Grundlage dieser Überlegungen wurden zwei Prüfkörper ("Prüfkörper Uno" und "Prüfkörper Dos") mit jeweils 3 enthaltenen Spanngliedern hergestellt. Die Spannglieder unterschieden sich dabei im Material des Hüllrohrs (Metall oder Kunststoff), dem Grad der Verfüllung und der Lage der Längsachse im Betonkörper (Abbildung 17).

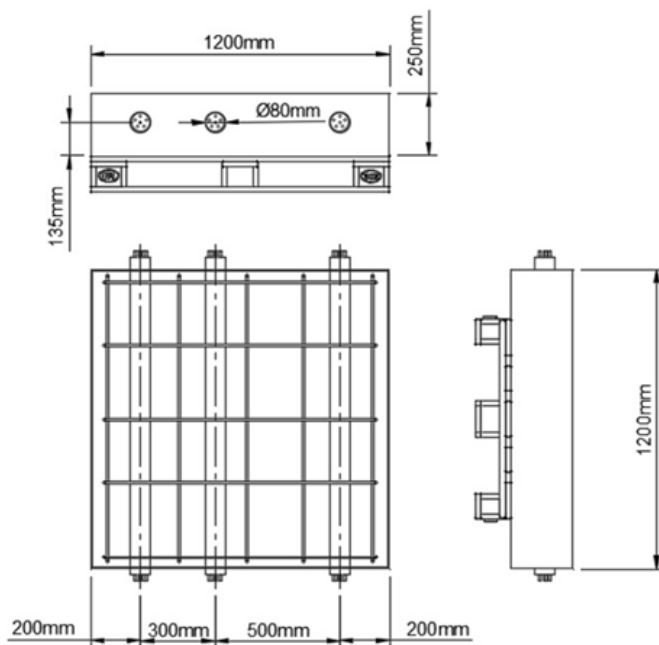


Abbildung 17: Schema der Prüfkörper.

Im Prüfkörper Uno waren ein metallisches und zwei kunststoffbasierte Hüllrohre verbaut. Sowohl das Metallhüllrohr als auch das unmittelbar benachbarte Kunststoffhüllrohr waren jeweils nur über die halbe Länge mit Injektionsgut gefüllt, während die restliche Hälfte unverfüllt blieb (Abbildung 18).

Im dritten Kunststoffhüllrohr wurde ein graduell abnehmender Füllstand realisiert. Dieser Verlauf entspricht der Situation eines schräg ansteigenden Hüllrohres, in dem das flüssige Injektionsgut einen Spiegel ausbildet, der aufgrund der Schwerkraft stets horizontal orientiert ist. Steigt das Hüllrohr an, so erscheint dieser Spiegel im Rohrquerschnitt folglich schräg, was zu einer kontinuierlich variierenden Füllhöhe entlang der Rohrlängsachse führt.

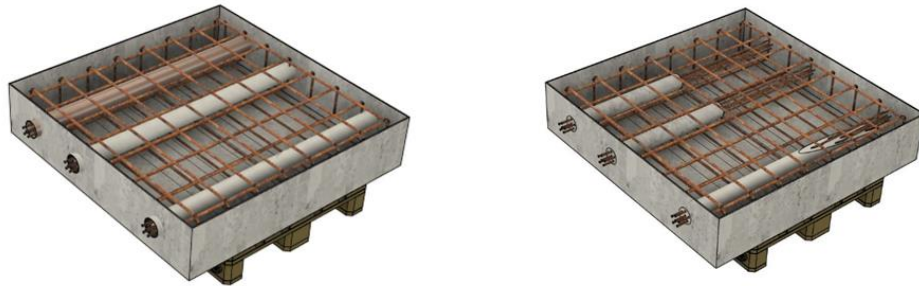


Abbildung 18: Darstellung von Prüfkörper Uno. Links: Darstellung der Hüllrohre (Metall/Kunststoff). Rechts: Darstellung des Hüllrohrrinnens.

Im «Prüfkörper Dos» wurden nur Kunststoffhüllrohre verbaut, die jeweils teilweise verfüllt waren. Ein Hüllrohr verlief mit einer schrägen Achse im Beton, also einer veränderlichen Betondeckung und ein Hüllrohr befand sich ausserhalb des schlaffen Bewehrungskorbes (Abbildung 19).

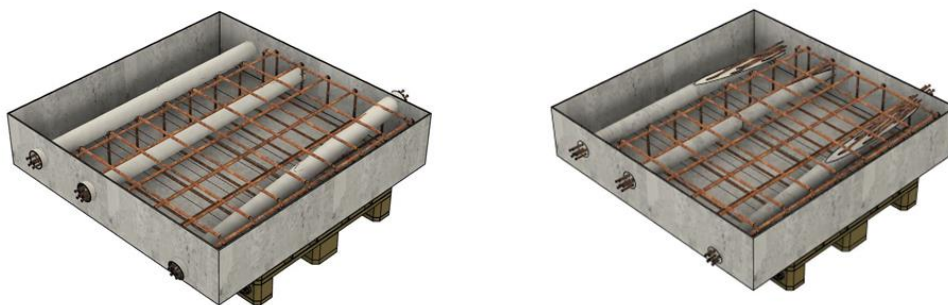


Abbildung 19: Darstellung von Prüfkörper Dos. Links: Darstellung der Hüllrohre (Metall/Kunststoff). Rechts: Darstellung des Hüllrohrrinnens.

Beim Beton handelte es sich um eine Standardmischung der TFB AG mit einem CEM II Zement, einem w/z-Wert von 0.55, einem Grösstkorn von 32 mm und einem Ausbreitmass von 380 mm (ohne Verwendung von Fließmittel). Die Abmessungen der Prüfkörper betragen jeweils in der Länge und Breite 120 cm und in der Höhe 25 cm. Die Spannglieder wurden als bereits verfüllte Hüllrohre von der Stahlton AG bezogen und von der TFB AG in die Schalung eingebaut (Abbildung 20).



Abbildung 20: Schalung der Prüfkörper Uno (links) und Dos (rechts) mit Bewehrung und Spanngliedern.

Nach dem Betonieren und Aushärten wurden die Prüfkörper mit Achsen beschriftet, um die Messungen mit den verschiedenen ZfP-Verfahren zu ermöglichen. Als Messraster wurde ein Abstand von 2 x 2 cm gewählt (Abbildung 21).



Abbildung 21: Prüfkörper Uno (links) und Dos (rechts) mit angezeichneten Messrastern von 2 x 2 cm.

Im Folgenden sind die Messungen und Ergebnisse beschrieben. Grundsätzlich wurden Messungen von beiden Prüfkörperseiten durchgeführt. Für eine gute Vergleichbarkeit werden Resultate unter anderem auch als Überlagerung mit der Prüfkörperabbildung dargestellt. Für eine gute Vergleichbarkeit sind diese Resultate jeweils auf die Ansicht der Vorderseite projiziert dargestellt, auch wenn die Messung von der Rückseite erfolgte. Die Orientierung zeigt die nachfolgende Abbildung 22.

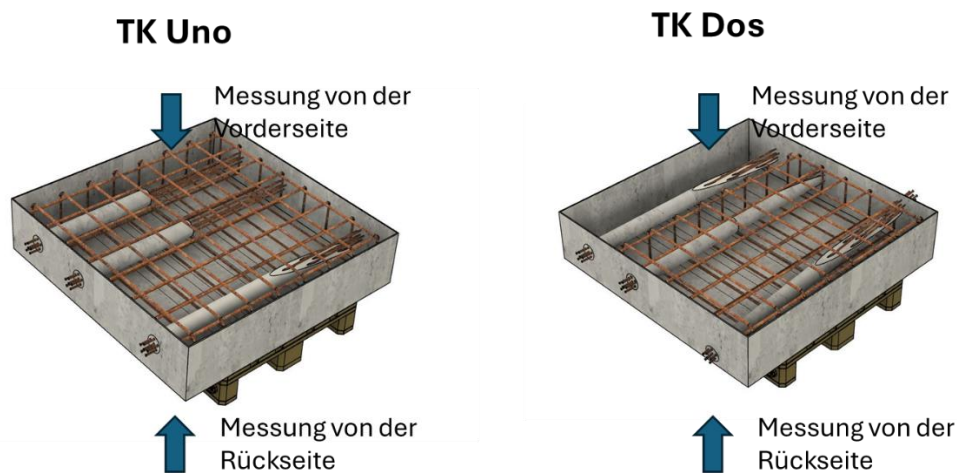


Abbildung 22: Orientierung von Vorder- und Rückseite der Prüfkörper Uno (links) und Dos (rechts).

3.2.7 Vorgehensweise zu Datenaufnahme und -analyse an den Laborprüfkörpern

3.2.7.1 Impakt-Echo – Vorgehensweise zur Datenaufnahme und -analyse

Die Impakt-Echo-Messungen wurden an beiden Prüfkörpern systematisch und reproduzierbar von jeweils beiden Seiten durchgeführt. Hierfür kamen definierte Messraster zum Einsatz, die aus Messlinien bestanden, welche die Spannkannallängsachsen senkrecht kreuzten, sowie aus entlang dieser Linien angeordneten Messpunkten. Die

Messpunkte waren in Abständen von 2 cm positioniert, während die aufeinanderfolgenden Messlinien einen Abstand von 5 cm aufwiesen.

Diese Geometrie gewährleistete eine hinreichende räumliche Auflösung, um Kontrastunterschiede zwischen Bereichen mit und ohne Hüllrohre zuverlässig zu detektieren. Durch die anschließende Anwendung einer Medianfilterung konnte der Einfluss einzelner Ausreisser reduziert und somit die Robustheit der Auswertung erhöht werden. Der Impakt-Echo-Sensor wurde präzise an den jeweiligen Messpunkten positioniert, wobei die Anregung manuell mittels einer Stahlkugel von 10 mm Durchmesser erfolgte. Die Aufschlagposition war um etwa 5 cm in y-Richtung gegenüber dem Messpunkt versetzt, entsprechend der Richtung der Spannkanaalachsen. Die Datenerfassung erfolgte mit einer Abtastfrequenz von 250 kHz; die Signallänge betrug 2048 Abtastwerte, entsprechend einer Zeitdauer von 8.192 ms. Sofern nicht anders angegeben, wurde auf eine Fensterung im Zeitbereich verzichtet, sodass die vollständige Signallänge in die Berechnung der Fourier-Transformation einging.

Die Auswertung der Messergebnisse umfasst zwei komplementäre Darstellungsformen. Zum einen wurden Profilbilder erzeugt, welche die dominierende Frequenz im jeweiligen Messbereich sowie die daraus abgeleitete Tiefe gemäss Gleichung (3) abbilden. Die Farbskala repräsentiert hierbei wahlweise die Frequenz- oder Tiefenwerte und ermöglicht eine intuitive Übersichtsdarstellung, berücksichtigt jedoch ausschliesslich die Frequenz mit maximaler Amplitude. Ergänzend dazu wurden B-, C- und D-Bilder berechnet, die das vollständige Amplitudenspektrum wiedergeben und somit eine detaillierte Analyse der spektralen Signatur erlauben.

3.2.7.2 Ultraschall – Vorgehensweise zur Datenaufnahme und -analyse

Die Ultraschalluntersuchungen wurden mit dem System Pundit Live Array Pro im Linienmodus durchgeführt. Die entlang der Messlinien aufgenommenen Rohdaten wurden in die Auswertesoftware *Echolyst* importiert, wo die Rekonstruktion der Bilddaten erfolgte. Dabei entstanden zweidimensionale Rekonstruktionen entlang der jeweiligen Messlinien mit einer Diskretisierung sowohl in x- als auch in z-Richtung (Linien- und Tiefenachse). Durch die parallele Anordnung der Messlinien konnte eine zusätzliche Dimension entlang der y-Achse erschlossen werden, wodurch ein dreidimensionales Volumenmodell des untersuchten Bereichs generiert wurde.

Während der Messung war das Messgerät stets längs zur jeweiligen Linie ausgerichtet. Die Messpositionen entlang einer Linie waren in einem Abstand von 100 mm zueinander angeordnet, während der Abstand zwischen den parallel geführten Linien 5 cm betrug. Diese systematische Anordnung ermöglichte eine hochaufgelöste volumetrische Erfassung des Prüfkörpers, welche die Grundlage für die nachfolgende Bildanalyse bildete.

3.2.8 Ergebnisse der Messungen an den Laborprüfkörpern

3.2.8.1 Prüfkörper Uno – Messung von der Vorderseite – Impakt-Echo

Bei der Untersuchung der Vorderseite des Prüfkörpers Uno zeigen die Impakt-Echo-Messungen ein klar differenziertes Bild der inneren Struktur. Die Spannkanaäle 1-M, 2-K und 3-K liegen in identischer Tiefe und weisen unterschiedliche Verfüllcharakteristika auf. Während die Spannkanaäle 1-M und 2-K jeweils zur Hälfte verfüllt und zur Hälfte leer ausgebildet sind, zeigt der Spannkanaal 3-K einen Verlauf mit graduell abnehmender Verfüllung. In der Messanordnung war der unverfüllte Abschnitt des Spannkanaals 3-K jeweils der Messoberfläche zugewandt.

Im Profilplot (Abbildung 23) treten die Spannkäle 1-M und 2-K als deutlich abgegrenzte Zonen reduzierter dominanter Frequenz in Erscheinung. Dieses Muster entspricht dem typischen Bild einer Rückwandverschiebung infolge eines akustischen Übergangs. Im Bereich der Spannkäle ist die dominante Frequenz systematisch verringert gegenüber den Referenzmesspunkten ausserhalb der Kanäle. Entlang der Kanäle lassen sich zwei charakteristische Segmente unterscheiden: ein Abschnitt mit moderater Frequenzreduktion über der Verfüllung sowie ein Abschnitt mit ausgeprägtem Frequenzabfall über der unverfüllten Zone. Die Befundlage erlaubt eine Differenzierung zwischen verfüllten und unverfüllten Abschnitten. Dieser Sachverhalt zeigt sich konsistent sowohl beim metallischen Hüllrohr (1-M) als auch beim Kunststoffrohr (2-K).

Auffällig ist, dass der vollständig verfüllte Bereich des metallischen Spannkanaals 1-M einen geringeren Frequenzabfall zeigt als der entsprechende Abschnitt beim Kunststoffrohr 2-K. Dabei reagiert die Anzeige des Kunststoffrohres empfindlicher auf die Verfüllungssituation, was sich in einem höheren relativen Frequenzabfall äussert.

Im Spannkanal 3-K lässt sich ein Abschnitt mit deutlich verstärktem Frequenzabfall erkennen. Dieser Bereich korrespondiert mit der Zone, in der der Verfüllgrad sukzessive gegen Null abnimmt. Die Ausprägung des Signals entspricht dem typischen Bild einer unvollständigen oder fehlenden Verfüllung.

In der Gesamtschau ergibt sich ein konsistentes Muster: Die gemessenen Frequenzverschiebungen korrelieren stark mit dem tatsächlichen Verfüllzustand der Spannkäle. Die detektierten Unterschiede zwischen verfüllten und unverfüllten Bereichen sind klar erkennbar. Der Kontrast ist beim metallischen Hüllrohr stärker ausgeprägt als beim Kunststoffrohr. Das Ergebnis bestätigt eine signifikante Sensitivität des Impact-Echo-Verfahrens für die Detektion von Inhomogenitäten im Bereich der Spannkäle.

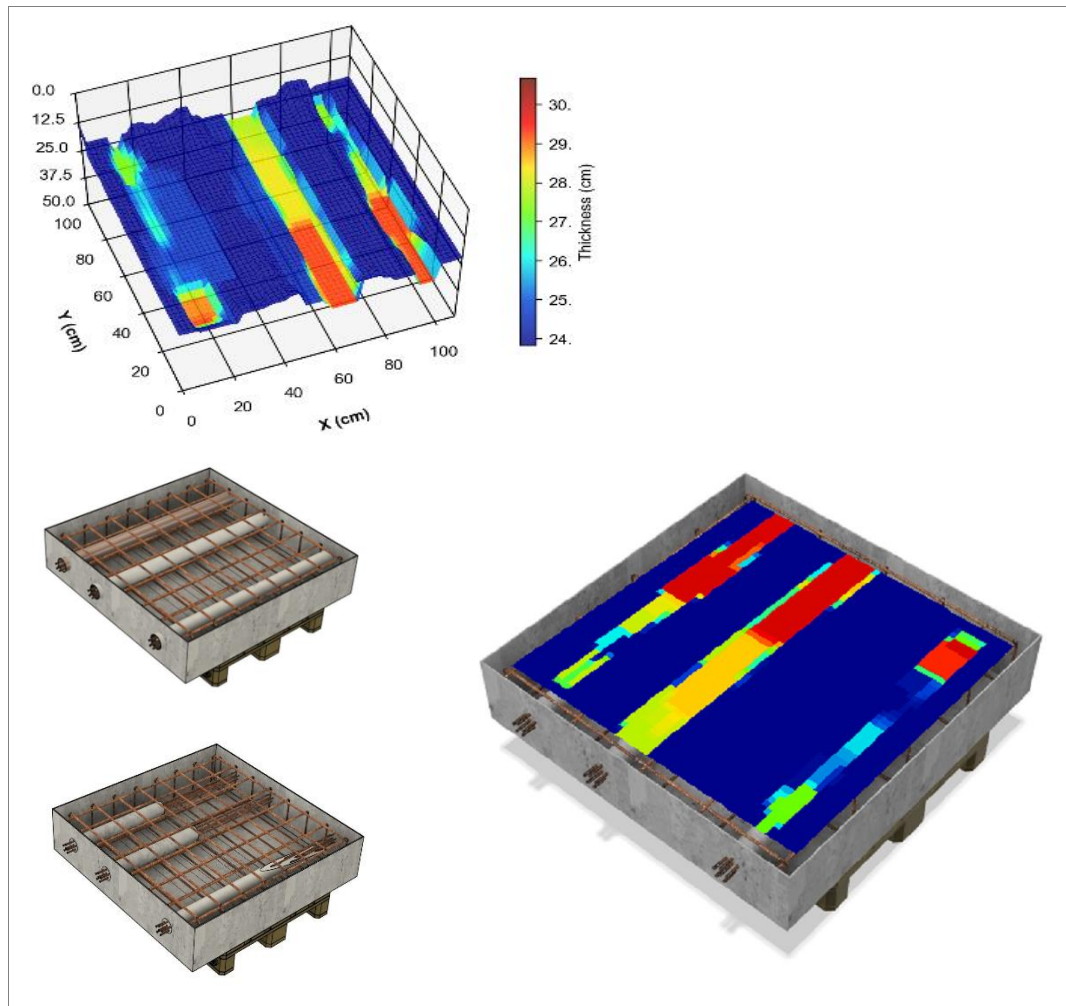


Abbildung 23: Impact-Echo-Profil für Prüfkörper Uno bei Messung von der Vorderseite.

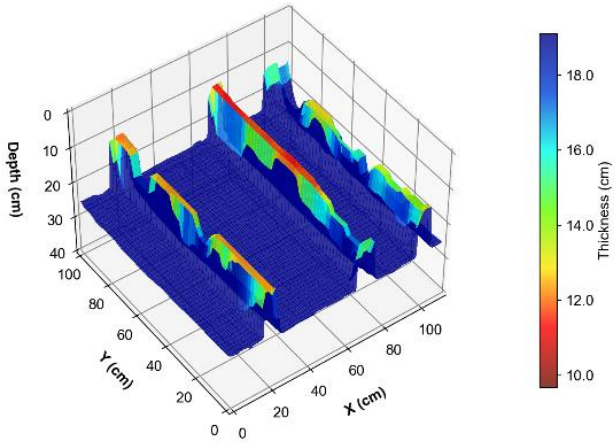
3.2.8.2 Prüfkörper Uno – Messung von der Vorderseite – Ultraschall

Das aus den Ultraschallmessungen gewonnene Laufzeit- bzw. Tiefenprofil (Abbildung 24) zeigt ein weitgehend homogenes Erscheinungsbild ohne auffällige Laufzeitabweichungen. Die Signalverläufe entlang der Messlinien weisen keine systematischen Differenzen auf, die mit dem Verfüllzustand der Spankanäle korrelieren würden. Das Laufzeitverhalten bleibt über den gesamten Messbereich konstant.

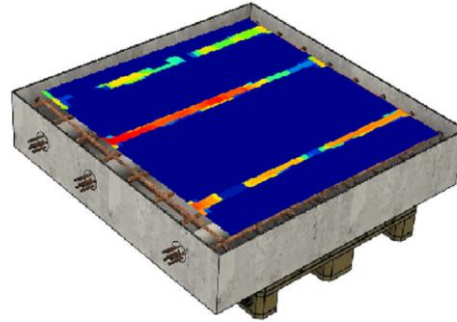
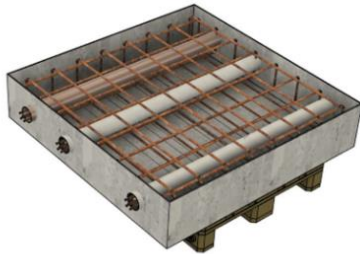
Auch im amplitudenbasierten C-Bild finden sich keine Hinweise auf eine signifikante Korrelation zwischen Signalintensität und Verfüllzustand. Die gemessenen Amplituden zeigen keine eindeutige Strukturierung oder Kontrastbildung im Bereich der Spankanäle. Sowohl verfüllte als auch unverfüllte Abschnitte erscheinen mit ähnlicher Amplitude.

Das Gesamtbild der Ultraschallmessung vermittelt keine diagnostisch verwertbaren Laufzeit- oder Amplitudenkontraste im Zusammenhang mit der Verfüllsituation. Es besteht hier keine ausreichende Sensitivität zur Differenzierung des Verfüllzustands der Spankanäle.

Laufzeit- bzw. Tiefenprofil



Laufzeit- bzw. Tiefenprofil (Overlay)



C-Projektion (Overlay)

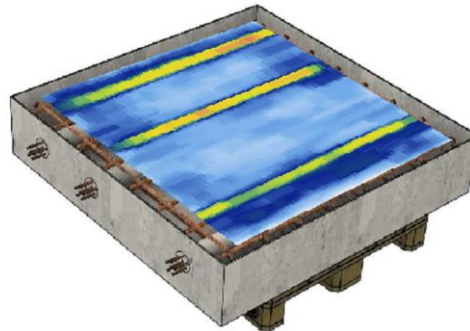


Abbildung 24: Ultraschall-Ergebnisdarstellung für Prüfkörper Uno bei Messung von der Vorderseite.

3.2.8.3 Prüfkörper Uno – Messung von der Rückseite – Impakt-Echo

Die von der Rückseite durchgeführten Impakt-Echo-Messungen zeigen ein charakteristisches, differenziertes Bild der Spannkanaalbereiche (Abbildung 25). Beim Spannkanaal 1-M tritt der unverfüllte Abschnitt als deutlich ausgeprägte Rückwandverschiebung in Erscheinung. Die dominanten Frequenzen sind in diesem Bereich signifikant reduziert. Eine entsprechende Anzeige über dem verfüllten Abschnitt ist nicht festzustellen. Dieses Muster bestätigt den bereits bei der Vorderseitenmessung beobachteten hohen Kontrast zwischen verfüllten und unverfüllten Abschnitten des metallischen Hüllrohres.

Beim Spannkanaal 2-K fällt das Erscheinungsbild heterogener aus. Der unverfüllte Bereich zeigt zwar ebenfalls eine deutliche Rückwandverschiebung mit signifikant reduzierter dominanter Frequenz, doch variiert das Signal im verfüllten Abschnitt deutlich stärker. Insbesondere im Randbereich des Prüfkörpers ist ein Bereich erhöhter Rückwandverschiebung erkennbar, der fälschlicherweise als Hinweis auf eine unvollständige Verfüllung interpretiert werden könnte. Obgleich dieses Phänomen nur lokal auftritt, ist ein Zusammenhang mit Randeffekten nicht auszuschließen.

Für den Spannkanaal 3-K zeigt sich erneut eine markante Rückwandverschiebung im Abschnitt, in dem der Verfüllgrad gegen Null geht. Das Frequenz- bzw. Tiefenprofil weist in diesem Bereich eine deutliche Absenkung auf, was mit dem vollständig unverfüllten Zustand übereinstimmt.

Insgesamt ergibt sich auch für die Rückseitenmessung ein konsistentes diagnostisches Muster im Sinne des Prinzips der Rückwandverschiebung. Unverfüllte Bereiche werden zuverlässig erkannt und heben sich klar von der Umgebung ab. Allerdings ist der Kontrast zwischen verfüllten und unverfüllten Zonen tendenziell geringer ausgeprägt als bei der Messung von der Vorderseite. Die Auswertung bleibt insgesamt stimmig, weist jedoch bei den Kunststoffhüllrohren eine geringere Trennschärfe auf, während das metallische Hüllrohr erneut eine stabile und eindeutige Signalantwort liefert.

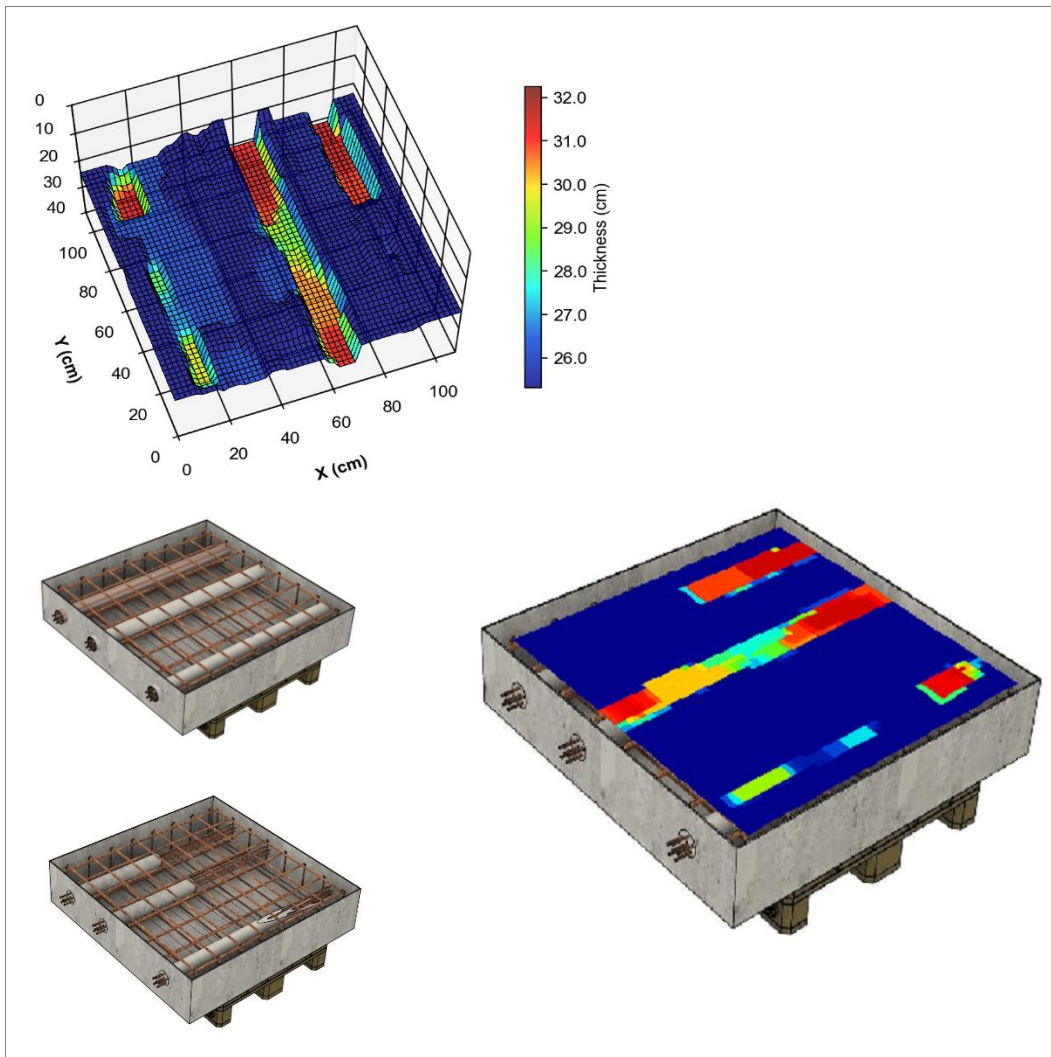


Abbildung 25: Impakt-Echo-Profilardarstellung für Prüfkörper Uno bei Messung von der Rückseite.

3.2.8.4 Prüfkörper Uno – Messung von der Rückseite – Ultraschall

Das aus den Rückseitenmessungen abgeleitete Laufzeitprofil (Abbildung 26) zeigt deutliche Unterschiede in den Laufzeiten innerhalb der verschiedenen Abschnitte der Spannkanaäle. Bei den Spannkanaälen 1-M und 2-K treten über jeweils die unverfüllte Hälfte der Kanallänge verkürzte Laufzeiten beziehungsweise geringere angezeigte Tiefen auf. Die Abweichungen betragen etwa 1 bis 2 cm im Vergleich zu den vollständig verfüllten Abschnitten. Dieses Muster wird durch die Ergebnisse am Spannkanaal 3-K bestätigt, bei dem der Verfüllungsgrad über die halbe Länge sukzessive abnimmt. Trotz des graduellen Übergangs bleibt die Laufzeit im unverfüllten Bereich konstant verkürzt und liegt systematisch unter den Werten des verfüllten Abschnitts, sodass keine kontinuierliche Veränderung der Laufzeit entlang des Verfüllgradienten erkennbar ist.

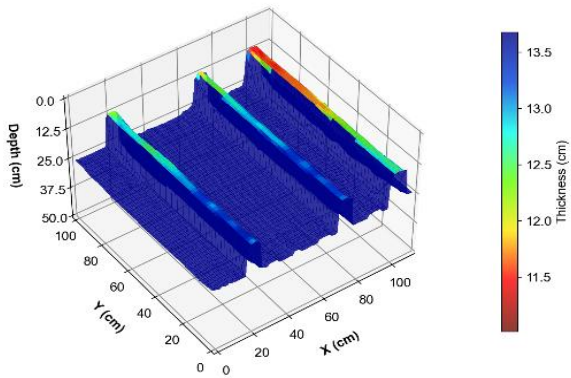
Die Messergebnisse von der Rückseite weisen somit eine klare und stabile Korrelation zwischen Laufzeitverhalten und Verfüllungszuständen der Spannkanaäle auf. Die reduzierten Laufzeiten bei fehlender oder unvollständiger Verfüllung lassen sich durch frühere Reflexionen erklären. Diese treten erwartungsgemäss an der Grenzfläche Beton zu Kunststoffrohr oder Kunststoffrohr zu Luft auf. Im vollständig verfüllten

Zustand hingegen tritt die massgebliche Reflexion erst an der inneren Struktur des Hüllrohres, das heisst am Litzenbündel, auf, was längere Laufzeiten und grössere Tiefenanzeigen zur Folge hat.

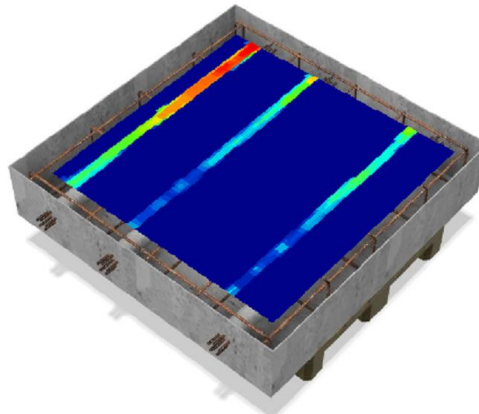
In der amplitudenbasierten Darstellung des C-Bildes zeigt sich dagegen kein erkennbarer Zusammenhang zwischen Signalintensität und Verfüllungszustand. Die Amplituden bleiben über verfüllte und unverfüllte Zonen hinweg weitgehend homogen und liefern kein auswertbares Unterscheidungsmerkmal.

Die Rückseiten-Ultraschallmessungen am Prüfkörper Uno bestätigen somit, dass die Laufzeitanalyse eine zuverlässige Differenzierung der Verfüllungszustände ermöglicht. Eine signifikante Korrelation lässt sich hingegen auf Basis der Amplitudenanalyse nicht identifizieren.

Laufzeit- bzw. Tiefenprofil



Tiefen- bzw. Laufzeitprofil (Overlay)



C-Projektion (Overlay)



Abbildung 26: Ultraschall-Ergebnisdarstellung für Prüfkörper Uno bei Messung von der Rückseite.

3.2.8.5 Prüfkörper Dos – Messung von der Vorderseite – Impakt-Echo

Die an Prüfkörper Dos durchgeführten Impakt-Echo-Messungen erfolgten in gleicher Weise wie jene an Prüfkörper Uno. Sämtliche Spannkanäle waren mit Kunststoffhüllrohren ausgestattet. Im Vergleich zum ersten Prüfkörper sind die Verfüllzustände jedoch weniger deutlich voneinander abgegrenzt, was in Abbildung 27 ersichtlich wird.

Bei der Messung von der Vorderseite waren die nicht verfüllten Abschnitte der Spannkanäle dem Messgerät zugewandt. Die detektierten Rückwandverschiebungen fielen insgesamt deutlich schwächer aus als bei den klarer strukturierten Verfüllzuständen von Prüfkörper Uno. Die erfassten Frequenzmuster zeigen keine stabile oder durchgängige Korrelation mit den tatsächlichen Verfüllzuständen der Spannkanäle 4-K und 5-K. Besonders auffällig ist, dass die Bereiche mit maximaler Rückwandverschiebung, gekennzeichnet durch eine signifikant reduzierte dominante Frequenz, nicht mit den räumlichen Segmenten unvollständiger Verfüllung übereinstimmen. Zusätzlich zeigen die vollständig verfüllten Zonen eine beträchtliche Variabilität hinsichtlich der dominanten Frequenz, wodurch sich die diagnostische Trennschärfe weiter verringert. Am Spannkanal 6-K wurde im Abschnitt mit unvollständiger Verfüllung eine leichte, jedoch erkennbar zutreffende Rückwandverschiebung detektiert. Dieser Befund entspricht dem realen Zustand und deutet darauf hin, dass unter bestimmten geometrischen oder lokal günstigen Bedingungen eine etwas höhere Korrelation erzielt werden kann.

Insgesamt ergibt sich für die Impakt-Echo-Messungen an Prüfkörper Dos lediglich eine schwache Übereinstimmung zwischen den gemessenen Frequenzverschiebungen und den tatsächlich vorliegenden Verfüllzuständen. Die an diesem Prüfkörper konstruktiv realisierten Bedingungen sind anspruchsvoller als bei Prüfkörper Uno. Die unvollständig verfüllten Bereiche sind nur gering ausgeprägt, mit einem Verfüllgrad von etwa 80 Prozent, verlaufen überwiegend graduell und sind räumlich stark begrenzt. Hinzu kommt, dass der Spannkanal 6-K einen schrägen Verlauf aufweist, was die Interpretation zusätzlich erschwert. Diese Kombination führt dazu, dass nur eine eingeschränkte Aussagekraft der Impakt-Echo-Methode im Hinblick auf die Detektion geringfügiger oder graduell ausgeprägter Verfüllfehler erreicht wird.

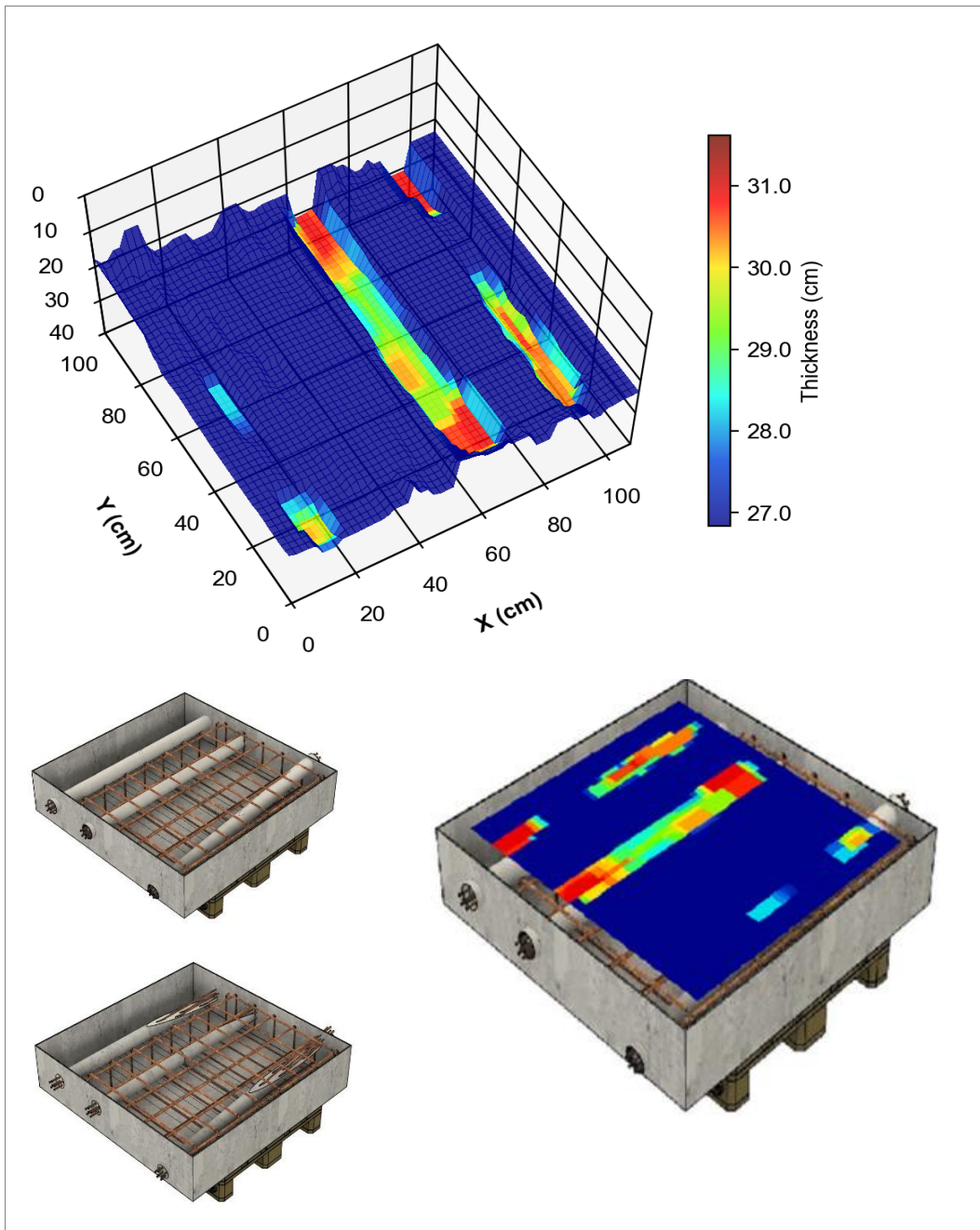


Abbildung 27: Impact-Echo-Profilardarstellung für Prüfkörper Dos bei Messung von der Vorderseite.

3.2.8.6 Prüfkörper Dos – Messung von der Vorderseite – Ultraschall

Das aus den Vorderseitenmessungen abgeleitete Laufzeitprofil (Abbildung 28) zeigt für die Spannkanäle 4-K und 5-K eine weitgehend konstante Dicke ohne markante Laufzeitabweichungen. Der Verlauf von Spannkanal 6-K erscheint nahezu vollständig graduell, ohne erkennbare sprunghafte Veränderungen, die auf lokal unvollständig verpresste Bereiche hinweisen würden. Eine verkürzte Laufzeit oder eine verringerte Tiefenanzeige als Indikator für fehlende oder reduzierte Verpressung lässt sich in keiner der drei Kanalstrukturen ableiten.

Auch die amplitudenbasierte Auswertung im C-Bild zeigt keine signifikanten Anhaltspunkte für einen Zusammenhang zwischen Amplitudenhöhe und Verpresszustand. Die Intensitätsverteilung bleibt über verfüllte und unvollständig verfüllte Bereiche hinweg homogen und weist keine systematischen Kontrastbildungen auf.

Insgesamt vermittelt die Ultraschallmessung von der Vorderseite bei Prüfkörper Dos ein gleichförmiges und unauffälliges Bild, das keine belastbare Differenzierung der Verpresszustände erlaubt. Das Erscheinungsbild bleibt sowohl in der Laufzeit- als auch in der Amplitudenanalyse ohne diagnostisch verwertbare Merkmale hinsichtlich der detektierten, nur gering ausgeprägten oder graduell verlaufenden Verpressdefizite.

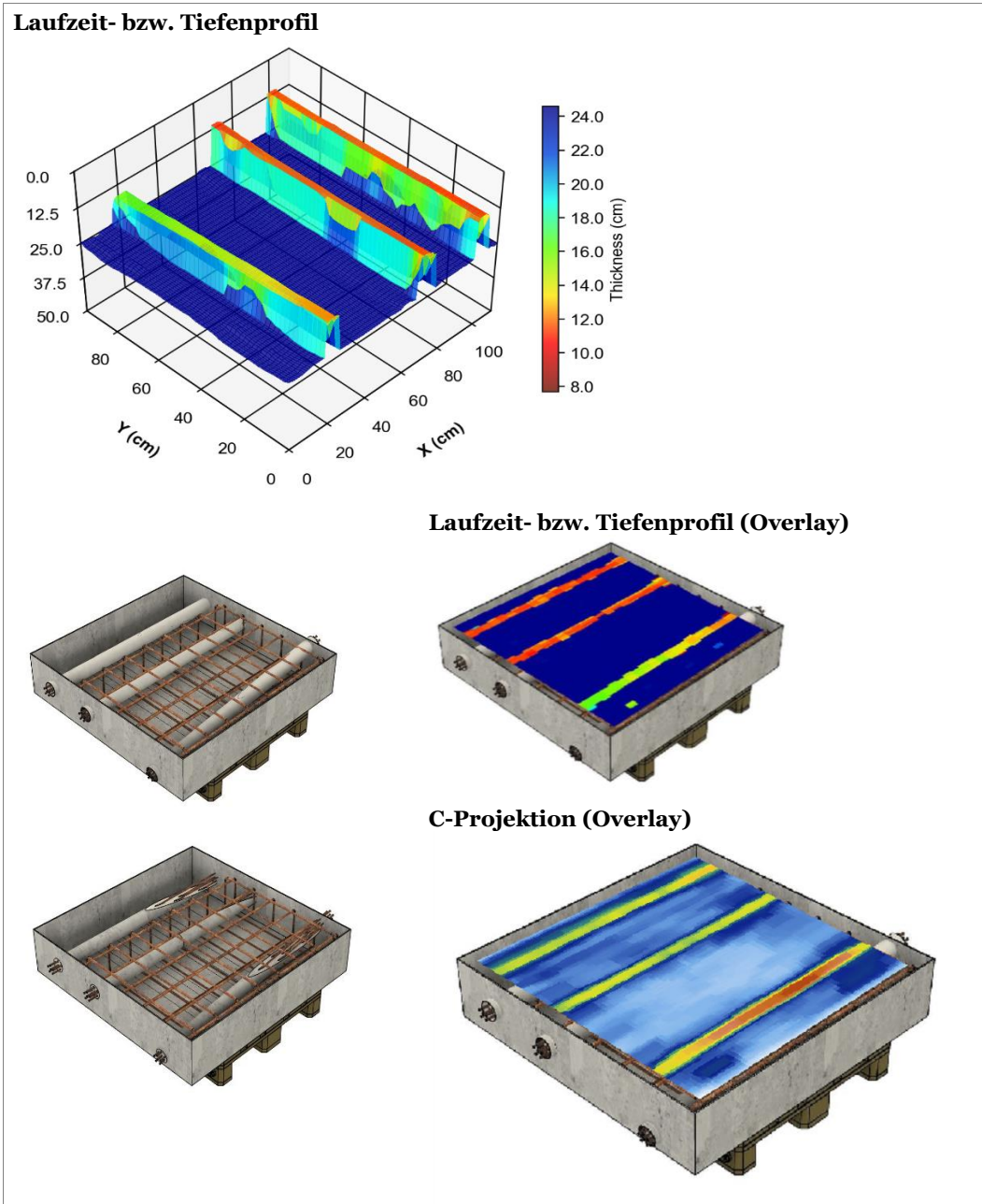


Abbildung 28: Ultraschall-Ergebnisdarstellung für Prüfkörper Dos bei Messung von der Vorderseite.

3.2.8.7 Prüfkörper Dos – Messung von der Rückseite – Impakt-Echo

In dieser Messkonfiguration liegen die nicht vollständig verfüllten, das heisst luftgefüllten Zonen auf der vom Messgerät abgewandten Seite. Trotz dieser geometrischen Ausgangslage zeigen die Ergebnisse (Abbildung 29) eine deutlich ausgeprägtere Korrelation mit den Verfüllzuständen der Spannkanäle als die Messungen von der Vorderseite.

In den unverfüllten Abschnitten der Spannkanäle 4-K und 5-K treten konsistent niedrigere dominante Frequenzen auf, die sich klar von den Frequenzen der verfüllten Bereiche unterscheiden. Diese systematische Absenkung ermöglicht eine eindeutige Differenzierung der jeweiligen Zonen. Auffällig ist jedoch, dass auch an den vollständig verfüllten Endbereichen der Spannkanäle am Rand des Prüfkörpers Signale mit reduzierter Frequenz auftreten. Diese Randanzeigen erschweren die Interpretation, da sie keiner bekannten strukturellen Besonderheit zugeordnet werden können.

Beim schräg verlaufenden Spannkanal 6-K wird eine abgesenkte Frequenz detektiert, die dem Bereich mit unvollständiger Verfüllung entspricht. Die räumliche Übereinstimmung zwischen Signal und tatsächlichem Zustand ist hier klar gegeben.

Zusätzlich erscheinen sowohl bei den Vorder- als auch bei den Rückseitenmessungen Anzeigen an den äusseren Endbereichen der Spannkanäle 4-K und 5-K, obwohl diese konstruktiv vollständig verfüllt sind. Die Ursache dieser Signalabsenkungen bleibt unklar. Denkbar sind lokale Entkopplungen zwischen Verfüllmaterial und Hüllrohr oder kleinräumige, nicht erwartete unverfüllte Zonen, die zu vorzeitigen Reflexionen führen könnten.

Insgesamt zeigen die Rückseitenmessungen bei Prüfkörper Dos eine deutlich stärkere Übereinstimmung zwischen gemessener Frequenz und tatsächlichem Verfüllzustand als die Messungen von der Vorderseite. Dieses Ergebnis ist insofern bemerkenswert, als sich die unverfüllten Zonen auf der dem Messgerät abgewandten Seite befinden. Trotz dieser ungünstigen Lage entsteht ein erkennbares, konsistentes Muster, das die Frequenzabsenkung zuverlässig mit dem Verfüllzustand der Spannkanäle verknüpft.

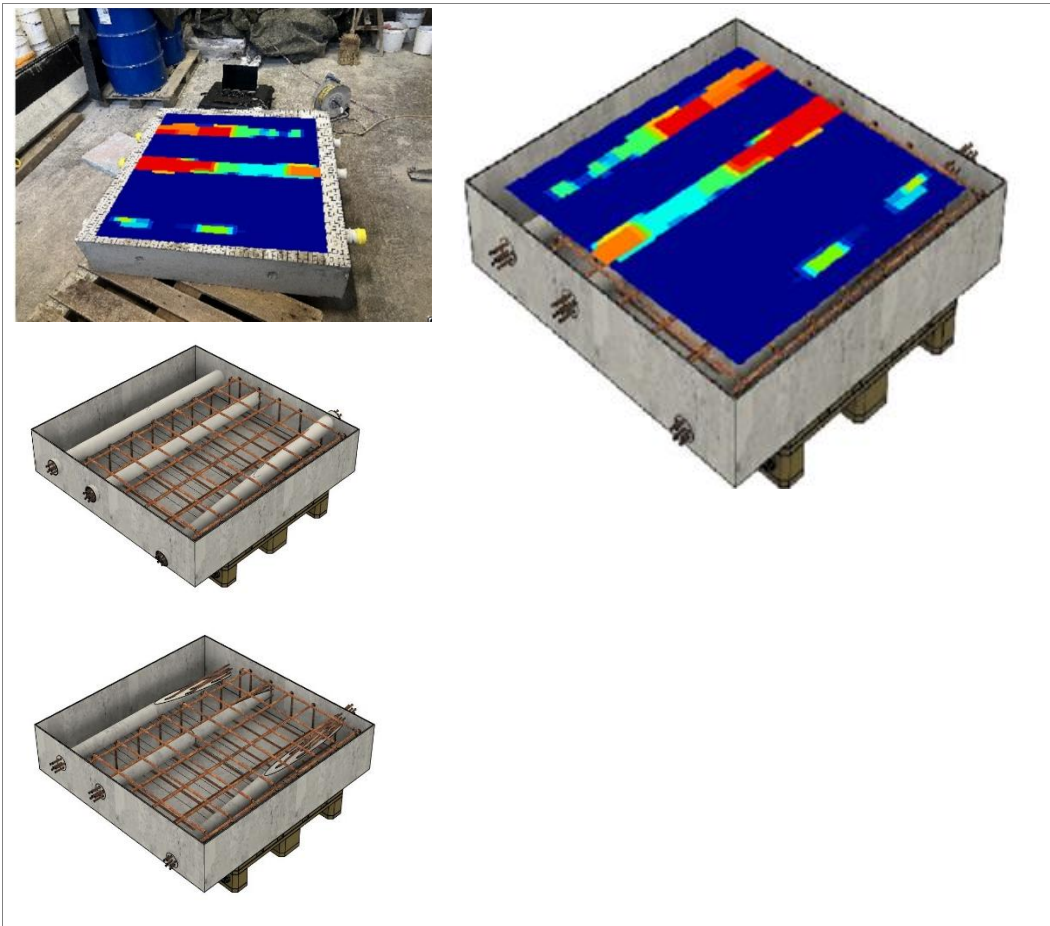


Abbildung 29: Impakt-Echo-Profilardarstellung für Prüfkörper Dos bei Messung von der Rückseite.

3.2.8.8 Prüfkörper Dos – Messung von der Rückseite – Impakt-Echo

Die Abbildung 30 stellt die Ergebnisse dar. Das aus den Rückseitenmessungen hervorgehende Laufzeitprofil zeigt entlang der Spannkanalverläufe durchgehend konstante Laufzeiten ohne erkennbare Differenzierung in Abhängigkeit des Verfüllzustandes. Weder bei den lediglich partiell verfüllten Abschnitten noch bei den vollständig verfüllten Bereichen treten signifikante Abweichungen in Form verkürzter Laufzeiten oder reduzierter Tiefenanzeigen auf. Eine potenzielle Laufzeitverkürzung an Zonen unvollständiger Verfüllung bestätigt sich in diesem Fall nicht.

Auch die amplitudenbasierte Auswertung des C-Bildes weist keine systematische Strukturierung auf, die mit dem Verfüllzustand der Spannkanäle in Verbindung stehen könnte. Die Amplituden bleiben über alle untersuchten Bereiche hinweg homogen und zeigen weder lokale Intensitätsmaxima noch charakteristische Abfälle, die auf Verfüllfehler hindeuten würden.

Zusammenfassend ergeben die Ultraschallmessungen von der Rückseite des Prüfkörpers Dos keine prägnanten Anzeichen für einen belastbaren Zusammenhang zwischen dem Verfüllzustand und den analysierten Messgrößen Laufzeit oder Amplitude. Das Erscheinungsbild bleibt in beiden Darstellungsformen weitgehend uniform, so dass sich aus den Ultraschalldaten zunächst keine diagnostisch verwertbare Differenzierung der Verfüllsituationen ableiten lässt.

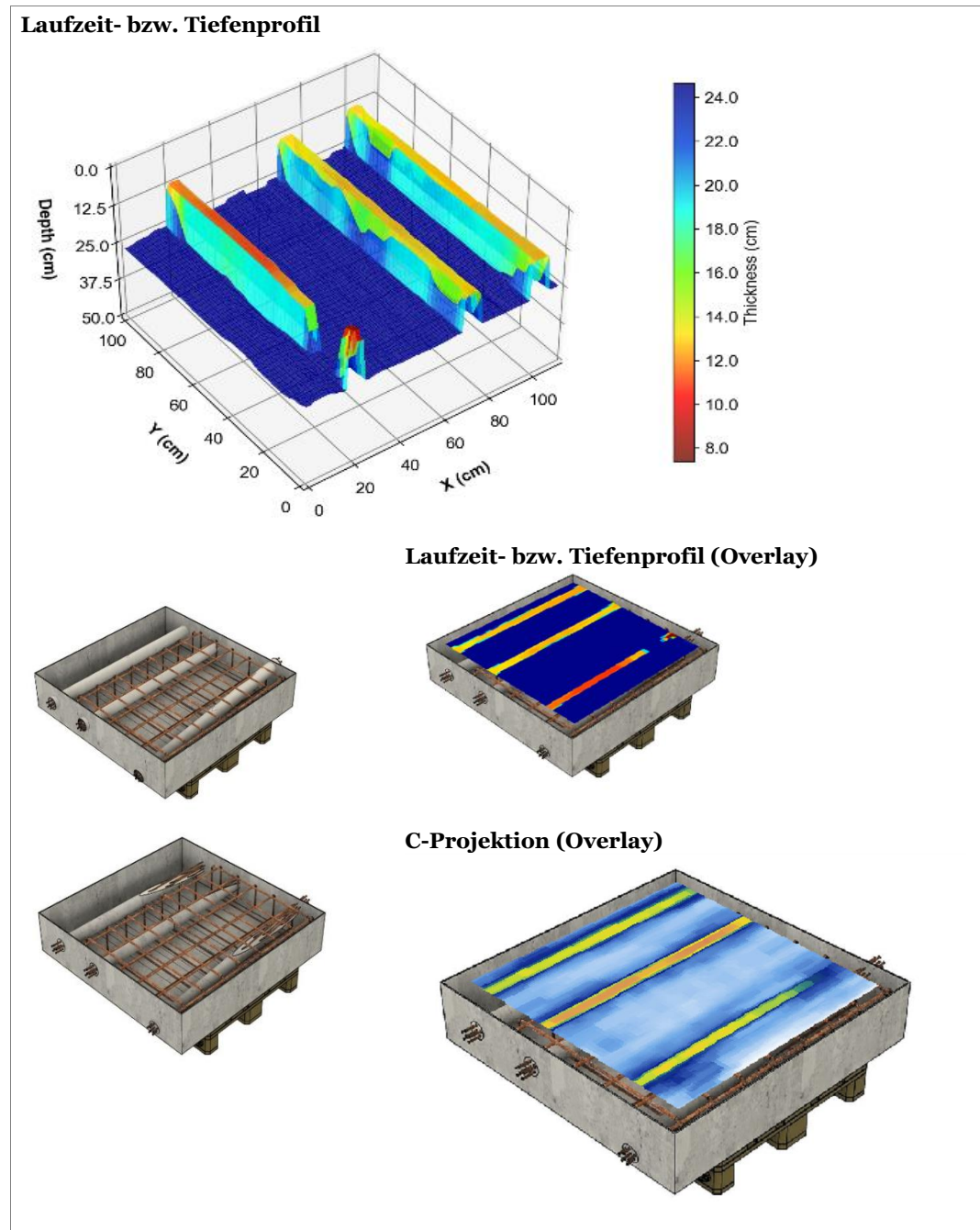


Abbildung 30: Ultraschall-Ergebnisdarstellung für Prüfkörper Dos bei Messung von der Rückseite.

3.2.9 Fazit Prüfkörperuntersuchungen

Die Messungen an den Prüfkörpern Uno und Dos wurden sowohl von der Vorder- als auch von der Rückseite durchgeführt. Die Untersuchungen verwendeten die Verfahren Impakt-Echo und Ultraschall (Array-Technologie).

Die Ergebnisse zeigen, dass bei diesen Untersuchungen die Impakt-Echo-Daten eine höhere Korrelation mit den Verfüllzuständen aufweisen. Unterschiede zwischen metallischen und Kunststoffrohren erscheinen dabei von untergeordneter Bedeutung, wenngleich bei metallischen Hüllrohren leicht signifikantere Resultate beobachtet

werden konnten. Die Ultraschallmessungen weisen sowohl in der Auswertung der Laufzeit als auch der Amplitude teilweise eine sehr hohe Korrelation mit dem Verfüllzustand auf, die jedoch nur bei Messungen an Prüfkörper Uno zu beobachten ist. Die Begründung durch die klare Abgrenzung der Verfüllzustände sowie der oberflächenparallele Verlauf der Spannkäle erscheint hier naheliegend.

4 Untersuchung an Bauwerken

4.1 Auswahl und Beschrieb der Bauwerke

In einem zweiten Schritt wurden aus den 18 (Kapitel 2.3) identifizierten Brücken (Tabelle 1) zwei für die Untersuchungen vor Ort ausgewählt. Diese Entscheidung beruhte im Wesentlichen auf Kriterien: der Zugänglichkeit der Brücken sowie dem Vorhandensein detaillierter Plangrundlagen.

Der einfache Zugang, wenn möglich ohne Beeinträchtigung des Verkehrs, zur Brücke war für die praktische Durchführung der Tests wichtig. Aufgrund dieses Kriteriums wurden die Messungen an der Reppischtalbrücke der A3 (Westumfahrung Zürich) westlich von Birmensdorf und die Rampenbrücke Wiese beim Anschluss Wiese der A3 in Basel durchgeführt. Die Katasterpläne der Bauwerke sind im Anhang enthalten.

Für beide Bauwerke waren die Pläne der Spannkabelführung vorhanden, was die Einsatzplanung und die Auffindung der Spannkanäle wesentlich vereinfachte.

4.2 Messungen Reppischtalbrücke

Die Reppischtalbrücke ist ein Viadukt der A3 auf dem Abschnitt Westumfahrung Zürich. Es handelt sich um eine vorgespannte Hohlkastenkonstruktion mit zwei getrennten, jeweils zweispurig geführten, Trägern. Die Brücke befindet sich zwischen den Tunneln Eggrain und Hafnerberg.

Die Messungen haben an vier ausgewählten Stellen an den Stegen des Hohlkastens stattgefunden. Die Auswahl dieser Stellen erfolgte einerseits unter dem Gesichtspunkt der Schadensrelevanz und zum anderen hinsichtlich der Zugänglichkeit für ZfP-Verfahren.

Im Nachfolgenden werden die Spannkanäle im jeweiligen Messfeld gemäss ihrer vertikalen Lage von oben nach unten mit α , β und γ bezeichnet.

4.2.1 Messstelle 1

Eine Darstellung der Messsituation sowie ein Bild der Messstelle sind in Abbildung 31 gezeigt. Messstellen 1 und 2 befinden sich im selben Brückenfeld. In Messstelle 1 wurden drei Spannkanäle untersucht, die sich jeweils in unterschiedlichen Tiefenlagen sowie Betonüberdeckungen befinden. Die Datenaufnahme erfolgte mit den Messsystemen Radar-1, Impakt-Echo, Ultraschall-1 und Ultraschall-2, welche in den folgenden Abschnitten detailliert dargestellt werden.

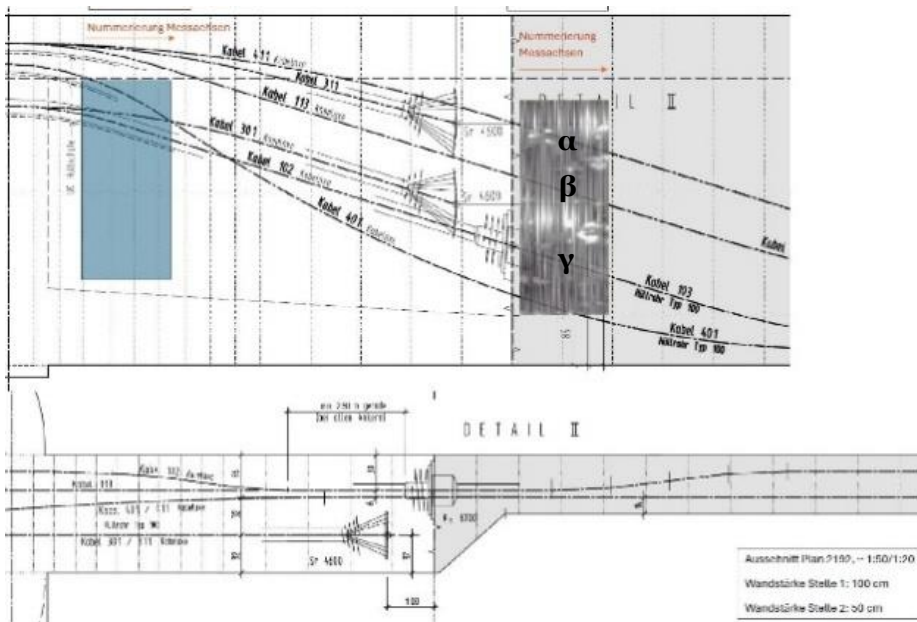


Abbildung 31: Messstelle 1 an der Reppischtalbrücke. Links: Situation gemäss Plan. Rechts: Foto der Messstelle.

4.2.1.1 Messstelle 1 – Radar-1

Die Untersuchungen mit dem Radarverfahren wurden mit System Radar-1 durchgeführt und dienten der Vorbereitung der nachfolgenden Ultraschall- und Impakt-Echo-Messungen. Ziel war die Lokalisierung des Verlaufs des Spannkanales im Bereich der Messstelle.

Eine Datenaufnahme entlang eines Messrasters erfolgte hierbei nicht; vielmehr wurden die mittels vertikal geführter Messlinien detektierten Positionen des Spannkanales direkt an der Stelle lokalisiert und auf der Bauteiloberfläche angezeichnet. Damit wurde eine Grundlage für die weiterführenden zerstörungsfreien Prüfungen geschaffen.

4.2.1.2 Messstelle 1 -Impakt-Echo

An der Messstelle 1 wurden Impakt-Echo-Untersuchungen unter Verwendung einer manuellen Anregung mit einem Impaktor von 10 mm Kugeldurchmesser durchgeführt. Die Messungen erfolgten entlang eines Messrasters, bestehend aus parallel geführten, vertikal orientierten Messlinien, die die Spannkanaäle kreuzen. Entlang jeder Messlinie wurden Einzelmessungen in einem äquidistanten Inkrement von 2 cm akquiriert.

In Übereinstimmung mit der konventionellen Achsdefinition des Impakt-Echo-Systems wird die x-Achse als Orientierungsachse entlang der Messlinien festgelegt, d. h. sie definiert die Abfolge der diskreten Messpunkte innerhalb einer Linie. Die y-Achse verläuft orthogonal hierzu und repräsentiert die Richtung, in der die parallelen Messlinien das zweidimensionale Messraster konstituieren. Der Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Messpunkten beträgt somit $\Delta x = 2$ cm, der Abstand zwischen zwei benachbarten Messlinien $\Delta y = 10$ cm. Eine Messposition bezeichnet hierbei die Position des Sensors, während die Impakt-Anregung lateral versetzt in y-Richtung mit einem Offset von etwa 5 cm erfolgt.

Die präzise Detektion und Lokalisierung der Spannkanele erweist sich initial als marginal, da eine markante indirekte Anzeige in Form einer Rückwandverschiebung nicht vorliegt. Stattdessen manifestieren sich die Spannkanele als direkte Indikationen im Volumeninnern, deren Frequenzen oberhalb derjenigen der Bauteildickenanzeige liegen.

In Abbildung 32 ist ein Tiefenprofil mit eingeschränktem Betrachtungsfenster in der Stegdickenachse von $z = [10, 40]$ cm dargestellt. Innerhalb dieses Bereichs werden ausschliesslich die Tiefenlagen der dominantesten Anzeigen wiedergegeben, wobei die Rückwandanzeige bewusst ausgeblendet wurde, um eine Überdeckung der vergleichsweise amplitudenschwachen Spannkanele-Indikationen zu vermeiden. Auch wurde eine zeitliche Fensterung verwendet, so dass ausschliesslich ein 2 ms umfassender Signalabschnitt in die Berechnung des FFT-basierten Amplitudenspektrums einbezogen wird, um die amplitudenschwachen, transienten Signalanteile der Spannkanele-Indikationen gezielt zu optimieren. In diesem Profil (Abbildung 32, links) zeigt sich eine breitbasige, signifikante Anzeige in der Position der oberen Spannkanele α und β . Aufgrund der lateral ausgedehnten Indikation ist eine eindeutige Zuordnung zu einem einzelnen Spannkanele nicht möglich; die Evidenz spricht für eine überlagerte Indikation beider Kanäle infolge ihrer geringen lateralen Separation. Zusätzlich wird im unteren Profilverbereich eine weitere Indikation detektiert, die in weitgehend räumlicher Übereinstimmung mit der Lage des Spannkaneles γ gemäss Plan steht. Sie liegt in einer geringeren Tiefenlage als die den Spannkanele α und β zugeordnete Anzeige.

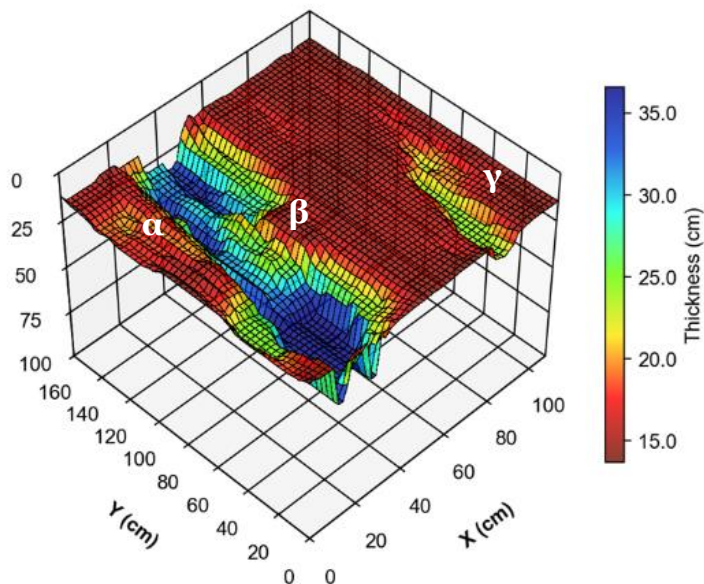


Abbildung 32: Messstelle 1 an der Reppischtalbrücke. Tiefenprofildarstellung unter Verwendung eines eingeschränkten Betrachtungsbereiches von $z = [10, 40]$ cm.

Abbildung 33 zeigt exemplarische Signale von beiden Anzeigen, Spannkanele α und β einerseits und γ andererseits. Hierin zeigt sich, dass für Spannkanele α und β eine Spannkanelefrequenz von $f = 5.6$ kHz gemessen wird, für Spannkanele γ eine Frequenz von $f = 9.3$ kHz.

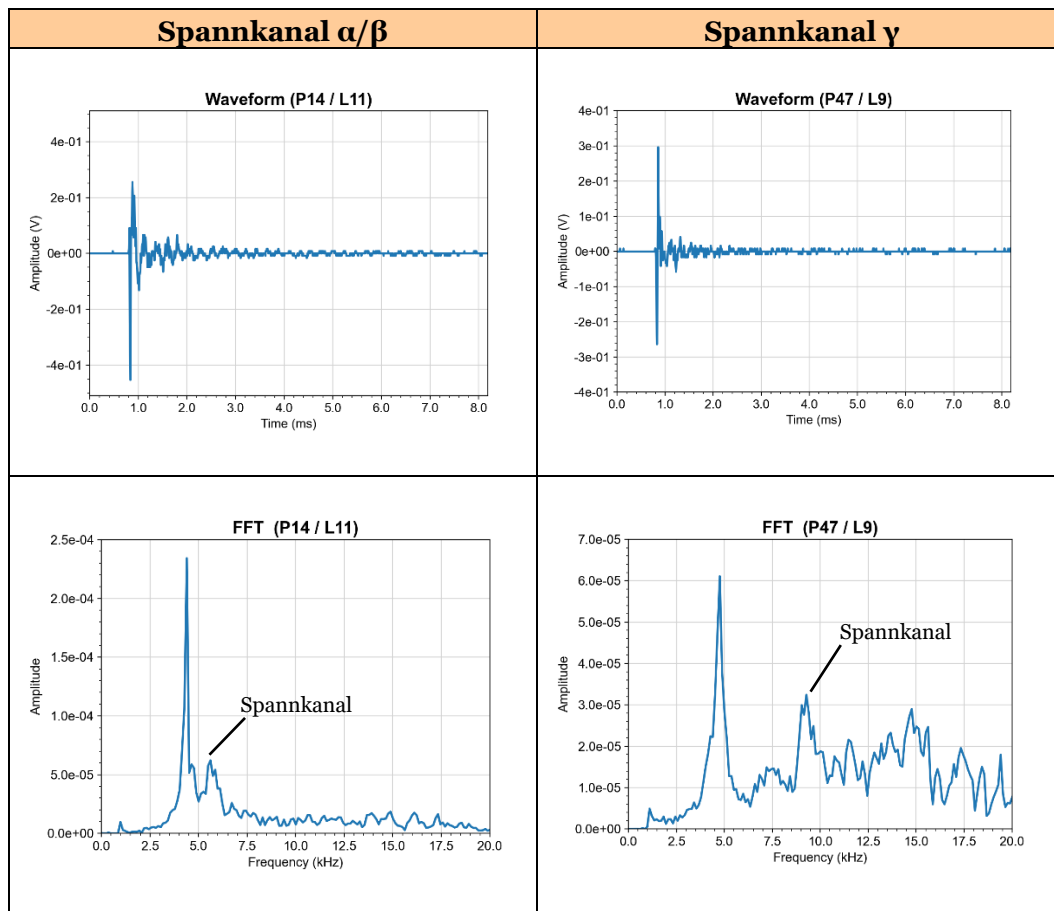


Abbildung 33: Messstelle 1 an der Reppischtalbrücke. Exemplarische Signale entlang der Anzeigen von Spannkanael α/β (links) sowie γ (rechts).

Die Solltiefen der Spannkanaele betragen $z_{\alpha}=15$ cm für Spannkanael α , $z_{\beta}=22$ cm für Spannkanael β sowie $z_{\gamma}=22$ cm für Spannkanael γ . Unter Prüfung der Gültigkeit der Gleichungen 3 und 4 in Bezug auf die detektierten Frequenzen, mit dem Ziel, daraus mögliche Rückschlüsse auf die Vollständigkeit bzw. Unvollständigkeit der Verfüllung abzuleiten, ergibt sich die in der Tabelle 3 dargestellte Auswertung. Dabei wird die gemäss Kalibrierung ermittelte Schallausbreitungsgeschwindigkeit der Longitudinalwelle von 4300 m/s zugrunde gelegt.

Die Tabelle weist für jeden der drei Spannkanaele sowohl die Solltiefe als auch die experimentell ermittelte Frequenz aus. Zur Orientierung enthalten die beiden letzten Spalten zusätzlich die Referenzfrequenzen, wie sie sich gemäss Gleichung (3) und Gleichung (4) auf Grundlage der Solltiefenwerte berechnen. Es ist jedoch anzumerken, dass, wie zuvor erläutert, die detektierte Anzeige der Spannkanaele α und β aufgrund ihrer räumlichen Überlagerung nicht eindeutig separierbar ist. Folglich bleibt unklar, ob die gemessene Frequenz primär von Spannkanael α oder β stammt.

Trotz einer Differenz von 1.56 kHz liegt die für Spannkanael α/β gemessene Frequenz von $f=5.6$ kHz deutlich näher am Referenzwert nach Gleichung (4) von 7.16 kHz – welcher nach der zugrunde liegenden Theorie einer vollständigen Verfüllung entspricht – als am Referenzwert nach Gleichung (3) von 14.3 kHz, der für eine

unvollständige Verfüllung steht. Die für Spannkanal γ gemessene Frequenz von $f=9,3 \text{ kHz}$ befindet sich in bemerkenswerter Nähe zum Referenzwert gemäss Gleichung (3) von $9,77 \text{ kHz}$. Nach der theoretischen Interpretation könnte dies auf eine unvollständige Verfüllung hindeuten; es wäre jedoch ebenso plausibel, dass dieser Befund auf einen unvollständigen Verbund zwischen der Innenoberfläche des Hüllrohres und dem Injektionsgut zurückzuführen ist. So reicht die Befundlage nicht zur eindeutigen Indizierung eines Injektionsmangels.

Analyse der Spannkanalindikationen

Spannkanal	Solltiefe z	Gemessene Frequenz f	Gl.3: $f = c/2d$	Gl.4: $f = c/4d$
α	15 cm	5.6 kHz	14.3 kHz	7.16 kHz
β	22 cm	5.6 kHz	9.77 kHz	4.89 kHz
γ	22 cm	9.3 kHz	9.77 kHz	4.89 kHz

Tabelle 3: Impakt-Echo-Analyse der Spannkanalindikationen gegenüber Referenzwerten aus Gl. 3 und Gl. 4 zwecks Orientierung.

Ergänzend werden C-Bilddarstellungen herangezogen, d. h. Visualisierungen der Amplitudenverteilung innerhalb des relevanten Tiefen- bzw. Frequenzbereichs der Spannkänäle entlang der Messfläche, entsprechend einem oberflächenparallelen Schnittbild.

Die Abbildung 34 zeigt Übersichtsdarstellungen von B-, C- und D-Projektionen während der Auswertung in Echolyst, optimiert für die Spannkänäle α/β (links) und γ (rechts). Eine Detaildarstellung zeigt Abbildung 35.

Die linke Spalte fokussiert sich dabei auf α/β , die rechte Spalte auf γ . Die jeweiligen Spannkänäle bilden sich in den jeweiligen C-Bildern gemäss ihrer Amplitude ab. Die Anzeige für α/β (links im Bild) hat eine diffus hohe Amplitude. Die Anzeige von γ (rechts im Bild) zeigt sich nur sehr schwach.

Aus den vorliegenden Amplitudenverteilungen ergeben sich keine unmittelbaren Hinweise auf eine unvollständige Verfüllung.

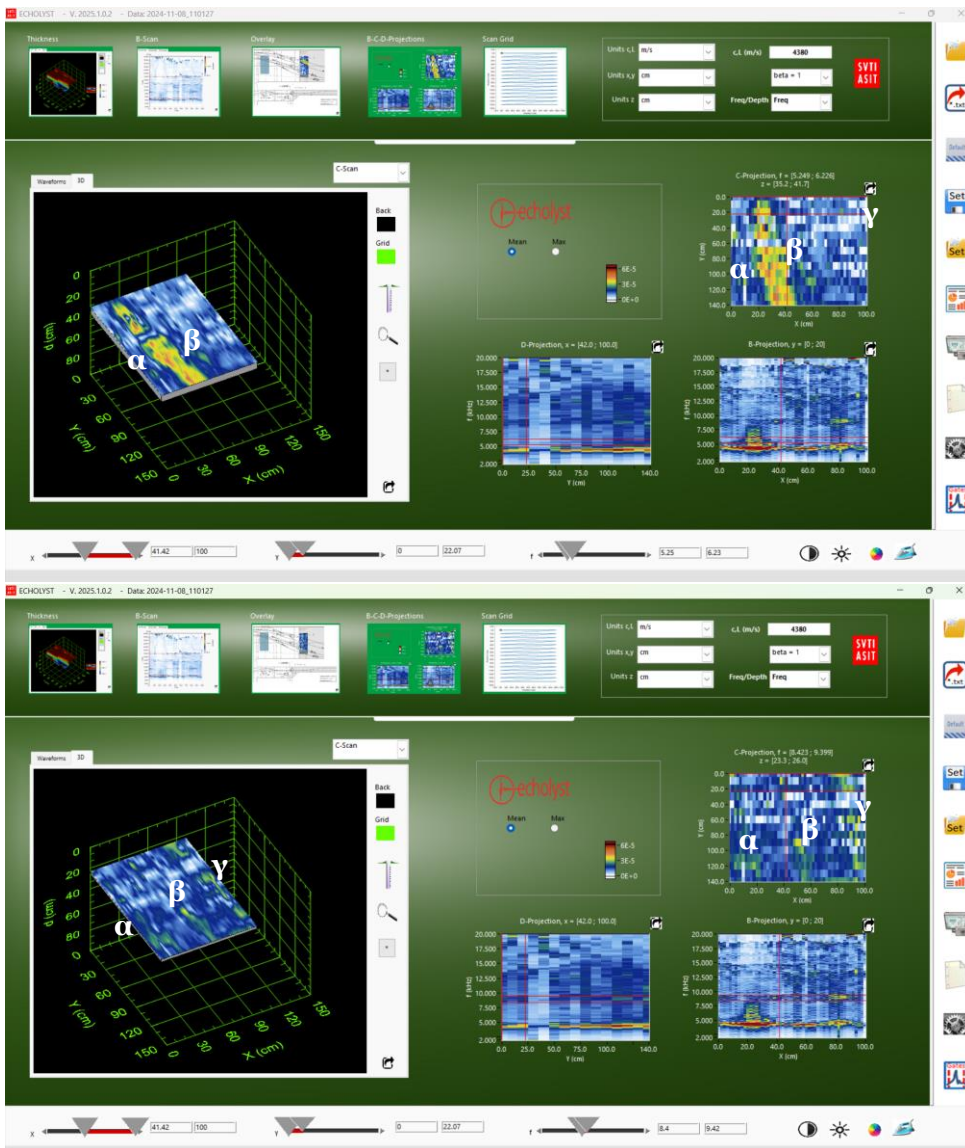


Abbildung 34: Übersichtsdarstellung von B-, C- und D-Projektionen während der Analyse in der Software Echolyst. Oben: Einstellungen optimiert für Spannkanaal α/β . Unten: Einstellungen optimiert für Spannkanaal γ .

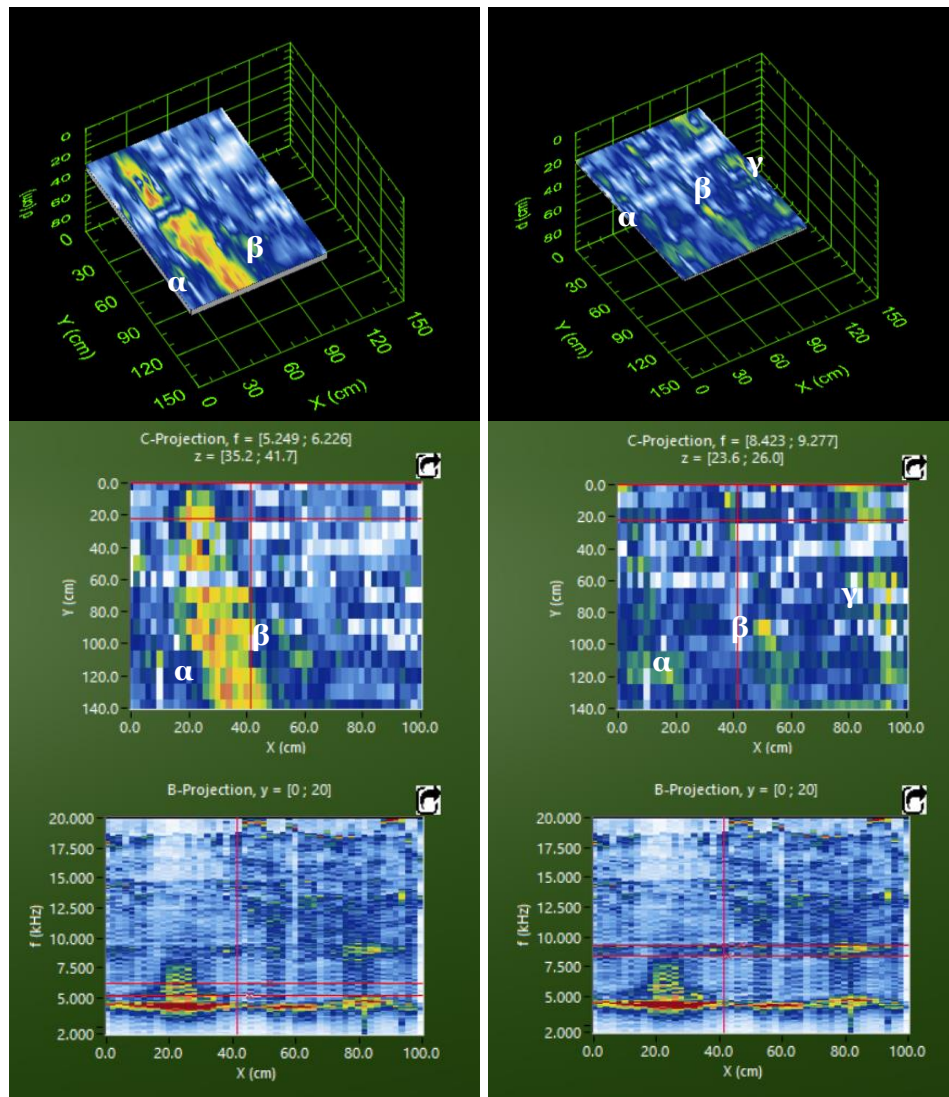


Abbildung 35: Amplitudenbasierte Analyse anhand B- und C-Projektionen während der Analyse in der Software Echolyst. Linke Spalte: Einstellungen optimiert für Spannkanaal α/β . Rechte Spalte: Einstellungen optimiert für Spannkanaal γ . Obere Reihe: 3D-Darstellung der jeweiligen C-Projektion. Mittlere Reihe: C-Projektion. Untere Reihe: B-Projektion.

4.2.1.3 Messstelle 1 – Ultraschall 1

Die Ultraschalluntersuchungen wurden mit System 1 entlang eines definierten Messrasters durchgeführt. Die Gerätelängsachse war dabei vertikal orientiert, so dass sie die Spannkanaäle kreuzte. Das Gerät wurde an den einzelnen Messpositionen schrittweise in vertikaler Richtung um jeweils 10 cm versetzt (Messpunktabstand). Auch der Abstand zwischen den parallelen Messlinien betrug 10 cm.

Nach der gängigen Konvention wird die x-Achse als Achse der Messlinien definiert, entlang derer das Gerät punktweise Messungen durchführt. Die orthogonale Richtung, in der die parallelen Messlinien gegeneinander versetzt werden, entspricht der y-Achse. Die Tiefenachse (z-Achse) verläuft von der Bauteiloberfläche in das Bauteilinnere. Der Messpunktabstand beträgt somit $\Delta x = 10$ cm, der Linienabstand $\Delta y = 10$ cm.

Abbildung 36 zeigt Ergebnisse dieser Ultraschallmessungen. Im oberen Bereich der Abbildung ist das Tiefenprofil dargestellt, welches die Tiefenlage des jeweils dominanten Echos an jeder Position auf Grundlage einer laufzeitbasierten Rekonstruktion wiedergibt. Gezeigt werden eine dreidimensionale Repräsentation des Profils (rechts), eine Überlagerung mit dem Plan der Messfläche (links oben) sowie ein Histogramm der ermittelten Tiefenwerte (links unten).

Die Wanddicke des Bauteils beträgt 50 cm. Die Spannkannäle sind in einer Tiefe von ca. 15 cm (Spannkanaal α) sowie ca. 25 cm (Spannkannäle β und γ) lokalisiert und treten im Profil klar hervor. Für alle drei Spannkannäle bildet sich deren Lage im Tiefenprofil weitgehend gleichmässig ab. Signifikante Variationen oder Auffälligkeiten, die auf eine insuffiziente Verfüllung hindeuten könnten, sind nicht erkennbar. Stellen, an denen eine reduzierte Tiefenanzeige auf eine lokal verminderte Laufzeit bzw. auf ein früheres Echo hinweisen könnte, etwa infolge einer Reflexion an einer Grenzschicht zu eingeschlossener Luft im Hüllrohrinneren, sind nicht ausgeprägt. Lediglich bei Spannkanaal γ zeigt sich im vorderen Bereich ($y = [0; 20]$ cm) eine minimale Verringerung der Tiefenanzeige. Diese Ausprägung ist jedoch zu gering, um sie unmittelbar auf eine mangelhafte Injektion oder auf eine Defizienz im Hüllrohrinneren zurückzuführen.

Im unteren Teil der Abbildung ist die C-Bildprojektion dargestellt. Diese zeigt die Amplitudenverteilung über den relevanten Tiefenbereich der Spannkannäle entlang der Messfläche. Die Lage der C-Projektion im Volumen wird in der dreidimensionalen Darstellung (rechts) ersichtlich; links ist die Überlagerung mit der Plandarstellung dargestellt. Die Amplitudenverteilung der Spannkannäle ist insgesamt weitgehend homogen. Spannkanaal γ weist zwar eine geringfügig höhere Amplitude auf als Spannkanaal α und β , der Unterschied ist jedoch marginal und liefert auch hier keinen eindeutigen Hinweis auf eine Kavität bzw. Injektionsmangel. Auffällig ist lediglich, dass die lokal erhöhte Amplitude mit der zuvor beobachteten minimalen Verringerung der Tiefenlage im Tiefenprofil korrespondiert.

Eine abschliessende Klärung dieses Effekts konnte im Rahmen der Untersuchung nicht erfolgen. Die Beobachtung wurde dokumentiert und kann bei Bedarf in einer weiterführenden Analyse Berücksichtigung finden. Da das Phänomen nur geringfügig ausgeprägt war, erscheint die Einleitung zusätzlicher Massnahmen gegenwärtig nicht erforderlich; im Bedarfsfall könnten jedoch ergänzende zerstörungsfreie oder minimalinvasive Prüfmethoden in Erwägung gezogen werden.

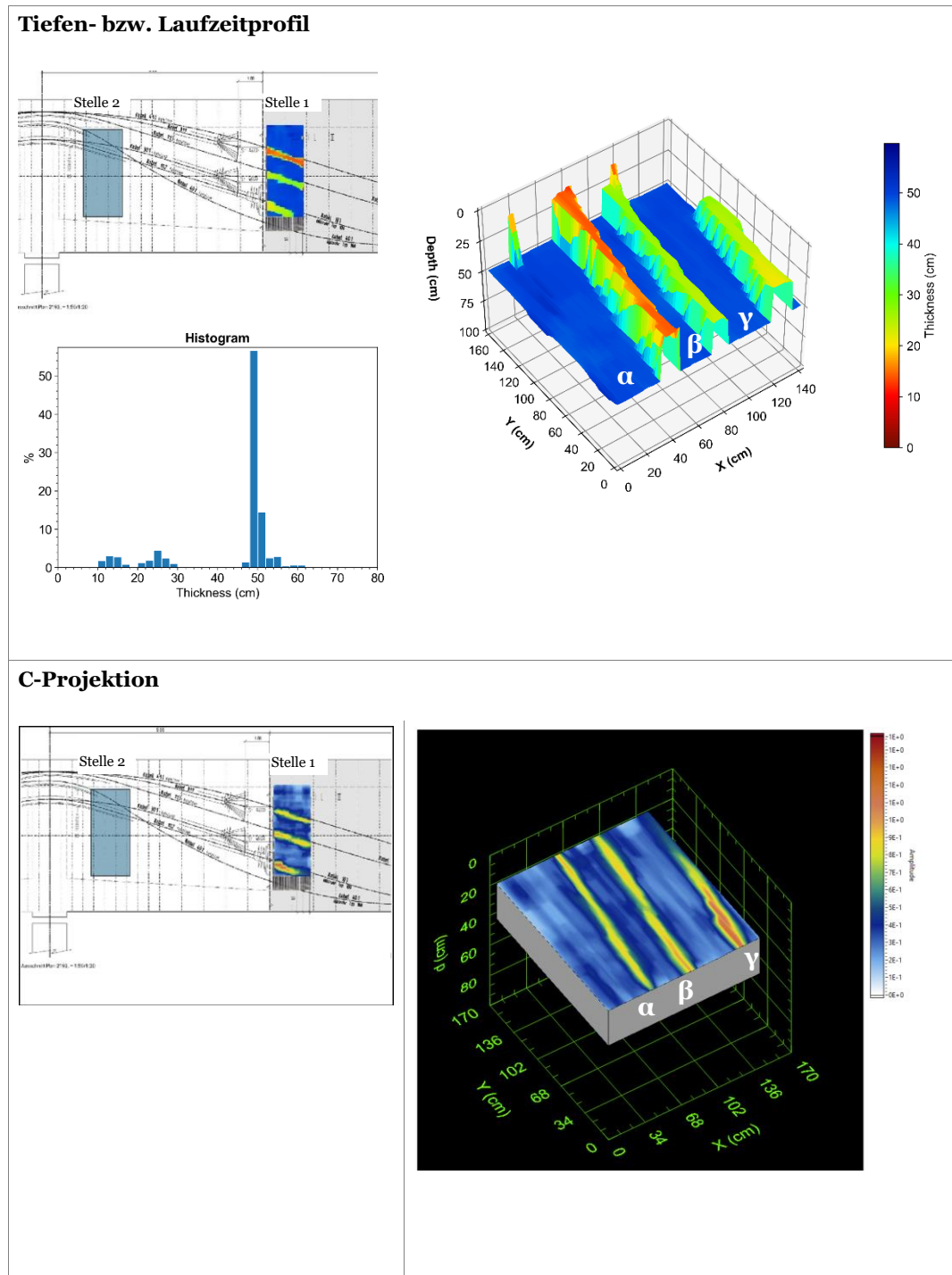


Abbildung 36: Ultraschall-Ergebnisdarstellung Reppischtalbrücke Messfeld 1. Oben: Auswertung des Tiefenprofils als 3D-Darstellung (rechts), Überlagerung mit Situationsplan und Histogramm (links). Unten: Amplitudenbasiertes C-Bild als 3D-Darstellung (rechts) und Überlagerung mit Situationsplan (links).

4.2.1.4 Messstelle 1 – Ultraschall (System-2)

Die Messungen mit System 2 wurden ebenfalls entlang eines definierten Messrasters durchgeführt. Das Gerät wurde analog zu System 1 ausgerichtet, wobei die Längsachse des Messkopfes vertikal positioniert war und die Spannkanele überwiegend senkrecht, jedoch nicht exakt orthogonal, kreuzte. Die Koordinatenachsen folgen der Konvention des Messsystems und der Analysesoftware: Die Achse, entlang derer das Gerät

linienförmig geführt wird, ist als x-Achse definiert und entspricht der vertikalen Achse des Bauwerks; die orthogonale Richtung, in der die parallelen Messlinien gegeneinander versetzt werden, ist die y-Achse. Der Messpunktabstand beträgt $\Delta x = 10$ cm, der Linienabstand $\Delta y = 10$ cm.

Abbildung 37 bietet eine Übersichtsdarstellung: links die Überlagerung des C-Bildes mit einer fotografischen Aufnahme der Messstelle, rechts die schematische Darstellung der Gerätekonfiguration. Das eigentliche C-Bild ist in Abbildung 38 wiedergegeben und zeigt die Amplitudenverteilung im relevanten Tiefenbereich zur Erfassung der Spannkanaäle entlang der Messfläche.

Bei Spannkanaal α ist eine leicht erhöhte Amplitude erkennbar, die sich jedoch über die gesamte Länge des Kanals weitgehend homogen ausprägt. Spannkanaal β weist demgegenüber eine deutlich geringere Amplitudenlage auf. Für Spannkanaal γ ist im vorderen Bereich (ca. $x = [0; 30]$ cm) eine geringfügig erhöhte Amplitude auszumachen. Dieses Ergebnis steht in hoher Übereinstimmung mit den Beobachtungen, die unter Einsatz von System 1 an derselben Stelle für Spannkanaal γ dokumentiert wurden.

Eine eindeutige Indikation für einen Injektionsmangel lässt sich aus diesen Beobachtungen nicht ableiten. Gleichwohl ist der Befund als Beobachtungspunkt zu dokumentieren und bei weiterführender Analyse in Betracht zu ziehen.

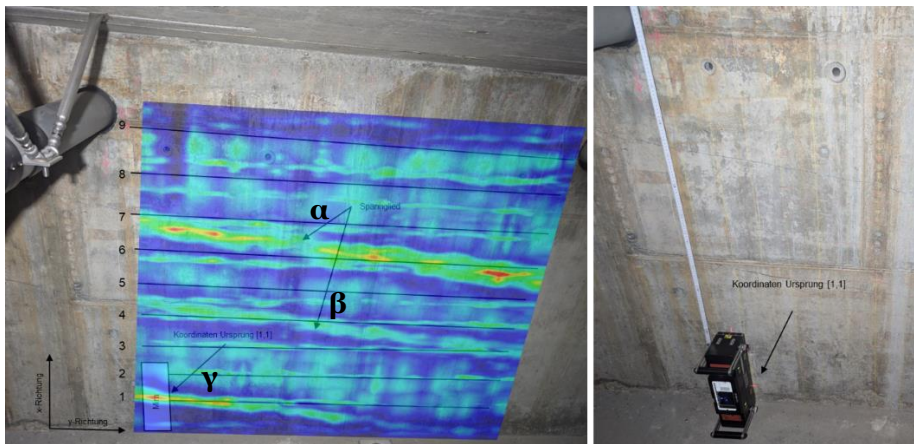


Abbildung 37: Ultraschall (System-2) Übersichtsdarstellung für Messfeld 1 an der Reppischtalbrücke. Links: Überlagerung des amplitudenbasierten C-Bildes im relevanten Tiefenbereich der Spannglieder. Rechts: Ausrichtung des Ultraschallgerätes entlang vertikaler Messlinien.

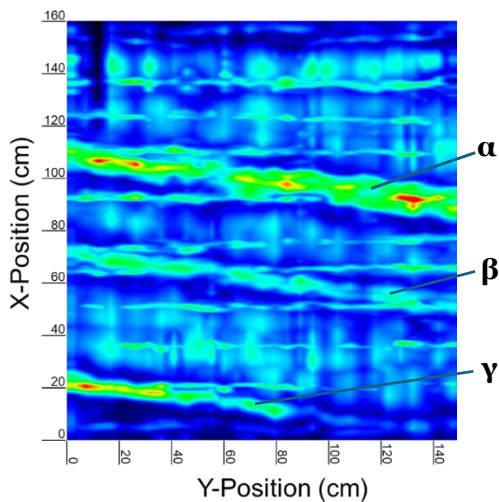


Abbildung 38: C-Bildprojektion des für die Spanngänge relevanten Tiefenbereiches, gewonnen mit Ultraschall (System-2) für Messfeld 1 an der Reppischtalbrücke.

4.2.2 Messstelle 2

Die Messstelle 2 befindet sich im gleichen Brückenfeld wie Messstelle 1 (vgl. Darstellung der Messsituation in Abbildung 39, links), jedoch in unmittelbarer Nähe des Auflagers und damit im Bereich der Spanngliedhochlage. Eine Orientierung zur lokalen Messsituation liefert Abbildung 39, rechts. Diese Stelle wurde ergänzend zu den Messstellen im Feldinnern (Messstellen 1, 3 und 4) der Studie hinzugefügt, da sie diese um eine neue Situation ergänzt, die beachtenswert erscheint, nämlich nahe dem Hochpunkt, der allgemein ein erhöhtes Risiko insuffizienter Injektion während des Baus birgt. Gemäss dieser geometrischen Lage ist allerdings demzufolge nur ein einzelnes Spannglied (301) der Messung zugänglich. Zudem ist die Wanddicke mit 100 cm (Soll gemäss Plan) verhältnismässig hoch und stellt sich für die zerstörungsfreie Prüfung anspruchsvoll dar. Das gilt insbesondere hinsichtlich aller Betrachtungen, welche die Rückwand- bzw. Bauteildickenanzeige als Referenz bedingen, was insbesondere für Impakt-Echo-Messungen der Fall ist.

Insofern fokussierte sich die Datenerfassung an diesem Messfeld auf Radar-1 (zur Spanngängelokalisation und Anzeichnen) und Ultraschall-2.

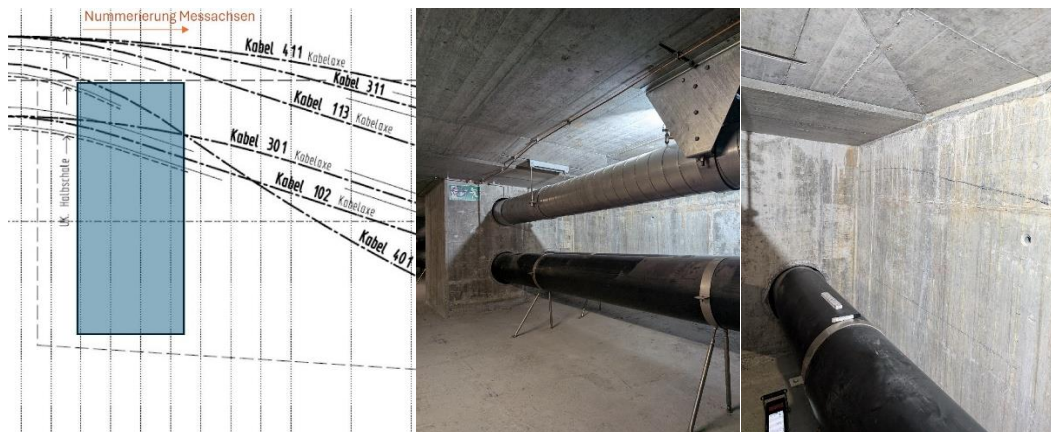


Abbildung 39: Messstelle 2 an der Reppischtalbrücke. Links: Detailsituation gemäss Plan. Mitte: Orientierungsfoto der Messstelle. Rechts: Detailfoto mit angezeichnetem Spannglied.

4.2.2.1 Messstelle 2 – Radar

Die Untersuchungen mit System Radar-1 wurden auch hier als vorbereitende Massnahme zur Unterstützung der nachfolgenden Ultraschall- und Impakt-Echo-Prüfungen durchgeführt. Hauptziel war es, den Verlauf des vorhandenen Spanngliedes im Bereich der Messstelle eindeutig zu bestimmen.

Anstelle einer kontinuierlichen Datenerfassung erfolgte die Arbeit in situ: Die mit vertikal geführten Radarlinien ermittelten Positionen des Spanngliedes wurden unmittelbar vor Ort lokalisiert und an der Bauteiloberfläche markiert. Damit stand eine präzise Orientierungshilfe zur Verfügung, die eine gezielte und effiziente Durchführung der weiterführenden zerstörungsfreien Messungen ermöglichte.

4.2.2.2 Messstelle 2 -Impakt-Echo

Mit dem System Impakt-Echo wurden an dieser Messstelle Versuchsmessungen durchgeführt, um die grundsätzliche Anwendbarkeit des Verfahrens in diesem Dickenbereich zu evaluieren. Die Ergebnisse zeigten jedoch, dass die für das Verfahren zentrale Bauteildickenanzeige in einer Tiefe von rund 1 m nur marginal erkennbar ist. Da diese Anzeige üblicherweise als Referenz für die Interpretation herangezogen wird, stellt dies eine wesentliche Einschränkung der Einsatzfähigkeit dar.

Abbildung 40 verdeutlicht diesen Sachverhalt; dargestellt ist die Mittelung der erhaltenen FFT-Amplitudenspektren einer exemplarischen vertikalen Messlinie. Es zeigt sich deutlich, dass die charakteristische Resonanz der Bauteildicke nur äusserst schwach ausgeprägt ist.

Grundsätzlich wäre der Einsatz grösserer Impaktoren, etwa in Form eines Kugelhammers, denkbar, um eine höhere Anregungstiefe zu erzielen. Allerdings ist in diesem Fall von einer geringen Sensitivität hinsichtlich der Detektion und Inspektion der Spannkäule auszugehen, so dass auf weiterführende Untersuchungen dieser Art im Rahmen dieser lediglich ergänzenden Messstelle verzichtet wurde.

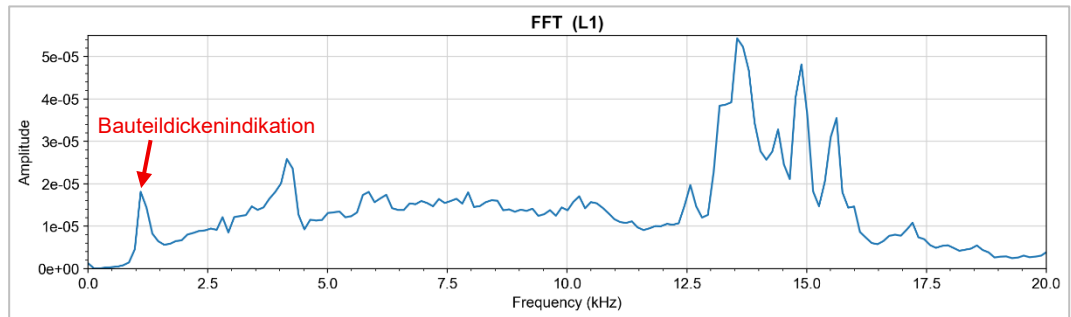


Abbildung 40: Mittelung aller FFT-Amplitudenspektren entlang einer exemplarischen vertikalen Messlinie an Stelle 1, gemessen mit dem System Impakt-Echo.

4.2.2.3 Messstelle 2 – Ultraschall (System-1)

An dieser Stelle liegen keine Daten des Ultraschallsystems-1 vor, so dass sich die Auswertung auf das System-2 fokussiert.

4.2.2.4 Messstelle 2 – Ultraschall (System-2)

Die Messungen mit System 2 wurden analog zu den Untersuchungen an Messstelle 1 entlang eines definierten Messrasters durchgeführt. Das Gerät wurde in identischer Orientierung ausgerichtet, wobei die Längsachse des Messkopfes vertikal positioniert war und das Spannglied überwiegend senkrecht, jedoch nicht exakt orthogonal, gekreuzt wurde. Die Koordinatenachsen entsprechen der Konvention des Messsystems und der Analysesoftware: Die Achse, entlang derer das Gerät linienförmig geführt wird, ist als x-Achse definiert und entspricht der vertikalen Achse des Bauwerks; die orthogonale Richtung, in der die parallelen Messlinien gegeneinander versetzt werden, ist die y-Achse. Der Messpunktabstand beträgt $\Delta x = 10$ cm, der Linienabstand $\Delta y = 10$ cm.

Abbildung 41 bietet eine Übersichtsdarstellung der Auswertung im Sinne von Überlagerungen der resultierenden C-Bilder mit der fotografischen Aufnahme der Messstelle. Links ist der Tiefenbereich $z = [0; 105]$ cm abgebildet, was eine integrale Darstellung des gesamten Volumens liefert. Hierin ist die Armierung vor dem Spannkanaal erkennbar.

Die eigentlichen C-Bilder sind in Abbildung 42 dargestellt. Das linke Bild liefert die integrale Darstellung des gesamten Bauteilvolumens, während das rechte Bild den Spannkanaalbereich fokussiert. In dieser Darstellung zeigt sich die Amplitudenverteilung des Spanngliedes entlang der Messfläche. Das einzelne Spannglied α bildet sich darin klar und durchgängig ab. Die Amplitudenlage weist eine gleichmässige, homogene Ausprägung mit moderater Intensität auf, ohne signifikante Variationen entlang der Länge. Auffälligkeiten, die auf eine Kavität oder eine mangelhafte Verfüllung im Sinne eines Injektionsmangels oder auch einen unvollständigen Verbundzustand schliessen liessen, sind hierin nicht erkennbar. Der Befund kann als unauffällig bewertet werden.

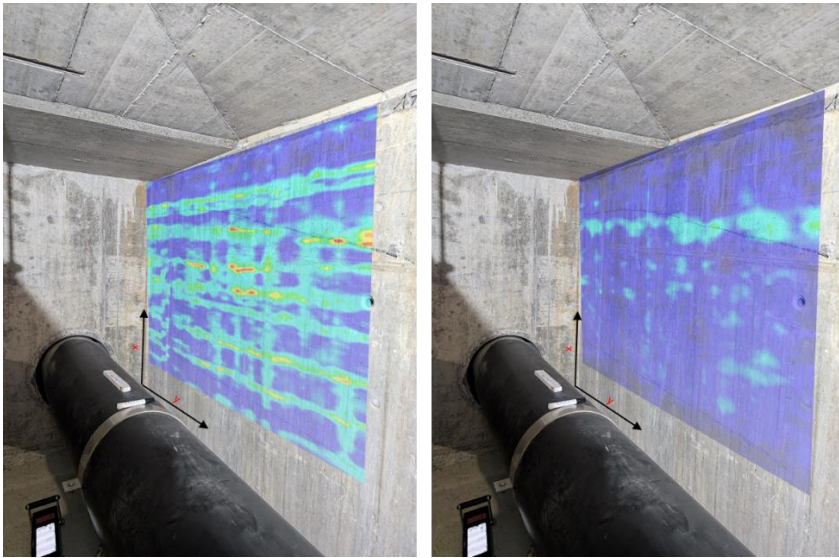


Abbildung 41: Ultraschall (System-2)-Übersichtsdarstellung für Messfeld 1 an der Reppischtalbrücke. Überlagerung des amplitudenbasierten C-Bildes im relevanten Tiefenbereich der Spannglieder.

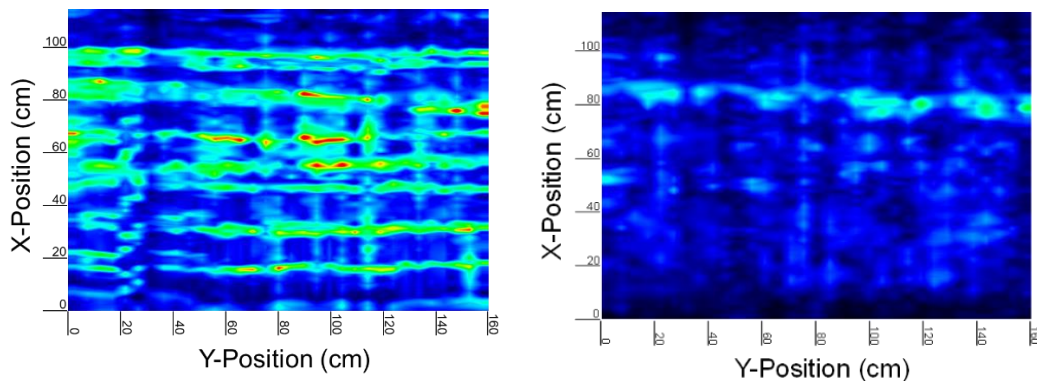


Abbildung 42: C-Bildprojektionen des Ultraschallsystems-2 an Messfeld 2. Links: $z = [0; 105]$ cm. Rechts: $z = [15; 35]$ cm.

4.2.3 Messstelle 3

Die Messstelle 3 befindet sich im aufsteigenden Bereich der Spannglieder eines weiteren Brückenfeldes. An dieser Position verlaufen zwei Spannglieder, die entsprechend ihrer vertikalen Lage von oben nach unten als α und β bezeichnet werden. Die planmäßige Wanddicke beträgt an dieser Stelle 50 cm. Eine Übersicht der lokalen Geometrie und Randbedingungen ist in Abbildung 43 dargestellt.

Die Untersuchung der Spannglieder erfolgte mit den Systemen Radar-1, Ultraschall-1, Ultraschall-2 und Impakt-Echo welche in den folgenden Abschnitten detailliert dargestellt werden.

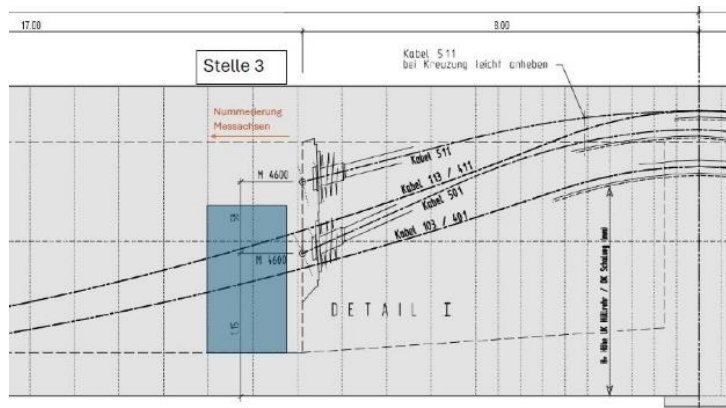


Abbildung 43: Messstelle 3 an der Reppischtalbrücke.

4.2.3.1 Messstelle 3 – Radar

Auch an Messstelle 3 wurden die vorbereitenden Untersuchungen mit dem System Radar-1 durchgeführt, analog zu den Messstellen 1 und 2. Ziel war wiederum die Lokalisierung des Verlaufs der Spannglieder als Grundlage für die nachfolgenden Ultraschall- und Impakt-Echo-Messungen.

Eine eigenständige Datenerfassung erfolgte auch hier nicht; die mit vertikal geführten Radarlinien detektierten Positionen der Spannglieder wurden unmittelbar vor Ort lokalisiert und auf der Bauteiloberfläche markiert. Damit wurde eine konsistente Grundlage für die weiterführenden Untersuchungen geschaffen.

4.2.3.2 Messstelle 3 – Ultraschall (System 1)

Abbildung 44 zeigt die Ergebnisse der Ultraschallmessungen an Messstelle 3 der Reppischtalbrücke im Überblick. Im oberen Bereich der Abbildung ist das Tiefenprofil dargestellt, basierend auf den gemessenen Laufzeiten der dominanten Echos nach Rekonstruktion. Gezeigt werden eine dreidimensionale Darstellung des Profils (rechts), eine Überlagerung mit dem Plan der Messfläche (links unten) sowie ein Histogramm der Tiefenwerte (links oben). Die planmässige Wanddicke von 50 cm sowie die Position der Spannglieder bei etwa 15 cm Tiefe sind im Profil deutlich erkennbar. Die Lage der Spannkäme bildet sich im Tiefenprofil weitgehend gleichmässig ab. Signifikante Variationen oder Auffälligkeiten, die auf eine Kavität oder einen Injektionsmangel hindeuten könnten, sind nicht ersichtlich. Insbesondere wurde keine Stelle mit sprunghaft verringerter Tiefenanzeige festgestellt, die auf eine lokal reduzierte Laufzeit bzw. ein früheres Echo infolge einer Reflexion an einer potenziellen Luftgrenzschicht im Hüllrohrinneren schliessen liesse.

Im unteren Teil der Abbildung ist die C-Bildprojektion wiedergegeben, die eine Amplitudendarstellung über den relevanten Tiefenbereich der Spannglieder entlang der Messfläche liefert. Die räumliche Lage der C-Projektion im Volumen geht aus der dreidimensionalen Darstellung (rechts) hervor, während links die Überlagerung mit der Plandarstellung gezeigt ist. Die Spannkäme weisen in ihrer Amplitude eine weitgehend homogene Ausprägung auf, wobei Spannkamm α eine geringfügig höhere Amplitude zeigt als Spannkamm β . Eine eindeutige Ursache für diesen Unterschied konnte nicht festgestellt werden. Zudem weist Spannkamm α eine gleichmässig

konstante Darstellung auf, so dass keine lokale Anomalie im Sinne einer insuffizienten Verfüllung angenommen werden kann.

Eine grossflächig unzureichende Verfüllung, die sich über den gesamten Messbereich erstrecken könnte, lässt sich anhand der Darstellung zwar nicht mit letzter Sicherheit ausschliessen. Da der beobachtete Amplitudenunterschied jedoch nicht mit einer verkürzten Laufzeit im Tiefenprofil einhergeht, spricht dies nicht für das Vorliegen eines umfassenden Bereiches mangelhafter Verfüllung. Eine abschliessende Klärung des Amplitudenunterschieds zwischen α und β war im Rahmen der vorliegenden Studie nicht möglich und sollte gegebenenfalls in weiterführenden Untersuchungen berücksichtigt werden.

Die dargestellten Untersuchungen machen zudem deutlich, dass die Beurteilung stets mehrere Darstellungen heranziehen sollte, um die Gesamtheit der Situation zu erfassen.

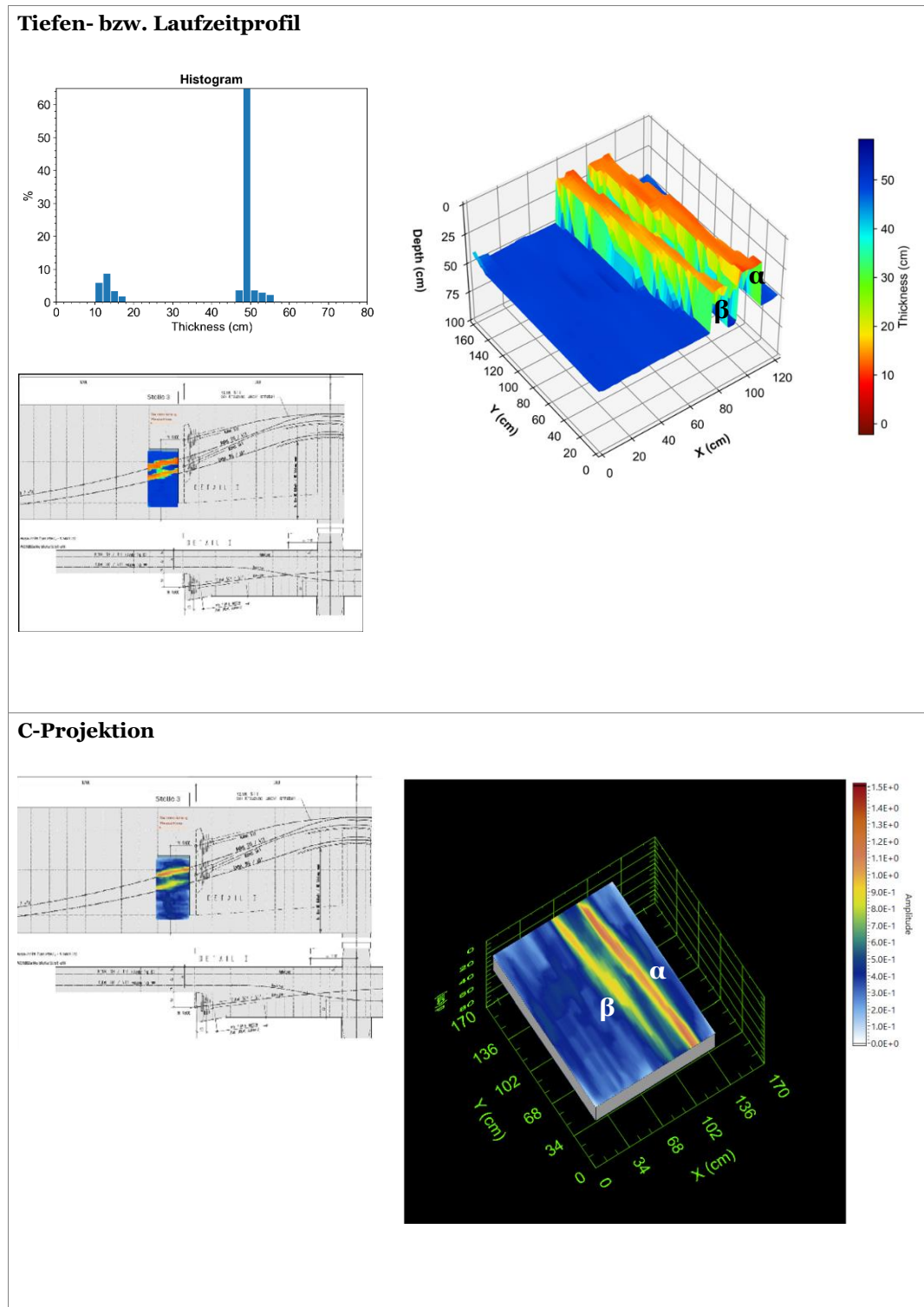


Abbildung 44: Ultraschall-Ergebnisdarstellung Reppischtalbrücke Messfeld 3. Oben: Auswertung des Tiefenprofils als 3D-Darstellung (rechts), Überlagerung mit Situationsplan und Histogramm (links). Unten: Amplitudenbasiertes C-Bild als 3D-Darstellung (rechts) und Überlagerung mit Situationsplan (links).

Die Messungen mit System 2 wurden an Messstelle 3 analog zu den Untersuchungen an den vorangegangenen Messstellen entlang eines definierten Messrasters durchgeführt. Das Gerät wurde in identischer Orientierung eingesetzt, wobei die Längsachse des Messkopfes vertikal positioniert war und die Spannglieder überwiegend senkrecht,

jedoch nicht exakt orthogonal, kreuzte. Die Koordinatenachsen folgen der Konvention des Messsystems und der Analysesoftware: Die Achse, entlang derer das Gerät linienförmig geführt wird, ist als x-Achse definiert und entspricht der vertikalen Achse des Bauwerks; die orthogonale Richtung, in der die parallelen Messlinien gegeneinander versetzt werden, entspricht der y-Achse. Der Messpunkt Abstand beträgt $\Delta x = 10$ cm, der Linienabstand $\Delta y = 10$ cm.

Abbildung 45 zeigt eine Übersichtsdarstellung der Auswertung in Form einer Überlagerung des resultierenden integralen C-Bildes. Die eigentlichen C-Bilder sind in Abbildung 46 wiedergegeben: Das linke Bild liefert die integrale Darstellung des gesamten Bauteilvolumens im Bereich $z = [0; 105]$ cm, während das rechte Bild gezielt den Spannkanaalbereich $z = [10; 15]$ cm fokussiert.

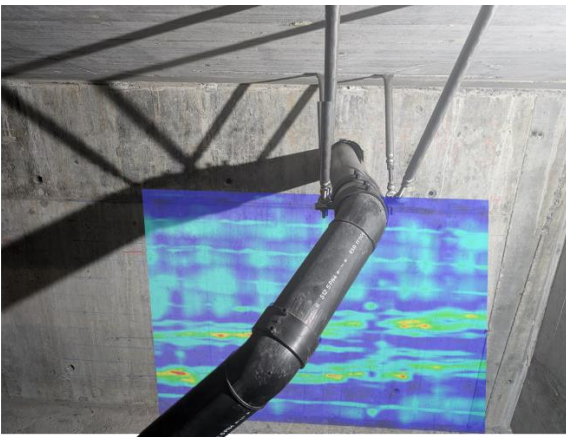


Abbildung 45: Ultraschall (System-2) Übersichtsdarstellung für Messfeld 3 an der Reppischtalbrücke. Überlagerung des integralen amplitudenbasierten C-Bildes mit der fotografischen Aufnahme der Messstelle.

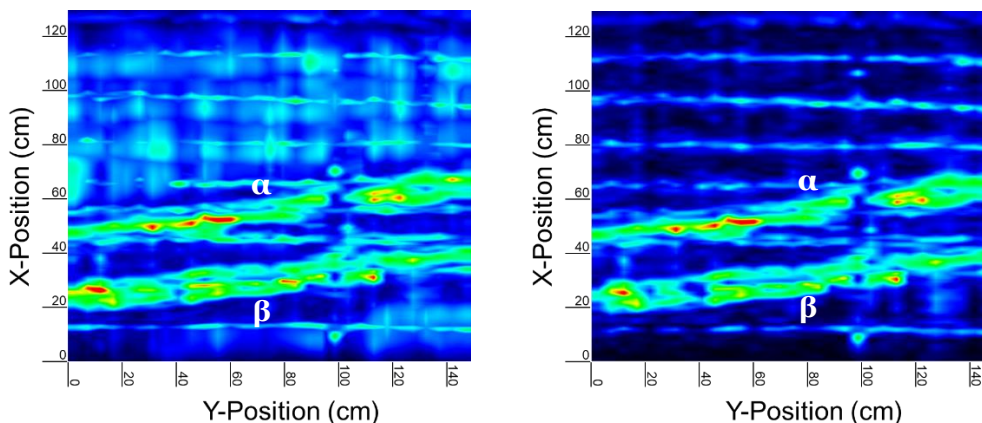


Abbildung 46: C-Bildprojektionen des Ultraschallsystems-2 an Messfeld 3. Links: $z = [0; 105]$ cm. Rechts: $z = [10; 15]$ cm.

4.2.3.3 Messstelle 3 – Impakt-Echo

An der Messstelle 3 wurden Impakt-Echo-Untersuchungen analog zur Vorgehensweise bei Messstellen 1 und unter Verwendung einer manuellen Anregung mit einem Impaktor von 10 mm Kugeldurchmesser durchgeführt. Die Messungen erfolgten entlang eines Messrasters, bestehend aus parallel geführten, vertikal orientierten Messlinien, die

die Spannkanäle kreuzen. Entlang jeder Messlinie wurden Einzelmessungen in einem äquidistanten Inkrement von 2 cm akquiriert.

In Übereinstimmung mit der konventionellen Achsdefinition des Impakt-Echo-Systems wird die x-Achse als Orientierungsachse entlang der Messlinien festgelegt, d. h. sie definiert die Abfolge der diskreten Messpunkte innerhalb einer Linie. Die y-Achse verläuft orthogonal hierzu und repräsentiert die Richtung, in der die parallelen Messlinien das zweidimensionale Messraster konstituieren. Der Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Messpunkten beträgt somit $\Delta x = 2$ cm, der Abstand zwischen zwei benachbarten Messlinien $\Delta y = 10$ cm. Eine Messposition bezeichnet hierbei die Position des Sensors während die Impakt-Anregung lateral versetzt in y-Richtung mit einem Offset von etwa 5 cm erfolgt.

Die Spannglieder lassen sich deutlich detektieren, und zwar nicht als Rückwandverschiebung sondern als direkte Anzeige im Volumen mit hoher Amplitude. Dementsprechend ist die Erstellung des Tiefenprofils möglich bzw. bilden sich die Spannkanäle deutlich auch im Tiefenprofil ab und zeigen sich im Kontrast zur Bauteildickenanzeige. An den Messpositionen der Spannglieder weisen die direkten Anzeigen aus dem Volumen (bei Frequenzen, die über der Bauteildickenfrequenz liegen) die höchsten Amplituden auf und stellen somit die dominanten Anzeigen dar.

In Abbildung 47 ist das Tiefenprofil dargestellt. Der Verlauf der beiden Spannglieder bildet sich hierin deutlich im Volumen beruhend auf Frequenzanzeigen grösser als die Bauteildickenfrequenz ab. Allerdings ist eine gewisse Variation erkennbar.

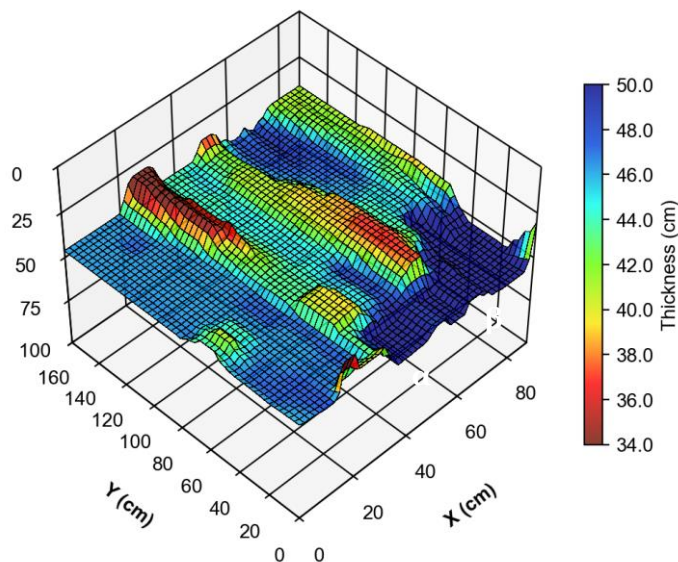


Abbildung 47: Tiefenprofildarstellung der Impakt-Echo-Untersuchung an Messstelle 3 der Reppischtalbrücke.

Aufgrund der vorhandenen direkten Anzeigen der Spannkanäle können diese unter Berücksichtigung von Gleichung 3 und Gleichung 4 ausgewertet werden. Abbildung 48 zeigt exemplarisch die Signale der beiden Spannkanäle in den unterschiedlichen Bereichen. Daraus lassen sich die charakteristischen Frequenzen eindeutig erkennen.

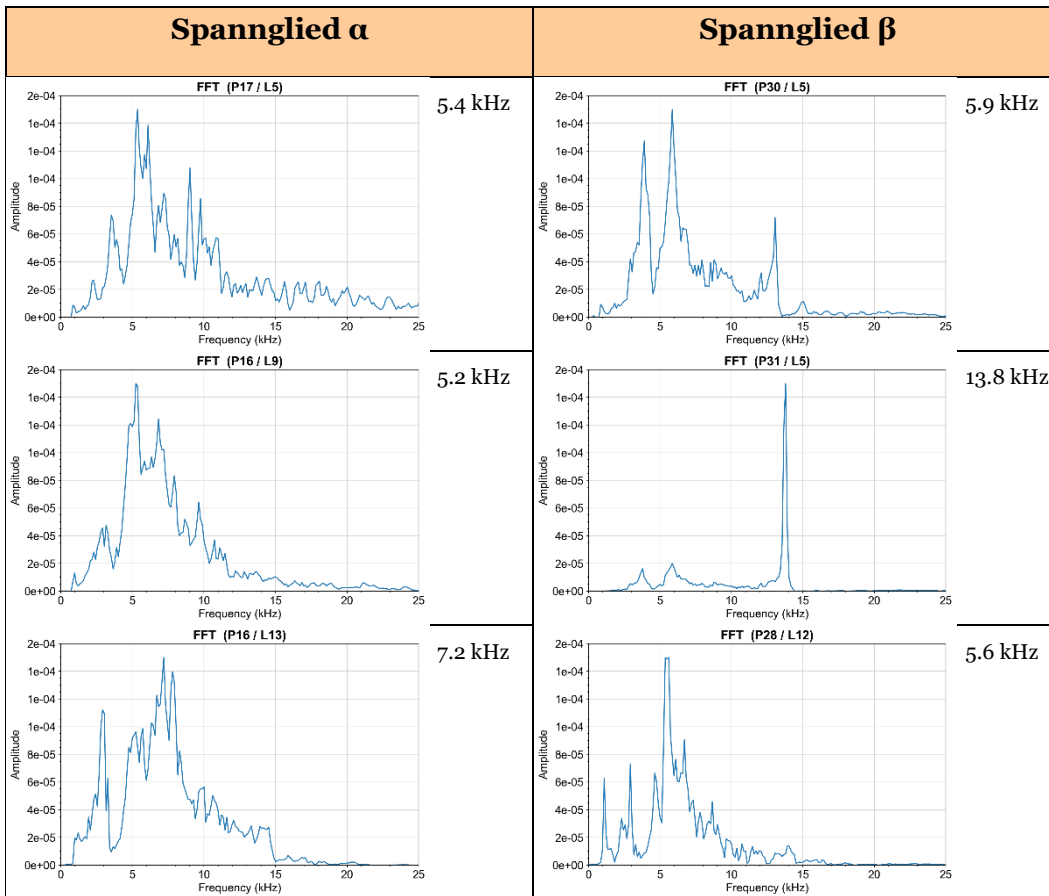


Abbildung 48: Charakteristische FFT-Amplitudenspektren gewonnen an Messpositionen entlang der beiden Spannglieder in Messfeld 3.

Die Tabelle 4 stellt die ermittelten charakteristischen Frequenzen den theoretischen Referenzwerten gemäss Gleichung (3) und Gleichung (4) gegenüber, basierend auf der planmässigen Solltiefe der Spannkanele von $d = 15 \text{ cm}$ sowie einer ermittelten Schallausbreitungsgeschwindigkeit von 4400 m/s .

Analyse der Spannkanealindikationen				
Spannglied	Solltiefe z	Gemessene Frequenz f	Gl.3: $f = c/2d$	Gl.4: $f = c/4d$
α	15 cm	5.4 kHz	14.6 kHz	7.3 kHz
		5.2 kHz		
		7.2 kHz		
β	15 cm	5.9 kHz	14.6 kHz	7.3 kHz
		13.8 kHz		
		5.6 kHz		

Tabelle 4: Impakt-Echo-Analyse der Spannkanealindikationen in Messfeld 3 gegenüber Referenzwerten aus Gl. 3 und Gl. 4 zwecks Orientierung.

Eine präzise Analyse der Ergebnisse gestaltet sich jedoch schwierig, zumal die Vorgehensweise einer Diskriminierung nach Gleichung (3) gegenüber Gleichung (4) nach heutigem fachlichem Kenntnisstand umstritten ist. Auffällig ist, dass sich die Spannglieder bei markanten Frequenzen im Bereich von etwa 5.5 bis 7.2 kHz zeigen. Nach (4) ergibt sich ein theoretischer Referenzwert von 7.3 kHz, was eine partielle Übereinstimmung mit den charakteristischen Messfrequenzen darstellt und nach der ursprünglichen, heute kritisch diskutierten Theorie auf eine vollständige Injektion, d. h. das Fehlen einer Grenzschicht zu Luft, hinweisen würde. Vereinzelt wurden zudem Signale mit markanten Frequenzen um 13.8 kHz identifiziert. Dieser Wert liegt in unmittelbarer Nähe zum theoretischen Referenzwert von 14.6 kHz nach (3), der nach der ursprünglichen Interpretation das Vorhandensein einer Grenzschicht zur Luft und somit potenziell eine mangelhafte Verfüllung oder auch eine Delamination im Hüllrohrinneren anzeigen könnte.

Angesichts der methodischen Unsicherheiten und der kontroversen Diskussion um die Gültigkeit dieser Interpretationsansätze lässt sich aus den vorliegenden Messungen jedoch keine belastbare Aussage zur Qualität der Verfüllung ableiten.

Ergänzend zur reinen Analyse der charakteristischen Frequenzen zeigt Abbildung 49 eine amplitudenbasierte C-Bildprojektion, in der die Spannglieder innerhalb des Volumens anhand ihrer Amplituden abgebildet werden. Dabei ist erkennbar, dass beide Spannglieder im vorderen Bereich – d. h. bei kleinen y-Positionen, also am Beginn des Messfeldes – vergleichsweise geringe Amplituden aufweisen, die im hinteren Teil des Messfeldes deutlich ansteigen.

Aus dieser Darstellung lassen sich jedoch keine konkreten Hinweise auf das Vorliegen einer mangelhaften Verfüllung oder einer Grenzschicht zu Luft ableiten.

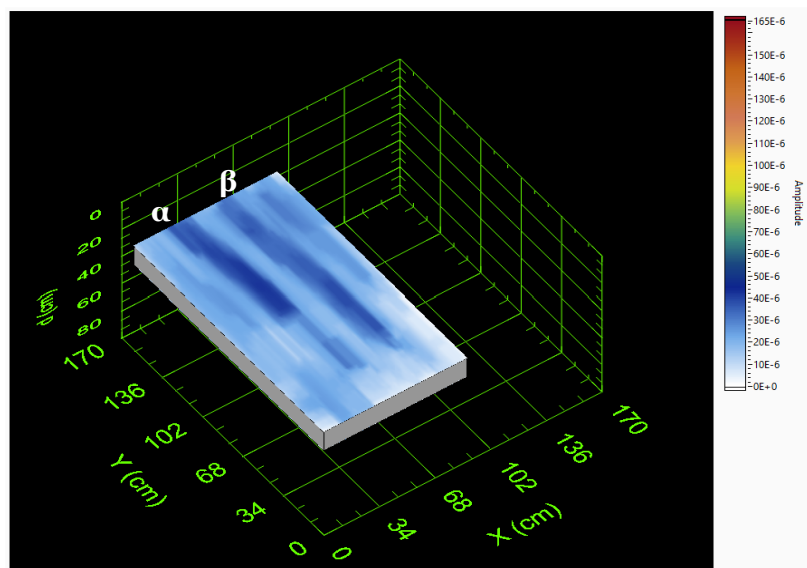


Abbildung 49: C-Bildprojektion der Spannglieder in Messfeld 3.

4.2.4 Stelle 4

Die Messstelle 4 befindet sich in einer der Messstelle 3 analogen Position, jedoch im darauffolgenden Brückenfeld. Auch hier liegt die Messstelle im aufsteigenden Bereich der Spannglieder. An dieser Position verlaufen zwei Spannglieder, die entsprechend ihrer vertikalen Lage von oben nach unten mit α und β bezeichnet werden. Die planmässige Wanddicke beträgt 50 cm. Eine Übersicht der lokalen Geometrie und Randbedingungen ist in Abbildung 50 dargestellt.

Die Untersuchungen der Spannglieder wurden mit den Systemen Radar-1, Ultraschall-1, Ultraschall-2 und Impakt-Echo durchgeführt. Die Ergebnisse werden in den nachfolgenden Abschnitten detailliert dargestellt.



Abbildung 50: Messstelle 4 an der Reppischtalbrücke.

4.2.4.1 Messstelle 4 – Radar

Auch an Messstelle 4 wurden die vorbereitenden Untersuchungen mit dem System Radar-1 durchgeführt, in Analogie zu den Messstellen 1 bis 3. Ziel war primär die Lokalisierung des Verlaufs der Spannglieder als Grundlage für die nachfolgenden Ultraschall- und Impakt-Echo-Messungen.

Darüber hinaus erfolgte eine Datenerfassung entlang eines definierten Messrasters. Das daraus rekonstruierte C-Bild, welches den Verlauf der Spannglieder abbildet, ist in Abbildung 50 dargestellt und dort mit dem Situationsplan überlagert. Zusätzlich wurden die detektierten Positionen der Spannglieder unmittelbar vor Ort lokalisiert und auf der Bauteiloberfläche markiert. Damit stand eine konsistente Grundlage für die weiterführenden Untersuchungen zur Verfügung.

4.2.4.2 Messstelle 4 – Ultraschall (System 1)

Abbildung 51 zeigt die Ergebnisse der Ultraschallmessungen mit System 1 an Messstelle 4 der Reppischtalbrücke im Überblick, in direkter Analogie zu den Untersuchungen an Messstelle 3. Im oberen Bereich der Abbildung ist das Tiefenprofil dargestellt, basierend auf den gemessenen Laufzeiten der dominanten Echos nach Rekonstruktion. Gezeigt werden eine dreidimensionale Darstellung des Profils (rechts), eine Überlagerung mit dem Plan der Messfläche (links oben) sowie ein Histogramm der Tiefenwerte (links unten). Die planmässige Wanddicke von 50 cm sowie die Lage der Spannglieder in etwa 15 cm Tiefe sind im Profil klar erkennbar. Die Position der Spannkanäle bildet sich im Tiefenprofil weitgehend gleichmässig ab. Signifikante Variationen oder Auffälligkeiten, die auf eine Kavität oder einen Injektionsmangel hinweisen könnten, sind nicht ersichtlich. Insbesondere wurde keine Stelle mit sprunghaft verringerter

Tiefenanzeige festgestellt, die auf eine lokal reduzierte Laufzeit bzw. ein früheres Echo infolge einer Reflexion an einer potenziellen Luftgrenzschicht im Hüllrohrinneren schliessen liesse.

Im unteren Teil der Abbildung ist die C-Bildprojektion wiedergegeben, welche die Amplitudendarstellung über den relevanten Tiefenbereich der Spannglieder entlang der Messfläche liefert. Die räumliche Lage der C-Projektion im Volumen geht aus der dreidimensionalen Darstellung (rechts) hervor, während links die Überlagerung mit der Plandarstellung zu sehen ist.

Die Ergebnisse bestätigen die bereits an Messstelle 3 gewonnenen Beobachtungen: Die Spannkänäle weisen eine weitgehend homogene Amplitudenlage auf, wobei Spannkänäal α eine geringfügig höhere Amplitude zeigt als Spannkänäal β . Eine eindeutige Ursache für diesen Unterschied konnte auch hier nicht festgestellt werden. Dass sich das Muster an zwei unmittelbar benachbarten Messstellen in nahezu identischer Weise wiederholt, legt nahe, dass es sich um einen systematischen oder bauteilbedingten Effekt handelt. Das Vorliegen einer Anomalie im Sinne einer mangelhaften Verfüllung erscheint somit nicht angezeigt.

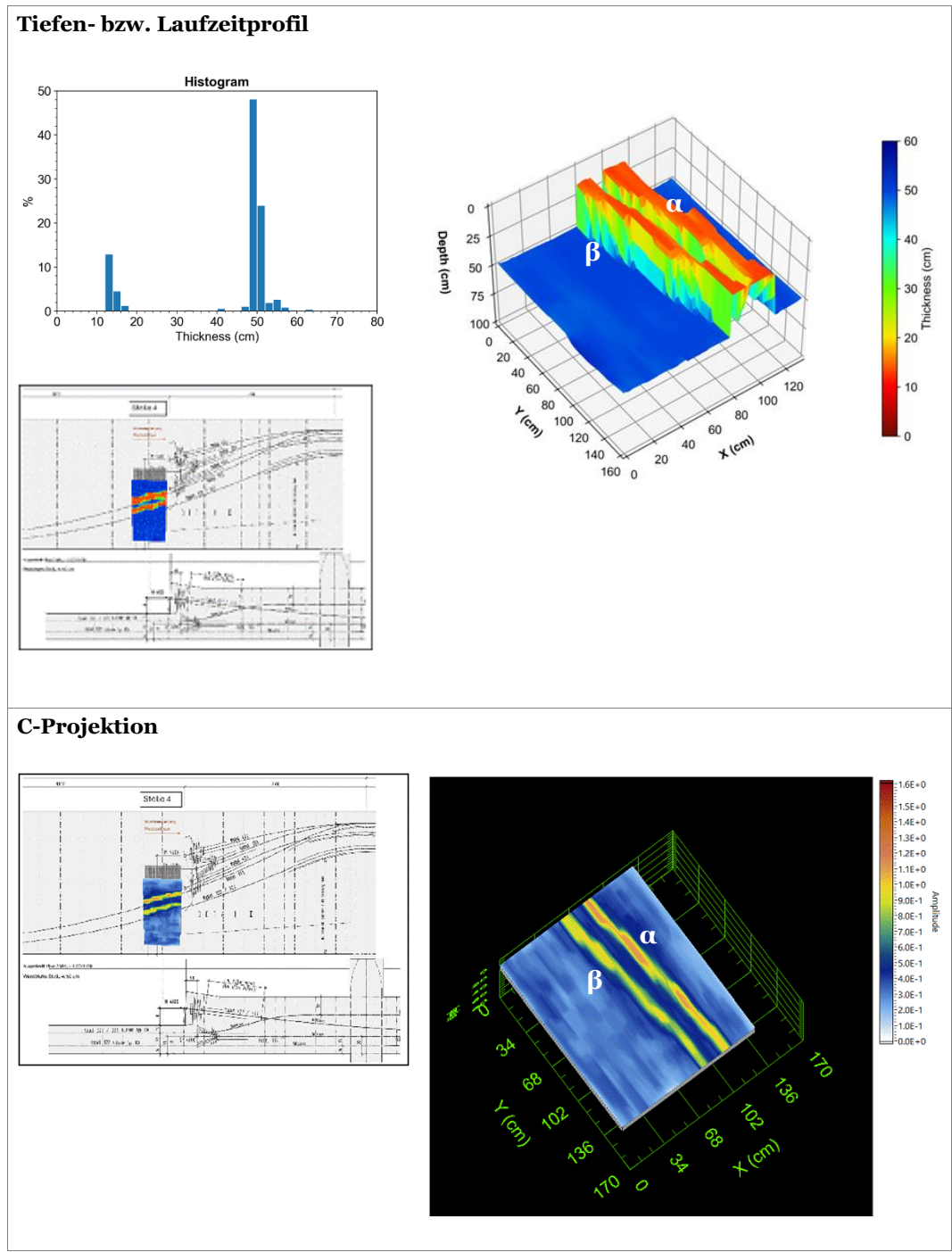


Abbildung 51: Ultraschall-Ergebnisdarstellung Reppischtalbrücke Messfeld 4. Oben: Auswertung des Tiefenprofils als 3D-Darstellung (rechts), Überlagerung mit Situationsplan und Histogramm (links). Unten: Amplitudenbasiertes C-Bild als 3D-Darstellung (rechts) und Überlagerung mit Situationsplan (links).

4.2.4.3 Messstelle 4 – Ultraschall (System 2)

Die Untersuchungen mit System 2 wurden an Messstelle 4 (in Analogie zu den vorangegangenen Messstellen) entlang eines definierten Messrasters durchgeführt. Das Gerät war dabei identisch zu System 1 ausgerichtet: Die Längsachse des Messkopfes befand sich in vertikaler Position und kreuzte die Spannglieder überwiegend senkrecht, jedoch nicht exakt orthogonal. Die Koordinatenachsen entsprechen der Konvention des Messsystems und der Analysesoftware: Die Achse, entlang derer das Gerät

linienförmig geführt wird, definiert die x-Achse und entspricht der vertikalen Achse des Bauwerks; die orthogonale Richtung, entlang der die parallelen Messlinien versetzt sind, stellt die y-Achse dar. Der Messpunktabstand beträgt $\Delta x = 10$ cm, der Linienabstand $\Delta y = 10$ cm.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 52 als C-Bilder dargestellt. Links findet sich die integrale Darstellung des gesamten Bauteilvolumens im Bereich $z = [0; 60]$ cm, während rechts der Spannkanaalbereich $z = [10; 15]$ cm fokussiert wird. Die beiden Spannglieder α und β bilden sich darin deutlich und kontinuierlich ab. Die Amplitudenlage zeigt eine insgesamt gleichmässige, intensive Ausprägung. Lokale Schwankungen entlang der Längserstreckung sind zwar auszumachen, bleiben jedoch gering und erlauben keine Interpretation im Sinne einer Kavität, einer mangelhaften Verfüllung oder einer Defizienz des Verbundzustands. Damit bestätigen die Ergebnisse an Messstelle 4 die Beobachtungen aus Messstelle 3: Der Befund ist insgesamt als unauffällig und stabil einzustufen.

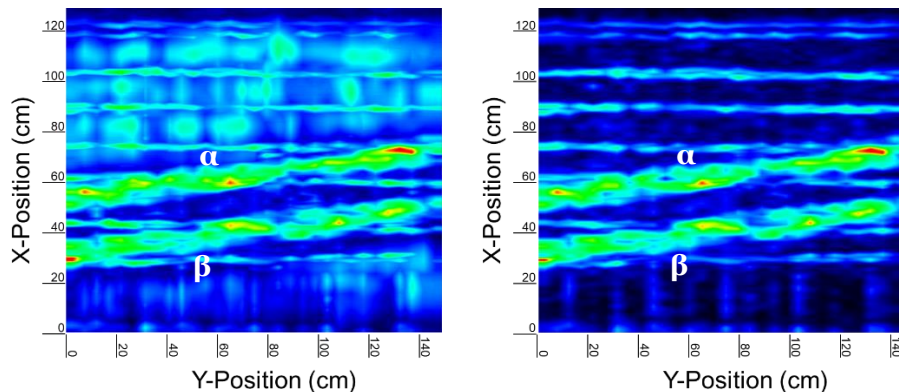


Abbildung 52: C-Bildprojektionen des Ultraschallsystems-2 an Messfeld 4. Links: $z = [0; 60]$ cm. Rechts: $z = [10; 15]$ cm.

4.2.4.4 Messstelle 4 – Impakt-Echo

An Messstelle 4 wurde für die Impakt-Echo-Messungen ein alternatives Vorgehen erprobt: Anstelle einer flächigen Rasteraufnahme folgte die Messung gezielt dem Verlauf des Spanngliedes, wie er zuvor durch die Radarmessungen markiert worden war. Auf diese Weise sollte eine erhebliche Effizienzsteigerung erzielt werden.

Dieses Vorgehen setzt jedoch voraus, dass die Messungen exakt auf dem Spannglied durchgeführt werden. Damit entfällt der direkte Vergleich zu einem benachbarten Bereich ohne Spannglied, in welchem die Rückwandreflexion als Referenz sichtbar wäre und durch den Kontrast eine verlässlichere Beurteilung des Spanngliedes ermöglicht würde.

Die Folge war, dass die Auswertung in diesem Fall nicht mit ausreichender Sicherheit erfolgen konnte. Aus diesem Grund wurden die Ergebnisse an dieser Messstelle nicht in die vorliegende Studie einbezogen.

Gleichwohl zeigt dieser Ansatz ein gewisses Potenzial für künftige Anwendungen, da er eine deutlich effizientere Messstrategie erlauben könnte. Dies würde voraussetzen, dass die Einschränkungen hinsichtlich Referenzbildung und Kontrastierung methodisch oder messtechnisch kompensiert werden können.

4.3 Messungen Rampenbrücke Wiese

Die Rampenbrücke Wiese ist ein Rampenbauwerk der Autobahn A3 der Verzweigung Basel Wiese. Es handelt sich um eine vorgespannte Hohlkastenkonstruktion mit zwei getrennten, jeweils zweispurig geführten, Trägern. Der untersuchte Brückenabschnitt befindet sich zwischen dem Tunnel Horburg und dem Schwarzwaldtunnel. Die Rampenbrücke wurde in zwei Etappen ausgeführt. Nur die neuere, zwischen 1995 und 1996 ausgeführte Etappe (anschliessend an den Tunnel Horburg) ist mit Kunststoffhüllrohren erstellt worden. Die Untersuchungen limitieren sich deshalb auf diese Etappe. Die Messungen haben an vier ausgewählten Stellen an den Stegen des Hohlkastens stattgefunden.

Die Messungen an der Rampenbrücke Wiese wurden in den ausgewählten Messfeldern mit den Systemen Radar-1, Impakt-Echo, Ultraschall-1 und Ultraschall-2 durchgeführt sowie durch Messungen mit dem System Radar-2 ergänzt. Letzteres diente der detaillierten Datenaufnahme im Sinne von Lokalisierung und Darstellung des Verlaufs der Spannkanele. Auf dieser Grundlage wäre es grundsätzlich möglich, Messungen mit den Impakt-Echo- und Ultraschall-Systemen gezielt entlang der georteten Spannkanele vorzunehmen, um die Effizienz zu steigern und die Anzahl der erforderlichen Messpunkte zu reduzieren. Die Vorgehensweise erwies sich im konkreten Fall jedoch wenig praktikabel. Für eine sinnvolle Umsetzung wäre eine äusserst präzise Lokalisierung und Markierung notwendig gewesen; bereits geringe Abweichungen hätten die Aussagekraft der Messungen erheblich beeinträchtigt. Darüber hinaus konnte auf diesem Weg kein ausreichender Kontrast zwischen Spannkanele und dem umgebenden Massiv festgestellt werden. Das Fehlen einer derartigen Referenz beeinträchtigt die Aussagekraft erheblich. Auch zeigte sich bei dieser Methode keine signifikante Zeiterparnis. So wurde entschieden, die Messungen entlang vollständiger Messraster durchzuführen, um eine belastbare Grundlage für die spätere Auswertung sicherzustellen.

4.3.1 Messfeld A

Die Abbildung 53 zeigt das Messfeld A an der Hohlkasteninnenwand der Rampenbrücke Wiese. An diesem Messfeld wurden Daten mit den Verfahren Radar, Impakt-Echo und Ultraschall durchgeführt. In diesem Messfeld liegen zwei Spannkanele, die gemäss ihrer vertikalen Lage von oben nach unten als α und β bezeichnet werden.



Abbildung 53: Messstelle A an der Rampenbrücke Wiese

4.3.1.1 Messstelle A – Radar (System 2)

Die Messungen erfolgten mithilfe des Radar-Systems-2 (GP8100-Systems der Firma Screeningeagle (Proceq)), wie in Abbildung 54 dargestellt. Das Gerät ist mit mehreren integrierten Antennen ausgestattet, wodurch ein breiterer Bereich bei der Datenerfassung abgedeckt werden kann. Im Vergleich zu herkömmlichen Systemen mit lediglich einer Antenne ermöglicht dies eine erhebliche Reduktion des zeitlichen Aufwands.



Abbildung 54: Messungen mit dem Prüfsystem Radar-2 (GP8100).

Die Abbildung 55 stellt die Ergebnisse der Radarmessungen dar. Auf der linken Seite ist ein C-Bild zu sehen, das die Amplituden entlang eines Schnittbildes parallel zur Messfläche im Tiefenbereich von 12 bis 24 cm abbildet. Zuvor wurden die Ausbreitungsgeschwindigkeit beziehungsweise die Dielektrizitätskonstante ϵ kalibriert und eine Kirchhoff-Migration durchgeführt. Ergänzend zeigt die Abbildung rechts ein volumetrisches 3D-Rendering. Der Verlauf der beiden Spannkable ist in diesen Darstellungen nachvollziehbar. Es zeigt sich jedoch auch, dass eine genaue Lokalisierung an einzelnen Positionen nur begrenzt möglich ist und die Genauigkeit der Lokalisierung durch Einschränkungen bei der manuellen Datenerfassung entlang des manuell aufgebraachten Rasters beeinflusst wird.

Das Radarverfahren wird für die Interpretation des Verfüllzustands der Spannkable in diesem Zusammenhang nicht berücksichtigt.

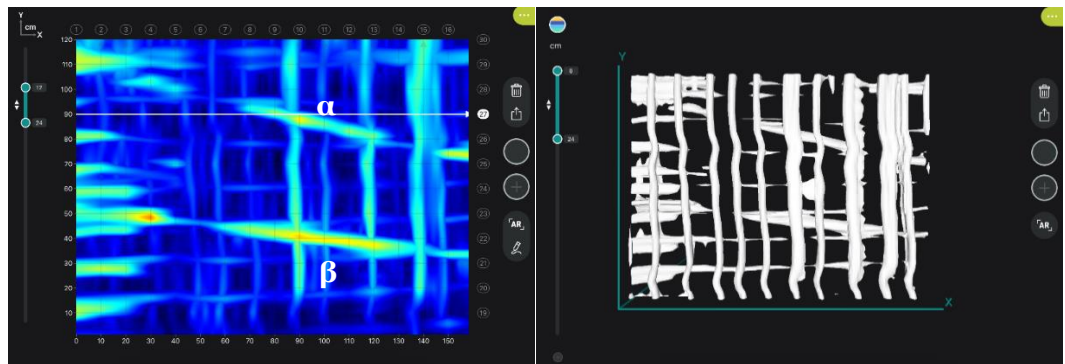


Abbildung 55: Resultatbilder der Radarmessungen an der Messstelle A der Rampenbrücke Wiese. Links: C-Bildarstellung, rechts: volumetrisches 3D-Rendering.

4.3.1.2 Ultraschall – System 1

Abbildung 56 stellt die Ergebnisse der Ultraschallmessungen an Messstelle A der Rampenbrücke Wiese als Tiefenprofil dar. Dieses basiert auf den gemessenen Laufzeiten der dominanten Echos nach der Rekonstruktion. Gezeigt werden eine dreidimensionale Darstellung des Profils (links), eine Überlagerung des Profils mit dem Foto der Messfläche (Mitte) sowie ein Histogramm der Tiefenwerte des Profils. Die Wanddicke von 50 cm und die Position der Spannkanäle bei etwa 15 cm Tiefe sind im Profil deutlich erkennbar. Der Verlauf der Spannkanäle lässt sich in diesem Fall klarer identifizieren als in den Radardaten desselben Messfeldes. Im Tiefenprofil finden sich keine Hinweise auf Auffälligkeiten, die auf eine mögliche Abweichung im Sinne einer unvollständigen Injektion schliessen lassen.

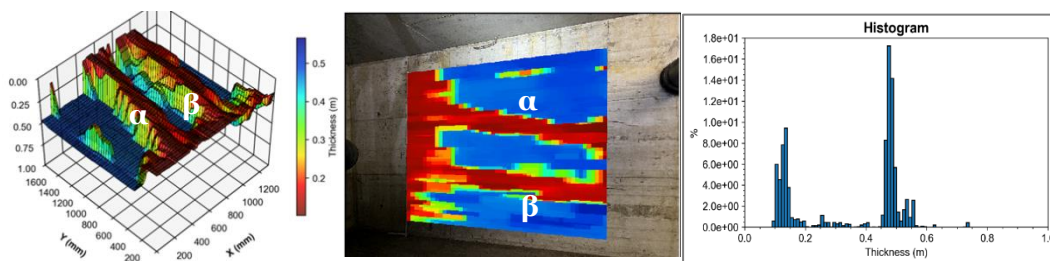


Abbildung 56: Tiefen bzw. Laufzeitprofil darstellungen der Ultraschallmessungen mit System 1 an der Messstelle A der Rampenbrücke Wiese. Links: 3D-Darstellung des Profils, Mitte: Bildliche Überlagerung mit dem Foto der Messfläche, rechts: Histogramm Darstellung der ermittelten Tiefenwerte.

Abbildung 57 zeigt eine Amplitudendarstellung in Form einer C-Projektion parallel zur Messoberfläche im relevanten Tiefenbereich, dargestellt als 3D-Darstellung (links) sowie als Überlagerung mit dem Foto der Messstelle. Der Verlauf der beiden Spannkanäle ist in der Darstellung erkennbar. Es besteht keine Evidenz für Auffälligkeiten in der Amplitudenhöhe, die eine unvollständige Injektion indizieren würden.

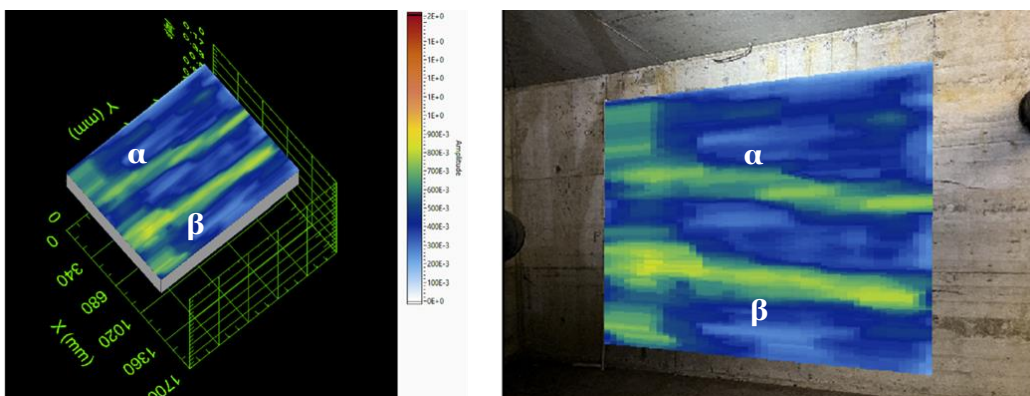


Abbildung 57: Amplitudendarstellung in Form einer C-Projektion parallel zur Messoberfläche im relevanten Tiefenbereich. Links: 3D-Darstellung, rechts: bildliche Überlagerung mit einem Foto der Messstelle A.

So liefern die mit System 1 durchgeführten Ultraschallmessungen an der Messstelle A der Rampenbrücke Wiese klare und vollständige Darstellungen des Verlaufs der Spannkanäle sowohl in Form von Tiefenprofilen als auch Amplitudenbildern. Die Wanddicke von 50 cm und die Lage der Spannkanäle in etwa 15 cm Tiefe sind deutlich erkennbar. Hinweise auf strukturelle Unregelmässigkeiten oder morphologische Auffälligkeiten, die auf eine unvollständige Injektion der Kanäle hindeuten könnten,

wurden in keiner der vorliegenden Darstellungen identifiziert. Das Gesamtbild ist mit einer vollständigen und homogenen Verfüllung vereinbar. Es liegen keine Korrelate für potenzielle Defekt- oder Verdachtszonen vor.

4.3.1.3 Ultraschall – System 2

Die Messungen mit System 2 wurden an dieser Messstelle abweichend von System 1 durchgeführt, indem sie dem jeweiligen Verlauf des Spannkanals folgten, um die Praktikabilität dieses Vorgehens zu testen. Für jeden Spannkanal wurden drei Messlinien mit halber Gerätebreite Versatz aufgenommen, so dass eine ausreichende Erfassung des Spannkanals sichergestellt ist und mögliche Ungenauigkeiten der Radarmessung ausgeglichen werden konnten. Jede Messlinie orientierte sich am Verlauf des Spannkanals und das Gerät wurde stets senkrecht dazu ausgerichtet.

Die Abbildung 58 präsentiert das Ergebnis als Amplitudendarstellung in jeweils einem C-Bild entlang eines Schnittbildes, das parallel zur Messoberfläche im Tiefenbereich von 7 bis 15 cm für beide Spannkanäle aufgenommen wurde. Die Darstellung der Spannkanäle wirkt stellenweise unregelmässig bzw. teilweise unterbrochen. Aus diesen Beobachtungen lässt sich jedoch keine belastbare Indikation für eine unvollständige Injektion ableiten.

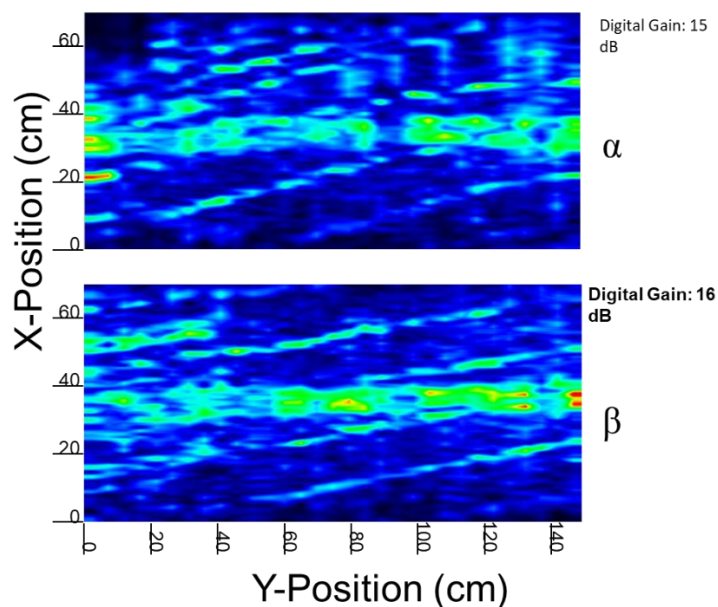


Abbildung 58: Ultraschallergebnisse für System 2 an in Messstelle A in Form von Amplitudendarstellungen als C-Bildprojektionen über Tiefenbereiche von jeweils 7 – 15 cm für beide Spannkanäle α und β .

Für dieses System stehen keine Tiefenprofile oder Laufzeitbilder zur Verfügung, da diese von der verwendeten Software nicht bereitgestellt werden.

Die Messdatenerfassung entsprechend den einzelnen Spannkanälen wurde getestet, jedoch hinsichtlich ihrer praktischen Umsetzbarkeit als begrenzt geeignet bewertet. Daher wurde für die folgenden Messstellen die Datenerfassung entlang von Messrastern angewendet.

Im Fazit wurden mit System 2 ebenfalls Daten an Messstelle A aufgenommen. Die Darstellungen fallen im Vergleich zu System 1 weniger deutlich aus; es liegt nahe, dass dies auf Unterschiede in der Filterung und Glättung im Zuge der Rekonstruktion sowie auf unterschiedliche Software-Handhabungen zurückzuführen ist. Insgesamt ergeben sich auch aus diesen Daten keine Hinweise auf möglicherweise unvollständig injizierte Bereiche an Messstelle A.

4.3.1.4 Impakt-Echo

Die Messungen mit dem System Impakt-Echo wurden entlang eines Rasters von 2 cm Punktabstand entlang der Messlinien durchgeführt. Die Linien verlaufen in vertikaler Richtung der Hohlkastenwand und kreuzen die Spannkanäle. Der Messlinienabstand beträgt 10 cm. Die Anregung erfolgte manuell mittels einer 10 mm Stahlkugel.

Es wurden C-Bilder erstellt, also Amplitudendarstellungen entlang von Schnittbildern parallel zur Messoberfläche im Tiefenbereich der Spannkanäle. Der Verlauf der Spannkanäle ist in der Abbildung 59 klar ersichtlich. Hinweise auf unvollständige Injektion bestehen nicht.

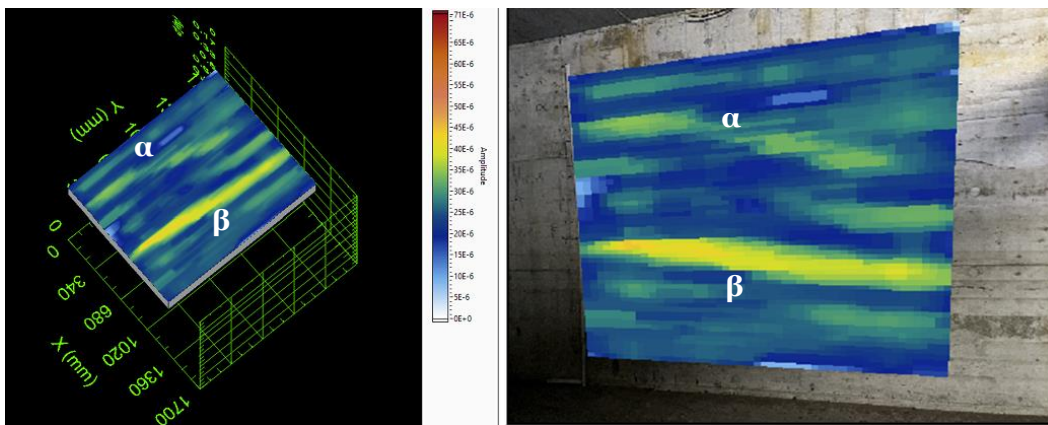


Abbildung 59: Impakt-Echo-Ergebnisse an Messstelle A in Form von Amplitudendarstellungen als C-Bildprojektionen über den Tiefenbereich der Spannkanäle.

In der Darstellung des Tiefenprofils (Abbildung 60) treten die Anzeigen der beiden Spannkanäle sehr deutlich hervor. Dies setzt jedoch das Ausblenden der Dickenanzeige voraus, also die Beschränkung auf einen Frequenzbereich von $f = [6 \text{ kHz}; 18 \text{ kHz}]$. Innerhalb dieses Bereichs erscheinen die Spannkanäle als dominante Anzeigen.

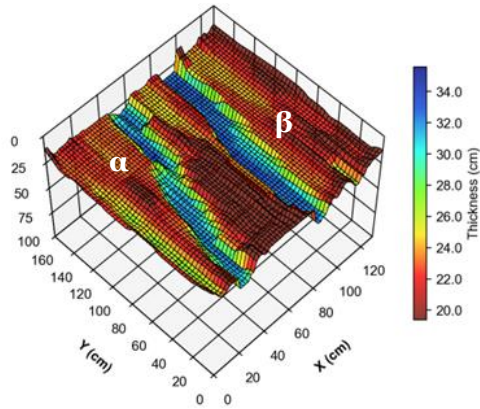


Abbildung 60: Tiefenprofildarstellung der Impact-Echo-Untersuchung an Messstelle A der Wiesenbrücke, unter Verwendung eines eingeschränkten Frequenzbereiches.

Die beiden Spannkanäle zeigen sich bei Frequenzen von ungefähr 6.7 kHz. Exemplarische Signale zeigt Abbildung 61.

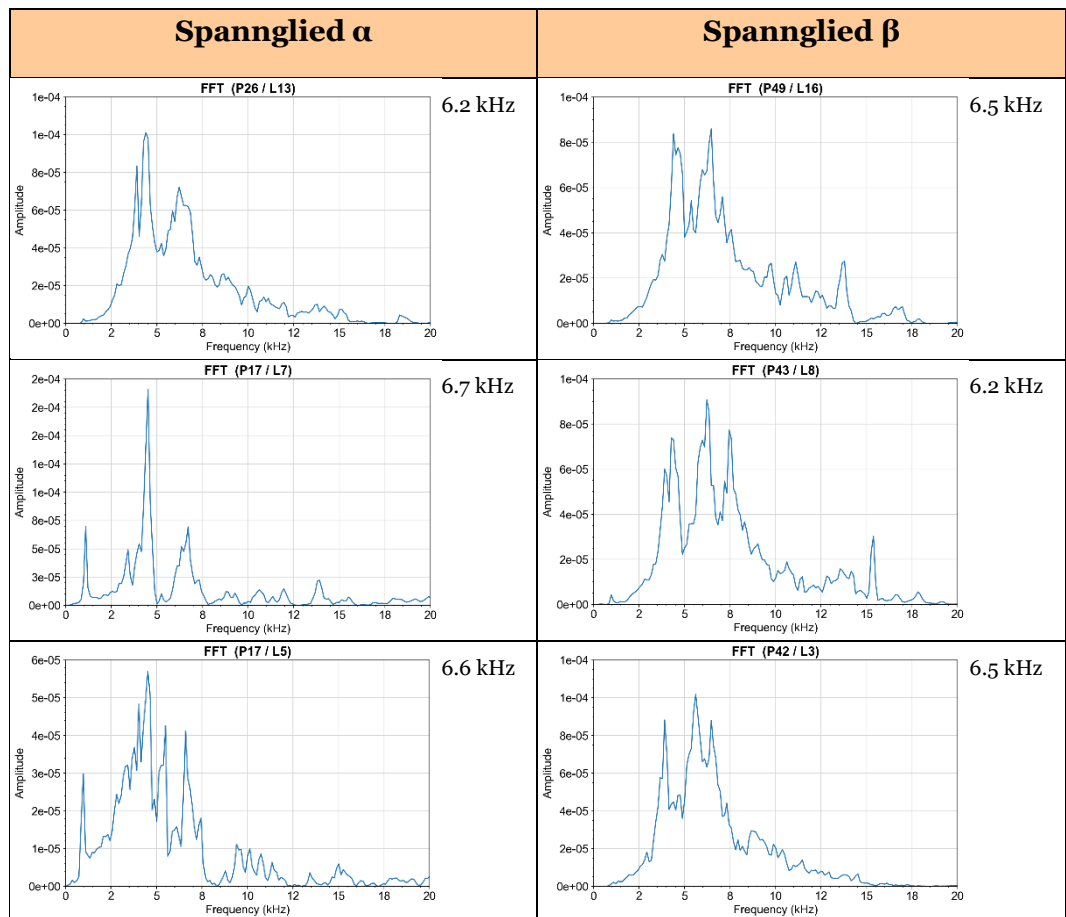


Abbildung 61: Messstelle A an der Wiesenbrücke. Exemplarische Signale entlang der Anzeigen von Spannkanal α/β (links) sowie γ (rechts).

Die Tabelle 5 stellt die ermittelten charakteristischen Frequenzen den theoretischen Referenzwerten gemäss Gleichung (3) und Gleichung (4) gegenüber, basierend auf der planmässigen Solltiefe der Spannkanäle von $d = 15$ cm sowie einer ermittelten

Schallausbreitungsgeschwindigkeit von 4200 m/s. Dabei zeigt sich, dass die gemessenen Frequenzen entlang beider Spanngliedern sehr nahe an den Referenzwerten gemäss Gleichung (4) liegen. Diese Werte entsprechen nach klassischer Interpretation einer Grenzfläche zu Stahl, was auf eine vollständige Injektion schliessen liesse.

Analyse der Spanngliedindikationen

Spannglied	Solltiefe z	Gemessene Frequenz f	Gl.3: $f = c/2d$	Gl.4: $f = c/4d$
α	15 cm	6.2 kHz 6.7 kHz 6.6 kHz	14.0 kHz	7.0 kHz
β	15 cm	6.5 kHz 6.2 kHz 6.5 kHz	14.0 kHz	7.0 kHz

Tabelle 5: Impakt-Echo-Analyse der Spanngliedindikationen in Messfeld A gegenüber Referenzwerten aus Gl. 3 und Gl. 4 zwecks Orientierung.

4.3.2 Messfeld B

Das Messfeld B befindet sich an derselben Längsposition der Brücke wie Messfeld C, jedoch an der gegenüberliegenden Wand des Hohlkastens. Gemäss seiner Lage auf der Brücke verlaufen in diesem Messfeld zwei Spanngliedern, die der zuvor definierten Nomenklatur folgend als α (oberes Spannglied, kleinere y-Position) und β (unteres Spannglied, grössere y-Position) bezeichnet werden.

Die Messungen wurden auch in diesem Bereich mit den vier Messsystemen Impakt-Echo, Ultraschall 1, Ultraschall 2 und Radar-2 durchgeführt.



Abbildung 62: Messstelle B an der Rampenbrücke Wiese.

4.3.2.1 Radar

Die Abbildung 63 zeigt die Ergebnisse des Systems Radar-2 dieser Messstelle. Das amplitudenbasierte C-Bild (links) wurde für den Tiefenbereich von 10 bis 31 cm dargestellt und somit auf die Lage und Erkennbarkeit der Spanngliedern optimiert. Die Lage der Spanngliedern ist sowohl im C-Bild als auch im volumetrischen Rendering (rechts) gut erkennbar. Allerdings treten in beiden Darstellungen Unterbrechungen auf, die auf die darüberliegende schlaffe Bewehrung zurückzuführen sind. Für die

Interpretation des Verfüllzustands der Spannkanele wird das Radarverfahren in diesem Zusammenhang weiterhin nicht berücksichtigt.

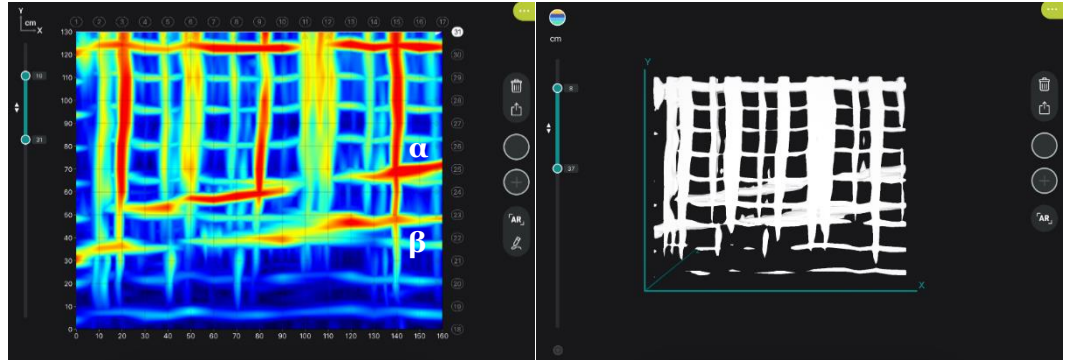


Abbildung 63: Resultatbilder der Radarmessungen (System 2) an der Messstelle B der Rampenbrücke Wiese. Links: C-Bilddarstellung, rechts: volumetrisches 3D-Rendering.

4.3.2.2 Ultraschall – System 1

Die Messungen mit dem System 1 (Datenaufnahme: Pundit Array, Analyse: Software Echolyst) zeigen in der Laufzeit- bzw. Tiefenprofildarstellung beide Spannkanele deutlich. Aufgrund der engen Lage zueinander sind sie jedoch nur eingeschränkt trennbar. Aus den Daten geht die Wanddicke von rund 50 cm sowie die Tiefenlage der Spannkanele in etwa 15 cm klar hervor, wie auch das zugehörige Histogramm verdeutlicht. Hinweise auf Auffälligkeiten oder Singularitäten, die auf eine unvollständige Injektion schließen lassen, liegen nicht vor.

Dies gilt ebenso für die Auswertung der Amplituden in Form des C-Bildes: Der Verlauf der beiden Spannkanele ist zwar erkennbar, eine klare Separation gestaltet sich aufgrund der geringen Distanz zwischen den Kanälen jedoch schwierig. Eine Verdachtsstelle im Sinne einer insuffizienten Injektion lässt sich aus dem Amplitudenbild nicht ableiten.

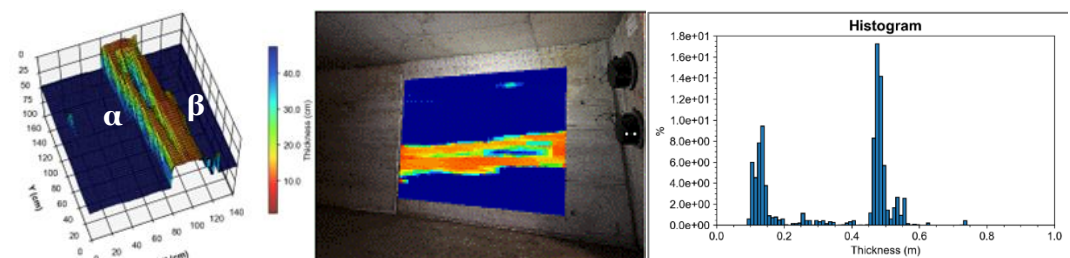


Abbildung 64: Tiefen bzw. Laufzeitprofildarstellungen der Ultraschallmessungen mit System 1 an der Messstelle B der Rampenbrücke Wiese. Links: 3D-Darstellung des Profils, Mitte: Bildliche Überlagerung mit dem Foto der Messfläche, rechts: Histogramm Darstellung der ermittelten Tiefenwerte.

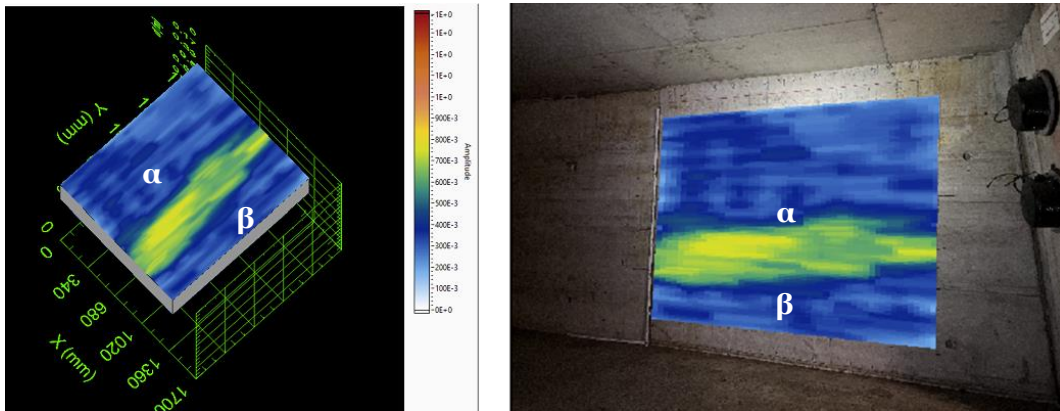


Abbildung 65: Amplitudendarstellung in Form einer C-Projektion parallel zur Messoberfläche im relevanten Tiefenbereich. Links: 3D-Darstellung, rechts: bildliche Überlagerung mit einem Foto der Messstelle B.

4.3.2.3 Ultraschall – System 2

Die Datenerfassung erfolgte analog zu Messfeld A entlang des jeweiligen Spannkanaals. In der C-Bilddarstellung (Abbildung 66) ist der Verlauf der Spannkanaäle zwar erkennbar, erscheint jedoch diffus. Eine belastbare Aussage hinsichtlich des Verfüllzustandes kann aus diesen Darstellungen nicht abgeleitet werden.

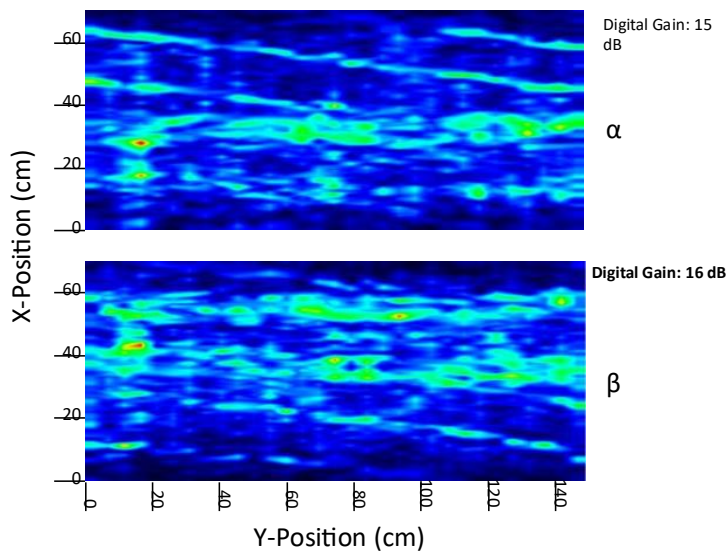


Abbildung 66: Ultraschallergebnisse für System 2 an in Messstelle B in Form von Amplitudendarstellungen als C-Bildprojektionen über Tiefenbereiche von jeweils 7 – 15 cm für beide Spannkanaäle α und β .

4.3.2.4 Impakt-Echo

Die Impakt-Echo-Messungen durchgeführt entlang eines Rasters mit 2 cm Punktabstand entlang der vertikal geführten Messlinien zeigen den Verlauf der Spannglieder deutlich und im Volumen bemerkenswert klar. Signifikante Amplitudenunterschiede, die als Hinweise auf Singularitäten oder Verdachtsstellen für eine unvollständige Injektion zu werten wären, wurden im C-Bild (Abbildung 67) nicht festgestellt.

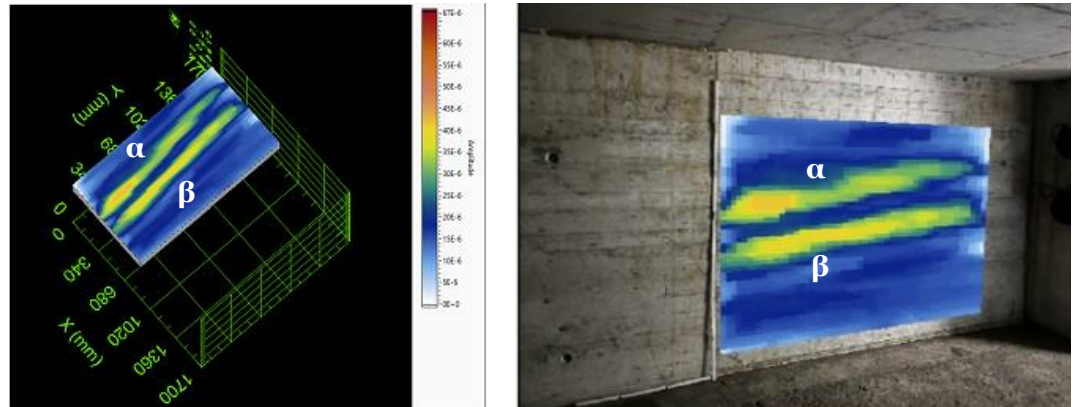


Abbildung 67: Impact-Echo-Ergebnisse an Messstelle B in Form von Amplitudendarstellungen als C-Bildprojektionen über den Tiefenbereich der Spannkanäle.

In der Darstellung des Tiefenprofils (Abbildung 68) treten die Anzeigen der beiden Spannkanäle sehr deutlich hervor. Dies setzt jedoch das Ausblenden der Dickenanzeige voraus, also die Beschränkung auf einen Frequenzbereich von $f = [6 \text{ kHz}; 18 \text{ kHz}]$. Innerhalb dieses Bereichs erscheinen die Spannkanäle als dominante Anzeigen.

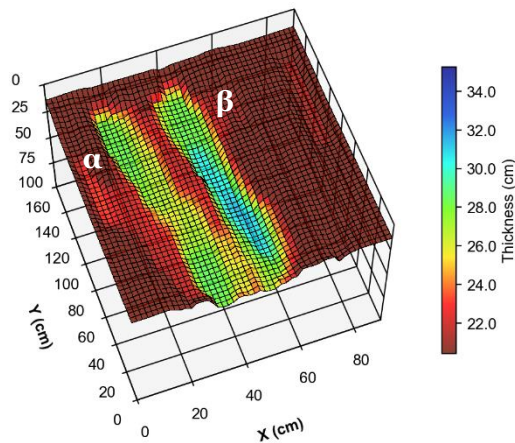


Abbildung 68: Tiefenprofil darstellung der Impact-Echo-Untersuchung an Messstelle B der Wiesenbrücke, unter Verwendung eines eingeschränkten Frequenzbereiches.

Die beiden Spannkanäle zeigen sich bei Frequenzen von ungefähr 7 kHz. Exemplarische Signale zeigt Abbildung 69.

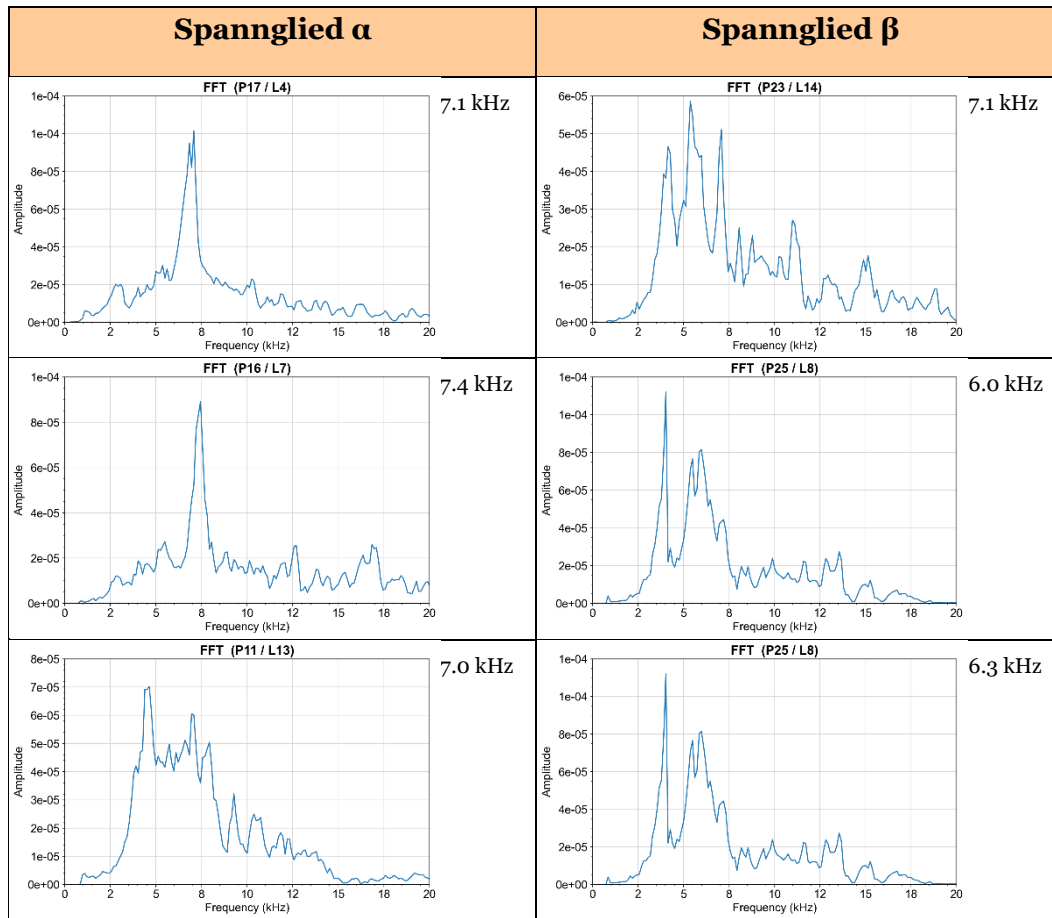


Abbildung 69: Messstelle A an der Wiesenbrücke. Exemplarische Signale entlang der Anzeigen von Spannkanaal α/β (links) sowie γ (rechts).

Die Tabelle 6 stellt die ermittelten charakteristischen Frequenzen den theoretischen Referenzwerten gemäss Gleichung (3) und Gleichung (4) gegenüber, basierend auf der planmässigen Solltiefe der Spannkanaäle von $d = 15 \text{ cm}$ sowie einer ermittelten Schallausbreitungsgeschwindigkeit von 4200 m/s . Dabei zeigt sich, dass die gemessenen Frequenzen entlang beider Spannkanaäle sehr nahe an den Referenzwerten gemäss Gleichung (4) liegen. Diese Werte entsprechen nach klassischer Interpretation einer Grenzfläche zu Stahl, was auf eine vollständige Injektion schliessen liesse.

Analyse der Spannkanaalindikationen				
Spannglied	Solltiefe z	Gemessene Frequenz f	Gl.3: $f = c/2d$	Gl.4: $f = c/4d$
α	15 cm	7.1 kHz	14.0 kHz	7.0 kHz
		7.4 kHz		
		7.0 kHz		
β	15 cm	7.1 kHz	14.0 kHz	7.0 kHz
		6.0 kHz		
		6.3 kHz		

Tabelle 6: Impakt-Echo-Analyse der Spannkanaalindikationen in Messfeld A gegenüber Referenzwerten aus Gl. 3 und Gl. 4 zwecks Orientierung.

4.3.2.5 Fazit Messstelle B

Alle eingesetzten Verfahren zeigen an Messfeld B gut nachvollziehbar den Verlauf der Spannkanaäle. In keinem der Verfahren konnten Hinweise auf Unregelmässigkeiten oder Bereiche mit unvollständiger Injektion identifiziert werden. Die Ergebnisse sind insgesamt konsistent mit einer vollständigen und homogenen Verfüllung.

4.3.3 Messfeld C

Das Messfeld C (Abbildung 70) befindet sich an der gegenüberliegenden Hohlkasteninnenwand der Rampenbrücke Wiese und liegt damit spiegelbildlich zu Messfeld B. Aufgrund dieser Lagebedingungen sind die konstruktiven Gegebenheiten nahezu identisch. Die Untersuchungen wurden wiederum mit Radar-2, Impakt-Echo sowie Ultraschall (System 1 und System 2) durchgeführt.

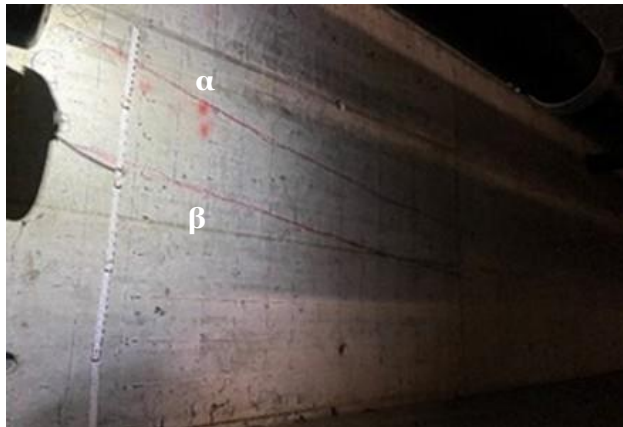


Abbildung 70: Messstelle C an der Rampenbrücke Wiese.

4.3.3.1 Radar

Die mit dem System 2 (GP8100-System) aufgenommenen Daten wurden auf einen Tiefenbereich von 10 bis 31 cm optimiert für die Erkennbarkeit der Spannkanaäle. Sowohl im amplitudenbasierten C-Bild als auch im volumetrischen 3D-Rendering ist deren Verlauf gut zu verfolgen. Wie auch bei Messfeld B zeigen sich vereinzelt Unterbrechungen der Darstellungen, bedingt durch die darüberliegende schlaaffe Bewehrung. Für Aussagen zum Verfüllzustand der Spannkanaäle werden die Radardaten nicht herangezogen.

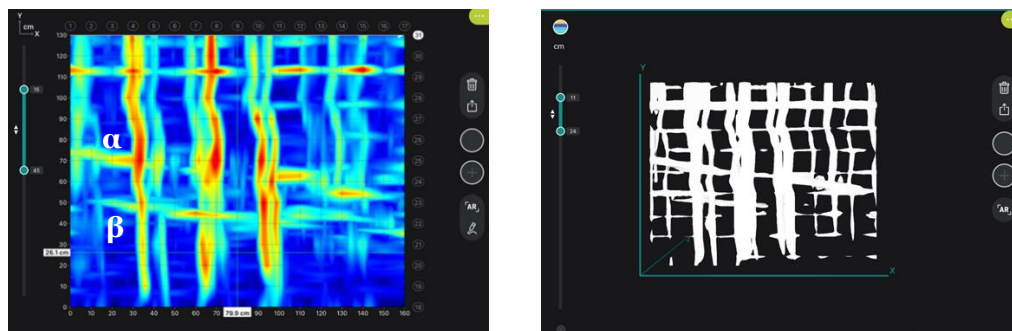


Abbildung 71: Resultatbilder der Radarmessungen an der Messstelle C der Rampenbrücke Wiese. Links: C-Bild-Darstellung, rechts: volumetrisches 3D-Rendering.

4.3.3.2 Ultraschall – System 1

In den mit System 1 (Pundit Array) gewonnenen Laufzeit- und Tiefenprofilen (Abbildung 72) treten beide Spannkanäle deutlich hervor. Die geringe Distanz zwischen den Spannkanälen erschwert die klare Separation auch hier. Die Wanddicke von etwa 50 cm sowie die Lage der Spannkanäle in rund 15 cm Tiefe sind eindeutig erkennbar und werden durch das zugehörige Histogramm bestätigt. Hinweise auf lokale Auffälligkeiten oder Unregelmässigkeiten, die auf einen Injektionsmangel schliessen liessen, fehlen.

Auch die amplitudenbasierte C-Bild-Darstellung (Abbildung 73) stützt diesen Befund: Der Verlauf ist sichtbar, aber aufgrund der Nähe der Kanäle äusserst eingeschränkt separierbar. Anzeichen für mögliche Defektstellen lassen sich nicht identifizieren.

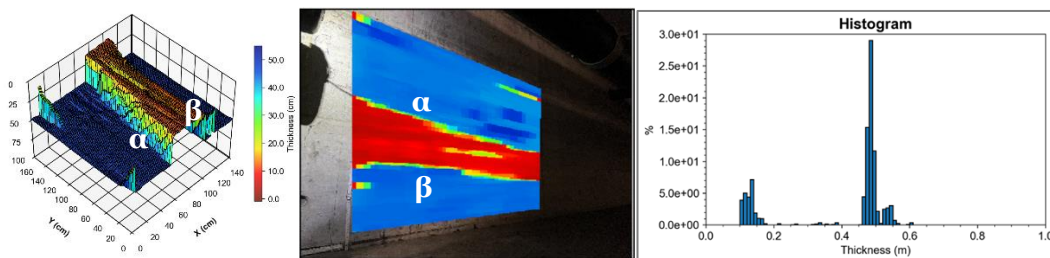


Abbildung 72: Tiefen bzw. Laufzeitprofildarstellungen der Ultraschallmessungen mit System 1 an der Messstelle C der Rampenbrücke Wiese. Links: 3D-Darstellung des Profils, Mitte: Bildliche Überlagerung mit dem Foto der Messfläche, rechts: Histogramm-darstellung der ermittelten Tiefenwerte.

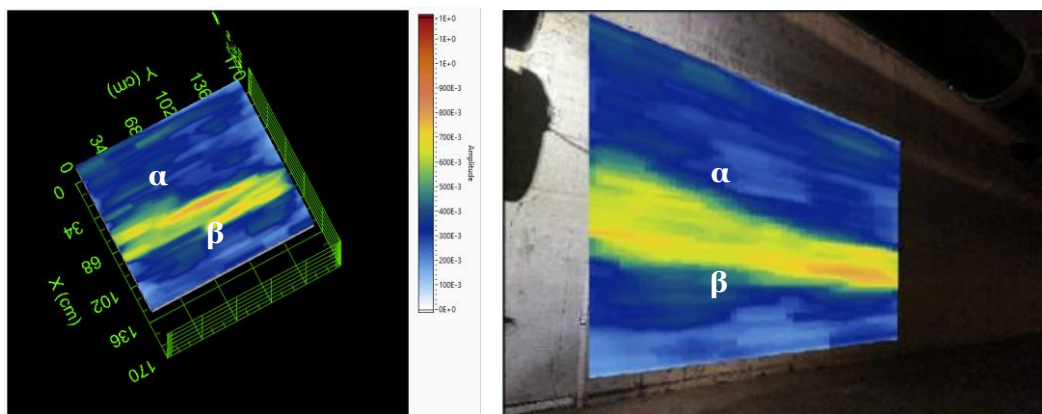


Abbildung 73: Amplitudendarstellung in Form einer C-Projektion parallel zur Messoberfläche im relevanten Tiefenbereich. Links: 3D-Darstellung, rechts: bildliche Überlagerung mit einem Foto der Messstelle C.

4.3.3.3 Ultraschall – System 2

Wie bei Messfeld B folgte die Datenerfassung dem Verlauf der einzelnen Spannkanäle. Im C-Bild (Abbildung 74) lässt sich der Verlauf der Spannkanäle nachvollziehen, allerdings diffus. Eine gesicherte Aussage zum Verfüllzustand lässt sich aus diesen Darstellungen nicht ableiten.

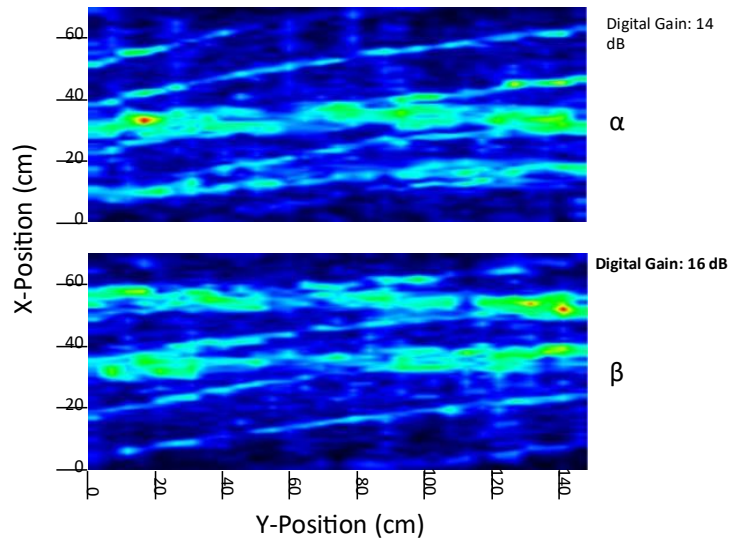


Abbildung 74: Ultraschallergebnisse für System 2 an in Messstelle C in Form von Amplitudendarstellungen als C-Bildprojektionen über Tiefenbereiche von jeweils 7 - 15 cm für beide Spannkäle α und β .

4.3.3.4 Impakt-Echo

Die mit einem 2-cm-Raster in vertikaler Richtung durchgeführten Impakt-Echo-Messungen bilden den Verlauf der Spannglieder auch in diesem Messfeld klar ab. Markante Unregelmässigkeiten, die auf mögliche Hohlstellen oder unvollständig injizierte Abschnitte hindeuten könnten, werden nicht festgestellt.

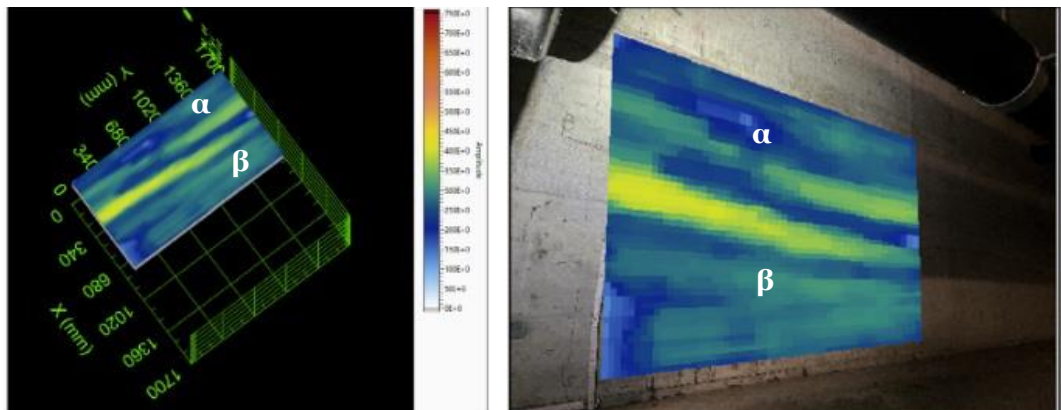


Abbildung 75: Impakt-Echo-Ergebnisse an Messstelle C in Form von Amplitudendarstellungen als C-Bildprojektionen über den Tiefenbereich der Spannkäle.

In der Darstellung des Tiefenprofils (Abbildung 76) treten die Anzeigen der beiden Spannkäle sehr deutlich hervor. Dies setzt jedoch das Ausblenden der Dickenanzeige voraus, also die Beschränkung auf einen Frequenzbereich von $f = [6 \text{ kHz}; 18 \text{ kHz}]$. Innerhalb dieses Bereichs erscheinen die Spannkäle als dominante Anzeigen.

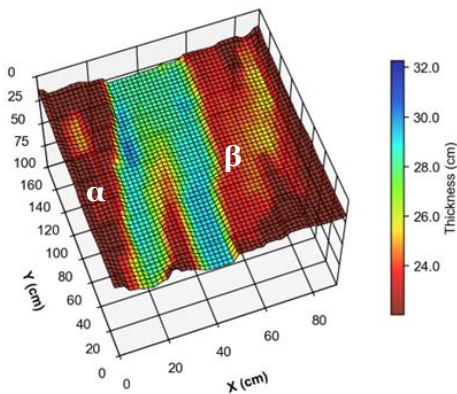


Abbildung 76: Tiefenprofilardarstellung der Impakt-Echo-Untersuchung an Messstelle C der Wiesenbrücke, unter Verwendung eines eingeschränkten Frequenzbereiches.

Die beiden Spannkanele zeigen sich bei Frequenzen von ungefähr 7 kHz. Exemplarische Signale zeigt Abbildung 77.

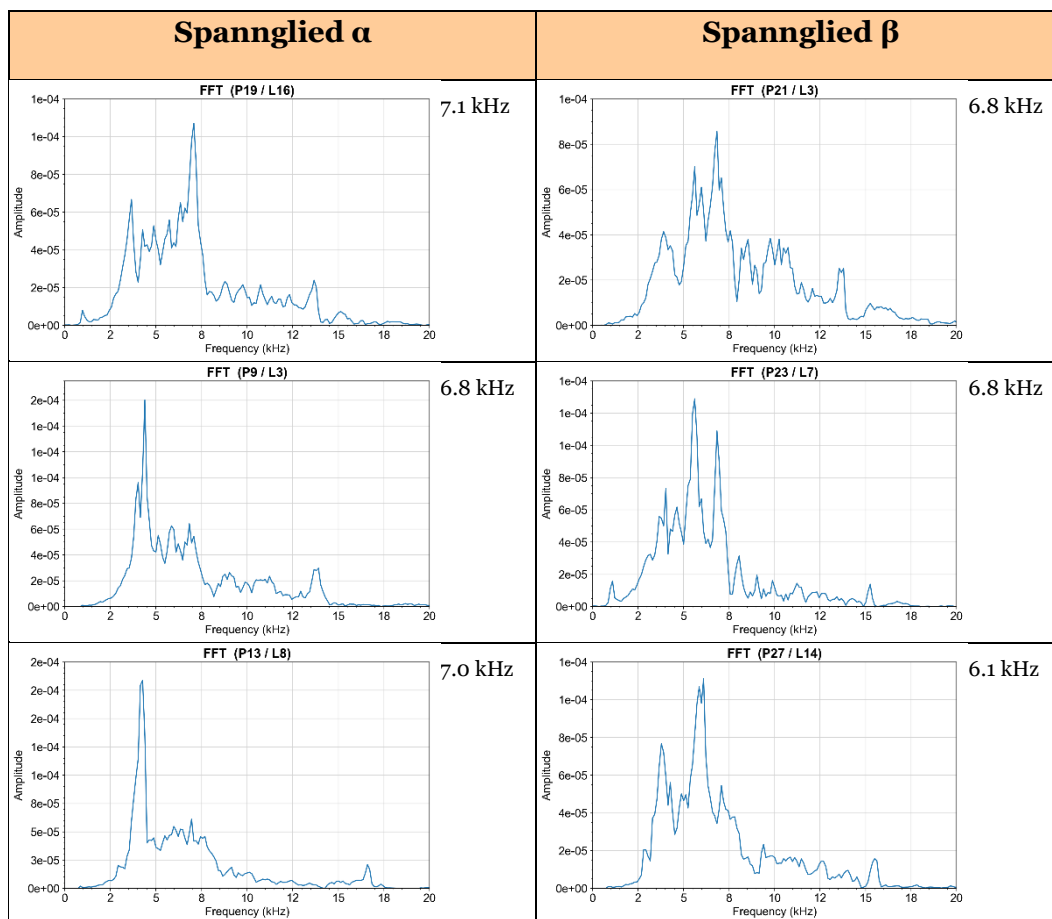


Abbildung 77: Messstelle C an der Wiesenbrücke. Exemplarische Signale entlang der Anzeigen von Spannkanael α/β (links) sowie y (rechts).

Die Tabelle 7 stellt die ermittelten charakteristischen Frequenzen den theoretischen Referenzwerten gemäss Gleichung (3) und Gleichung (4) gegenüber, basierend auf der planmässigen Solltiefe der Spannkanele von $d = 15$ cm sowie einer ermittelten

Schallausbreitungsgeschwindigkeit von 4200 m/s. Dabei zeigt sich, dass die gemessenen Frequenzen entlang beider Spannkannäle sehr nahe an den Referenzwerten gemäss Gleichung (4) liegen. Diese Werte entsprechen nach klassischer Interpretation einer Grenzfläche zu Stahl, was auf eine vollständige Injektion schliessen liesse.

Analyse der Spannkanalindikationen

Spannglied	Solltiefe z	Gemessene Frequenz f	Gl.3: $f = c/2d$	Gl.4: $f = c/4d$
α	15 cm	7.1 kHz 6.8 kHz 7.0 kHz	14.0 kHz	7.0 kHz
β	15 cm	6.8 kHz 6.8 kHz 7.1 kHz	14.0 kHz	7.0 kHz

Tabelle 7: Impakt-Echo-Analyse der Spannkanalindikationen in Messfeld A gegenüber Referenzwerten aus Gl. 3 und Gl. 4 zwecks Orientierung.

4.3.3.5 Fazit Messstelle C

Die Messergebnisse an Messfeld C stimmen in wesentlichen Punkten mit denen von Messfeld B überein. Diese Übereinstimmung unterstreicht sowohl die Reproduzierbarkeit der Messverfahren als auch die Gleichmässigkeit der Bauwerksstruktur. Anzeichen für Verfüllmängel oder Defekte konnten nicht nachgewiesen werden.

4.3.4 Messfeld D

Messfeld D befindet sich spiegelbildlich zu Messfeld E auf der gegenüberliegenden Hohlkasteninnenwand der Rampenbrücke Wiese. Aufgrund dieser in situ identischen baulichen Gegebenheiten ist für diese beiden Messfelder eine vergleichbare messtechnische Ausgangslage gegeben. Die Untersuchungen wurden mit den vier Prüfsystemen Radar (System 2), Ultraschall (System 1 und System 2) sowie Impakt-Echo durchgeführt.

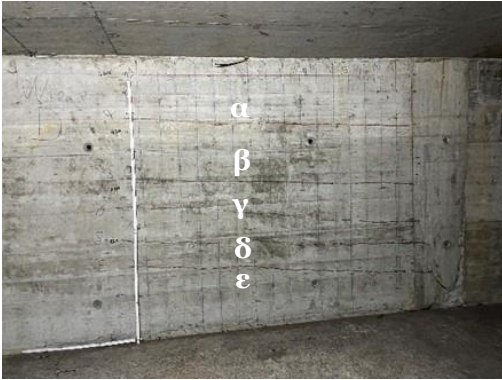


Abbildung 78: Messstelle D an der Rampenbrücke Wiese.

4.3.4.1 Radar

Die mit dem System 2 (GP8100-System) aufgenommenen Radardaten zeigen den Verlauf der fünf Spannglieder (bezeichnet von oben nach unten als α , β , γ , δ und ϵ) grundsätzlich klar. Lokale Unterbrechungen in der Darstellung sind auf darüberliegende Bewehrungselemente zurückzuführen. Ansonsten entspricht die Qualität der Radardaten dem status quo der Messfelder A bis C. Eine Interpretation des Verfüllzustandes wird auch hier nicht aus den Radardaten abgeleitet.

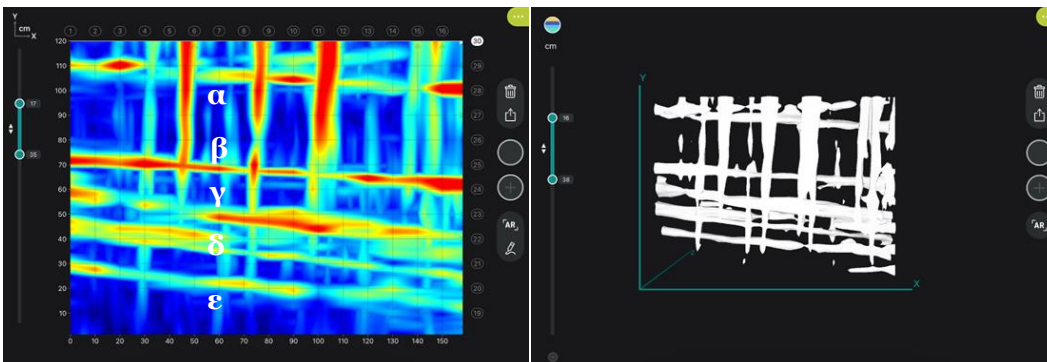


Abbildung 79: Resultatbilder der Radarmessungen an der Messstelle D der Rampenbrücke Wiese. Links: C-Bilddarstellung, rechts: volumetrisches 3D-Rending.

4.3.4.2 Ultraschall – System 1

Mit Ultraschall System 1 konnten sämtliche Spannglieder zuverlässig detektiert werden. Die klare Separierung der unteren Spannglieder (δ und ϵ) gestaltet sich jedoch in der Laufzeit- bzw. Tiefenprofildarstellung (Abbildung 80) schwierig, was auf deren dichte vertikale Anordnung zurückzuführen ist. Im amplitudenbasierten C-Bild (Abbildung 81) ist die Trennung demgegenüber etwas deutlicher. Die festgestellte Tiefenlage der Spannglieder befindet sich zwischen 15 cm und 25 cm und wird im

zugehörigen Histogramm nachvollziehbar. Auffälligkeiten oder Anomalien, die auf eine unvollständige Injektion hindeuten könnten, wurden nicht festgestellt.

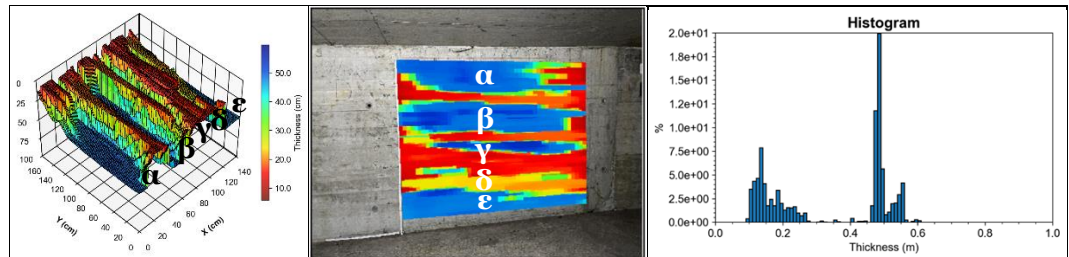


Abbildung 80: Tiefen bzw. Laufzeitprofildarstellungen der Ultraschallmessungen mit Ultraschallsystem 1 an der Messstelle D der Rampenbrücke Wiese. Links: 3D-Darstellung des Profils, Mitte: Bildliche Überlagerung mit dem Foto der Messfläche, rechts: Histogramm Darstellung der ermittelten Tiefenwerte.

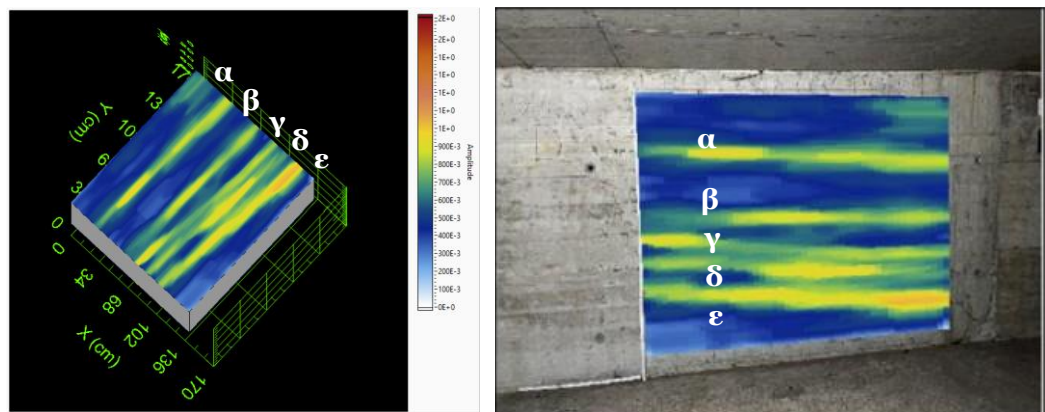


Abbildung 81: Amplitudendarstellung in Form einer C-Projektion parallel zur Messoberfläche im relevanten Tiefenbereich. Links: 3D-Darstellung, rechts: bildliche Überlagerung mit einem Foto der Messstelle D.

4.3.4.3 Ultraschall – System 2

Im Gegensatz zu den Messfeldern A bis C erfolgte die Datenerfassung mit Ultraschallsystem 2 nicht entlang der einzelnen Spannglieder, sondern rasterbasiert. Die Orientierung des Prüfkopfes war vertikal ausgerichtet, d.h. weitgehend senkrecht zum Verlauf der Spannglieder. Angesichts der Anzahl (fünf) und der engen Anordnung der Spannglieder war dies die einzig praktikable Vorgehensweise. Zudem ermöglichte diese Methode eine verbesserte Übersichtsdarstellung im amplitudenbasierten C-Bild. Der Verlauf der Spannglieder ist darin überraschend klar separierbar. Amplitudenauffälligkeiten, die diagnostisch als Verdachtsstellen gewertet werden könnten, lassen sich aus diesen Daten nicht ableiten.

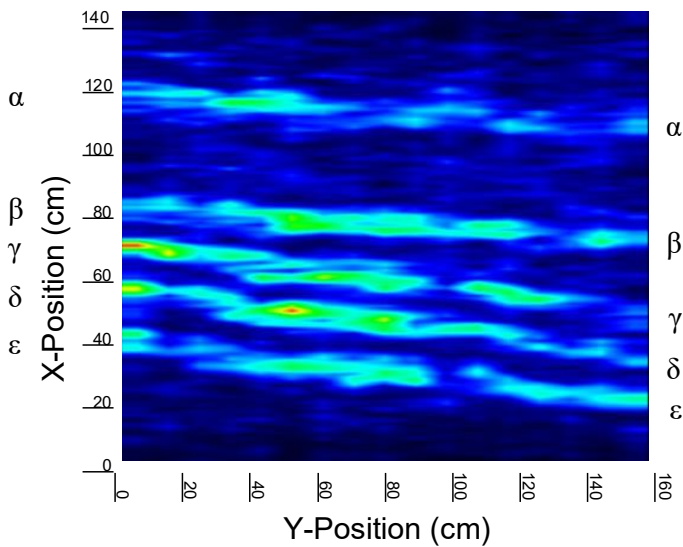


Abbildung 82: Ultraschallergebnisse für System 2 an Messstelle D in Form von Amplitudendarstellungen als C-Bildprojektionen über Tiefenbereiche von jeweils 7 – 15 cm für beide Spannkanaäle α und β .

4.3.4.4 Impakt-Echo

Die Impakt-Echo-Messungen lieferten im vorliegenden Fall nur eine unscharfe Lokalisierung der Spannglieder im C-Bild (Abbildung 83). Eine sichere Identifikation einzelner Stränge ist erschwert, und es konnten keine belastbaren Hinweise auf unvollständige Injektion gewonnen werden. Auf dieser Basis ist die Äusserung eines Verdachts nicht angezeigt.

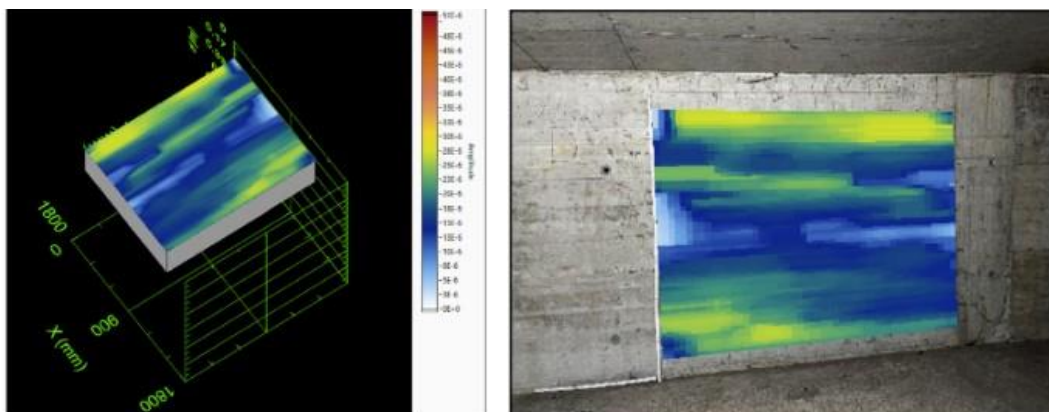


Abbildung 83: Impakt-Echo-Ergebnisse an Messstelle D in Form von Amplitudendarstellungen als C-Bildprojektionen über den Tiefenbereich der Spannkanaäle.

In der Darstellung des Tiefenprofils (Abbildung 84) treten die Anzeigen der vier Spannkanaäle nur sehr diffus hervor. In dieser Darstellung ist die Dickenanzeige ausgeblendet, also eine Beschränkung auf einen Frequenzbereich von $f = [6 \text{ kHz}; 18 \text{ kHz}]$ vorgenommen.

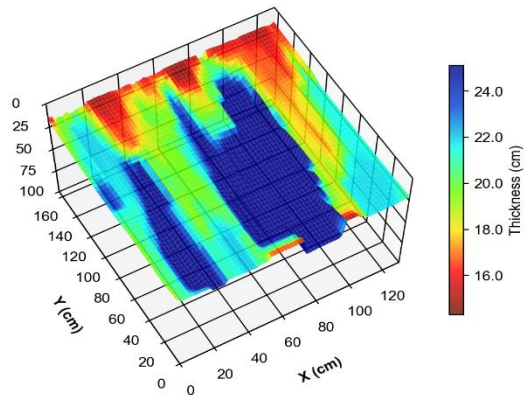


Abbildung 84: Tiefenprofilardarstellung der Impakt-Echo-Untersuchung an Messstelle D der Wiesenbrücke, unter Verwendung eines eingeschränkten Frequenzbereiches.

Abbildung 85 zeigt exemplarische Signale. Die Interpretation und Auswahl der Signale gestaltet sich jedoch als schwierig, da die Spannkable sehr dicht beieinander liegen und eine eindeutige Trennung nur eingeschränkt möglich ist. Auffällig ist dennoch das Auftreten von Signalanteilen bei etwa 16 kHz. Bei einer Tieflage der Spannglieder von rund 15 cm würde dies gemäss Gleichung (3) einer Reflexion an einer Luftgrenzfläche entsprechen. Es ist jedoch zu betonen, dass die Signale nicht eindeutig interpretierbar sind, sodass ein solcher Schluss an dieser Stelle nicht als gesichert angesehen werden kann.

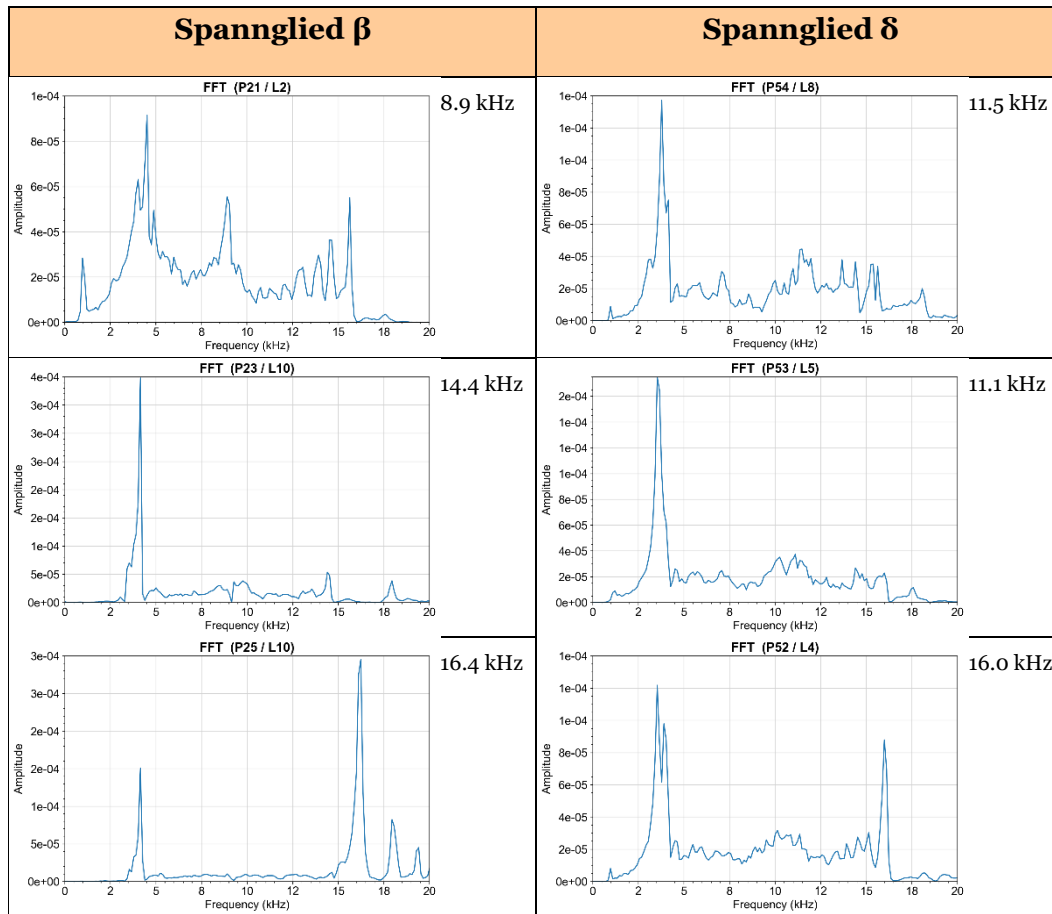


Abbildung 85: Messtabelle D an der Wiesenbrücke. Exemplarische Signale entlang der Anzeigen von Spannkanaal β (links) sowie δ (rechts).

Die Tabelle 8 stellt die ermittelten charakteristischen Frequenzen den theoretischen Referenzwerten gemäss Gleichung (3) und Gleichung (4) gegenüber, basierend auf der planmässigen Solltiefe der Spannkanaäle von $d = 15 \text{ cm}$ sowie einer ermittelten Schallausbreitungsgeschwindigkeit von 4200 m/s . Dabei zeigt sich, dass die gemessenen Frequenzen entlang beider Spannkanaäle sehr nahe an den Referenzwerten gemäss Gleichung (4) liegen. Diese Werte entsprechen nach klassischer Interpretation einer Grenzfläche zu Stahl, was auf eine vollständige Injektion schliessen liesse.

Analyse der Spannkanaalindikationen

Spannglied	Solltiefe z	Gemessene Frequenz f	Gl.3: $f = c/2d$	Gl.4: $f = c/4d$
α	15 cm	7.1 kHz	14.0 kHz	7.0 kHz
		6.8 kHz		
		7.0 kHz		
β	15 cm	6.8 kHz	14.0 kHz	7.0 kHz
		6.8 kHz		
		7.1 kHz		

Tabelle 8: Impakt-Echo-Analyse der Spannkanaalindikationen in Messfeld A gegenüber Referenzwerten aus Gl. 3 und Gl. 4 zwecks Orientierung.

4.3.4.5 Fazit Messstelle D

Die Spannkanele sind mit den meisten Verfahren gut zu lokalisieren, wenn auch Impakt-Echo hier nur schwache Ergebnisse liefert. Die dichte Lage der Spannkanele stellt hier eine Herausforderung dar. Anzeichen von Verfüllmängeln gehen aus keinem der Ergebnisse an dieser Messstelle hervor.

4.3.5 Messfeld E

Messfeld E (Abbildung 86) liegt spiegelbildlich zu Messfeld D an der gegenüberliegenden Hohlkasteninnenwand der Rampenbrücke Wiese. Die geometrischen und konstruktiven Rahmenbedingungen sind in situ nahezu identisch. So beinhaltet dieses Messfeld ebenfalls fünf Spannkanele, die entsprechend ihrer vertikalen Lage von oben nach unten als α , β , γ , δ und ε bezeichnet werden. Die Untersuchungen erfolgten mit den Systemen Radar, Ultraschall (System 1 und System 2) sowie Impakt-Echo.

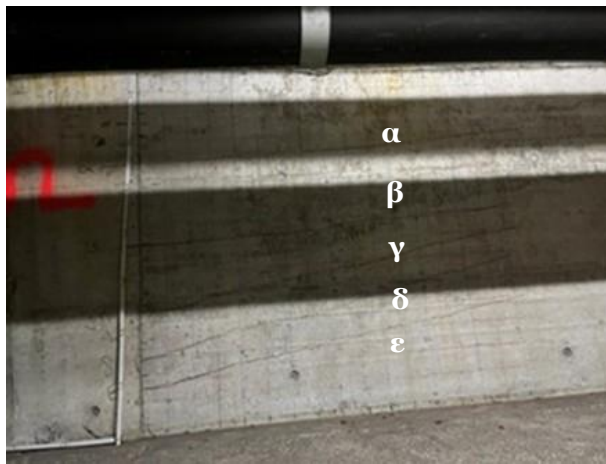


Abbildung 86: Messstelle E an der Rampenbrücke Wiese.

4.3.5.1 Radar

Die mit dem System 2 (GP8100) aufgenommenen Radardaten zeigen den Verlauf der fünf Spannglieder α , β , γ , δ und ε klar (Abbildung 87). Lokale Unterbrechungen der Darstellung treten nur vereinzelt auf, verursacht durch darüberliegende Bewehrungselemente. Im amplitudenbasierten C-Bild (links) sowie im volumetrischen Rendering (rechts) ist die Lage der Spannglieder dennoch gut nachvollziehbar. Für eine Beurteilung des Verfüllzustandes werden die Radardaten weiterhin nicht herangezogen.

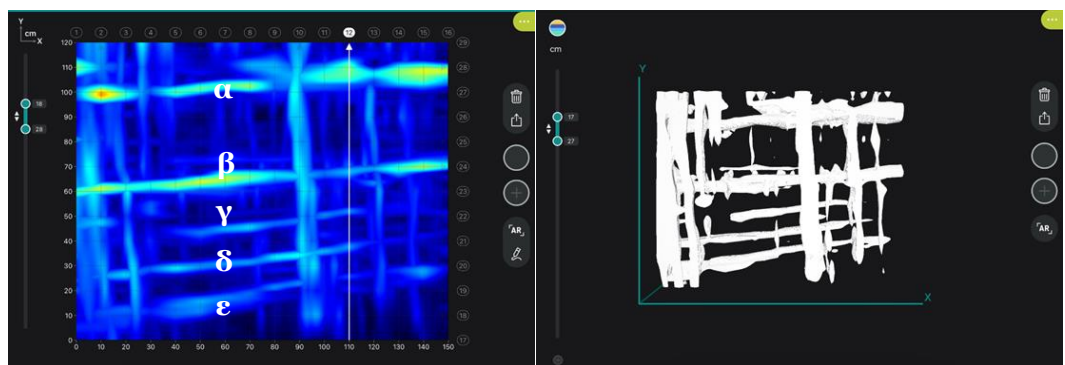


Abbildung 87: Resultatbilder der Radarmessungen an der Messstelle E der Rampenbrücke Wiese. Links: C-Bilddarstellung, rechts: volumetrisches 3D-Rendering.

4.3.5.2 Ultraschall – System 1

Mit Ultraschall System 1 konnten alle fünf Spannglieder eindeutig detektiert werden. Die eng beieinanderliegenden unteren Spannglieder (δ und ϵ) lassen sich im Tiefenprofil (Abbildung 88) hier besser separieren als es im Messfeld D der Fall war. Hier wird die unterschiedliche Tiefenlage von Spannkänen α und β gegenüber γ , δ und ϵ klar ersichtlich. Die Tiefenlage liegt, wie auch im zugehörigen Histogramm ersichtlich, zwischen etwa 15 cm und 22 cm. Eine klare Separierung liefert auch das amplitudenbasierte C-Bild (Abbildung 89). Auffälligkeiten, die als Indikatoren für unvollständige Injektion zu interpretieren wären, sind nicht erkennbar.

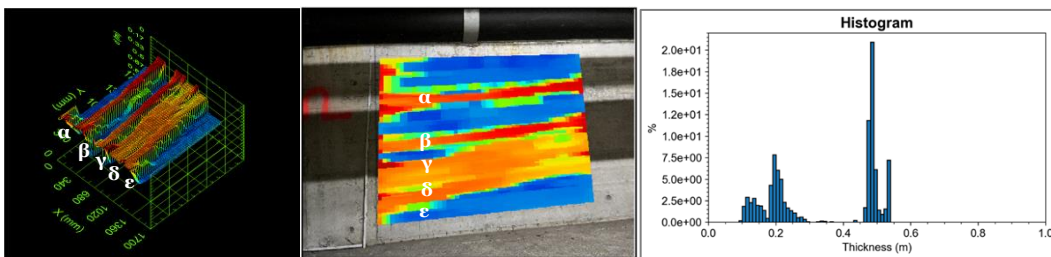


Abbildung 88: Tiefen bzw. Laufzeitprofildarstellungen der Ultraschallmessungen mit System 1 an der Messstelle E der Rampenbrücke Wiese. Links: 3D-Darstellung des Profils, Mitte: Bildliche Überlagerung mit dem Foto der Messfläche, rechts: Histogramm Darstellung der ermittelten Tiefenwerte.

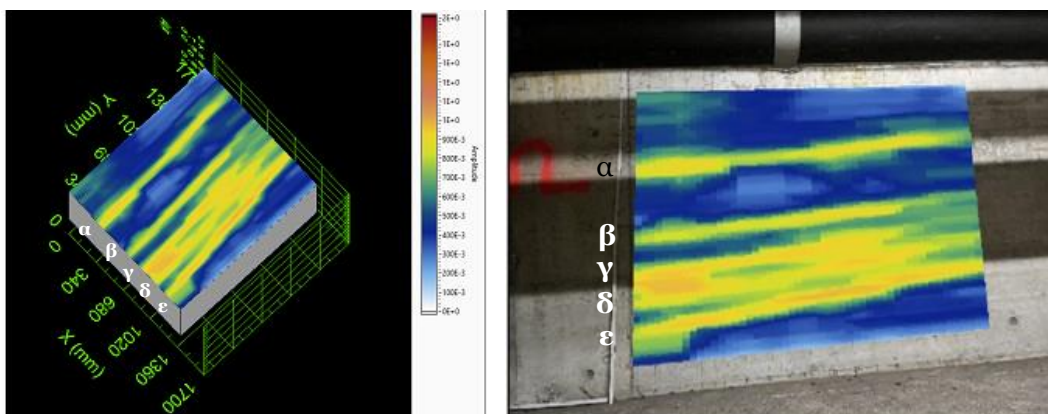


Abbildung 89: Amplitudendarstellung in Form einer C-Projektion parallel zur Messoberfläche im relevanten Tiefenbereich. Links: 3D-Darstellung, rechts: bildliche Überlagerung mit einem Foto der Messstelle E.

4.3.5.3 Ultraschall – System 2

Die Datenerfassung erfolgte analog zu Messfeld D rasterbasiert. Im amplitudenbasierten C-Bild (Abbildung 90) sind alle fünf Spannglieder deutlich abgebildet. Auffällig ist, dass in der Bildmitte ($x = [50 \text{ cm}; 110 \text{ cm}]$) sich für alle Spannglieder deutlich hohe Amplituden ergeben. Eine kausale Verbindung zu Bereichen mit unvollständiger Injektion ist jedoch aufgrund der Auffälligkeit in allen fünf Spannkänen nicht naheliegend und wird ex negativo verworfen.

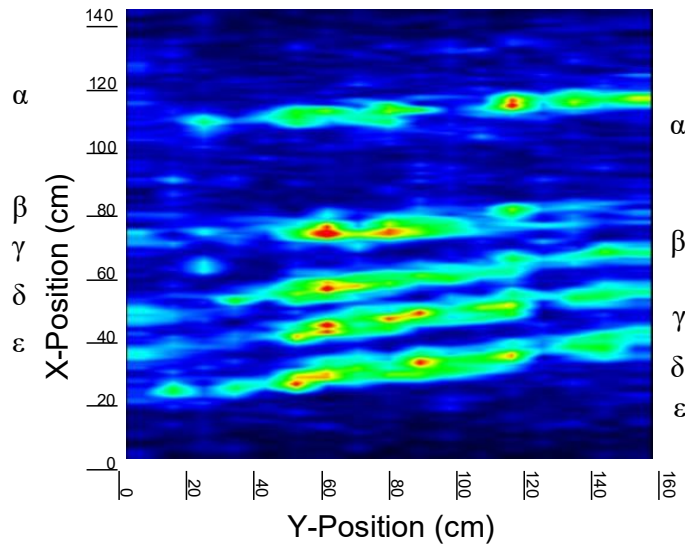


Abbildung 90: Ultraschallergebnisse für System 2 an in Messstelle E in Form von Amplitudendarstellungen als C-Bildprojektionen über Tiefenbereiche von jeweils 7 – 15 cm für beide Spannkanaäle α und β .

4.3.5.4 Impakt-Echo

Im Gegensatz zu Messfeld D zeigt das Impakt-Echo hier eine deutlich klarere und präzisere Lokalisation aller fünf Spannglieder im C-Bild (Abbildung 91). Diese verbesserte Abbildungsqualität ist bemerkenswert, lässt sich jedoch technisch nicht eindeutig erklären. Hinweise auf Defektzonen oder unvollständige Injektion wurden nicht festgestellt.

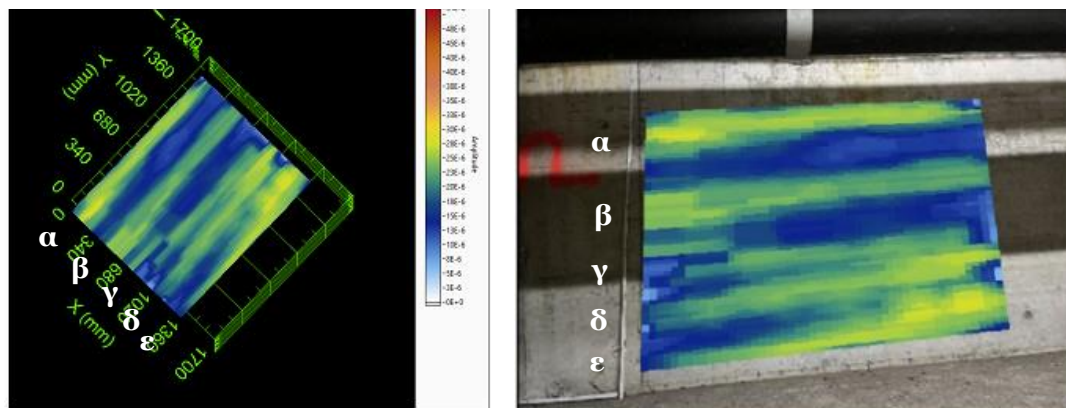


Abbildung 91: Impakt-Echo-Ergebnisse an Messstelle E in Form von Amplitudendarstellungen als C-Bildprojektionen über den Tiefenbereich der Spannkanaäle.

4.3.5.5 Fazit Messstelle E

Messfeld E bestätigt im Wesentlichen die Ergebnisse von Messfeld D, weist jedoch mit dem Impakt-Echo-System eine präzisere Lokalisation der Spannglieder auf. Die beobachteten Amplitudenvariationen im Ultraschall System 2 im mittleren Bildbereich sind auffällig, lassen sich jedoch nicht als Beleg für mangelnde Injektion interpretieren. Hinweise auf Verfüllmängel oder strukturelle Anomalien konnten mit keinem der Verfahren festgestellt werden.

4.3.6 Gesamtbewertung der Messungen an Rampenbrücke Wiese

Über alle fünf Messfelder hinweg ergibt sich insofern ein überwiegend homogenes Bild, dass keine eindeutigen Indizien für unvollständig injizierte Abschnitte festgestellt wurden. Die Lokalisierung der Spannglieder gelang in allen Fällen zuverlässig, mit leichten methodenspezifischen Variationen in der Abbildungsqualität. Auffällige, jedoch nicht klar als Defekte zu interpretierende Messphänomene traten lediglich lokal und methodenabhängig auf (z. B. Amplitudenanomalien in Messfeld E).

Die vorliegenden Ergebnisse liefern keine gesicherten Hinweise auf relevante Verfüllmängel in den untersuchten Bereichen. Vollständig ausschliessen lassen sich solche Mängel jedoch nicht, da einzelne Messphänomene nicht abschliessend geklärt werden konnten. Die hohe Übereinstimmung zwischen den Verfahren über alle Messfelder hinweg spricht für eine insgesamt homogene Struktur und eine gute Reproduzierbarkeit der angewandten Methoden.

5 Diskussion und Folgerungen

Die Erfahrung zeigt, dass Injektionsmängel in Vorspannkabeln, insbesondere unvollständige Verfüllungen und Segregationen des Füllguts, potenziell erhebliche Korrosionsrisiken für Spannglieder darstellen. Besonders kritisch sind grössere Hohlräume sowie stark segregiertes Füllgut (Soft-Grout), da diese Bedingungen die Entstehung von Makroelementen fördern und zu einer beschleunigten Korrosion des Spannstahls führen können. Die in der Literatur beschriebenen und im Rahmen früherer Projekte dokumentierten Schadensfälle verdeutlichen die Dringlichkeit, die Ursachen und Mechanismen solcher Phänomene weiter zu erforschen.

Die Laboruntersuchungen an den Prüfkörpern zeigten, dass die Verfahren Impakt-Echo und Ultraschall grundsätzlich geeignet sind, Unterschiede im Verfüllzustand der Hüllrohre zu detektieren. Beim Impakt-Echo bestand in den Prüfungen an den Testkörpern eine hohe Korrelation mit dem tatsächlichen Verfüllzustand, insbesondere bei metallischen Hüllrohren, während bei Kunststoffhüllrohren ein etwas geringerer Kontrast zwischen verfüllten und unverfüllten Bereichen zu beobachten war. Die Ultraschallmessungen lieferten unterschiedliche Resultate: Die Laufzeit- bzw. Tiefenprofile erwiesen sich als aussagekräftiger als die amplitudenbasierten Auswertungen, die weniger sensitiv auf Verfüllmängel reagierten.

Die Feldmessungen an der Reppischtalbrücke und an der Rampenbrücke Wiese machten deutlich, dass sich die Laborergebnisse nur eingeschränkt auf reale Bauwerksbedingungen übertragen lassen. Die präzise Lokalisierung der Spannkanäle gelang zwar in allen Fällen, jedoch sind im Feld eine Reihe zusätzlicher Einflussfaktoren wirksam, darunter komplexe Geometrien, dicht liegende Bewehrung und variierende Bauwerksoberflächen. Hinsichtlich der Bewertung des Verfüllzustandes konnten keine eindeutigen Indizien für das Vorliegen von Verfüllmängeln festgestellt werden.

Ein wichtiger methodischer Aspekt ist die fehlende, direkte Validierung der Felddaten durch invasive Verfahren wie Sondierungen. Darauf wurde bewusst verzichtet, um eine Beschädigung der Bauwerke bzw. der überwachten Kabel zu vermeiden, zumal keine klaren Hinweise auf Fehlstellen vorlagen und deren Auftreten als eher unwahrscheinlich einzustufen war. Somit kann nicht abschliessend beurteilt werden, ob die Verfahren im Feld tatsächlich in der Lage gewesen wären, vorhandene Verfüllmängel sicher zu detektieren.

Gleichwohl lässt sich festhalten, dass die eingesetzten Verfahren in der Kombination ein homogenes und konsistentes Befundbild ohne auffällige Häufung falscher Anzeigen (*falsum positivum*) lieferten. Damit belegen die Ergebnisse, dass unter den gegebenen Bedingungen keine deutlichen Hinweise auf Defektzonen vorlagen und dass die Methoden geeignet sind, ein verlässliches Bild unauffälliger Spannkanäle zu erzeugen. Für eine belastbare Validierung ihrer Detektionsfähigkeit im Feld wären jedoch Untersuchungen an Bauwerken mit bekanntem Defektbestand notwendig, idealerweise bestätigt durch gezielte Öffnungen und Probenentnahmen.

Zu beachten ist dabei auch, dass die Zugänglichkeit relevanter Bereiche bei Hohlkastenbauwerken oft eingeschränkt ist. Die relevanten Zonen liegen auf Höhe der Platte an Boden und Decke und werden zudem nicht selten durch Querträger verdeckt, so dass Hochpunkte und Tiefpunkte in der Regel nicht erreicht werden können. Um das Potenzial bauwerksdiagnostischer Untersuchungen künftig nutzen zu können, sollte zu prüfgerechte Bauweise verfolgt werden.

Es stellt sich die Frage nach der Vergleichbarkeit der Aussagekraft der Verfahren Ultraschall und Impakt Echo sowohl im Labor als auch im Feld. Die Beurteilung der tatsächlichen Aussagefähigkeit muss sich auf die Untersuchungen an den Testkörpern stützen, da nur dort der wahre Zustand zweifelsfrei bekannt ist. Dabei zeigt sich, dass beide Verfahren verlässliche Ergebnisse liefern können, sofern die Bedingungen eindeutig sind, wie es beim Testkörper Uno der Fall war. Für die Anwendung im Feld ist festzuhalten, dass der Ultraschall eine höhere Reproduzierbarkeit aufweist, da Impakt Echo in hohem Masse von der konkreten Anregung und der Ankopplung des Sensors abhängt. Die Auswertung des Impakt Echo-Verfahrens ist zudem komplex, da sowohl Frequenz- als auch Amplitudenaspekte zu berücksichtigen sind und unterschiedliche physikalische Effekte zum Tragen kommen. Einige dieser Effekte basieren auf frequenzspezifischen Interpretationen im tiefen oder hohen Bereich sowie auf theoretischen Ansätzen, deren Validität nicht unumstritten ist. Insgesamt erscheint die Auswertung im Vergleich zum Ultraschall weniger direkt, da beim Ultraschall ein klarer Zusammenhang zwischen Laufzeit und Tiefe besteht.

Für den Einsatz von Impakt Echo ist eine ganzheitliche Betrachtung erforderlich. Dazu gehört zunächst die Identifikation der dominanten Frequenzen und deren Darstellung im Tiefenprofil. Erst dadurch lässt sich erkennen, ob eine vermeintliche Verschiebung der Rückwand vorliegt oder ob es sich um Anzeigen aus dem Volumeninnern handelt. Darauf aufbauend sind weitere Überlegungen hinsichtlich der Anwendbarkeit der theoretischen Gleichungen über Resonanzen an festen oder losen Enden möglich, die zur Identifikation von Luft dienen. Gleichzeitig muss die Anregung so gewählt werden, dass der relevante Frequenzbereich tatsächlich angeregt wird. Häufig ist zudem zu beobachten, dass unverfüllte Stellen aufgrund geringerer Dämpfung zu höheren Amplituden führen, weshalb sich die zusätzliche Betrachtung von amplitudenbasierten C-Bildern empfiehlt. Insgesamt zeigt sich, dass eine vollständige Analyse stets mehrere dieser Schritte umfasst, was zu einer entsprechenden Komplexität führt.

Bei der Ultraschallprüfung konnte festgestellt werden, dass die Tiefe der Echolage Hinweise auf Reflexionen entweder am Hüllrohr selbst bei Luftfüllung oder am Spannstahl bei vollständiger Verpressung liefert. Darüber hinaus zeigt sich bei unverpressten Bereichen eine leicht erhöhte Amplitude, bedingt durch die stärkere Reflexion an Luft gegenüber Stahl. Damit ist das Verfahren in der praktischen Anwendung zunächst direkter. Besonders geeignet für die Interpretation sind Tiefenprofilardarstellungen, die sich bei der Analyse der Testkörperdaten als zielführend erwiesen, da geringe Laufzeitunterschiede klar in der Tiefenanzeige sichtbar werden. Voraussetzung hierfür ist eine angemessene Einstellung der Farbskala, sodass die Dynamik der Werteunterschiede hinreichend abgebildet wird, sowie der Einsatz geeigneter Software. Bei den verwendeten Systemen war dies lediglich bei System 1 gegeben, wobei für das Gerät aus System 2 zeitnah eine entsprechende Kompatibilität erwartet wird. Perspektivisch sind

auch massgeschneiderte Lösungen zur quantitativen Erfassung dieser Effekte denkbar. Ergänzend ist die Darstellung von C-Bildern notwendig, um lokale Amplitudenerhöhungen entlang des Spannkanals, die auf Luftfüllung hindeuten, zuverlässig erkennen zu können. Darüber hinaus bietet das Ultraschallverfahren weiteres Potenzial für erweiterte Analysetechniken, die im Rahmen dieses Projekts noch nicht angewendet wurden, jedoch im Ausblick genannt werden.

Final ist festzustellen, dass sowohl Impakt-Echo als auch das Ultraschallverfahren in der Lage sind, unverfüllte Bereiche zu detektieren, jedoch keines der beiden Verfahren eine hundertprozentige Detektion ermöglicht. Daher erscheint eine Kombination beider Methoden insbesondere bei kritischen Fragestellungen sinnvoll. Beide Verfahren erfordern zudem eine ausreichende Messpunktdichte. Die Datenerfassung mit Impakt Echo erfolgte entlang der die Spannkanäle kreuzenden Richtung mit einem sehr geringen Punktabstand von $dx = 2 \text{ cm}$, was eine hohe Auflösung und durch softwareinterne Glättungsverfahren eine hohe Aussagekraft ermöglicht. Gleichzeitig ist der Aufwand für die Datenaufnahme beträchtlich und stellt für die Praxis eine wesentliche Einschränkung dar. Bei praxisüblichen Punktabständen von mindestens 10 cm ist die Detektierbarkeit sehr fraglich. Grundsätzlich bestimmt der Punktabstand in der kreuzenden Richtung die lokale Detektierbarkeit, während der Linienabstand entlang der Längsrichtung die minimal erfassbare Ausdehnung eines Hohlraumes vorgibt.

Die grosse Apertur des Ultraschallsystems erlaubt hingegen einen deutlich grössere Messpunktabstände bis etwa zur halben Gerätebreite, wodurch sich die Datenerfassung schneller und reproduzierbarer gestaltet. Dies gilt jedoch ebenfalls nur in der kreuzenden Richtung. Auch hier bestimmt der Abstand der parallelen Messlinien die minimal detektierbare Ausdehnung. Wichtig ist, dass die Apertur vorzugsweise senkrecht zum Spannkanal ausgerichtet sein sollte; eine Ausrichtung entlang des Kanals in lieferte kaum verwertbare Ergebnisse.

Insgesamt zeigt sich, dass der Aufwand für die Datenerfassung in beiden Verfahren hoch ist. Ein praktischer Einsatz der Systeme und insbesondere deren Kombination erscheint grundsätzlich möglich, wird sich jedoch auf die relevantesten Bereiche beschränken müssen. Eine flächendeckende Anwendung ist in dieser manuellen Form kaum realistisch. Im Ausblick werden mögliche Weiterentwicklungen im Sinne mechanisierter oder robotisierter Systeme adressiert, die künftig eine effizientere Umsetzung erlauben könnten.

Über allem ist zudem bemerkenswert, dass gemäss dieser Studie die Detektion unverfüllter Stellen grundsätzlich auch bei Kunststoffrohren als machbar beurteilt werden kann. Der direkte Vergleich mit dem Spannkanal aus Stahlblech im Testkörper Uno zeigte zwar eine geringfügig klarere Anzeige im Falle des Stahlblechrohrs, jedoch fiel dieser Unterschied sehr moderat aus. Dies ist insofern hervorzuheben, als der deutlich geringere akustische Impedanzunterschied zwischen Beton und Kunststoff im Vergleich zu jenem zwischen Beton und Stahlblech die Lösbarkeit der Aufgabenstellung auf Basis elastischer Wellen zumindest als anspruchsvoll erscheinen liess.

Abschliessend sei eine Empfehlung im Sinne eines prüfgerechten Bauens hier ausgesprochen. Dies umfasst Konstruktionen, bei denen potenziell kritische Bereiche

hinsichtlich möglicher Injektionsmängel so gestaltet werden, dass sie für ZfP-Techniken gut zugänglich bleiben. Ungünstig erscheinen Spannkanäle, die in Wanddickenrichtung übereinander liegen, da sie die Prüfung erheblich erschweren. Der hierfür notwendige zusätzliche planerische und bauliche Aufwand sollte dem langfristigen Nutzen einer verbesserten diagnostischen Zugänglichkeit gegenübergestellt werden. Dies erscheint umso sinnvoller, als in den kommenden Jahren und Jahrzehnten weitere Fortschritte in der diagnostischen Forschung zu erwarten sind. Zudem ist der Einbau von Sensorik zur Dauerüberwachung als ergänzende Massnahme in Betracht zu ziehen.

6 Ausblick

Für zukünftige Entwicklungen erscheint es zunächst sinnvoll, den Abbruch vorgespannten Bauwerken gezielt als Gelegenheit für weitergehende Erkenntnisse zu nutzen. Beim Rückbau von Brücken und anderen Spannbetonkonstruktionen besteht die einmalige Möglichkeit, die Spannkäme unmittelbar zu öffnen und die tatsächliche Verfüllungs- und Korrosionssituation systematisch zu dokumentieren. Solche Untersuchungen könnten wertvolle Referenzdaten liefern, die eine direkte Validierung zerstörungsfreier Prüfmethoden erlauben und damit entscheidend zur Weiterentwicklung der Diagnostik beitragen. Es wäre daher wünschenswert, wenn öffentliche Bauherren wie das ASTRA sowie die Kantone diese Chance künftig verstärkt wahrnehmen und entsprechende Begleituntersuchungen unterstützen würden.

Die Ursachen der Segregationen respektive der Soft-Grout Bildung sind aktuell noch nicht vollständig geklärt. Aufgrund der bis heute dokumentierten Fälle tritt Soft-Grout mehrheitlich bei Kunststoffhüllrohren und externer Vorspannung auf. Es ist denkbar, dass das Füllgut in gerippten Stahlblechhüllrohren während der Injektion stärker verwirbelt (vermischt) wird, was die Homogenität und Stabilität womöglich verbessert. Ein Unterschied zwischen Litzen- oder Drahtsystemen ist nicht bekannt. Restwasser in den Hüllrohren ist ungünstig, weil es die Füllgutzusammensetzung verändert und die Stabilität der Mischung beeinträchtigt. Bei langen Injektionsetappen nimmt das Risiko von Entmischungen ebenfalls zu.

Aufgrund von Erfahrungen der Forschungsstelle ist die Qualitätssicherung des Füllguts und der Injektionsarbeiten auf der Baustelle zentral, damit die Spannglieder vollständig verfüllt werden und keine Qualitätsabnahme des Füllguts über die Kabellänge auftritt. Die Durchführung von Eignungsprüfungen und Produktionskontrollen auf der Baustelle durch die Vorspannfirmer gemäss SN EN 446, Tabelle NA.1, sollten konsequent umgesetzt werden. Bei hohen Anforderungen (Ausführungsstufe 3) sollte von der Bauherrschaft regelmässig eine Überwachung durch eine unabhängige dritte Stelle verlangt (Fremdüberwachung) werden, was heute noch zu wenig häufig gemacht wird.

Einige Kontrollen auf der Baustelle und gewisse Prüfungen am Füllgut sind besonders wichtig. Die aus den Betonbauteilen herausragenden Entlüftungsröhrchen sind gefährdet für Beschädigungen, insbesondere an der Übergangsstelle zur Betonoberfläche. An diesen Punkten weisen die Röhrchen häufig Risse auf, beispielsweise wenn man mit dem Fuss (unabsichtlich) das Röhrchen touchiert oder bei Materialverschiebungen auf der Bauteiloberfläche. Über solche Risse kann Wasser einfach und unkontrolliert in das Hüllrohr eindringen, von wo es sich nur schwer wieder entfernen lässt. Normalerweise werden die Hüllrohre vor der Injektion mit Pressluft ausgeblasen. Bei langen und gekrümmten Spanngliedern ist jedoch nicht gesichert, ob das ganze Wasser zuverlässig aus dem Hüllrohr befördert werden kann. Die Kontrolle und, falls notwendig, die Reparatur beschädigter Entlüftungsröhrchen ist demzufolge zu beachten. Eine rasche Revision der Normenserie SN EN 445, 446 und 447 von 2007 ist nicht zu erwarten. Die durchzuführenden Prüfungen am Füllgut sind aber nach wie vor sinnvoll

und zweckmässig. Mit der Prüfung der Fliesszeit zu verschiedenen Zeitpunkten und Einhaltung des festgelegten Grenzwerts soll die Pumpbarkeit und das Verfüllen enger Hohlräume, auch bei dichter Packung der Hüllrohre, sichergestellt werden. Dazu müssen die Fliessmittel durch eine hohe Mischenergie (Kolloidalmischer) ausreichend aktiviert werden. Durch das Befüllen von durchsichtigen Standrohren mit Füllgut kann das Absetzen der Mischung und die Blutwasserbildung an der Oberfläche über 24 Stunden messtechnisch kontrolliert werden (Setzmass und Bestimmung der Blutwassermenge). Die gravimetrische Bestimmung der Flüssigkörperdichte, gemessen an Ein- und Auslasspunkten gibt deutlich Hinweise, ob sich die Zusammensetzung des Füllguts auf dem Weg durch das Hüllrohr verändert hat.

Hinsichtlich der zukünftig einzusetzenden Untersuchungsmethoden an verfüllten Spanngliedern bieten sich mehrere Ansätze an, um die Diagnostik von unregelmässiger Verfüllung und fehlerhaftem Injektionsgut weiter zu verbessern. Die Ergebnisse dieser Studie haben gezeigt, dass sowohl Impakt Echo als auch das Ultraschallverfahren grundsätzlich geeignet sind, unverfüllte Bereiche zu detektieren, zugleich jedoch deutliche Grenzen in der Vollständigkeit der Erfassung bestehen. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, bestehende Methoden weiterzuentwickeln und gleichzeitig ergänzende Verfahren einzubeziehen.

Ein wesentlicher Schwerpunkt zukünftiger Arbeiten liegt in der vertieften Auswertung der Ultraschallechos, insbesondere durch eine detaillierte Phasenanalyse. Diese ermöglicht eine deutlich präzisere Interpretation der Reflexionen und könnte damit die diagnostische Trennschärfe erheblich erhöhen. Eine solche Analyse war im Rahmen dieses Projekts aus zeitlichen Gründen und aufgrund fehlender spezieller Expertise nicht umsetzbar, stellt jedoch ein vielversprechendes Feld für weiterführende Forschung dar.

Ein weiterer vielversprechender Ansatz betrifft die Nutzung simulationsgestützter Rekonstruktionstechniken, wie sie in der Schweiz von der Firma Mondaic entwickelt wurden und insbesondere im Rahmen des laufenden Forschungsvorhabens BGT_20_o8C_o1 (*Full Waveform Inversion for reliable investigation of reinforced concrete with the Ultrasonic Echo method*) evaluiert werden. Auf Basis eines digitalen Zwillings des untersuchten Bauteils und präziser numerischer Simulationen des elastischen Wellenfeldes ermöglicht die Full Waveform Inversion eine iterative Anpassung der Materialparameter, sodass gemessene und simulierte Signale bestmöglich übereinstimmen. Dadurch können auch komplexe Wellenfelder, die durch Streuungen, Überlagerungen oder Heterogenitäten beeinflusst sind, vollständig rekonstruiert werden. Die resultierenden Abbildungen liefern quantitative Aussagen über die Verteilung elastischer Parameter und erlauben eine deutlich präzisere Identifikation von Hohlstellen und Injektionsmängeln, als es mit konventionellen Ultraschallverfahren möglich ist. Diese Technologie eröffnet somit Perspektiven für eine erheblich verbesserte diagnostische Aussagekraft, insbesondere bei schwer zugänglichen oder stark heterogenen Bauteilen.

Darüber hinaus erscheint die Anwendung von Röntgenverfahren als ergänzende Methode interessant [43]. Röntgenbasierte Techniken bieten das Potenzial einer hochauflösenden und direkten Visualisierung von Fehlinjektionen, die mit Ultraschall und

Impakt Echo lediglich indirekt erschliessbar sind. Besonders geeignet wäre ihr Einsatz zur gezielten Abklärung von Verdachtsstellen, die zuvor mit den akustischen Verfahren lokalisiert wurden. Eine grossflächige Anwendung von Röntgenuntersuchungen ist jedoch aufgrund des hohen technischen Aufwands und der Kosten kaum wirtschaftlich realisierbar.

Im Zusammenhang mit der Radiografie ist auch die Myonentomografie zu nennen. Dieses Verfahren nutzt die natürliche kosmische Myonenstrahlung zur Durchdringung grosser und massiv bewehrter Bauteile und ermöglicht eine tomografische Rekonstruktion der inneren Struktur, ohne dass eine aktive Anregung erforderlich ist. Da Myonen selbst dichte Materialien wie Beton und Stahl durchdringen, können volumenhafte Abbildungen des Innern erzeugt werden, die unabhängig von Ankopplung, Zugänglichkeit oder Signalqualität konventioneller zerstörungsfreier Prüfverfahren sind. Die Methode weist besonderes Potenzial für Bauwerke mit sehr grossen Querschnitten oder starker Bewehrung auf, wo akustische Verfahren an physikalische Grenzen stossen. Auch wenn der Einsatz derzeit noch mit hohem Aufwand verbunden ist, erscheint die Myonentomografie als vielversprechende ergänzende Technik, die langfristig neue diagnostische Möglichkeiten für die Zustandsbeurteilung komplexer Spannkanalsysteme eröffnen könnte.

Aus den gewonnenen Erkenntnissen ergibt sich zudem ein deutlicher Hinweis darauf, dass Fortschritte nicht allein in der Signalverarbeitung und Gerätekonzeption zu erwarten sind, sondern auch in der bautechnischen Gestaltung der Spannkanalsysteme selbst. Eine prüfgerechte Bauweise, die den Zugang zu kritischen Bereichen erleichtert, kann die Leistungsfähigkeit der Diagnostik massgeblich erhöhen. Angesichts der zu erwartenden Entwicklungen in der zerstörungsfreien Prüfung erscheint es sinnvoll, künftige Bauwerke so zu planen, dass diagnostische Verfahren möglichst optimale Bedingungen vorfinden.

Darüber hinaus besteht Potenzial in der Weiterentwicklung mechanisierter oder robotisierter Systeme zur Datenerfassung. Der erhebliche manuelle Aufwand, der sowohl bei Ultraschall als auch bei Impakt Echo entsteht, stellt derzeit eine der grössten praktischen Hürden dar. Automatisierte Messtechnik könnte hier eine deutliche Effizienzsteigerung ermöglichen und gleichzeitig die Reproduzierbarkeit der Daten verbessern.

Schliesslich ist auch der Einsatz dauerhaft integrierter Sensorik zu erwägen, um Veränderungen im Spannkanalinnern kontinuierlich überwachen zu können. Solche Systeme könnten langfristig eine wertvolle Ergänzung zur periodischen zerstörungsfreien Prüfung darstellen und zur Erhöhung der strukturellen Sicherheit beitragen.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse dieser Arbeit, dass sowohl methodische als auch bautechnische und systemtechnische Weiterentwicklungen erhebliches Potenzial bieten, die Diagnostik von Injektionsmängeln in den kommenden Jahren deutlich voranzubringen.

Literaturverzeichnis

- [1] SIA 262:2013 "Betonbau", SIA, 2013.
- [2] Massnahmen zur Gewährleistung der Dauerhaftigkeit von Spanngliedern in Kunstbauten, ASTRA, 2007.
- [3] B. Mühlan, S. Yves, Hasenstab, Andreas, D. Algernon und S. Feistkorn, Zerstörungsfreie Prüfmethoden (ZfP): Bedürfnisse der Praxis, 2017.
- [4] Y. Schieg und B. Mühlan, TFB Bericht 183614 Kongresshaus Biel, 2018.
- [5] F. Hunkeler, P. Matt, U. von Matt und R. Werner, „Spannglieder, Schrägseile und Anker - Beschreibung der Systeme und Erkenntnisse aus Korrosionsschäden,“ VSS Bericht Nr. 588, 2005.
- [6] Y. Schiegg und B. Mühlan, „Objekt 79R Brücke Stadtergasse,“ Bericht Nr. 103612 der TFB AG, Wildeg, 2011.
- [7] S. Fricker, T. Vogel, H. Ungricht und F. Hunkeler, „Akustische Überwachung einer stark geschädigten Spannbetonbrücke und Zustandserfassung beim Abbruch,“ VSS Bericht Nr. 643, 2010.
- [8] Y. Schiegg, *Schäden und Korrosion an Spannstahl*, Fachhochschule Nordwestschweiz, 2024.
- [9] M. Alvarez, P. Matt, L. Meyer und U. Vollmer, *Schrägseile und externe Spannglieder für den Brückenbau*, Bern: Bundesamt für Strassen ASTRA, 2001 V1.00.
- [10] Y. Schiegg und F. Hunkeler, „741 Calancastrasse - Ponte Tieda: Korrosionsversuche Füllgut,“ Bericht Nr. 113601 der TFB AG, Wildeg, 2011.
- [11] B. Mühlan und Y. Schiegg, „N13 EPO2 Mesocco, Ponte Pregorda - Ultraschall-Echo Analyse,“ Bericht Nr. 183721, 2018, 2018.
- [12] *SN EN 445: Einpressmörtel für Spannglieder - Prüfverfahren*, SIA, 2007.
- [13] *SN EN 446: Einpressmörtel für Spannglieder - Einpressverfahren*, SIA, 2007.
- [14] *SN EN 447: Einpressmörtel für Spannglieder - Allgemeine Anforderungen*, SIA, 2007.
- [15] H. Ganz, *Vorspannung für Betonbauten (CAS Betontechnik)*, FHNW/Betonsuisse, 2016.
- [16] L. Bertolini und M. Carsana, „High pH corrosion of prestressing steel in segregated grout,“ in *In C. Andrade & G. Mancini (Eds), Modelling of corroding concrete structures*, Dordrecht, RILEM Publications, Springer, 2011, pp. 147-158.
- [17] K. Lau, „Corrosion of Post-tensioned Tendons with Deficient Grout,“ Final Report BDV29-977-04, Tallahassee FL: FDOT Research Center, 2016.
- [18] E. Blactot, C. Brunet-Vogel, F. Farcas, L. Gaillet, I. Mabile, T. Chaussadent und E. Sutter, „Electrochemical Behaviour And Corrosion Sensitivity Of Prestressed Steel In Cement Grout,“ *WIT Transactions on Engineering Sciences*, Bd. 54, Nr. 10.2495/ECOR070261, p. 10 pages, 2007.

- [19] Y. Schiegg und B. Mühlan, „PÜF Oberwies,“ Bericht Nr. 113604 der TFB AG, Wildeg, 2011.
- [20] Y. Schiegg und B. Mühlan, „Viadotto delle Fornaci,“ Bericht Nr. 123617 der TFB AG, Wildeg, 2013.
- [21] T. Vogel und R. Bargähr, „Zustandserfassung von Brücken bei deren Abbruch,“ VSS Bericht Nr. 608, 2006.
- [22] e. a. Maierhofer Christiane, „Maierhofer, Christiane, et al. "Complementary application of radar, impact-echo, and ultrasonics for testing concrete structures and metallic tendon ducts.,“ *Transportation research record* , Bd. 1892, Nr. 1, pp. 170-177, 2004.
- [23] B. Köhler und F. Schubert, „Ten lectures on impact-echo,“ *Journal of Nondestructive Evaluation*, Bd. 27, Nr. 1, pp. 5-21, 2008.
- [24] S. Dorafshan und H. Azari, „Evaluation of bridge decks with overlays using impact echo, a deep learning approach,“ *Automation in Construction*, 2020.
- [25] D. Algernon, „Anwendungspotenzial für Machine Learning in der ZfP im Bauwesen,“ in *DGZfP-Jahrestagung*, Leipzig, 2018.
- [26] R. Liesaus, K.-D. Kaschmierzeck und G. Kapphahn, „Praktische Anwendungen Zerstörungsfreier Prüfungen,“ Berlin, 1999.
- [27] R. Beutel, H.-W. Reinhardt, C. U. Grosse, A. Glaubitt, M. Krause, C. Maierhofer, D. Algernon, H. Wiggenhauser und M. Schickert, „Comparative Performance Tests and Validation of NDT Methods for Concrete Testing,“ *Journal for Nondestructive Evaluation*, Bd. 27, Nr. 1-3, pp. 59-65, September 2008.
- [28] R. Helmerich, E. Niederleithinger, D. Algernon und H. Wiggenhauser, „Bridge Inspection and Condition Assessment in Europe,“ *Transportation Research Records*, Bd. 2044, Nr. 2044, pp. 31-38, 2008.
- [29] D. Streicher, D. Algernon, M. Behrens, C. Kohl, J. Wöstmann, H. Wiggenhauser und J. Petz, „Zerstörungsfreie Zustandsuntersuchungen an Spannbetonbrücken unter Verkehr,“ in *Fachtagung Bauwerksdiagnose 2016*, Berlin, 2006.
- [30] H. Wiggenhauser und E. Niederleithinger, „Innovative Ultrasonic Techniques for Inspection and Monitoring of Large Concrete Structures,“ Cadarache (France), 2012.
- [31] M. Krause, „Ultraschallechoverfahren an Betonbauteilen,“ in *Bauphysik-Kalender*, E. Cziesielski, Hrsg., Berlin, Ernst & Sohn, 2004, pp. 341-352.
- [32] C. Holmes, B. W. Drinkwater und P. D. Wilcox, „Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit–receive array data for non-destructive evaluation,“ *NDT & E International*, Bd. 38, Nr. 8, 2005.
- [33] J. Krautkrämer und H. Krautkrämer, *Ultrasonic Testing of Materials*, Springer, 1990.
- [34] L. von Bernus, A. Bulavinov, D. Joneit und M. Kröning, „Sampling Phased Array A New Technique for Signal Processing and Ultrasonic Imaging,“ in *ECNDT*, Berlin, 2006.

- [35] M. J. Sansalone und W. B. Streett, *Impact-Echo. Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry.*, Jersey Shore, PA (USA): Bullbrier Press, 1997.
- [36] D. Algernon, B. Gräfe, F. Mielentz, B. Köhler und F. Schubert, „Imaging of the Elastic Wave Propagation in Concrete Using Scanning Techniques: Application for Impact-Echo and Ultrasonic Echo Methods,“ *Journal of Nondestructive Evaluation*, Bd. 27, Nr. 1, pp. 83-97, 2008.
- [37] D. Algernon, „Impact-Echo: Analyse Akustischer Wellen in Beton,“ *ZfP-Zeitung*, Nr. 110, pp. 42-47, 2008.
- [38] N. J. Carino und M. Sansalone, „Pulse-Echo Method for Flaw Detection in Concrete,“ National Bureau of Standards, 1984.
- [39] N. J. Carino, „The Impact-Echo Method: An Overview,“ in *Proceedings of the 2001 Structures Congress & Exposition*, Washington, D.C. (USA), 2001.
- [40] J. W. Cooley und J. W. Tukey, „Cooley JW, Tukey JW (1965) An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series,“ *Mathematics of Computation*, Bd. 90, Nr. 19, pp. 297-301, 1965.
- [41] F. Schubert und R. Lausch, „Geometrical Effects on Impact-Echo Testing of Finite Concrete Specimens,“ in *Proceedings of the International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE) 2003*, Berlin, 2003.
- [42] F. Schubert und B. Köhler, „Ten lectures on impact-echo,“ *Journal of Nondestructive Evaluation*, Bd. 27, 2008.
- [43] S. Schulze, „Radiographie im Bauwesen–Einsatzmöglichkeiten in der Praxis im Rahmen der ZfPBau,“ *Beton-und Stahlbetonbau*, Bd. 117, Nr. 12, pp. 1008-1017, 2022.
- [44] H.-R. Ganz, *Vorspannung für Betonbauten*, CAS Betontechnik, Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW, 2016.
- [45] P. Matt, F. Hunkeler und H. Ungricht, „Korrosionsschäden an Spannstählen in Spanngliedern und vorgespannten Boden- und Felsankern,“ VSS Bericht Nr. 534, 1998.

Datenverwendung

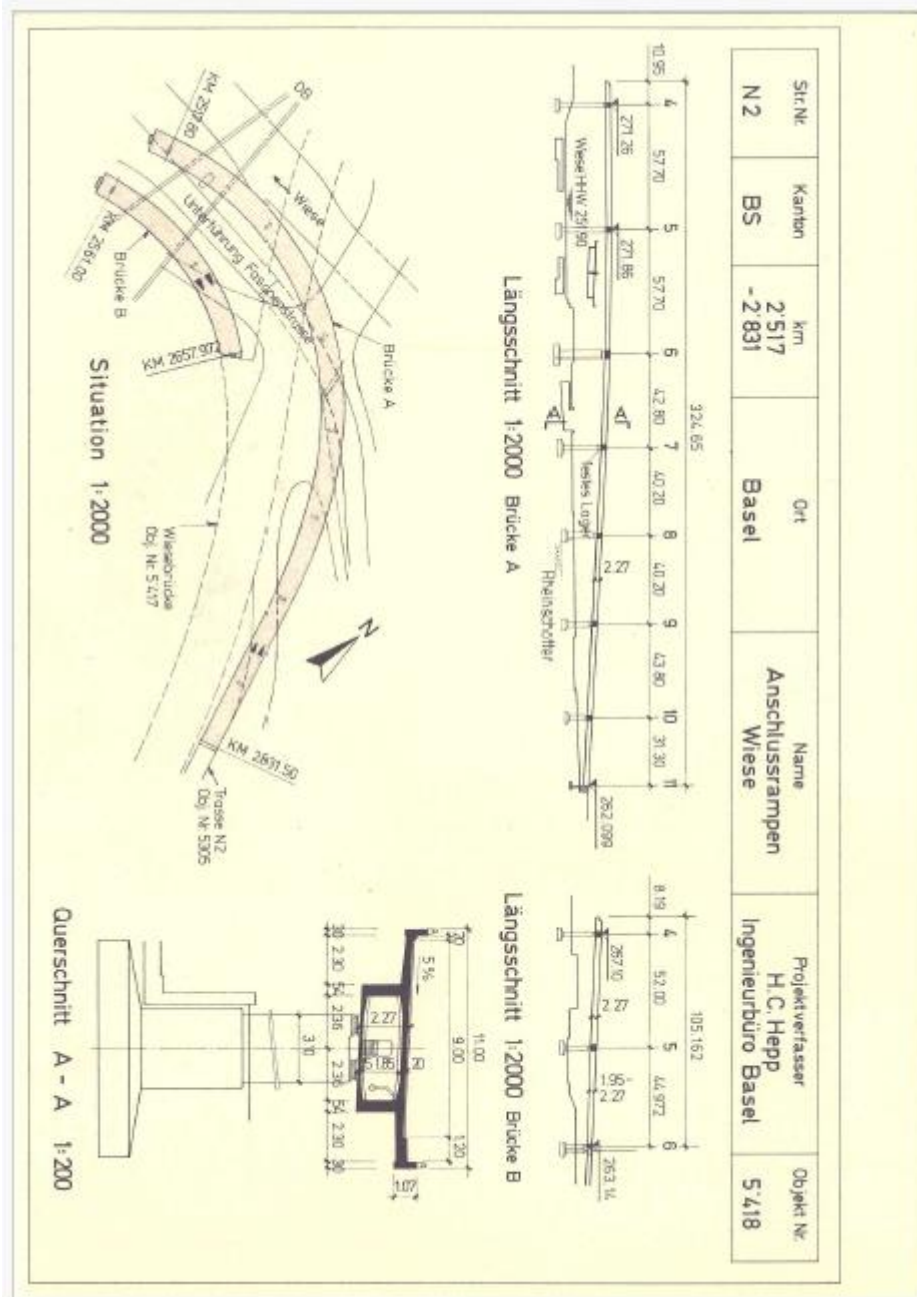
Die in diesem Bericht verwendeten Messdaten stammen von eigenen Impact-Echo-, Ultraschall- und Georadarmessungen. Diese stammen sowohl von den Prüfköpfen aus dem Labor und aus Felduntersuchungen an Brückenbauwerken. Die Messergebnisse wurden mit den kommerziell erhältlichen Softwarelösungen Radan, Echolyst sowie ergänzend MiraNeo bearbeitet.

Die Bauwerksakten und Liste der vorgespannten Bauwerke mit Spanngliedern vom Typ B oder C stammen vom Bundesamt für Strassen (ASTRA) und vom VSV (Verein Schweizerischer Vorspannfirmer).

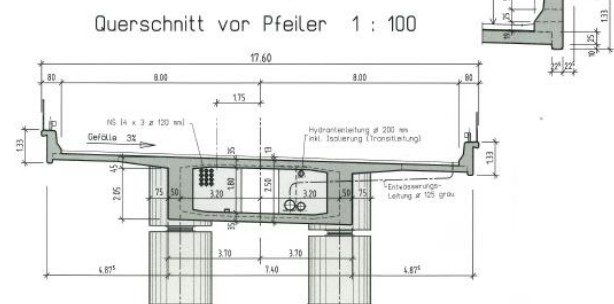
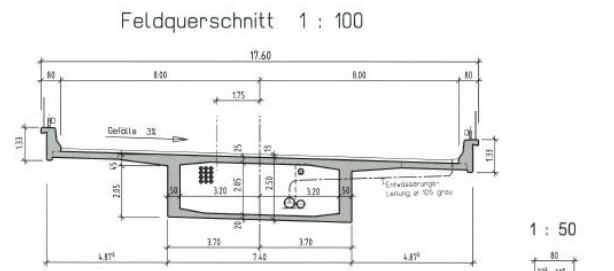
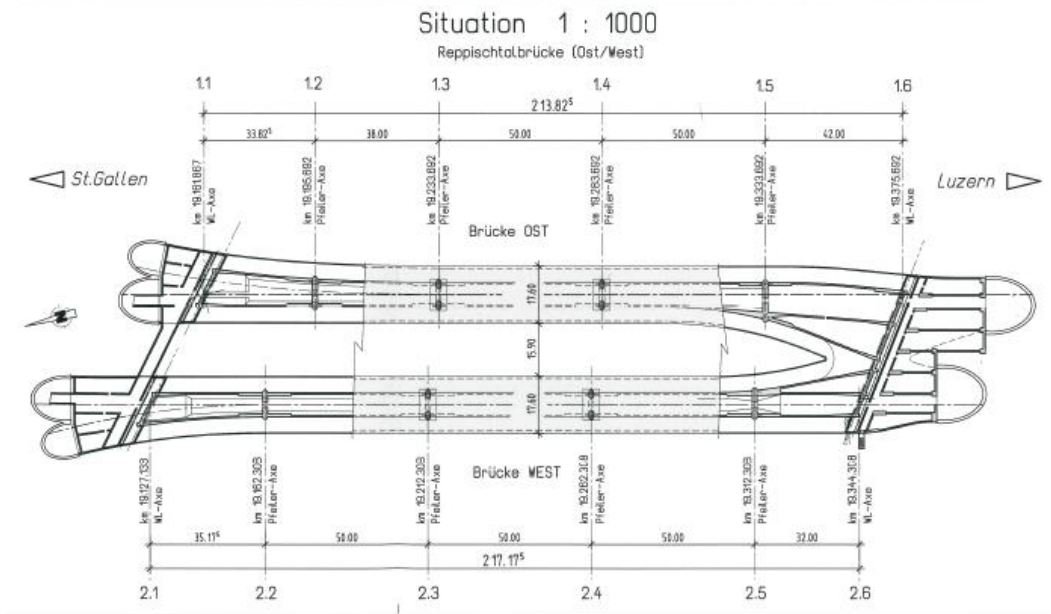
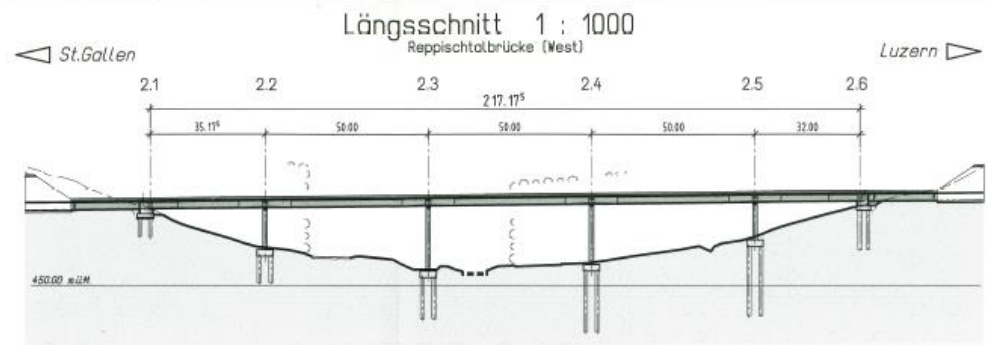
Die Messdaten sind nicht öffentlich zugänglich, können aber bei Bedarf bei der Forschungsstelle schriftlich beantragt werden (z.B. für die Nutzung bei weiteren Forschungsarbeiten). Für den Zugang zu den Bauwerksakten muss das ASTRA oder der VSV kontaktiert werden.

Anhang

Rampenbrücke Wiese



Reppischtalbrücke



Bauwerke mit Spanngliedern Typ b und c

Nr.	Name	Bauteil mit Vorspannung	Ort
1	Talbrücke Dättwil		Dättwil
2	Brücke FBZG Reuss Kt.Grenze AG/ZG	Vollwandträger	
3	Objekt Nr. 8.443 Rampenbrücke Wiese	Fahrbahnplatte, Hohlkasten	Basel
4	A2 Nordtangente, Abschnitt 4, Horburg Tunnel Rhein-Klybeck, Tunnel Horburg-West		Basel
5	Nordtangente Abschnitt 2 Tunnel St. Johann Mitte Haupttunnel		Basel
6	Brücke Wilddurchlass Henkelgiessen	Plattenbalken	Bilten
7	Brücke Anschluss Bilten + Linthkanal	Einzelstütze	Bilten
8	Rötibrücke		Solothurn
9	Brücke Städlerwald	Fahrbahnplatte	Cham
10	UEF Schulstrasse, Opfikon	Fahrbahnplatte, Steg	Opfikon
11	Brücke Sihlhochstrasse, Enge	Randborde	Zürich
12	Brücke B Glatt Süd, Verzweigung ZH Nord	Bodenanker	Opfikon
13	UEF Ottenbachstrasse	Fahrbahnplatte	Affoltern a.A.
14	UEF Dachlissen	Fahrbahnplatte	Mettmenstetten
15	UEF Obere Wangenstrasse	Mehrfacher Plattenbalken	Brütisellen
16	UEF Rampe Werft Richtung ZH Mitte	Fahrbahnplatte	Kloten
17	UEF Butzenbüelring Ost, Fracht	Platte	Kloten
18	Brücke Reppischtal	Fahrbahnplatte, Hohlkasten	Birmensdorf
19	PS du Milieu	VSL / PT-Plus; 4 to 7 strands 0.6" (15.7mm)	Avenches
20	PS d'Aderahubel	VSL / PT-Plus; 22 strands 0.6" (15.7mm)	Morar
21	Neubau Aarebrücke	VSL / PT-Plus; 4, 19 & 22 strands 0.6" (15.7mm)	Olten
22	MTRC Harbour Crossing Immersed Tube Tunnel	VSL / PT-Plus; 31 strands 0.5" (12.9mm)	Hong Kong
23	PS Pré du Mariage	Fahrbahnplatte VSL / PT-Plus; 19 strands 0.5" (12.9mm)	Cugy
24	Los 19015 Brig- Naters	VSL / PT-Plus; 5 & 7 strands 0.6" (15.7mm)	Valais
25	Bahn 2000 1. Et. 3. Geleise Winterthur-Kempthal los 2 Tössbrücke	VSL / PT-Plus; 15 strands 0.6" (15.7mm)	Zürich

26	BLS Bümpliz Nord	VSL / PT-Plus; 7 strands 0.6" (15.7mm)	Bern
27	Muota Brücke	Wire 52 strands 965 m	Ibach
28	Rhonebrücke Leuk	VSL / PT-Plus; 29 & 37 strands 0.6" (15.7mm)	Valais
29	Brücke Grindwäschi	Wire 102 strands 228 m	Walchwil
30	B-422 SBB Unterführung Etzgen	VSL / PT-Plus; 15 strands 0.6" (15.7mm)	Aargau
31	Neubau Zürchersmühlebrücke	Wire BBRV 366 m	Urnäsch
32	Pont Lapia-La Torrnaz-Mouthey	VSL / PT-Plus; 19 strands 0.6" (15.7mm)	Valais
33	Vorinvestition Bahnhof Löwenstrasse	Tendon CONA 19-06 2'989 m	Zürich
34	WSB, B-7831 Mittelmuhlen	Wire 31/42 strands 274 m	Muhlen
35	WSB, B-7833, Chesslermatt	Wire 42 strands 160 m	Muhlen
36	Brücke B449	Tendon CONA 9/13-06 - 1'110 m	Kaiseraugst- Rheinfelden
37	Chronbachbrücke, Staatsstr.	Wire 175 m	Urnäsch
38	Bahnbrücke BDWM, Objekt B-7344	Wire 52 strands 68 m	Bergdietikon
39	Ausbau Passage Sihlquai	Wire 82 strands 511 m	Zürich
40	Tunnel Giblin, Brücke SBB,	VSL / PT-Plus; 11 strands 0.6" (15.7mm)	Solothurn
41	Neubau Gessnerbrücke	Tendon CONA 12/ 19-06 - 1'037 m	Zürich
42	Brücke	Tendon CONA 12-06 54 m	Sissach
43	Brücke Entsumpfungskanal	Tendon CONA 22-06 141 m	Walenstadt
44	Viaduct du Lect	VSL / PT-Plus; 12 & 22 strands 0.6" (15.7mm)	Geneva
45	Stägmatthbrücke	Tendon CONA 27-06 392 m	Lütschental
46	Brücke Gais AG, B- 7150	Tendon CONA 22-06 - 414 m	Aarau

47	Los 44, Kunstbauten Schächen I	Tendon CONA 19-06 792 m	Altdorf UR
48	Bahnhof Aarau, Perrondach	Wire 42 strands 192 m	Aarau
49	Tischbrücke	VSL / PT-Plus; 19 strands 0.6" (15.7mm)	Biel
50	Gexi	VSL / PT-Plus; 12 strands 0.6" (15.7mm)	Lenzburg
51	Tram Bern West	VSL / PT-Plus; 12 & 19 strands 0.6" (15.7mm)	Bern
52	Löchligut	VSL / PT-Plus; 7 strands 0.6" (15.7mm)	Bern
53	PU - West, Fachhochschule	Wire 52 strands 133 m	St. Gallen
54	SBB Anschluss St.Gallen Spange SOB	VSL / PT-Plus; 27 & 31 strands 0.6" (15.7mm)	Engwil – St.Finden
55	Aufhebung der Bahnüber-gänge	VSL / PT-Plus; 22 strands 0.6" (15.7mm)	Wilchingen
56	Hofbrücke	VSL / PT-Plus; 27 & 31 strands 0.6" (15.7mm)	Innertkirchen
57	Los 41, Kunstbauten Schächen II	Tendon CONA 7/19-06 - 1'471 m	Altdorf UR
58	Wildunterführ-ung Fanelwald	VSL / PT-Plus; 19 strands 0.6" (15.7mm)	Gampelen-Ins
59	Alpentransit, Lotto 781- Camorino	VSL / PT-Plus; 12, 31 & 37 strands 0.6" (15.7mm)	Tessin
60	Alpentransit, Lotto 782- Camorino	VSL / PT-Plus; 12 & 19 strands 0.6" (15.7mm)	Tessin
61	Durchmesser-linie	VSL / PT-Plus; 12, 19 & 31 strands 0.6" (15.7mm)	Zürich
62	Gärtnerstras-sen Brücke	VSL / PT-Plus; 19 strands 0.6" (15.7mm)	Basel
63	Stadttangente Bern Erneuerung Brücke T2	VSL / PT-Plus; 19 strands 0.6" (15.7mm)	Bern

64	Durchmesserlinie, Einbindung Oerlikon	Tendon CONA 19-06 - 3'670 m	Zürich
65	Zweite Rheinbrücke SBB	Tendon DYWIDAG 32 - 2'675 m Tendon CONA 22-06 5359 m - Tot. 8'034 m	Basel
66	H144 Rennaz - Les Evouettes, Pont sur le Grand Canal	Tendon CONA 22-06 961 m	Chessel
67	Überwerfung Hürlistein,	Tendon CONA 19/31- 06 - 5'629 m	Effretikon
68	Zweite Rheinbrücke SBB	additional delivery of measuring cables to No. 21	Basel
69	P.I. de la rue Gambetta	Tendon CONA 3-06 115 m	Montreux
70	Überführung, Luzernerstrasse	Tendon CONA 7-06 - 20 m	Bremgarten AG
71	K21 Seelisbergstrasse, Lehnenviadukt I	Wire 102 strands 175 m	Seelisberg
72	Bahn 2000, 1. Etappe, Einfahrt Wettingen	Tendon CONA 27/31- 06 - 3'200 m	Spreitenbach
73	Zufahrtbrücke Schachen	Tendon CONA 12-06 520 m	Holderbank AG
74	Viadotto Lugano Belinzona Lotto 781		S. Antonino
75	Projekt 1184 / 4. Gleis Visp-St. Germann Teil Ost	Tendon CONA 31-06 10284 m	Visp
76	A16, Lot 8.1 Viaducs sur la Birse, Jonction de Delém.-Est	Tendon CONA 19-06 1'740 m	Delémont
77	Doppelspurausbau Schachen West, SBB- Linie Herisau- Wattwil	Tendon CONA 12/22 06 - 1'737 m	Herisau
78	RHB, Unterführung	Wire 29 strands 599 m	Malans GR
79	Wehrbrücke Hagneck	VSL / PT-Plus; 15 strands 0.6" (15.7mm)	Bern
80	Bahnhofsbau Brücken	VSL / PT-Plus; 12 & 22 strands 0.6" (15.7mm)	Zürich Oerlikon
81	RHB Rütlandbrücke, Litzirüti- Haspel- grube, Schöneggweg	Tendon CONA 4-06 285 m	Litzirüti
82	FMV-CH Mendrisio Stabio Confine	Tendon CONA 7/22-06 - 1'558 m	Mendrisio
83	MTRC Aberdeen Channel Bridge SIL Contract 903	VSL / PT-Plus; 19 strands 0.6" (15.7mm)	Hong Kong

84	Spange Süd	VSL / PT-Plus; 19 strands 0.6" (15.7mm)	Worb
85	Viadotto Lugano Belinzona Lotto 782		S. Antonino
86	Fuss und Radwegbrücke, Dammweg	Tendon CONA 19-06 132 m	Olten
87	Grosskreisel	Tendon CONA 4/12-06 - 827 m	Siebnen
88	Bateau Porte Forme 10	VSL / PT-Plus; 7 strands 0.6" (15.7mm)	France
89	Lehnenviadukt Foura d'Valorga, Ardez-Ftan	Tendon CONA 12-06 390 m	Ardez
90	RhB Überführung Kantonsstrasse	Tendon CONA 12/19-06 - 71 m	Landquart
91	Unterführung, Bahnhofstrasse	Wire 52/42 strands 336 m	Amriswil
92	SBB-Brücke, Zürcherstrasse	Tendon CONA 12-06 - 21 m	Baden
93	Gleisquerung Stadtmitte UF	Tendon CONA 4/7/12-06 - 65 m	Winterthur
94	AS Zizers, Wildbrücke Halbmil	Tendon CONA 22-06 - 3'150 m	Zizers
95	Svincolo Mendrisio, Lotto 202	Wire 52 strands 604 m	Mendrisio
96	Nietenbach-Brücke, Kantonsstrasse Schwyz-Sattel	Tendon CONA 4/7-06 522 m	Schwyz
97	Kappelbodenbrücke	Tendon CONA 7-06 813 m	Jaun
98	Tram Hardbrücke	Wire 42/52 strands 1'855 m	Zürich
99	Brücke Birchbach, 009X.211 192	Tendon CONA 12/31-06 - 312 m	Randa
100	Gleisquerung Stadtmitte, 2. Etappe	Tendon CONA 4/7-06 86 m	Winterthur
101	Neubau Paradiesbrücke, Möriken-Wildegg	Tendon CONA 12-06 70 m	Möriken AG
102	Bürtschlibrücke	VSL / PT-Plus; 12 strands 0.6" (15.7mm)	Schangnau
103	Torfeld Nord	VSL / PT-Plus; 12 strands 0.6" (15.7mm)	Aarau
104	Rue de la Mèbre – Cheseaux	Freyssinet 20T13S = 600m	Cheseaux
105	Ponte sul Fiume Brenno	Freyssinet 37T13S = 1200m	Biasca

106	Viaduc de Chanélaz	Freyssinet 13T15S = 800m	Chanélaz
107	San Gottardo	Freyssinet 12T15S = 400m	Biasca
108	Pont sur le Trient	Freyssinet 31T15S = 700m	Valais
109	PS de la Valerette	Freyssinet 19T15S = 37m 7T15S = 110m	Vaud
110	Staldbach Brücken	Freyssinet 19T15S 2500m	VS
111	St. – Barthélemy A9 Pont 1	Freyssinet 19T15S 2000m	St. – Barthélemy
112	Pont Prébois TCMC	Freyssinet 19T15 300m	Genève
113	Pont Hans Wilsdorf	Freyssinet 7T15S 1000m	Genève
114	Cavalcavia A2 – Ponte Nord	Freyssinet 19T15 = 450m 37T15 = 1700m	Tessin
115	PI La Mouline	Freyssinet 19T15 = 400m	Vaud
116	Correction de la Chaudanne	Freyssinet	Vaud
117	Leine Melchaa, Giswil	Freyssinet 19T15S 450m	Giswil
118	PS RC 780 Villeneuve	Freyssinet 25T15S 296m	Villeneuve
119	Pont sur le Durnand	Freyssinet 13T15S 60m	Valais
120	Val Marcou	Freyssinet 13T15 72m	Tessin
121	Fleur-de-Lys	Freyssinet 19T15S 210m	Vaud
122	Pont sur le Buttes	Freyssinet 13T15 265m	Neuchâtel
123	Pont sur la Grande- Eau	Freyssinet 13T15S 268m	Aigle
124	Pont de l'Ile	Freyssinet 19T15S 2600m	Genève
125	H144 viaduc sur l'A9	Freyssinet 19T15S	Vaud
126	H144 Viaduc sur le Rhône	Freyssinet 22T15S =1300m 19T15S = 1400m 16T15S = 330m 12T15SA = 230	Vaud

127	Guibiasco	Freyssinet 17T15S = 133m 27T15S = 320m 37T15S = 850m	Tessin
128	Biasca Nodo della Giustizia	Freyssinet 25T15S = 600m	Biasca
129	OIK ByPass Thun Aarebrücke	Freyssinet 17T15S = 85m 13T15 = 2100m 19T15 = 900m 25T15 = 600m 31T15 = 900m	Thun
130	Lotto 761	Freyssinet 7T15S = 2810m	Tessin
131	PS Rc Bonn - Düdingen	Randborde	Düdingen
132	PS Moulin de Bavois	Kastenträger	
133	PS TPF Semsales - La Verrerie	Fahrbahnplatte	
134	PS RC Châbles - Mussillens	Fahrbahnplatte	
135	PS Rc Faoug-Courgevaux	Fahrbahnplatte	
136	Viaduc de Lully Alpes	Fahrbahnplatte	
137	Viaduc de Lully Jura	Fahrbahnplatte	
138	PONT de Chandoline	Seile, Kabel	
139	PS de Perly (4105) - Lausanne	Fahrbahnplatte	Lausanne

Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 05.12.2025

Grunddaten

Projekt-Nr.: BGT_20_06B_02
 Projekttitel: Bewertung des Zustandes von Spanngliedern der Korrosionsschutz-Kat. b und c
 Enddatum: 31.12.2025

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Seit den frühen 1990er-Jahren werden in der Schweiz vermehrt Spannsysteme der Korrosionsschutzkategorien b und c eingesetzt, die im Gegensatz zur Kategorie a (klassische Stahlblechhüllrohre) auf Kunststoffhüllrohre zum verbesserten Korrosionsschutz durch das Material (Typ b und c) setzen. Da in den letzten Jahrzehnten vermehrt Mängel oder Schadenfälle infolge unvollständiger oder fehlerhafter Injektion der Spannglieder dokumentiert wurden, war das Ziel dieser Forschungsarbeit, ein Überblick über die in der Schweiz eingesetzten Spanngliedersysteme der Kategorien b und c zu gewinnen und zerstörungsfreie Prüfmethode zur Detektion von Fehlstellen im Labor und an Bauwerken zu bewerten.

Mit den Verfahren Impakt- und Ultraschall-Echo konnte an Laborprüfkörpern eine gute Korrelation mit dem Verfüllzustand nachgewiesen werden. Insbesondere erwies sich die Kombination beider Methoden als effektiv, um Hohlräume zuverlässig zu lokalisieren und deren Ausdehnung sowie Beschaffenheit näher zu charakterisieren.

Bei den nachfolgenden Felduntersuchungen an zwei Brückenbauwerken war die Interpretation der Messergebnisse erwartungsgemäss deutlich anspruchsvoller. Es konnte gezeigt werden, dass die Methoden geeignet sind, ein verlässliches Bild unauffälliger Spannkanele zu erzeugen. Die Untersuchung von Hochpunkten war jedoch nur eingeschränkt möglich, da die Spannglieder in diesen Bereichen meist in der Fahrbahnplatte liegen und von Querträgern verdeckt sind. In der Praxis liefert das Ultraschall-Verfahren eine höhere Reproduzierbarkeit als Impakt-Echo, da die Ankopplung der Sensoren und die Auswertung der Daten etwas einfacher ist. Es ist zudem bemerkenswert, dass gemäss dieser Studie die Detektion unverfüllter Stellen grundsätzlich auch bei Kunststoffrohren als machbar beurteilt werden kann.

Die Diagnostik von Hohlräumen und fehlerhaftem Füllgut in Spanngliedern muss zukünftig weiter verbessert werden. Für Ultraschall bietet sich beispielsweise eine detaillierte Phasenanalyse an, was eine präzisere Interpretation der Reflexionen erlaubt. Auch das Waveform Modeling, bei dem simulierte und gemessene Wellen verglichen und in Übereinstimmung gebracht werden, was Rückschlüsse auf die Strukturparameter erlaubt, bietet einen vielversprechenden Ansatz. Abschliessend sei erwähnt, dass die Qualitätssicherung des Füllguts und die zunehmende Überwachung der Injektionsarbeiten auf der Baustelle einen wichtigen Beitrag zur Vermeidung von Mängeln an Spanngliedern liefern.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

Das vorliegende Forschungsprojekt zielte darauf ab, einen Überblick über Spannglieder der Korrosionsschutz-Kategorien b und c zu erhalten, die in der Schweiz seit den frühen 1990er Jahren verbaut wurden und bei denen es möglicherweise zu Entmischungen des Füllguts gekommen sein könnte (Soft-Grout Bildung). Es wurden rund 140 Bauwerke mit Typ b oder c Spannglieder identifiziert. Ohne die Berücksichtigung von Schrägseilbrücken ist in der Schweiz aktuell nur ein Fall mit Soft-Grout in einem Hüllrohr dokumentiert. Durch den Einsatz aussagekräftiger zerstörungsfreier Prüfmethoden sollte eine Bewertung des Verfüllzustandes von Spanngliedern vorgenommen werden. Ultraschall- und Impakt-Echo haben sich bei dieser Fragestellung als grundsätzlich geeignete Verfahren erwiesen, was in einer ersten Phase an Laborprüfkörpern gezeigt werden konnte. Bei der Anwendung an zwei Brückenbauwerken war die Interpretation der Messergebnisse jedoch deutlich schwieriger, was häufig mit der dicht verlegten, schlaffen Bewehrung vor den Spanngliedern zusammenhängt. Trotzdem konnten keine verdächtigen Stellen identifiziert werden. Auf eine Validierung des Zustandes des Füllguts in den gemessenen Bereichen mittels zerstörender Sondage wurde verzichtet, um den bestehenden Korrosionsschutz der Spannglieder nicht unnötig zu gefährden.

Folgerungen und Empfehlungen:

Hohlräume und die Entstehung von Soft-Grout in Spanngliedern können ein erhebliches Korrosionsrisiko zur Folge haben. Die Ursachen und der Mechanismus der Soft-Grout Bildung sollten zukünftig noch genauer untersucht werden. Impakt-Echo und Ultraschall-Prüfungen sind grundsätzlich geeignet, eine ungenügende Verfüllung zu detektieren. Eine komplexe Bauteilgeometrie und dicht verlegte Bewehrung sind jedoch Faktoren, welche die Interpretation der Messergebnisse erschweren können. Mit beiden Verfahren müssen die Messungen senkrecht zur Spanngliedachse durchgeführt werden. Die zerstörungsfreien Prüfmethoden erlauben die Untersuchung von Spanngliedern mit metallischen, als auch mit Kunststoff-Hüllrohren. Die vertiefte Auswertung der Ultraschallechos, z.B. durch eine detaillierte Phasenanalyse, die Nutzung simulationsgestützter Rekonstruktionstechniken oder die gezielte Anwendung von Radiografie, eventuell auch Myonentomografie öffnen das Feld für zukünftige Forschungstätigkeiten. Die Qualitätssicherung des Füllguts und die Überwachung der Injektionsarbeiten auf der Baustelle sollten verstärkt werden. Dies sind wichtige Tätigkeiten, damit die Spannglieder vollständig verfüllt werden und keine Qualitätsabnahme des Füllguts über die Kabellänge auftritt. Es ist denkbar, dass die sich im Aufbau befindende Personenzertifizierung von Fachpersonal "Vorspanntechnik" gemäss den Normen SN EN 17678-1 und -2 die Kompetenzen der Spannfirmen zusätzlich erhöht.

Publikationen:

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Schiegg

Vorname: Yves

Amt, Firma, Institut: TFB AG

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Das Forschungsprojekt hatte folgende Zielsetzungen:

- Detektion von Verpressfehlern in Spanngliedern mit Kunststoffhüllrohren (Kategorie b und c gemäss Norm SIA 262). In der Schweiz wurden ca. 140 Projekte mit Kunststoffhüllrohren identifiziert. Auf Basis von Kriterien wie Spanngliedführung und Zugänglichkeit wurden zwei Brückenprojekte für die Überprüfung von erfolgsversprechenden NDT Methoden ausgewählt.

- Identifikation von erfolgsversprechenden NDT Methoden, um Verpressfehler in Spanngliedern mit Kunststoffhüllrohren finden zu können. Als Ergebnis einer Literaturstudie wurden die NDT Methoden "Impakt-Echo" und "Ultraschall-Echo" für die weiteren Untersuchungen gewählt. Diese NDT Methoden wurden mit verschiedenen Messgeräten sowohl an Laborprüfkörpern mit bekannter Geometrie und Verpressfehlern als auch an den zwei ausgewählten Brückenprojekten geprüft.

Eine Aussage zum generellen Zustand von Spanngliedern mit Kunststoffhüllrohren (Kategorien b und c) in der Schweiz kann auf Grund der Resultate dieses Projekts nicht gemacht werden. Das Projekt hat gezeigt, dass die NDT-Methoden Impakt-Echo und Ultraschall-Echo grundsätzlich geeignet sind, um Verpressfehler in Spanngliedern mit Kunststoffhüllrohren zu detektieren, dies vor allem, wenn wie in den Laborkörpern einzelne, oberflächennahe Hüllrohre und relativ wenig schlaffe Bewehrung vorliegen. In Brücken ist die Interpretation der Messresultate deutlich schwieriger. In den zwei untersuchten Projekten wurden keine Hinweise auf Verpressfehler gefunden. Die NDT-Methoden ergaben aber ein konsistentes Befundbild für unauffällige Spannkantile. Ein Beweis, dass sich Verpressfehler in Brückenspanngliedern detektieren lassen, konnte in diesem Projekt nicht erbracht werden.

Umsetzung:

Die Detektion von Verpressfehlern in Spanngliedern mit Wellblech- und Kunststoffhüllrohren bleibt weiterhin eine Herausforderung. Dieses Projekt konnte zeigen, dass sich Impakt-Echo und Ultraschall-Echo grundsätzlich dafür eignen, insbesondere wenn die Geometrie des Bauteils, die Spanngliedführung und die Bewehrung einfach sind, die NDT-Methoden in Kombination eingesetzt werden und die Auswertung verschiedene Parameter berücksichtigt. Da der Aufwand für die Messungen und Interpretation hoch ist, eignen sich diese Methoden nicht für eine Untersuchung von ganzen Objekten, sondern nur punktuell für einzelne Details.

weitergehender Forschungsbedarf:

Eine zuverlässige Detektion von Verpressfehlern in Spanngliedern mittels NDT-Methoden ist bislang nicht gewährleistet. Es bedarf weiterer Anstrengungen auf Seiten NDT-Methoden, Messgeräten und Auswertungsverfahren.

Einfluss auf Normenwerk:

Aus Sicht der BK haben die Ergebnisse des Projekts keinen Einfluss auf das Normenwerk.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Ganz

Vorname: Hans Rudolf

Amt, Firma, Institut: Ganz Consulting

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission: