

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation

Bundesamt für Strassen

Forschungsauftrag AGB2000/553 (90/00)  
auf Antrag der Arbeitsgruppe Brückenforschung

## Zuverlässigkeit und Genauigkeit von Georadar-Ergebnissen auf Betonbrücken

Détermination de la précision et de la fiabilité des mesures par radar sur les ponts

Reliability and Accuracy of Radar Results on Concrete Bridges

EMPA, Dübendorf  
Abteilung Strassenbau/ Abdichtungen  
Johannes Hugenschmidt, Dipl.-Geophysiker



März 2005



## **Hinweise**

Bitte beachten Sie als Lesehilfe das „Kleine Radarlexikon“ im Kapitel 7 dieses Berichtes.

## Vorwort

In den letzten zehn Jahren hat sich die zerstörungsfreie Prüfung von Brücken mit dem Georadar-Verfahren rasant weiterentwickelt. Dies betrifft sowohl die für die Messungen eingesetzten Geräte als auch die zur Datenverarbeitung und –auswertung verfügbare Hard- und Software. Zusätzlich entstand eine grosse Zahl von Publikationen über die (meist erfolgreiche) Anwendung des Verfahrens auf neue Fragestellungen und über neue, verbesserte Ansätze zur Bearbeitung bereits früher dokumentierter Anwendungen.

Obwohl diese Entwicklungen von grossem Wert für die Anwendung des Verfahrens in der Praxis sind, stellen sich für die Verantwortlichen letztlich nach wie vor die gleichen Fragen. Um eine Entscheidung über die Anwendung bzw. Nichtberücksichtigung dieses Verfahrens treffen zu können, sind Informationen darüber erforderlich, mit welcher Zuverlässigkeit und Genauigkeit bestimmte Fragen beantwortet werden können.

Die Bestimmung der Zuverlässigkeit und Genauigkeit von Radarergebnissen für verschiedene Fragestellungen war das Ziel des im vorliegenden Bericht dokumentierten Forschungsprojektes, welches im November 2000 vom Bundesamt für Strassen bei der EMPA, Abteilung Strassenbau/ Abdichtungen in Auftrag gegeben wurde. Zum Abbruch vorgesehene Brücken wurden mittels Georadar untersucht, die Resultate offengelegt und während des Abbruchs detailliert überprüft. Die dadurch gewonnenen Ergebnisse geben dem Praktiker wichtige Hinweise über die Zweckmässigkeit von Georadar-Untersuchungen für diverse Fragestellungen.

Dübendorf, im März 2005

Johannes Hugenschmidt

Empa

Abteilung Strassenbau/ Abdichtungen

## Zusammenfassung

Im hier dokumentierten Forschungsprojekt wurde die Genauigkeit und Zuverlässigkeit von Radarergebnissen auf Brücken ermittelt. Zu diesem Zweck wurden zum Abbruch vorgesehene Objekte mittels Georadar untersucht, die Ergebnisse offengelegt und während bzw. nach dem Abbruch durch einen Vergleich mit den Brückenteilen überprüft. Zusätzlich wurde ein Laborexperiment durchgeführt.

Die Belagsdicke konnte auf 95% der untersuchten Strecke bestimmt werden. Die mittlere Abweichung zwischen Radarergebnis und der Realität betrug 9mm. Die Frage, wie gut das Verfahren Schäden im Asphaltbelag detektieren kann, konnte im Rahmen dieses Forschungsprojektes nicht abschliessend beantwortet werden.

Die Eisenüberdeckung der obersten Bewehrungslage konnte auf 77% der untersuchten Strecke bestimmt werden. Die mittlere Abweichung zwischen Radarergebnis und der Realität betrug 10mm. Über weite Strecken konnte zusätzlich die Maschenweite der obersten Bewehrungslage bestimmt werden.

Die Position von Vorspannkabeln in der Brückenplatte konnte mit einer manuellen Radaruntersuchung mit einer Genauigkeit von besser als 50mm bestimmt werden. Der Anteil gefundener Kabel ist abhängig vom investierten Zeitaufwand und vom untersuchten Objekt.

Eine Pilotuntersuchung legte die Schlussfolgerung nahe, dass auch Zonen mit erhöhtem Chloridgehalt im Beton mittels Georadar lokalisiert werden können (z.B. in Fahrbahnplatten unter Abdichtung und Belag). Hier sind noch weitere Abklärungen sinnvoll.

Im Laborversuch wurde das Innere eines Betonträgers dreidimensional und detailliert abgebildet.

## Résumé

Le présent projet de recherche était consacré à la détermination de la précision et de la fiabilité des mesures par radar sur les ponts. Pour cela, on a procédé à un examen par géoradar de ponts destinés à être démolis. Les résultats de ces mesures ont ensuite été comparés avec ceux obtenus par mesure directe sur les ponts lors de leur démolition. A côté de cela, des expériences de laboratoire ont encore été réalisées.

La géoradar a permis de déterminer l'épaisseur du revêtement sur 95% des tronçons examinés. L'écart moyen entre les résultats de mesure par géoradar et la réalité atteignait 9 mm. Il n'a par contre pas été possible d'apporter une réponse définitive sur l'adéquation de cette méthode pour détecter les défauts dans le revêtement

L'épaisseur du recouvrement de béton de l'armature supérieure a pu être déterminée sur 77% des tronçons mesurés. L'écart moyen entre les résultats des mesures radar et la réalité atteignait 10 mm. Sur une grande partie des tronçons il a de plus été possible de déterminer la largeur de maille de la couche d'armature supérieure.

La position des câbles de précontrainte dans le tablier du pont a pu être déterminée par mesure manuelle avec une précision supérieure à 50 mm. Le pourcentage de câbles localisés dépend du temps investi dans les mesures et de l'objet à examiner.

Un essai pilote a montré que le géoradar devrait aussi permettre de détecter les zones du béton présentant des teneurs en chlorure élevées (par exemple dans les dalles de roulement des ponts, sous l'étanchéité et le revêtement). Cependant des études complémentaires seront encore nécessaires.

Dans un essai de laboratoire, la mesure géoradar a permis d'obtenir une représentation tridimensionnelle de l'intérieur d'une poutre en béton.

## Summary

During the research project described here, the accuracy and reliability of radar results on bridge decks was evaluated. To achieve this, bridges designated for demolition were inspected with GPR and the results were laid open. During and after demolition radar results are verified through a comparison with actual bridge parts. In addition, a laboratory experiment was carried out.

The pavement thickness was determined on 95% of the inspected sections. The mean difference between radar results and reality was 9mm. The suitability of the radar method for the detection of pavement damage was not evaluated conclusively during this project.

The concrete cover of the top layer of re-bar was determined on 77% of the inspected sections. The mean difference between radar results and reality was 10mm. In addition, the spacing between single bars was determined in many places.

The position of tendon-ducts in a bridge deck was determined with errors of less than 50mm. The percentage of ducts that can be localized depends on the amount of effort and on the object under inspection.

A pilot study suggested that the method is suitable for the detection of zones of increased chloride content within the concrete (for example on bridge decks beneath pavement and sealing). Further work on this subject is advisable.

In a laboratory experiment the interior of a bridge girder was mapped in three dimensions and in great detail.

# Inhalt

Hinweise.....	3
Vorwort.....	4
Zusammenfassung.....	5
Summary.....	7
Résumé.....	6
Inhalt.....	8
1 Projekt und Methodik.....	9
1.1 Arbeiten auf Abbruchobjekten.....	9
1.2 Sonstige Arbeiten.....	12
2 Funktionsweise des Georadar-Verfahrens.....	13
3 Stand der Technik.....	18
3.1 Technische Entwicklung seit 1990.....	18
3.2 Radargeräte.....	19
3.3 Antennen.....	20
3.4 Datenverarbeitung.....	21
3.5 Ausbreitungsgeschwindigkeiten.....	28
3.6 Positionsbestimmung und Positionierung.....	29
3.7 Mobile Georadar-Anlage der EMPA.....	33
3.8 Zukünftige Entwicklungen.....	35
4 Forschung aktuell.....	37
4.1 Durchmesser von Bewehrungsseisen.....	37
4.2 Chloridgehalt im Beton.....	38
4.3 Ausbreitungsgeschwindigkeit und Genauigkeit.....	39
5 Eignung und Genauigkeit der Ergebnisse für einzelne Fragestellungen.....	42
5.1 Belagsdicke.....	42
5.2 Belagsschäden.....	48
5.3 Eisenüberdeckung der obersten Bewehrungslage.....	50
5.4 Tiefe weiterer Bewehrungslagen.....	59
5.5 Betonschäden.....	59
5.6 Chloridgehalt.....	59
5.7 Ortung von Spannkabeln.....	65
5.8 Dreidimensionale Untersuchungen an Brückenteilen.....	77
6 Regulierung.....	80
7 Kleines Radarlexikon.....	83
8 Dank.....	88
9 Literatur.....	89
10 Anhang: Gekürzte Untersuchungsberichte für die einzelnen Objekte.....	91
10.1 Überführung Burggasse Altendorf.....	91
10.2 Rampe Sihlhochstrasse.....	105
10.3 Viadotto sopra le Cantine.....	125
10.4 Überführung Wyssenried.....	138
10.5 Aabachbrücke Uster.....	151
11 Beilage: Wegleitung für Praktiker.....	159



# 1 Projekt und Methodik

Am 23. November 2000 erhielt die EMPA, Abteilung Strassenbau/ Abdichtungen vom Bundesamt für Strassen, ASTRA, den Auftrag das Projekt „Beurteilung des Zustandes von Brücken mittels Georadar“ zu realisieren. Die Grundidee des Projektes besteht in Radaruntersuchungen auf zum Abbruch vorgesehenen Brücken und der Überprüfung der Radarergebnisse anhand der Brückenteile nach dem Abbruch. Zusätzlich wurde ein Laborexperiment durchgeführt und der hier vorliegende Bericht wurde durch für Brücken relevante Resultate aus Auftragsarbeiten ergänzt.

## 1.1 Arbeiten auf Abbruchobjekten

Bei der Auswahl der zu untersuchenden Objekte stand als wichtigstes Kriterium die Art des Abbruchs im Vordergrund, da nur „zersägte“ Brücken eine sinnvolle Überprüfung der Radarergebnisse erlauben. Weiterhin wurde angestrebt möglichst verschiedene Brückentypen und Problemstellungen mit einzubeziehen.

Die Radarmessungen wurden, wie bei anderen Brückenuntersuchungen auch, mit der mobilen Georadar-Anlage der EMPA vorgenommen (Ausnahme: Laborversuch auf Längsträger vom Viadotto sopra le Cantine). Die Auswertung der aufgezeichneten Radardaten erfolgte mit Hilfe einzelner Sondierungen zu Kalibrationszwecken.

Im Einzelnen waren für jedes Abbruchobjekt die folgenden Schritte vorgesehen:

Für jede Brücke, vor Abbruch:

- Radarmessung entlang möglichst mehrerer der vorgesehenen Schnittlinien
- Auswertung der Radardaten
- Offenlegung der Ergebnisse

Für jede Brücke nach Abbruch:

- Quantitativer Vergleich zwischen Radarergebnissen und der Realität

Zwar wurden in der Schweiz in den letzten Jahren viele Brücken abgebrochen, die wenigsten von ihnen wurden jedoch zersägt. Somit war die Auswahl an geeigneten Objekten eingeschränkt. Die *Tabelle 1.1-1* gibt eine kurze Übersicht über die untersuchten Objekte. Photos von den einzelnen Objekten zeigen die *Abbildungen 1.1.1 bis 1.1.6*.

*Tabelle 1.1-1: Übersicht über die untersuchten Brücken*

Nr.	Bezeichnung	Standort	Länge	Bemerkungen
1	Überführung Burggasse	Altendorf, SZ	53.06m	
2	Rampe Sihlhochstrasse	Zürich, ZH	40m (224.16m) <sup>1</sup>	Tatsächliche Verhältnisse bei Radarauswertung bekannt
3	Viadotto sopra le Cantine	Capolago, TI	340m	
4	Überführung Wyssenried	Thunstetten, BE	25m	Belag vor Abbruch zerstört
5	Aabachbrücke	Uster, ZH	16.30m	Belag vor Radarmessung entfernt
6	Längsträger vom Viadotto sopra le Cantine	Capolago/TI, Dübendorf/ZH		Dreidimensionale Untersuchung im Labor

<sup>1</sup> gesamt abgebrochene Länge 224.16m, zersägte Länge 40m



Abbildung 1.1.1: Überführung Burggasse



Abbildung 1.1.2: Rampe Sihlhochstrasse



Abbildung 1.1.3: Viadotto sopra le Cantine



Abbildung 1.1.4: Überführung Wyssenried



Abbildung 1.1.5: Aabachbrücke



Abbildung 1.1.6: Längsträger vom Viadotto sopra le Cantine

Auf den Objekten 1, 2 und 3 ermöglichte die Art des Belagsabbruchs eine Überprüfung der mittels Georadar ermittelten Belagsdicken. Auf dem Objekt 4 wurde der Belag mittels Bagger zerstört und auf dem Objekt 5 war er bereits vor der Radarmessung entfernt worden.



Abbildung 1.1.7: Abfräsen des Belages auf dem Objekt 3



Abbildung 1.1.8: Belagsöffnung mittels Baggerzahn auf Objekt 2

Die manuellen Messungen an den freigelegten Belagskanten und an den Abbruchteilen gestalteten sich in den meisten Fällen schwierig, da sie entweder unter hohem Zeitdruck während der laufenden Bauarbeiten durchgeführt wurden oder aber an provisorisch abgelegten Brückenteilen. Dennoch gelang es den grössten Teil der relevanten Informationen zu erheben.

In diesem Bericht werden die auf den Baustellen und Deponien per Hand ausgemessenen Grössen ohne weitere Korrekturen und Einschränkungen als Realität bezeichnet und für den Vergleich mit den Radarergebnissen beigezogen. Somit sind die erhaltenen Genauigkeiten in dem Sinne konservativ, dass allfällige Messfehler der Handmessung voll in den Vergleich eingehen.



Abbildung 1.1.9: Entfernung eines Brückenteils vom Objekt 3



Abbildung 1.1.10: Ausmessen der Eisenüberdeckung an einem Teil des Objekts 3



Abbildung 1.1.11: Brückenteile des Objektes 1 auf Deponie

## 1.2 Sonstige Arbeiten

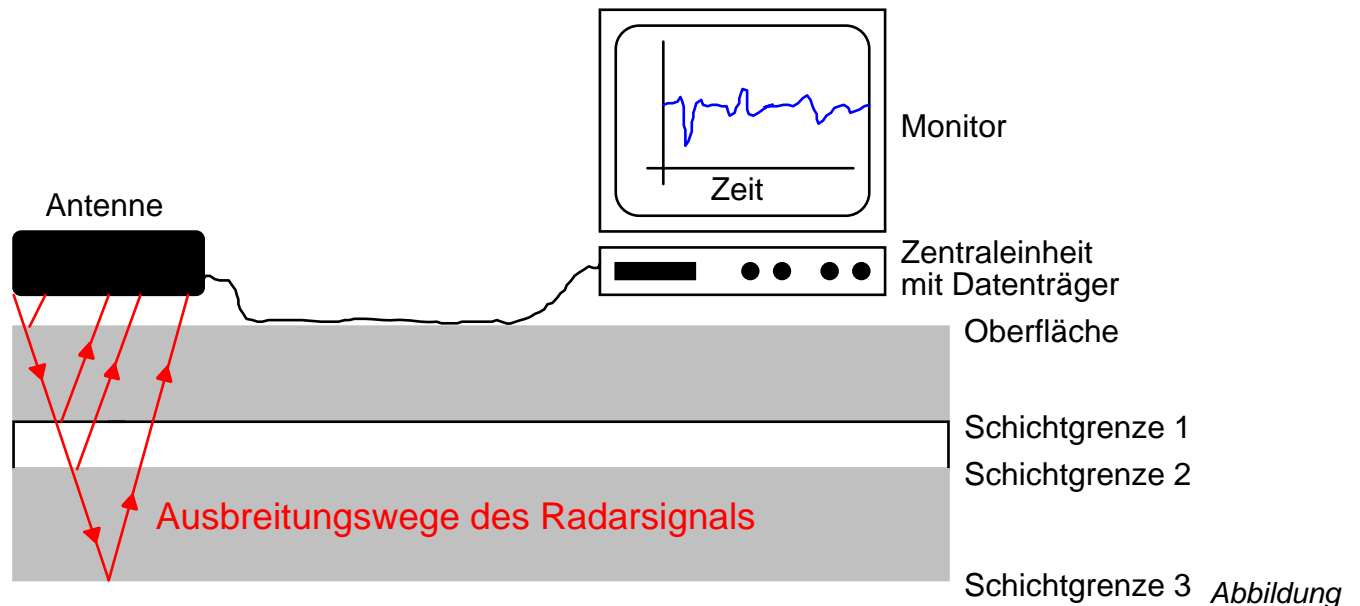
Die Arbeiten auf den Abbruchobjekten zielten darauf, die Qualität von Radarergebnissen unter realen Feldbedingungen zu überprüfen. Mit dem Laborexperiment sollte im Gegensatz dazu das heute technisch machbare aufgezeigt werden. Die Ergänzungen aus den Auftrags- und anderen Arbeiten (Tabelle 1.2-1) beleuchten Aspekte, die im Rahmen der Arbeiten auf den Abbruchobjekten nicht berücksichtigt werden konnten.

Tabelle 1.2-1: weitere in diesem Bericht erwähnte Brücken

Bezeichnung	Standort	Bemerkungen
Hauptbrücke Sihlhochstrasse	Zürich/Zh	
Felsenauviadukt	Bern/Be	
Brücke auf Gelände EMPA/EAWAG	Dübendorf/ Zh	
Anonyme Brücke		
Anonyme Brücke		

## 2 Funktionsweise des Georadar-Verfahrens

Unter Georadar versteht man ein elektromagnetisches Wellenverfahren. Andere gebräuchliche Bezeichnungen dieses Verfahrens sind Bodenradar, Ground Penetrating Radar (GPR), Surface Penetrating Radar und Elektromagnetisches Reflektionsverfahren (EMR). Das Funktionsprinzip ist in *Abbildung 1.2.1* dargestellt.



1.2.1: Funktionsprinzip des Georadar Verfahrens

Ein elektromagnetisches Signal wird von der Antenne abgestrahlt und an verschiedenen Grenzflächen reflektiert. Das reflektierte Signal wird von der Antenne empfangen und kann, nach Aufbereitung durch die Zentraleinheit, auf einem Monitor dargestellt und zur weiteren Bearbeitung auf einem PC auf Datenträger abgespeichert werden. Eine einzelne derartige Messung bestehend aus Messwerten über eine bestimmte Zeit an einem Ort wird als Spur, Einzelspur oder Scan bezeichnet. Diese Zeitreihe kann auf verschiedene Arten dargestellt werden. Im Wiggle-Modus wird eine Kurve geplottet, bei der vielfach die zwischen der Kurve und dem Nullpunkt liegenden Flächen eingefärbt sind (siehe *Abbildung 1.2.2*, links). Eine andere übliche Darstellung ist die Codierung der Signalstärke in Farben oder Graustufen (*Abbildung 1.2.2*, Mitte).

Das Prinzip der Einzelmessung an einem Ort ist schematisch in der *Abbildung 1.2.2* (rechts dargestellt).

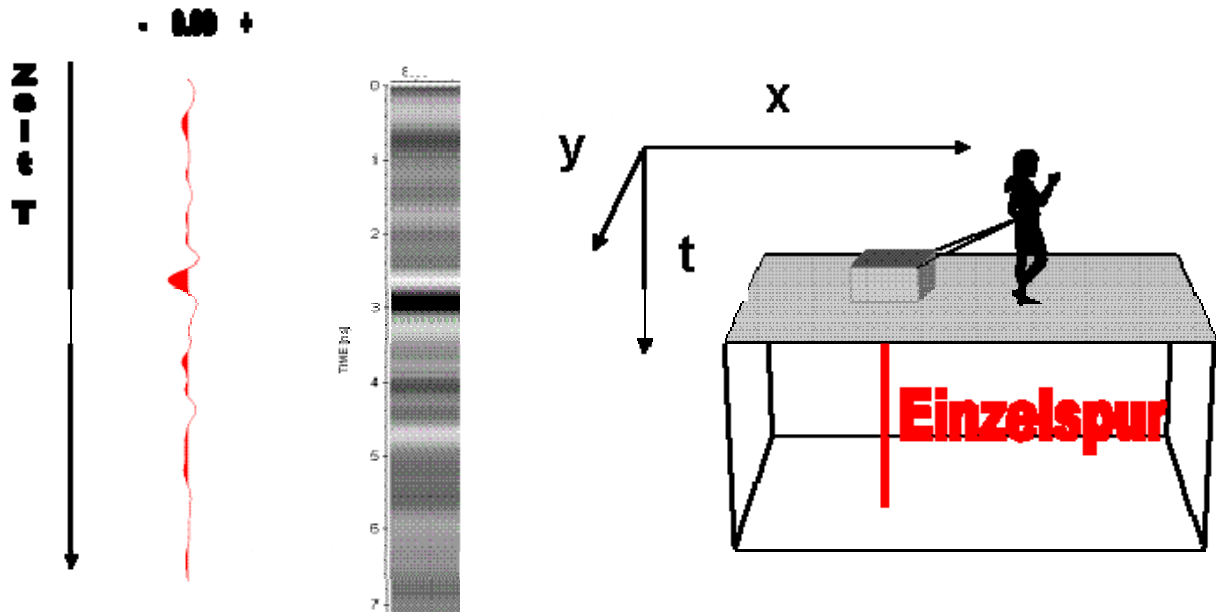


Abbildung 1.2.2: Einzelspur im Wiggle-Modus (links), in Graustufendarstellung (Mitte) und schematische Darstellung der Einzelmessung an einem Ort (rechts)

Radardaten werden meist entlang von Linien als Serie von Einzelspuren aufgezeichnet. Werden viele dieser Spuren nebeneinander geplottet, so ergibt sich ein Bild, welches durch Eigenschaften des Untergrundes bestimmt wird. Ein Beispiel derartiger Darstellungen, aufgezeichnet auf einer bewehrten Betonplatte zeigt *Abbildung 1.2.3* in Wiggle Darstellung und die *Abbildung 1.2.4* in Graustufen Darstellung. Eine derartige Darstellung wird als Radargramm oder Radarprofil bezeichnet. Eine schematische Darstellung des Zustandekommens eines Radargramms ist in *Abbildung 1.2.5* dargestellt.

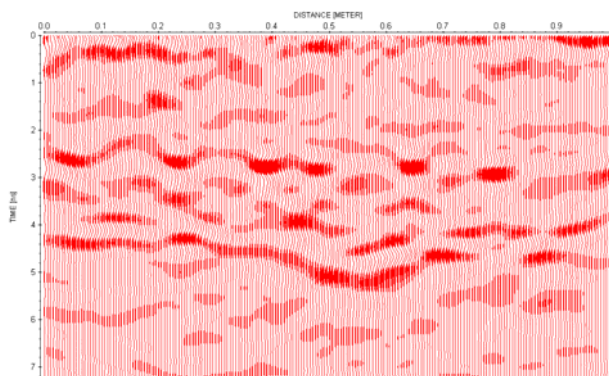


Abbildung 1.2.3: Radarprofil in Wiggle Darstellung

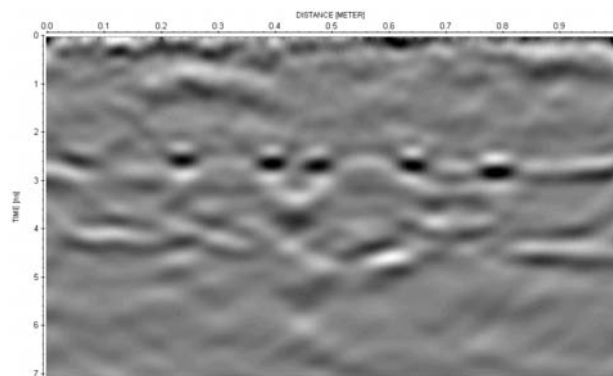


Abbildung 1.2.4: Radarprofil in Graustufen Darstellung

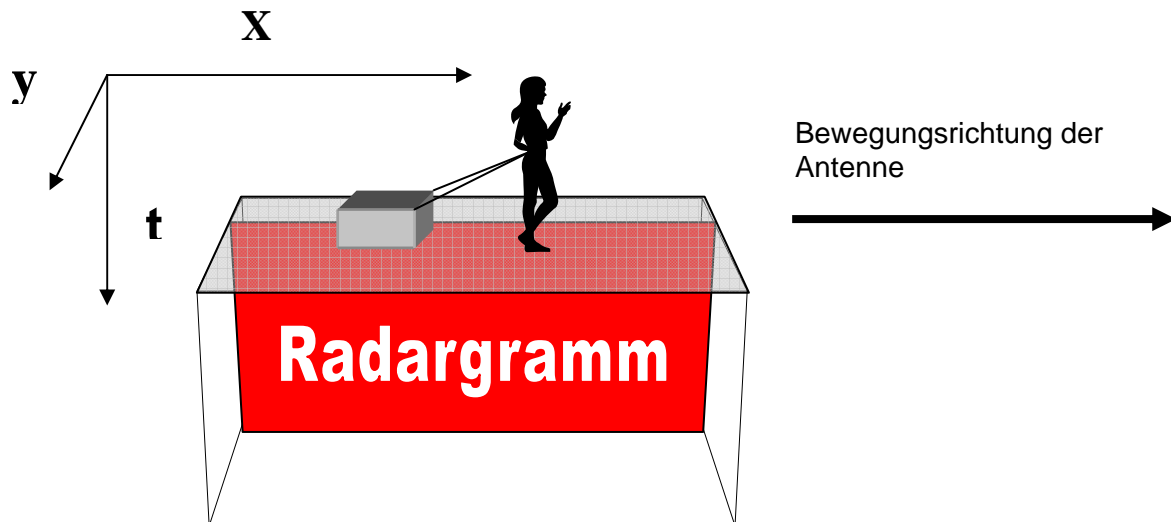


Abbildung 1.2.5: Schematische Darstellung zur Aufzeichnung eines Radargramms

Ein derartiges Radarprofil gibt zwar Charakteristika des Untergrundes bzw. des untersuchten Mediums wieder, stellt jedoch keinen Schnitt durch dieses Medium dar. Für diesen Sachverhalt sind verschiedene Effekte verantwortlich, zwei davon sollen an einem Beispiel verdeutlicht werden.

Die *Abbildung 1.2.6* stellt schematisch eine Radarmessung über einem aus zwei Schichten aufgebauten Untergrund dar. In der oberen Schicht befindet sich ein punktförmiger Störkörper. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Radarsignals in der oberen Schicht soll deutlich geringer sein als in der unteren. Die Radarantenne wird entlang einer geraden Linie über die Oberfläche bewegt.

Das dieser Situation entsprechende Radarprofil ist in *Abbildung 1.2.7* dargestellt. Der punktförmige Störkörper verursacht eine Reflexion in Form einer Hyperbel, weil die Antenne nicht nur senkrecht nach unten sondern auch seitlich abstrahlt bzw. empfängt. Dadurch wird nicht nur direkt über dem Körper (Pos. 2) sondern auch davor bzw. danach (Pos. 1 und 3) eine Reflexion registriert. Da der Weg des Signals zum Störkörper und zurück in den Positionen 1 und 3 länger ist als in Pos. 2, benötigt das Radarsignal mehr Zeit und wird deshalb zu einem späteren Zeitpunkt registriert.

Die horizontalen Schichtgrenzen S1 und S2 innerhalb des Mediums (*Abbildung 1.2.6*) erscheinen im Messergebnis als horizontale Reflexionen. Da die Geschwindigkeit in der unteren Schicht deutlich höher ist als in der oberen, benötigt das Signal für die Durchquerung weniger Zeit, weshalb die Reflexion an Schichtgrenze S2 im Radarprofil "nach oben verschoben" erscheint.

## physikalische Situation

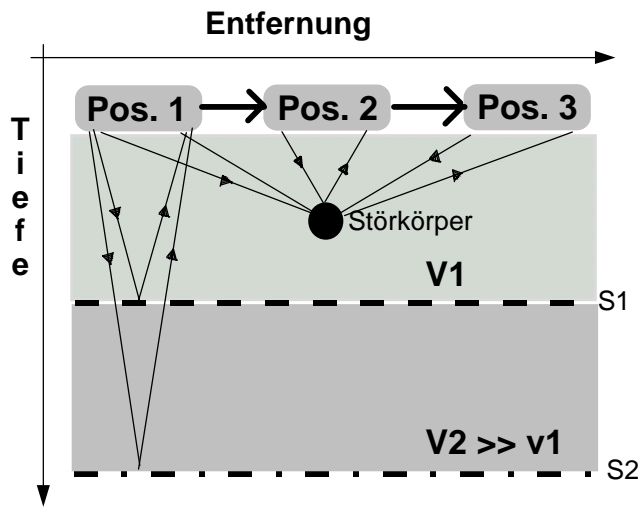


Abbildung 1.2.6: physikalische Situation

## Messergebnis

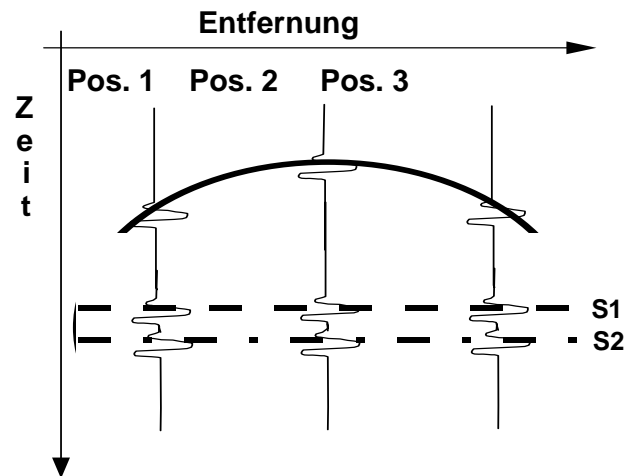


Abbildung 1.2.7: Messergebnis

Weitere Effekte, die bewirken, dass man mit einem Radarprofil zunächst keinen Schnitt durch den Untergrund erhält sind beispielsweise die Dämpfung des Signals und der Einfluss neben dem Profil liegender unter- oder oberirdischer Strukturen.

Durch eine geeignete Datenverarbeitung können die oben genannten Effekte zu einem grossen Teil korrigiert werden, so dass in Verbindung mit einer sachkundigen Interpretation im allgemeinen detaillierte und zuverlässige Informationen über den Aufbau des untersuchten Objektes gewonnen werden können.

Radardaten können nicht nur entlang von Linien sondern auch flächig aufgezeichnet werden, beispielsweise durch die Aufzeichnung entlang vieler paralleler Linien. Dies ermöglicht flächige oder dreidimensionale Darstellungen. Eine Zeitscheibe stellt die Radardaten einer bestimmten Zeit oder Zeitspanne dar. Die *Abbildung 1.2.8* zeigt ein auf einem bewehrten Betonboden aufgezeichnetes Beispiel. Die durch die einzelnen Bewehrungseisen verursachten Reflexionsmaxima zeichnen sich deutlich ab. Das Prinzip der Zeitscheibe ist schematisch in der *Abbildung 1.2.9* verdeutlicht.



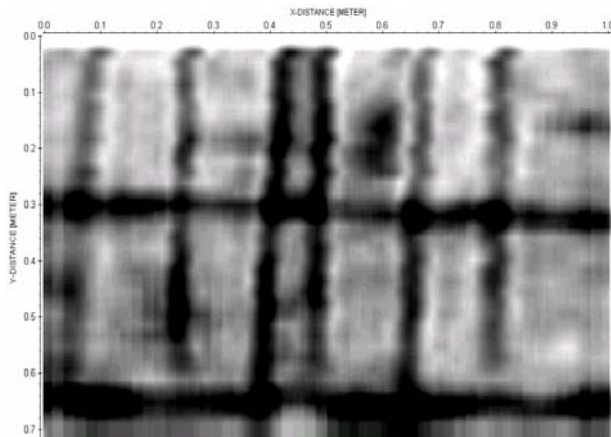


Abbildung 1.2.8: Zeitscheibe aus Datensatz aufgezeichnet auf bewehrtem Betonboden

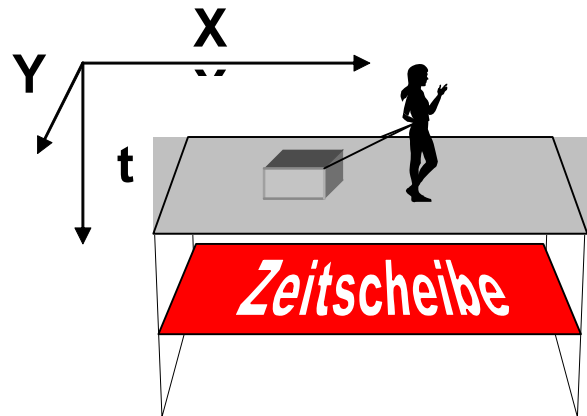


Abbildung 1.2.9: schematische Darstellung zum Prinzip der Zeitscheibe

Als weitere Möglichkeit können flächig erhobene Daten auch direkt als Datenkubus dargestellt werden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind hier Vereinfachungen erforderlich. So können beispielsweise nur diejenigen Daten dargestellt werden, die einen gewissen Grenzwert überschreiten. Ein derartiges Beispiel zeigt die *Abbildung 1.2.10*. Es zeigt wiederum die Daten des Betonfussbodens. Eine schematische Darstellung des Prinzips liefert die *Abbildung 1.2.11*.

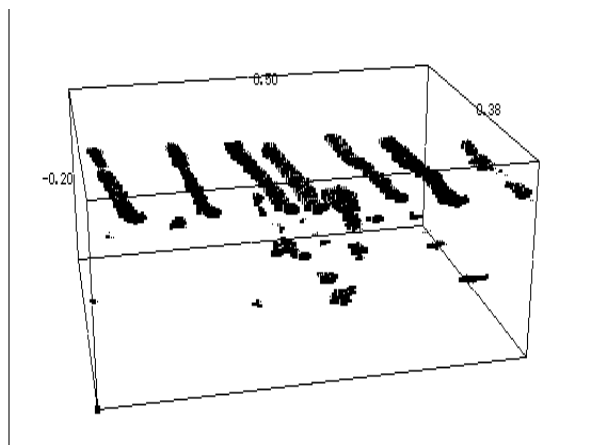


Abbildung 1.2.10: Datenkubus des auf dem Betonfussboden aufgezeichneten Datensatzes

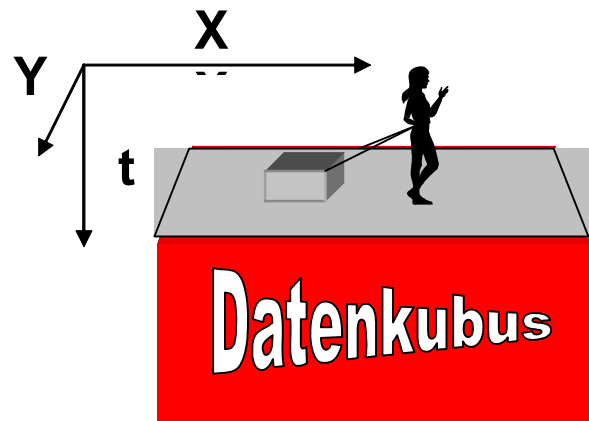


Abbildung 1.2.11: Schematische Darstellung zum Datenkubus

Eine ausführliche Beschreibung des Georadar-Verfahrens findet sich bei David Daniels *Ground Penetrating Radar*, eine Beschreibung der Anwendung im Bauwesen in dem von der Deutschen Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung herausgegebenen Merkblatt B10, *Merkblatt über das Radarverfahren zur zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen*.

## 3 Stand der Technik

### 3.1 Technische Entwicklung seit 1990

Im Jahre 1991 veröffentlichte das Bundesamt für Strassenbau den Forschungsbericht „Mise au point d'une méthode pour localiser les défauts d'étanchéité et rechercher divers défauts dans le tablier des ponts par voie non-destructive“ (de Bosset et al., 1991, im folgenden als Bericht-91 bezeichnet). Darin stellen die Autoren die Kombination von Infrarot Thermographie und Georadar für die Untersuchung von Brückenschäden vor und zeigen Beispiele von verschiedenen Brücken. Seither hat eine rasante technische Entwicklung stattgefunden, die die Möglichkeiten des Radar-Verfahrens erheblich erweitert hat.

#### Radargeräte

Die Entwicklung bei den Radargeräten brachte eine Verbesserung der Handlichkeit, eine markante Erhöhung der Anzahl möglicher Messungen pro Sekunde sowie die Möglichkeit Daten direkt vor Ort zu bearbeiten. Für den Bericht-91 sowie die hier vorgelegte Studie wurden insgesamt 3 verschiedene Radargeräte eingesetzt anhand derer die technische Entwicklung beispielhaft gezeigt werden kann (*Tabelle 3.1-1*).

*Tabelle 3.1-1: Radargeräte, technische Entwicklung*

	<b>GSSI SIR-8</b>	<b>GSSI SIR-10A</b>	<b>GSSI SIR-20</b>
Eingesetzt von/für	Bericht-91	EMPA 1993-Dez. 2001	EMPA seit Dez. 2001
Markteinführung	1982	1991	2001
Messungen/s	ca. 25	100	800
Sichtung der Daten während der Messung	Aufzeichnung auf Papier	Bildschirm	Bildschirm
Datenspeicherung	Magnetband	Magnetband	Festplatte
Datenverarbeitung im Feld		Diverse einfache Verfahren wie Filter etc...	Volle Datenverarbeitung auf integriertem Laptop

#### Antennen

Bei den Antennen stellt die Verfügbarkeit von hochfrequenten Antennen die für die Untersuchung von Brücken relevanteste Entwicklung dar. Das dadurch erhöhte Auflösungsvermögen stellt einen wesentlichen Erfolgsfaktor für Radaruntersuchungen dar. Die *Abbildung 3.1.1* und die *Abbildung 3.1.2* zeigen einen Vergleich zwischen zwei auf demselben Betonboden aufgezeichneten Datensätzen. Der in *Abbildung 3.1.1* gezeigte, mit der 1.5 GHz Antenne aufgezeichnete Datensatz erlaubt die eindeutige Identifizierung einzelner Bewehrungsstäbe. Beim 900 MHz Datensatz (*Abbildung 3.1.2*) ist die Auflösung deutlich geringer und die Identifizierung einzelner Eisen nicht in jedem Falle möglich.

Ein weiterer Schritt war die Entwicklung von Hornantennen, da diese ohne direkten Kontakt zum Objekt betrieben werden und somit Messungen von einem in Bewegung befindlichen Fahrzeug erlauben.

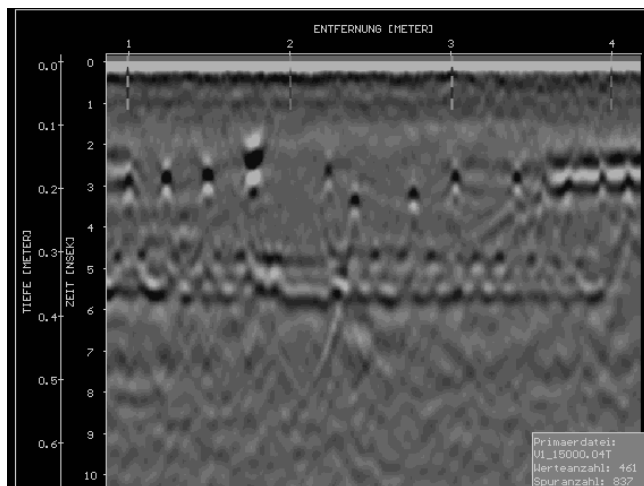


Abbildung 3.1.1: Datensatz 1.5 GHz Antenne

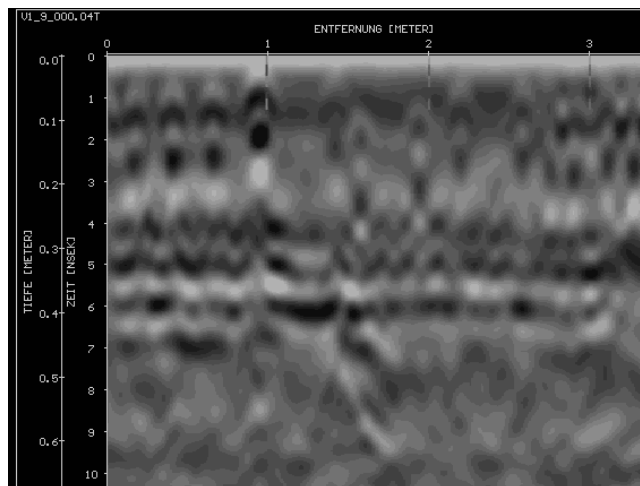


Abbildung 3.1.2: Datensatz 900 MHz Antenne

## Positionierung und Positionskontrolle

Hier ist insbesondere die Verfügbarkeit von weitgehend automatischen Geräten zur Positionsbestimmung zu nennen. Durch automatische Theodolithen (Lehmann, 1999) und benutzerfreundliche GPS Systeme (siehe Abschnitt 3.6) können entweder vordefinierte Messlinien eingehalten werden oder zeitsparend auch grössere Gebiete abgerastert werden.

## Datenverarbeitung

Die dramatische Entwicklung der Computertechnologie dürfte jedem Leser bekannt sein und wird hier nicht abgehandelt. Für die Verarbeitung von Radardaten bedeutet dies, dass nun auch grosse Datenmengen, wie sie beispielsweise bei 3D-Untersuchungen anfallen, auf einem Standard-PC verarbeitet werden können.

## 3.2 Radargeräte

Die in diesem Bericht dokumentierten Radaruntersuchungen wurden mit zwei verschiedenen Geräten vorgenommen. Beide Geräte stammen von der Firma Geophysical Survey Systems (GSSI), die in den USA beheimatet ist und eine der grössten und ältesten Herstellerinnen von Georadargeräten ist. Das erste Georadar Gerät der EMPA vom Typ SIR-10A (Abbildung 3.2.1) war zwischen 1993 und 2001 in Betrieb. Nach einem Totalschaden wurde es im Jahr 2001 durch das Nachfolgemodell SIR-20 (Abbildung 3.2.2) ersetzt. Beide Geräte erwiesen sich für die Untersuchungen von Brücken als gut geeignet. Die Vorteile des neueren Gerätes liegen in der höheren Aufnahmegeschwindigkeit (800 statt 100 Messpunkte pro Sekunde) und der Möglichkeit die gesamte Datenverarbeitung auf dem integrierten Laptop vorzunehmen. Die im Verkaufsprospekt versprochene Möglichkeit zur Kopplung mit einem GPS-Gerät funktioniert bis heute (Oktober 2004) noch nicht.



Abbildung 3.2.1: GSSI SIR-10A System



Abbildung 3.2.2: GSSI SIR-20 System

### 3.3 Antennen

Die in diesem Bericht gezeigten Radardaten wurden mit drei verschiedenen Antennen aufgezeichnet:

- GSSI Modell 4205 **Hornantennen** (Abbildung 3.3.1)
- GSSI Modell 5100 **1.5GHz Antenne** (Abbildung 3.3.2)
- GSSI Modell 3101D **900 MHz Antenne** (Abbildung 3.3.3)

Die Hornantennen sind speziell für den Einsatz ohne Kontakt zum untersuchten Objekt konzipiert und eignen sich somit vor allem für Messungen mit der mobilen Georadar-Anlage. Sende- und Empfängerantenne sind in separaten Gehäusen untergebracht. Die Mittelfrequenz liegt bei etwa 1.2GHz (Messung der EMPA, Herstellerangabe 2.5GHz), damit ist die Auflösung hoch genug um im Normalfall einzelne Bewehrungseisen abzubilden. Die meisten der in diesem Bericht gezeigten Radardaten wurden mit den Hornantennen aufgezeichnet. Eine ausführliche Beschreibung der Eigenschaften dieser Antennen findet sich bei Hugenschmidt (1998).

Die 1.5GHz Antenne ist für den Einsatz mit direktem Kontakt zum untersuchten Objekt konzipiert und eignen sich somit vor allem für Messungen, die von Hand vorgenommen werden. Sende- und Empfängerantenne sind im gleichen Gehäuse untergebracht. Da die EMPA über zwei derartige Antennen verfügt, können auch Messungen mit variablem Abstand zwischen Sender und Empfänger durchgeführt werden. Die Mittelfrequenz liegt in Luft bei etwa 1.2GHz (Messung der EMPA, Herstellerangabe 1.5GHz auf Beton), damit ist die Auflösung hoch genug um im Normalfall einzelne Bewehrungseisen abzubilden. Eine ausführliche Beschreibung der Eigenschaften dieser Antennen findet sich bei Hugenschmidt (2000).

Die 900MHz ist für den Einsatz mit direktem Kontakt zum untersuchten Objekt konzipiert und eignen sich somit vor allem für Messungen, die von Hand vorgenommen werden. Sende- und Empfängerantenne sind im gleichen Gehäuse untergebracht. Die Mittelfrequenz liegt in Luft bei etwa 900MHz (Herstellerangabe), damit ist die Auflösung nur knapp ausreichend um einzelne Bewehrungseisen abzubilden. Da für den Einsatz auf Brücken in den meisten

Fällen eine höhere Auflösung erforderlich ist als mit dieser Antenne erreicht werden kann, sind mit dieser Antenne aufgezeichnete Daten nur zu Vergleichszwecken in diesem Bericht abgebildet.



Abbildung 3.3.1: GSSI Modell 4205 Hornantennen



Abbildung 3.3.2: GSSI Modell 5100(1.5GHz) Antenne



Abbildung 3.3.3: GSSI Modell 3101D (900 MHz) Antenne

### 3.4 Datenverarbeitung

Durch die im Anschluss an die Messung durchgeführte Datenverarbeitung werden folgende Ziele verfolgt:

1. Verbesserung der Datenqualität
2. Korrektur der Oberflächenreflexion auf den Nullpunkt
3. Transformation der Radarkoordinaten in das lokale Koordinatensystem

Zusätzlich können weitere Gesichtspunkte, wie beispielsweise eine Reduktion der Datenmenge, eine Rolle spielen.

Je nach Datenqualität und Fragestellung werden verschiedene Verarbeitungssequenzen und Parameter ausgewählt. An der EMPA wird derzeit das Programmpaket REFLEXW von Sandmeier scientific software / Karlsruhe eingesetzt. Damit stehen die für die Verarbeitung von Radardaten relevanten Mittel zur Verfügung.

Generell kann gesagt werden, dass die Datenverarbeitung von Radardaten in enger Anlehnung an die seismische Datenverarbeitung erfolgt. Wesentliche Unterschiede liegen in der Grösse der aufgezeichneten Datensätze (bei Radardaten i.a. wesentlich kleiner) und in der Tatsache dass Radardaten oft mit einem konstanten Abstand zwischen Sender und Empfänger aufgezeichnet werden, wodurch sich deren Verarbeitung erheblich vereinfacht. Ausserdem muss der Reflexionskoeffizient bei Radaraufnahmen i.a. als komplex angesehen werden. Dadurch können Dekonvolutionsverfahren nicht, beziehungsweise nur eingeschränkt, eingesetzt werden. Eine umfassende Beschreibung der seismischen Datenverarbeitung gibt Yilmaz 1987.

Im Folgenden wird die Verarbeitung eines Datensatzes an einem Beispiel verdeutlicht. Die Daten wurden auf einer Autobahn bei einer Fahrgeschwindigkeit von 50 km/h mit den Hornantennen aufgezeichnet.

Weitere Aufnahmeparameter:

Antennenhöhe: 25 cm  
 Spuren/s 100  
 Spurlänge: 15 ns  
 Samples: 512  
 A/D Wandlung: 16 bit  
 Datenverarbeitung während der Messung: keine

Zusätzlich werden die einzelnen Verarbeitungsschritte an einem synthetischen Datensatz veranschaulicht. Dieser besteht im Wesentlichen aus einem oder mehreren Spikes (Wert ungleich Null), alle anderen Werte in der Spur sind, soweit nicht anders darauf hingewiesen wird, gleich Null.



Abbildung 3.4.1: Rohdaten

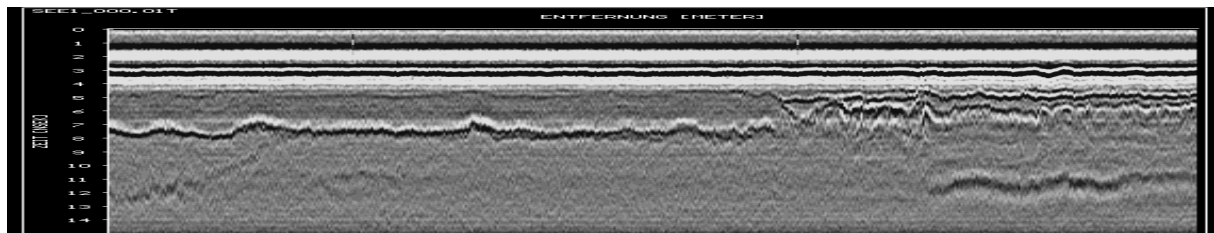


Abbildung 3.4.2: Datensatz nach Bandpassfilterung

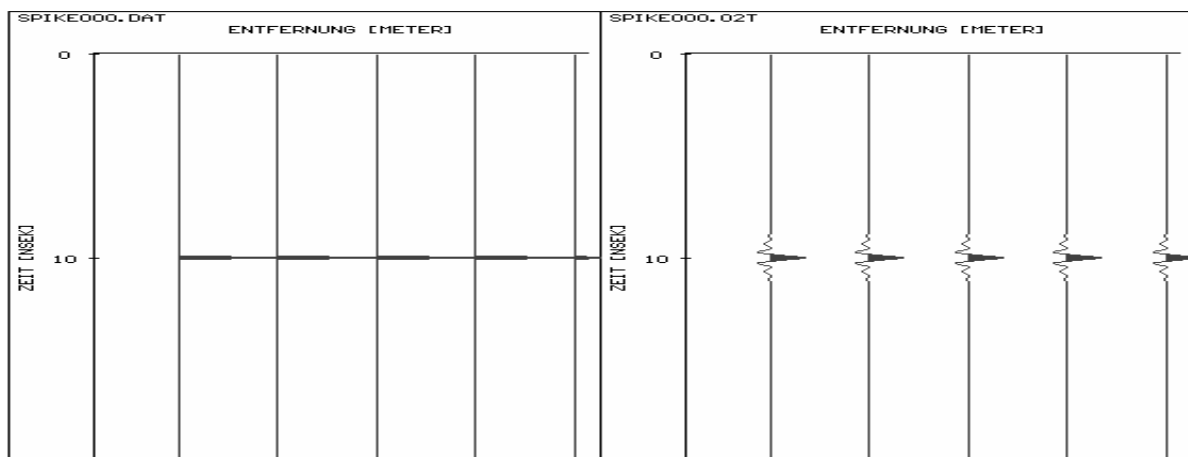


Abbildung 3.4.3: synthetische Daten vor (links) und nach Bandpassfilterung (rechts)

Bei der Bandpassfilterung werden Signale ausserhalb eines bestimmten Frequenzbereiches eliminiert. Die Beispiele zeigen die Wirkung eines im Frequenzbereich angewandten Filters mit den Grenzen 300MHz-500MHz und 2500MHz-2700MHz. Das Verhältnis zwischen Signal und Rauschen ist bereits nach Anwendung des Bandpassfilters deutlich verbessert.

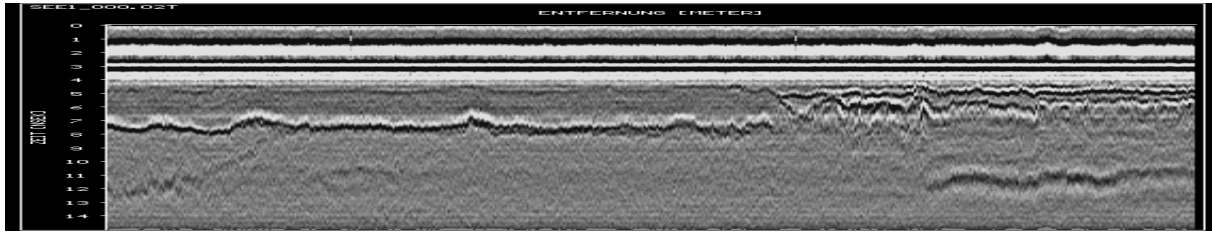


Abbildung 3.4.4: Datensatz nach gerader Korrektur

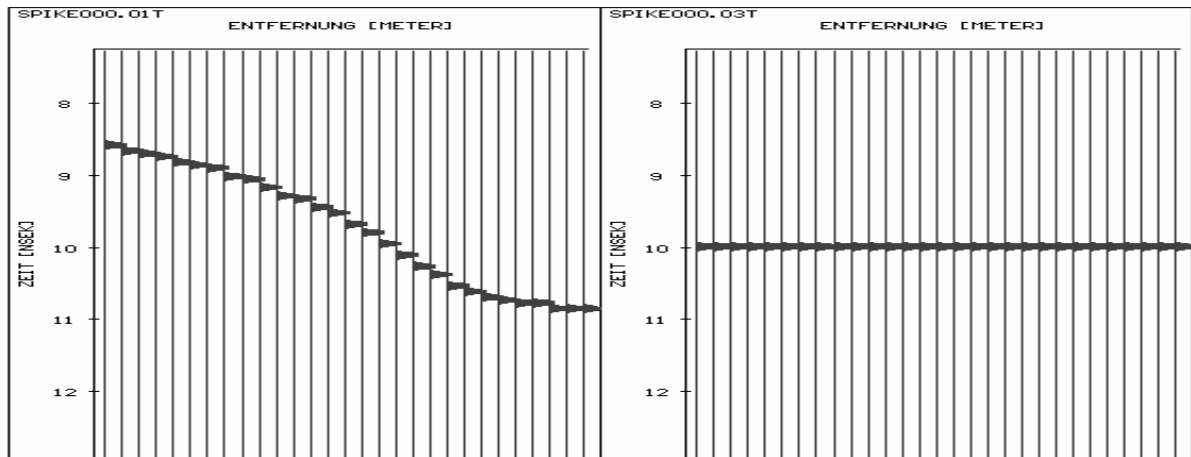


Abbildung 3.4.5: synthetische Daten vor (links) und nach gerader Korrektur (rechts)

Durch die gerade Korrektur werden Schwankungen der Antennenhöhe, wie sie z.B. beim Überfahren von Unebenheiten vorkommen, korrigiert. Dazu werden die von der Fahrbahnoberfläche resultierenden Reflexionen auf eine gerade Linie korrigiert.

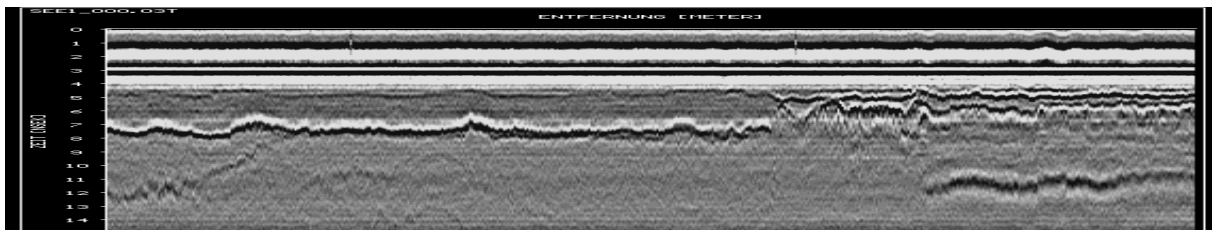


Abbildung 3.4.6: Datensatz nach Stapelung 2-fach

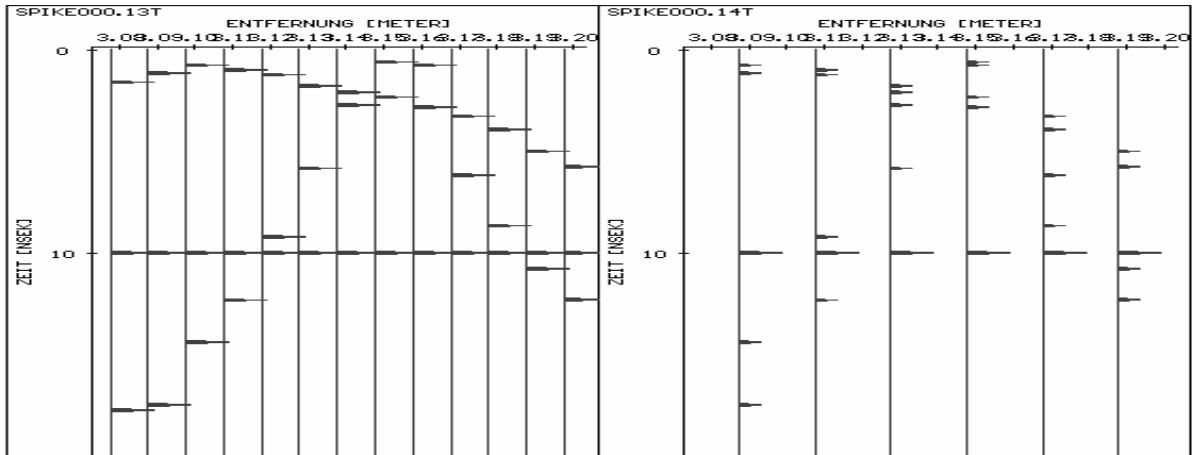


Abbildung 3.4.7: synthetische Daten vor (links) und nach zweifacher Stapelung

Bei der Stapelung werden benachbarte Spuren zusammenaddiert. Dadurch wird einerseits die Grösse des Datensatzes reduziert und die weitere Bearbeitung vereinfacht. Andererseits werden horizontal kohärente Signale gegenüber horizontal inkohärenten verstärkt.

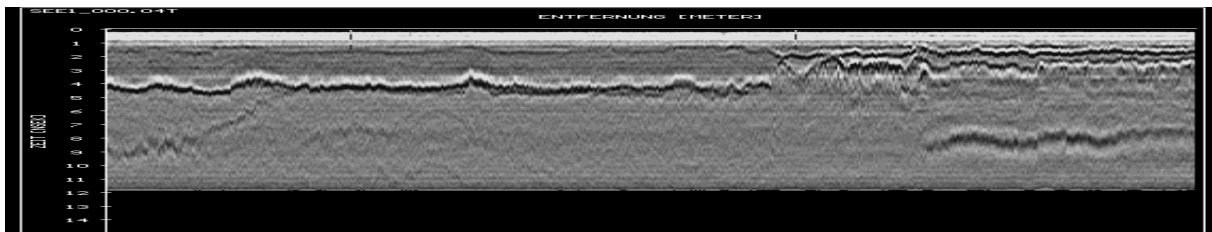


Abbildung 3.4.8: Datensatz nach Korrektur der Oberflächenreflexion auf den Nullpunkt

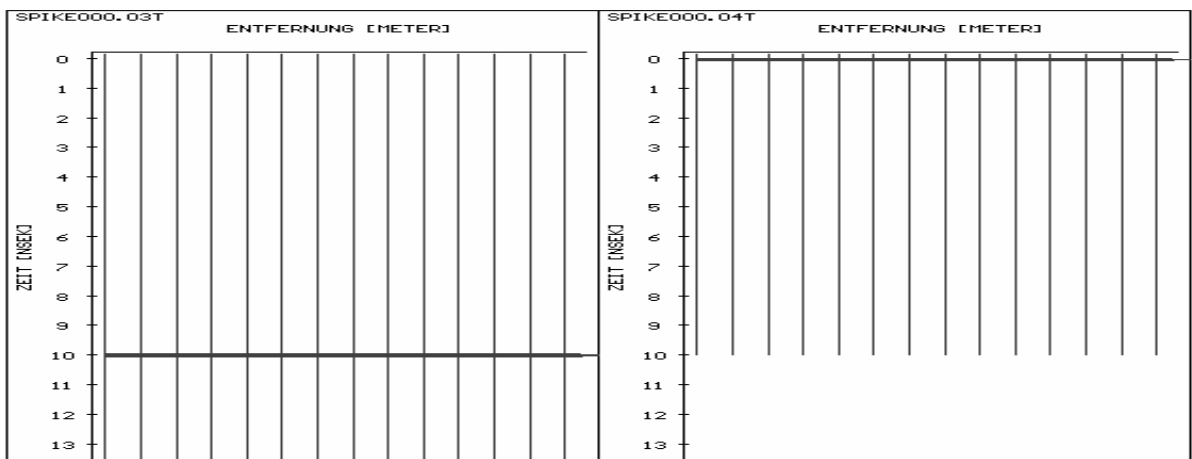


Abbildung 3.4.9: synthetischer Datensatz vor (links) und nach der Korrektur der Reflexion auf den Nullpunkt



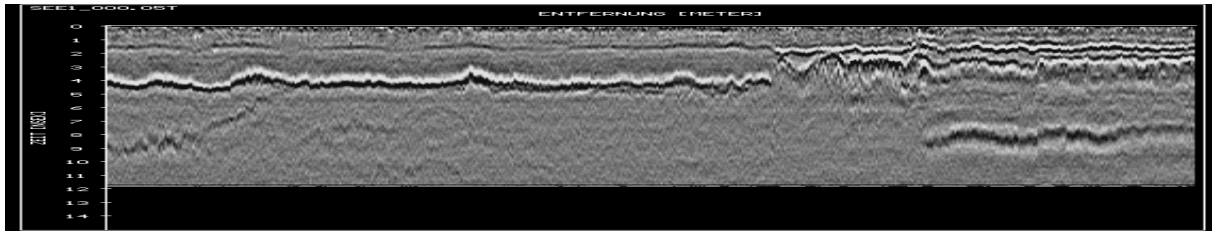


Abbildung 3.4.10: Datensatz nach Subtraktion des Mittelwertes

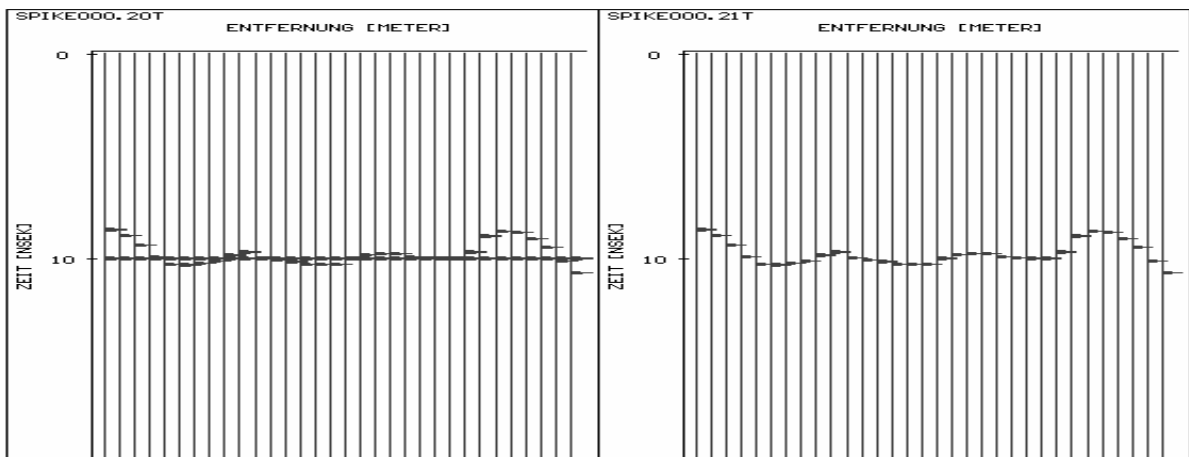


Abbildung 3.4.11: synthetischer Datensatz vor (links) und nach Subtraktion des Mittelwertes (rechts)

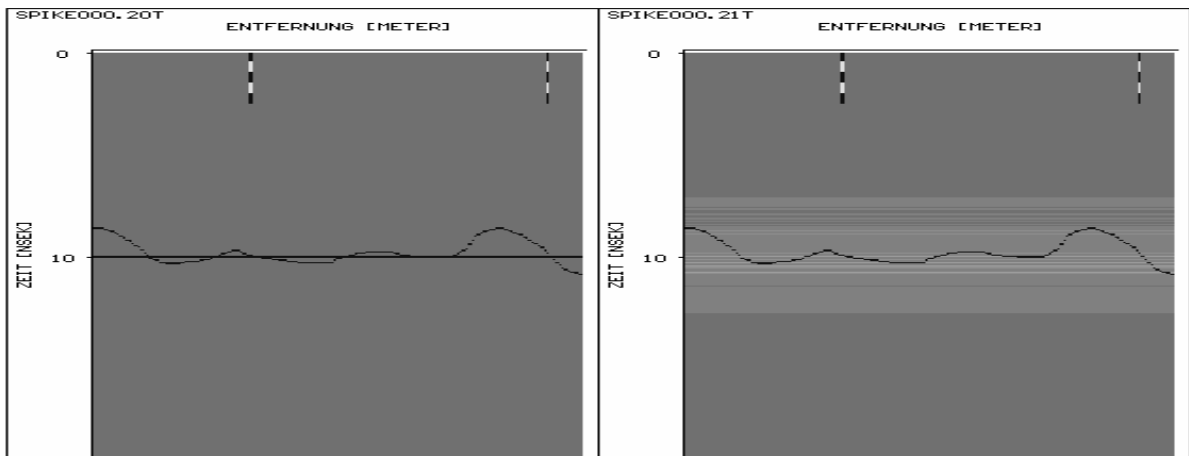


Abbildung 3.4.12: synthetischer Datensatz vor (links) und nach Subtraktion des Mittelwertes (rechts) in Graustufendarstellung

Bei der Subtraktion des Mittelwertes wird für jeden Sample ein Mittelwert über alle Spuren bzw. über einen ausgewählten Bereich gebildet. Anschliessend wird dieser Mittelwert in allen Spuren vom betreffenden Sample subtrahiert. Dadurch wird horizontal kohärente Energie eliminiert. Dieses Verfahren ist sehr wirkungsvoll bei der Entfernung gleichbleibender Störsignale wie sie zum Beispiel durch Reflexionen am Fahrzeug entstehen können. Allerdings ist, wie übrigens auch bei den meisten anderen Verfahren, eine unkritische Anwendung nicht ungefährlich. In *Abbildung 3.4.12* zeigen sich Signale in Bereichen, die vorher gleich Null waren. In realen Datensätzen, welche im allgemeinen komplizierter sind

als das obige synthetische Beispiel, können auf diese Weise Signale eingeführt und als Reflexion interpretiert werden.

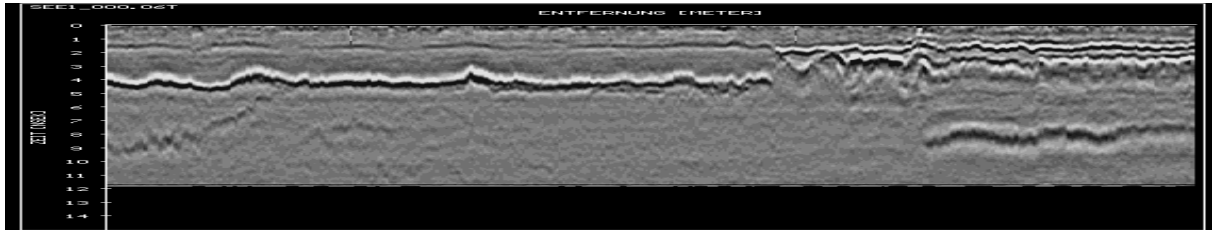


Abbildung 3.4.13: Datensatz nach Glättung über zwei Spuren

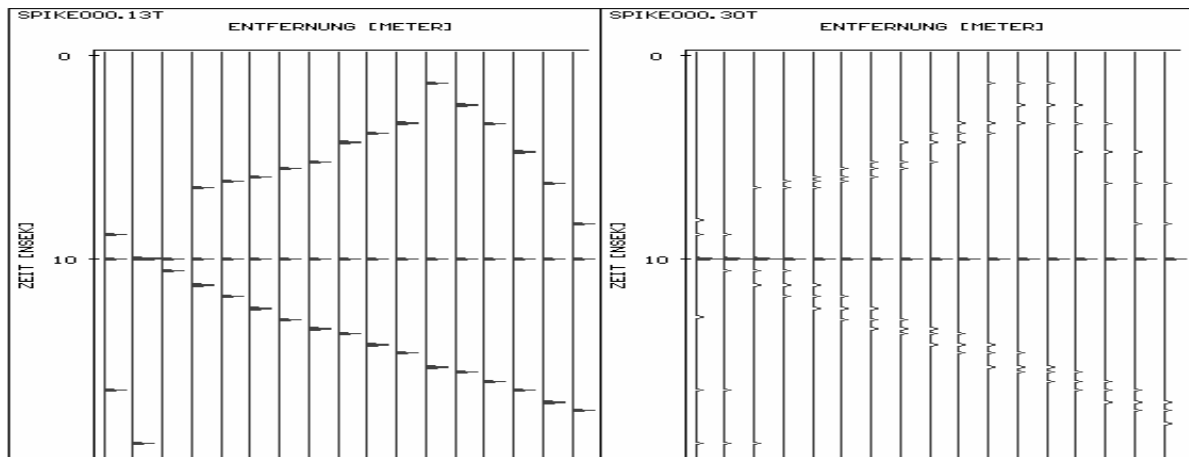


Abbildung 3.4.14: synthetischer Datensatz vor (links) und nach Glättung über zwei Spuren (rechts)

Bei der horizontalen Glättung werden horizontal kohärente Signale durch Mittelwertbildung über mehrere Spuren verstärkt.

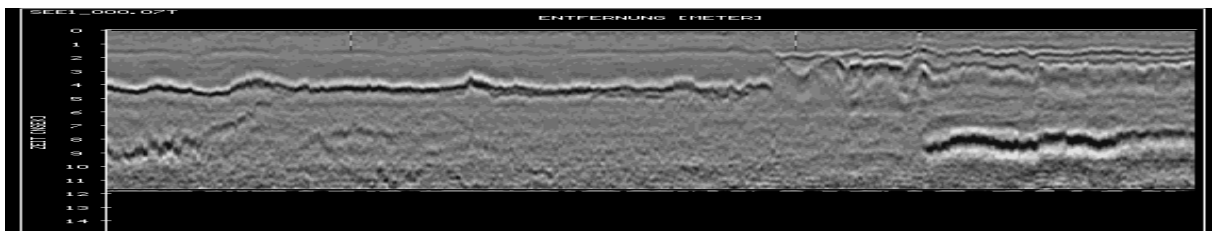


Abbildung 3.4.15: Datensatz nach Gainkorrektur

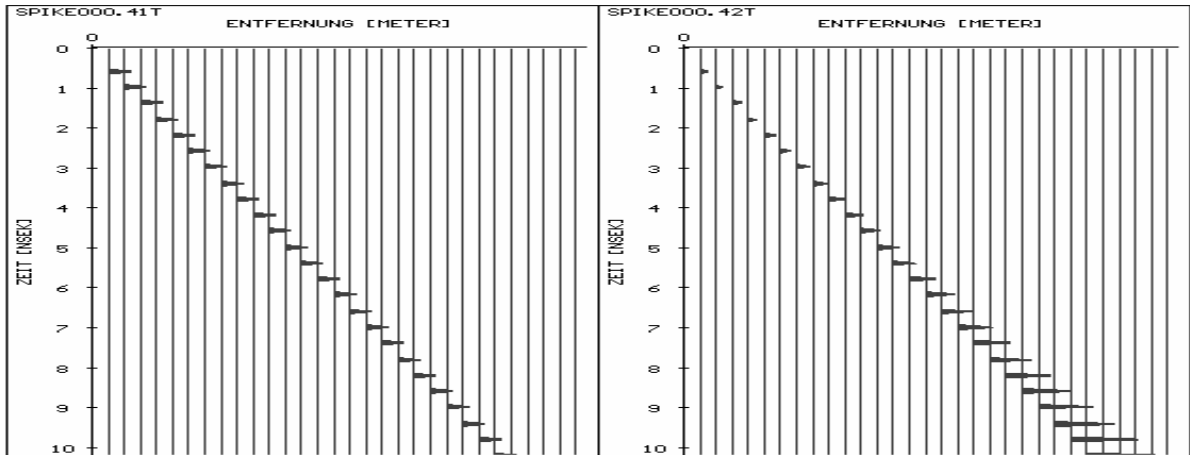


Abbildung 3.4.16: synthetischer Datensatz vor (links) und nach Gainkorrektur (rechts)

Im Allgemeinen nimmt die Signalstärke mit zunehmender Tiefe ab. Durch die Gainkorrektur wird eine zeitabhängige Verstärkung vorgenommen. Im realen Datensatz (*Abbildung 3.4.16*) wurde die Gainkorrektur nur zu Demonstrationszwecken vorgenommen, eine Verbesserung der Datenqualität ist in diesem Fall nicht zu beobachten.

Wie bereits im Abschnitt „Funktionsweise des Georadar Verfahrens“ beschrieben, strahlt die Antenne nicht nur senkrecht nach unten sondern auch seitlich ab. Dadurch erscheinen beispielsweise punktförmige Körper im Radargramm als Hyperbel. Dieser und andere Effekte lassen sich durch eine Migration korrigieren. Migration kann als ein Prozess verstanden werden, bei dem die Daten zurück an den Ort des Reflektors gerechnet werden. Die *Abbildung 3.4.17 (oben)* zeigt einen Ausschnitt aus einem auf einem bewehrten Beton aufgezeichneten Datensatz. Die durch die einzelnen Bewehrungsseisen verursachten Reflexionen erscheinen als Hyperbeln. Die *Abbildung 3.4.17 (unten)* zeigt den gleichen Ausschnitt nach der Migration. Die Hyperbeln wurden in Punkte zurückgerechnet.

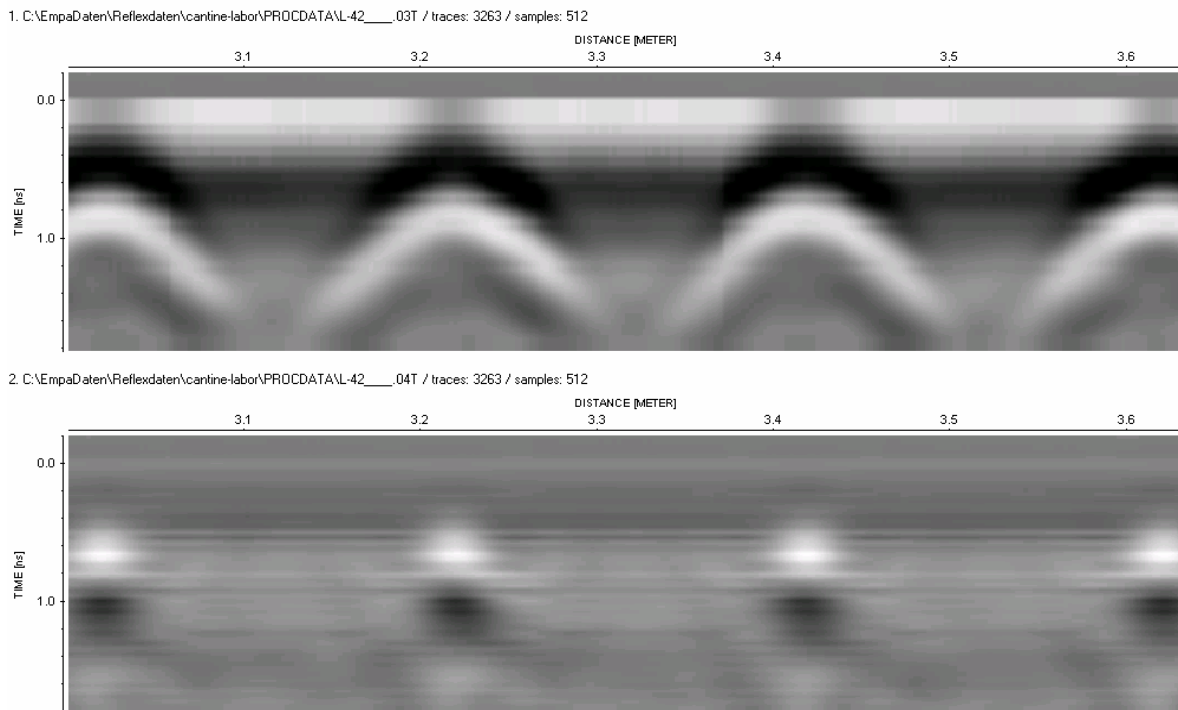
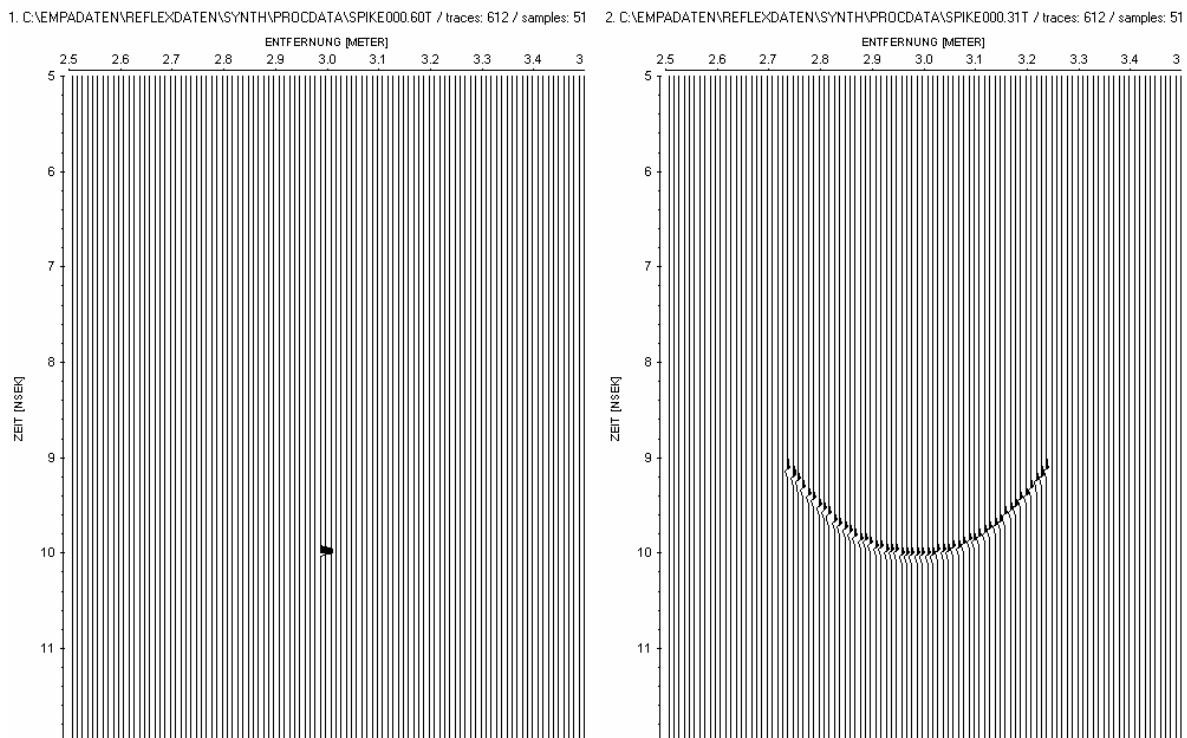


Abbildung 3.4.17: Datensatz aufgezeichnet auf bewehrtem Beton, vor Migration (oben) und nach Migration (unten)

Die Wirkung der Migration auf einen synthetischen Datensatz in dem alle Werte ausser einem einzigen Null sind, zeigt die *Abbildung 3.4.18*.



*Abbildung 3.4.18: synthetischer Datensatz vor (links) und nach Migration (rechts)*

Während die oben beschriebene Verarbeitungssequenz durchaus dem üblichen Vorgehen entspricht, ist es in vielen Fällen erforderlich, andere beziehungsweise zusätzliche Verarbeitungsschritte vorzunehmen. Auch einzelne Parameter müssen von Fall zu Fall an die Daten oder die Problemstellung angepasst werden. Eine unkritische Anwendung von Datenverarbeitungsverfahren kann nicht nur die Aussagekraft der Daten reduzieren, sondern auch Fehler bei der Interpretation hervorrufen.

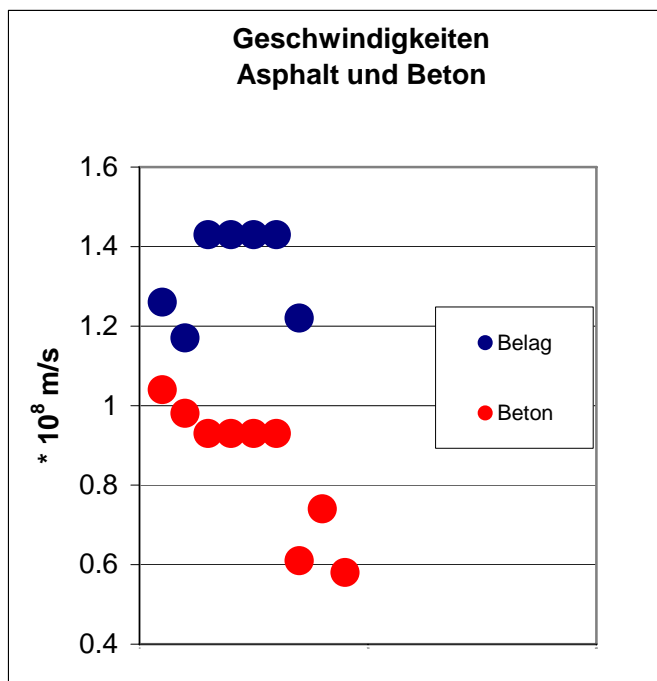
Im Anschluss an die oben beschriebenen Verarbeitungsschritte erfolgt i.a. die Transformation der Radarkoordinaten in das lokal verwendete Koordinatensystem. Auf eine ausführliche Darstellung sei an dieser Stelle verzichtet.

### **3.5 Ausbreitungsgeschwindigkeiten**

Die Kenntnis der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Radarsignals im jeweiligen Material ist die Voraussetzung zur Umrechnung der ursprünglichen Laufzeiten in Tiefen oder Schichtdicken. Ausbreitungsgeschwindigkeiten können entweder anhand von Erfahrungswerten geschätzt, mittels Bohrungen oder Sondierungen kalibriert oder direkt aus den Radardaten ermittelt werden. Letzteres ist entweder aufwändig (Hugenschmidt 2000, Dix 1955) oder verlangt Annahmen, die in der Praxis nur beschränkt zutreffen und deshalb die Genauigkeit der Geschwindigkeitsbestimmung negativ beeinflussen können (Parry 1992, Roddis 1992).

Bei den in diesem Bericht vorgestellten Radaruntersuchungen wurde die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Radarsignals mittels Bohrungen und/oder Sondierungen an einzelnen Punkten und für die einzelnen Materialien ermittelt und dann auf der gesamten Länge der jeweiligen Messlinie verwendet. Dies beinhaltet die Annahme von über die gesamte Linie gleichbleibenden Ausbreitungsgeschwindigkeiten. Dies ist eine durchaus wesentliche Vereinfachung, die einen Einfluss auf die in diesem Bericht dokumentierten Fehler und Genauigkeiten der Radarresultate hat. Andererseits ist diese Lösung praktikabel, klar dokumentierbar und erlaubt den Verzicht auf weitere, ebenfalls nur beschränkt zutreffende Annahmen.

Die *Abbildung 3.5.1* gibt einen Überblick über nachträglich, im Anschluss an die eigentliche Radaruntersuchung, berechnete optimale Ausbreitungsgeschwindigkeiten. Optimal bedeutet hier, dass diese Geschwindigkeiten die mittlere Abweichung zwischen dem Radarergebnis und der beim Abbruch gemessenen Realität minimieren (siehe Abschnitte 5.1 und 5.3). Die Ausbreitungsgeschwindigkeiten variieren zwischen  $1.17$  und  $1.43 \cdot 10^8$  m/s für den Asphalt und zwischen  $0.58$  und  $1.04 \cdot 10^8$  m/s für den Beton.



*Abbildung 3.5.1: berechnete optimale Ausbreitungsgeschwindigkeiten des Radarsignals auf den untersuchten Objekten*

### 3.6 Positionsbestimmung und Positionierung

Die korrekte Zuordnung von Radarergebnissen und Positionen ist auf Brückenplatten in den meisten Fällen von grosser Bedeutung. Zusätzlich sind Radaruntersuchungen oft an bestimmten Positionen durchzuführen, die für die Brücke oder für Baumassnahmen von besonderer Bedeutung sind. Beispiele hierfür sind aus statischen Gründen die Ränder von Hohlkasten oder für Baumassnahmen im Falle einer Spannkabelortung Positionen in denen Bohrungen vorgesehen sind.

Prinzipiell gibt es zwei Ansätze um Radarergebnisse und Positionen zusammenzuführen. Im ersten Fall wird an vorher festgelegten Positionen gemessen. Diese können im Falle einer

mobilen Messung entweder auf der Brücke markiert oder elektronisch auf einem Gerät zur Positionskontrolle (GPS oder automatischer Theodolit) abgelegt sein. Als zweite Möglichkeit können möglichst viele Punkte unter ständiger automatischer Positionsbestimmung ausgemessen werden, um anschliessend auf die relevanten Punkte zu interpolieren. Die zweite Möglichkeit kann durchaus sinnvoll sein, wurde aber von der EMPA, unter anderem aus Gründen der dabei anfallenden Datenmengen, bisher nicht angewendet.

Die Markierung von auszumessenden Linien auf einer Brücke mittels Farbspray war bis vor kurzem Standard. Nachteile bei dieser Vorgehensweise sind der grosse Aufwand für das Anbringen der Markierungen, die Ungenauigkeit mit der solche Markierungen von einem fahrenden Messfahrzeug angefahren werden können und letztlich auch die Tatsache, dass solche Markierungen auch nach Abschluss der Arbeiten noch lange Zeit sichtbar sind.

Die elektronische Ablage der auszumessenden Linien auf einem Gerät, im Falle der EMPA einem GPS-Gerät, bietet gegenüber der Markierung mit Farbspray erhebliche Vorteile. Die zu messenden Linien können im Allgemeinen aus vorhandenen Daten (z.B. Koordinaten der Brückenachse) berechnet werden, das zeitaufwändige und den Verkehr behindernde Aufsprühen entfällt, es bleiben keine sichtbaren Spuren auf dem Objekt, die Genauigkeit mit der die vorgesehenen Linien abgefahren werden ist deutlich besser und, da die tatsächliche Position des Messfahrzeuges in Echtzeit aufgezeichnet werden kann, kann klar dokumentiert werden wo die vorgesehene Messlinie mit welcher Genauigkeit eingehalten wurde. Zusätzlich besteht keine Abhängigkeit von der Sichtbarkeit der Markierungen, welche zum Beispiel in der Nacht oder bei starkem Verkehr eingeschränkt sein kann. Als Nachteile sind die hohen Kosten für ein geeignetes GPS-Gerät von ca. CHF 70000.- zu nennen. Zusätzlich werden höhere Anforderungen an das Know-How der Mitarbeiter gestellt und im Falle der Abdeckung von Teilen des Himmels (Lärmschutzwände, Strassenschluchten, etc.) ist das Verfahren nur beschränkt einsetzbar.

Im Folgenden soll die Vorgehensweise anhand eines praktischen Beispiels veranschaulicht werden. Im Frühling 2004 untersuchte die EMPA im Auftrag des Tiefbauamtes des Kantons Bern das Felsenauviadukt entlang von 22 Linien über die gesamte Brückenlänge von 1116 Metern. Die Messlinien waren der EMPA elektronisch anhand von Punkten in Abständen von 100 Metern zur Verfügung gestellt worden.

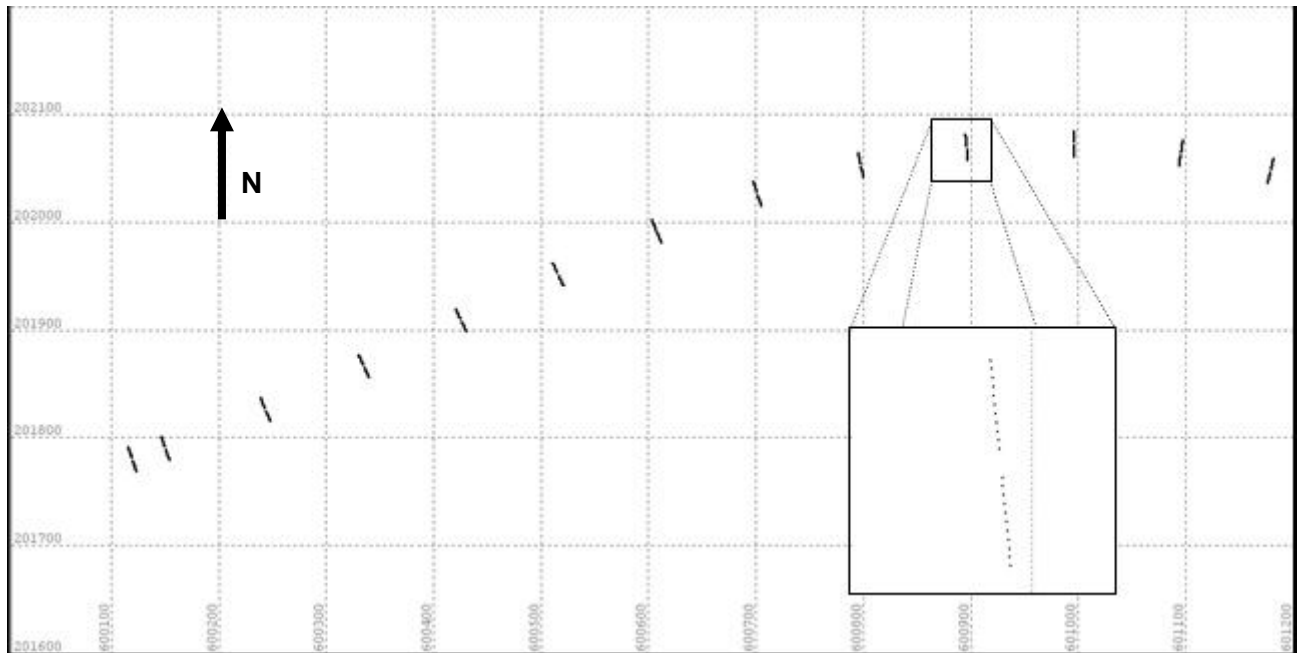


Abbildung 3.6.1: Punktwolken, Felsenauviadukt

Um während der Messung entlang von klar definierten Linien fahren zu können, wurden anschliessend Kurven durch die vorgegebenen Punkte gelegt und auf dem GPS-Controller abgelegt.

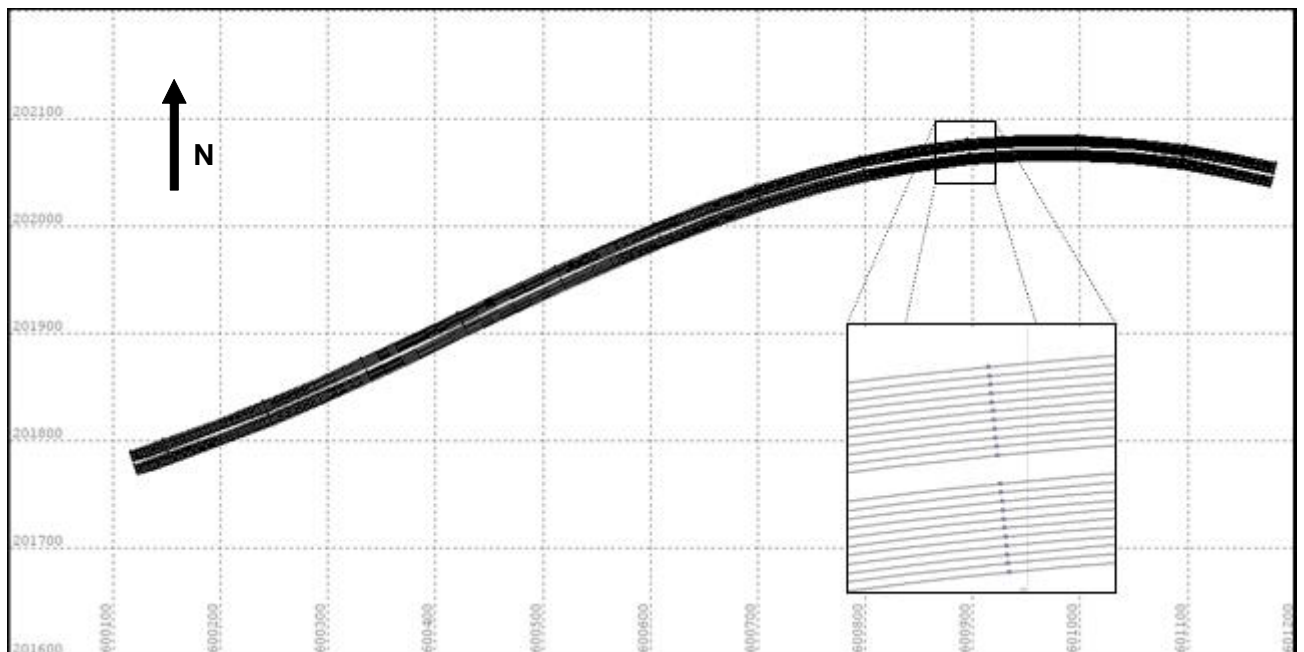


Abbildung 3.6.2: Punktwolken mit Messlinien, Felsenauviadukt

Während der Radarmessung auf dem Objekt wurde einerseits die Position mit Hilfe des Controllers ständig kontrolliert bzw. korrigiert, andererseits wurde die aktuelle Position auch zum Zwecke der Dokumentation abgespeichert.



Abbildung 3.6.3: Controller mit Messlinie, Felsenauviadukt

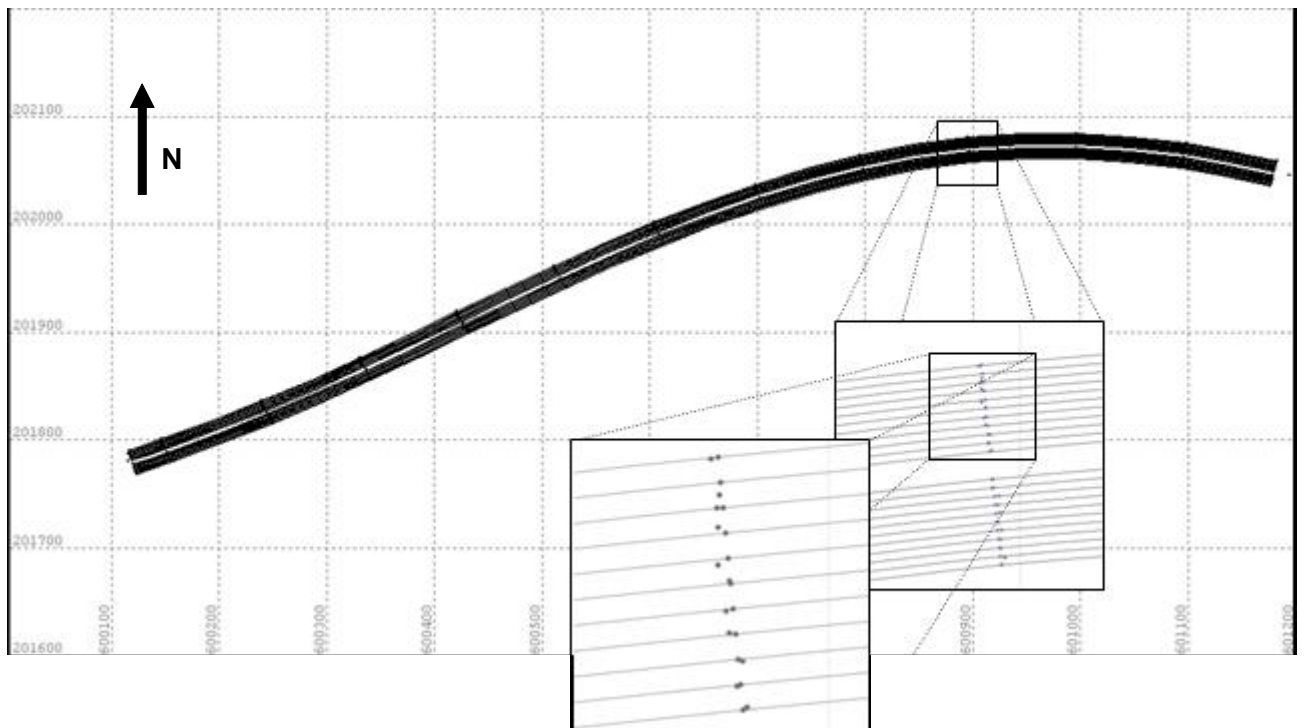


Abbildung 3.6.4: Messlinien und tatsächliche Positionen, Felsenauviadukt

Das für dieses Projekt eingesetzte GPS-System besteht aus zwei Trimble Modell 5700 Empfängern (mit Zubehör wie GPS-Antennen, Funkverbindung etc.). Einer davon bildet die Basisstation und der andere ist als Rover auf dem Messfahrzeug untergebracht. Die



Basisstation berechnet Korrekturen (z.B. für atmosphärische Störungen) und sendet diese per Funk an den Rover, welcher diese in die Positionsrechnung mit einbezieht. Diese Art der GPS-Messung wird als RTK (Real-Time-Kinematic) bezeichnet und erzeugt, sofern ausreichend Satelliten zur Verfügung stehen, Positionen mit Genauigkeiten von besser als 0.01m.



Abbildung 3.6.5: Basisstation



Abbildung 3.6.6: GPS-Antenne auf Fahrzeug (roter Pfeil)

### 3.7 Mobile Georadar-Anlage der EMPA

Die mobile Georadar-Anlage der EMPA wurde im Jahr 1996 in Betrieb genommen und seither kontinuierlich verbessert. Sie besteht aus einem geländegängigen Fahrzeug, diversem Zubehör und den folgenden Komponenten:

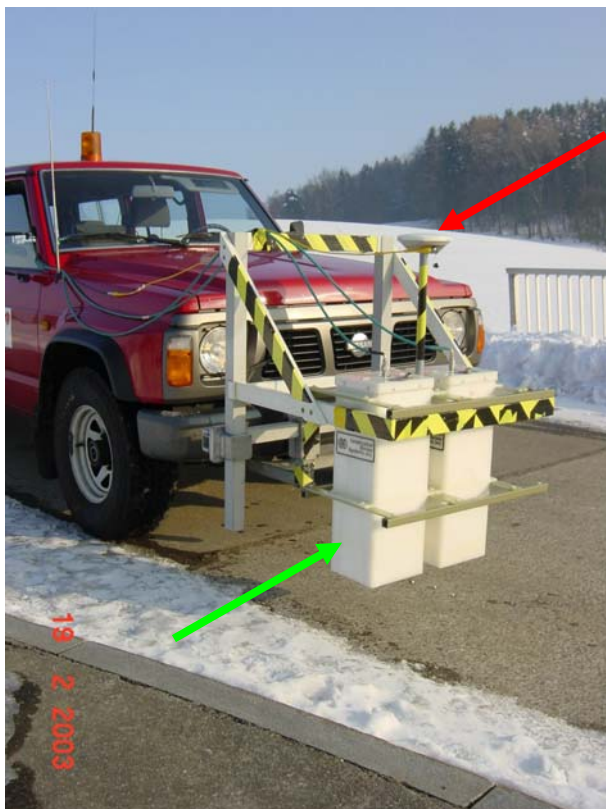
Tabelle 3.7-1: technische Ausrüstung der mobilen Georadar-Anlage der Empa

Bezeichnung	Modell	Hersteller
<b>Georadar</b>		
Radargerät	SIR-20	GSSI
Hornantennen	4205	GSSI
900MHz Antenne	3101D	GSSI
Antennenhalterungen	---	EMPA
<b>Positionierung und Positionskontrolle</b>		

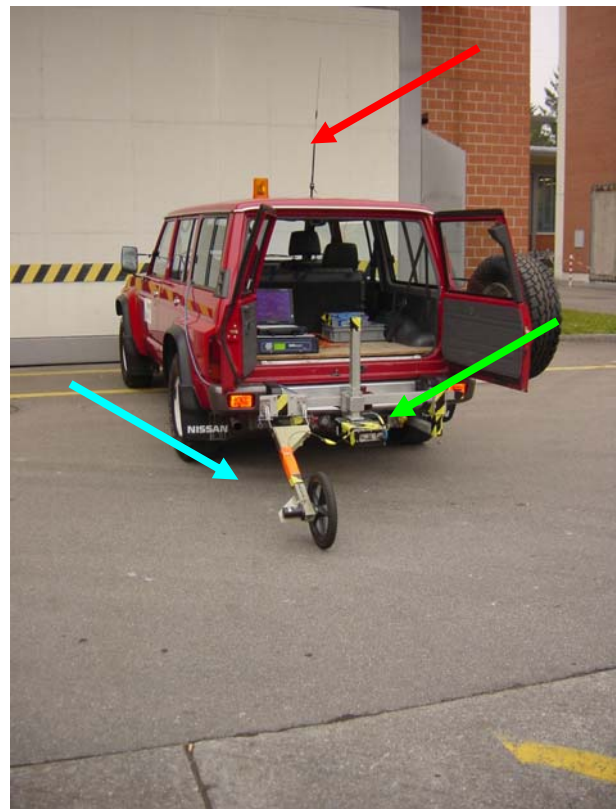
GPS-Basisstation	5700	Trimble
Rover	5700	Trimble
Messrad	---	GSSI

Die Anlage ist für Geschwindigkeiten von maximal 80 km/h konzipiert, kann also auch auf Autobahnen ohne Verkehrsbehinderung eingesetzt werden. Die in diesem Bericht beschriebenen Messungen wurden mit Fahrgeschwindigkeiten von 10 km/h durchgeführt. Dies bietet die Möglichkeit vorher definierte Messlinien genau einzuhalten und erlaubt einen kleinen Abstand zwischen den einzelnen Messpunkten. Die Antennenhalterungen ermöglichen eine grosse Flexibilität. Die Antennen können in verschiedenen Höhen montiert, seitlich verschoben und gedreht werden. Für die An- und Abreise kann die gesamte Anlage im Inneren des Fahrzeugs untergebracht werden.

Die *Abbildung 3.7.1* zeigt die Vorderansicht der mobilen Anlage. Die beiden Hornantennen (ein Sender, ein Empfänger) sind mit einem grünen Pfeil gekennzeichnet. Darüber befindet sich die GPS-Antenne (roter Pfeil). Von hinten betrachtet ist die 900 MHz Antenne (grüner Pfeil), das Messrad (blauer Pfeil) sowie die Funkantenne für die Verbindung mit der GPS-Basisstation erkennbar.



*Abbildung 3.7.1: mobile Georadar-Anlage, Ansicht von vorn*



*Abbildung 3.7.2: mobile Georadar-Anlage, Ansicht von hinten*

### 3.8 Zukünftige Entwicklungen

Wie bereits im Abschnitt *Technische Entwicklung seit 1990* beschrieben, hat in den letzten Jahren eine rasante Entwicklung stattgefunden und es gibt keinen Grund anzunehmen, dass sich dies in Zukunft ändern könnte. Die im Folgenden beschriebenen Trends beruhen einerseits auf aktuellen Entwicklungen und andererseits spiegeln sie die persönliche Meinung des Autors wider. Demnach sind in der nahen Zukunft folgende Entwicklungen zu erwarten:

1. Verbreitung und routinemässige Anwendung von Antennen-Arrays
2. Geräte für spezielle Anwendungen, auch durch Laien bedienbar
3. Miniaturisierung von Geräten
4. Vollautomatische 3-D Datenverarbeitungs- und Auswertungssoftware

#### Verbreitung und routinemässige Anwendung von Antennen-Arrays

Dreidimensionale Messungen sind äusserst nützlich und geben Details wider, die in zweidimensionalen Untersuchungen nicht abgebildet werden können. Allerdings ist heute die Erhebung dreidimensionaler Datensätze sehr zeitaufwendig und deshalb meist auf kleine Bereiche oder Laboruntersuchungen beschränkt. Seit kurzem sind erste Antennen-Arrays mit bis zu 63 Antennen auf dem Markt, die es erlauben auch grössere Flächen innerhalb kurzer Zeit auszumessen. Damit könnten 3-D Untersuchungen von ganzen Brückenplatten zum Normalfall werden. Allerdings stellt sich heute noch die Frage, wie die grossen Datenmengen am Besten gehandhabt werden können und es ausserdem unklar welche Systeme sich am Markt behaupten werden.



Abbildung 3.8.1: Antennenarray, Photo 3d-Radar AS, Norway

#### Geräte für spezielle Anwendungen, auch durch Laien bedienbar

Die meisten der heutigen Radargeräte sind nach wie vor Systeme mit einem grossen Bereich an möglichen Anwendungen, vielen Optionen, die nur von Spezialisten bedienbar und zudem in einer hohen Preisklasse angesiedelt sind. In Ansätzen bereits auf dem Markt und in Zukunft vermehrt zu erwarten sind Low-Cost Geräte, die auf eine spezielle Anwendung optimiert und auch durch den Laien bedienbar sind. Beispiele für derartige Ansätze sind StructureScan von GSSI oder Conquest von Sensors & Software. Beide

Systeme sind speziell für flächige und oberflächennahe Untersuchungen auf Beton konzipiert, können aber nicht als Low-Cost Lösungen bezeichnet werden.

### **Miniaturisierung von Geräten**

Der im gesamten Bereich Elektronik zu beobachtende Trend zur Miniaturisierung macht selbstverständlich auch vor Radargeräten nicht Halt. Miniaturisierte Geräte sind hier vor allem im Zusammenhang mit durch Laien bedienbaren Geräten für spezielle Anwendungen relevant. Als Beispiel sei hier das Gerät HandyScan von GSSI erwähnt (*Abbildung 3.8.2*). Es hat etwa die Grösse eines Bügeleisens und eignet sich für oberflächennahe Anwendungen.



*Abbildung 3.8.2: HandyScan, Photo Geophysical Survey Systems Inc, USA*

### **Vollautomatische 3-D Datenverarbeitungs- und Auswertungssoftware**

Die Bearbeitung und Auswertung von Radardaten ist nach wie vor Aufgabe von spezialisierten Fachkräften. Diverse Firmen vertreiben bereits heute Software mit dem Anspruch einer vollautomatischen Datenbearbeitung und Auswertung. Dies muss weiterhin eher als Verkaufsstrategie denn als in der Praxis anwendbares Konzept gelten. Letztlich liegt es nach wie vor in der Verantwortung des Spezialisten, die richtigen Schlussfolgerungen aus den Radardaten zu ziehen. Allerdings können Auswertungs- und Interpretationshilfen durchaus nützlich sein, wenn die vorgeschlagenen Lösungen abschliessend vom Spezialisten beurteilt und gegebenenfalls korrigiert werden.

Für einzelne Anwendungen wie oberflächennahe und flächendeckende Untersuchungen auf Beton, kann die Softwareunterstützung besonders nützlich sein und dem Spezialisten einen grossen Teil der Arbeit abnehmen. Der Grund hierfür liegt in den weitgehend bekannten Materialien und Strukturen die hier anzutreffen sind. Wird zudem eine standardisierte Vorgehensweise bei der Aufnahme der Radardaten angewendet, so ist eine automatisierte Bearbeitung und Auswertung eher unproblematisch. Wichtig ist allerdings auch hier eine Überprüfung der Ergebnisse durch eine fachkundige Person.

## 4 Forschung aktuell

Die heutigen Forschungsanstrengungen im Bereich Brücken und Georadar sind vielfältig. Die drei hauptsächlichen Stossrichtungen zielen auf die Verbesserung des Kalibriervorganges, die Anwendung auf neue Fragestellungen und die Verifikation von verschiedenen Ansätzen. Die folgenden Abschnitte geben einen Überblick über einige aktuelle Themen.

### 4.1 Durchmesser von Bewehrungseisen

Die direkte Abbildung des Durchmessers von Bewehrungseisen ist mit der auf dem Markt erhältlichen Ausrüstung nicht möglich, da das Auflösungsvermögen zu gering ist. Ob dies in Zukunft möglich sein wird, ist fraglich, da die erforderlichen hochfrequenten Signale in den meisten Materialien stark gedämpft werden. Dennoch ist die Frage nach dem Durchmesser der Bewehrungseisen für die Praxis von grossem Interesse.

Utsi und Utsi (2004) wählen einen indirekten Ansatz, in dem sie die Reflexionsamplituden an Bewehrungsstäben mit verschiedenen Polarisationsrichtungen untersuchen und auswerten. Die Messungen führen sie mit einer extrem hochfrequenten Antenne mit einer Mittelfrequenz von 4 GHz und mit Ankopplung an die Betonoberfläche durch.

Die *Abbildung.4.1.1* zeigt die Reflexionsstärke einer Polarisationsrichtung in Abhängigkeit vom Durchmesser und für verschiedene Tiefen aufgezeichnet auf einer Betondecke. Das entsprechende Resultat für die andere Polarisationsrichtung zeigt die *Abbildung 4.1.2*. Offensichtlich sind die Ergebnisse sowohl vom Durchmesser als auch von der Tiefe abhängig. Durch Bildung des Quotienten der beiden Reflexionsstärken (*Abbildung 4.1.3*) kann bereits ohne Kenntnis der Tiefe eine grobe Unterscheidung bzgl. verschiedener Durchmesser erreicht werden. Da mittels Georadar auch die Tiefe der Eisen bestimmt werden kann, können in einem weiteren Schritt zusätzliche Korrekturen vorgenommen werden.

Die Vorgehensweise der Autoren ist plausibel und hat an dem getesteten Objekt gute Resultate erzielt. Sicherlich sind weitere Abklärungen an anderen Objekten erforderlich. Ob ein derartiger Ansatz auf einer Brückenplatte mit Asphaltbelag zum Erfolg führen kann bleibt abzuklären.

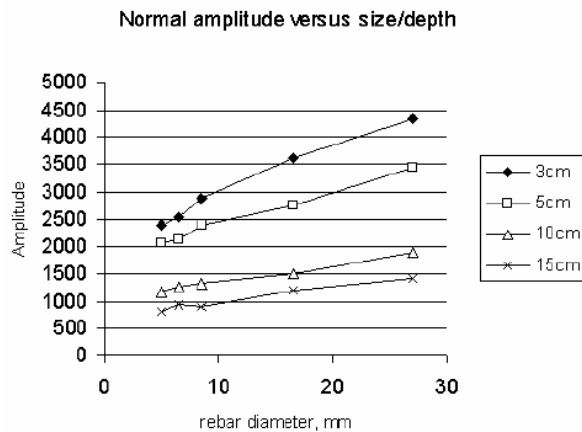


Abbildung.4.1.1: Reflexionsstärke in Abhängigkeit vom Durchmesser und der Tiefe (aus Utsi, 2004)

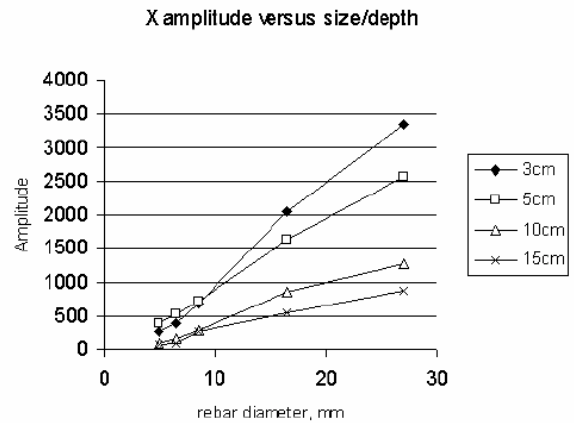


Abbildung 4.1.2: Reflexionsstärke in Abhängigkeit vom Durchmesser und der Tiefe (aus Utsi, 2004)

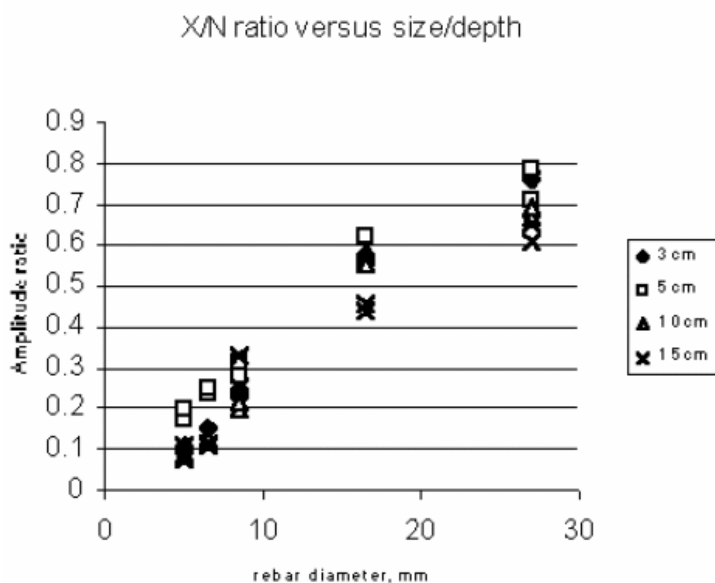


Abbildung 4.1.3: Quotient der beiden Reflexionsstärken in Abhängigkeit vom Durchmesser und der Tiefe (aus Utsi, 2004)

## 4.2 Chloridgehalt im Beton

Arai et al. (2003) untersuchen in Laborversuchen Betonproben mit verschiedenen Feuchtigkeiten und Chloridgehalten. Zusätzlich betrachten sie mehrere Betontypen. Mit verschiedenen Korrekturen erreichen sie eine gute Korrelation zwischen einer Chloridbestimmung mittels Radar und der Realität. Die Abbildung 4.2.1 zeigt einen Vergleich zwischen Radarergebnis (estimated value) und tatsächlichen Chloridgehalten (set value) nach einer Feuchtigkeits- und Temperaturkorrektur. Die Ergebnisse weisen eine sehr gute Genauigkeit auf. Die Abbildung 4.2.2 zeigt den Einfluss des Betontyps auf die Resultate. Die

verschiedenen Symbole stehen für verschiedene Betontypen. Die gezeigten Resultate der Autoren sind beeindruckend, es muss allerdings hinzugefügt werden, dass zumindest einige der vorgeschlagenen Korrekturen auf realen Brücken schwierig oder unmöglich sein dürften, da die jeweiligen Parameter (z.B. Feuchtigkeit) nicht bekannt sind.

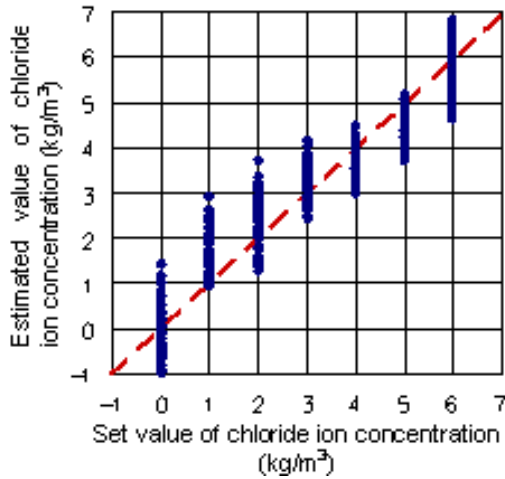


Abbildung 4.2.1: Vergleich von Radarergebnis und Realität für Chloridgehalt nach Temperatur- und Feuchtigkeitsvergleich (aus Arai, 2003)

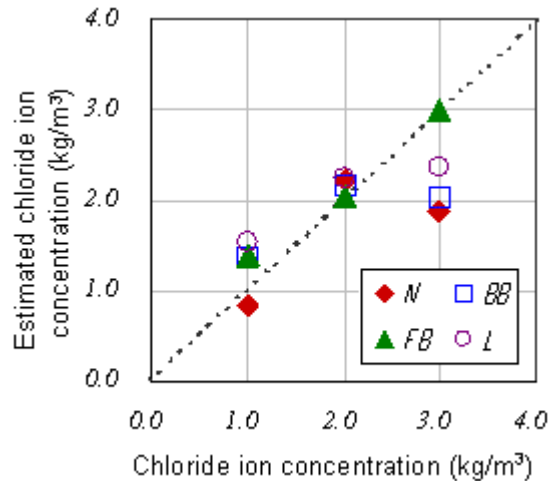


Abbildung 4.2.2: Vergleich von Radarergebnis und Realität für Chloridgehalt für verschiedene Betontypen (aus Arai 2003)

### 4.3 Ausbreitungsgeschwindigkeit und Genauigkeit

Watanabe et al. (2003) untersuchen in Laborversuchen einen aus einer Brücke entnommenen Betonträger mit verschiedenen zerstörungsfreien Methoden. Sie vergleichen die mittels Radar erhaltenen Ergebnisse für die Eisenüberdeckung mit der Realität und erhalten das in Abbildung 4.3.1 gezeigte Ergebnis. Leider geben die Autoren keine Hinweise auf die Art ihrer Kalibrierung.

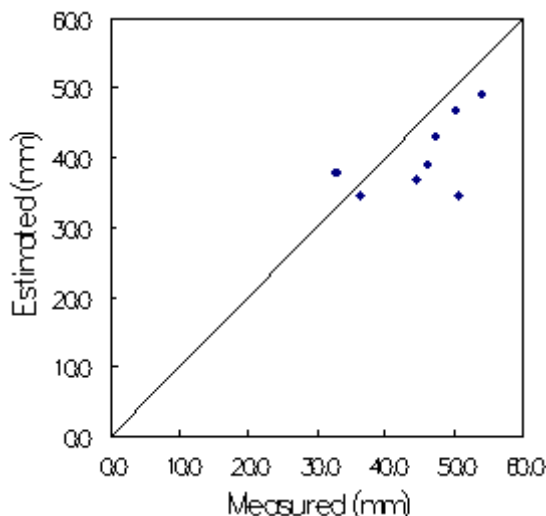
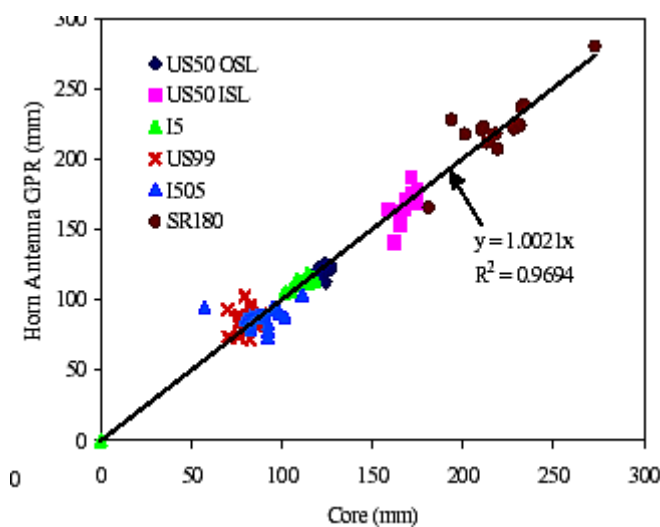


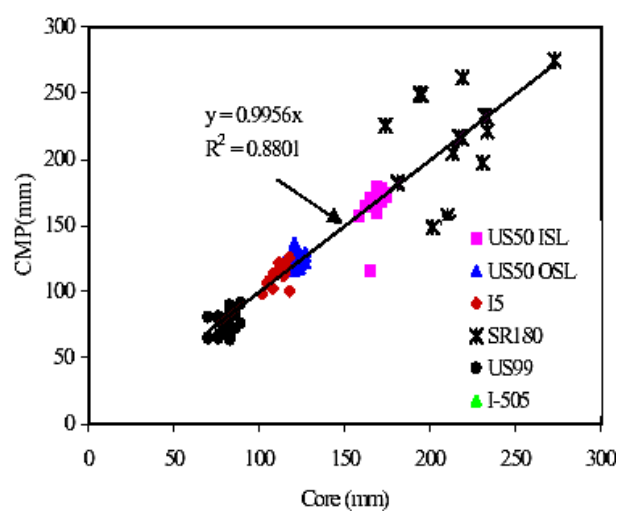
Abbildung 4.3.1: Radarergebnis vs. Realität im Laborversuch (aus Watanabe et al., 2003)

Maser et al. (2003) vergleichen zwei Verfahren zur Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit auf Asphalt. Bei der CMP-Methode werden Messungen mit verschiedenen Abständen zwischen Send- und Empfangsantenne ausgewertet (Dix, 1955). Dieses Verfahren ist in der seismischen Industrie Standard und wird in grossem Massstab angewendet. Als zweite Methode wird die Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit über die Reflexionskoeffizienten an Schichtgrenzen angewendet (Reflexionsmethode) (Roddis et al. 1992). Dieses Verfahren wird von diversen Anbietern eingesetzt, ist aber nicht unumstritten, weil es Annahmen beinhaltet, die in der Praxis nur bedingt zutreffen (Parry und Davis, 1992). Beide Verfahren werden zusätzlich zu den beschriebenen Verfahren anschliessend noch anhand von Bohrkernen kalibriert.

Die Resultate dieses Vergleichs sind in *Abbildung 4.3.2* und in *Abbildung 4.3.3* dargestellt. Das Ergebnis legt die Schlussfolgerung nahe, dass die Reflexionsmethode bessere Ergebnisse als das CMP-Verfahren liefert.

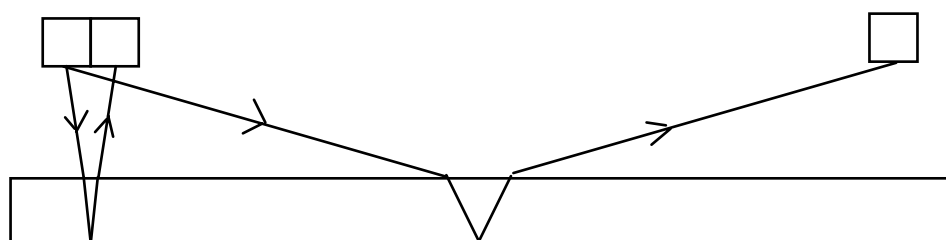


*Abbildung 4.3.2: Radarergebnis vs. Realität auf diversen Strassen, Reflexionsmethode mit anschliessender Kalibration, (aus Maser et al. 2003)*



*Abbildung 4.3.3: Radarergebnis vs. Realität auf diversen Strassen, CMP-Methode mit anschliessender Kalibration, (aus Maser et al. 2003)*

Al-Qadi et al. (2003) übertragen das CMP-Verfahren auf die Anwendung. Dies ist aus physikalischen Gründen nicht sinnvoll. Durch den grossen Geschwindigkeitsunterschied in Luft und Asphalt legt das Signal auch bei grossen Abständen zwischen Sender und Empfänger nur minimal variierende Strecken im Belag zurück. Dieser Sachverhalt ist bei Hugenschmidt (1998) näher beschrieben und in der *Abbildung 4.3.4* schematisch dargestellt.



*Abbildung 4.3.4: Laufweg des Signals für Hornantennen mit verschiedenen Abständen zwischen Sender und Empfänger*



Den Vergleich zwischen den CMP Ergebnissen, den Ergebnissen mit der Reflexionsmethode und Bohrungen zeigt die Tabelle 4.3-1. Das CMP Ergebnis ist besser als das mit der Reflexionsmethode erhaltene. Umgerechnet in absolute Fehler (Tabelle 4.3-2) zeigt sich allerdings, dass diese erheblich sind.

*Tabelle 4.3-1: Vergleich zwischen CMP-Hornantennen und Reflexionsmethode (Al-Qadi, et al., 2003)*

Core #	Core Location*	Core Thickness (mm)	GPR Thickness (mm) CMP Method	GPR Thickness (mm) Classic Method	Absolute Error (%) CMP Method	Absolute Error (%) Classic Method
1n	7.00	337	322	378	4.3	12.1
2n	9.00	311	303	399	2.6	28.4
3n	11.00	368	350	459	5.0	24.6
4n	12.90	343	322	377	6.1	10.0
5n	14.00	330	359	374	8.7	13.3
6n	15.50	298	274	272	8.2	8.8
7n	16.45	279	310	322	11.0	15.5
8s	16.00	305	313	311	2.7	1.8
9s	15.40	267	308	324	15.5	21.3
11s	15.22	267	296	306	11.0	14.5
14s	14.95	286	283	315	1.0	10.1
17s	14.68	292	303	301	3.7	2.9
21s	10.64	375	345	405	7.9	8.1
22s	7.00	356	331	377	6.9	5.8
<b>Mean Error (%)</b>					<b>6.8</b>	<b>12.7</b>

*Tabelle 4.3-2: absolute Fehler berechnet aus Tabelle 4.3-1*

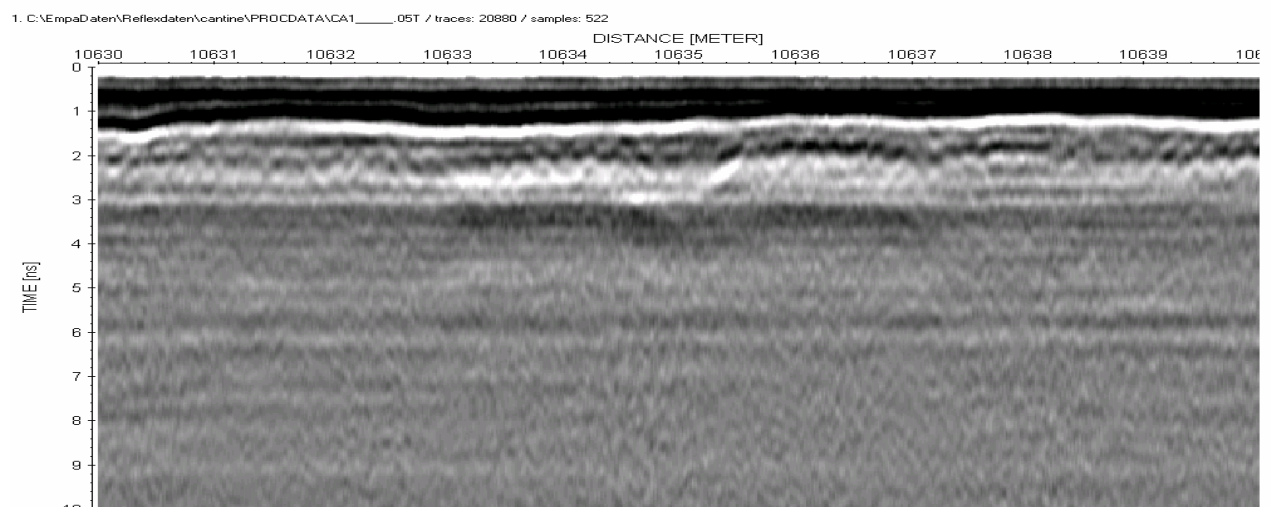
	CMP-Methode	Klassische Methode
Maximaler Fehler (mm)	41	91
Mittlerer Fehler (mm)	21	40

## 5 Eignung und Genauigkeit der Ergebnisse für einzelne Fragestellungen

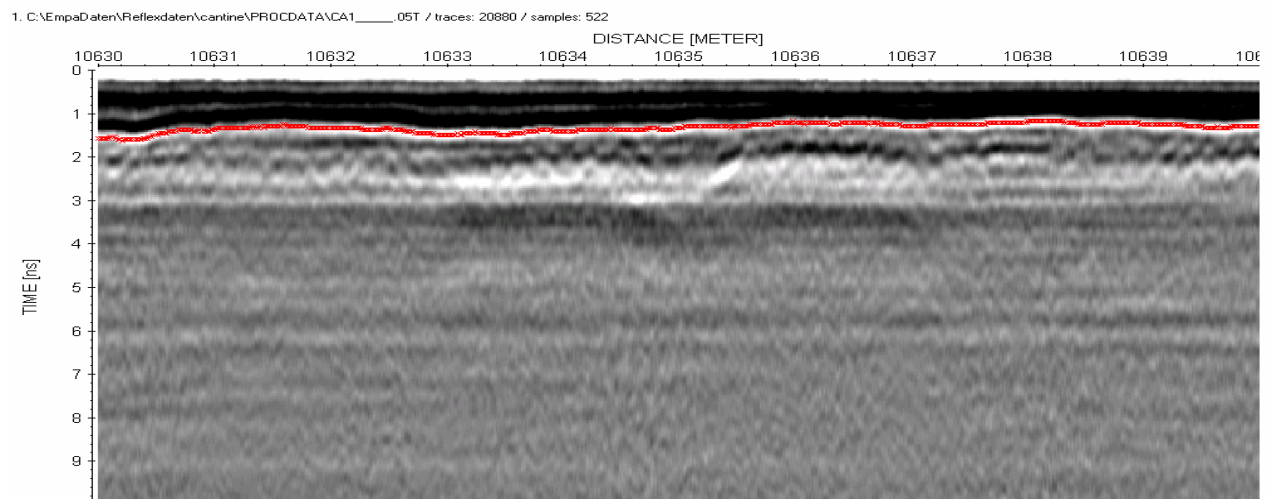
### 5.1 Belagsdicke

#### Anwendbarkeit

Das Verfahren ist gut für die Untersuchung der Belagsdicke auf Brücken geeignet, da sich Asphalt und Beton hinsichtlich ihrer elektromagnetischen Eigenschaften deutlich unterscheiden. Dies führt in den meisten Fällen zu einer deutlichen Reflexion an der Grenze zwischen Asphalt und Beton. Die *Abbildung 5.1.1* zeigt einen Ausschnitt von 10 m Länge vom Viadotto sopra le Cantine. In der *Abbildung 5.1.2* ist die Reflexion am Übergang Beton-Asphalt rot gekennzeichnet.



*Abbildung 5.1.1: Ausschnitt aus dem Datensatz vom Viadotto sopra le Cantine, Länge 10m*

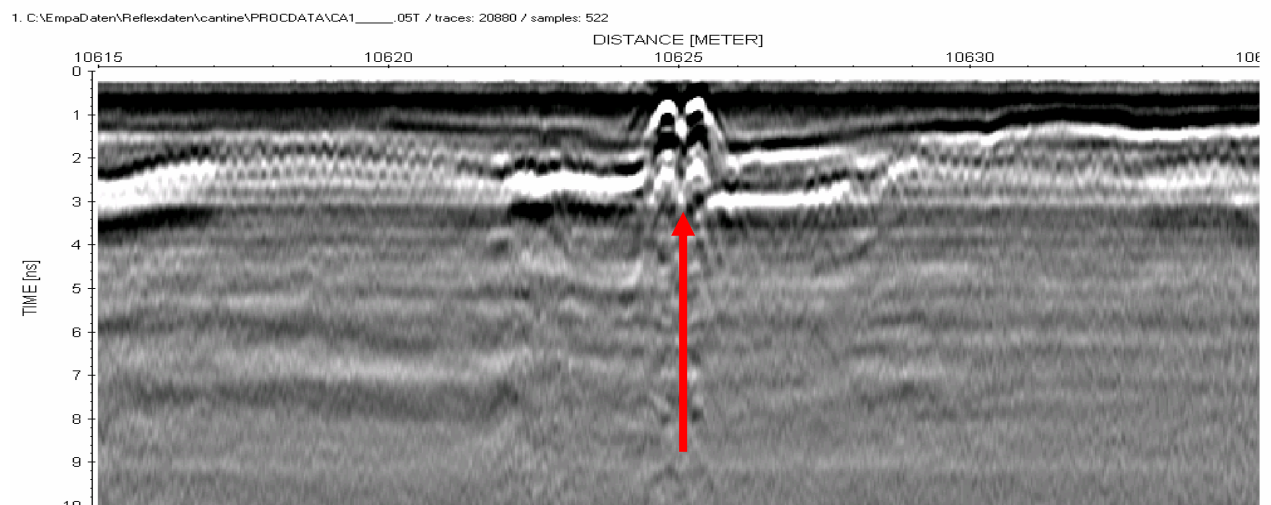


*Abbildung 5.1.2 : Ausschnitt aus dem Datensatz vom Viadotto sopra le Cantine, Länge 10m, Reflexion am Übergang Asphalt-Beton rot markiert*

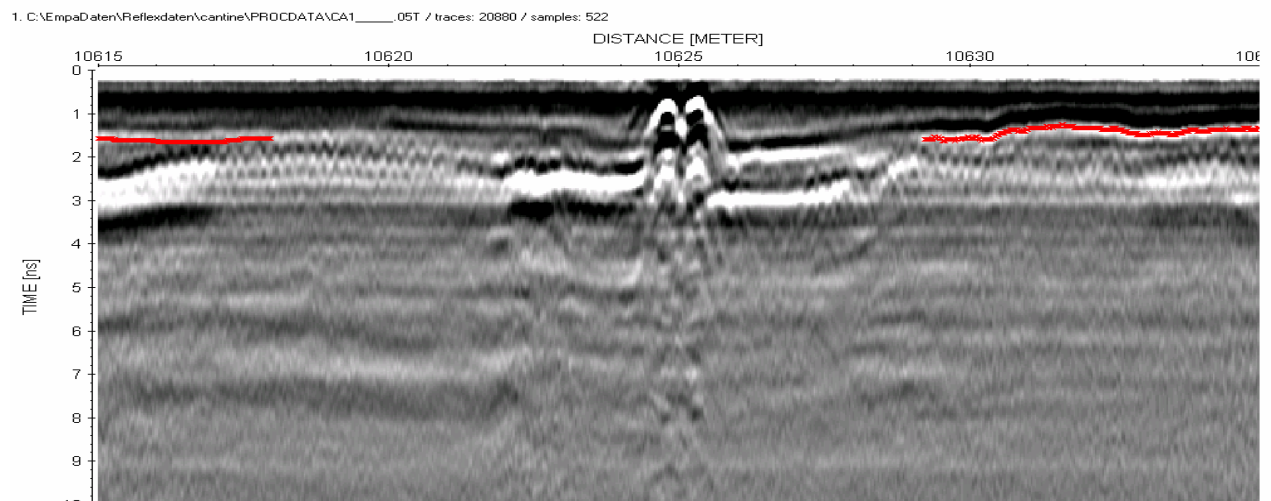
Radarergebnisse für Belagsdicken weisen auf den meisten Brücken kleinere Lücken auf. Dies ist auf mehrere Ursachen zurückzuführen:

- Fahrbahnübergänge und deren Umgebung
- Geringe Eisenüberdeckung der obersten Bewehrungslage
- Mangelnde Zusatzinformation bzw. komplexe Verhältnisse

Die *Abbildung 5.1.3* und die *Abbildung 5.1.4* zeigen die Umgebung eines Fahrbahnüberganges (Pfeil) auf dem Viadotto sopra le Cantine. Der Fahrbahnübergang ist 1.25m breit. Der Bereich in dem keine Belagsdicke festgestellt werden konnte ist deutlich grösser. Ursachen hierfür sind störende Reflexionen an den Metallteilen des Fahrbahnüberganges und möglicherweise ein anderer Aufbau im Übergangsbereich Asphalt-Beton.



*Abbildung 5.1.3: Umgebung eines Fahrbahnübergangs (Pfeil) auf dem Viadotto sopra le Cantine*



*Abbildung 5.1.4: Umgebung eines Fahrbahnübergangs auf dem Viadotto sopra le Cantine*

Die *Abbildung 5.1.5* und die *Abbildung 5.1.6* zeigen einen Ausschnitt von 20m Länge vom Felsenauviadukt. Im mittleren Bereich des Ausschnitts ist die Eisenüberdeckung so gering dass sich die Reflexion an der obersten Bewehrungslage mit der am Übergang Asphalt-Beton überlagert. Eine exakte Bestimmung der Belagsdicke ist damit nicht mehr möglich, wohl aber die Angabe eines Dickenbereiches (Belagsdicke liegt zwischen Xcm und Ycm).

I: C:\EmpaDaten\Reflexdaten\Felsenauviadukt\NPROC DATA\S05;\_05T / traces: 44567 / samples: 528

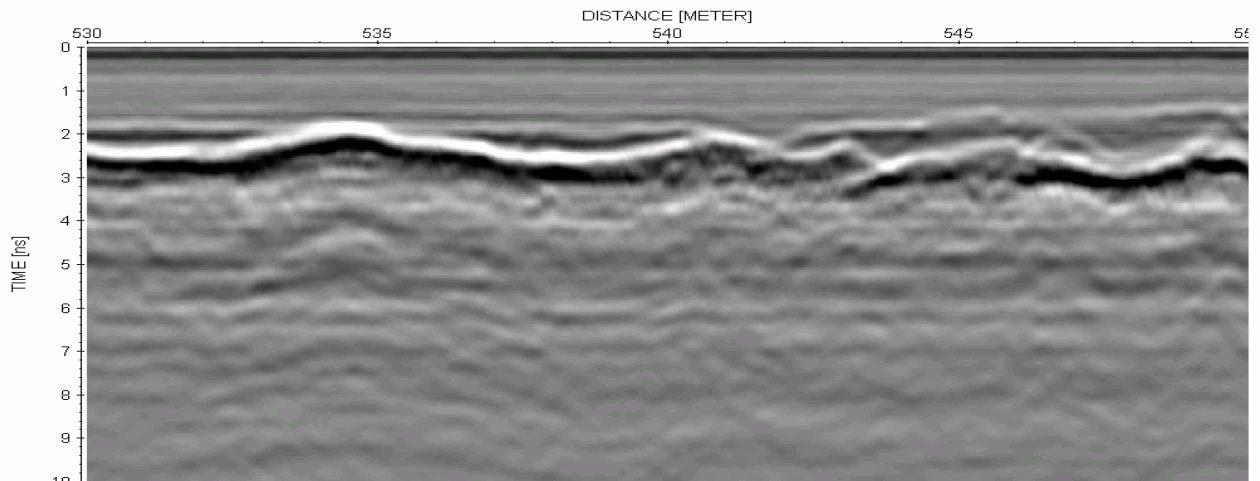


Abbildung 5.1.5: Ausschnitt aus Datensatz vom Felsenauviadukt, Länge 20m

I: C:\EmpaDaten\Reflexdaten\Felsenauviadukt\NPROC DATA\S05;\_05T / traces: 44567 / samples: 528

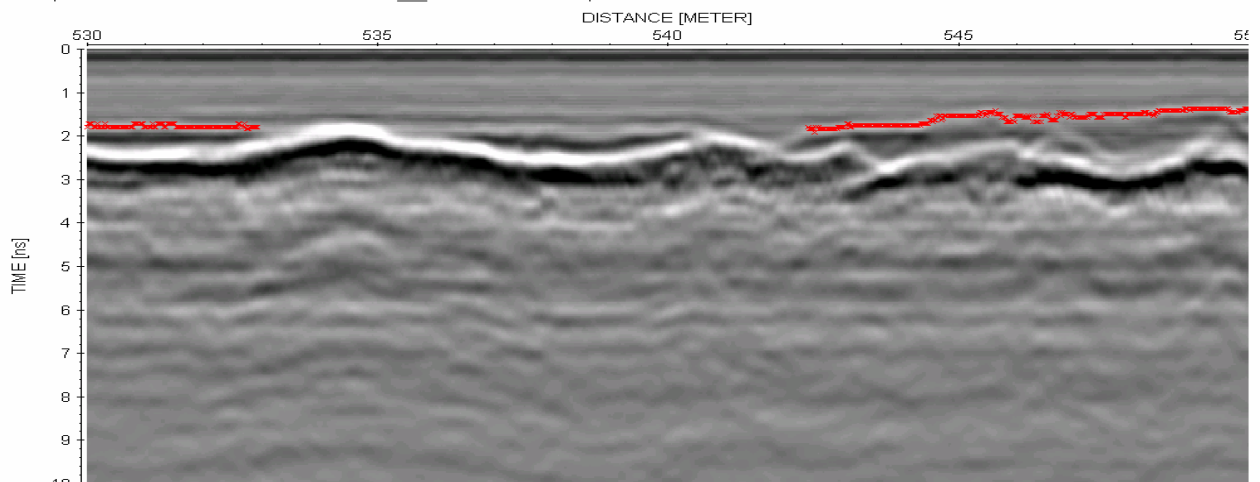


Abbildung 5.1.6: Ausschnitt aus Datensatz vom Felsenauviadukt, Reflexion am Übergang Asphalt-Beton rot markiert

Mangelnde Zusatzinformation kann bei komplexen Verhältnissen eine Auswertung der Radardaten erschweren oder gar verunmöglichen. Die *Abbildung 5.1.7* zeigt einen Ausschnitt von 30m Länge, der ausserhalb des hier dokumentierten Forschungsprojektes aufgezeichnet wurde. Das Reflexionsmuster ist recht komplex und variiert zusätzlich auch im Bereich diese kurzen Abschnittes so stark, dass die Reflexion am Übergang Asphalt-Beton nicht eindeutig identifizierbar ist. Da im dargestellten Abschnitt keine Zusatzinformation (Bohrkern oder Sondierung) zur Verfügung stand, konnte in diesem Bereich keine Belagsdicke bestimmt werden.

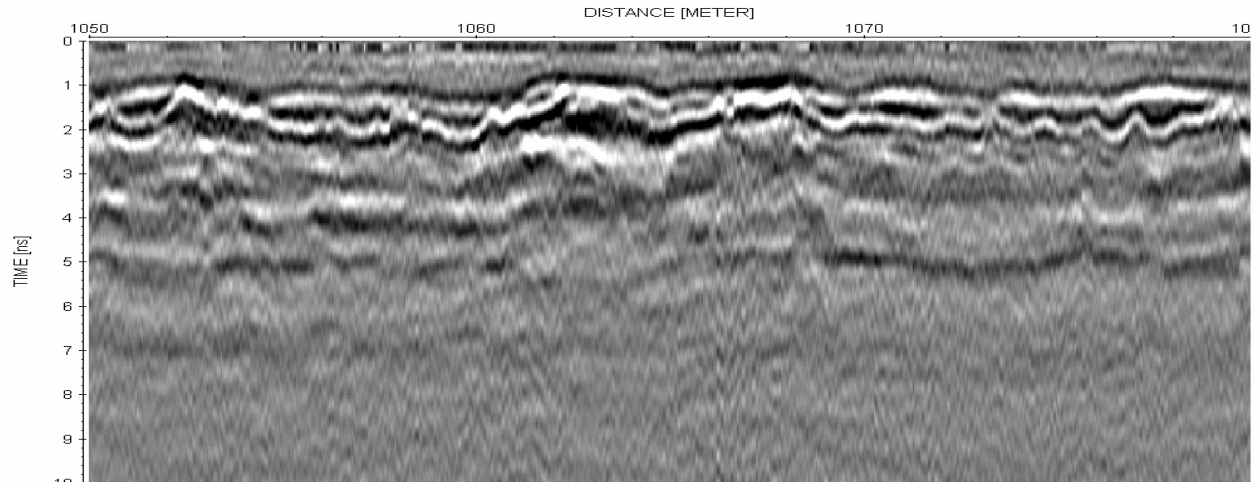


Abbildung 5.1.7: Ausschnitt aus einem Datensatz von 30m Länge, Objekt anonym

Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über den Anteil der Brückenlänge, über den auf den einzelnen Objekten eine Belagsdicke bestimmt werden konnte. Fahrbahnübergänge, Dohlendeckel und andere Bereiche ohne Asphaltbelag wurden bei der Berechnung nicht gesondert behandelt. Erwartungsgemäss unterscheiden sich die Ergebnisse auf den einzelnen Brücken, jedoch konnte überall auf dem mit Abstand grössten Teil der Brückenlängen die Belagsdicke bestimmt werden.

Tabelle 5.1-1: Anteil der Länge, auf der eine Belagsdicke bestimmt werden konnte

Radar-Messlinie	Prozent der Länge, auf der eine Belagsdicke bestimmt werden konnte
Überführung Burggasse - 1	86%
Überführung Burggasse - 1	84%
Sihlhochstrasse - 1	100%
Sihlhochstrasse - 2	99%
Sihlhochstrasse - 3	100%
Sihlhochstrasse - 4	100%
Viadotto sopra le Cantine - 1	90%
Viadotto sopra le Cantine - 2	90%
Überführung Wyssenried - 1	96%
Überführung Wyssenried - 2	98%
Überführung Wyssenried - 3	96%
Überführung Wyssenried - 4	98%
Überführung Wyssenried - 5	99%
Überführung Wyssenried - 6	97%
Überführung Wyssenried - 7	99%
Überführung Wyssenried - 8	90%
Überführung Wyssenried - 9	97%
Aabachbrücke Uster	Asphaltbelag bereits vor Radarmessung entfernt
Mittelwert <sup>1</sup>	95%

<sup>1</sup> in die Berechnung des Mittelwertes flossen alle Messlinien unabhängig von ihrer Länge mit gleicher Gewichtung ein

## Abdichtung

Bitumen-Dichtungsbahnen (DB) zur Abdichtung von Brückenplatten sind normalerweise um 5mm dick und liegen damit unterhalb des Auflösungsvermögens der eingesetzten Radar-Ausrüstung. Somit wird in diesem Bericht Belagsdicke als Belagsdicke einschliesslich einer möglicherweise vorhandenen DB verstanden.

## Genauigkeit

Die *Tabelle 5.1-2* gibt einen Überblick über die mittleren und maximalen Fehler, für die drei Brücken, auf denen die Belagsdicke manuell ausgemessen werden konnte. Die Spalten 2 und 3 entstanden unter Verwendung der ursprünglichen, mit Hilfe einiger weniger Sondierungen bestimmten Ausbreitungsgeschwindigkeit. Die Spalten 4 und 5 ergeben sich mit einer berechneten optimalen Ausbreitungsgeschwindigkeit. Diese wurde nachträglich so berechnet, dass der mittlere Fehler minimal wird.

*Tabelle 5.1-2: mittlere und maximale Fehler für Belagsdicke*

Spalte 1	Spalte 2	Spalte 3	Spalte 4	Spalte 5
	Mittl. Fehler (mm)	Max. Fehler (mm)	Mittl. Fehler, $V_{opt}$ (mm)	Max. Fehler, $V_{opt}$ (mm)
Überführung Burggasse-1	11	23	4	12
Überführung Burggasse-2	6	14	5	14
Sihlhochstrasse - 1			5	19
Sihlhochstrasse - 2			5	17
Sihlhochstrasse - 3			7	15
Sihlhochstrasse - 4			9	23
Viadotto sopra le Cantine - 1	11	33	8	41
Mittelwert <sup>1</sup>	9		6	

<sup>1</sup> in die Berechnung des Mittelwertes flossen alle Messlinien unabhängig von ihrer Länge mit gleicher Gewichtung ein

## Flächige Belagsdickenbestimmung mit grossen Dickenvariationen

Die im Rahmen diese Forschungsprojektes durchgeführten Messungen wurden entlang der vorgesehenen Schnittlinien und auf Brücken mit lediglich moderaten Belagsdickenvariationen durchgeführt. Deshalb wird nachstehend zur Ergänzung ein Ergebnis präsentiert, welches ausserhalb dieses Projektes erzielt wurde.

Im Jahre 1998 untersuchte die EMPA im Auftrag des Kantons Zürich die Sihlhochstrasse (A3) um ein flächiges Ergebnis für die Belagsdicke zu ermitteln. Dazu wurden in parallel Linien über die gesamte Brückenlänge Radardaten aufgezeichnet und ausgewertet. Die ermittelten Belagsdicken wurden in einem weiteren Schritt dazu benutzt, um die Höhe der Betonoberfläche zu berechnen. Hierzu wurde zusätzlich von einem Vermessungsbüro die Höhe der Belagsoberfläche ausgemessen.

Das Ergebnis für die Belagsdicke auf einer Fläche von 7990m<sup>2</sup> zeigt die *Abbildung 5.1.8*. Auffallend sind die Variationen der Belagsdicke zwischen 9cm und 28cm. In der *Abbildung*

5.1.9 ist das aus der Subtraktion von Belagsoberfläche und Belagsdicke ermittelte Resultat für die Höhe der Betonoberfläche dargestellt.

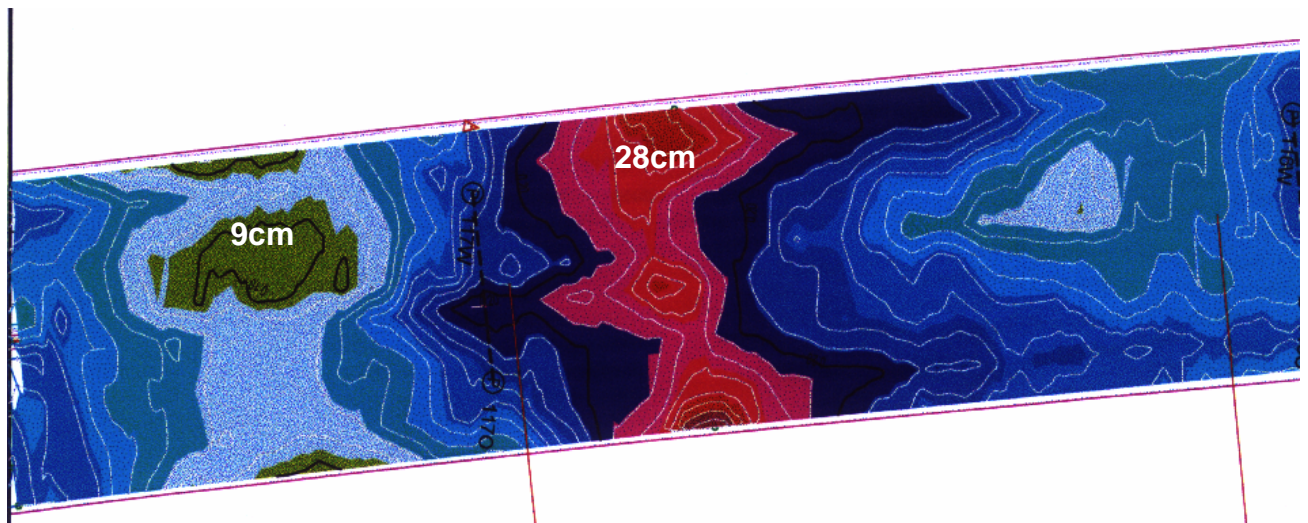


Abbildung 5.1.8: Belagsdicke, Fläche 7990m<sup>2</sup>, Hauptbrücke Sihlhochstrasse, Graphik erstellt durch terra vermessungen ag

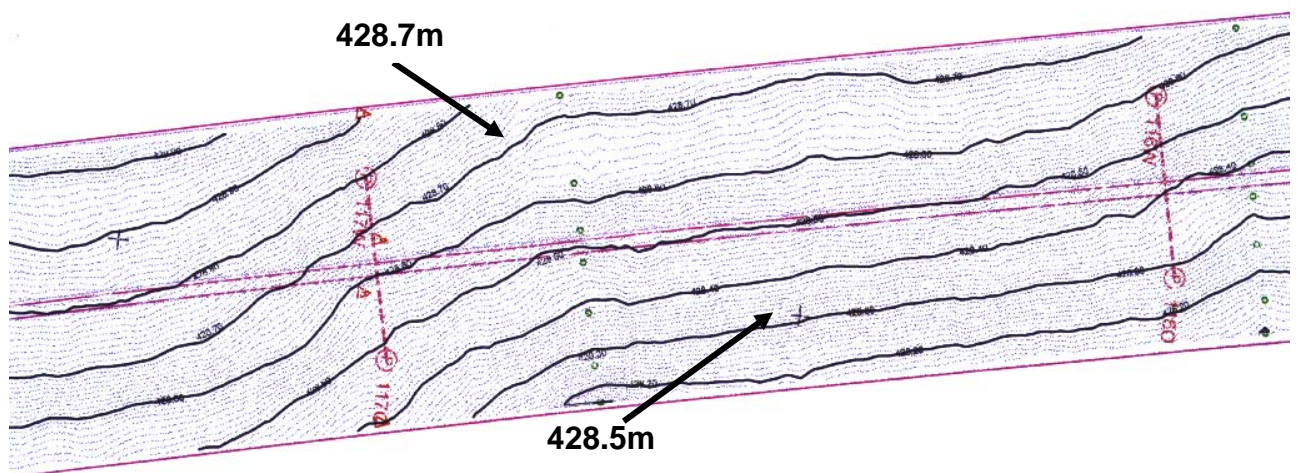


Abbildung 5.1.9: Höhe der Betonoberfläche, Fläche 7990m<sup>2</sup>, Hauptbrücke Sihlhochstrasse, Graphik erstellt durch terra vermessungen ag

### Dicke einzelner Belagsschichten

Die Dicke einzelner Belagsschichten konnte auf den Baustellen aus Zeitgründen nicht nachgemessen werden. Gemäss den bisherigen Erfahrungen der EMPA ist die Bestimmung einzelner Schichtdicken vielfach möglich. Voraussetzung ist allerdings ein ausreichender Kontrast der elektromagnetischen Eigenschaften in den einzelnen Schichten. Davon kann nicht in allen Fällen ausgegangen werden.

## Ausbreitungsgeschwindigkeiten

Bei allen hier dokumentierten Untersuchungen wurden die Ausbreitungsgeschwindigkeiten auf einzelnen Radar-Messlinien jeweils als konstant betrachtet. Dies ist eine Vereinfachung, da in der Praxis durchaus Variationen möglich sind. Andererseits wurden die Radar-Messlinien so gelegt, dass sie parallel zur Brückenachse liegen und damit jeweils eine über die einzelnen Linien weitgehend gleichbleibende Verkehrsbelastung erfahren. Damit sollten auch eine allfällige Nachverdichtung oder sonstige Einflüsse des Verkehrs entlang der Messlinie als konstant angenommen werden können.

Die *Tabelle 5.1-3* stellt die berechneten optimalen Ausbreitungsgeschwindigkeiten für einzelne Messlinien dar. Sie variieren zwischen  $1.17 \cdot 10^8$  m/s und  $1.47 \cdot 10^8$  m/s. Dies bestätigt die bisherigen Erfahrungen der EMPA, welche allerdings pro Objekt auf einige wenige Vergleiche beschränkt waren.

*Tabelle 5.1-3: optimale Ausbreitungsgeschwindigkeiten im Belag*

Messlinie	$V_{opt}$
Überführung Burggasse-1 (Chur)	$1.26 \cdot 10^8$ m/s
Überführung Burggasse-2 (Mitte)	$1.17 \cdot 10^8$ m/s
Sihlhochstrasse - 1	$1.43 \cdot 10^8$ m/s
Sihlhochstrasse - 2	$1.43 \cdot 10^8$ m/s
Sihlhochstrasse - 3	$1.43 \cdot 10^8$ m/s
Sihlhochstrasse - 4	$1.43 \cdot 10^8$ m/s
Viadotto sopra le Cantine - 1	$1.22 \cdot 10^8$ m/s

## Empfehlungen

- Messlinien möglichst parallel zur Brückenachse legen
- Bohrkerne möglichst erst nach Sichtung der Radardaten entnehmen

## 5.2 Belagsschäden

Eine systematische Untersuchung der Eignung des Verfahrens für Belagsschäden war im Rahmen dieses Forschungsprojektes nicht möglich, da dies einen auf die Bedürfnisse des Projektes zugeschnittenen Belagsabbruch mit intensiver Probenentnahme erfordert hätte. Somit beschränken sich die folgenden Betrachtungen auf das Beispiel offensichtlicher Kornablösungen auf der Überführung Burggasse.

Bereits während des Belagsabbruches mit einer Fräse, zeigten sich auf der Überführung Burggasse deutliche Kornablösungen. Stellenweise konnte das Material der Ausgleichsschicht an der Fräskante mit der Hand leicht ausgeräumt werden. Die *Abbildung 5.2.1* zeigt eine sichergestellte Belagsprobe. Auch hier zeigt sich deutlich eine Trennung zwischen Deck- und Ausgleichsschicht sowie eine weitgehend zerfallene Ausgleichsschicht.





Abbildung 5.2.1: Belagsprobe von der Überführung Burggasse

Einen Ausschnitt aus dem Datensatz der Überführung Burggasse zeigt die *Abbildung 5.2.2* (oben), darunter ist beim gleichen Ausschnitt der Bereich des Asphaltbelages mit orange eingezeichnet. Zum Vergleich dazu zeigt die *Abbildung 5.2.3* einen gleich langen Ausschnitt vom Viadotto sopra le Cantine. Beim Datensatz Burggasse existiert ein starkes Signal von innerhalb des Belages, beim Datensatz Cantine fehlt dieses. Mit hoher Wahrscheinlichkeit resultiert das zusätzliche Signal beim Datensatz Burggasse vom Übergang von der intakten Deckschicht in die beschädigte Ausgleichsschicht. Diese Beobachtung deckt sich mit anderen Erfahrungen der EMPA (Hugenschmidt, 1997), bei denen beispielsweise Datensätze vor und nach einer Belagssanierung aufgezeichnet und verglichen wurden. Allerdings stellt sich hier nach wie vor die Frage der Quantifizierung, d.h. beispielsweise die Frage, welche Signalstärke mit welchem Schadensfortschritt in Verbindung zu bringen ist.

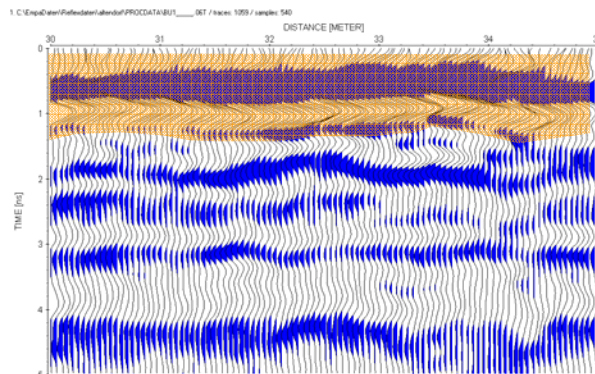
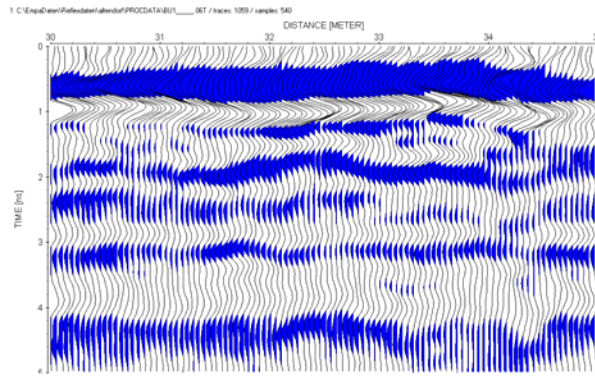


Abbildung 5.2.2: Ausschnitt Überführung Burggasse

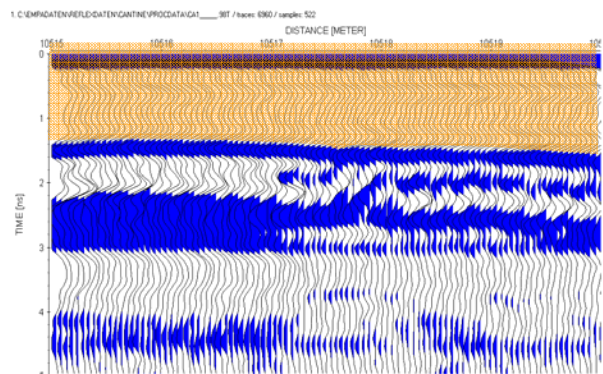
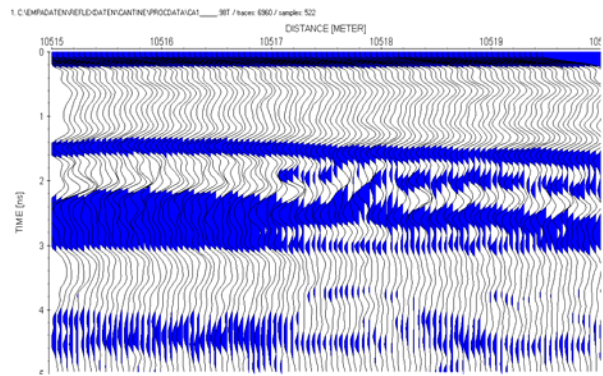


Abbildung 5.2.3: Ausschnitt Viadotto sopra le Cantine

### 5.3 Eisenüberdeckung der obersten Bewehrungslage

#### Anwendbarkeit

Das Verfahren ist gut für die Untersuchung der Eisenüberdeckung der obersten Bewehrungslage geeignet, da das Radarsignal an Metallen eine Totalreflexion erfährt. Dies führt in den meisten Fällen zu einer deutlichen Reflexion an der obersten Bewehrungslage. Allerdings handelt es sich im Gegensatz zum Übergang Asphalt-Beton nicht um eine geschlossene Fläche, sondern in den meisten Fällen um ein rechtwinkliges Netz. Dadurch ist die Fläche an der die Reflexion tatsächlich stattfindet sehr gering und die Signalstärke entsprechend reduziert.

Einen nicht vernachlässigbaren Einfluss hat auch die Polarisation des Radarsignals. Steht das elektrische Feld parallel zur Längsrichtung des Bewehrungsstabes, so ist die Reflexion deutlich stärker als wenn es senkrecht dazu steht. Die *Abbildung 5.3.1* und die *Abbildung 5.3.2* zeigen einen Vergleich zwischen zwei auf dem gleichen Abschnitt aufgezeichneten Datensätzen von der Rampe Sihlhochstrasse. Die Daten von *Abbildung 5.3.1* wurden mit quer vor dem Fahrzeug montierten Antennen aufgezeichnet, die von *Abbildung 5.3.2* mit längs montierten. Die Reflexion an der obersten Bewehrungslage ist mit den längs montierten Antennen deutlich stärker. Obwohl dies zunächst als wünschenswert erscheint, bringt es jedoch auch erhebliche Nachteile mit sich.

Die *Abbildung 5.3.3* zeigt zwei Datensätze, aufgezeichnet auf einer Brücke auf dem EMPA Gelände mit quer (oberer Bildteil) und längs (unterer Bildteil) montierten Antennen. Die bei den quer montierten Antennen getrennten Reflexionen am Übergang Asphalt Beton (roter

Pfeil) und an der obersten Bewehrungslage (grüner Pfeil) überlagern sich bei den längs montierten Antennen, wodurch die Auswertung erheblich erschwert wird.

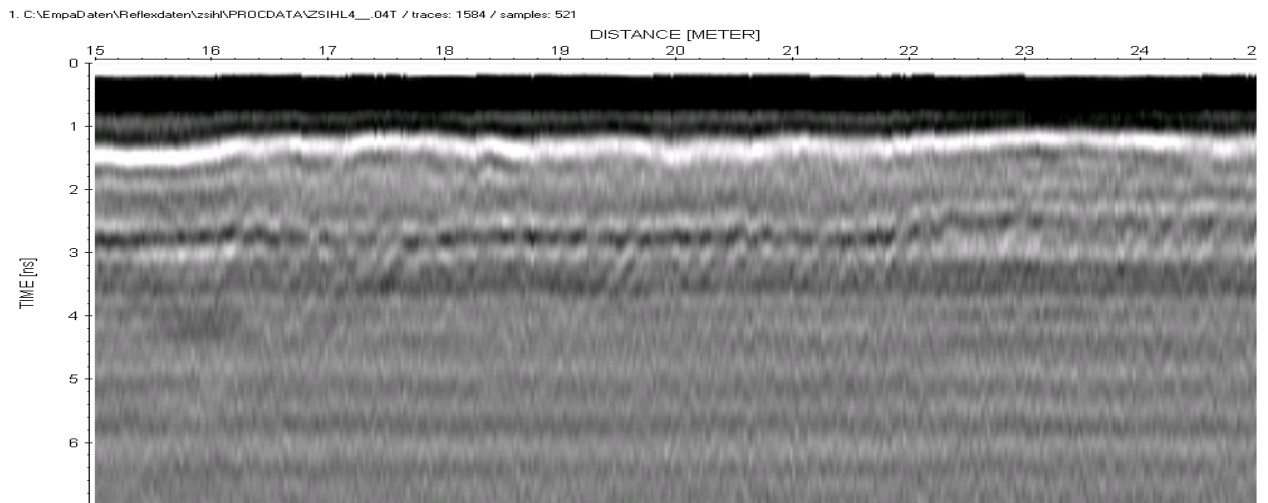


Abbildung 5.3.1: Antennen quer, Rampe Sihlhochstrasse

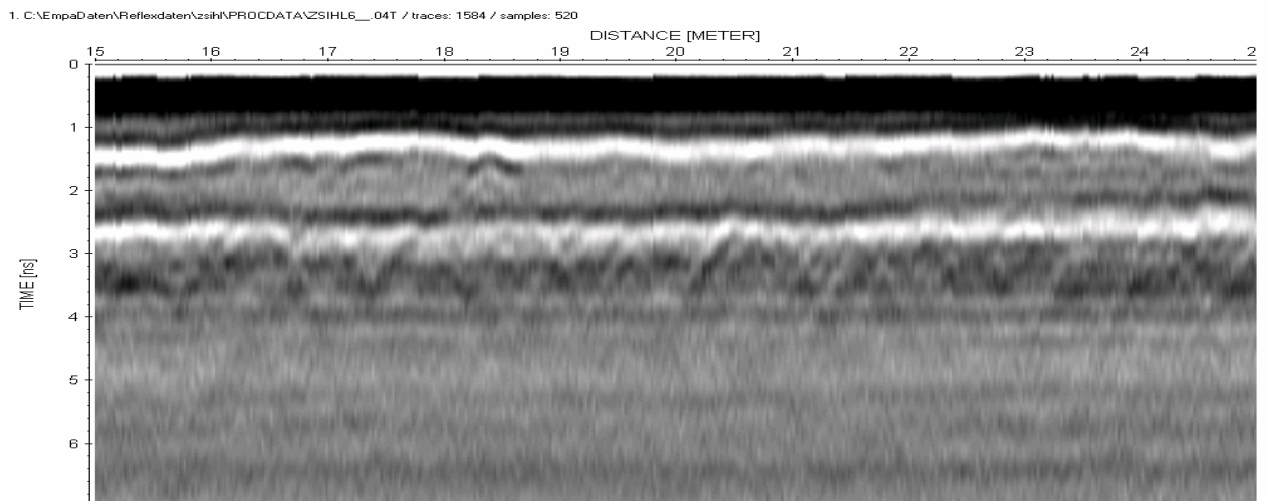


Abbildung 5.3.2: Antennen längs, Rampe Sihlhochstrasse

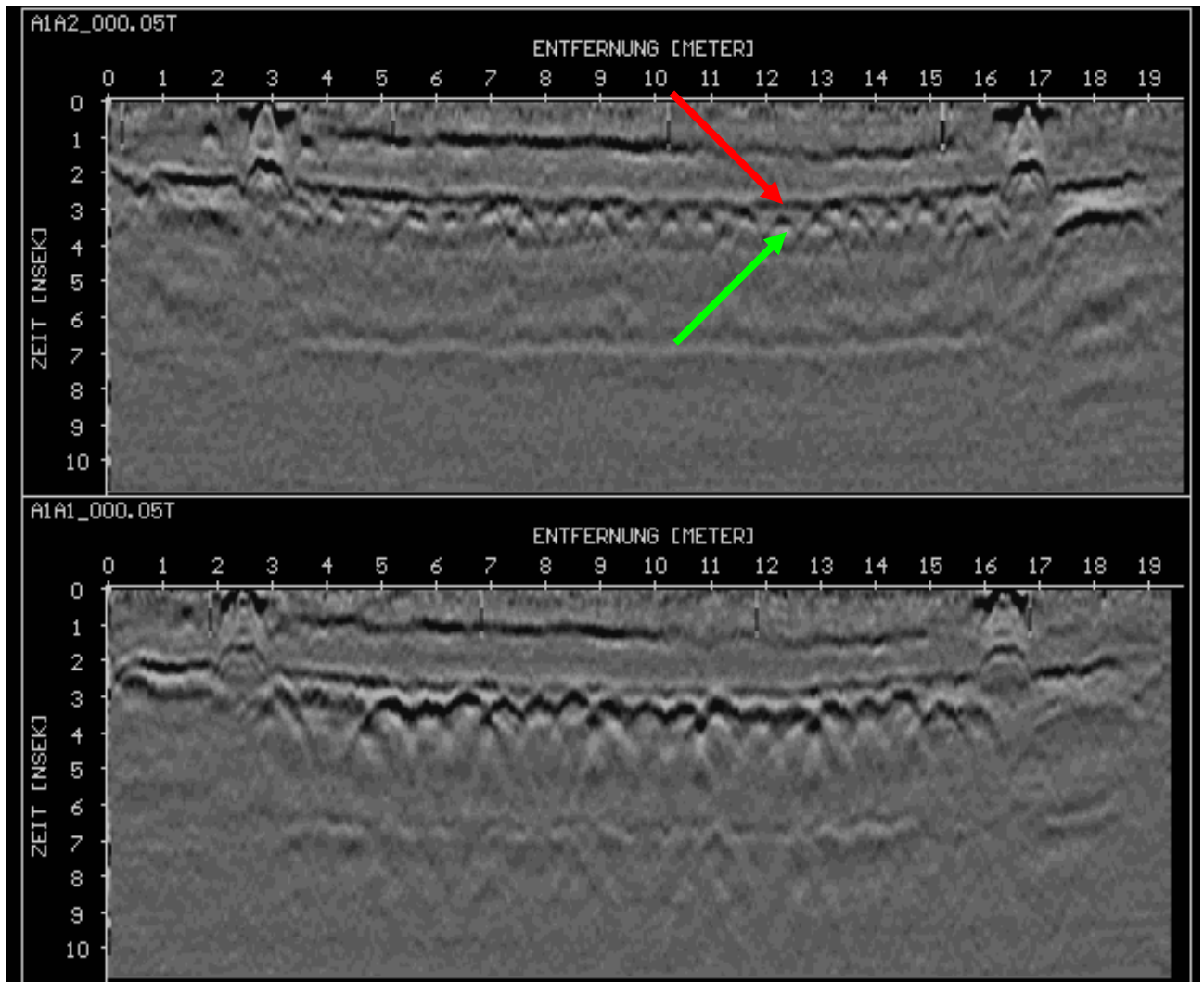


Abbildung 5.3.3: Problematik Reflexionsstärke Bewehrung, Brücke EMPA/EAWAG, oben: Antennen quer montiert, unten: Antennen längs montier, roter Pfeil=Reflexion am Übergang Asphalt-Beton, grüner Pfeil=Reflexion an oberster Bewehrungslage

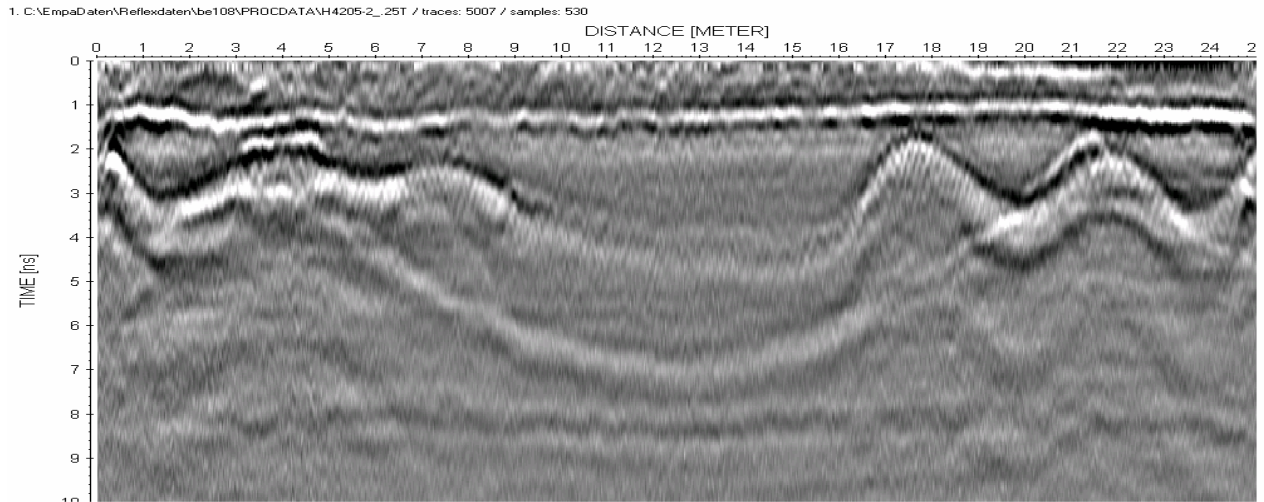
Radarergebnisse für die Eisenüberdeckung weisen auf den meisten Brücken kleinere Lücken auf. Dies ist auf mehrere Ursachen zurückzuführen:

- Fahrbahnübergänge und deren Umgebung
- Geringe Eisenüberdeckung
- Keine Belagsdicke bestimmbar
- Mangelnde Zusatzinformation
- komplexe Verhältnisse
- Elementfugen

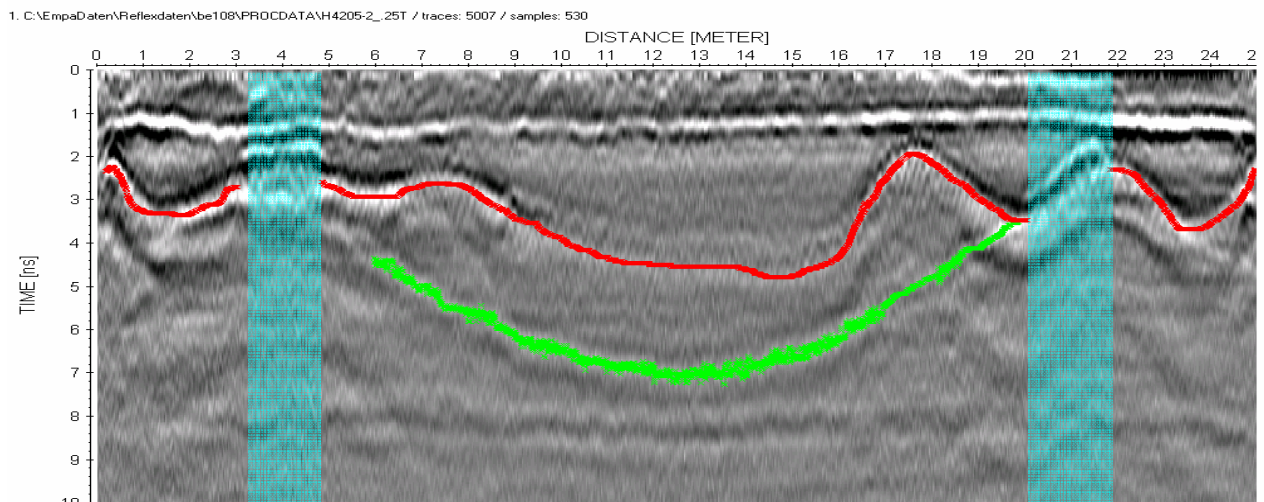
Für den Bereich von Fahrbahnübergängen und deren Umgebung sowie bei geringer Eisenüberdeckung gelten sinngemäss die bereits im Abschnitt über die Belagsdicke gemachten Bemerkungen. Zusätzlich kann natürlich nur dann eine Eisenüberdeckung festgelegt werden, wenn auch die Tiefe des Überganges Asphalt-Beton bekannt ist.

Die Problematik von mangelnder Zusatzinformation bzw. komplexen Verhältnissen soll an einem Beispiel erläutert werden. Auf der Überführung Wyssenried befand sich unmittelbar neben der Radar-Messlinie ein Vorspannkabel, dessen Reflexion sich deutlich im Datensatz

zeigt. Die *Abbildung 5.3.4* zeigt den entsprechenden Datensatz, in der *Abbildung 5.3.5* sind die Reflexionen an der obersten Bewehrungslage rot und die am Spannkabel mit grün gekennzeichnet. Im Bereich der Hochpunkte des Spannkabels überlagern sich die beiden Reflexionen und die Tiefe der Bewehrung kann nicht mehr mit ausreichender Zuverlässigkeit bestimmt werden (blauer Bereich in *Abbildung 5.3.5*).



*Abbildung 5.3.4: Datensatz von der Überführung Wyssenried*



*Abbildung 5.3.5: Datensatz von der Überführung Wyssenried mit eingezeichneten Reflexionen, rot=oberste Bewehrungslage, grün=benachbartes Vorspannkabel, blau=Bereiche in denen keine Eisenüberdeckung bestimmt werden konnte*

## Elementfugen

Auf der Überführung Burggasse lagen alle Messlinien auf oder in unmittelbarer Umgebung von Elementfugen (*Abbildung 5.3.6* und *Abbildung 5.3.7*). Die Datensätze (*Abbildung 5.3.8* und *Abbildung 5.3.9*) weisen eine schwache und von diversen Störungen überlagerte Reflexion an der obersten Bewehrungslage auf. Mit hoher Wahrscheinlichkeit ist dies auf die zusätzliche Komplexität im Bereich der Fuge zurückzuführen. Sofern möglich, sollten deshalb Messlinien nicht direkt auf oder in die unmittelbare Umgebung von Elementfugen gelegt werden.

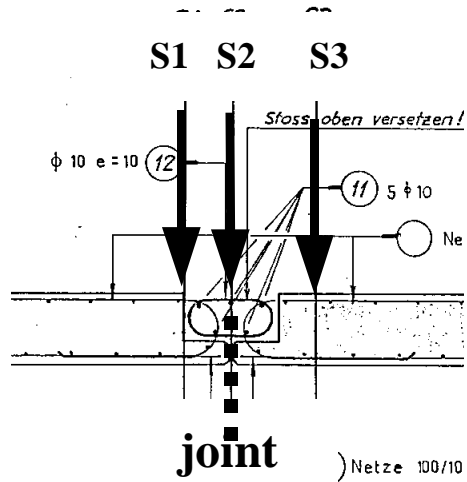
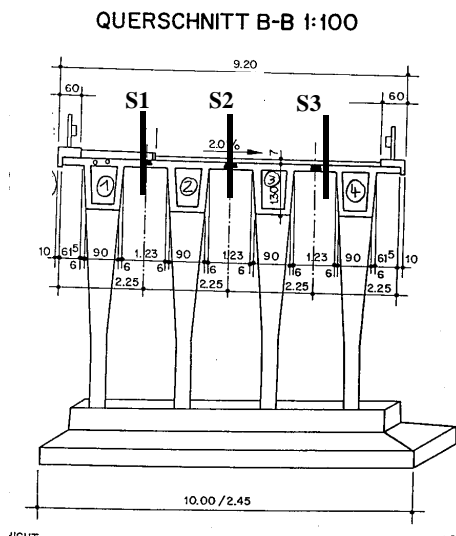


Abbildung 5.3.6: Überführung Burggasse, Schnittpositionen S1, S2, S3

Abbildung 5.3.7: Überführung Burggasse, Schnittpositionen im Detail

1. C:\EmpaDaten\Reflexdaten\altendorf\PROCADATA\BU1\_06T / traces: 1059 / samples: 540

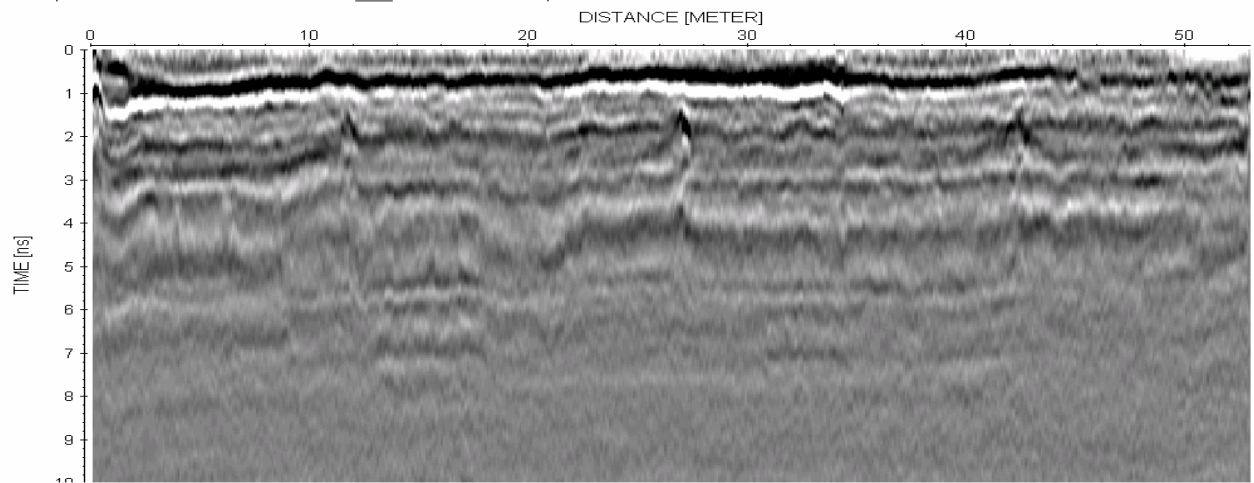


Abbildung 5.3.8: Datensatz von der Überführung Burggasse

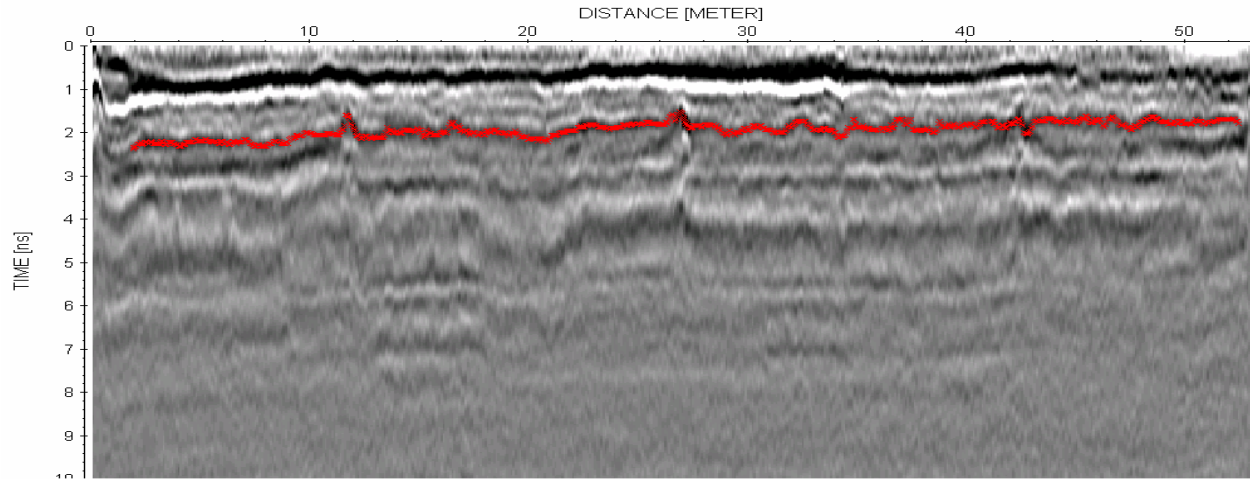


Abbildung 5.3.9: Datensatz von der Überführung Burggasse mit rot eingezeichneter Reflexion an der obersten Bewehrungslage

Die nachfolgende Tabelle (Tabelle 5.3-1) gibt einen Überblick über den Anteil der Brückenlänge, über die auf den einzelnen Objekten eine Eisenüberdeckung bestimmt werden konnte. Fahrbahnübergänge, Dohlendeckel und Ähnliches wurden bei der Berechnung nicht gesondert behandelt. Erwartungsgemäss unterscheiden sich die Ergebnisse auf den einzelnen Brücken, jedoch konnte überall auf dem mit Abstand grössten Teil der Brückenlängen die Eisenüberdeckung bestimmt werden.

Tabelle 5.3-1: Anteil an der Gesamtlänge auf der Eisenüberdeckung bestimmt werden konnte

Radar-Messlinie	Prozent der Länge, auf der Eisenüberdeckung bestimmt werden konnte
Überführung Burggasse - 1	75%
Überführung Burggasse - 2	75%
Sihlhochstrasse - 1	94%
Sihlhochstrasse - 2	90%
Sihlhochstrasse - 3	91%
Sihlhochstrasse - 4	86%
Viadotto sopra le Cantine - 1	86%
Viadotto sopra le Cantine - 2	87%
Überführung Wyssenried – 1	76%
Überführung Wyssenried - 2	74%
Überführung Wyssenried – 3	63%
Überführung Wyssenried – 4	84%
Überführung Wyssenried – 5	81%
Überführung Wyssenried – 6	79%
Überführung Wyssenried – 7	72%
Überführung Wyssenried – 8	56%
Überführung Wyssenried – 9	93%
Spezialfall Brücke ohne Belag:	
Aabachbrücke Uster-A	46%

Aabachbrücke Uster-B	60%
Mittelwert <sup>1</sup>	77%

<sup>1</sup> in die Berechnung des Mittelwertes flossen alle Messlinien unabhängig von ihrer Länge mit gleicher Gewichtung ein

## Genauigkeit

Die *Tabelle 5.3-2* gibt einen Überblick über die mittleren und maximalen Fehler, für die vier Brücken, auf denen die Belagsdicke manuell ausgemessen und verglichen werden konnte. Die Spalten 2 und 3 entstanden unter Verwendung der ursprünglichen, mit Hilfe einiger weniger Sondierungen bestimmten Ausbreitungsgeschwindigkeit. Die Spalten 4 und 5 ergeben sich mit einer berechneten optimalen Ausbreitungsgeschwindigkeit. Diese wurde nachträglich so berechnet, dass der mittlere Fehler minimal wird.

*Tabelle 5.3-2: mittlere und maximale Fehler für Eisenüberdeckung*

Spalte 1	Spalte 2	Spalte 3	Spalte 4	Spalte 5
	Mittl. Fehler (mm)	Max. Fehler (mm)	Mittl. Fehler, $V_{opt}$ (mm)	Max. Fehler, $V_{opt}$ (mm)
Überführung Burggasse-1	5	19	5	18
Überführung Burggasse-2	5	14	5	13
Sihlhochstrasse - 1			4	14
Sihlhochstrasse - 2			3	9
Sihlhochstrasse - 3			4	14
Sihlhochstrasse - 4			4	12
Viadotto sopra le Cantine - 2	13	47	8	32
Überführung Wyssenried - 1	12	41	11	35
Überführung Wyssenried - 2	17	33	7	20
Mittelwert <sup>1</sup>	10		6	

<sup>1</sup> in die Berechnung des Mittelwertes flossen alle Messlinien unabhängig von ihrer Länge mit gleicher Gewichtung ein

Was bedeuten nun diese Werte für die praktische Anwendung des Verfahrens? Darauf soll am Beispiel der Überführung Wyssenried näher eingegangen werden. Die *Abbildung 5.3.10* zeigt den Vergleich zwischen dem Radarergebnis (blaue Linie), der Realität (rote Linie) und dem Radarergebnis mit der berechneten optimalen Geschwindigkeit (grüne Linie). Zusätzlich sind die absoluten Differenzen zwischen Radarergebnis und Realität mit Punkten gekennzeichnet. Der mittlere Fehler der ursprünglichen Radarauswertung beträgt 12mm, der maximale 41mm. Zwar sind diese Fehler erheblich, dennoch gibt das Radarergebnis den Verlauf der Eisenüberdeckung über die Brückenlänge im generellen Sinne richtig wieder. Das Verfahren ist somit zwar nicht für die millimetergenaue Bestimmung der Eisenüberdeckung in einzelnen Punkten geeignet, sehr wohl jedoch für die Abbildung des Verlaufs der Überdeckung über grössere Bereiche.



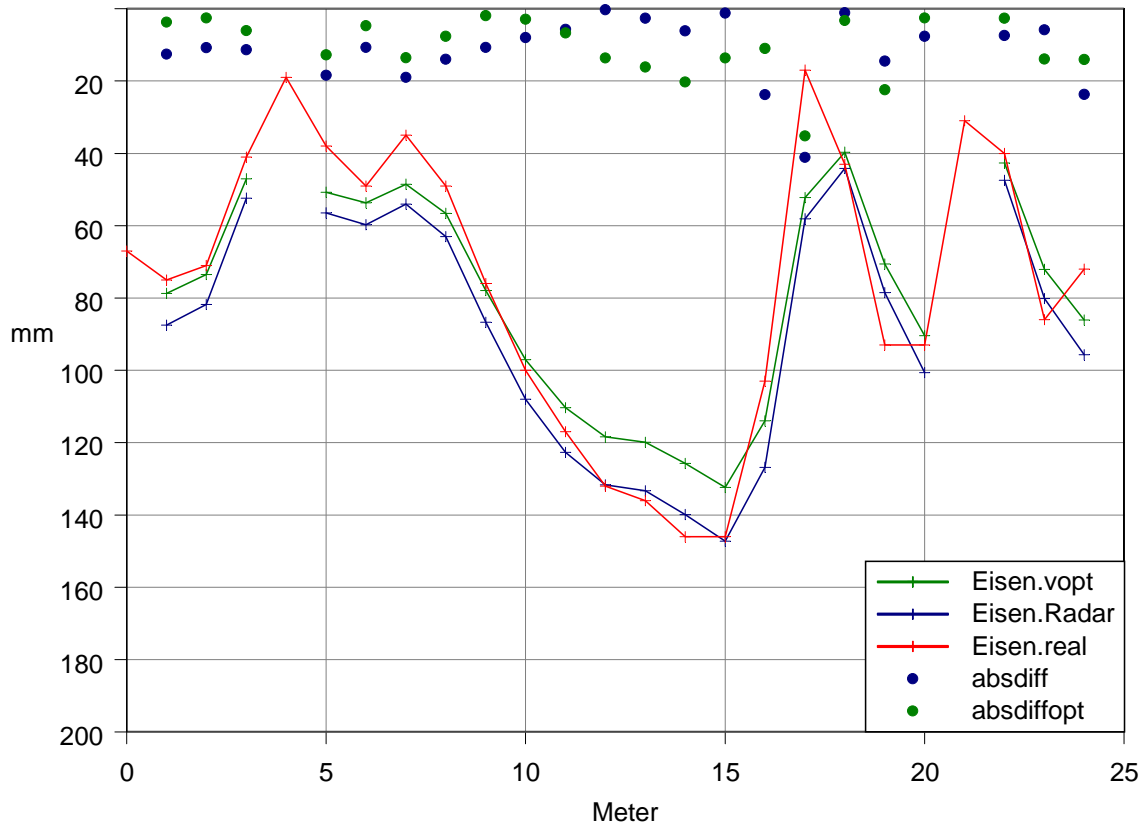


Abbildung 5.3.10: Vergleich zwischen Radarergebnis und Realität auf der Überführung Wyssenried

### Ausbreitungsgeschwindigkeiten

Bei allen hier dokumentierten Untersuchungen wurden die Ausbreitungsgeschwindigkeiten auf einzelnen Radar-Messlinien jeweils als konstant betrachtet. Dies ist eine Vereinfachung, da in der Praxis durchaus Variationen möglich sind. Andererseits wurden die Radar-Messlinien so gelegt, dass sie parallel zur Brückenachse liegen und damit auch zumindest weitgehend im gleichen Bereich des Brückenquerschnitts.

Die *Tabelle 5.3-3* stellt die berechneten optimalen Ausbreitungsgeschwindigkeiten für einzelne Messlinien dar. Sie variieren zwischen  $0.61 \cdot 10^8$  m/s und  $1.04 \cdot 10^8$  m/s. Dies bestätigt die bisherigen Erfahrungen der EMPA, welche allerdings pro Objekt auf einige wenige Vergleiche beschränkt waren.

Tabelle 5.3-3: optimale Ausbreitungsgeschwindigkeiten im Beton

Messlinie	V <sub>opt</sub>
Überführung Burggasse-1 (Chur)	1.04 * 10 <sup>8</sup> m/s
Überführung Burggasse-2 (Mitte)	0.98 * 10 <sup>8</sup> m/s
Sihlhochstrasse - 1	0.93 * 10 <sup>8</sup> m/s
Sihlhochstrasse - 2	0.93 * 10 <sup>8</sup> m/s
Sihlhochstrasse - 3	0.93 * 10 <sup>8</sup> m/s
Sihlhochstrasse - 4	0.93 * 10 <sup>8</sup> m/s
Viadotto sopra le Cantine - 2	0.61 * 10 <sup>8</sup> m/s
Überführung Wyssenried – 1	0.74 * 10 <sup>8</sup> m/s
Überführung Wyssenried - 2	0.58 * 10 <sup>8</sup> m/s

## Sondierungen

Die grössten mittleren Fehler ergeben sich auf den Linien Überführung Wyssenried-2 und Viadotto sopra le Cantine-2 mit 17mm bzw. 13mm und in beiden Fällen lässt sich das Radarergebnis durch Verwendung der optimalen Geschwindigkeit erheblich verbessern, im Falle von Wyssenried-2 um 10mm auf 7mm und bei Viadotto sopra le Cantine-2 um 5mm auf 8mm.

Die Überführung Wyssenried hat eine Länge von lediglich 25m und zur Auswertung stand ein Sondierfenster, allerdings auf einer anderen Messlinie, zur Verfügung. Zusätzliche Sondierungen kommen auf einem Objekt dieser Grösse kaum in Frage, so dass hier kaum Potential zur Verbesserung besteht.

Auf dem Viadotto sopra le Cantine wurden 3 Belagsbohrungen vorgenommen und in den Bohrlöchern anschliessend mit einem Meisel die oberste Bewehrungslage freigelegt. Dadurch wurde pro Sondierstelle jeweils ein Eisen freigelegt. Dies erwies sich als nicht ausreichend, da auf dem Viadotto sopra le Cantine die Eisenüberdeckung auf kleinstem Raum relevante Schwankungen aufweist. Wenn, wie im vorliegenden Fall, die Eisenüberdeckung innerhalb eines Meters um mehr als 50 mm schwankt, reicht ein durch die Bohrung aufgedecktes Armierungseisen nicht aus und es sollte mittels Sondierfenstern ein grösserer Bereich betrachtet werden.

## Empfehlungen

- Die Sondierungen sollten möglichst mit Sondierfenstern und nicht mit Bohrungen vorgenommen werden
- Die Sondierungen sollten möglichst nach Sichtung der Radardaten vorgenommen werden
- Sofern möglich, sollten die Messlinien nicht direkt auf Elementfugen gelegt werden
- Ideal wären Messungen mit 2 Antennenausrichtungen

## **5.4 Tiefe weiterer Bewehrungslagen**

Mit der mobilen Georadar-Anlage konnten auf keiner der fünf untersuchten Brücken brauchbare Resultate für tiefere Bewehrungslagen erzielt werden. Dies bedeutet jedoch nicht, dass dies mit dem Georadar-Verfahren prinzipiell unmöglich wäre, da in anderen Fällen sehr gute Ergebnisse erzielt wurden (siehe Abschnitt 3-D Untersuchungen). Im vorliegenden Fall treffen lediglich zu viele ungünstige Parameter aufeinander, teilweise können diese durchaus vermieden werden. Sind tiefere Bewehrungslagen von Interesse, so könnten diese beispielsweise durch eine Handmessung von der Brückenunterseite aus untersucht werden. Die Machbarkeit einer solchen Untersuchung sollte für jeden Einzelfall, zum Beispiel durch einen Vorversuch, abgeklärt werden.

## **5.5 Betonschäden**

Schäden wie Abplatzungen des Betons durch Korrosion der Bewehrung oder Risse konnten an den untersuchten Schnittflächen der Brücken nicht beobachtet werden. Somit konnten diese Fragestellungen im Rahmen dieses Projektes auch nicht bearbeitet werden.

## **5.6 Chloridgehalt**

Die EMPA führte im Jahre 2004 im Auftrag des Tiefbauamtes des Kantons Bern eine Radaruntersuchung auf dem Felsenauviadukt (A1) durch, bei der die Bestimmung von Zonen mit erhöhten Chloridgehalten im Vordergrund stand. Zusätzlich wurden Belagsdicke und Eisenüberdeckung der obersten Bewehrungslage bestimmt.

Die Messungen wurden während zwei Nächten mit der mobilen Georadar-Anlage durchgeführt. Dabei wurden pro Fahrtrichtung 11 Messlinien abgefahren. Diese standen während der Messung auf dem GPS-Controller zur Positionskontrolle zur Verfügung.

Um Verdachtsflächen für Unterläufigkeiten bzw. erhöhte Chloridwerte im Beton zu erhalten, wurde in 2 Schritten vorgegangen:

- Überprüfung der Reflexionsamplituden am Übergang Asphalt-Beton, an der obersten Bewehrungslage und des Quotienten dieser beiden Grössen
- Visuelle Kontrolle anhand der Radardaten

Der Schritt 2 ist vor allem deshalb wesentlich, weil auffallende Reflexionsamplituden viele Gründe haben können. Die Reflexionsstärke an der obersten Bewehrungslage hängt unter anderem von der Eisenüberdeckung, dem Durchmesser der einzelnen Eisen, der Antennenhöhe sowie den Eigenschaften des Asphaltbelages ab. Neben diesen Einflüssen ist eine erhöhte Dämpfung des Radarsignals im Beton durch Chloride und eine verstärkte Reflexion am Übergang Asphalt-Beton durch chloridhaltige Feuchtigkeit zu erwarten.

Die Identifizierung von Verdachtsflächen soll im Folgenden anhand einer vorgeschlagenen Sondierposition erläutert werden. Die *Abbildung 5.6.1* und *Abbildung 5.6.2* zeigen Auffälligkeiten (rote Pfeile) in den Reflexionsamplituden vom Übergang Asphalt-Beton und an der obersten Bewehrungslage. Besonders deutlich wird dies bei der Betrachtung des Quotienten dieser beiden Grössen (*Abbildung 5.6.3*). In den Radardaten (*Abbildung 5.6.4*) ist erkennbar, dass das an der obersten Bewehrungslage reflektierte Radarsignal bei der

vorgeschlagenen Sondierung (roter Pfeil) im Vergleich zur Umgebung (grüner Pfeil) deutlich abgeschwächt ist.

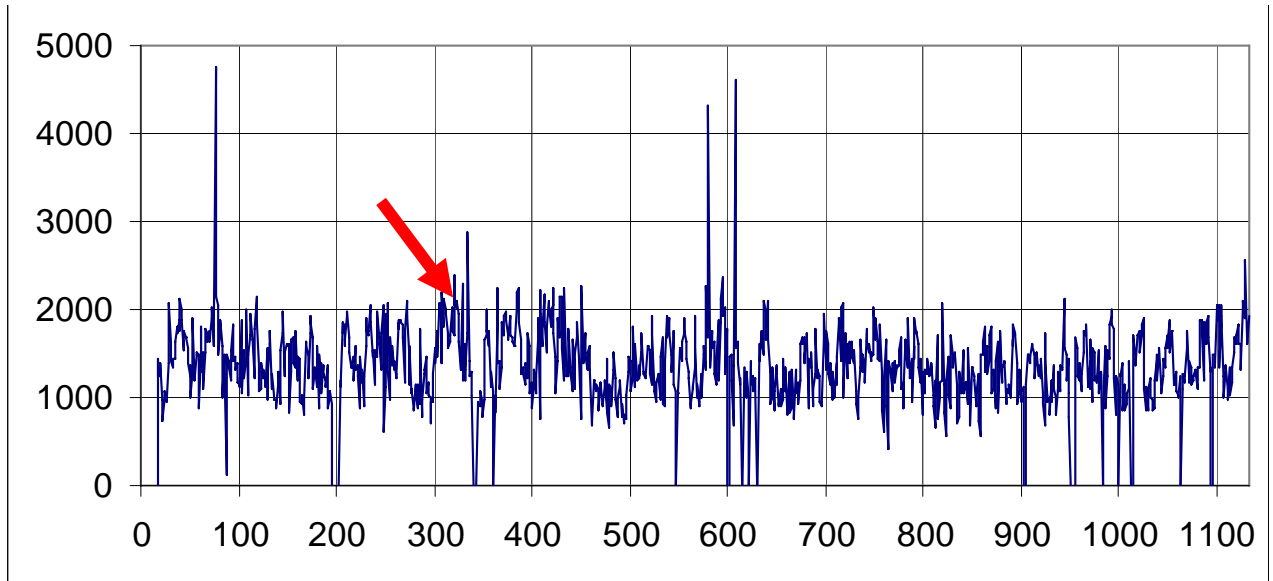


Abbildung 5.6.1: Reflexionsamplitude am Übergang Asphalt-Beton, Felsenauviadukt

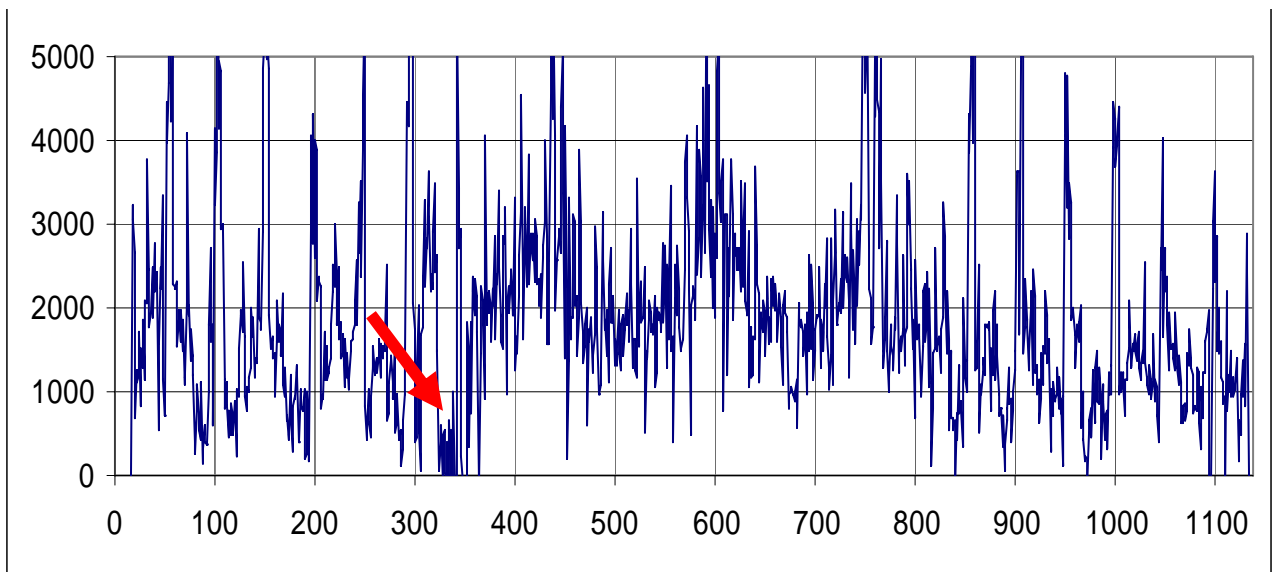


Abbildung 5.6.2:: Reflexionsamplitude an der obersten Bewehrungslage, Felsenauviadukt

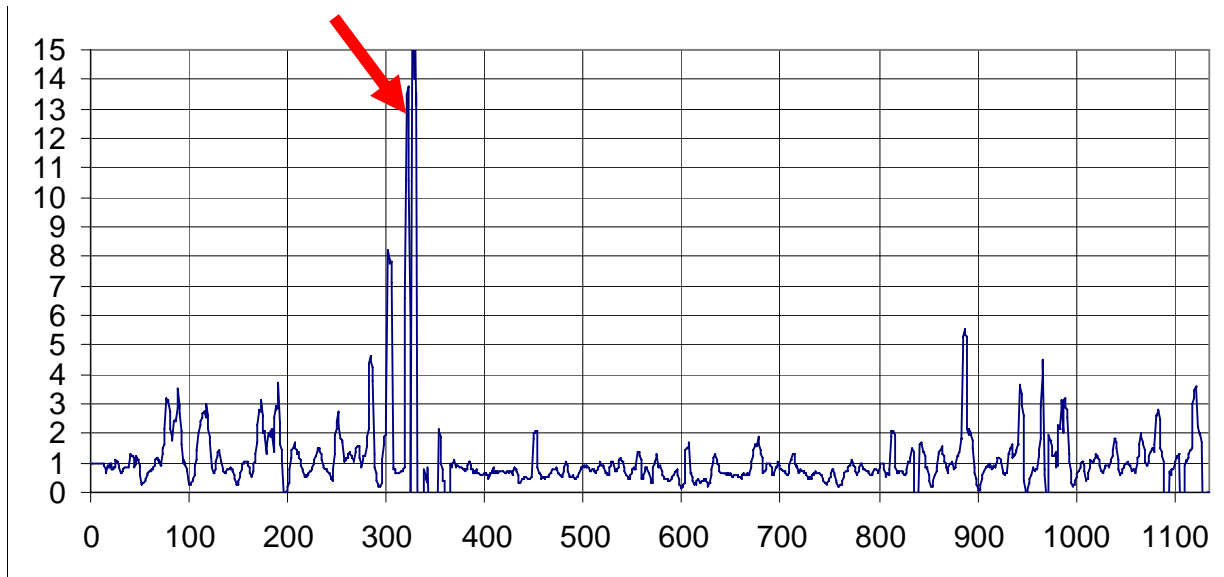


Abbildung 5.6.3: Quotient aus Reflexionsamplituden, Felsenauviadukt

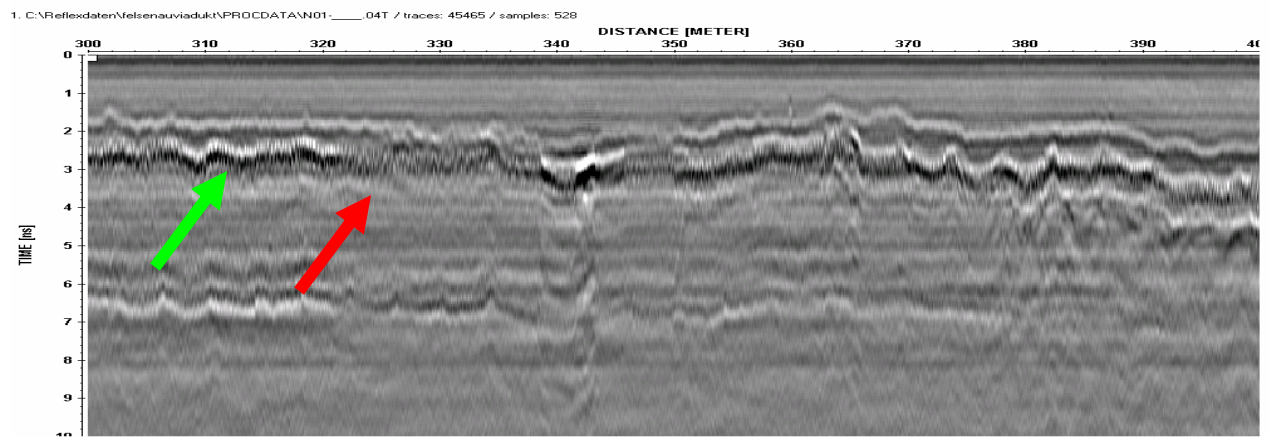


Abbildung 5.6.4: Ausschnitt aus dem Datensatz, Länge 100m, Felsenauviadukt

Insgesamt wurden 5 Sondierpositionen vorgeschlagen. Ein Vergleich der ermittelten Chloridgehalte (angegeben ist jeweils der maximale Wert) mit den Quotienten aus der Reflexionsstärke am Übergang Asphalt-Beton und der obersten Bewehrungslage ergab das in den *Abbildungen 5.5.6 bis 5.5.9* dargestellte Ergebnis. Die Sondierpositionen sind in diesen Darstellungen jeweils mit roten (Chloridgehalt 0.183% bzw. 0.158%) und grünen (Chloridgehalt 0.054% bzw. 0.051%) Balken gekennzeichnet.

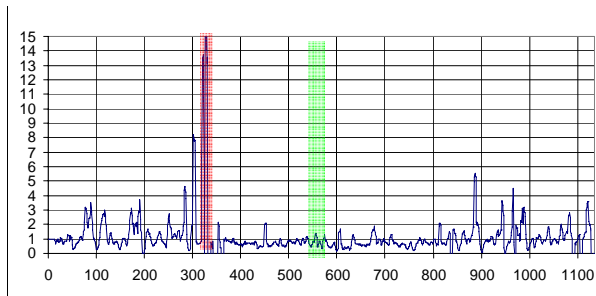


Abbildung 5.6.5: Sondierung 17: Chloridgehalt (Massen-% bzgl. Beton) maximal 0.183

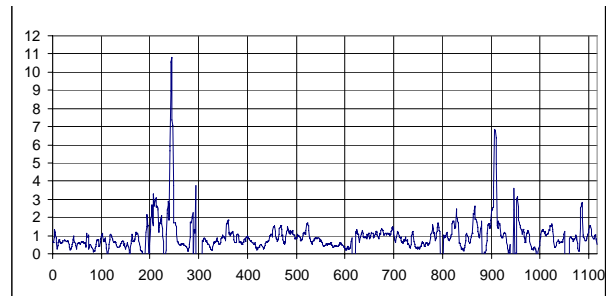


Abbildung 5.6.6: Sondierung 18: Chloridgehalt (Massen-% bzgl. Beton) maximal 0.054

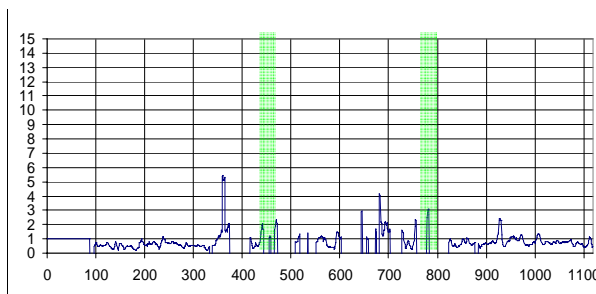


Abbildung 5.6.7: Sondierung 21: Chloridgehalt (Massen-% bzgl. Beton) maximal 0.051

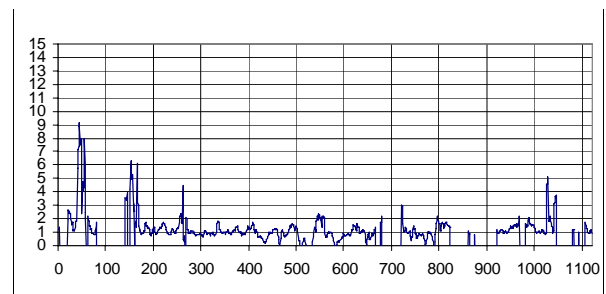


Abbildung 5.6.8: Sondierung 20: Chloridgehalt (Massen-% bzgl. Beton) maximal 0.051

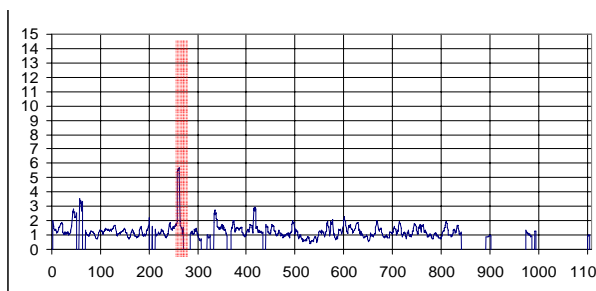


Abbildung 5.6.9: Sondierung 19: Chloridgehalt (Massen-% bzgl. Beton) maximal 0.158

Somit lagen alle ermittelten Chloridgehalte unterhalb der geltenden Grenzwerte. Die beiden Sondierungen mit den höchsten Chloridgehalten (Sondierungen 17 und 19) weisen auch den höchsten Quotienten der beiden Reflexionsstärken auf. Somit scheint die Annahme bestätigt, dass erhöhte Chloridgehalte eine Verstärkung der Reflexion am Übergang Asphalt-Beton und eine Abschwächung der Reflexion an der obersten Bewehrungslage bewirken. Am deutlichsten zeigt sich dies in der Betrachtung des Quotienten dieser beiden Grössen.

Um eine Karte des Viaduktes mit Zonen erhöhter Chloridbelastung generieren zu können, wurden zunächst alle Zonen mit einem Quotienten grösser als 4 bestimmt und anschliessend anhand der Radardaten einer visuellen Kontrolle unterzogen. Der Wert von 4 wurde so gewählt, dass er die Sondierungen 17 und 19 mit erhöhtem Chloridgehalt von den anderen Sondierungen trennt. Somit ist der Wert 4 zwar eine plausible, andererseits aber auch weitgehend willkürliche Grenze. Sollten in Zukunft weitergehende Informationen zur Verfügung stehen, wäre eine Überprüfung dieses Wertes bzw. des hier eingeschlagenen Weges sinnvoll.

Die *Abbildung 5.6.10* zeigt einen Plan des Viaduktes im Massstab 1:3000. Darin eingezeichnet sind Zonen, in denen die Radardaten gemäss oben beschriebener Vorgehensweise auf erhöhte Chloridgehalte hinweisen. Diese Zonen konzentrieren sich eher auf die seitlichen Randbereiche und fehlen weitgehend im mittleren Teil des Bauwerkes in Längsrichtung betrachtet. Darüber hinaus ergeben die Radardaten keine Hinweise auf Bereiche mit Chloridgehalten jenseits oder nahe den geltenden Grenzwerten. Somit sind wahrscheinlich auch keine derartigen Zonen vorhanden, mit Sicherheit kann dies allerdings nicht festgestellt werden.

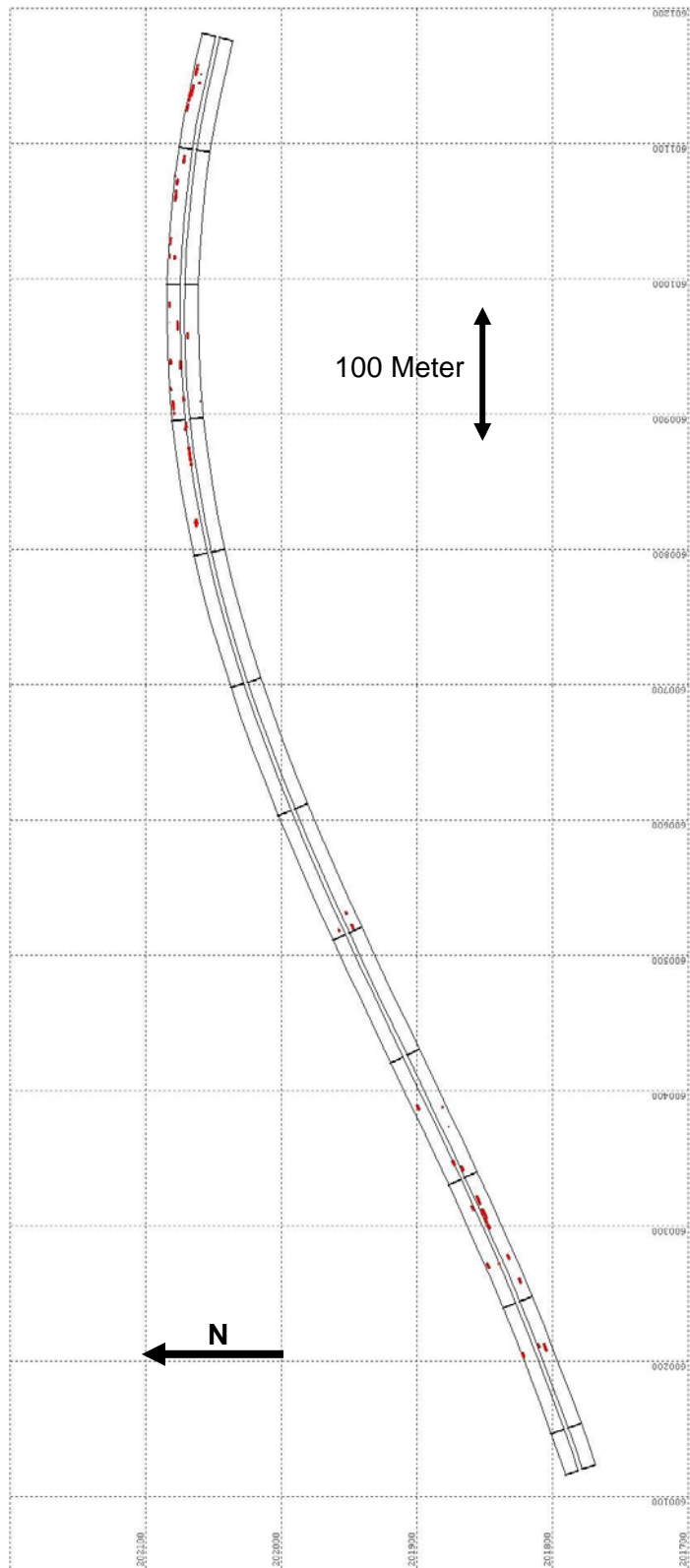


Abbildung 5.6.10: Plan des Felsenauviaduktes, Zonen mit Hinweisen auf erhöhte Chloridbelastung sind rot markiert, Darstellung nicht massstabsgetreu



## 5.7 Ortung von Spannkabeln

Die Kenntnis der Positionen von Vorspannkabeln auf Brücken ist vor allem dann relevant, wenn Arbeiten durchgeführt werden, bei denen diese Kabel oder deren Hülle beschädigt oder zerstört werden könnten.

In den Jahren 2001 und 2002 führte die EMPA im Auftrag des Tiefbauamtes des Kantons Zürich auf der Sihlhochstrasse (A3/ Zürich) umfangreiche Arbeiten zur Ortung von Spannkabeln durch. Zusätzlich erhielt die EMPA den Auftrag, die durchgeführten Arbeiten, die Resultate und die Kosten zu dokumentieren. Die folgenden Ausführungen basieren im Wesentlichen auf der im Rahmen dieser Arbeiten erstellten Dokumentation.

Die Lokalisierung von Spannkabeln wurde auf der Brückenplatte, unterhalb der Brückenplatte sowie in den Hohlkästen erfolgreich durchgeführt. Die Resultate waren an allen drei Orten von ähnlicher Qualität. Grosse Unterschiede ergaben sich beim Zeitaufwand; darauf wird unten noch näher eingegangen.

Bei allen Ortungsarbeiten wurden die Messungen direkt vor Ort ausgewertet und die Kabelpositionen mit Kreide auf der Betonoberfläche aufgezeichnet.

### Brückenplatte

Bei der ersten Version des Messaufbaus wurde die Antenne in einem Messschlitten montiert und hinter einem Wägelchen hergezogen, auf dem sich die restliche Apparatur befand. Mit Hilfe eines ebenfalls am Wagen befestigten Messrads wurde eine festgelegte Anzahl von Messungen pro Meter durchgeführt.

Die Kabelpositionen wurden jeweils direkt vor Ort aus den Radardaten ermittelt und auf der Brückenplatte markiert. In den meisten Fällen wurden die Positionen anhand einer Messlinie ermittelt. Lediglich in Bereichen wo die Positionsbestimmung auf Schwierigkeiten stiess (siehe unten) wurden parallel versetzt weitere Messlinien ausgemessen.

Auf der Brückenplatte war der Ablauf der Messungen naturgemäss einfacher zu gestalten als auf der Brückenunterseite oder in den Hohlkästen. Wesentliche Probleme traten nicht auf. In der *Tabelle 5.7-1* findet sich eine Zusammenstellung kleinerer Hindernisse, die den Erfolg der Untersuchung allerdings nie in Frage stellten.

*Tabelle 5.7-1: kleinere Hindernisse bei der Messung auf der Brückenplatte*

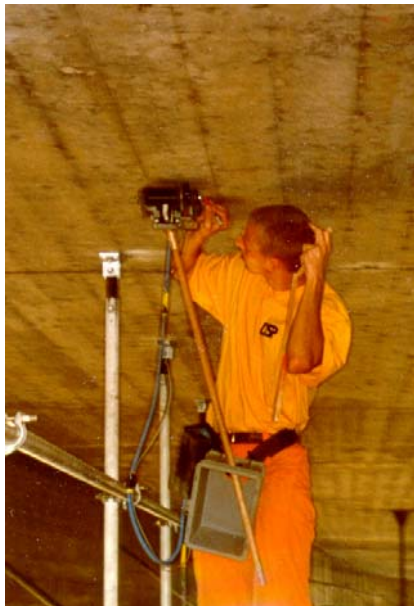
<b>Beschreibung</b>	<b>Bemerkungen</b>
Wartezeiten während Reinigung der Fahrbahnplatte	
Erschwerte Fortbewegung der Messapparatur auf bereits aufgerauhtem Beton	dieses Problem trat nur während der ersten Messtage auf und konnte anschliessend vermieden werden
Auf den vorgesehenen Messlinien stehendes Material	Die anschliessende Rückübertragung der Kabelpositionen auf die ursprüngliche Messlinie könnte den Fehler der Positionsbestimmung vergrössern.

## Hohlkästen

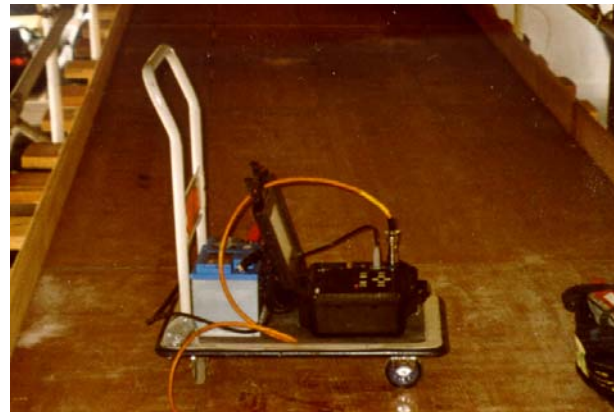
In den Hohlkästen wurden nur wenige Messungen durchgeführt. Die hauptsächlichen Schwierigkeiten bestanden darin die Radarausrüstung in den Hohlkästen zu bringen und darin, dass der Hohlkasten lediglich 1.5m hoch war und die Arbeiten dadurch erheblich erschwert waren.

## Brückenunterseite

Für die Untersuchung der Brückenunterseite wurde ein Messhelfer eingesetzt. Dieser führte die Antenne an einem Stab über Kopf (*Abbildung 5.7.1*) und zeichnete nach Zuruf durch den Radarspezialisten die Kabelpositionen ein. Das Messrad war in diesem Falle direkt an der Antenne befestigt. Der Rest des Materials befand sich auf einem Wägelchen (*Abbildung 1.1.1*) und war mit der Antenne durch ein Kabel von 7.5 m Länge verbunden.



*Abbildung 5.7.1: Messung  
Brückenunterseite, Sihlhochstrasse*



*Abbildung 5.7.2: Wägelchen mit Radargerät,  
Sihlhochstrasse*

Da zum Zeitpunkt der Messungen keine grösseren anderen Arbeiten unterhalb der Brücke durchgeführt wurden, konnten die Messungen ohne Hindernisse durchgeführt werden.

Im Gegensatz zu den Untersuchungen auf der Brückenplatte wurden jeweils zwei parallele Messlinien ausgemessen. Auf beiden Linien aufgefundene Kabelpositionen wurden als "sicher" eingezeichnet, einfach aufgefundene als "wahrscheinlich".

## Mobile Messung

Ein bereits im September 1998 mit der mobilen Georadar-Anlage zur Bestimmung der Belagsdicke aufgezeichneter Datensatz wurde nachträglich einer zusätzlichen Datenbearbeitung unterzogen, um einen Vergleich mit den oben beschriebenen Messanordnungen zu ermöglichen. Nach dieser Bearbeitung zeigen sich zumindest im betrachteten Abschnitt die meisten Vorspannkabel deutlich ab (Abb. 3.8, rote massive

Pfeile). Einige Kabel sind eher undeutlich zu erkennen (Abbildung 5.7.3, gestrichelte Pfeile). Das Ergebnis ist ähnlich gut, wie das mit der manuellen Messung erzielte. Allerdings wird dies nur durch eine umfangreiche Datenverarbeitung erreicht. Ausserdem wurde zum Zeitpunkt dieser Untersuchung mit der mobilen Anlage die erforderliche Positionsgenauigkeit von 5-10 cm noch nicht erreicht. Heute sollte dies mit der GPS-unterstützten Anlage möglich sein, ein Feldversuch wurde allerdings noch nicht durchgeführt.

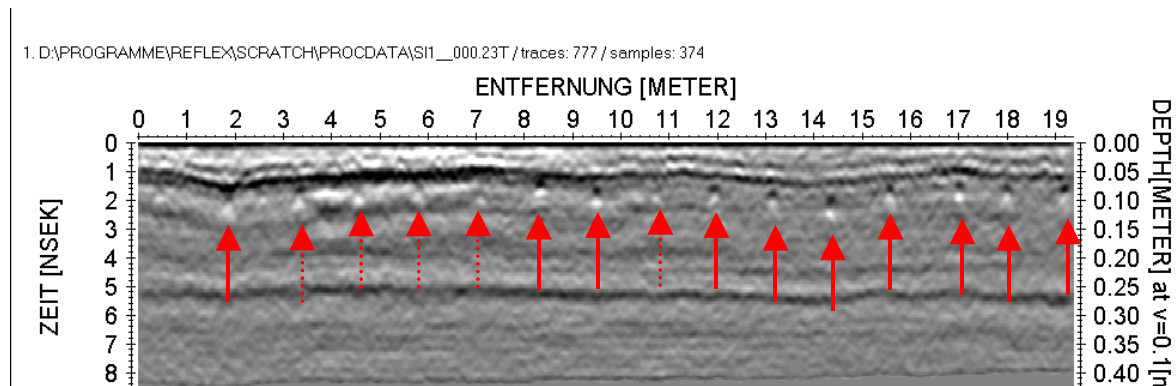


Abbildung 5.7.3: mit der mobilen Georadar-Anlage aufgezeichneter Datensatz (Ausschnitt), Sihlhochstrasse

## Anteil gefundener Kabel

Wie viele der in der Brücke vorhandenen Kabel tatsächlich mittels Georadar gefunden werden können, hängt im Wesentlichen von drei Einflussgruppen ab:

1. Eingesetzte Radarausrüstung und Kompetenz des Sachbearbeiters
2. Auftrag, Budget, zur Verfügung stehende Zeit, Situation auf der Baustelle, Aufgabenstellung
3. Bauwerk

### Zu 2)

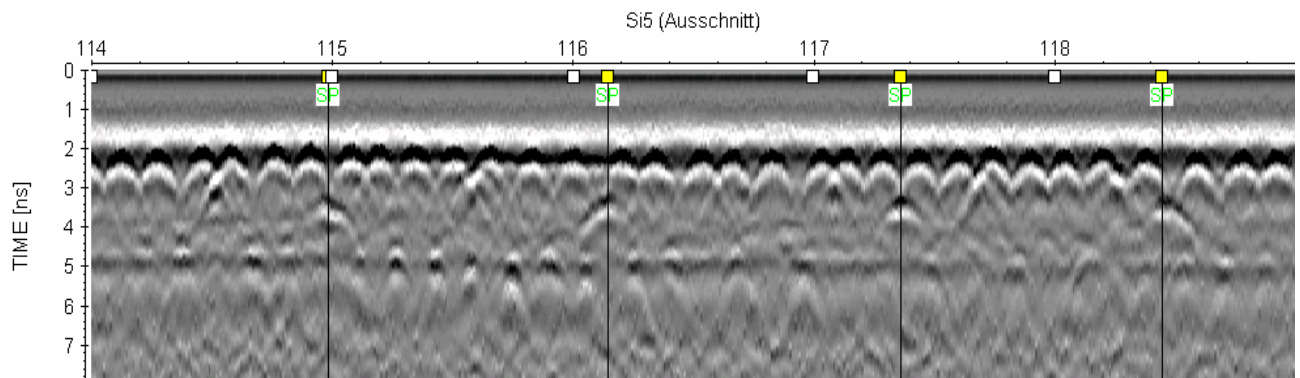
Die Anzahl auffindbarer Kabel hängt in sehr starkem Masse vom zur Verfügung stehenden Budget und von den zeitlichen Rahmenbedingungen ab. Da es sich bei der Sihlhochstrasse um ein Bauwerk von ca. 1.5km Länge handelt und von Anfang an feststand, dass die Spannkabel entlang mehrerer Messlinien über die gesamte Brückenlänge zu orten waren, wurde von vornherein nicht angestrebt, jedes einzelne Kabel aufzufinden, da dies nicht nur das Budget, sondern auch den zeitlichen Ablauf der Bauarbeiten sowie die Kapazitäten der EMPA im Bereich Georadar gesprengt hätte. Die hier dokumentierten Ergebnisse sind deshalb für Untersuchungen repräsentativ, deren Aufwand pro Längenmeter ähnlich ist wie beim Auftrag Sihlhochstrasse. Dieser Aufwand wird weiter unten quantifiziert.

Weiterhin ist die genaue Aufgabenstellung von Bedeutung. So macht es beispielsweise einen wesentlichen Unterschied, ob es darum geht möglichst viele Kabelposition einzuzichnen, oder ob nur Kabel eingezeichnet werden sollen, deren Position ohne jeden Zweifel feststeht.

### Zu 3)

Die folgende Beschreibung konzentriert sich auf Faktoren, welche die Ortung von Spannkabeln verhinderten oder erschwerten:

Die *Abbildung 5.7.4* zeigt zu Vergleichszwecken einen Ausschnitt, der auf der Brückenplatte aufgezeichnet wurde und der problemlos ausgewertet werden kann. Die vier in diesem Ausschnitt aufgefundenen Kabel liegen in regelmässigen Abständen und in ähnlicher Tiefe. Im Datenbeispiel sind die Kabelpositionen durch einen senkrechten Strich und mit "SP" bezeichnet. Die Ortung wird weder durch eng liegende Bewehrung noch durch Pfützen oder anderes behindert.



*Abbildung 5.7.4: Beispiel für einfache Auswertung, Sihlhochstrasse, SP=Vorspannkabel*

### **Pfützen und Zementschlämme auf der Brückenplatte**

Das Radar-Verfahren beruht auf der Aussendung eines elektromagnetischen Signals, welches in das Untersuchungsobjekt eindringt, an verschiedenen Strukturen reflektiert und über die Antenne wiederum aufgezeichnet wird. Befindet sich auf dem Untersuchungsobjekt eine Schicht mit hoher elektrischer Leitfähigkeit, so wird das Signal zum grossen Teil in Ströme umgewandelt. Darunterliegende Strukturen sind somit abgeschirmt und können nur noch in sehr eingeschränkter Masse untersucht werden. Zementschlämme und Pfützen mit Schmutzwasser stellen eine derartige Schicht mit hoher Leitfähigkeit dar. Dort war eine Ortung der Spannkabel nicht oder nur sehr eingeschränkt möglich. Während in den meisten Fällen eine Reinigung derartiger Abschnitte durch die Bauleitung veranlasst wurde, war dies in einigen Fällen aus zeitlichen oder personellen Gründen nicht möglich. In einigen Fällen handelte es sich auch nur um sehr kurze Abschnitte, so dass sich der Aufwand für eine Reinigung nicht gelohnt hätte.

Die *Abbildung 5.7.5* zeigt einen Ausschnitt von 5 Metern Länge mit einem Übergang von einem trockenen Abschnitt in eine Pfütze. Im trockenen Abschnitt können drei Spannkabel geortet werden (dünne, senkrechte Linien, "SP"). Im Bereich der Pfütze ist die Datenqualität deutlich verschlechtert. Spannkabel können unter derartigen Umständen nicht mehr aufgefunden werden.

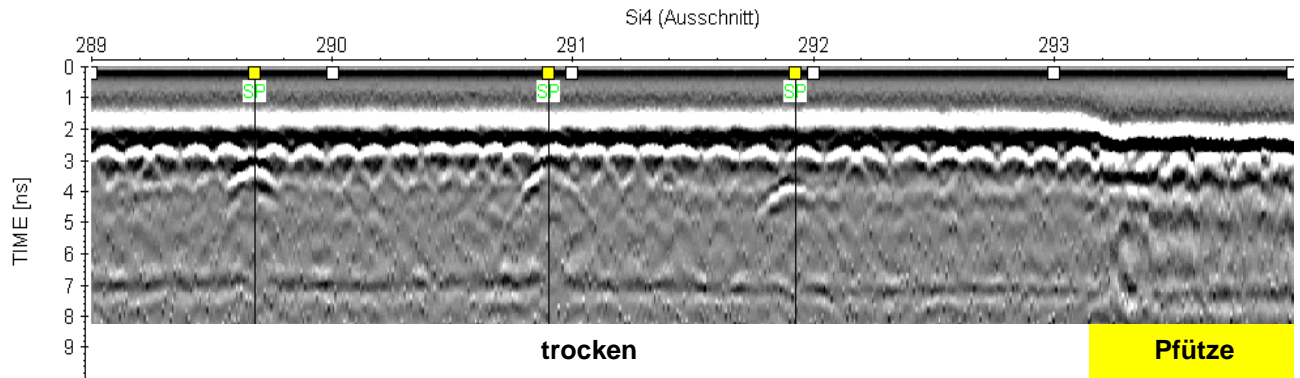


Abbildung 5.7.5: Datensatz mit Übergang von einem trockenem Bereich in eine Pfütze, Sihlhochstrasse, SP=Vorspannkabel

### Eng liegende Bewehrung

Die Maschenweite der Bewehrung liegt auf der Sihlhochstrasse meist um 15cm. Dies stellt für die Ortung der Vorspannkabel kein Problem dar. In einigen Bereichen ist der Abstand zwischen den einzelnen Armierungseisen jedoch deutlich geringer. Dort werden einerseits tiefer liegende Bereiche durch die erhöhte Leitfähigkeit abgeschirmt und andererseits überlagern sich die Reflexionen der Bewehrung mit denen der Spannkabel, was deren Ortung zusätzlich erschwert.

Die *Abbildung 5.7.6* zeigt einen Ausschnitt von 5 Metern Länge, welcher auf der Unterseite der Brückenplatte aufgezeichnet wurde. In diesem Bereich wurden vier Spannkabel geortet (dünne schwarze Linien). Ausserdem sind die von den einzelnen Armierungseisen verursachten Reflexionen fast überall deutlich erkennbar (rote Pfeile). In einem ca. 80 Zentimeter langen Bereich (roter Balken) ist der Abstand zwischen den Armierungseisen deutlich geringer als 15 Zentimeter. Hier lassen sich einzelne Armierungsstäbe nur noch schwerlich unterscheiden und ein mit grosser Wahrscheinlichkeit in diesem Bereich vorhandenes Spannkabel (Normalabstand zwischen einzelnen Kabeln um 60 Zentimeter) konnte nicht geortet werden.

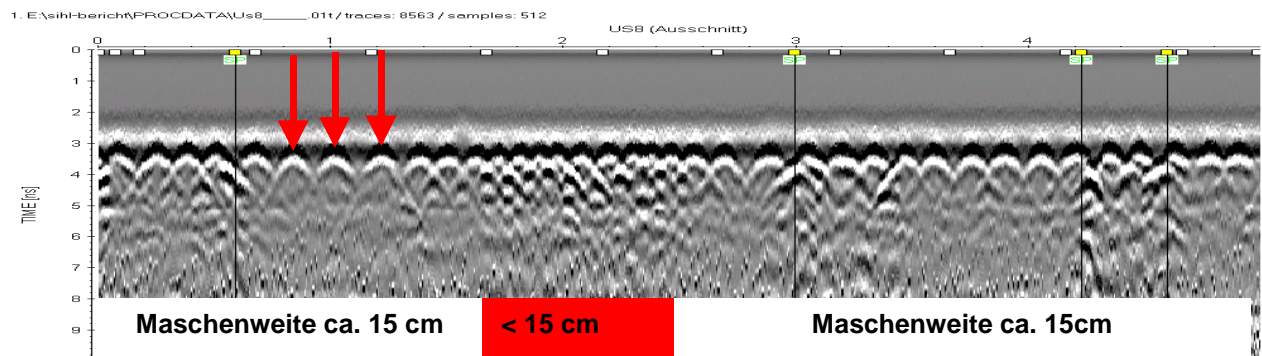


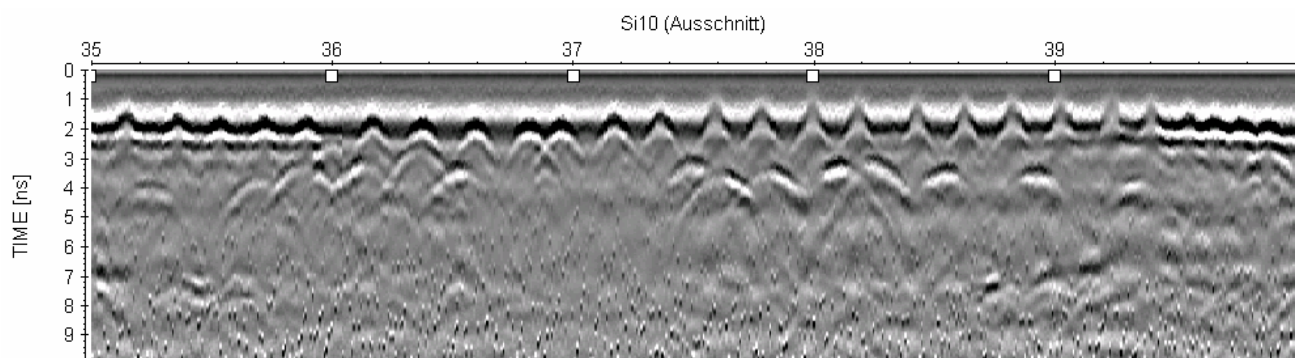
Abbildung 5.7.6: Beispiel für enge Bewehrung, Ausschnitt von 5m Länge, Sihlhochstrasse, SP=Vorspannkabel

## Komplexe Verhältnisse

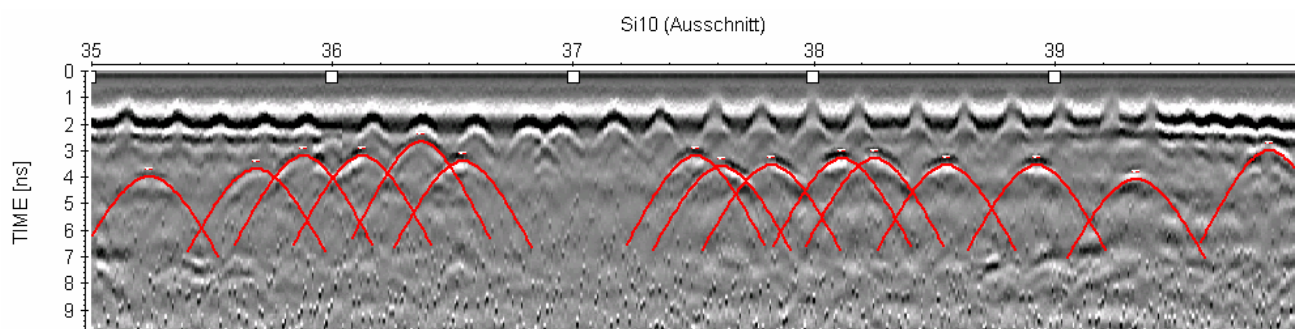
Nicht nur die gesuchten Spannkabel, sondern auch andere Strukturen innerhalb der Brücke können hyperbelförmige Reflexionen verursachen. Somit stellt sich die Frage, ob es sich tatsächlich um ein Kabel handelt oder nicht. Diese Frage kann nicht alleine aufgrund der Radardaten entschieden werden, sondern es sind Zusatzinformationen wie beispielsweise der erwartete Abstand zwischen einzelnen Kabeln oder deren Tiefe erforderlich.

Beim Datenbeispiel aus *Abbildung 5.7.4* wurde ein Abstand zwischen den Kabeln von ca. 1,2m erwartet. Die Reflexionen weisen Abstände von 1.15m, 1.20m und 1.10m auf. Hier ist die Schlussfolgerung naheliegend, dass es sich tatsächlich um die gesuchten Kabel handelt.

Eine andere Situation stellt der Ausschnitt in *Abbildung 5.7.7* dar, der ebenfalls auf der Brückenplatte aufgezeichnet wurde. Innerhalb von nur 5m Länge sind 15 Diffraktionshyperbeln in verschiedenen Tiefen erkennbar (*Abbildung 5.7.8*). Eine derartige Anhäufung von Kabeln ist selbst im Bereich der Brückenpfeiler kaum realistisch und es kann aufgrund des in *Abbildung 5.7.7* gezeigten Datenausschnittes nicht entschieden werden, welche Reflexionen von Spannkabeln stammen und welche andere Ursachen haben. In derartigen Bereichen kann eine zusätzliche, parallel versetzte Messlinie eine wichtige Hilfe sein, da dort die Spannkabel im Gegensatz zu vielen anderen Strukturen ebenfalls vorhanden sein sollten. Auf der Brückenseite wurden derartige Zusatzmessungen nur bei Bedarf durchgeführt, auf der Brückenunterseite wurden mit wenigen Ausnahmen über die gesamte Brückenlänge zwei parallele Messlinien ausgemessen.



*Abbildung 5.7.7: Beispiel für komplexe Verhältnisse, Ausschnitt von 5m Länge, Sihlhochstrasse*



*Abbildung 5.7.8: Beispiel für komplexe Verhältnisse, Ausschnitt von 5m Länge, Sihlhochstrasse*

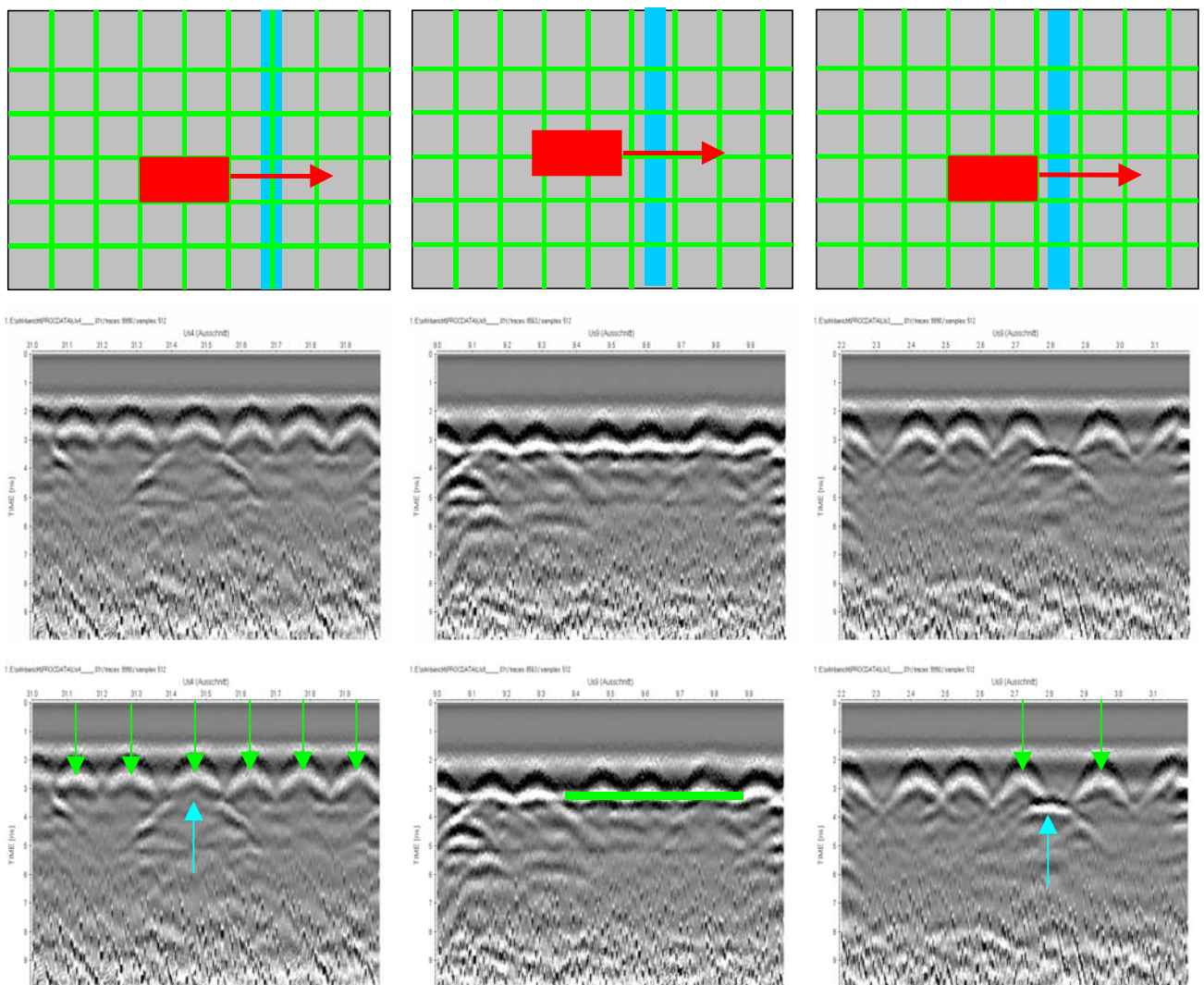
## Weitere Gründe für nicht aufgefundene Kabel

Während der Radaruntersuchungen kam es öfters vor, dass über einen Streckenabschnitt keine oder nur sehr wenige Kabel gefunden wurden. In diesen Fällen wurde die Messung

wiederholt, wobei die Messlinie um einige Zentimeter seitlich versetzt wurde. Auch nachträglich kann nicht in jedem Falle eine Erklärung für nicht aufgefundene Kabel angegeben werden. In vielen Fällen spielt aber die Position der einzelnen Bewehrungsseisen in Bezug auf die Messlinie und die Spannkabel eine wesentliche Rolle. Diesbezüglich können drei Situationen unterschieden werden:

- Spannkabel liegt direkt unterhalb eines quer verlaufenden Bewehrungsstabes oder in unmittelbarer Nähe davon
- Messlinie verläuft oberhalb eines Bewehrungsstabes in Längsrichtung
- Ungestörte Situation

Die *Abbildungen 5.7.9 bis 5.7.11* zeigen eine schematische Darstellung der Situationen A-C (oben) sowie einen entsprechenden Datenausschnitt von 1 m Länge (Mitte und unten).



*Abbildung 5.7.9: Situation A*

*Abbildung 5.7.10: Situation B*

*Abbildung 5.7.11: Situation C*

In **Situation A** (*Abbildung 5.7.9*) befindet sich ein Bewehrungsseisen (grün) direkt oberhalb des Kabels (blau). Die Antenne und deren Bewegungsrichtung ist rot eingezeichnet. Im

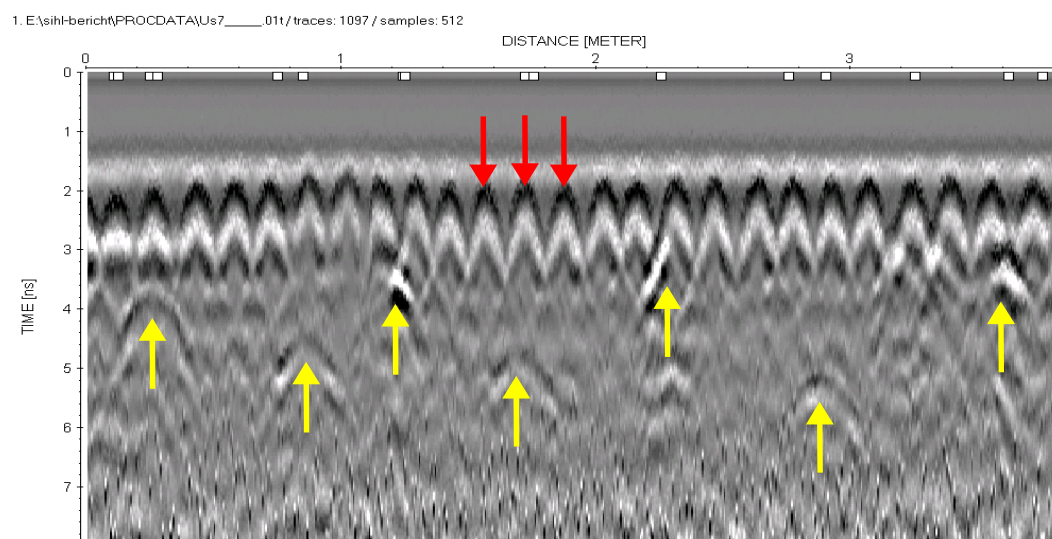
Datensatz ist der Scheitel der Diffraktionshyperbel am Spannkabel nicht erkennbar, da er vom darüberliegenden Eisen abgeschirmt wird. Lediglich die Hyperbeläste sind, wenn auch eher schwach ausgeprägt, vorhanden.

In **Situation B**) (*Abbildung 5.7.10*) wird die Antenne während einer kurzen Strecke direkt oberhalb eines längs der Messrichtung verlaufenden Eisens (grün) geführt. Durch die Abschirmung können Strukturen unterhalb des Eisens nur noch sehr eingeschränkt untersucht werden.

Bei der in *Abbildung 5.7.11* dargestellten ungestörten **Situation C**) sind sowohl der Scheitel als auch beide Hyperbeläste gut erkennbar, der linke Ast wird durch das benachbarte Eisen nur leicht abgeschwächt. Ein derartiges Spannkabel kann problemlos geortet werden.

### Sonderfall

Der mit Abstand grösste Teil der Messungen auf der Unterseite der Brückenplatte wurde etwa in der Mitte zwischen den beiden Hohlkästen durchgeführt. An einigen wenigen Stellen wurde auf einem Podest neben dem Hauptgerüst unmittelbar neben einem Hohlkasten gemessen. Da die Kabel jeweils abwechselnd von beiden Seiten schräg verlaufen, sollten sie abseits der Mitte in verschiedenen Tiefen liegen. Die *Abbildung 5.7.12* zeigt einen Ausschnitt von ca. 3.8 m Länge, der unmittelbar neben dem Hohlkasten aufgezeichnet wurde. Unterhalb der Bewehrung (rote Pfeile) liegen die Spannkabel (gelbe Pfeile) jeweils abwechselnd in verschiedenen Tiefen.



*Abbildung 5.7.12: Ausschnitt aus unmittelbar neben Hohlkasten aufgezeichnetem Datensatz*

### Anteil gefundener Kabel auf der Brückenunterseite

Auf der Brückenunterseite wurden, mit wenigen Ausnahmen, jeweils zwei parallele Messlinien ausgemessen. Dies bewirkte einerseits einen erhöhten Zeitaufwand, brachte aber andererseits mehrere Vorteile:

- Unterscheidungsmöglichkeit zwischen sicheren und wahrscheinlichen Kabelpositionen; nur in einer Messlinie aufgefundene Positionen wurden als



"wahrscheinlich" eingezeichnet, in beiden Linien aufgefundene Positionen wurden als "sicher" eingezeichnet

- Erhöhung des Anteils aufgefundener Kabel
- Möglichkeit zur Bestimmung der Genauigkeit der Positionsbestimmung durch einen Vergleich zwischen den beiden Messlinien (siehe unten)
- Möglichkeit zur Kontrolle des Auswertevorgangs für den Sachbearbeiter vor Ort; falls nicht zumindest ein grosser Anteil der Positionen in beiden Messlinien aufgefunden wird ist nicht gesichert, dass es sich tatsächlich um Kabel handelt

Nachdem die Untersuchungen auf der Unterseite der Brücke abgeschlossen waren wurden im Bereich des Regelquerschnittes die aufgefundenen Kabel gezählt und mit der Anzahl Kabel gemäss Plan verglichen. Die Ergebnisse dieses Vergleichs lassen sich wie folgt zusammenfassen:

*Tabelle 5.7-2: Anteil gefundener Kabel*

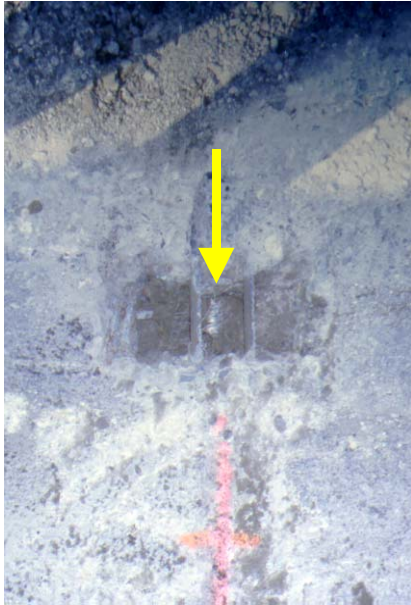
	<b>Anzahl</b>	<b>Prozent</b>
<b>Kabel gesamt</b>	1684	
<b>Radar sicher</b>	917	54.5
<b>Radar wahrscheinlich</b>	492	29.2
<b>Radar gesamt</b>	1409	83.7

Mehr als die Hälfte der Kabel konnten sicher geortet werden und mehr als 80% der Kabel wurden in mindestens einer der beiden Messlinien aufgefunden (wahrscheinliche Kabelposition). Dieses Ergebnis ist deutlich besser als auf der Oberseite der Brückenplatte. Die Gründe dafür dürften darin liegen, dass jeweils 2 Messlinien gemessen wurden, die Betonoberfläche über die gesamte Strecke sauber und gleichmässig war und die Arbeiten vollkommen ungehindert von allen anderen Aktivitäten auf der Baustelle durchgeführt werden konnten.

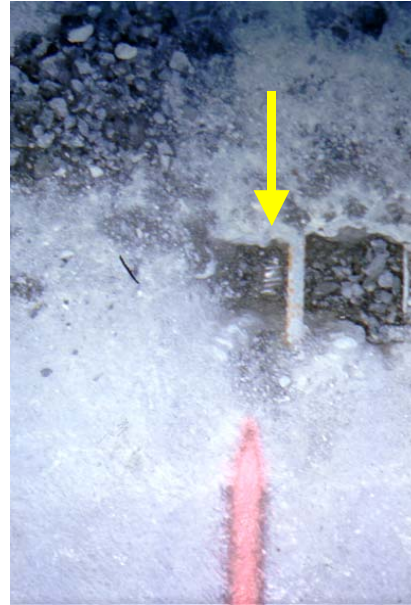
## **Genauigkeit der Positionsbestimmung**

### **Vergleich zwischen Radarergebnissen und Sondierungen**

Im Vorfeld der Messungen wurde die erforderliche Genauigkeit mit 5 – 10 cm angegeben. Bei den am 08. März 2000 durchgeführten Probemessungen auf der Brückenplatte bestand die Möglichkeit, die mittels Radar bestimmten Kabelpositionen mit einigen bereits vorhandenen Sondierungen zu vergleichen. Diese Vergleiche ergaben, dass die genannten Anforderungen problemlos erfüllt werden konnten. Die *Abbildung 5.7.13* und die *Abbildung 5.7.14* zeigen einen Vergleich zwischen Radarergebnissen (roter Strich) und den sondierten Kabelpositionen (gelber Pfeil).



*Abbildung 5.7.13: Vergleich zwischen Radarergebnis (roter Strich) und Sondierung (gelber Pfeil)*



*Abbildung 5.7.14: Vergleich zwischen Radarergebnis (roter Strich) und Sondierung (gelber Pfeil)*

### **Statistische Auswertung für die Brückenunterseite**

Um eine statistische Untersuchung der Genauigkeit der Positionsbestimmung zu ermöglichen, wurden insgesamt 8 Datensätze à zweimal 105m (parallele Linien) jeweils im Anschluss an die eigentliche Kabelortung aufgezeichnet. Die *Abbildung 5.7.15* zeigt einen Ausschnitt von 5m Länge aus zwei parallel verlaufenden Messlinien. In diesen Datensätzen wurden die vorher auf der Betonoberfläche eingezeichneten Kabelpositionen jeweils in den Datensätzen markiert. Somit ergibt sich die Möglichkeit die Übereinstimmung zwischen je zwei parallel verlaufenden Messlinien zu vergleichen und damit ein Mass für die Genauigkeit der Positionsbestimmung zu ermitteln.

Vor der Aufzeichnung dieser Datensätze wurden im Abstand von 5 Metern Striche auf die Betonoberfläche aufgebracht, welche ebenfalls in den Datensätzen markiert wurden. Mit deren Hilfe konnte im Anschluss an die Messung der Längenmasstab der Datensätze kontrolliert bzw. korrigiert werden. Dies ist von Bedeutung, wenn beispielsweise beim Überqueren einer Fuge das an der Antenne angebrachte Messrad auf einem kurzen Abschnitt nicht mitläuft.

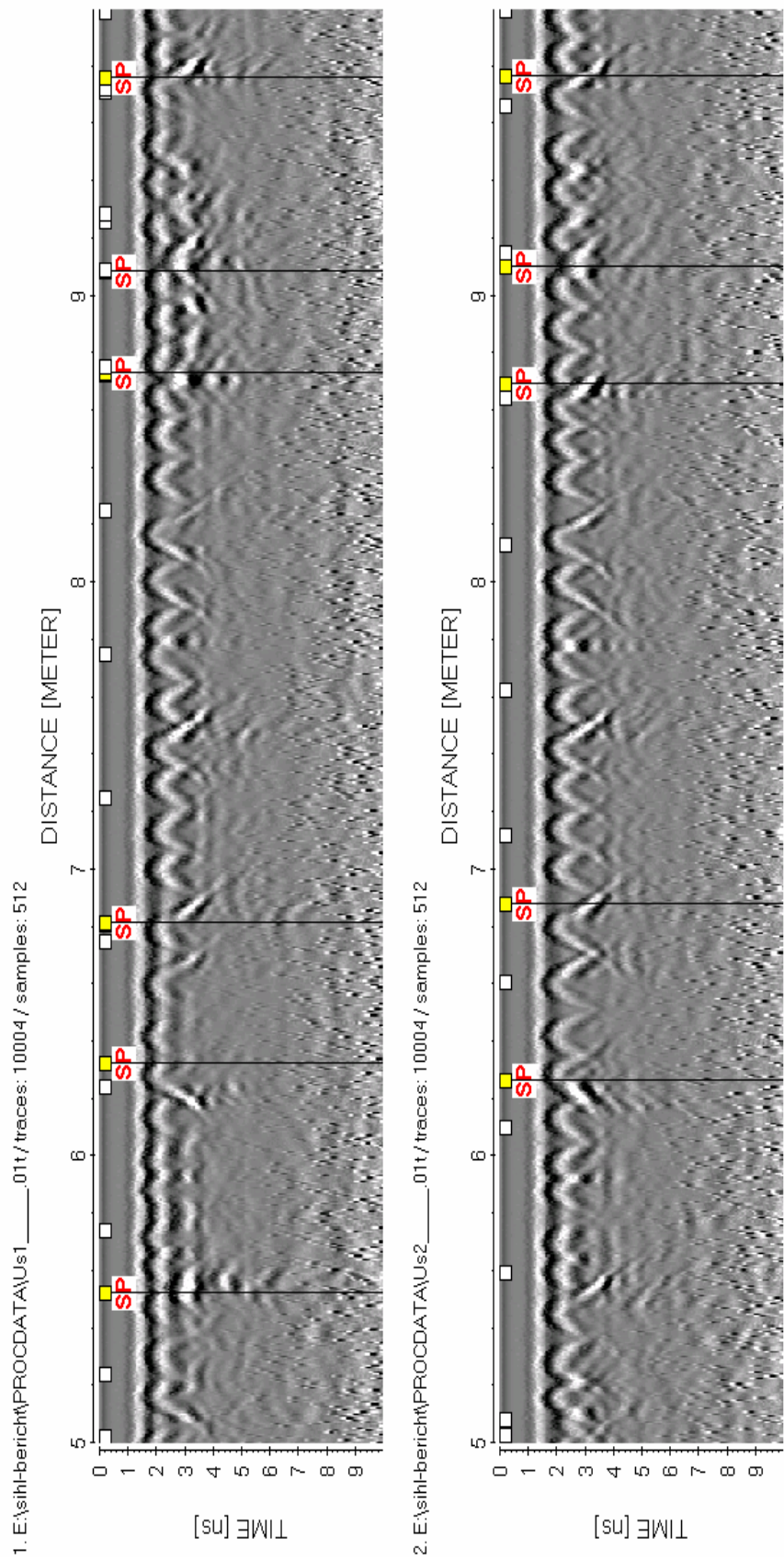


Abbildung 5.7.15: Ausschnitt von 5m Länge aus zwei parallel verlaufenden Messlinien, Sihlhochstrasse, SP=Vorspannkabel

Zunächst wurden für alle auf beiden parallelen Messlinien ermittelten Kabelpositionen die jeweiligen Abstände zur Position auf der parallel verlaufenden Messlinie berechnet. Soll aus diesen Werten die Genauigkeit der Positionsbestimmung berechnet werden, so stellt sich das Problem, dass die tatsächliche Kabelposition nicht bekannt ist. Somit werden zusätzliche Annahmen zur Fehlerabschätzung erforderlich.

Das gesuchte Kabel kann zwischen den in den beiden Messlinien gefundenen Positionen liegen (Situation 1, *Abbildung 5.7.16*) oder auch ausserhalb (Situation 2, *Abbildung 5.7.17*).

Für die **Situation 1** gilt folgendes:

A = Fehler in Messlinie 1

B = Fehler in Messlinie 2

D = Distanz zwischen den Positionen in den beiden Messlinien = A + B

Dann gilt:

Mittlerer Fehler in beiden Messlinien =  $F_m = 0.5 * (A + B) = 0.5 * D$

Für die **Situation 2** gilt:

D = Distanz zwischen den Positionen in den beiden Messlinien

C = Distanz zwischen der wahren Position des Kabels und der am nächsten liegenden mittels Georadar bestimmten Position

Hier stellt sich das Problem, dass die Strecke C unbekannt ist. Eine mögliche und sinnvolle Annahme besteht darin, die Strecke C gleich dem mittleren Fehler in Situation 1 zu setzen. In diesem Falle gilt:

Fehler in Linie 1 =  $D + C = 1.5 * D$

Fehler in Linie 2 =  $C = 0.5 * D$

Daraus resultiert als mittlerer Fehler beider Messlinien:

$F_m = D$

Über alle aufgezeichneten Messlinien ergibt sich als mittlere Distanz für die in den beiden parallelen Messlinien ermittelten Profilpositionen ein Wert von 5 cm. Die maximale Distanz beträgt 15 cm. Somit kann der mittlere Fehler mit besser als 5 cm abgeschätzt werden. In der Realität dürfte dieser Fehler deutlich geringer sein, da jeweils die Mitte zwischen den in beiden Linien ermittelten Positionen markiert wurde. Ausserdem wurde angenommen, dass die Kabel jeweils genau senkrecht zur Brückenachse liegen und allfällige Abweichungen von dieser Annahme gehen als Fehler in die Berechnung ein.

## Empfehlungen

- Sofern möglich sollten zwei parallele Linien gemessen werden
- Zusatzinformation wie erwarteter Abstand zwischen den Kabeln und die Tiefe der Kabel helfen Kabel von anderen Objekten/ Strukturen zu unterscheiden

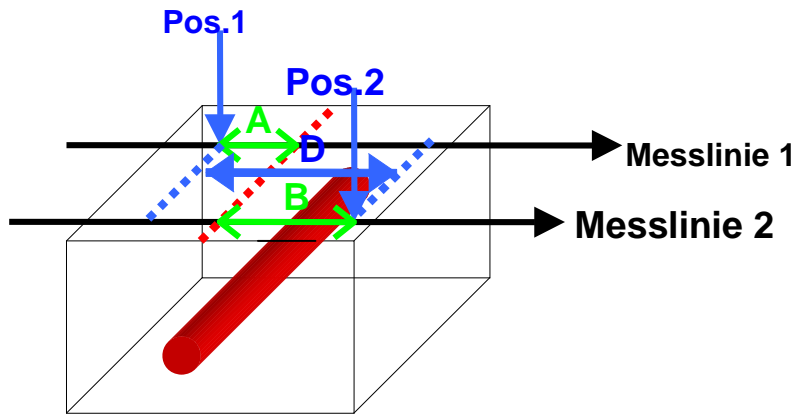


Abbildung 5.7.16: Situation 1

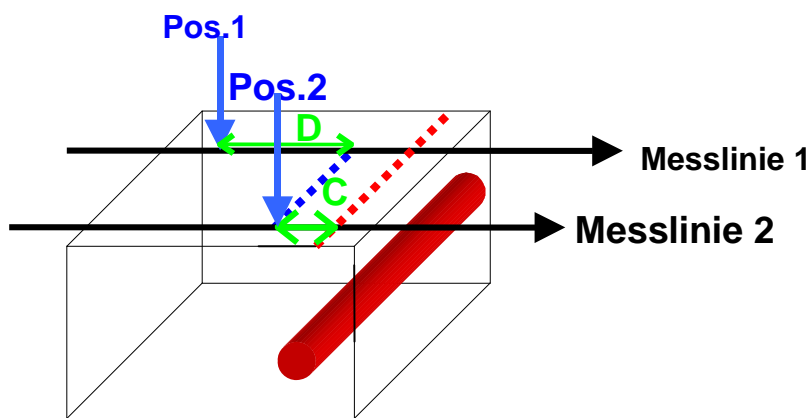


Abbildung 5.7.17: Situation 2

Betrachtungen über den Zeitaufwand für Kabelortung auf der Brückenunterseite

Die folgenden Ausführungen sind im Zusammenhang mit den oben gemachten Feststellungen zum Anteil gefundener Kabel und zu den erreichten Genauigkeiten zu sehen, da sich durch eine Veränderung des Zeitaufwandes auch diese Größen ändern würden. Dargestellt wird lediglich der Zeitaufwand für die Messungen als solche ohne An- Abreise und Transport des Materials auf das Gerüst an der Brückenunterseite.

Tabelle 5.7-3: Zeitaufwand

Zeitaufwand Messung pro Meter	4.2 Minuten
Zeitaufwand Messung pro sicher geortetem Kabel	4.6 Minuten
Zeitaufwand Messung pro geortetem Kabel (sicher und wahrscheinlich)	3.0 Minuten

## 5.8 Dreidimensionale Untersuchungen an Brückenteilen

Dreidimensionale Untersuchungen auf Brücken sind momentan noch eher die Ausnahme als die Regel. Der Grund dafür liegt im erheblichen Zeitaufwand für die Messung. Dieser Aufwand wird sich in der Zukunft mit der Verbreitung von Antennenarrays und evtl. auch automatischen Scannersystemen erheblich reduzieren, so dass auch auf der Baustelle derartige Untersuchungen zunehmen werden.

Um den Nutzen von dreidimensionalen Radaruntersuchungen zu dokumentieren wurde an der EMPA ein Laborexperiment an einem Längsträger des Viadotto sopra le Cantine durchgeführt. Dabei wurde eine Seite des Trägers mit horizontalen und vertikalen Linien im Abstand von jeweils 0.02m ausgemessen.



Abbildung 5.8.1: Längsträger vom Viadotto sopra le Cantine



Abbildung 5.8.2: Längsträger vom Viadotto sopra le Cantine

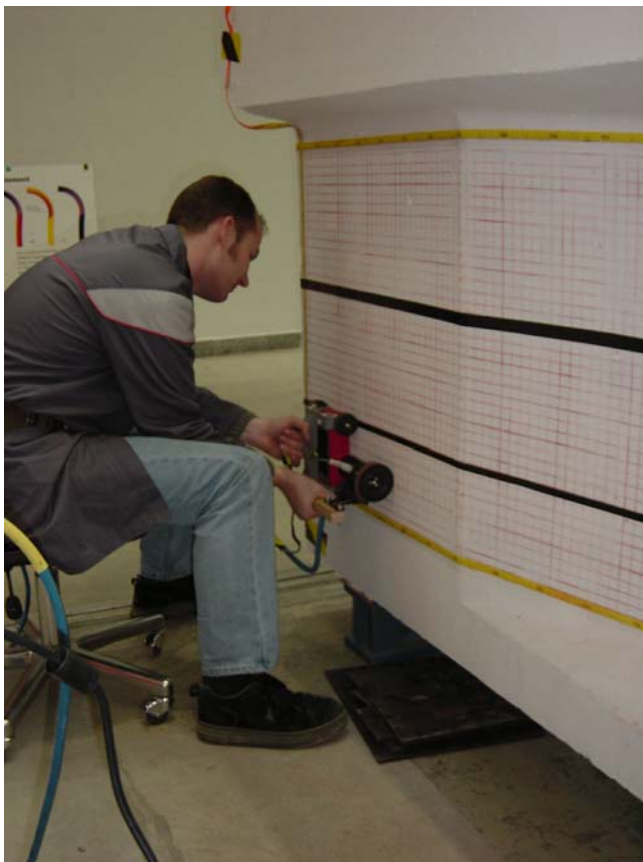


Abbildung 5.8.3: Messung

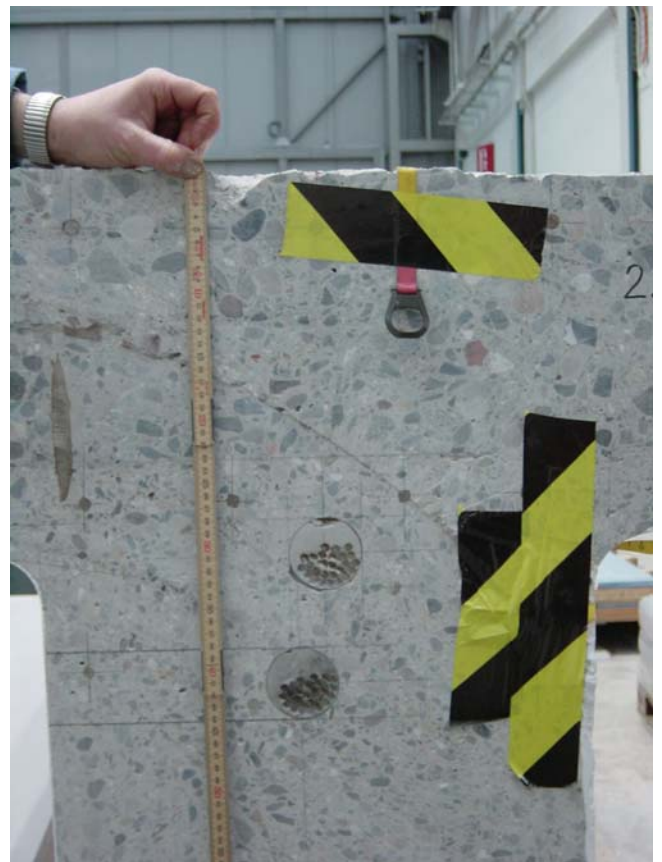
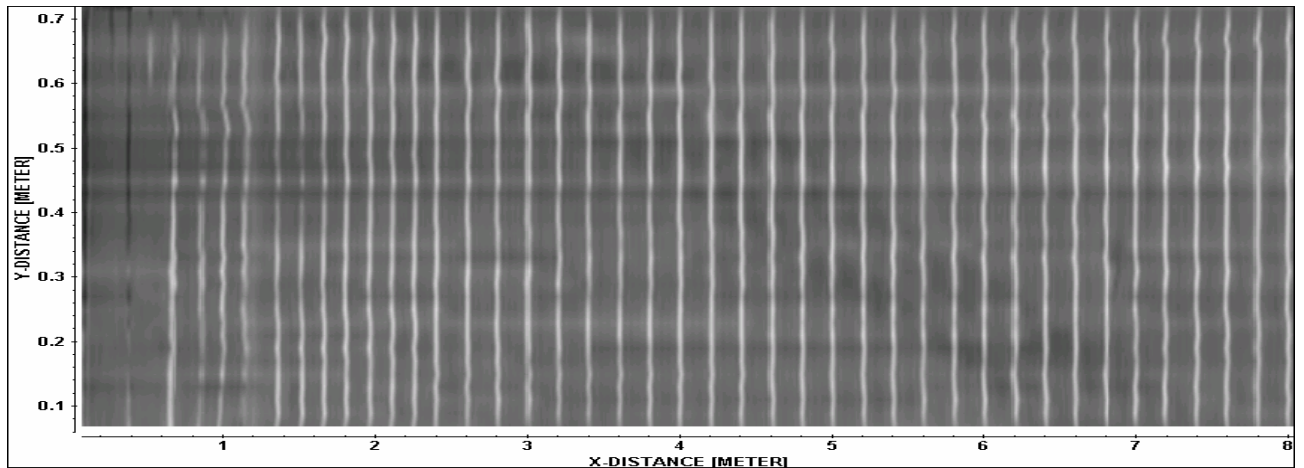


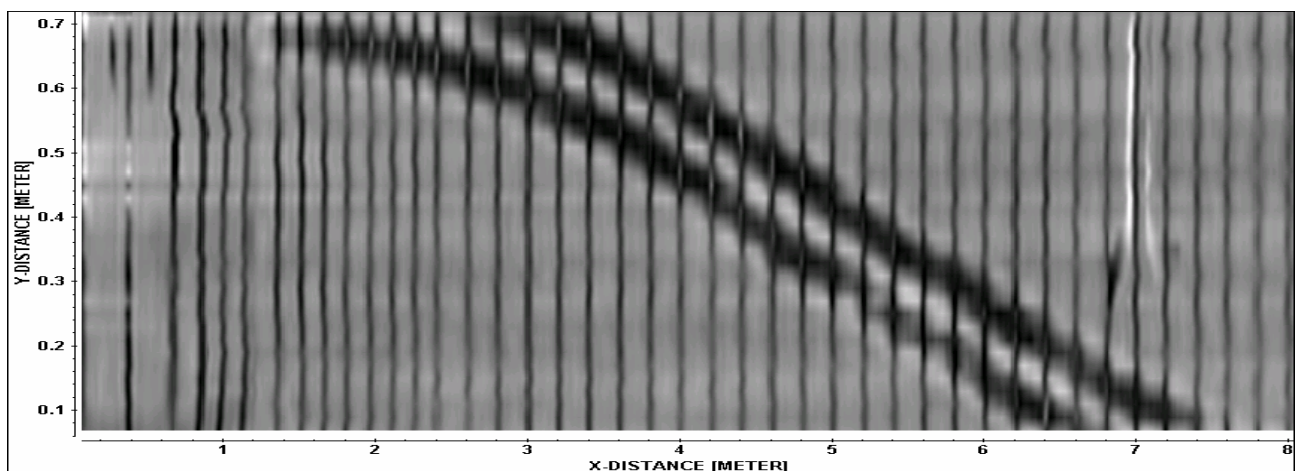
Abbildung 5.8.4: Stirnseite mit zwei Spannkabeln

Im Anschluss an die Datenverarbeitung lassen sich Zeitscheiben aus beliebigen Tiefen des Trägers darstellen. Bei den folgenden Darstellungen wurden lediglich die in Längsrichtung aufgezeichneten Daten berücksichtigt, so dass horizontal verlaufende Strukturen weitgehend unterdrückt werden. Die *Abbildung 5.8.5* zeigt eine Zeitscheibe von 0.52ns, was etwa 0.02m entspricht. Die Darstellung ist in der Vertikalen stark überhöht (Ausschnitt 0.72m vertikal und 8.05m horizontal). Die vertikalen Bewehrungseisen sind als helle Linien deutlich erkennbar.



*Abbildung 5.8.5: Zeitscheibe 0.57ns, entspricht ca. 0.02m, Längsträger vom Viadotto sopra le Cantine*

Bei 1.13ns, entsprechend einer Tiefe von etwa 0.05m, zeigen sich deutlich die beiden Spannkabel (*Abbildung 5.8.6*). Zusätzlich ist auch das Abklingen der Reflexion an der obersten Bewehrungslage als schwarze Linien erkennbar. Bei ca. 7.0m zeigt sich eine zusätzliche Struktur, bei der es sich vermutlich um eine im Träger verbliebene Vorrichtung zum Transport des vorgefertigten Trägers handelt.



*Abbildung 5.8.6: Zeitscheibe 1.13ns, entspricht ca. 0.05m, Längsträger vom Viadotto sopra le Cantine*

Bei 2.15ns, entsprechend einer Tiefe von ca. 0.10m, zeigen sich deutlich die Eisen der zweiten Bewehrungslage (*Abbildung 5.8.7*). Zwischen 0.0m und 1.2m fehlen diese, da der Träger dort dicker als in den übrigen Bereichen ist und damit auch die zweite Bewehrungslage tiefer liegt.

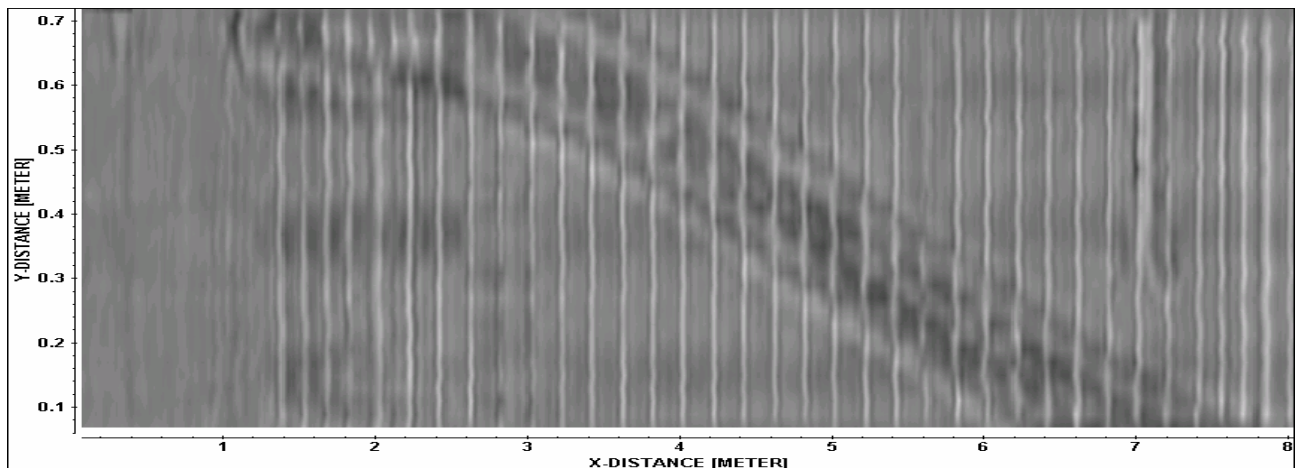


Abbildung 5.8.7: Zeitscheibe 2.15ns, entspricht ca. 0.10m, Längsträger vom Viadotto sopra le Cantine

Natürlich können die Daten auch in anderer Form als in Zeitscheiben dargestellt werden. Die *Abbildung 5.8.8* zeigt den Datenkubus anhand von Schnitten senkrecht zur Längsachse des Trägers. Die Rückwand des Trägers ist mit einem roten und die Spannkabel sind mit blauen Pfeilen gekennzeichnet.

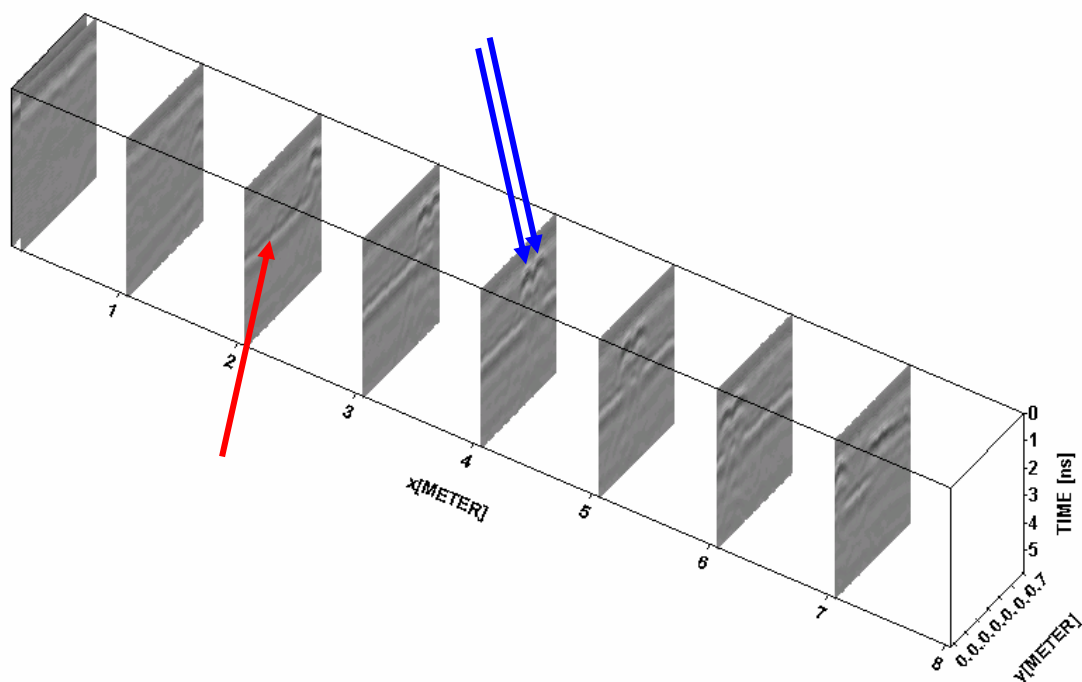


Abbildung 5.8.8: Schnitte senkrecht zur Längsachse des Trägers, Längsträger vom Viadotto sopra le Cantine, roter Pfeil=Rückwand des Trägers, blaue Pfeile=Vorspannkabel

## 6 Regulierung



Das elektromagnetische Spektrum wird durch eine Vielzahl von Systemen und Technologien benutzt. Beispiele hierfür sind Radio, Fernsehen, Telefon, Radar und GPS. Zusätzlich strahlen zahlreiche Geräte elektromagnetische Signale als unerwünschte Nebeneffekte ab. Die Natur schliesslich produziert elektromagnetische Signale in grosser Vielfalt und über weite Frequenzbereiche durch Gewitter, kosmische Strahlung, Sonnenlicht und andere Effekte.

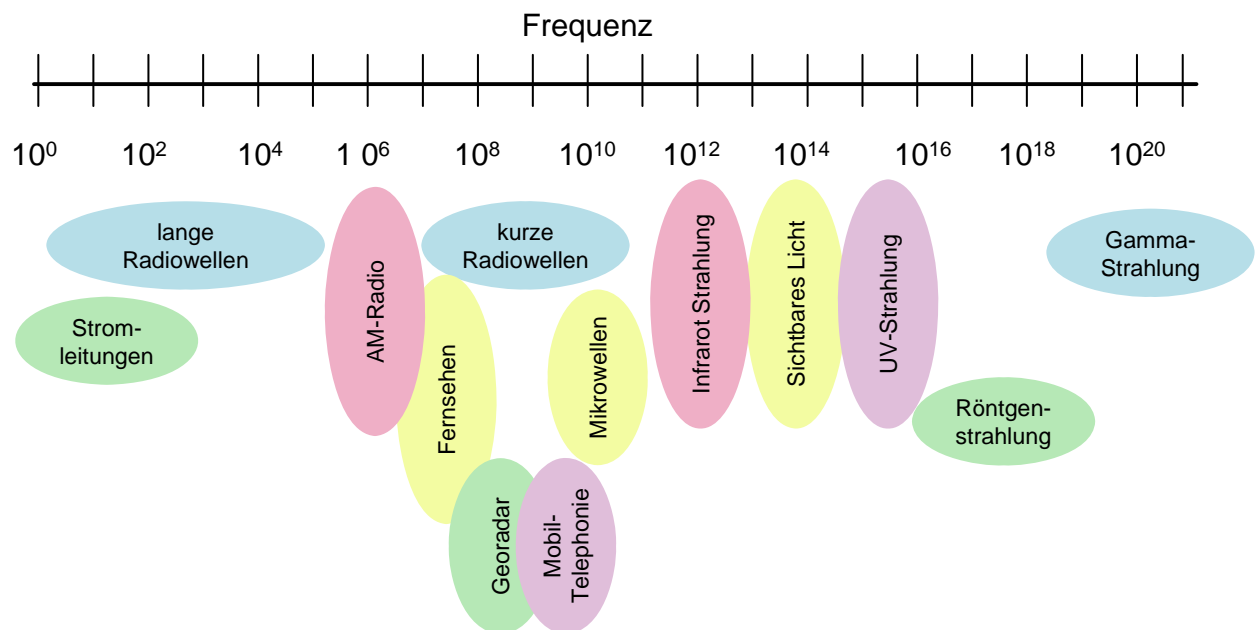


Abbildung 5.8.1: schematische Darstellung der Nutzung des elektromagnetischen Spektrums

Bestimmte Bereiche des elektromagnetischen Spektrums unterliegen besonderen Regulierungen, beispielsweise weil die Strahlung als gesundheitsschädlich bekannt ist (Röntgenstrahlung, Gammastrahlung), oder weil sie, wie beispielsweise in den für Kommunikation nutzbaren Frequenzbereichen, von zahlreichen Anspruchsgruppen genutzt werden.

Die vom Menschen und seinen Systemen erzeugte Strahlung muss entweder gering gehalten werden, wenn es sich um unerwünschte Nebeneffekte handelt oder muss sich auf bestimmte, zugeteilte Frequenzbereiche und/oder Leistungen beschränken. Die betreffenden, als Regulierung bezeichneten Regelungen sind recht kompliziert, da hier nationale und internationale Interessen und Vereinbarungen einfließen. In der Schweiz veröffentlicht das Bundesamt für Kommunikation (BAKOM) von der Kommunikationskommission (COMCOM) genehmigte Frequenzzuweisungspläne.

Die meisten der heute gängigen Georadar-Systeme basieren auf der Abstrahlung eines bzgl. der Zeit möglichst kurzen Pulses. Um dies zu erreichen, muss die Bandbreite möglichst gross sein, d.h. einen möglichst grossen Frequenzbereich abdecken. Die abgestrahlten Leistungen sind sehr gering, werden aber von den Herstellern im Allgemeinen nicht angegeben. Störungen von anderen Geräten durch Georadar sind nicht bekannt. Eine Sorge gilt möglichen Störungen des GPS-Systems durch Georadar. Bei der mobilen Georadar-Anlage der EMPA befindet sich die GPS Antenne direkt oberhalb der Radarantennen ohne dass dies einen negativen Einfluss hätte. Dennoch bewegen sich Georadar-Anwender damit in einer rechtlichen Grauzone. Dies wurde von den Regulierern erkannt. In den USA hat die

Federal Communications Commission gemäss Herstellerangaben bereits diverse Geräte und Antennen zertifiziert. Bei den Antennen handelt es sich dabei um Modelle mit Bodenkontakt, Abschirmung und ausserhalb gewisser Frequenzbereiche. In Europa ist dieser Prozess noch nicht so weit vorangeschritten (Chignell 2004). Dennoch ist in naher Zukunft damit zu rechnen, dass Vorschriften erlassen werden, die die zulässigen Geräte und deren Einsatz regeln.

## 7 Kleines Radarlexikon

**Hinweis:** Gewisse Sachverhalte wurden stark vereinfacht um allgemeinverständlich zu sein.

### **Auflösungsvermögen**

vertikal: erforderlicher vertikaler Abstand zwischen zwei Schichtgrenzen um in den Radardaten als getrennte **Reflexionen** erkennbar und auswertbar zu sein. Wird dieser Abstand unterschritten, so überlagern sich die beiden Reflexionen und sind nicht mehr eindeutig auswertbar. Als Regel gilt: Schichtgrenzen sind unterscheidbar, wenn ihr Abstand mindestens ein Viertel der dominierenden **Wellenlänge** beträgt. Daraus folgt, dass das Auflösungsvermögen vom **Frequenzinhalt** des abgestrahlten Signals (d.h. der verwendeten Antenne) und vom untersuchten Medium bestimmt wird. Das untersuchte Medium wirkt einerseits als **Bandpassfilter**, d.h. verschiedene Frequenzen werden verschieden stark gedämpft (Veränderung des Frequenzinhaltes des Radarsignals), andererseits bestimmt es die Wellenlänge gemäss der Beziehung  $\lambda = c / \nu$ .

horizontal: erforderlicher horizontaler Abstand zwischen zwei Objekten um in den Radardaten unterscheidbar zu sein. Das horizontale Auflösungsvermögen wird weitgehend bestimmt von der Grösse der **Fresnel-Zone**

### **Bandbreite**

Frequenzbereich in dem die Radaranlage einschliesslich Antenne sendet und empfängt.

### **Bandpassfilterung**

ein Verfahren zur Datenbearbeitung, bei dem Signale ausserhalb eines bestimmten Frequenzbereiches eliminiert werden. Bandpassfilterung ist ein wichtiges Verfahren zur Verbesserung des Verhältnisses zwischen Signal und **Rauschen**

### **Basis**

Siehe **Basisstation**

### **CMP-Methode**

Bei der **Common-Mid-Point** Methode werden Sende- und Empfängerantenne während der Messung von einem gemeinsamen Mittelpunkt wegbewegt. Dies ermöglicht unter anderem eine Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit im untersuchten Objekt

### **Basisstation**

Stationärer Teil eines RTK-GPS-Systems, welcher Korrekturen (z.B. für atmosphärische Störungen) berechnet und diese zum **Rover** funkt

### **Datenkubus**

Darstellungsart für flächig aufgezeichnete Radardaten

### **Dielektrizitätszahl $\epsilon$**

ist materialabhängig und beeinflusst das elektrische Feld. Die Dielektrizitätszahl bestimmt weitgehend die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Radarsignals gemäss  $v = c / \sqrt{\epsilon}$

### **direkte Welle**

Radarsignal welches direkt von der Sender- zur Empfängerantenne gelangt, bzw. bei Verwendung nur einer Antenne direkt von dieser registriert wird

### **Eindringtiefe**

entspricht der maximal möglichen Untersuchungstiefe. Durch die elektrische Leitfähigkeit und molekulare sowie atomare Prozesse wird die Eindringtiefe begrenzt. Da i. A. höhere Frequenzen stärker gedämpft werden, nimmt die mögliche Untersuchungstiefe mit zunehmender Frequenz ab. Die erzielbare Eindringtiefe bzgl. eines Untersuchungsobjektes ist im voraus meist nicht genau bestimmbar, da die beeinflussenden Faktoren nicht genau bekannt sind. Im Bereich Strassenbau haben sich folgende Erfahrungswerte ergeben:

900 MHz Antenne                      Eindringtiefe:  $\geq 1\text{m}$

Mod. 4205 Hornantennen      Eindringtiefe:  $\geq 0.5\text{m}$

Für Beton gelten meist geringere Werte.

### **Einzelspur**

siehe **Spur**

### **Frequenz $\nu$**

Anzahl Schwingungen pro Zeit. Einheit: Hertz (Hz), 1 Hertz = 1 Schwingung/ 1 Sekunde

### **Fresnel-Zone**

Der Bereich, indem sich die von verschiedenen Punkten reflektierte Energie konstruktiv überlagert. Die Grösse der Fresnel-Zone wird bestimmt von der Laufzeit (d.h. der Tiefe des Reflektors), dem Frequenzinhalt des Quellensignals sowie der Ausbreitungsgeschwindigkeit oberhalb des Reflektors.

### **Geschwindigkeitsanalyse**

Bestimmung der **Signalgeschwindigkeit** in einem bestimmten Medium. Hierzu gibt es mehrere Möglichkeiten:

- Vergleich der Radarergebnisse mit bekannten Schichtdicken (z.B. Bohrungen)
- Auswertung von Diffraktionen
- Auswertung der **Reflexionsstärke** an Schichtgrenzen
- Messungen mit variablem Abstand zwischen Sende- und Empfangsantenne

### **Giga**

$\sim 10^9$

### **GPS**

Global-Positioning-System

### **Hornantenne**

eine Antenne, die durch ihre besondere Konstruktion besonders gut für den Einsatz ohne Bodenkontakt geeignet ist.

### **Interpretation**

während der Interpretation werden einzelnen **Reflexionen** in den Radardaten physikalische Strukturen (z. B. Schichtgrenzen) zugeordnet

### **Kalibrierung**

eine einfache Form der **Geschwindigkeitsanalyse**, bei der die Geschwindigkeit des Radarsignals anhand bekannter Dicken bzw. Tiefen (z.B. von Bohrkernen) ermittelt wird

### **Lichtgeschwindigkeit $c$**

Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen (z.B. Licht, Radarsignal) im Vakuum, gilt in guter Näherung auch in Luft

$c = 2.9979 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

**manuelle Messung**

Messung, bei der die Radarantenne von Hand über das Untersuchungsobjekt geführt wird

**Mega**

~  $10^6$

**Messrad**

misst den Weg und steuert die Messung

**Migration**

ein Verfahren zur Datenbearbeitung, durch das seitlich reflektierte Energie richtig positioniert wird. Beispiel: Ein punktförmiger Reflektor erscheint in den Radardaten als Hyperbel. Durch Migration wird die Reflexion auf einen Punkt reduziert. Im Bereich der zerstörungsfreien Prüfung wird oft auch der Begriff **SAFT** für die Migration verwendet.

**Mittelfrequenz**

Radarantennen strahlen Energie über einen gewissen Frequenzbereich ab. Die Mittelfrequenz bezeichnet die Mitte dieses Frequenzbereiches. Hohe Mittelfrequenzen bedeuten hohes **Auflösungsvermögen** und geringe **Eindringtiefe**. Tiefe Mittelfrequenzen bedeuten geringes Auflösungsvermögen und grosse Eindringtiefe

**Mobile Georadar-Anlage**

Ein mit einer Georadar-Anlage ausgerüstetes Fahrzeug, das Messungen während der Fahrt ermöglicht

**Mobile Messung**

Messung mit der **mobilen Georadar-Anlage**

**Nanosekunden ns**

eine Nanosekunde entspricht  $10^{-9}$  s, Abkürzung: ns

**Piko**

~ $10^{-12}$

**Polarisation**

elektrisches und magnetisches Feld einer elektromagnetischen Welle (z. B. des Radarsignals) schwingen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Bei polarisierten Wellen schwingen diese Felder in einer bestimmten Richtung. Radarantennen strahlen i.a. mehr oder weniger polarisierte Signale ab. Daraus folgt, dass es zum Beispiel beim Lokalisieren von Armierungen nicht gleichgültig ist, ob die Antenne längs oder quer bewegt wird.

**Radar**

**Radio Detection and Ranging**

**Radargramm**

Darstellung eines Datensatzes, welcher entlang einer Linie aufgezeichnet wurde

**Rauschen**

das Nutzsignal überlagernde Störsignale

**Reflektor**

eine Struktur, an welcher das Radarsignal reflektiert wird. Beispiel: Schichtgrenzen wie die Unterseite eines Strassenbelages

**Reflexion**

Vorgang bei dem ein Teil oder die gesamte elektromagnetische Energie z. B. an einer Grenzfläche zwischen zwei Materialien reflektiert wird. Das Verhältnis zwischen reflektierter und transmittierter Energie wird durch den **Reflexionskoeffizienten** beschrieben.

### **Reflexionskoeffizient**

beschreibt, welcher Anteil der elektromagnetischen Energie reflektiert wird. Für praktische Anwendungen kann in erster Näherung verwendet werden: Je grösser der Unterschied zwischen den **Dielektrizitätszahlen**, desto grösser der Anteil der reflektierten Energie

### **Rover**

Mobiler Teil eines **RTK-GPS-Systems**

### **RTK**

Real-Time-Kinematik, Art der GPS-Messung bei der Korrekturen in Echtzeit von der Basisstation gesendet, vom Rover empfangen und in die Positionsberechnung einbezogen werden

### **SAFT**

Synthetic-Aperture-Focussing-Technique, siehe **Migration**

### **Sample**

ein Wert in einer Spur (Zeitreihe)

### **Samplerate**

bezeichnet die Anzahl Samples, die pro Zeiteinheit aufgezeichnet werden. Der Begriff horizontale Samplerate bezeichnet die Anzahl Spuren pro Längeneinheit.

### **Scan**

siehe **Spur**

### **Signalgeschwindigkeit**

bezeichnet die Geschwindigkeit des Radarsignals. Diese Geschwindigkeit ist wichtig für die Umrechnung der ursprünglichen Zeitachse in eine Tiefenachse und ist in verschiedenen Medien unterschiedlich.

### **Spur**

(~Scan, Einzelspur) eine Zeitreihe, die das (meist an einem Ort) aufgezeichnete Radarsignal enthält. Alternativ wird, insbesondere im Bereich Ultraschall, auch der Begriff A-Scan verwendet.

### **Spurlänge**

Aufnahmedauer pro Messpunkt

### **Stapelung**

ein Verfahren zur Datenbearbeitung, bei dem benachbarte **Spuren** zusammenaddiert werden. Da das Nutzsignal meist eine gewisse horizontale Konstanz aufweist (z.B. sind die Änderungen von Schichtdicken zwischen benachbarten Messungen meist gering) können durch Stapelung zufällig auftretende Störeinflüsse reduziert werden.

### **Stepped-Frequency**

Radar-Technologie bei der nicht ein Impuls im Zeitbereich gesendet wird, sondern einzelne Frequenzen abgescannt und anschliessend zu einem Impuls zusammengesetzt werden.

### **TWT**

siehe **Two-Way-Traveltime**

**Two-Way-Traveltime**

die Zeit, die das Radarsignal von der Antenne bis zum **Reflektor** und wieder zurück benötigt

**Wellenlänge  $\lambda$** 

in einem Medium hat eine elektromagnetische Welle einer bestimmten **Frequenz** eine gemäss  $\lambda = c / \nu$  berechenbare **Wellenlänge**. Für das Radarsignal ist eine derartige Berechnung nicht in dieser Form möglich, da es sich aus einem Frequenzbereich zusammensetzt. Möglich ist beispielsweise eine Berechnung der Wellenlänge für die **Mittelfrequenz**.

**Zeitscheibe**

Darstellungsart für flächig aufgezeichnete Radardaten.

## 8 Dank

Das Forschungsprojekt „Beurteilung des Zustandes von Brücken mittels Georadar“ wurde vom Bundesamt für Strassen unterstützt (AGB 2000/553, FA Nr. 90/00).

Die Spannkabelortung und die flächendeckende Untersuchung der Belagsdicke erfolgten im Auftrag des Tiefbauamtes des Kantons Zürich, das anschliessend die Erlaubnis zur Veröffentlichung der Resultate gegeben hat. Den Tiefbauämtern der Kantone Schwyz, Tessin und Zürich sowie den Schweizerischen Bundesbahnen gilt der Dank für die Unterstützung bei der Untersuchung ihrer jeweiligen Objekte. Den EMPA Mitarbeitern Roman Mastrangelo und Marcello Stimolo besten Dank für die Unterstützung bei den Radaruntersuchung und der Erfassung der Realität.

Der ASTRA Begleitkommission Brückenforschung bestehend aus den Herren H. Fleischer (Vorsitz), M. Donzel, M. Käser und D. Somaini sei insbesondere für die konstruktiven und hilfreichen Kommentare und Verbesserungsvorschläge zu diesem Bericht gedankt.



## 9 Literatur

Al-Qadi i., Lahouar S., Loulizi A.: GPR: From the State-of-the-Art to the State-of-the-Practice, Proc. Non-Destructive Testing in Civil Engineering 2003, September 16-19, 2003, Berlin, D

Arai J., Mizobuchi T. and Suda K.: Study on Measurement of Chloride Content using Electromagnetic Wave in Reinforced Concrete Structures, Proc. Non-Destructive Testing in Civil Engineering 2003, September 16-19, 2003, Berlin, D

Chignell R.: The Radio Licensing of GPR systems in Europe, Proc. Tenth international conference on ground penetrating radar, Delft/NL, 21.-24. Juni 2004

Daniels D.: Ground Penetrating Radar, Inspec/IEE, Oktober 2004

De Bosset, C., Robert, A., Dumitrescu, T. und Belhia, A.: Mise au pont d'une méthode pour localiser les défauts d'étanchéité et rechercher divers défauts dans le tablier des ponts par voie non-destructive (Ausarbeitung einer zerstörungsfreien Methode, um Abdichtungs- und verschiedene Betonschäden der Brückenplatte zu lokalisieren), Forschungsauftrag 82/89, 1991, Bundesamt für Strassenbau

Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung, Merkblatt B10, Merkblatt über das Radarverfahren zur zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen, Ausgabe November 2001

Dix C. H.: Seismic velocities from surface measurements, Geophysics, 20, 1955,

Hugenschmidt J.: Mobile Georadar-Anlage – Technische Beschreibung, EMPA FE:160'617, Mai 1998

Hugenschmidt J.: Georadar in Strassenbau und Unterhalt, Anwendungsbeispiele, EMPA-Report Nr. 113/10, November 1997

Hugenschmidt J.: Multi-offset analysis for man-made structures, Proc. Eighth International Conference on Ground Penetrating Radar, Gold Coast, Australia, 23-26 May 2000

Hugenschmidt J.: Concrete bridge inspection with a mobile GPR system, Construction and Building Materials, 16/3, 2002

Lehmann F. and Green A. G.: Semi-automated georadar data acquisition in three dimensions, Geophysics, 64, 1999

Maser K., Holland T.J., Roberts R. and Popovics J.: Technology for quality assurance of new pavement thickness, , Proc. Non-Destructive Testing in Civil Engineering 2003, September 16-19, 2003, Berlin, D

Parry, N. S. and Davis J. L., 1992, GPR Systems for Roads and Bridges, Proceedings of Fourth International Conference on Ground Penetrating Radar, Rovaniemi, Finland, 8-13 June 1992, pp. 247-257

Roddis, W. M., Maser, K. and Gisi, A. J., 1992, Radar Pavement Thickness Evaluations for varying Base Conditions, Transportation Research Record 1355, Transportation Research Board, USA, pp. 90-98

Watanabe S., Misra S. und Oumoto T: Nondestructive evaluation of concrete structures, Proc. Non-Destructive Testing in Civil Engineering 2003, September 16-19, 2003, Berlin, D

Yilmaz, O., 1987, Seismic Data Processing, Society of Exploration Geophysics, USA

## **Webseiten**

Geräte und Software:

[www.gssi.com](http://www.gssi.com), Geophysical Survey Systems Inc., Hersteller von Radargeräten und Zubehör

[www.sensoft.ca](http://www.sensoft.ca), Sensors & Software Inc., Hersteller von Radargeräten und Zubehör

[www.ids-spa.it](http://www.ids-spa.it), INGEGNERIA DEI SISTEMI S.P.A, Hersteller von Radargeräten und Zubehör

[www.utsielectronics.co.uk](http://www.utsielectronics.co.uk), Utsi Electronics Ltd., Hersteller von Radargeräten und Zubehör

[www.sandmeier-geo.de](http://www.sandmeier-geo.de), Sandmeier Scientific Software, Software zur Bearbeitung und Auswertung von Radardaten

[www.3d-radar.com](http://www.3d-radar.com), 3-D radar-as, Hersteller von Radargeräten und Zubehör

Regulierung:

[www.fcc.gov](http://www.fcc.gov), Federal Communications Commission

[www.etsi.org](http://www.etsi.org), European Telecommunications Standards Institute

## 10 Anhang: Gekürzte Untersuchungsberichte für die einzelnen Objekte

### 10.1 Überführung Burggasse Altendorf

#### Technische Daten

Die folgenden Informationen wurden den vom Tiefbauamt des Kantons Schwyz zur Verfügung gestellten Unterlagen entnommen.

Tabelle 10.1-1: Technische Daten

Objektname	Überführung Burggasse
Kanton	Schwyz
Nr.	103
Bez. des Bauherren	Kataster Nr. 345
Standort, Gemeinde	Altendorf
Hindernis	A3
Brückentyp	Überführung mit V-Stielen in vorfabriziertem Beton
Vorspannung	Litzen System VSL
Max. Spannweite	30.7m
Gesamtlänge	52.94m gemäss Zustandsrapport Kunstbauten vom Oktober 1997, 53.06m gemäss Plan (siehe unten)
Gesamtbreite	9.20m
Gesamtoberfläche	487m <sup>2</sup>
Abdichtung	Weich-Mastix (beim Abfräsen des Belages festgestellt: mit Textileinlage)
Baujahr	1970
Abbruch	2001
Abbruchgrund	Eindeckung Altendorf

#### Pläne

Die folgenden Pläne wurden den vom Tiefbauamt des Kantons Schwyz zur Verfügung gestellten Unterlagen entnommen.

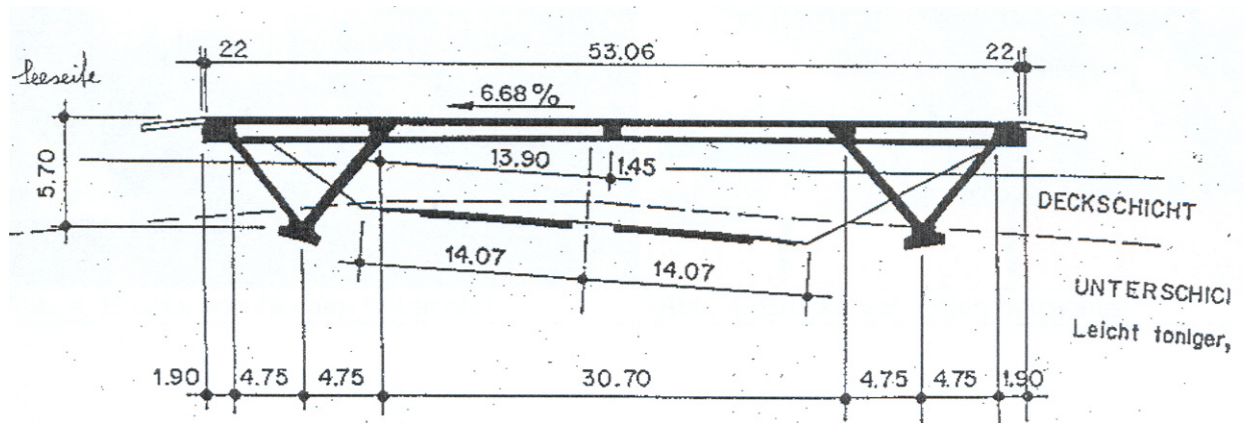


Abbildung 10.1.1: Längsschnitt

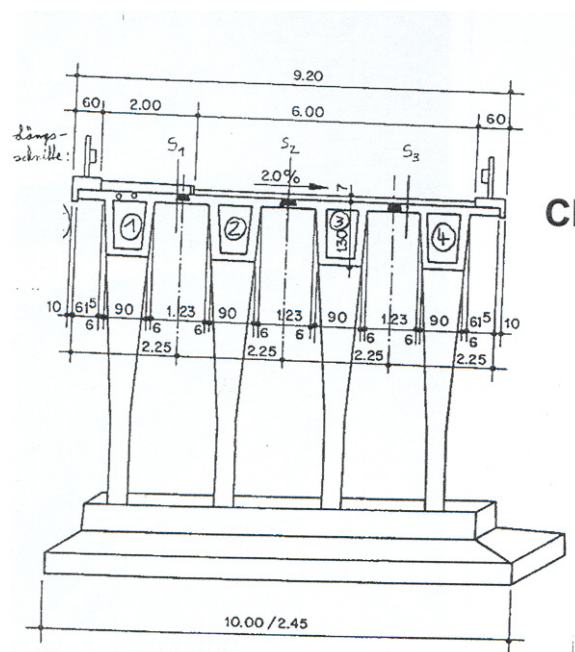


Abbildung 10.1.2: Querschnitt mit Position der Schnittlinien S1=Zürich, S2=Mitte, S3=Chur

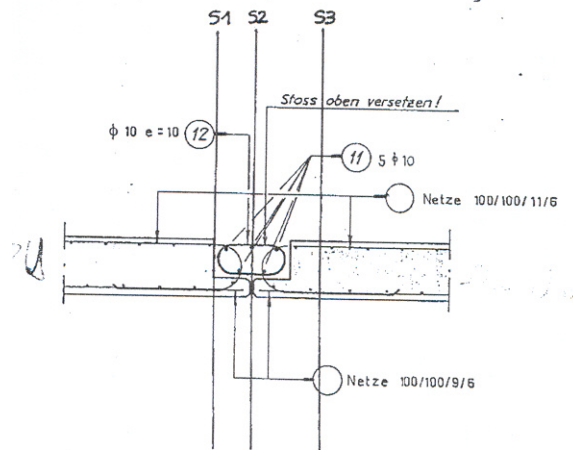


Abbildung 10.1.3: Position der Schnittlinien

## Photos



Abbildung 10.1.4: Brücke von Norden betrachtet



Abbildung 10.1.5: Brücke von unten betrachtet



Abbildung 10.1.6: Fahrbahn

## Radardaten nach der Datenbearbeitung

1. C:\EmpaDaten\Reflexdaten\valtendorf\PROCDATA\BU1\_\_\_\_.06T / traces: 1059 / samples: 540

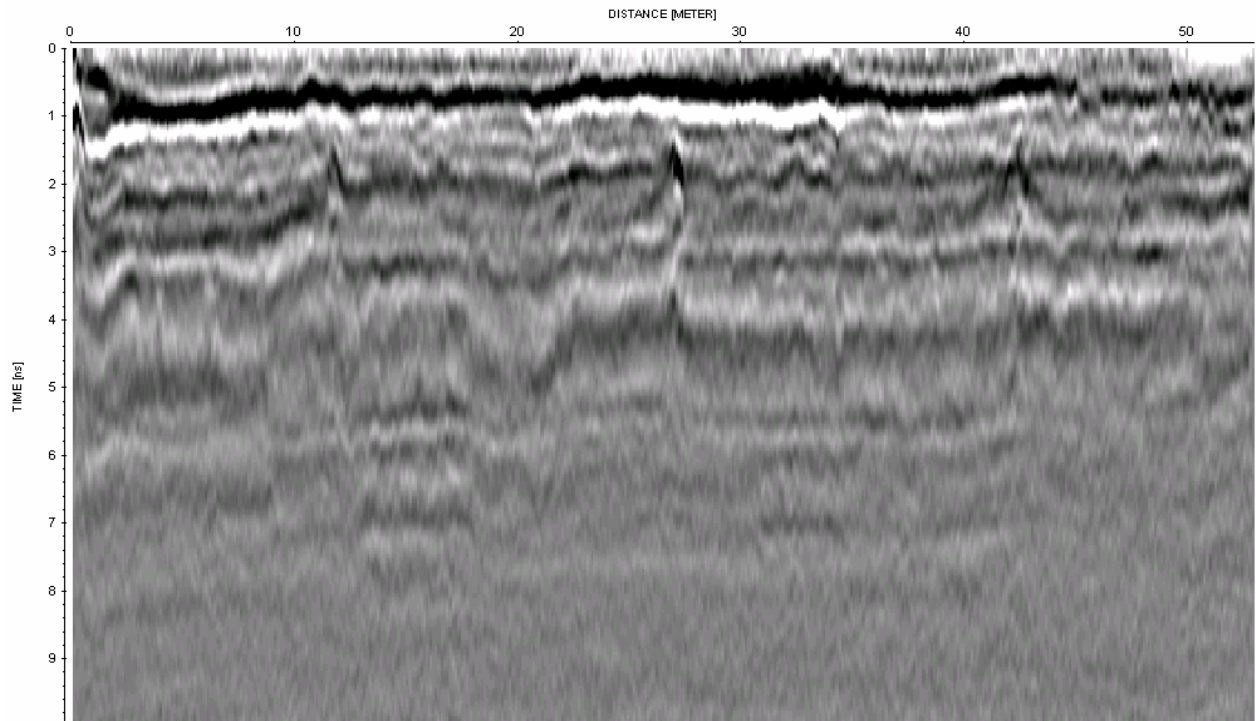


Abbildung 10.1.7: Profil S3, Chur

1. C:\EmpaDaten\Reflexdaten\valtendorf\PROCDATA\BU2\_\_\_\_.07T / traces: 1053 / samples: 573

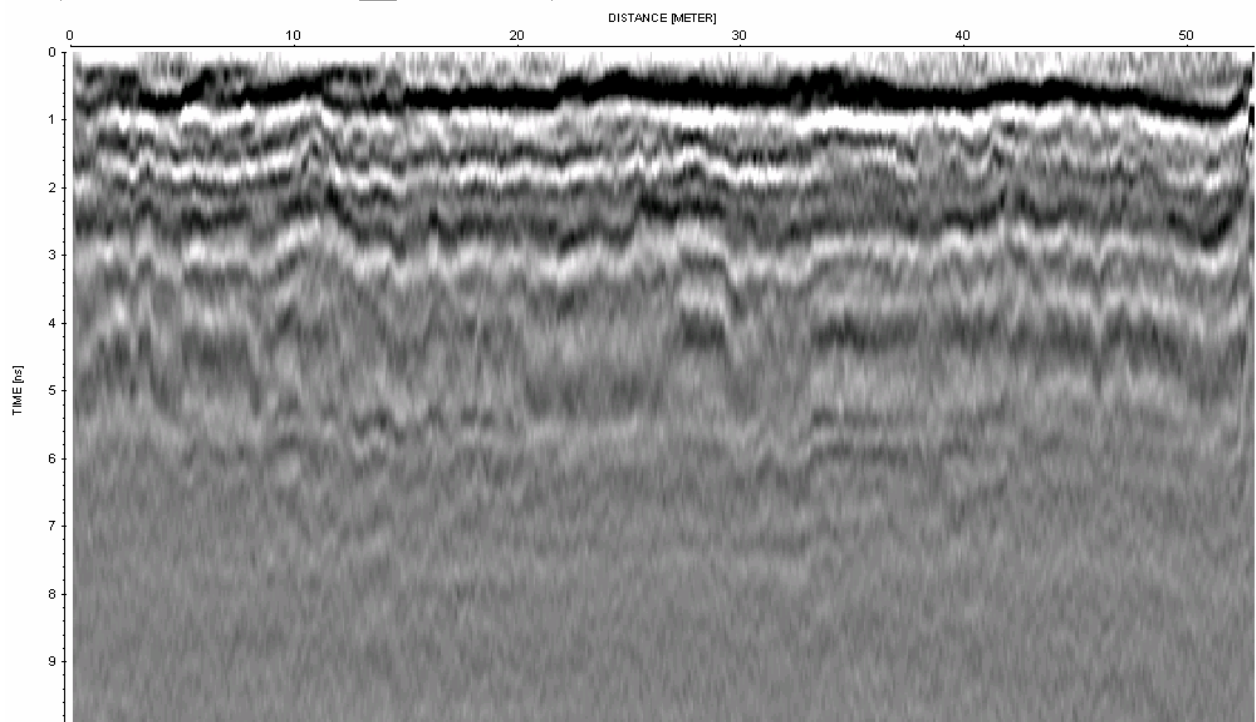


Abbildung 10.1.8: Profil S2, Mitte

1. C:\EmpaDaten\Reflexdaten\altendorf\PROCDATA\BU4\_\_\_\_.03T / traces: 1604 / samples: 524

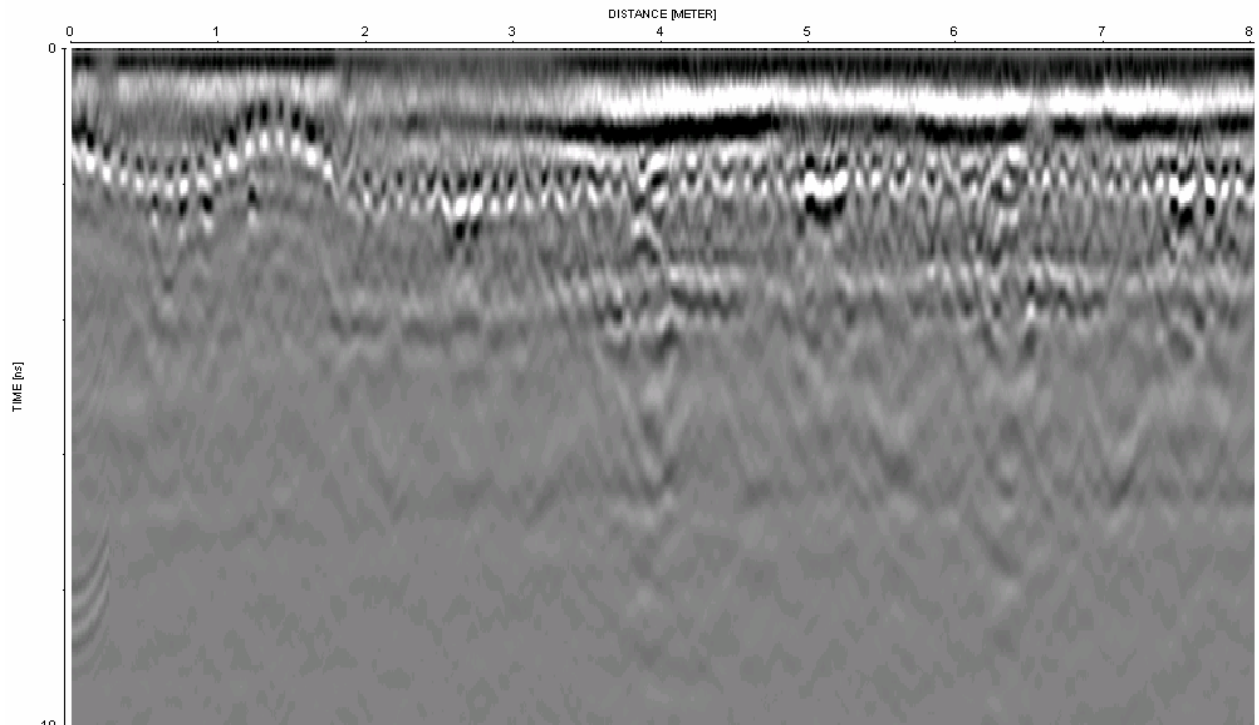


Abbildung 10.1.9: Querprofil, 12.9m ab FÜ Berg, der linke Rand der Darstellung entspricht der Seite Zürich

### **Ermittlung der tatsächlichen Belagsstärke während des Abfräsens**

Am 4. Mai 2001 wurde der Belag streifenweise abgefräst (Abbildung 10.1.10 und Abbildung 10.1.11). Vor dem Abfräsen waren entlang der mit Georadar untersuchten Linien jeweils im Abstand von einem Meter Markierungen aufgesprüht worden. Während des Fräsvorganges wurde die Belagsdicke an den markierten Stellen ausgemessen.



Abbildung 10.1.10: Abfräsen des Belags



Abbildung 10.1.11: Fräskante, Spur Mitte, S2

In *Abbildung 10.1.12* sind die ermittelten Belagsdicken entlang der 3 Schnittlinien in Längsrichtung dargestellt. An einigen Stellen konnte wegen nach dem Fräsen noch vorhandener Belagsreste bzw. Dichtungsbahn keine Belagsdicke bestimmt werden. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

*Tabelle 10.1-2: Zusammenfassung reale Belagsdicken*

	Chur, S3	Mitte, S2	Zürich, S1
Minimum (mm)	62	65	37
Maximum (mm)	101	85	57
Mittelwert (mm)	78	75	44
Anzahl fehlende Werte	7	4	2



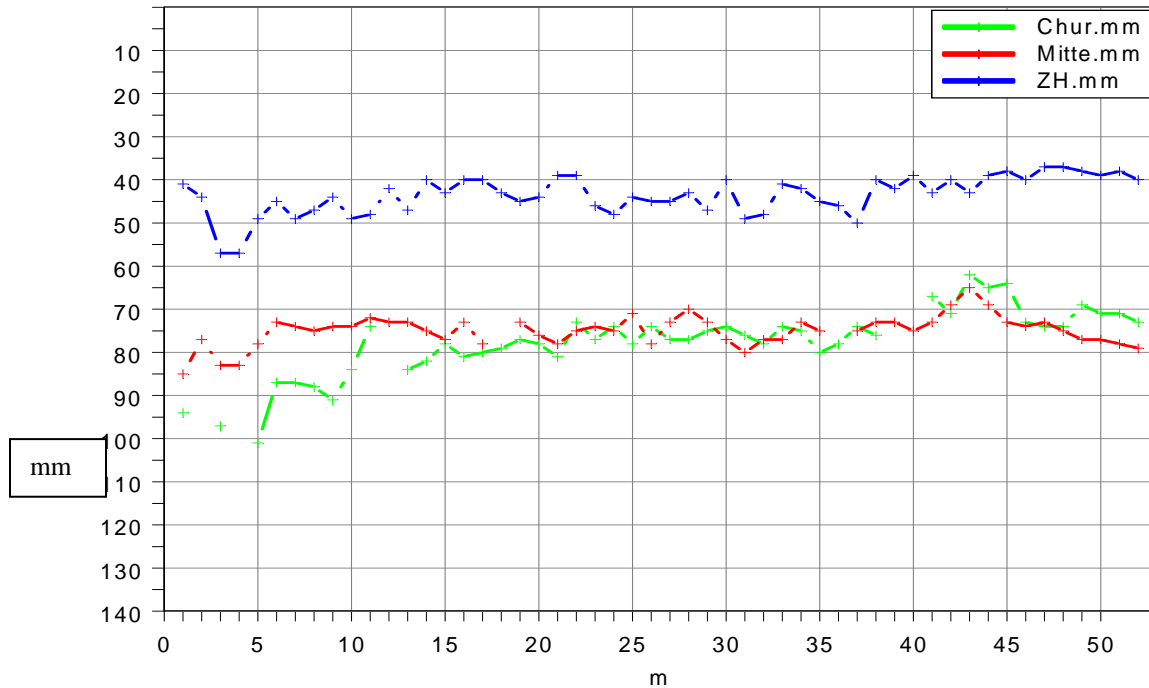


Abbildung 10.1.12: reale Belagsstärke

In einigen Bereichen zeigte der untere Teil des Belages an der Fräskante starke Kornablösungen. Eine Kartierung dieser Bereiche war aus Zeitgründen nicht möglich. Die *Abbildung 10.1.13* zeigt ein entnommenes Belagsstück, bei dem der untere Bereich leicht mit den Händen zu zerbröseln war. An anderen Stellen war der Belag über die gesamte Dicke mechanisch stabil. Eine entnommene Belagsprobe wurde an der EMPA untersucht. Nach heutiger Norm ergab sich dabei folgendes:

Anzahl Schichten: 2  
 Deckschicht: Typ AB6, Bindemittelgehalt 6.91 Masseprozent, Bindemittel teerhaltig  
 Ausgleichsschicht: Typ AB11, Bindemittelgehalt 4.79 Masseprozent, keine Hinweise auf Teergehalt



Abbildung 10.1.13: Belagsstück mit zerbröselter Schutzschicht AB11

### Ermittlung der tatsächlichen Eisenüberdeckung auf der Deponie

Nachdem die Brücke zersägt und auf der Deponie eingelagert worden war, wurde die Eisenüberdeckung an den eingelagerten Brückenteilen ausgemessen. Der Zugang zu einzelnen Stellen war durch die Art der Lagerung teilweise verunmöglicht, der überwiegende Teil konnte jedoch wie vorgesehen ausgemessen werden. Die *Abbildung 10.1.14* zeigt die auf der Deponie gelagerten Brückenteile, in *Abbildung 10.1.15* ist ein Abschnitt dargestellt. Während die Eisenüberdeckung der obersten Armierungslage in den 3 Sondierfenstern auf der Brücke stark variierte und teilweise lediglich 1 cm betrug, verlief sie in den zersägten Brückenteilen eher gleichmässig. Dies könnte darauf hinweisen, dass einzelne Eisen während des Sondiervorgangs nach oben verbogen wurden.



Abbildung 10.1.14: deponierte Brückenteile



Abbildung 10.1.15: vergrößerter Ausschnitt eines Schnittes

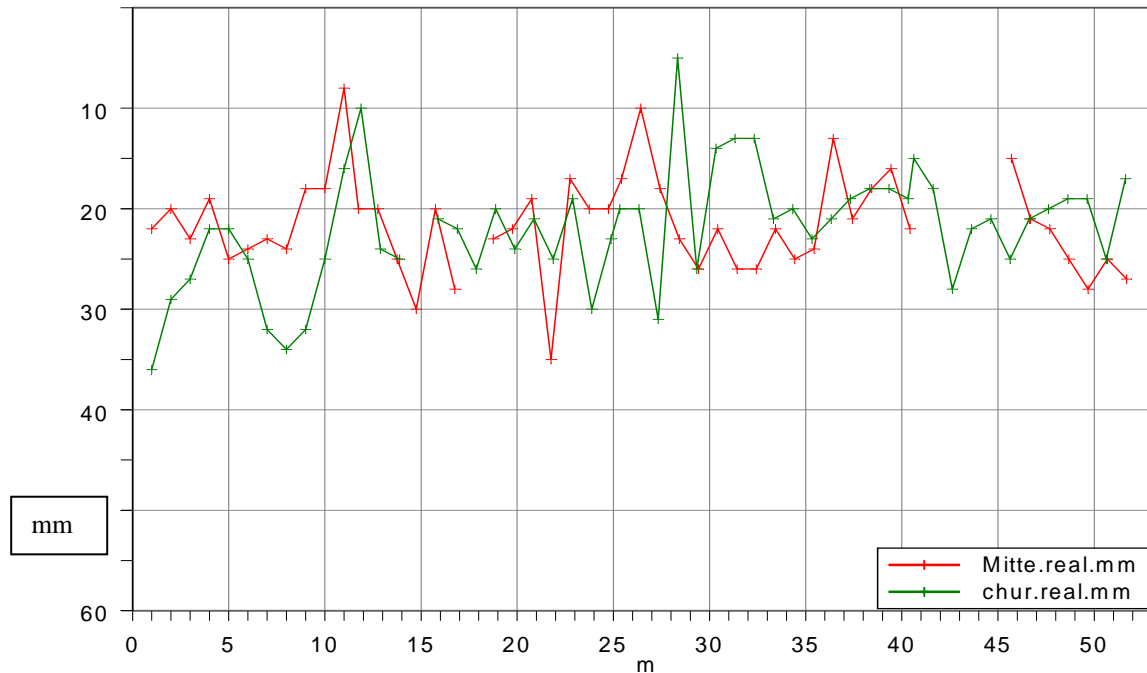


Abbildung 10.1.16: reale Eisenüberdeckung

Die Ergebnisse für die Eisenüberdeckung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Tabelle 10.1-3: Zusammenfassung Eisenüberdeckung real

	Chur, S3	Mitte, S2
Minimum (mm)	5	8
Maximum (mm)	36	35
Mittelwert (mm)	22	22
Anzahl fehlende Werte	3	8

## Vergleich Radar-Realität

### Belag

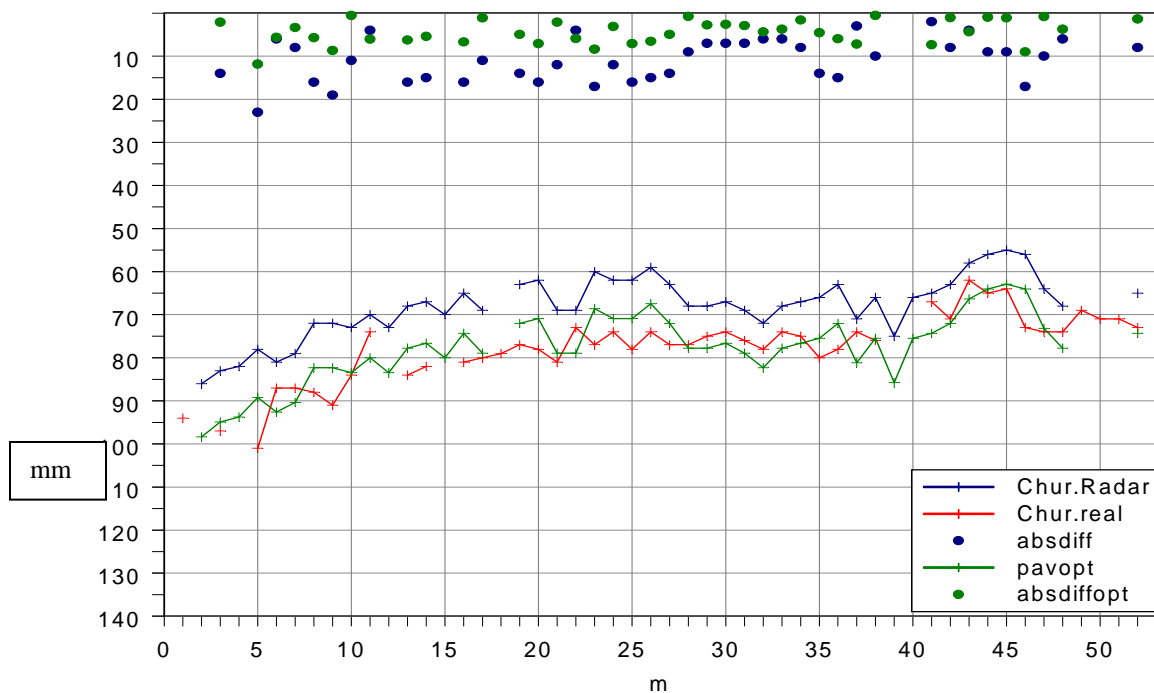
Die Radarergebnisse lagen in horizontalen Abständen von 5 cm vor, die tatsächliche Belagsdicke war im Abstand von jeweils einem Meter ausgemessen worden. Deshalb wurden die Radarergebnisse zunächst auf Meterabstände umgerechnet. Dabei wurde jeweils über 15 cm, d.h. drei Messpunkte gemittelt.

Für die Berechnung der Belagsdicken aus den Radardaten wurde eine konstante Ausbreitungsgeschwindigkeit des Radarsignals von  $v_{\text{Belag}} = 1.1 \cdot 10^8$  m/s verwendet.

### Spur Chur

Die *Abbildung 10.1.17* zeigt die Radarergebnisse (RE) für die Spur Chur (blaue Linie) zusammen mit den tatsächlichen Belagsdicken (TB) (rote Linie). Die RE zeigen zwar einen ähnlichen Verlauf wie die TB, die RE fallen jedoch über die gesamte Brückenlänge etwas zu gering aus. Die mittlere Abweichung zwischen RE und TB beträgt 11mm, die maximale Differenz 23mm. Die Differenzen an den einzelnen Vergleichspunkten sind in *Abb. 8* mit blauen Einzelpunkten dargestellt (absdiff). Da die RE durchwegs eine zu geringe Dicke aufweisen, deutet dies auf die Verwendung einer zu geringen Ausbreitungsgeschwindigkeit des Radarsignals bei der Umrechnung der Laufzeiten in Dicken hin. Auf der Spur Chur stand ein Kalibrierfenster bei 15.0m ab Fahrbahnübergang See zur Verfügung. Die Belagsdicke betrug dort zwischen 72mm und 83mm. Das Radarergebnis bei 15.0m liegt bei lediglich 70mm, also ausserhalb des Dickenbereiches der Sondierung. Dies wurde während der Kalibrierung in Kauf genommen, um für den gesamten Brückenbelag die gleiche Ausbreitungsgeschwindigkeit verwenden zu können.

Um das Ergebnis unabhängig von der Kalibrierproblematik beurteilen zu können wurde  $V_{opt}$  als Geschwindigkeit berechnet, bei der die mittlere Abweichung zwischen RE und TB minimal wird. Mit  $V_{opt} = 1.26 \cdot 10^8$  m/s ergibt sich das in *Abbildung 8* als grüne Linie (pavopt) dargestellte Ergebnis. Die entsprechenden Differenzen zur Realität sind mit grünen Punkten (absdiffopt) gekennzeichnet. Der mittlere Fehler reduziert sich auf 4mm, der maximale auf 12 mm.

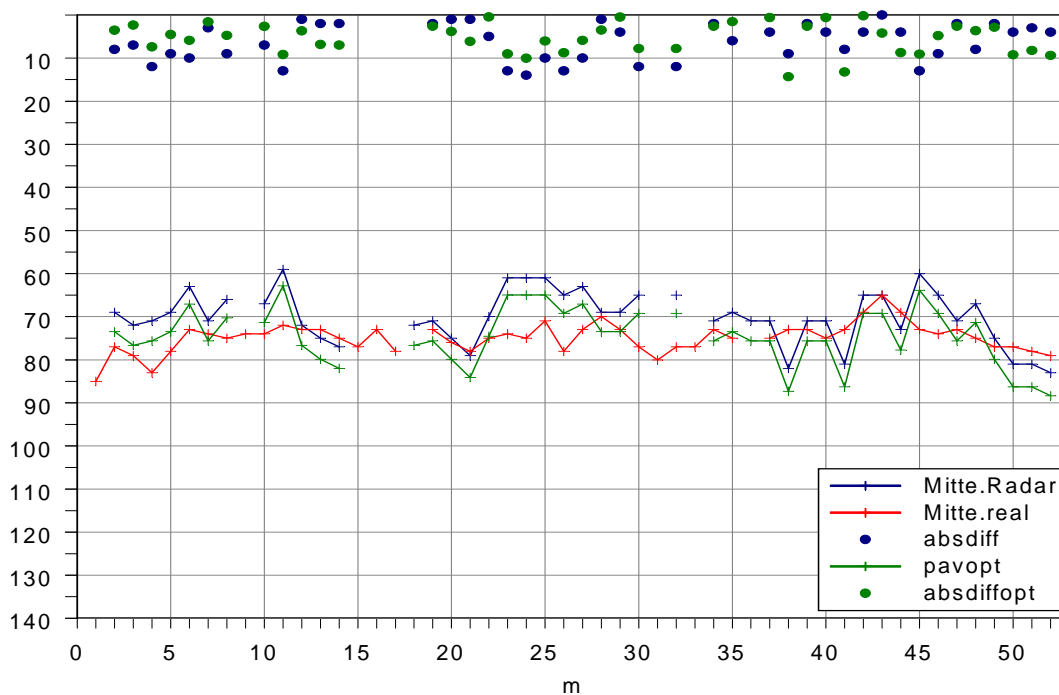


*Abbildung 10.1.17: Radarergebnis und Realität für die Asphalt dicke auf der Spur Chur, S3*

### Spur Mitte

Die *Abbildung 10.1.18* zeigt die Radarergebnisse (RE) für die Spur Mitte (blaue Linie) zusammen mit den tatsächlichen Belagsdicken (TB) (rote Linie). Die mittlere Abweichung zwischen RE und TB beträgt 6mm, die maximale Differenz 14mm. Die Differenzen an den einzelnen Vergleichspunkten sind in *Abbildung 9* mit blauen Einzelpunkten (absdiff) dargestellt. Im Gegensatz zur Spur Chur ist keine offensichtliche Abweichung der RE nach oben oder unten erkennbar. Auf der Spur Mitte standen zwei Kalibrierfenster bei 18.0m und 36.0m ab Fahrbahnübergang See zur Verfügung. Die Belagsdicken betragen dort zwischen 68mm und 74mm bei 18.0m und zwischen 70mm und 73mm bei 36.0m. Die RE an den Sondierstellen liegen mit 72mm und 71mm jeweils innerhalb dieser Bereiche.

Die Berechnung von  $V_{opt}$  ergab  $V_{opt} = 1.17 \cdot 10^8$  m/s. Damit ergibt sich das in *Abbildung* als grüne Linie dargestellte Ergebnis (pavopt). Die entsprechenden Differenzen zur Realität sind mit grünen Punkten (absdiffopt) gekennzeichnet. Der mittlere Fehler reduziert sich auf 5mm, der maximale bleibt unverändert bei 14 mm.



*Abbildung 10.1.18: Radarergebnis und Realität für die Asphaltstärke auf der Spur Mitte, S2*

### Eisenüberdeckung

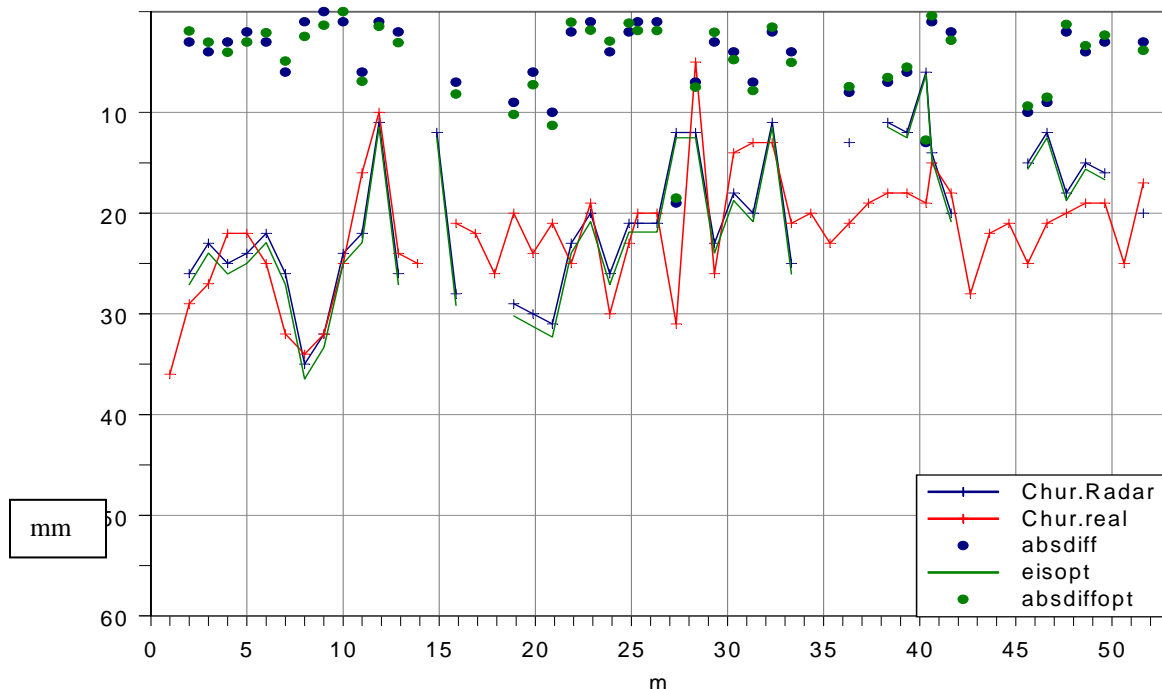
Die Radarergebnisse lagen in horizontalen Abständen von 5 cm vor, die tatsächliche Eisenüberdeckung war im Abstand von jeweils einem Meter ausgemessen worden. Deshalb wurden die Radarergebnisse zunächst auf die Positionen umgerechnet, an denen die Eisenüberdeckung ausgemessen worden war. Dabei wurde jeweils über 15 cm, d.h. drei Messpunkte gemittelt.

Für die Berechnung der Eisenüberdeckung aus den Radardaten wurde eine konstante Ausbreitungsgeschwindigkeit des Radarsignals von  $v_{Beton} = 1.0 \cdot 10^8$  m/s verwendet.

### Spur Chur

Die *Abbildung 10.1.19* zeigt die Radarergebnisse (RE) für die Spur Chur (blaue Linie) zusammen mit den tatsächlichen Eisenüberdeckungen (TE) (rote Linie). Die mittlere Abweichung zwischen RE und TE beträgt 5mm, die maximale Differenz 19mm. Die Differenzen an den einzelnen Vergleichspunkten sind in *Abb. 10* mit blauen Einzelpunkten (absdiff) dargestellt. Es ist keine offensichtliche Abweichung der RE nach oben oder unten erkennbar. Auf der Spur Chur stand ein Kalibrierfenster bei 15.0m ab Fahrbahnübergang See zur Verfügung. Die Eisenüberdeckung betrug dort zwischen 10mm und 20mm. Das Radarergebnis bei 14.88m beträgt 12mm und liegt somit im durch die Sondierung vorgegebenen Bereich.

Die Berechnung von  $V_{opt}$  ergab  $V_{opt} = 1.04 \cdot 10^8$  m/s. Damit ergibt sich das in *Abbildung* als grüne Linie (eisopt) dargestellte Ergebnis. Die entsprechenden Differenzen zur Realität sind mit grünen Punkten (absdiffopt) gekennzeichnet. Der mittlere Fehler bleibt bei 5mm, der maximale reduziert sich auf 18mm.



*Abbildung 10.1.19: Radarergebnis und Realität für die Eisenüberdeckung auf der Spur Chur, S3*

### Spur Mitte

Die *Abbildung 10.1.20* zeigt die Radarergebnisse (RE) für die Spur Mitte (blaue Linie) zusammen mit den tatsächlichen Eisenüberdeckungen (TE) (rote Linie). Die mittlere Abweichung zwischen RE und TE beträgt 5mm, die maximale Differenz 14mm. Die Differenzen an den einzelnen Vergleichspunkten sind in *Abb. 11* mit blauen Einzelpunkten (absdiff) dargestellt. Es ist keine offensichtliche Abweichung der RE nach oben oder unten erkennbar. Auf der Spur Mitte standen zwei Kalibrierfenster bei 18.0m und 36.0m ab Fahrbahnübergang See zur Verfügung. Die Eisenüberdeckungen betrug dort zwischen 10mm und 33mm bei 18.0m und 10mm und 25mm bei 36.0m. Das Radarergebnis beträgt bei 17.75m 25mm und liegt somit im Rahmen des durch das Sondierfenster vorgegebenen Bereiches, bei 36.43m beträgt das Radarergebnis 10mm und liegt damit am unteren Ende.

Die Berechnung von  $V_{opt}$  ergab  $V_{opt} = 0.98 \cdot 10^8$  m/s. Damit ergibt sich das in Abbildung als grüne Linie (eisopt) dargestellte Ergebnis. Der mittlere Fehler bleibt bei 5mm, der maximale reduziert sich auf 13mm.

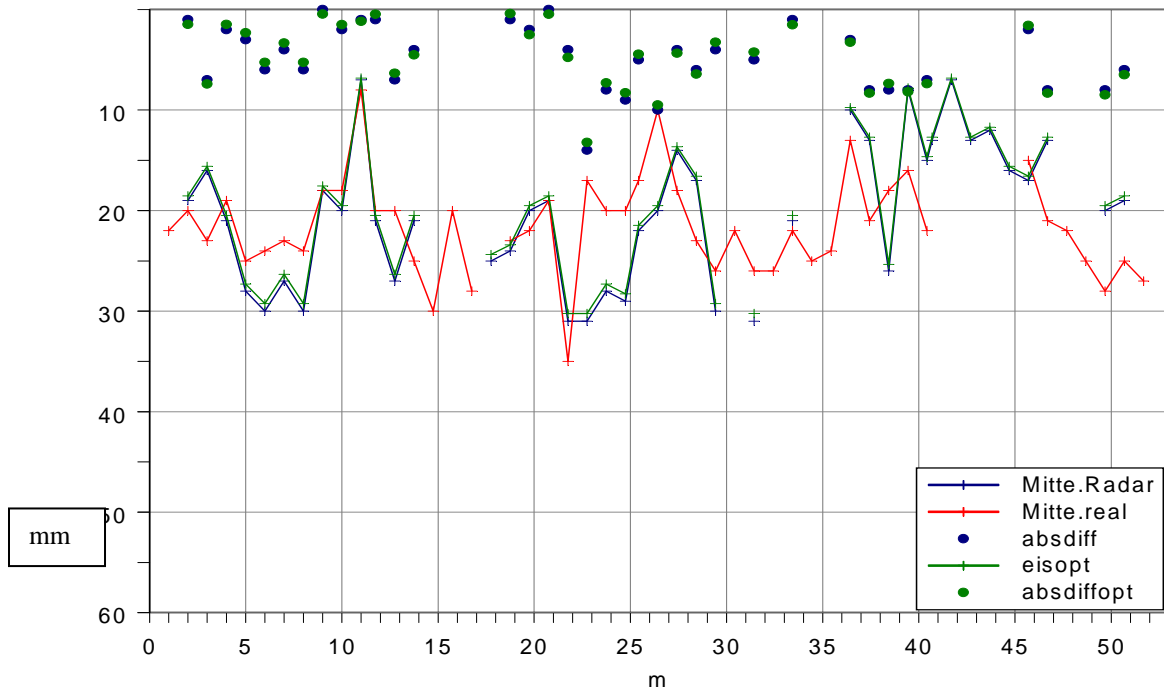


Abbildung 10.1.20: Radarergebnis und Realität für die Eisenüberdeckung auf der Spur Chur

### Die Radardaten im Detailausschnitt

Die *Abbildung 1.1.1* zeigt einen Ausschnitt aus dem Datensatz der Spur Chur. Die beiden als Obergrenze Beton und oberste Armierungslage ausgewerteten Reflexionen sind mit Pfeilen (rot=OG Beton, schwarz=Armierung) eingezeichnet. Eine aus dem Belag stammende Reflexion (gelber Pfeil) ist deutlich stärker als das Signal von der Betonoberfläche. Die drei genannten sowie diverse weitere Reflexionen überlagern sich gegenseitig. Die Auswertung der Daten war unter diesen Umständen stark erschwert.

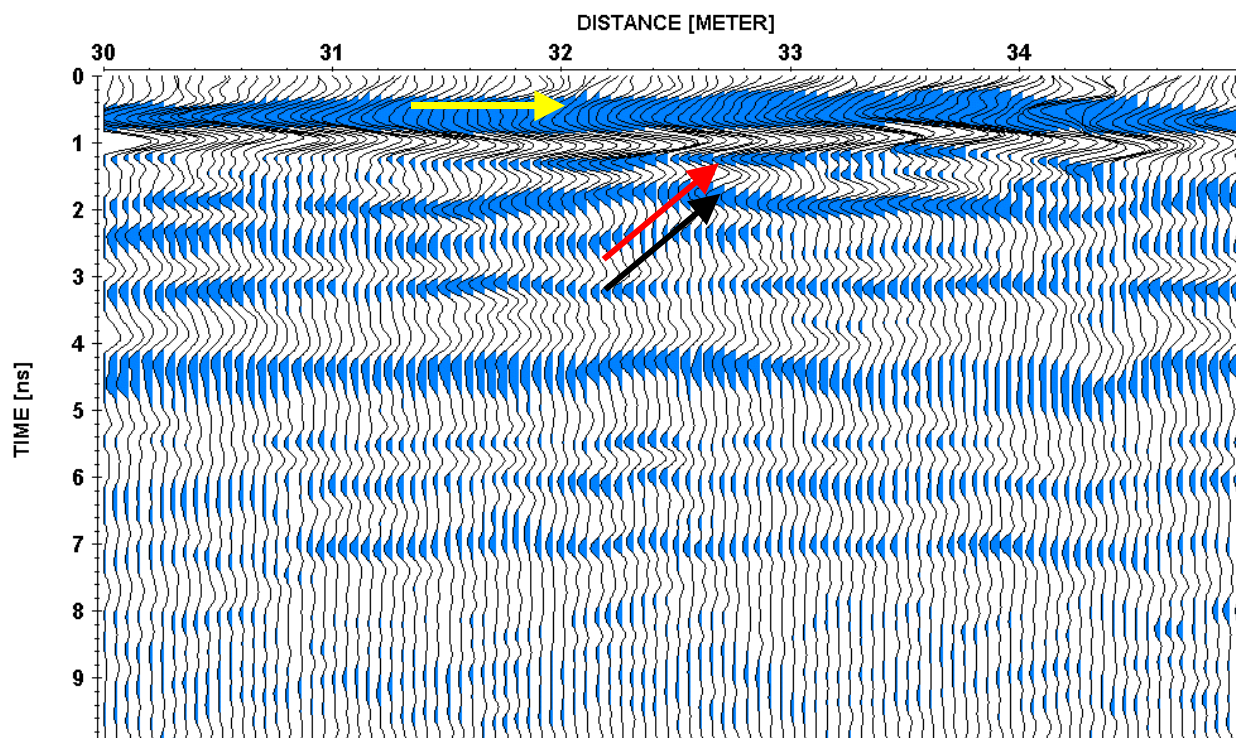


Abbildung 10.1.21: Ausschnitt aus dem Datensatz Spur Chur

## Schlussfolgerungen

Die Qualität der Radardaten ist deutlich schlechter als bei anderen, bisher von der EMPA durchgeführten Brückenuntersuchungen.

Die Gründe für die schlechte Datenqualität liegen nach heutiger Erkenntnis in den stark variierenden Belageigenschaften (Kornablösungen) und insbesondere in der Tatsache, dass entlang der Linien gemessen wurde, an denen die Brücke beim Bau zusammengefügt wurde. Durch die zusätzliche Bewehrung und das Vorhandensein von Ortsbeton und vorgefertigtem Beton ergeben sich zusätzliche Reflexionen, die die Auswertung stark erschweren. Ausserdem überlagern sich verschiedene Reflexionen, wodurch die Auswertung zusätzlich erschwert wurde.

Der Vergleich zwischen Radarergebnissen für den Belag und der Realität ergibt auf der Spur Chur einen mittleren Fehler von 11mm bei Verwendung einer Signalgeschwindigkeit von  $1.1 \cdot 10^8$  m/s. Dieser Fehler kann durch Verwendung einer Signalgeschwindigkeit von  $1.26 \cdot 10^8$  m/s auf 4mm reduziert werden.

Auf der Spur Mitte ergibt sich für den Belag bei Verwendung einer Signalgeschwindigkeit von  $1.1 \cdot 10^8$  m/s ein mittlerer Fehler von 6mm. Dieser Fehler kann durch Verwendung einer Signalgeschwindigkeit von  $1.17 \cdot 10^8$  m/s lediglich geringfügig auf 5mm reduziert werden.

Aus den Punkten 3 und 4 folgt, dass die sich Ausbreitungsgeschwindigkeit des Radarsignals im Belag auf beiden Spuren unterscheidet. Unter der Annahme, dass diejenigen Geschwindigkeiten, welche die beste Übereinstimmung zwischen Radar und der Realität



ergeben auch den tatsächlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten entsprechen, ergibt sich eine Differenz von  $0.09 \cdot 10^8$  m/s. Möglicherweise ist diese Differenz auf eine unterschiedliche Nachverdichtung durch Überfahren während der Nutzungszeit der Brücke zurückzuführen.

Für die Eisenüberdeckung variiert die Übereinstimmung zwischen Radarergebnissen und Realität innerhalb der beiden Spuren recht stark. Die mittlere Differenz beträgt für beide Spuren 5mm und kann durch Anpassung der Signalgeschwindigkeit nicht signifikant verbessert werden.

## 10.2 Rampe Sihlhochstrasse

### Technische Daten

Die folgenden Informationen wurden den von der Bauleitung Sihlhochstrasse zur Verfügung gestellten Unterlagen entnommen.

Tabelle 10.2-1: Technische Daten

Objektname	Hilfsbrücke Sihlhölzli
Kanton	Zürich
Standort, Gemeinde	Zürich
Hindernis	Keines, Auffahrt zur Sihlhochstrasse
Brückentyp	Verbundbrücke
Vorspannung	keine
Gesamtlänge	224.162 m
Gesamtbreite	8.05 m
Gesamtoberfläche	1804.5 m <sup>2</sup>
Abdichtung	keine
Baujahr	1999
Abbruch	2002
Abbruchgrund	Temporäres Bauwerk, wegen fortgeschrittener Arbeiten an der Sihlhochstrasse nicht mehr benötigt

## Planausschnitte

Die folgenden Pläne wurden den von der Bauleitung Sihlhochstrasse zur Verfügung gestellten Unterlagen entnommen. Die Planausschnitte sind nicht masstabgerecht wiedergegeben.

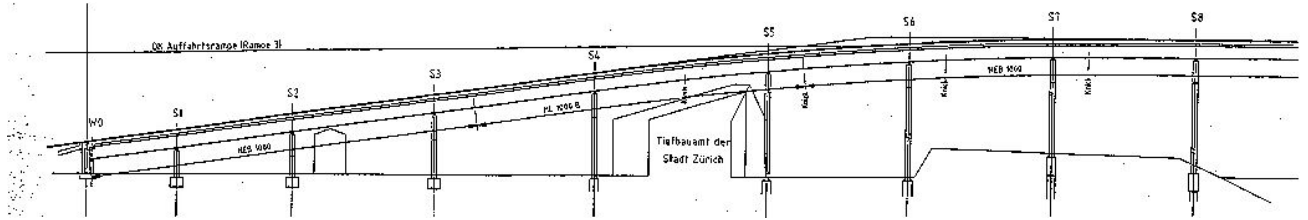


Abbildung 10.2.1: Längsschnitt

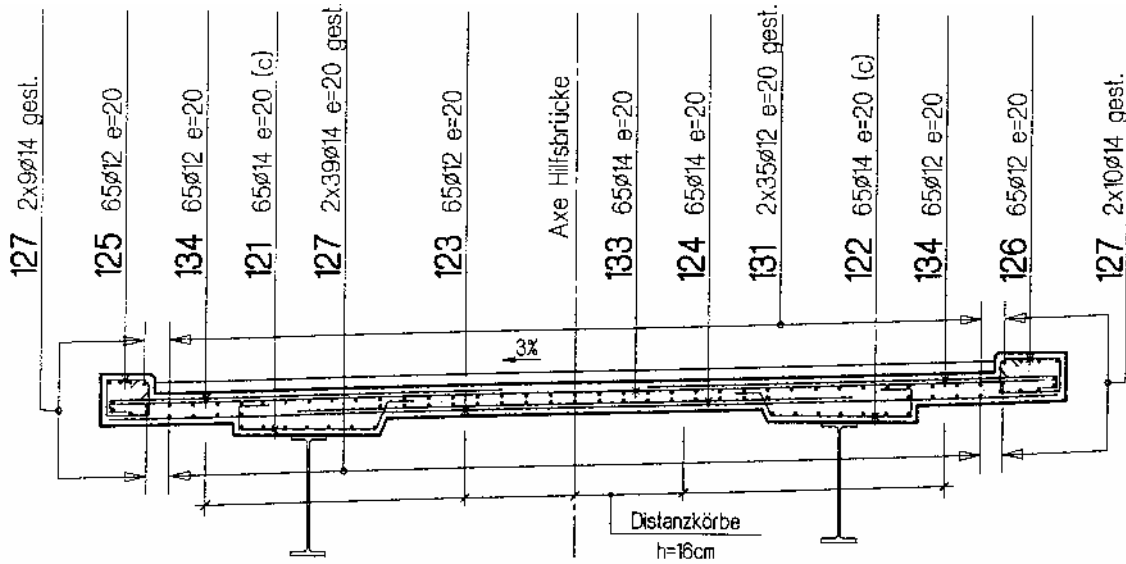


Abbildung 10.2.2: Querschnitt

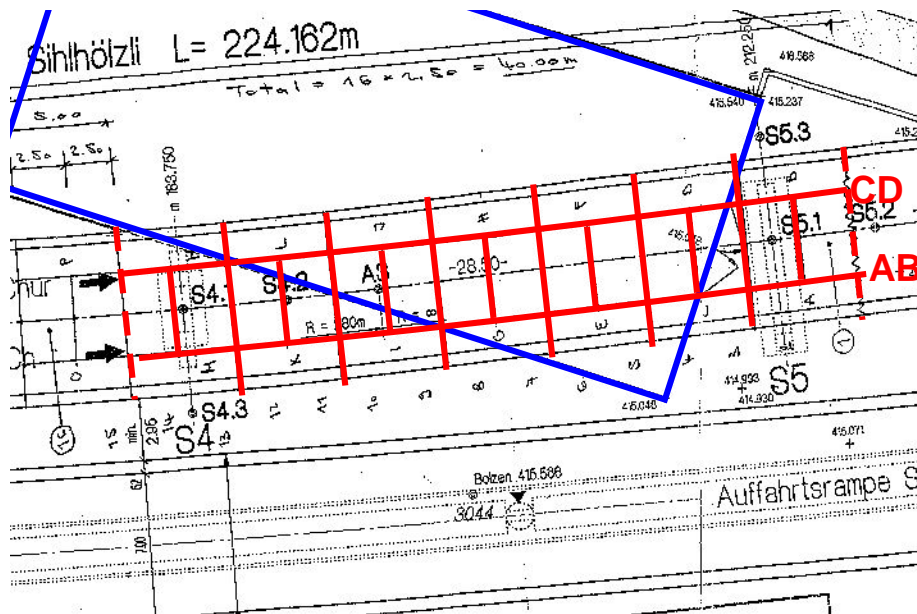


Abbildung 10.2.3: Draufsicht mit Position der Schnittlinien A-D (rot)

In *Abbildung 10.2.3* ist die Position der Schnittlinien dargestellt. Lediglich ein Brückenteil von ca. 40 m Länge im Bereich eines Gebäudes (blau) wurde beim Abbruch geschnitten. Die restlichen Brückenabschnitte wurden zerbissen. Die mit AB und CD bezeichneten längs verlaufenden Linien bestehen jeweils aus zwei Schnitten, da auf beiden Seiten des Metallprofils (*Abbildung 10.2.6*) geschnitten wurde.

## Photos



Abbildung 10.2.4: Hilfsbrücke Sihlhölzli



Abbildung 10.2.5: Fahrbahn



*Abbildung 10.2.6: Brücke von unten betrachtet*

## Radardaten

1. C:\EmpaDaten\Reflexdaten\zsih\PROC DATA\ZSIHL2\_\_04T / traces: 1594 / samples: 520

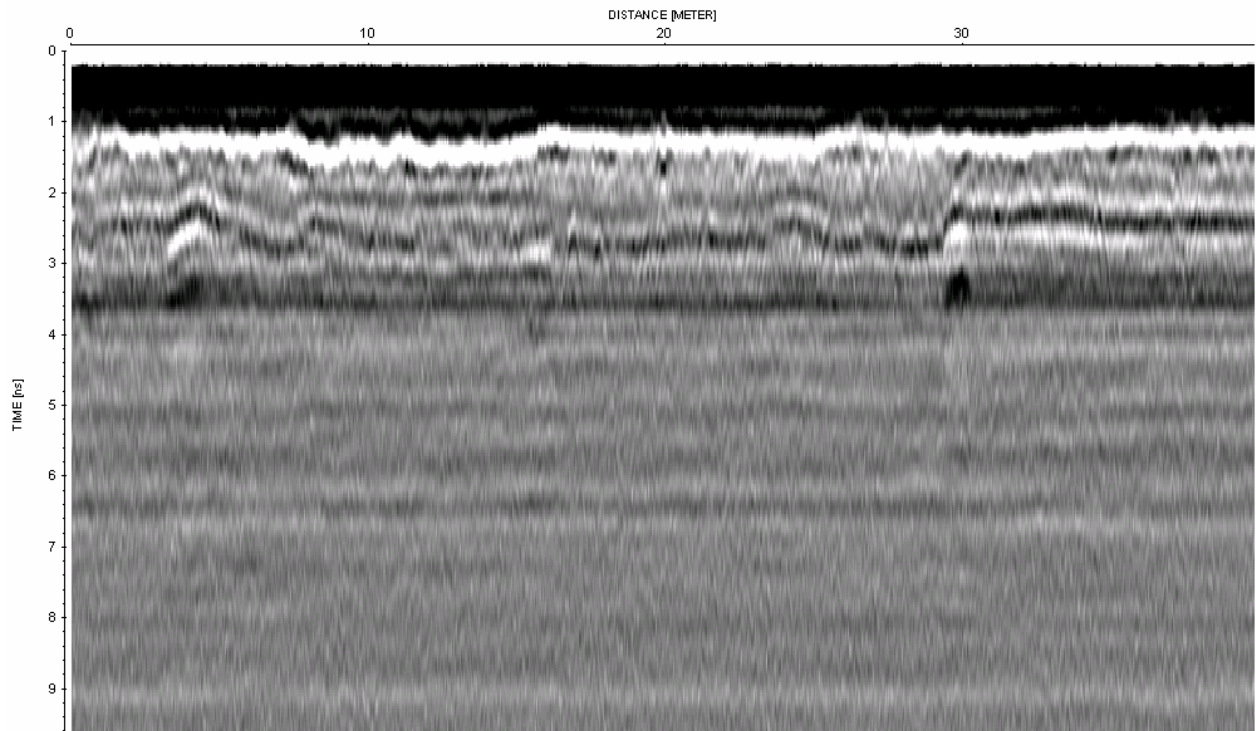


Abbildung 10.2.7: Radardaten der Linie A, Antennen quer montiert

1. C:\EmpaDaten\Reflexdaten\zsih\PROC DATA\ZSIHL1\_\_04T / traces: 1594 / samples: 518

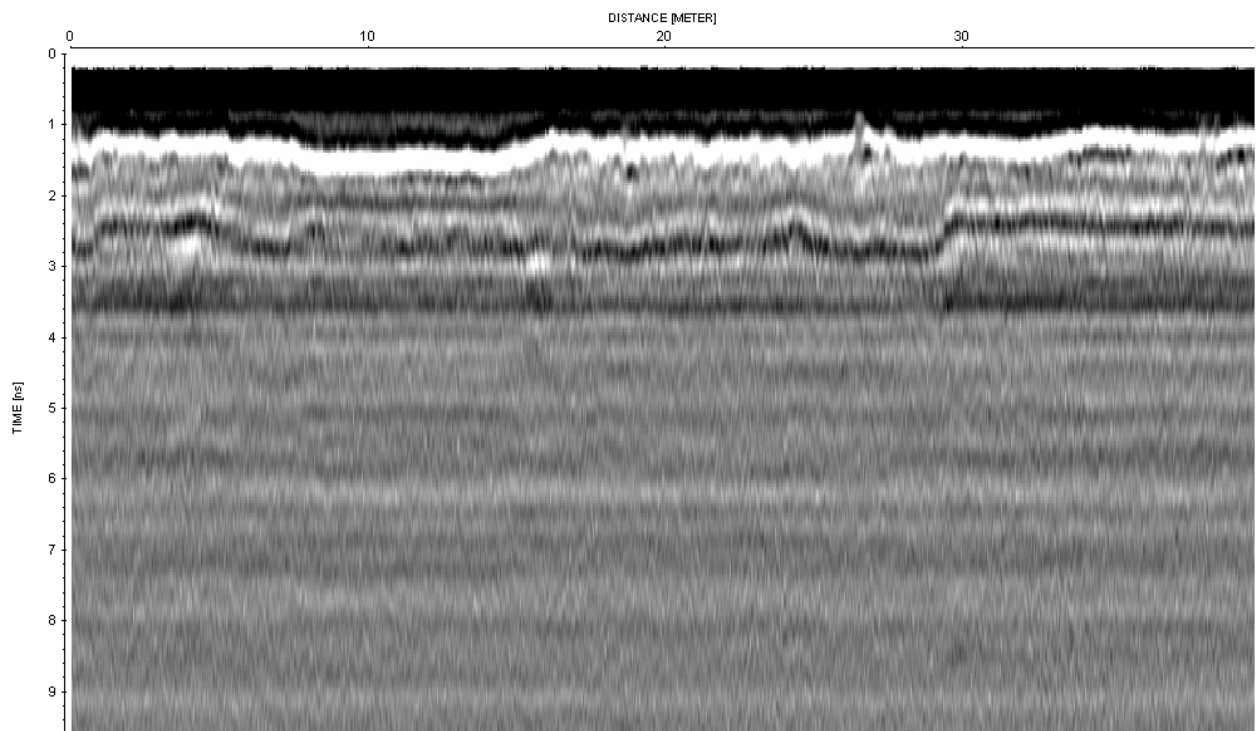


Abbildung 10.2.8: Radardaten der Linie B, Antennen quer montiert

1. C:\EmpaDaten\Reflexdaten\zsihl\PROCDATA\ZSIHL4\_\_04T / traces: 1584 / samples: 521

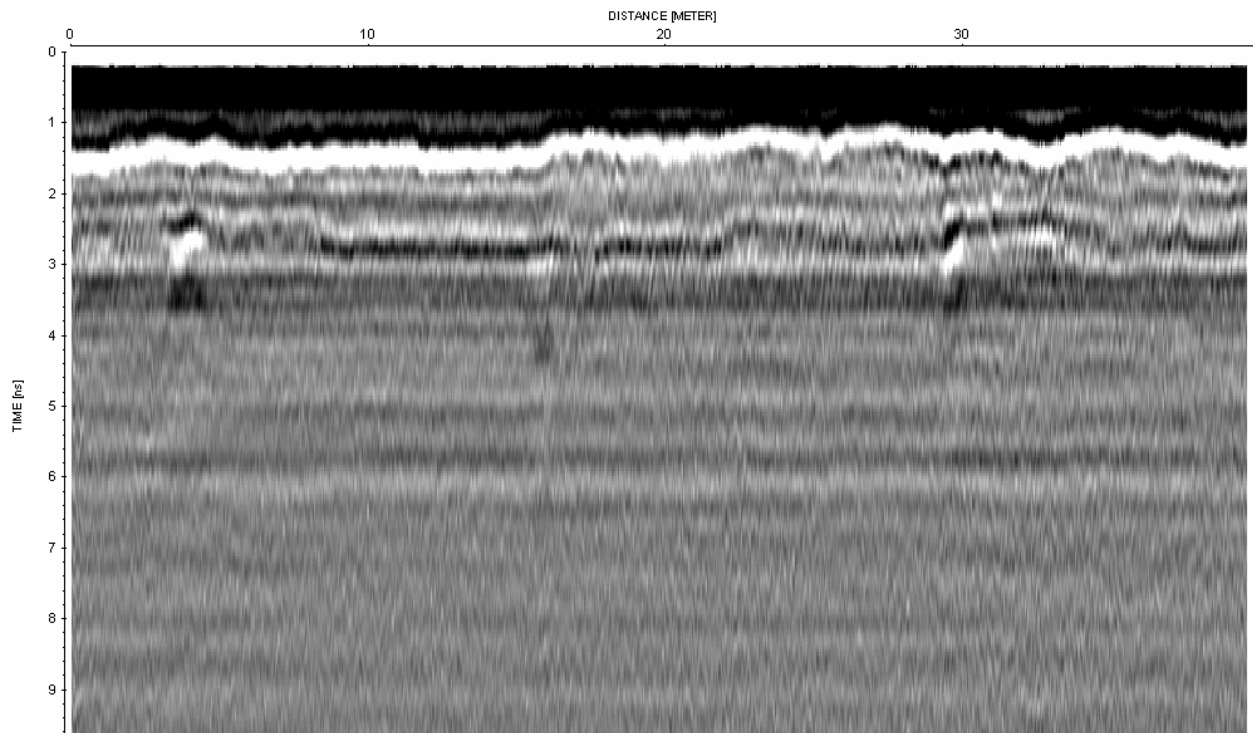


Abbildung 10.2.9: Radardaten der Linie C, Antennen quer montiert

1. C:\EmpaDaten\Reflexdaten\zsihl\PROCDATA\ZSIHL3\_\_04T / traces: 1584 / samples: 521

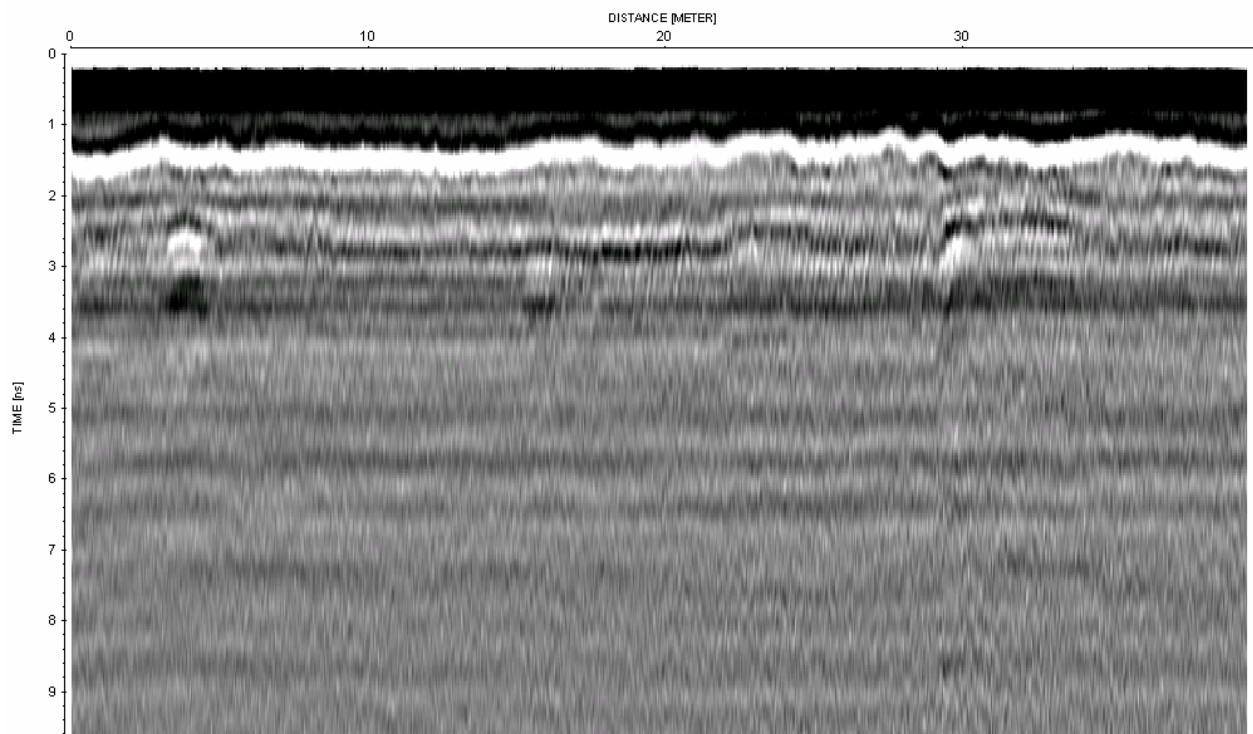


Abbildung 10.2.10: Radardaten der Linie D, Antennen quer montiert

1. C:\EmpaDaten\Reflexdaten\zsih\PROC DATA\ZSIHL6\_\_04T / traces: 1584 / samples: 520

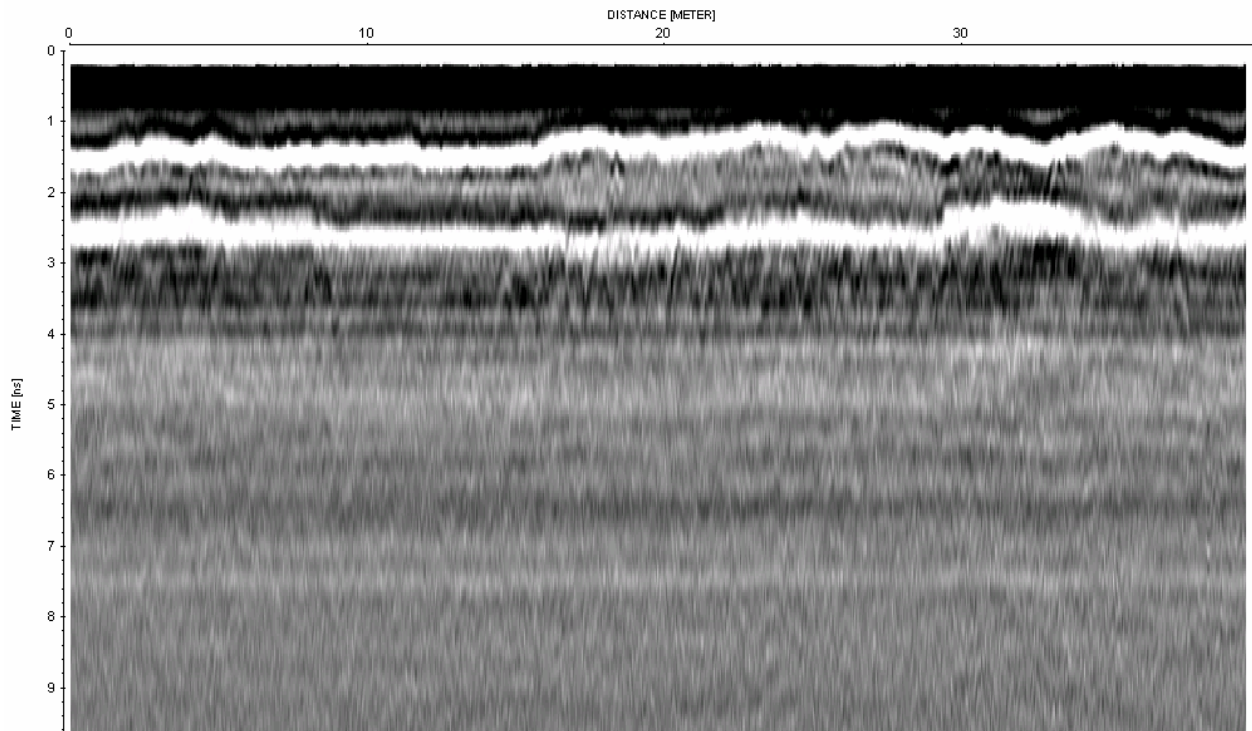


Abbildung 10.2.11: Radardaten der Linie C, Antennen längs montiert

1. C:\EmpaDaten\Reflexdaten\zsih\PROC DATA\ZSIHL5\_\_04T / traces: 1584 / samples: 521

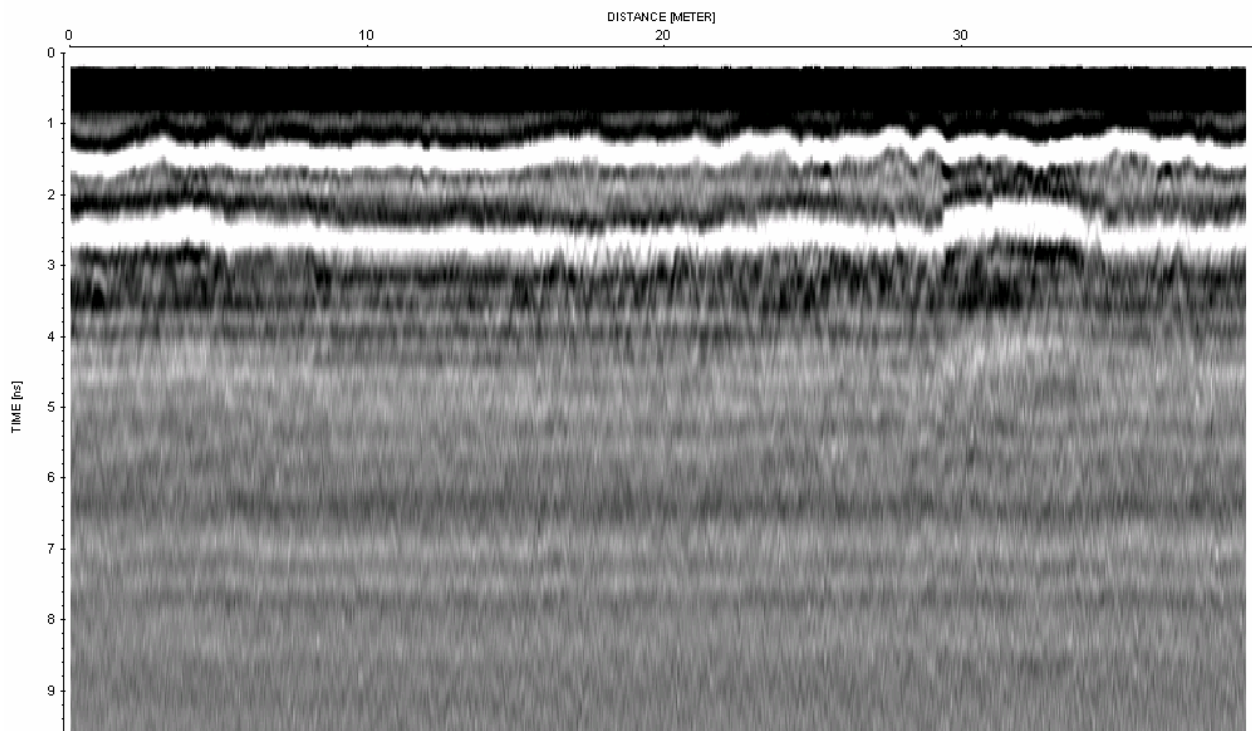


Abbildung 10.2.12: Radardaten der Linie D, Antennen längs montiert

## Bestimmung der tatsächlichen Belagsstärke

Am 13. August 2002 wurde der Belag zwischen den Linien AB und CD mit einem Baggerzahn geöffnet (*Abbildung 10.2.13, Abbildung 10.2.14*). Vorher waren entlang der mit Georadar untersuchten Linien jeweils im Abstand von einem Meter Markierungen aufgesprüht worden. Während des Öffnens wurde die Belagsdicke an den markierten Stellen ausgemessen. Aufgrund der Breite der Belagsöffnung wurde für die Linien AB und CD jeweils nur einmal geöffnet.

Es stellte sich heraus, dass es dem Baggerführer nicht möglich war entlang der Ideallinie, d.h. genau zwischen den beiden Schnittlinien zu öffnen (*Abbildung 10.2.14*). Die Abweichungen betragen ca. maximal 0.2m. Dies sollte aber kein Problem darstellen, da eventuelle Unterschiede in der Belagsdicke zwischen der idealen und der tatsächlich geöffneten Linie äusserst gering sein dürften.



*Abbildung 10.2.13: Öffnen des Belages*



*Abbildung 10.2.14: Abweichung von der Ideallinie*

Teilweise entfernte der Baggerzahn nicht nur den Belag, sondern frass sich zusätzlich in die Betonoberfläche (*Abbildung 10.2.15*). Die Photo der *Abbildung 10.2.15* wurde nach der kompletten Entfernung des Belages aufgenommen und zeigt deutlich die abgetragene Betonoberfläche. Dies wurde beim Ausmessen der Belagsdicken, soweit möglich, berücksichtigt. Es kann jedoch nicht vollkommen ausgeschlossen werden, dass vereinzelt zu grosse Dicken gemessen wurden.

Während der Belagsöffnung herrschte trockene Witterung und die Strassenoberfläche war ebenfalls trocken. Dennoch füllten sich die Belagsschlitze relativ schnell mit ca. 1-2cm Wasser (*Abbildung 10.2.16*).





Abbildung 10.2.15: durch Baggerzahn abgetragener Beton



Abbildung 10.2.16: Wasser im Belagsschlitz

In *Abbildung 10.2.17* sind die ermittelten Belagsdicken entlang der Linien AB und CD dargestellt. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

*Tabelle 10.2-2: Zusammenfassung reale Belagsdicke*

	<b>Linie AB</b>	<b>Linie CD</b>
Minimum (mm)	81	75
Maximum (mm)	117	114
Mittelwert (mm)	96	95
Anzahl fehlende Werte	0	0

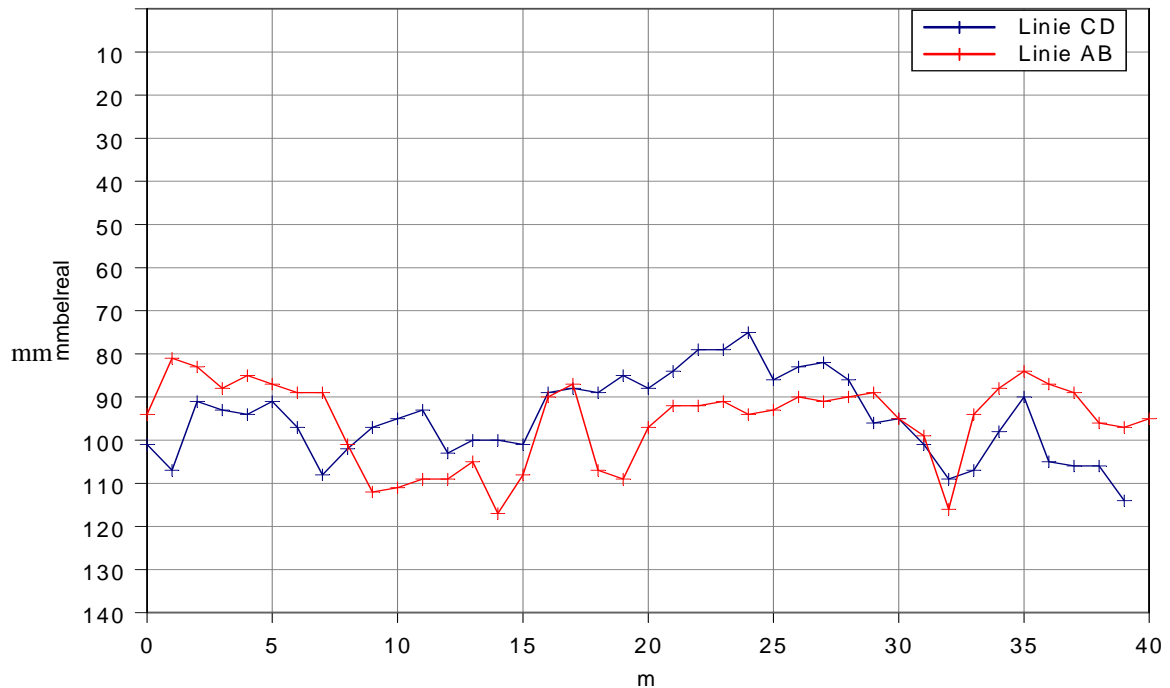


Abbildung 10.2.17: tatsächliche Belagsdicken

Während des Belagsabbruches wurden mehrere Belagsproben sichergestellt. Eine dieser Proben zeigt die Abbildung 10.2.18. Eine Untersuchung an der EMPA ergab folgendes:

Tabelle 10.2-3: Ergebnis der Laboruntersuchung

Anzahl Schichten: 2	Schicht 1 (oben)	Schicht 2 (unten)
Dicke	50 mm	29 mm
Dichte	2.519 t/m <sup>3</sup>	2.511 t/m <sup>3</sup>
Rohdichte	2.401 t/m <sup>3</sup>	2.359 t/m <sup>3</sup>
Hohlraumgehalt	4.68 %	6.06 %
Lösl. Bindemittelanteile	4.92 %	4.44 %



Abbildung 10.2.18: Belagsprobe

### **Bestimmung der tatsächlichen Eisenüberdeckung**

Im September und Oktober 2002 wurde der zu sägende Teil der Hilfsbrücke entlang der vorgesehenen Linien geschnitten (Abbildung 10.2.19). Die gesägten Brückenteile wurden jeweils für einige Tage auf dem noch vorhandenen Brückenabschnitt gelagert (Abbildung 10.2.20). Mit Unterstützung der Bauleitung Sihlhochstrasse wurden dort jeweils in Abständen von einem Meter die Eisenüberdeckungen für alle drei Armierungslagen, die Durchmesser der dem Messpunkt am nächsten liegenden Eisen sowie die lokale Maschenweite bestimmt.



Abbildung 10.2.19: Betonabbruch



Abbildung 10.2.20: auf der Brücke abgelegte Brückenteile

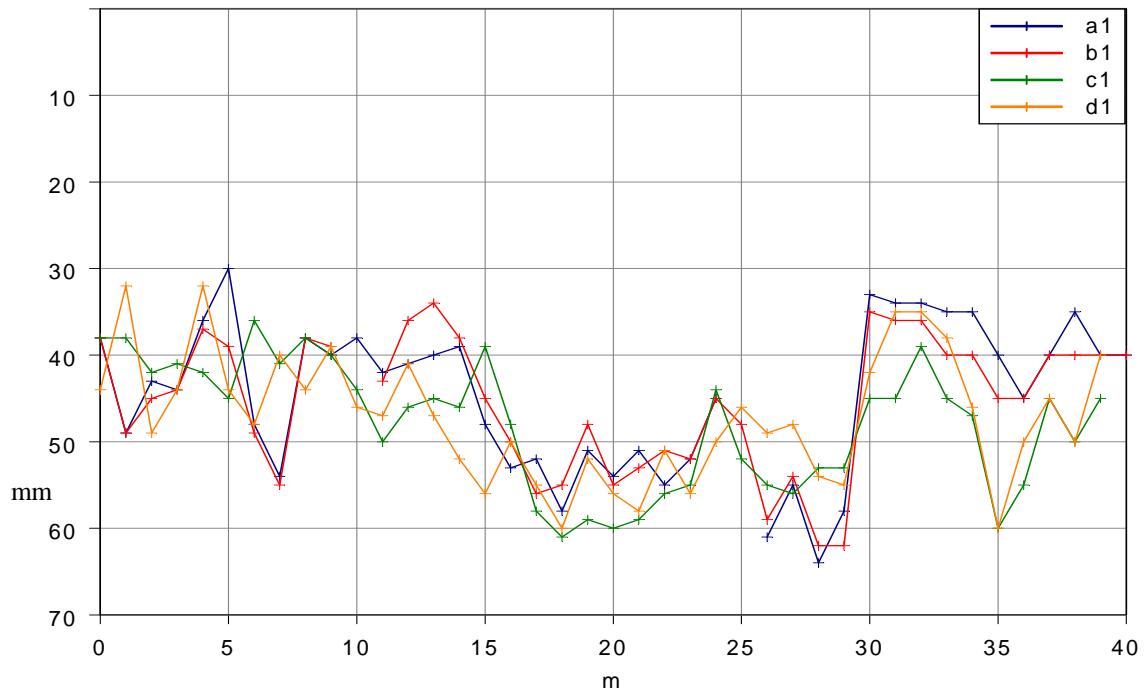


Abbildung 10.2.21: Eisenüberdeckung der 1. Bewehrungslage

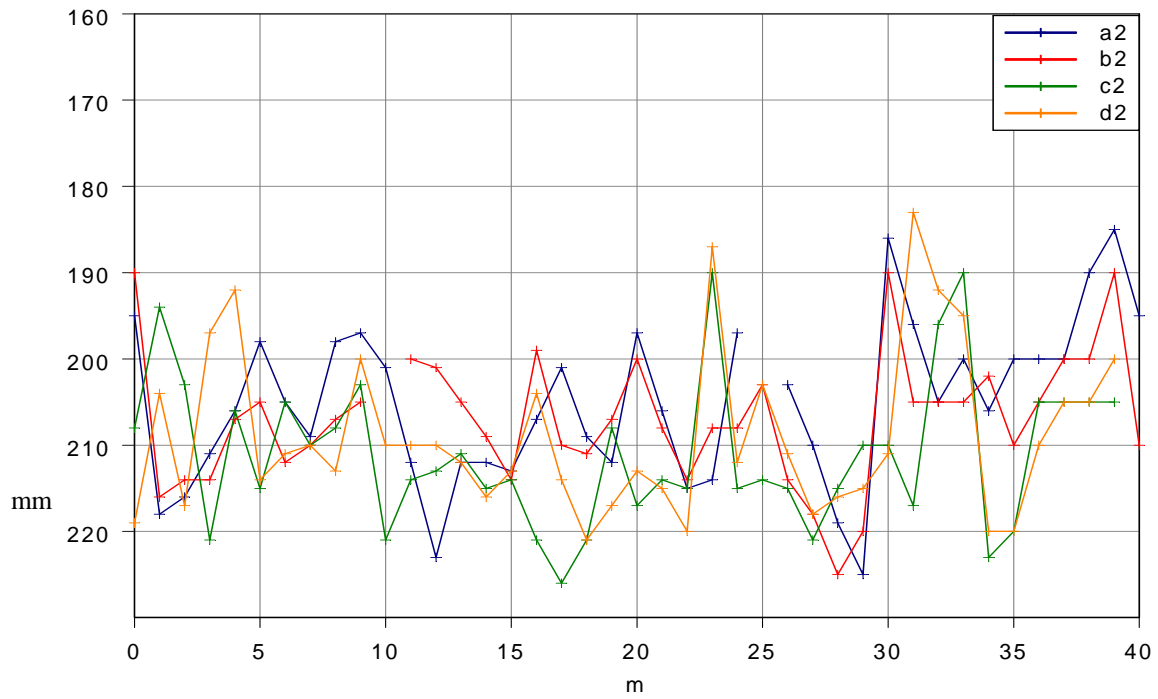


Abbildung 10.2.22: Eisenüberdeckung der 2. Bewehrungslage

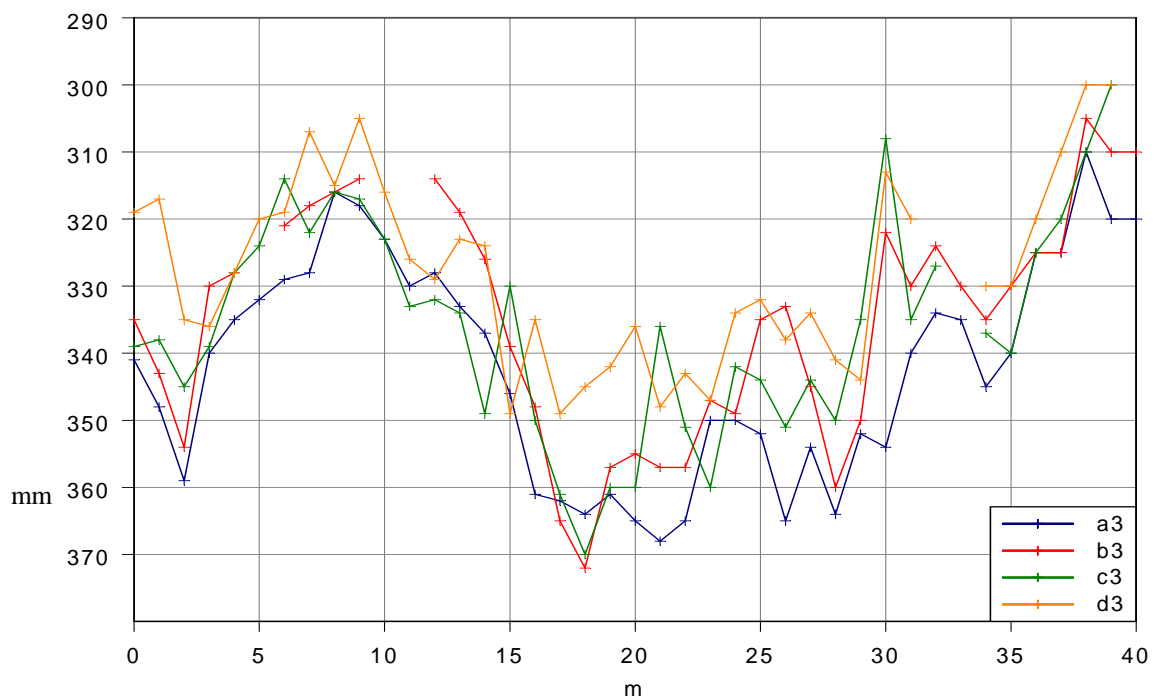


Abbildung 10.2.23: Eisenüberdeckung der 3. Bewehrungslage

Die Ergebnisse für die Eisenüberdeckungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

*Tabelle 10.2-4: Zusammenfassung Eisenüberdeckung*

<b>1. Bewehrungslage</b>	Linie A	Linie B	Linie C	Linie D
Minimum (mm)	30	34	36	32
Maximum (mm)	64	62	61	60
Mittelwert (mm)	45	45	48	47
<b>2. Bewehrungslage</b>	Linie A	Linie B	Linie C	Linie D
Minimum (mm)	185	190	190	183
Maximum (mm)	225	225	226	221
Mittelwert (mm)	205	207	211	209
<b>3. Bewehrungslage</b>	Linie A	Linie B	Linie C	Linie D
Minimum (mm)	185	190	190	183
Maximum (mm)	225	225	226	221
Mittelwert (mm)	205	207	211	209

## Vergleich Radar-Realität

### Belag

Die Radarergebnisse lagen in horizontalen Abständen von 2.5 cm vor, die tatsächliche Belagsdicke war im Abstand von jeweils einem Meter ausgemessen worden. Deshalb wurden die Radarergebnisse zunächst auf Meterabstände umgerechnet. Dabei wurde jeweils über 15 cm, d.h. sechs Messpunkte gemittelt.

Für die Berechnung der Belagsdicken aus den Radardaten wurde eine konstante Ausbreitungsgeschwindigkeit des Radarsignals von  $v_{\text{Belag}} = 1.4339 \cdot 10^8$  m/s verwendet.

Die *Abbildung 10.2.24* und die *Abbildung 10.2.27* zeigen einen Vergleich zwischen den Radarergebnissen (blaue Linie) und der Realität (rote Linie). Zusätzlich ist mit blauen Punkten die absolute Differenz dargestellt.

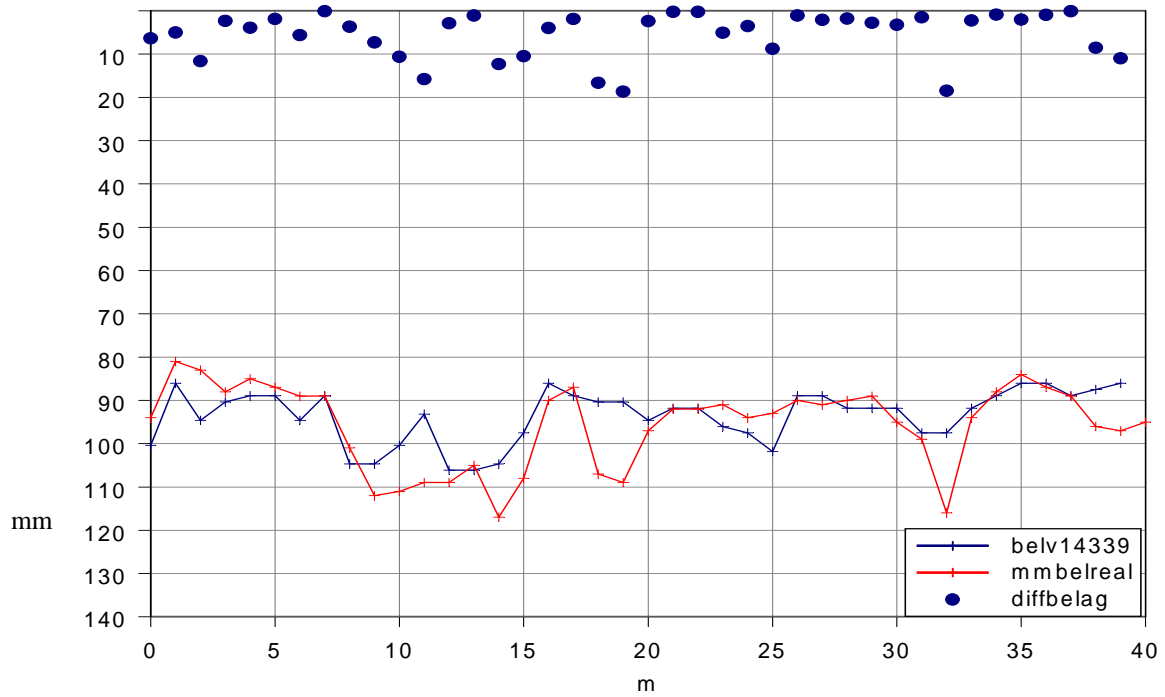


Abbildung 10.2.24: Radarergebnis und Realität für die Linie A

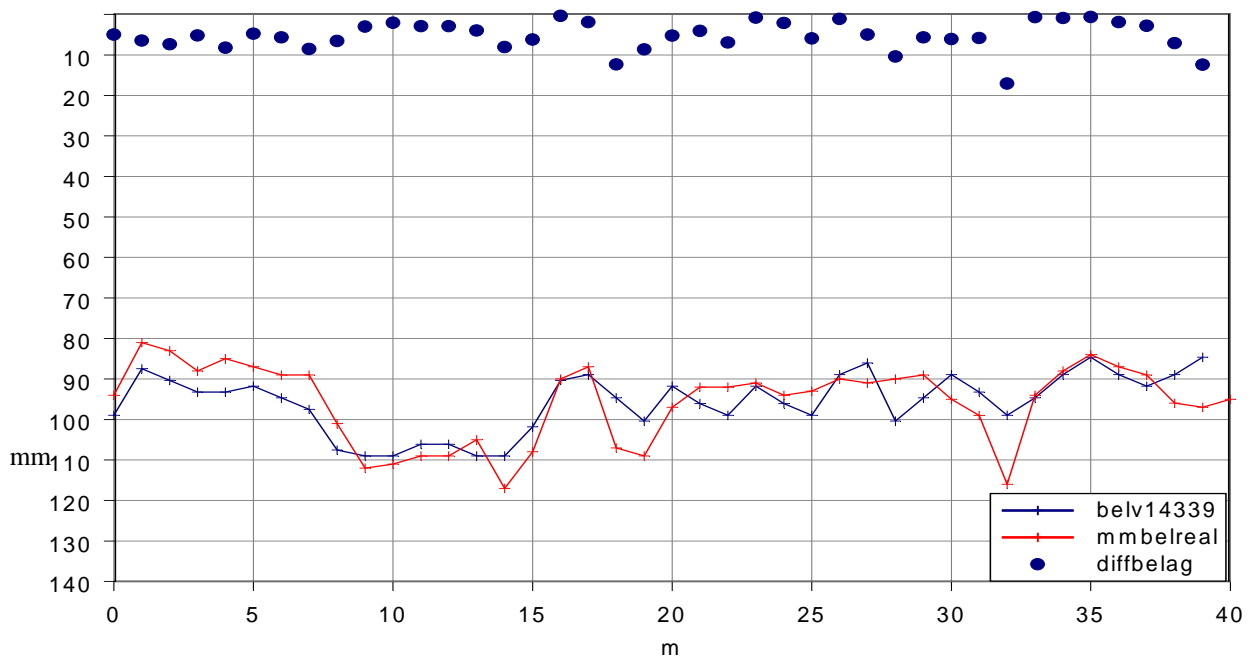


Abbildung 10.2.25: Radarergebnis und Realität für die Asphaltstärke auf der Linie B

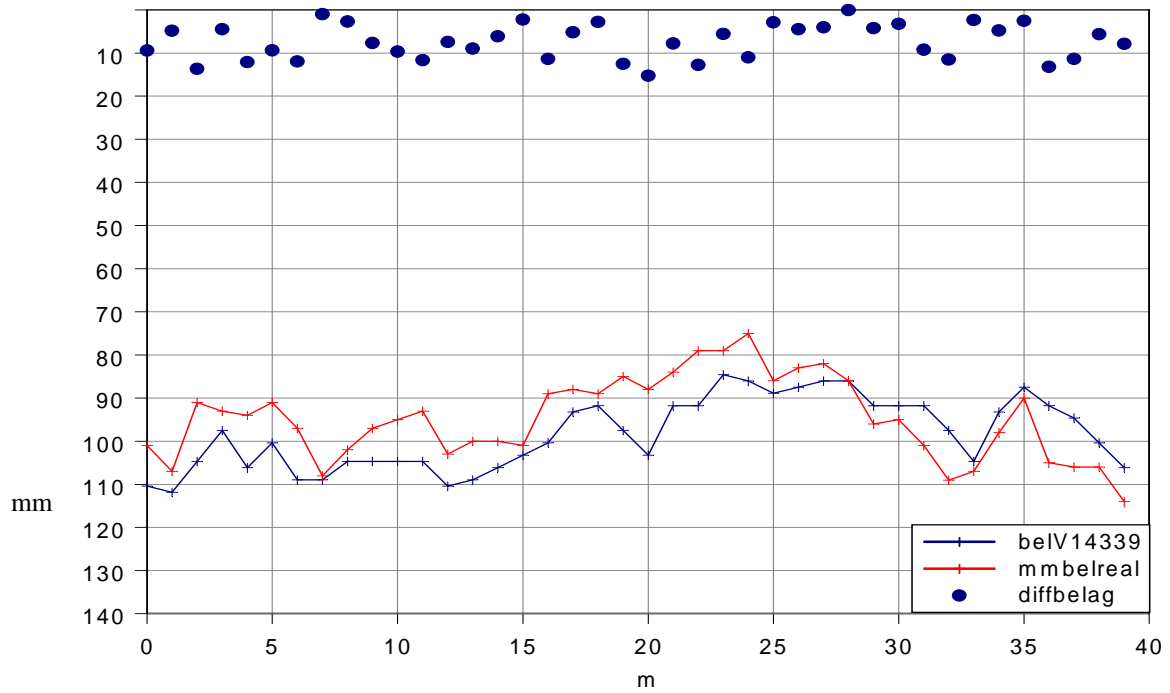


Abbildung 10.2.26: Radarergebnis und Realität für die AsphaltDicke auf der Linie C

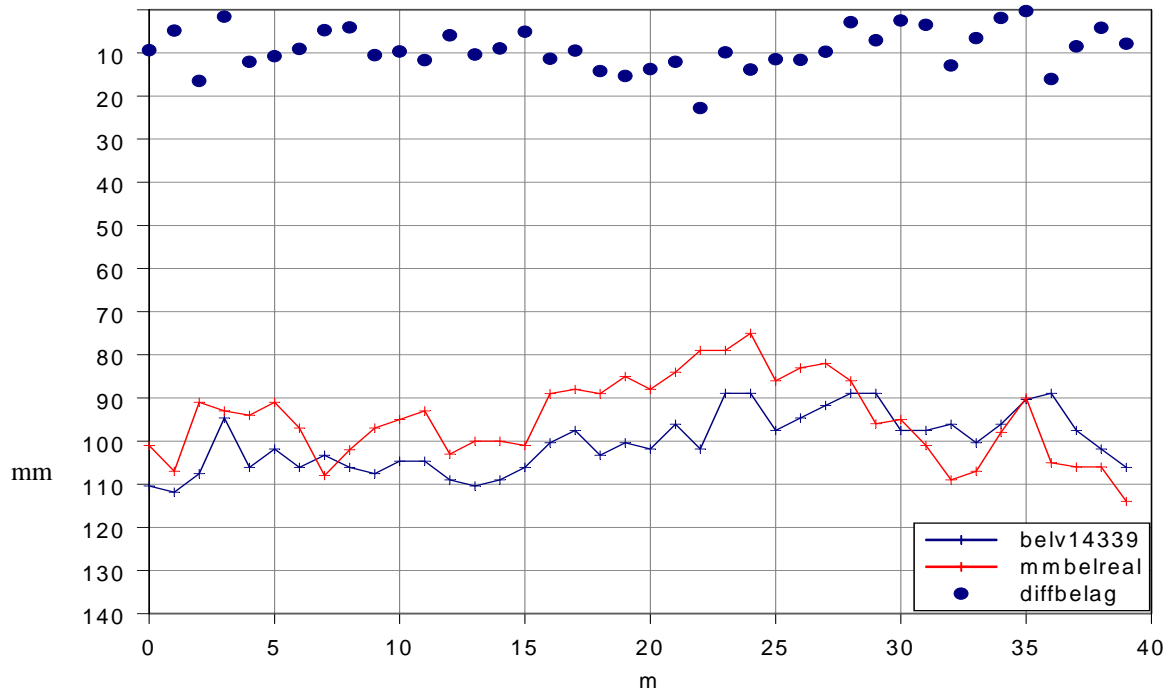


Abbildung 10.2.27: Radarergebnis und Realität für die AsphaltDicke auf der Linie D

Der Vergleich zwischen den Radarergebnissen und der Realität für die Belagsdicke lässt sich wie folgt zusammenfassen:



Tabelle 10.2-5: Vergleich Radarergebnis-Realität für Belagsdicke

	Linie A	Linie B	Linie C	Linie D
Mittlere Differenz	5	5	7	9
Max. Differenz	19	17	15	23

Damit kann die Übereinstimmung zwischen den Radarergebnissen und der Realität als gut bezeichnet werden. Auf der Linie D wird durch die Radaruntersuchung zwischen 8m und 27m systematisch eine etwas zu grosse Belagsdicke ermittelt. Als wahrscheinliche Erklärung bietet sich hier eine geringere Ausbreitungsgeschwindigkeit als die verwendeten  $v_{\text{Belag}} = 1.4339 \cdot 10^8$  m/s an.

### Eisenüberdeckung

Die Radarergebnisse lagen in horizontalen Abständen von 2.5 cm vor, die tatsächliche Eisenüberdeckung war im Abstand von jeweils einem Meter ausgemessen worden. Deshalb wurden die Radarergebnisse zunächst auf die Positionen umgerechnet, an denen die Eisenüberdeckung ausgemessen worden war. Dabei wurde jeweils über 15 cm, d.h. sechs Messpunkte gemittelt.

Für die Berechnung der Eisenüberdeckung aus den Radardaten wurde eine konstante Ausbreitungsgeschwindigkeit des Radarsignals von  $v_{\text{Beton}} = 0.9343 \cdot 10^8$  m/s verwendet.

Die *Abbildungen 10.2.28 bis 10.2.31* zeigen einen Vergleich zwischen den Radarergebnissen (blaue Linie) und der Realität (rote Linie). Zusätzlich ist mit blauen Punkten die absolute Differenz dargestellt.

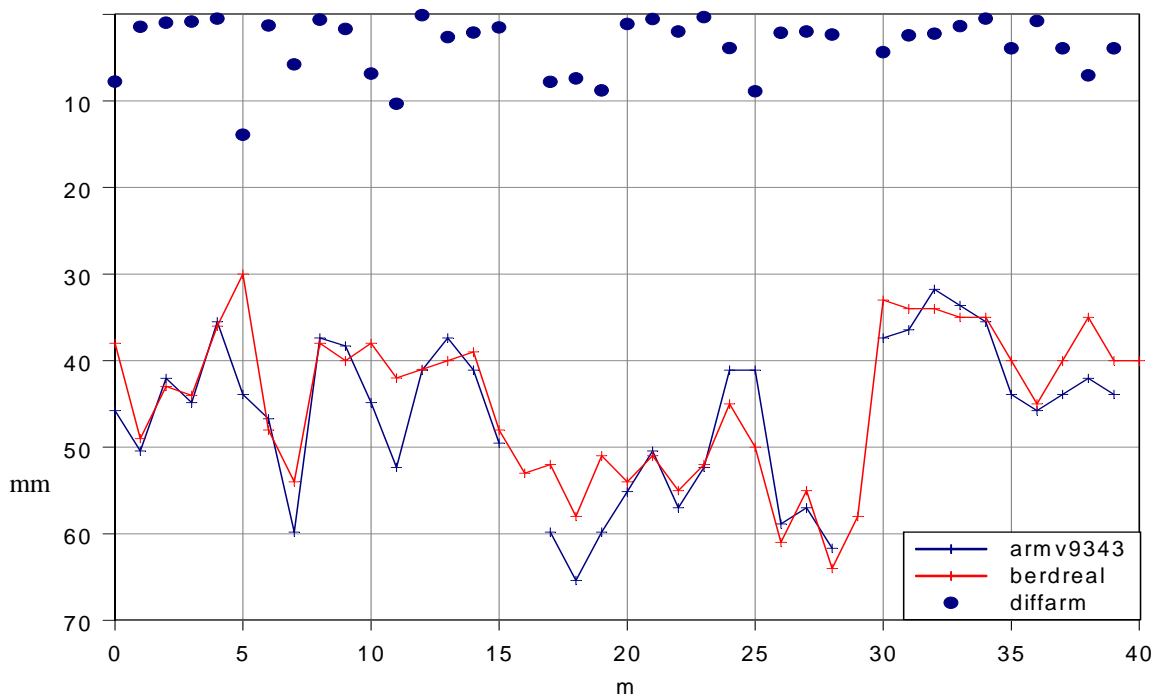


Abbildung 10.2.28: Radarergebnis und Realität für die Eisenüberdeckung auf der Linie A

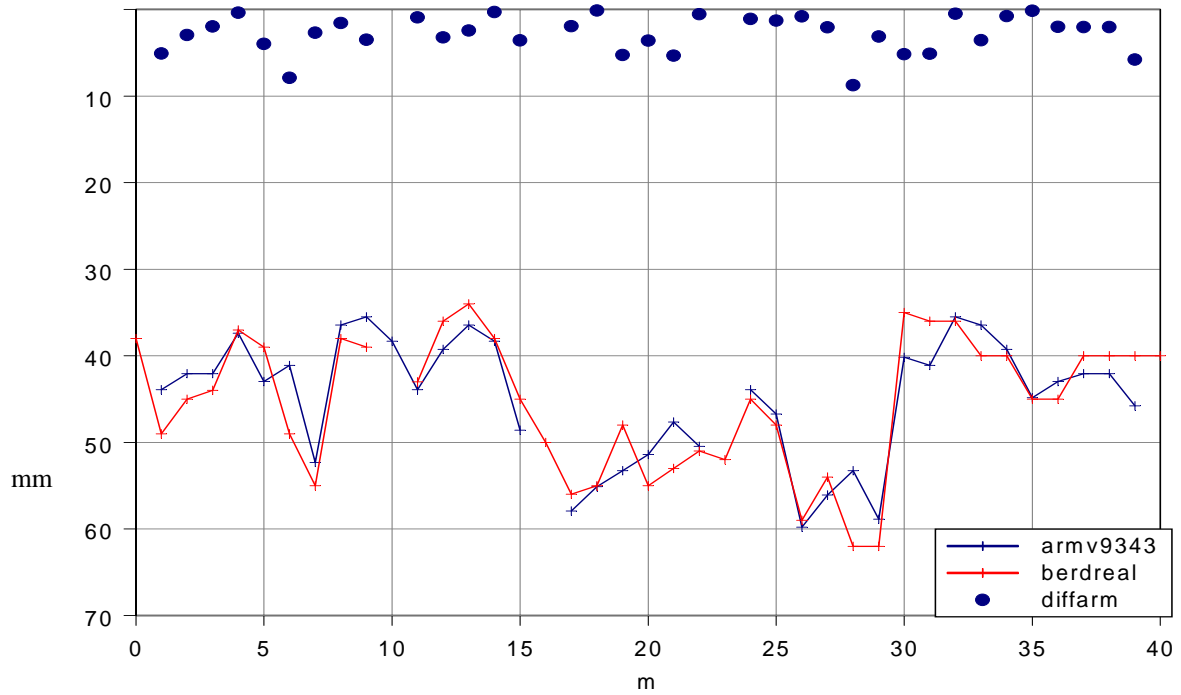


Abbildung 10.2.29: Radarergebnis und Realität für die Eisenüberdeckung auf der Linie B

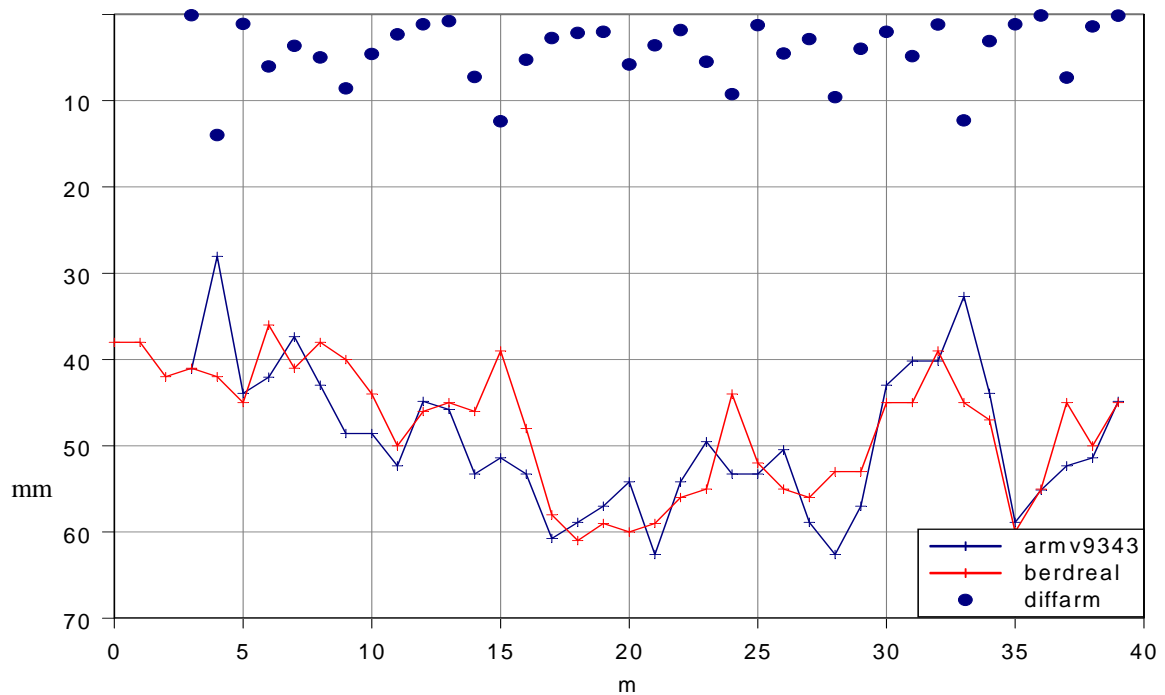


Abbildung 10.2.30: Radarergebnis und Realität für die Eisenüberdeckung auf der Linie C

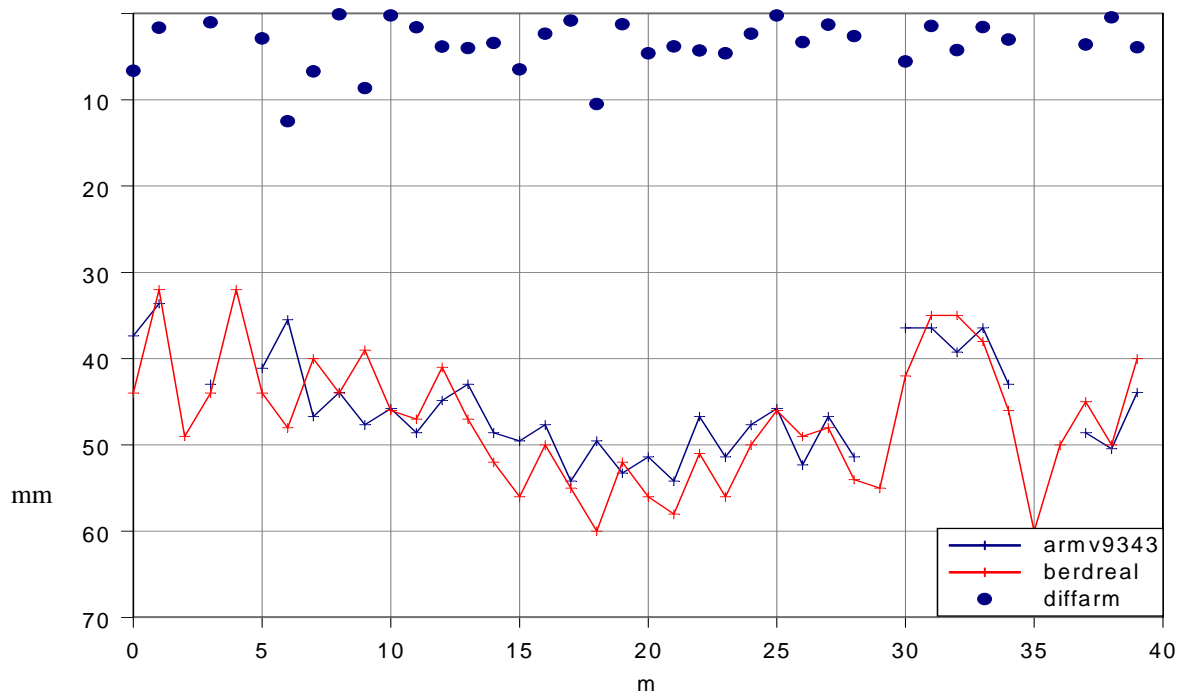


Abbildung 10.2.31: Radarergebnis und Realität für die Eisenüberdeckung auf der Linie D

Der Vergleich zwischen den Radarergebnissen und der Realität für die 1. Bewehrungslage lässt sich wie folgt zusammenfassen:

Tabelle 10.2-6: Vergleich Radarergebnis-Realität für Eisenüberdeckung

	Linie A	Linie B	Linie C	Linie D
Mittlere Differenz	4	3	4	4
Max. Differenz	14	9	14	12

Damit kann die Übereinstimmung zwischen den Radarergebnissen und der Realität als gut bezeichnet werden.

### Die Radardaten im Detail

Die *Abbildung 10.2.32* zeigt den Datensatz, der auf der Schnittlinie B aufgezeichnet wurde. Die verwendete Wiggledarstellung erlaubt eine detailliertere Betrachtung als die im Zwischenbericht 202048/12 verwendete Graustufendarstellung. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde nur jeder zehnte Messpunkt und nur das Zeitfenster zwischen null und fünf Nanosekunden dargestellt. Die beiden als Obergrenze Beton und oberste Armierungslage ausgewerteten Reflexionen sind mit Punkten (rot=OG Beton, grün=Armierung) eingezeichnet. Beide Reflexionen sind über die gesamte Brückenlänge klar ausgeprägt und deshalb auch problemlos auswertbar.

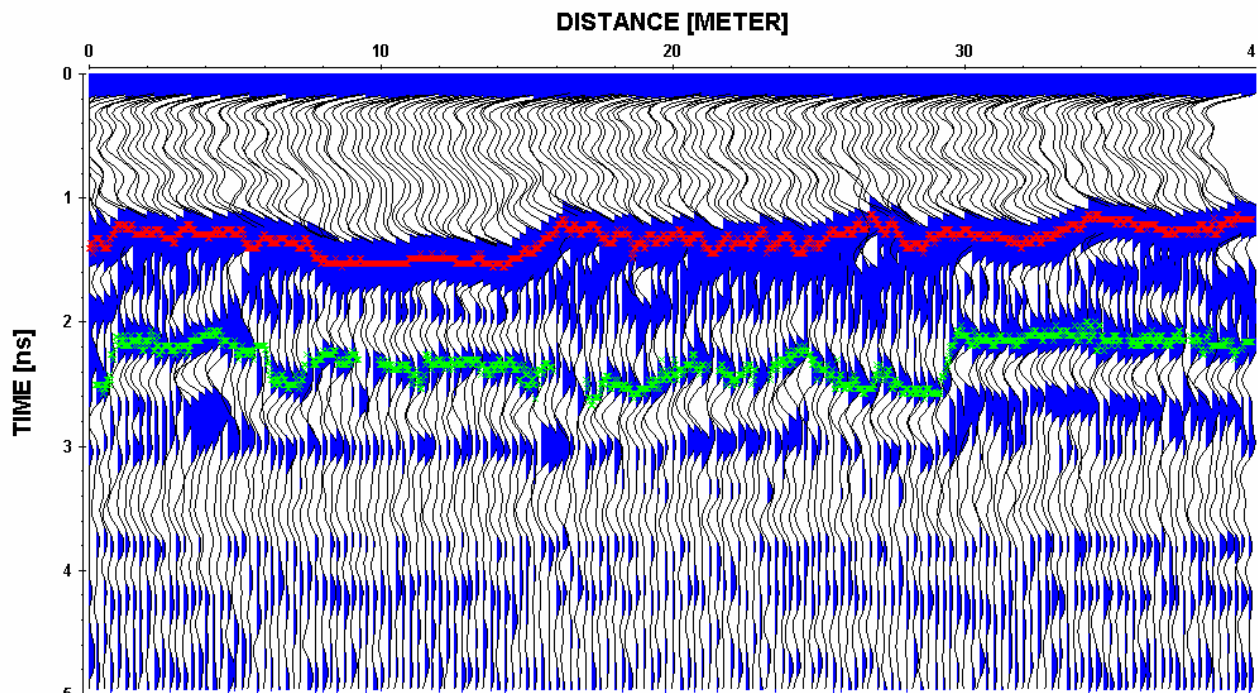


Abbildung 10.2.32: Datensatz der Linie B

## Schlussfolgerungen

Die Qualität der Radardaten ist, was die Reflexionen am Übergang Asphalt-Belag und an der obersten Bewehrungslage betrifft, als gut zu bezeichnen.

Die Asphaltstärke und die Eisenüberdeckung der obersten Bewehrungslage waren problemlos auswertbar. Die Maschenweite der obersten Bewehrungslage kann über weite Bereiche ebenfalls bestimmt werden.

Informationen über die von oben betrachtet zweite und dritte Bewehrungslage können aus den vorliegenden Datensätzen nicht gewonnen werden.

Die Tatsache, dass die Auswertung der Radardaten erst nach dem Abbruch erfolgte, wirkte sich vor allem auf die Kalibrierung der Ausbreitungsgeschwindigkeit in Asphalt und Beton aus. Normalerweise stehen hierfür ca. 1-2 Sondierungen zur Verfügung, im vorliegenden Fall konnten die bekannten Belagsdicken entlang der Linien AB und die Eisenüberdeckungen entlang der Linie B verwendet werden.

Der Vergleich zwischen Radarergebnissen für den Belag und der Realität ergibt bei Verwendung einer konstanten Ausbreitungsgeschwindigkeit von  $v_{\text{Belag}} = 1.4339 \cdot 10^8$  m/s mittlere Fehler zwischen 5mm (Linien A und B) und 9mm (Linie D).

Der Vergleich zwischen Radarergebnissen für die Eisenüberdeckung und der Realität ergibt bei Verwendung einer konstanten Ausbreitungsgeschwindigkeit von  $v_{\text{Beton}} = 0.9343 \cdot 10^8$  m/s mittlere Fehler zwischen 3mm (Linie B) und 4mm (Linien A, C und D).

## 10.3 Viadotto sopra le Cantine

### Bestimmung der tatsächlichen Belagsstärke

Am 05. Mai 2002 wurde der Belag zwischen der Betonbordüre und der mittels Georadar untersuchten Linie Ca1 (2.0m ab Betonbordüre) abgefräst. Dies ermöglichte eine manuelle Messung der Belagsdicke entlang der Schnittlinie zur Überprüfung der Radarergebnisse.



Abbildung 10.3.1: Abfräsen des Belages

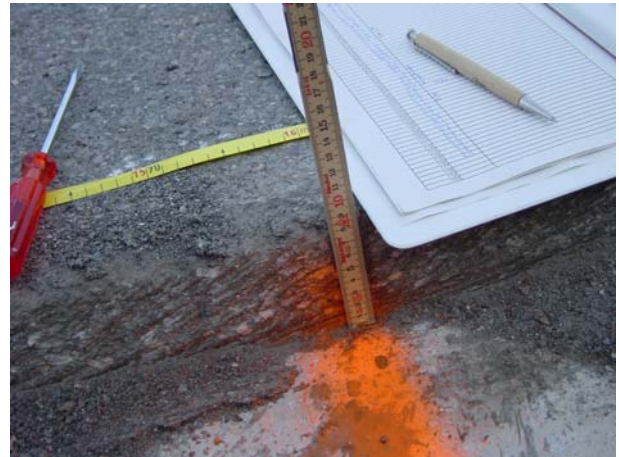


Abbildung 10.3.2: Detail der Fräskante



Abbildung 10.3.3: Situation nach Abfräsen

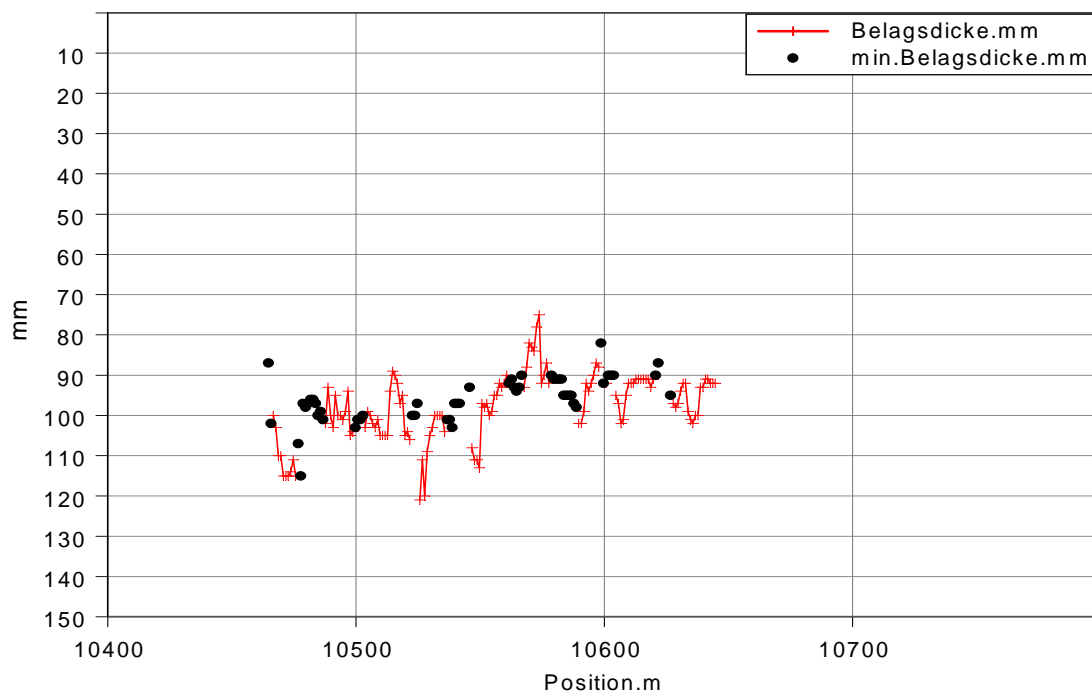
Bei der manuellen Messung stellten sich zwei Probleme:

- Der Belagsabbruch ging so schnell vonstatten, dass eine komplette Erfassung nicht möglich war
- Teilweise wurde der Belag nicht komplett entfernt, so dass Asphaltreste übrig blieben. An diesen Stellen konnte lediglich eine Mindest-Belagsdicke gemessen werden

In *Abbildung 10.3.4* sind die ermittelten Belagsdicken entlang der Linie CA1 dargestellt. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

*Tabelle 10.3-1: reale Belagsdicken*

	<b>Linie CA1</b>
Minimum (mm)	75
Maximum (mm)	121
Mittelwert (mm)	98



*Abbildung 10.3.4: tatsächliche Belagsdicken entlang der Linie CA1*

Im Anschluss an die Radarmessungen waren zu Kalibrierzwecken 3 Bohrungen vorgenommen und die Bohrkern sichergestellt worden. Eine Untersuchung an der EMPA ergab folgendes:

Bohrkern A: nicht untersucht

Bohrkern B:  
Anzahl Schichten: 3 (3. Schicht Gussasphalt)

Tabelle 10.3-2: Ergebnisse für Bohrkern B

	Schicht 1 (oben)	Schicht 2 (Mitte)	Schicht 3 (unten)
Dicke [mm]	24	43	23
Dichte [ $t/m^3$ ]	2.444	2.490	2.317
Rohdichte [ $t/m^3$ ]	2.323	2.234	2.291
Hohlraumgehalt %	4.95	10.28	1.12
Lösl. Bindemittelanteile %	6.03	4.89	10.34

Bohrkern C:

Anzahl Schichten: 3 (3. Schicht Gussasphalt)

Tabelle 10.3-3: Ergebnisse für Bohrkern C

	Schicht 1 (oben)	Schicht 2 (Mitte)	Schicht 3 (unten)
Dicke [mm]	26	39	25
Dichte [ $t/m^3$ ]	2.456	2.479	2.332
Rohdichte [ $t/m^3$ ]	2.329	2.249	2.299
Hohlraumgehalt %	5.17	9.275	1.415
Lösl. Bindemittelanteile %	6.00	4.79	10.02

### Bestimmung der tatsächlichen Eisenüberdeckung

Zwischen dem 12. und dem 21. Mai 2003 wurde an den zersägten Brückenteilen entlang der Linie Ca2 (1.24m ab Betonbordüre Überholspur) die Eisenüberdeckung der obersten drei Armierungslagen gemessen. Zusätzlich wurden als weitere Grössen die Eisendurchmesser und die Maschenweite bestimmt. Diese Arbeiten hatten sich am Zeitplan des Abbruchs zu orientieren und mussten am 21. Mai 2003 aus Zeitgründen abgebrochen werden, obwohl noch nicht die ganze Brückenlänge ausgemessen war.



Abbildung 10.3.5: Betonabbruch



Abbildung 10.3.6: abgelegte Brückenteile

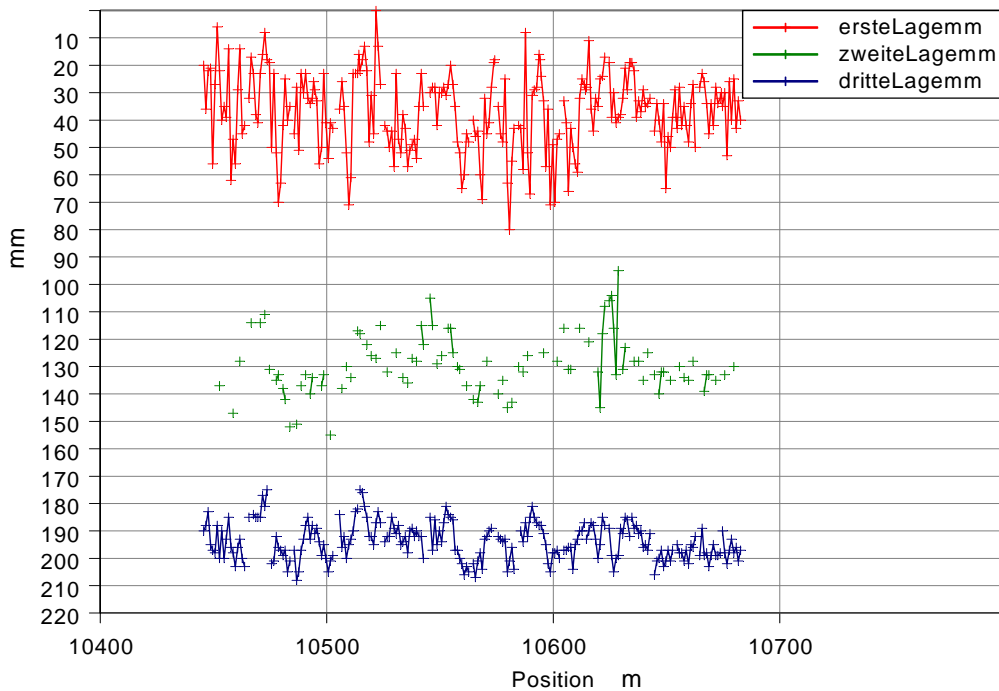


Abbildung 10.3.7: tatsächliche Eisenüberdeckung entlang der Linie CA2

Die Ergebnisse für die Eisenüberdeckungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Tabelle 10.3-4: Eisenüberdeckung real

<b>1. Bewehrungslage</b>	Linie CA2
Minimum (mm)	0
Maximum (mm)	80
Mittelwert (mm)	37
<b>2. Bewehrungslage</b>	Linie CA2
Minimum (mm)	95
Maximum (mm)	155
Mittelwert (mm)	129
<b>3. Bewehrungslage</b>	Linie Ca2
Minimum (mm)	175
Maximum (mm)	208
Mittelwert (mm)	194



## Vergleich Radar-Realität

### Belag

Die Radarergebnisse lagen in horizontalen Abständen von 2.5 cm vor. Die tatsächliche Belagsdicke war im Abstand von jeweils einem Meter ausgemessen worden. Deshalb wurden die Radarergebnisse zunächst auf Meterabstände umgerechnet. Dabei wurde jeweils über 15 cm, d.h. sechs Messpunkte gemittelt.

Für die Berechnung der Belagsdicken aus den Radardaten wurde eine konstante Ausbreitungsgeschwindigkeit des Radarsignals von  $v_{\text{Belag}} = 1.1 \cdot 10^8$  m/s verwendet.

Die *Abbildungen 10.3.8 bis 10.3.11* zeigen einen Vergleich zwischen den Radarergebnissen (blaue Linie) und der Realität (rote Linie). Zusätzlich ist mit blauen Punkten die absolute Differenz dargestellt. Um das Ergebnis unabhängig von der Kalibrierproblematik beurteilen zu können wurde  $V_{\text{opt}}$  als Geschwindigkeit berechnet, bei der die mittlere Abweichung zwischen Radarergebnis und Realität minimal wird. Mit  $V_{\text{opt}} = 1.22 \cdot 10^8$  m/s ergibt sich das in den *Abbildungen 10.3.8 bis 10.3.11* als grüne Linie dargestellte Ergebnis. Die entsprechenden Differenzen zur Realität sind mit grünen Punkten gekennzeichnet.

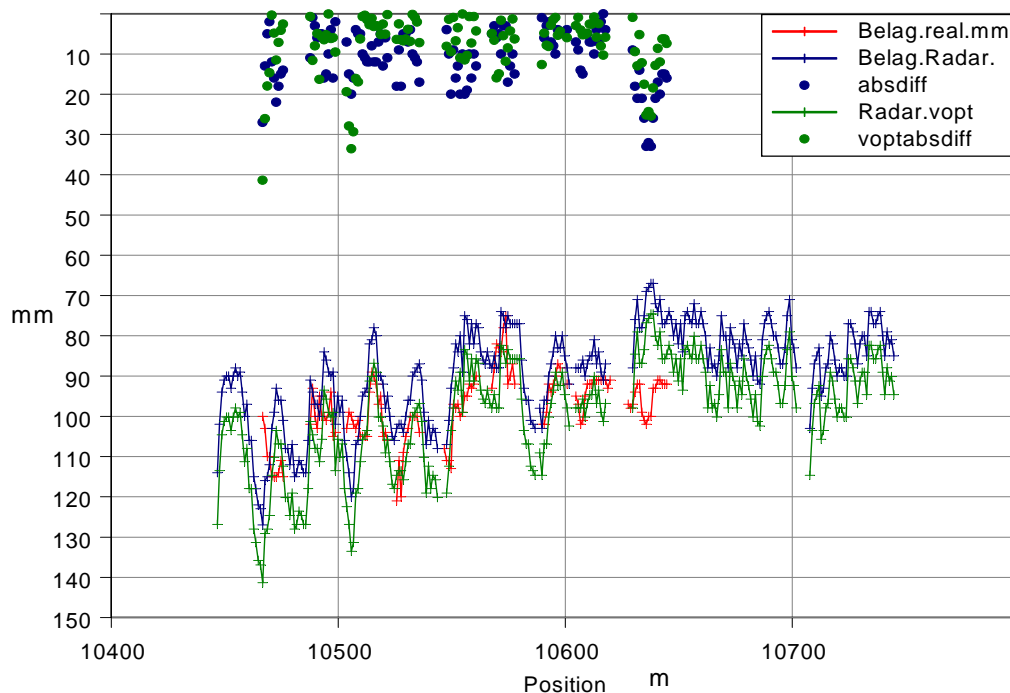


Abbildung 10.3.8: Radarergebnis und Realität für die Asphaltstärke

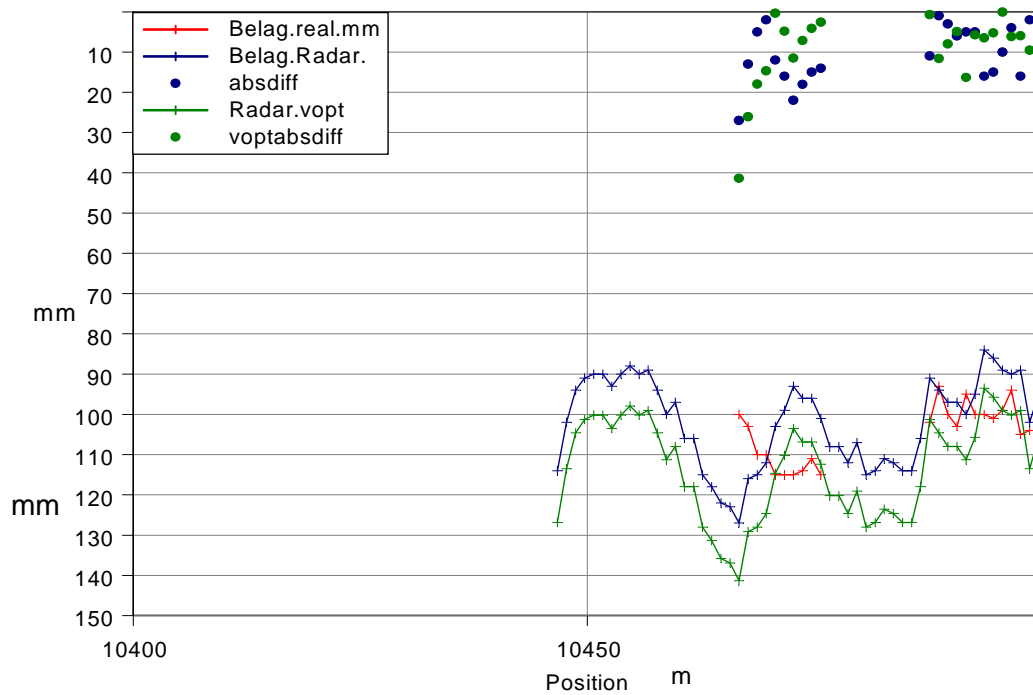


Abbildung 10.3.9: Radarergebnis und Realität für die Asphalt Dicke (Ausschnitt)

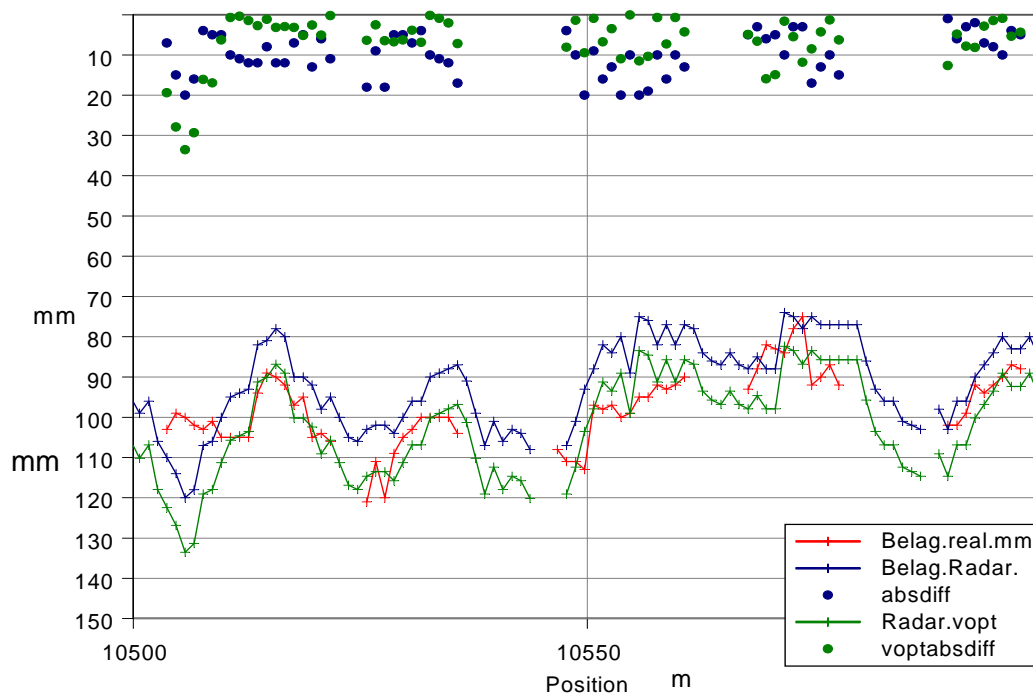


Abbildung 10.3.10: Radarergebnis und Realität für die Asphalt Dicke (Ausschnitt)

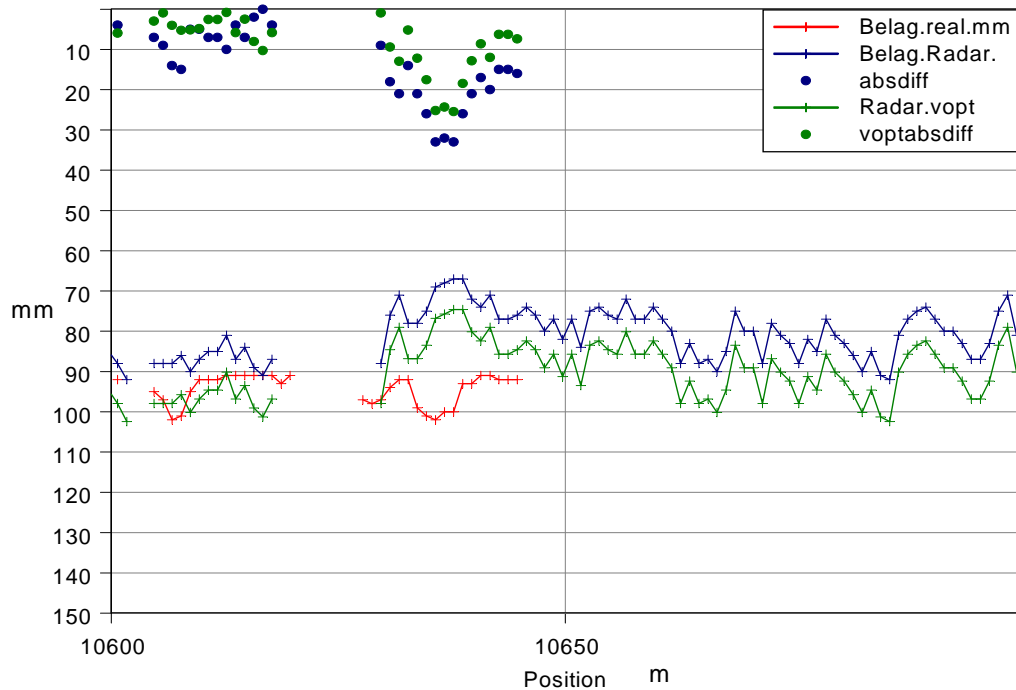


Abbildung 10.3.11: Radarergebnis und Realität für die Asphalt Dicke (Ausschnitt)

Der Vergleich zwischen den Radarergebnissen und der Realität für die Belagsdicke lässt sich wie folgt zusammenfassen:

Tabelle 10.3-5: Vergleich Radar-Realität für Eisenüberdeckung

	Linie CA1, $v_{\text{orig.}}=1.1$	Linie CA1, $v_{\text{opt}}=1.22$
Mittlere Differenz	11	8
Max. Differenz	33	41

Die mittlere Differenz zwischen dem ursprünglichen Radarergebnis und Realität beträgt 11 mm und kann bei Verwendung einer optimierten Ausbreitungsgeschwindigkeit  $v_{\text{opt}}= 1.22 \cdot 10^8$  m/s auf 8 mm reduziert werden. Auffallend gross sind die maximalen Fehler von 33 bzw. 41 mm. Eine derartige Abweichung ist für viele Anwendungen nicht akzeptabel, deshalb wird im Folgenden näher auf mögliche Ursachen eingegangen.

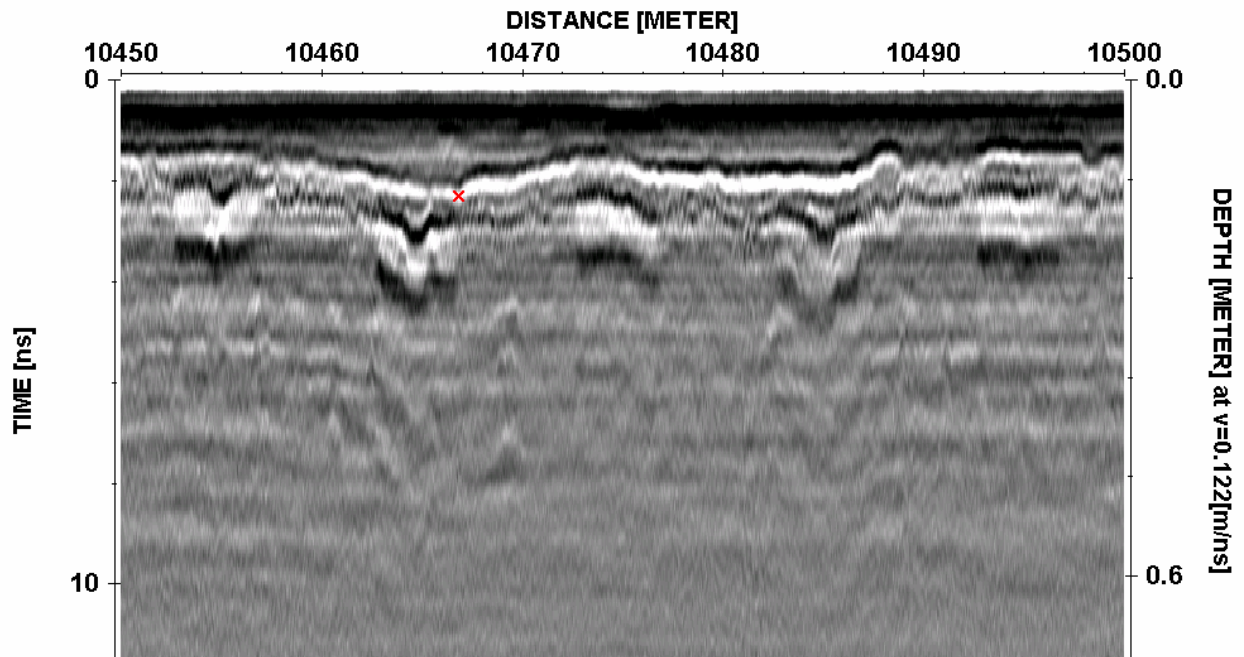


Abbildung 10.3.12: Ausschnitt 10450m-10500m

Die *Abbildung 10.3.12* zeigt einen Ausschnitt von 50 m Länge aus den Radardaten. Die maximale Differenz von 41mm bei der Verwendung von  $v_{opt}$  tritt bei 10466.7m (rote Markierung) auf. In diesem Bereich ist eine deutliche Reflexion vorhanden und eine Fehlinterpretation erscheint schlecht vorstellbar.

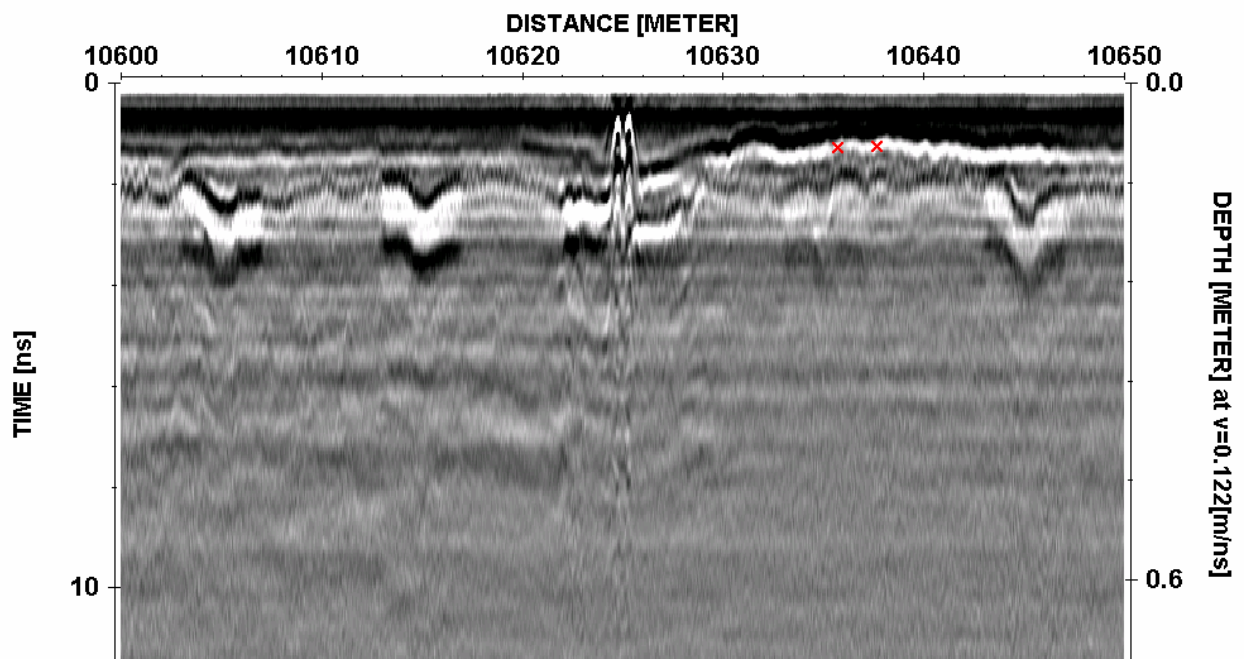
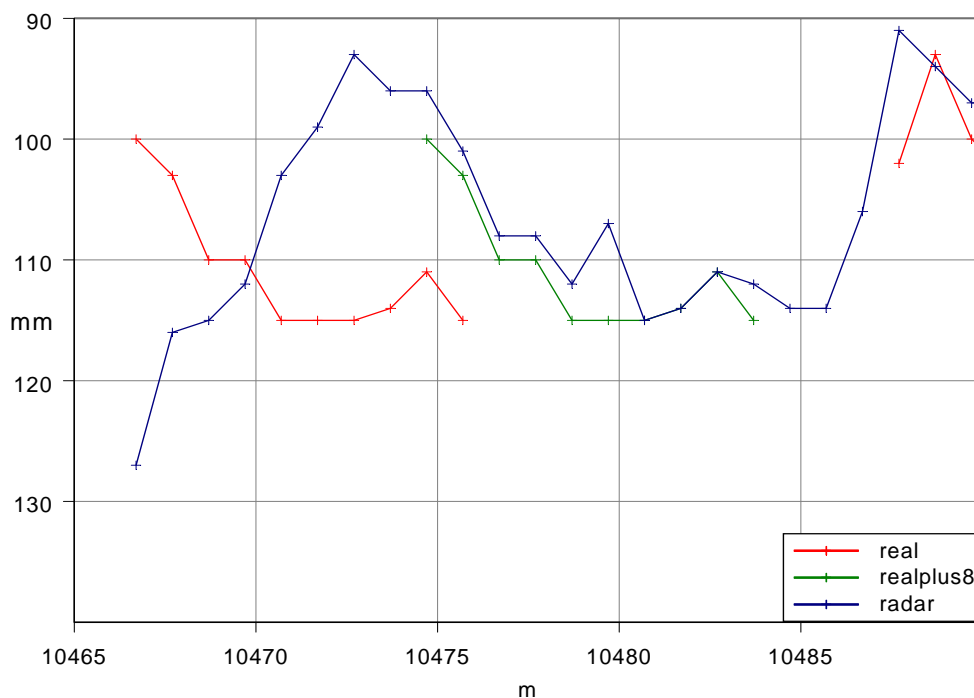


Abbildung 10.3.13: Ausschnitt 10600m-10650m

Die *Abbildung 10.3.13* zeigt wiederum einen Ausschnitt von 50 m Länge aus den Radardaten. Zwischen 10635.7m und 10637.7m werden Fehler von bis zu 33mm bzw. 25 mm erreicht (rote Markierung). Wiederum ist eine deutliche Reflexion vorhanden und eine Fehlinterpretation erscheint schlecht vorstellbar.

Eine andere Erklärungsmöglichkeit könnte in einem Positionsfehler der Radarergebnisse oder der manuellen Messung beim Abbruch liegen. Die *Abbildung 10.3.14* zeigt einen Vergleich zwischen dem Radarergebnis (blaue Linie) und dem Ergebnis der manuellen Messung (rote Linie). Verschiebt man das Ergebnis der manuellen Messung um 8 Meter nach rechts, ergibt sich eine gute Übereinstimmung mit dem Radarergebnis. Zwar wurde die manuelle Messung unter grossem Zeitdruck im Rahmen des Abbruchs durchgeführt, ein Positionsfehler von 8 Metern erscheint dennoch unwahrscheinlich. Die gute Übereinstimmung bei einer Verschiebung um 8 Meter könnte auch Zufall sein.

Festzustellen bleibt, dass die grossen Abweichungen zwischen Radar und der manuellen Belagsdickenbestimmung, die an einigen wenigen Stellen auftreten mit dem derzeitigen Kenntnisstand nicht erklärbar sind. Deshalb wurde keine nachträgliche Positionskorrektur vorgenommen und die in diesem Bereich besonders grossen Fehler gehen voll in die Bestimmung der mittleren und maximal Differenzen zwischen Radarergebnis und Realität ein.



*Abbildung 10.3.14: Vergleich Radarergebnis-Realität, mit und ohne Positionskorrektur*

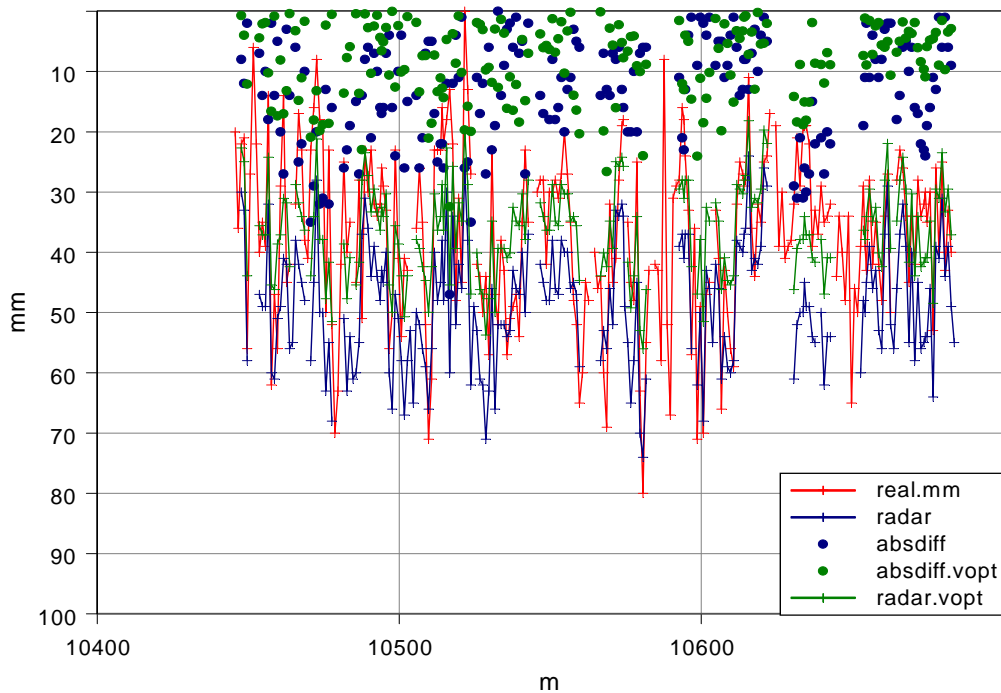
## Eisenüberdeckung

Die Radarergebnisse lagen in horizontalen Abständen von 2.5 cm vor, die tatsächliche Eisenüberdeckung war im Abstand von jeweils einem Meter ausgemessen worden. Deshalb wurden die Radarergebnisse zunächst auf die Positionen umgerechnet, an denen die

Eisenüberdeckung ausgemessen worden war. Dabei wurde jeweils über 15 cm, d.h. sechs Messpunkte gemittelt.

Für die Berechnung der Eisenüberdeckung aus den Radardaten wurde eine konstante Ausbreitungsgeschwindigkeit des Radarsignals von  $v_{\text{Beton}} = 0.80 \cdot 10^8$  m/s verwendet.

Die *Abbildungen 10.3.15 bis 10.3.18* zeigen einen Vergleich zwischen den Radarergebnissen (blaue Linie) und der Realität (rote Linie). Zusätzlich ist mit blauen Punkten die absolute Differenz dargestellt. Grün sind wiederum die Ergebnisse mit einer berechneten optimalen Ausbreitungsgeschwindigkeit (siehe Abschnitt Belag) eingezeichnet.



*Abbildung 10.3.15: Radarergebnis und Realität für die Eisenüberdeckung über die gesamte Länge*

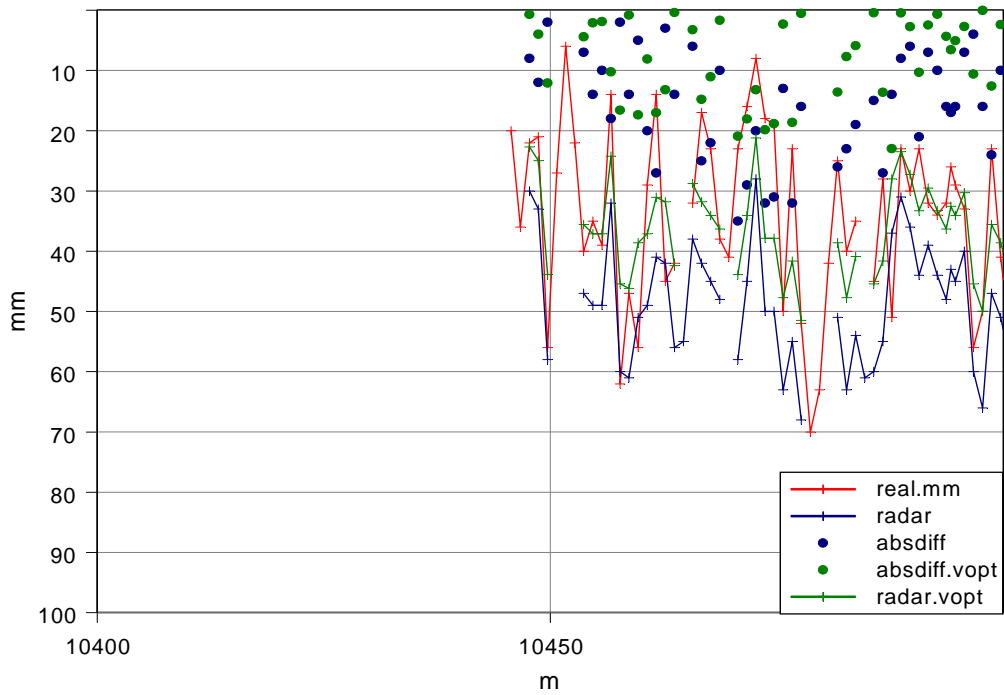


Abbildung 10.3.16: Radarergebnis und Realität für die Eisenüberdeckung (Ausschnitt)

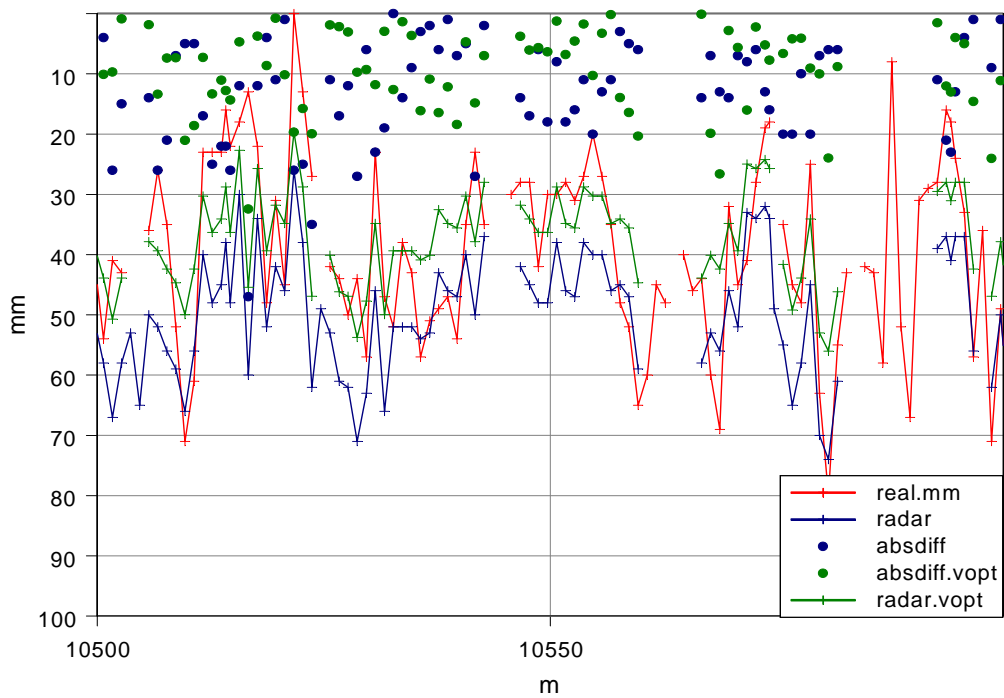


Abbildung 10.3.17: Radarergebnis und Realität für die Eisenüberdeckung (Ausschnitt)

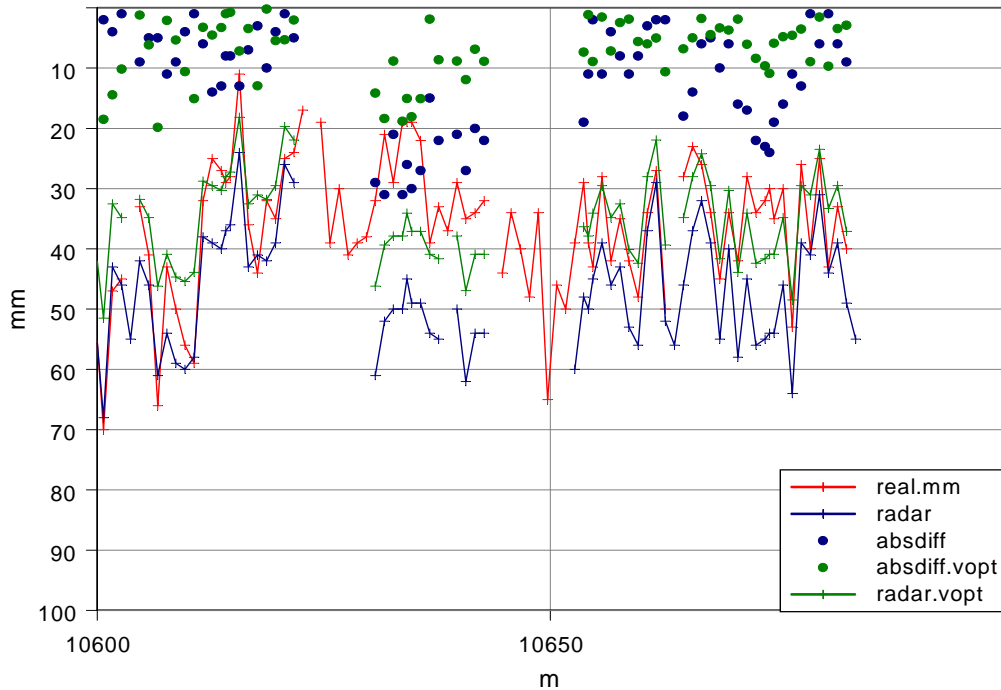


Abbildung 10.3.18: Radarergebnis und Realität für die Eisenüberdeckung (Ausschnitt)

Der Vergleich zwischen den Radarergebnissen und der Realität für die 1. Bewehrungslage lässt sich wie folgt zusammenfassen:

Tabelle 10.3-6: Vergleich Radarergebnis-Realität für Eisenüberdeckung

	$V=0.93 \cdot 10^8 \text{ m/s}$	$V_{\text{opt}}=0.61 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
Mittlere Differenz	13	8
Max. Differenz	47	32

Damit muss festgestellt werden, dass die ursprüngliche Kalibrierung mittels 3 Bohrlöchern nicht ausreichend genau war. Dies dürfte im wesentlichen auf die starken Schwankungen der Eisenüberdeckung auf engstem Raum zurückzuführen sein. Wenn, wie im vorliegenden Fall, die Eisenüberdeckung innerhalb eines Meters um mehr als 50 mm schwankt, reichen ein bis zwei durch die Bohrung aufgedeckte Armierungseisen nicht aus und es sollte mittels Sondierfenstern ein grösserer Bereich betrachtet werden.

Wiederum lohnt sich eine Betrachtung der Stellen mit den grössten Abweichungen. Die *Abbildung 10.3.19* zeigt einen Ausschnitt von 100m Länge. Die roten Kreuze kennzeichnen diejenigen Stellen, an denen die Abweichung zwischen Radarergebnis und manueller Bestimmung beim Abbruch mehr als 15mm beträgt. Die Stellen grosser Abweichung erscheinen weitgehend zufällig verteilt. Insbesondere sind keine Häufungen an speziellen Stellen wie z.B. über den Stützen erkennbar.



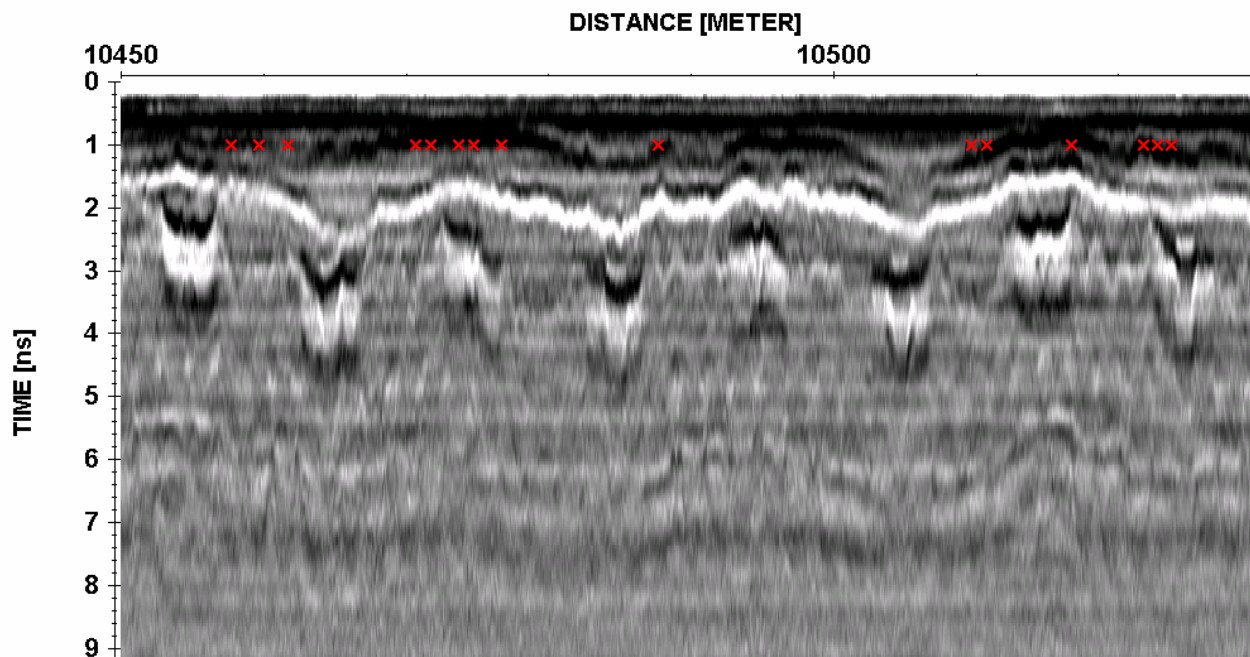


Abbildung 10.3.19: Radardaten (Ausschnitt) und Positionen mit Differenzen grösser 15mm (rote Markierungen)

## Schlussfolgerungen

Die Qualität der Radardaten ist, was die Reflexionen am Übergang Asphalt-Belag und an der obersten Bewehrungslage betrifft, als gut zu bezeichnen.

Die Asphaltstärke und die Eisenüberdeckung der obersten Bewehrungslage waren auswertbar. Die Maschenweite der obersten Bewehrungslage kann über weite Bereiche ebenfalls bestimmt werden.

Informationen über die von oben betrachtet zweite und dritte Bewehrungslage können aus den vorliegenden Datensätzen allenfalls an einigen Stellen gewonnen werden.

Der Vergleich zwischen Radarergebnissen für den Belag und der Realität ergibt bei Verwendung einer konstanten Ausbreitungsgeschwindigkeit von  $v_{\text{Belag}} = 1.1 \cdot 10^8$  m/s einen mittleren Fehler von 11mm. Dieser Fehler reduziert sich bei Verwendung einer nachträglich berechneten optimalen Ausbreitungsgeschwindigkeit  $v_{\text{opt}} = 1.22 \cdot 10^8$  m/s auf 8mm.

Der Vergleich zwischen Radarergebnissen für die Eisenüberdeckung und der Realität ergibt bei Verwendung einer konstanten Ausbreitungsgeschwindigkeit von  $v_{\text{Beton}} = 0.93 \cdot 10^8$  m/s einen mittlere Fehlern von 13 mm. Dieser Fehler reduziert sich bei Verwendung einer nachträglich berechneten optimalen Ausbreitungsgeschwindigkeit  $v_{\text{opt}} = 0.61 \cdot 10^8$  m/s auf 8mm.

Bei der Belagsstärke und bei der Eisenüberdeckung ergeben sich lokal Abweichungen zwischen den Radarergebnissen und der Realität von 33 mm bzw. 47 mm. Diese aussergewöhnlich grossen Abweichungen können mit dem derzeitigen Kenntnisstand nicht abschliessend erklärt werden.

## 10.4 Überführung Wyssenried

### Technische Daten

Die folgenden Informationen wurden dem Zebra-Objektblatt entnommen. Darin enthalten sind von den SBB zusammengestellte Informationen.

Tabelle 10.4-1: Überführung Wyssenried, technische Daten

Objektname	Überführung Bützbergstrasse (Wyssenried), BE108
Kanton	Bern
Standort, Gemeinde	Thunstetten
Hindernis	(ehemalige) SBB-Strecke
Brückentyp	Durchlaufträger
Vorspannung	VSL
Gesamtlänge	25.0 m
Gesamtbreite	5.60 m
Gesamtoberfläche	140 m <sup>2</sup>
Abdichtung	keine
Baujahr	1962
Abbruch	2004
Abbruchgrund	Verlegung der SBB-Strecke

### Planausschnitte

Die folgenden Pläne und Planausschnitte wurden dem Zebra-Objektblatt entnommen. Darin enthalten sind von den SBB zusammengestellte Pläne. Die Planausschnitte sind nicht massstabsgerecht wiedergegeben.

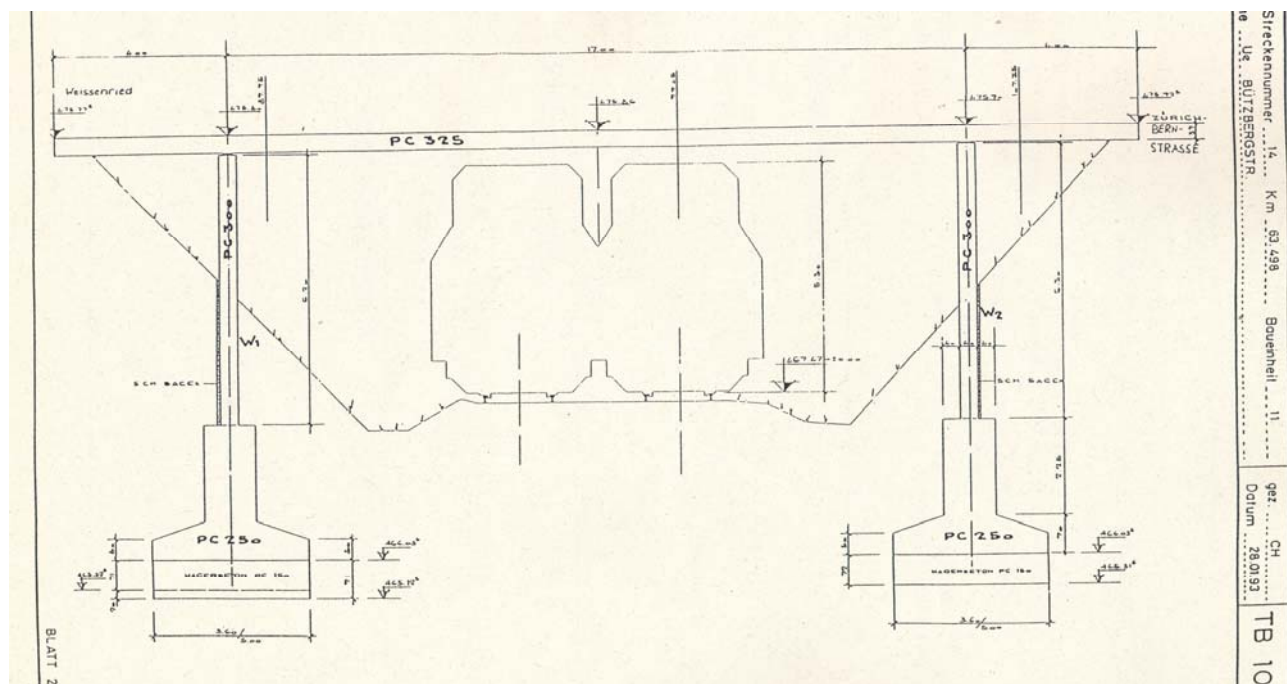


Abbildung 10.4.1: Längsschnitt

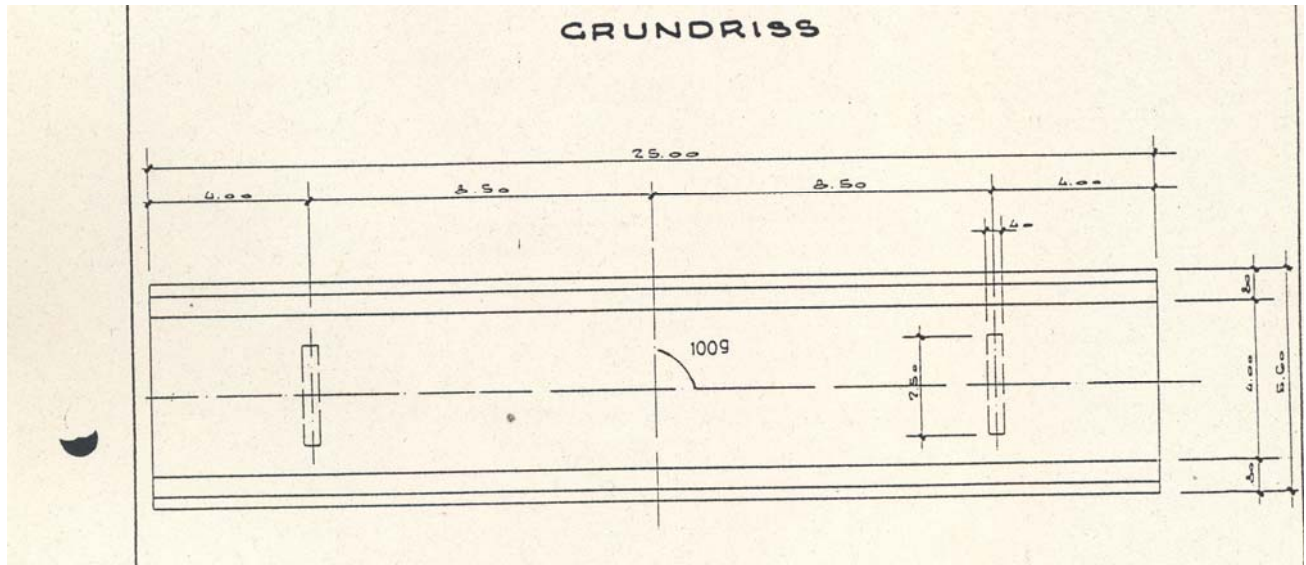


Abbildung 10.4.2: Grundriss

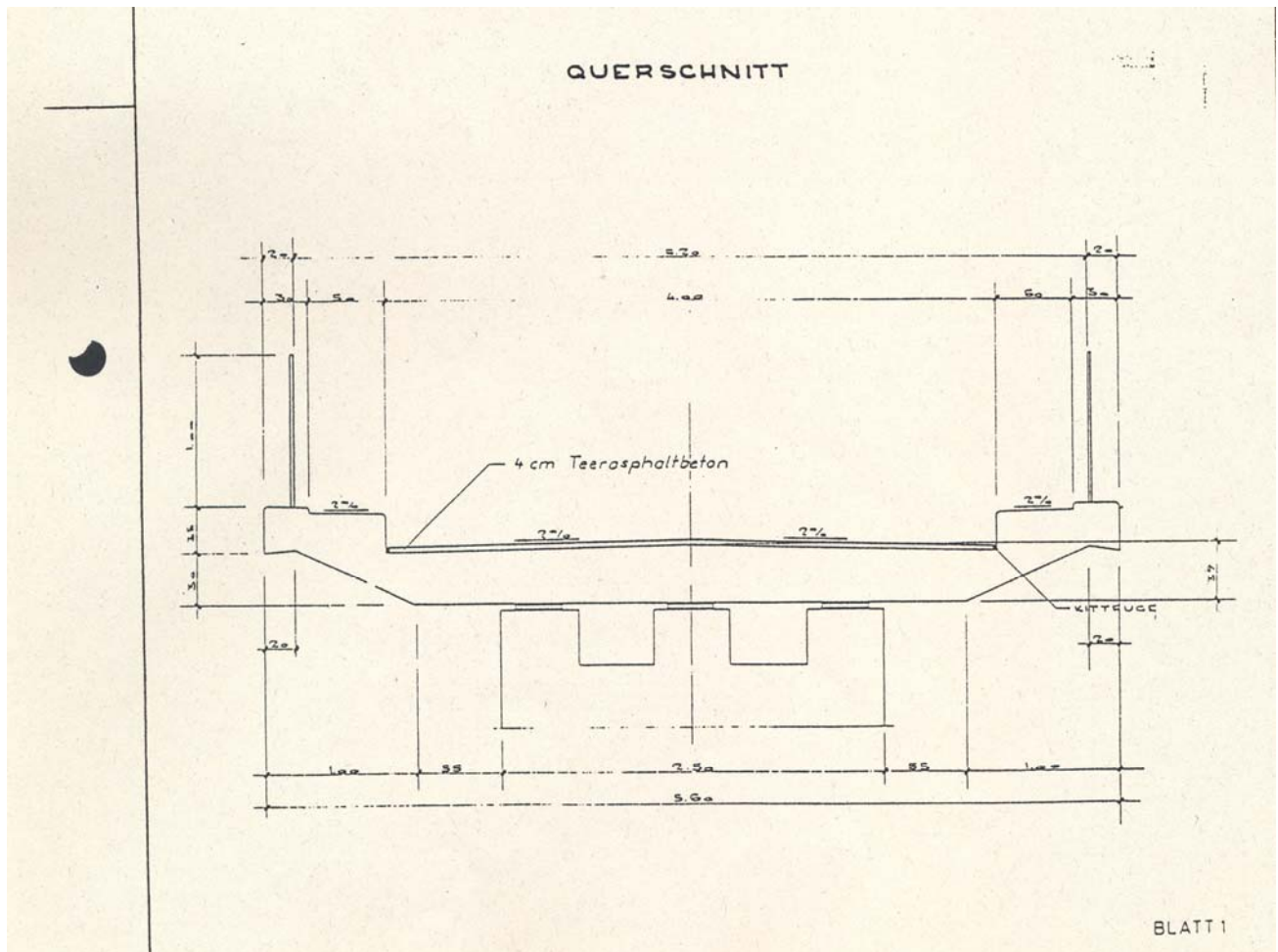


Abbildung 10.4.3: Querschnitt

Schraubbereich : = 3  
 Untersicht : - 40; - 25; - 40  
 (mit Korr., neben Abpl.)

**QUERSCHNITT 1:20**  
 DETAIL-ANSICHT BEWEGLICHE ANKER

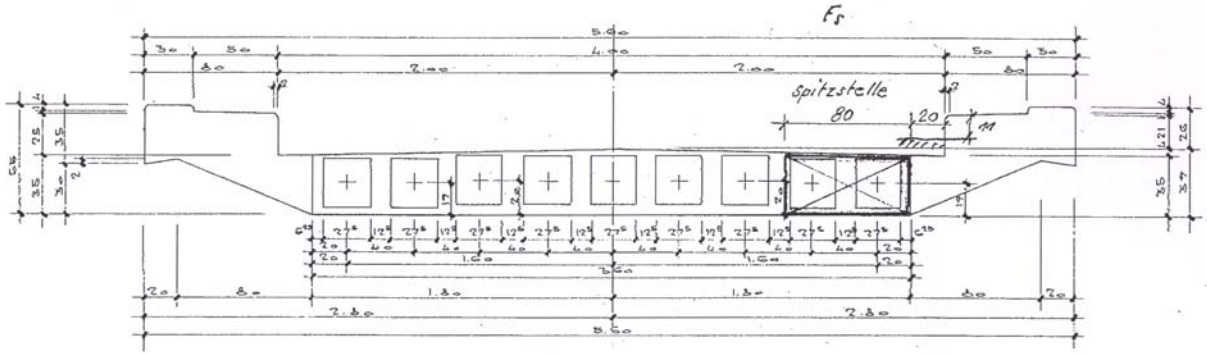


Abbildung 10.4.4: Querschnitt Brückenplatte

## Photos



Abbildung 10.4.5: Überführung Wyssenried



Abbildung 10.4.6: Fahrbahn



Abbildung 10.4.7: Brücke von unten betrachtet

## Radarergebnisse BE108, Überführung Bützbergstrasse

### Hinweise

Der Nullpunkt für die horizontalen Entfernungsangaben befindet sich am Übergang zum Widerlager Süd.

In den Titeln der Darstellungen ist der jeweilige Abstand der Messlinie zur Betonbordüre Seite Bützberg angegeben.

Als Datenbeispiel wird die Linie im Abstand von 1.75m ab Betonbordüre Seite Bützberg dargestellt. Darin eingezeichnet sind die folgenden Reflexionen:

Übergang Asphalt-Beton	blau
Oberste Bewehrungslage	rot
Spannkabel	grün
Unterseite Fahrbahnplatte	gelb

1: C:\Reflexdaten\be108\PROCCDATA\H4205-2\_25T / traces: 5007 / samples: 530

**BE108, 1.75m**

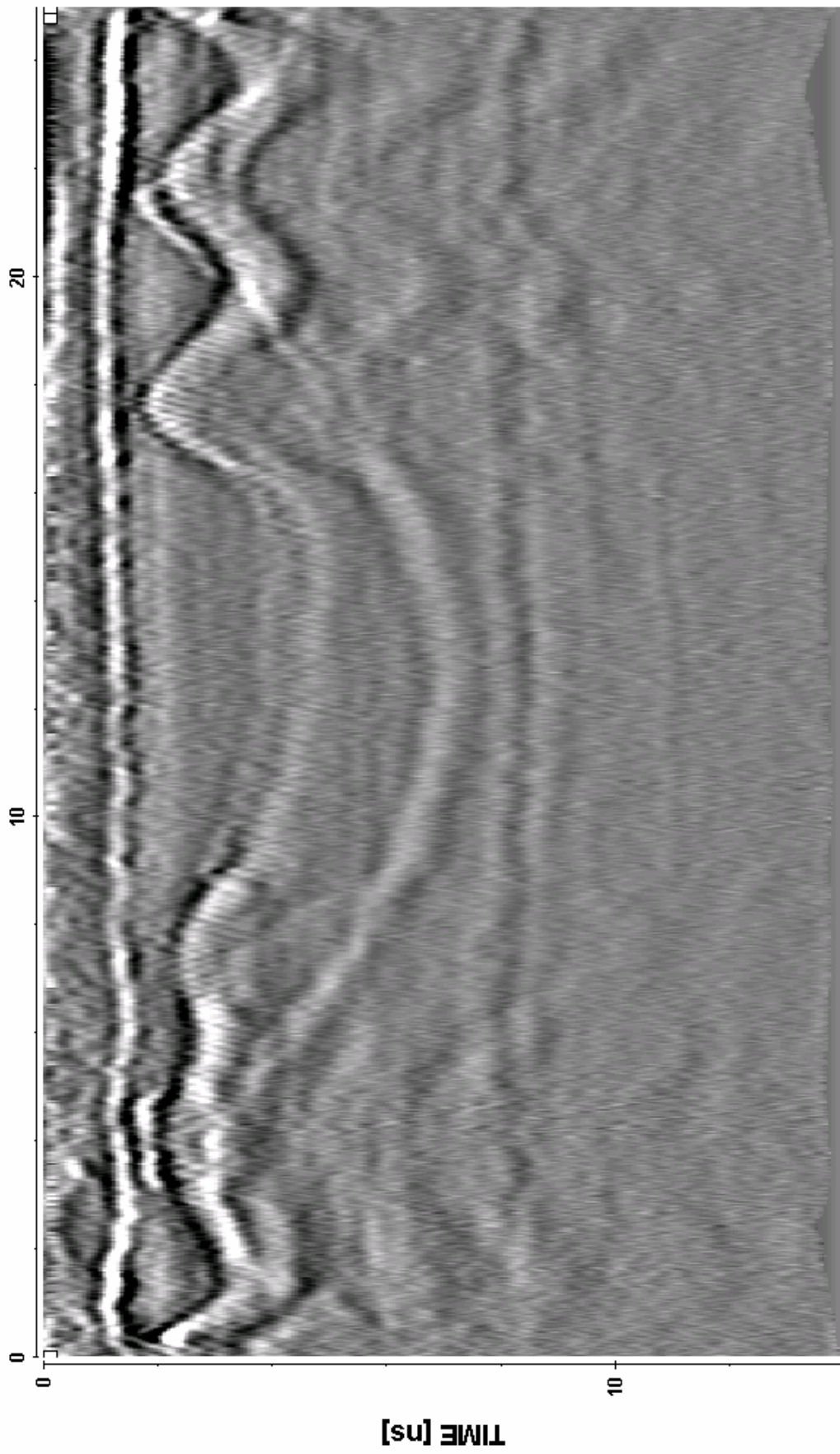


Abbildung 10.4.8: Datensatz

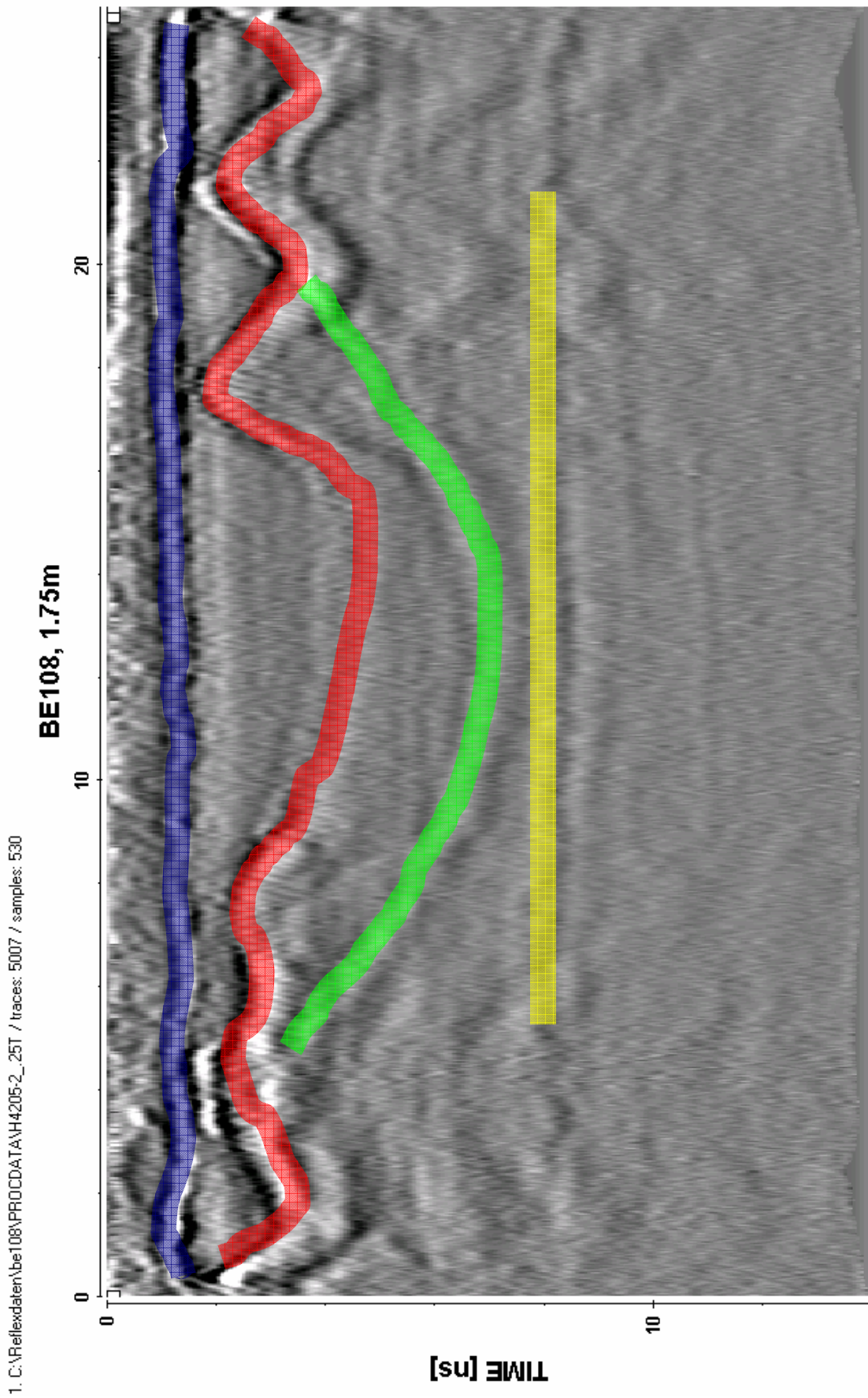


Abbildung 10.4.9: Datensatz mit Interpretation



## Belagsstärke

Der Belag war schon vor dem Herunterheben der Brückenplatte entfernt worden, so dass eine Überprüfung der Belagsdicke nicht möglich war.

## Bestimmung der tatsächlichen Eisenüberdeckung

Im Januar 2004 wurde die Brückenplatte abgehoben und als ganzes abgelegt. Anschliessend wurden zwei Längs- und zwei Querschnitte vorgenommen (*Abbildung 10.4.10*). Entlang der beiden Radar Messlinien im Abstand von 1.75m (Linie A) und 3.5m (Linie B) ab der Betonbordüre Seite Bützberg wurden im Abstand von einem Meter die Eisenüberdeckungen der beiden Bewehrungslagen (*Abbildung 10.4.11*), die Durchmesser der dem Messpunkt am nächsten liegenden Eisen sowie die lokale Maschenweite bestimmt.



*Abbildung 10.4.10: Schneiden der Brückenplatte*

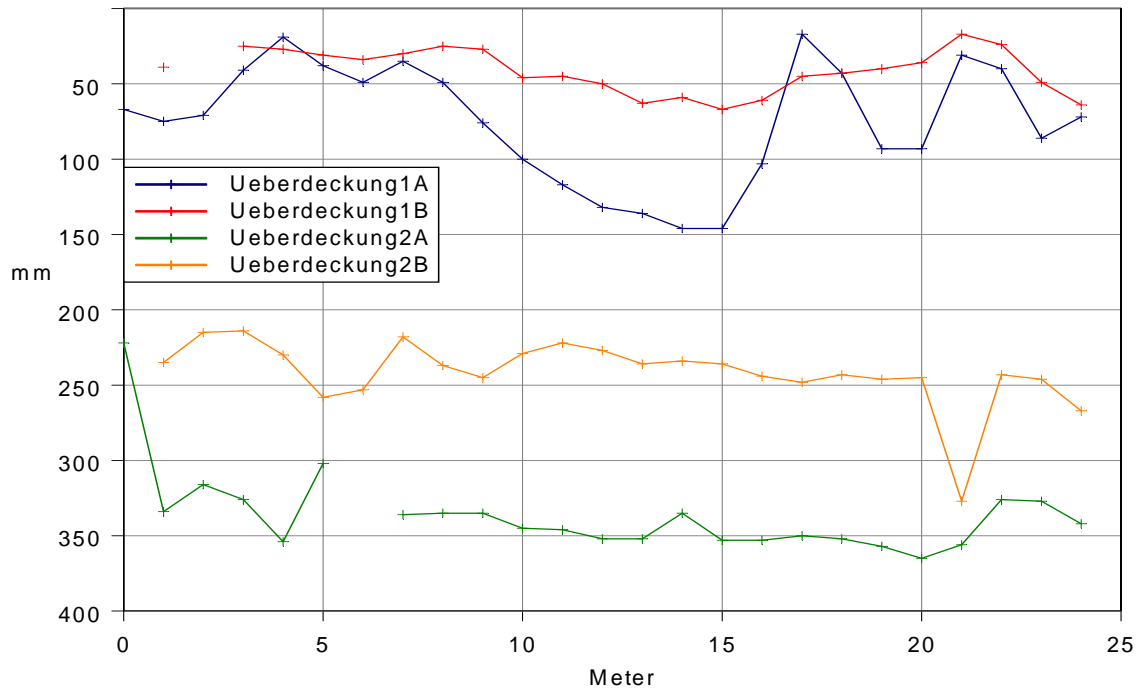


Abbildung 10.4.11: Eisenüberdeckung

Die Ergebnisse für die Eisenüberdeckungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Tabelle 10.4-2: Eisenüberdeckung

<b>1. Bewehrungslage</b>	Linie A	Linie B
Minimum (mm)	17	17
Maximum (mm)	146	67
Mittelwert (mm)	75	41
<b>2. Bewehrungslage</b>	Linie A	Linie B
Minimum (mm)	222	214
Maximum (mm)	365	327
Mittelwert (mm)	336	242

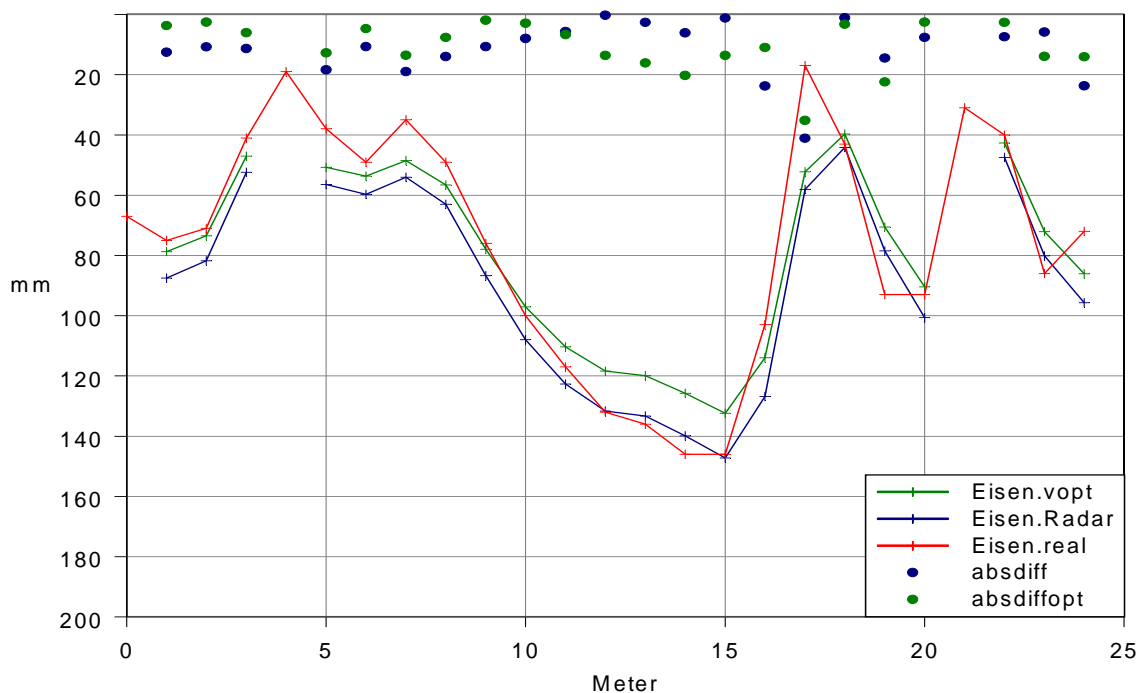
## Vergleich Radar-Realität

### Eisenüberdeckung

Die Radarergebnisse lagen in horizontalen Abständen von 0.005 m vor, die tatsächliche Eisenüberdeckung war im Abstand von jeweils einem Meter ausgemessen worden. Deshalb wurden die Radarergebnisse zunächst auf die Positionen umgerechnet, an denen die Eisenüberdeckung ausgemessen worden war. Dabei wurde jeweils über  $\pm 0.15$  m, d.h. 60 Messpunkte gemittelt.

Für die Berechnung der Eisenüberdeckung aus den Radardaten wurde eine konstante Ausbreitungsgeschwindigkeit des Radarsignals von  $v_{\text{Beton}} = 0.82 \cdot 10^8$  m/s verwendet. Diese Geschwindigkeit war vor der Auswertung der Radardaten mittels einer Sondierung kalibriert worden.

Die *Abbildung 10.4.12* und die *Abbildung 10.4.13* zeigen einen Vergleich zwischen den Radarergebnissen (blaue Linie) und der Realität (rote Linie) für die oberste Bewehrungslage. Zusätzlich ist mit blauen Punkten die absolute Differenz dargestellt. Die grüne Linie zeigt das Radarergebnis mit einer Ausbreitungsgeschwindigkeit von  $0.74 \cdot 10^8$  m/s für die Linie A und  $0.58 \cdot 10^8$  m/s die Linie B. Diese Geschwindigkeiten minimieren die mittlere absolute Differenz zwischen Radarergebnis und Realität.



*Abbildung 10.4.12: Radarergebnis und Realität für die Eisenüberdeckung auf der Linie A*

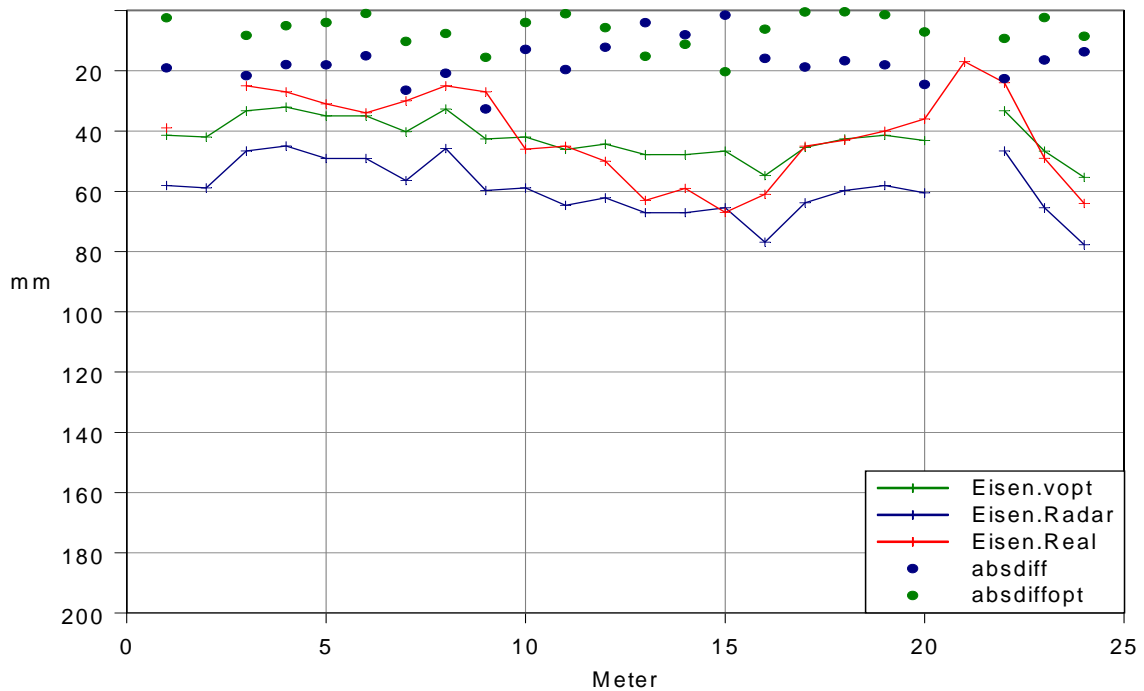


Abbildung 10.4.13: Radarergebnis und Realität für die Eisenüberdeckung auf der Linie B

Der Vergleich zwischen den Radarergebnissen und der Realität für die 1. Bewehrungslage lässt sich wie folgt zusammenfassen:

Tabelle 10.4-3: Vergleich zwischen Radarergebnis und Realität

	Linie A	Linie B	Linie A, vopt	Linie B, vopt
Mittlere Differenz	12	17	11	7
Max. Differenz	41	33	35	20

Auf beiden Messlinien ergeben sich kleinere Lücken in den Resultaten für die Eisenüberdeckung. Die Gründe hierfür sollen am Beispiel der Linie A erläutert werden. Bei 4.0 Metern und bei 21.0 Metern wird kein Radarresultat erzielt. Die *Abbildung 10.4.14* zeigt den Radardatensatz dieser Messlinie. Die Positionen 4.0m und 21.0m sind mit roten Linien gekennzeichnet. An beiden Stellen überlagern sich mehrere Reflexionen, so dass nicht mit Sicherheit bestimmt werden kann, welche von der obersten Bewehrungslage stammt.

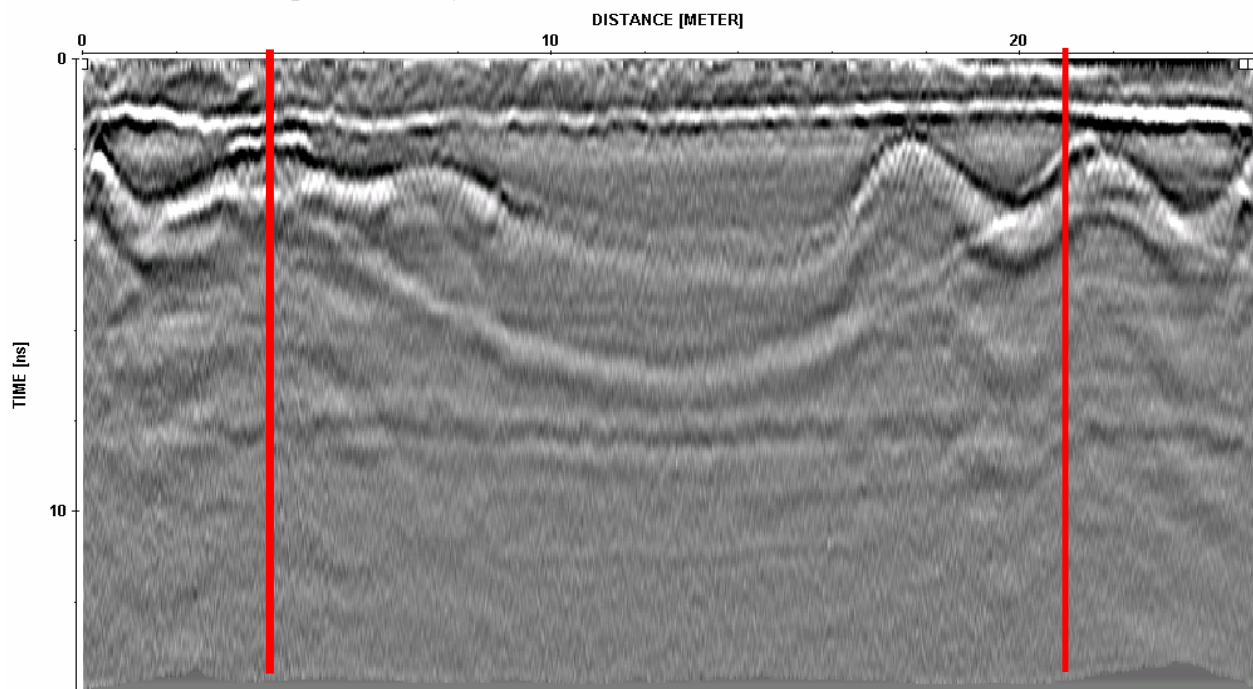


Abbildung 10.4.14: Radardatensatz der Messlinie A

### Tiefere Bewehrungslagen

Mit den Radardaten der Überführung Wyssenried können keine Aussagen über tiefere Bewehrungslagen gewonnen werden.

### Maschenweite der obersten Bewehrungslage

Die Maschenweite der obersten Bewehrungslage kann über weite Bereiche festgestellt werden. In *Abbildung 10.4.15* ist dies beispielhaft an einem Ausschnitt gezeigt. Die Position einzelner Bewehrungsseisen ist mit roten Pfeilen gekennzeichnet. Die tatsächlichen, manuell gemessenen Maschenweiten bei 19.0m betragen zwischen 110mm und 124mm. Die aus den Radardaten ermittelten Maschenweiten variieren zwischen 110mm und 120mm. Keine Angaben können in Bereichen gemacht werden, wo sich verschiedene Signale wie beispielsweise Bewehrung/Vorspannung oder Bewehrung/ UG-Belag überlagern oder wo die Bewehrung besonders tief liegt.

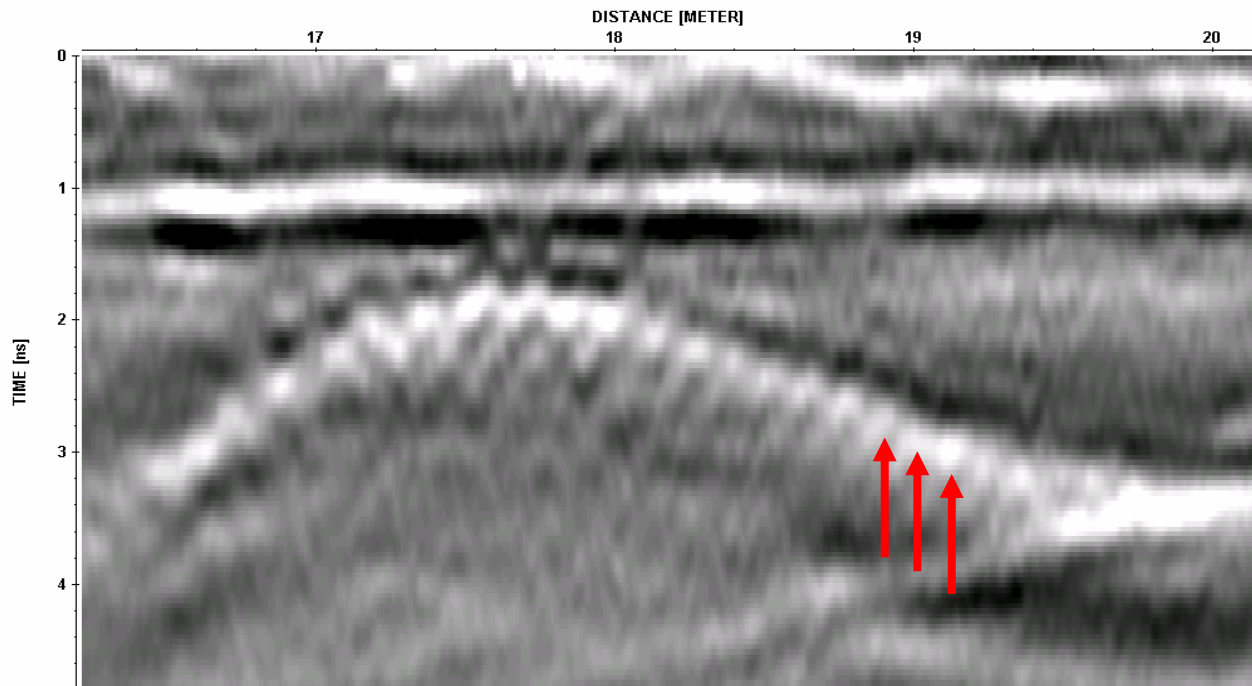


Abbildung 10.4.15: Ausschnitt aus dem Radardatensatz der Linie A, die roten Pfeile bezeichnen die Position einzelner Bewehrungsseisen

## Schlussfolgerungen

Die Qualität der Radardaten ist, was die Reflexionen am Übergang Asphalt-Belag und an der obersten Bewehrungslage betrifft, als gut zu bezeichnen.

Die Asphaltstärke und die Eisenüberdeckung der obersten Bewehrungslage sind problemlos auswertbar. Die Maschenweite der obersten Bewehrungslage kann über weite Bereiche ebenfalls bestimmt werden.

Informationen über die zweite Bewehrungslage können aus den vorliegenden Datensätzen nicht gewonnen werden.

Der Vergleich zwischen Radarergebnissen und der Realität für die Eisenüberdeckung ergibt bei Verwendung einer konstanten Ausbreitungsgeschwindigkeit von  $v_{\text{Beton}} = 0.82 \cdot 10^8$  m/s mittlere Fehler von 12mm (Linie A) und 17mm (Linie B). Durch Verwendung von berechneten Ausbreitungsgeschwindigkeiten  $v_{\text{opt}} = 0.74 \cdot 10^8$  m/s (Linie A) bzw.  $v_{\text{opt}} = 0.58 \cdot 10^8$  m/s (Linie B) kann der mittlere Fehler auf 11mm (Linie A) bzw. 7mm (Linie B) reduziert werden.

Insbesondere auf Grund der grossen Schwankungen der Eisenüberdeckung stellt die Überführung Wyssenried ein lohnendes Objekt im Rahmen dieses Projektes dar.

## 10.5 Aabachbrücke Uster

### Technische Daten

Die folgenden Informationen wurden den vom Tiefbauamt des Kantons Zürich und der Firma DSP/ Greifensee zur Verfügung gestellten Unterlagen entnommen.

Tabelle 10.5-1: Aabachbrücke Uster, technische Daten

Objektname	Aabachbrücke
Kanton	Zürich
Nr.	0198-27
Bez. Des Bauherren	Eisenbetonbrücke über den Aabach
Standort, Gemeinde	Uster
Hindernis	Aabach
Brückentyp	Eisenbetonbrücke
Vorspannung	keine
Gesamtlänge	16.3m
Gesamtbreite	10.34m
Abdichtung	unbekannt
Baujahr	Ca. 1953
Abbruch	2004
Abbruchgrund	Ersatz durch neue Brücke

### Pläne

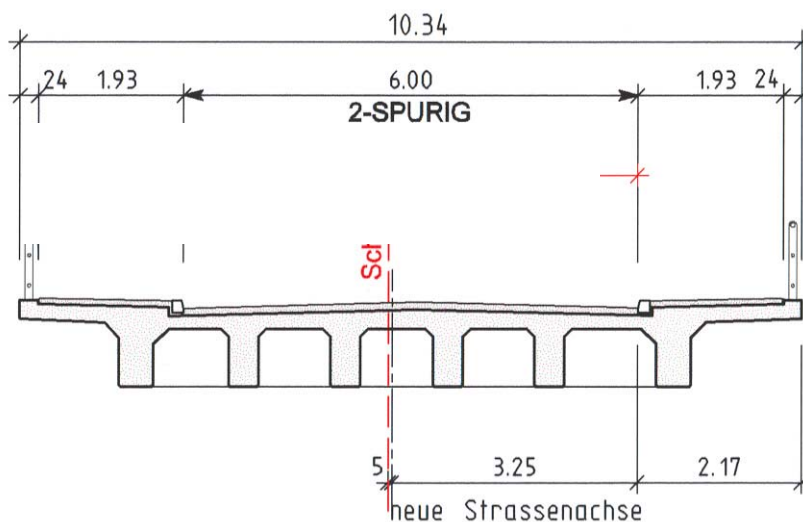


Abbildung 10.5.1: Querschnitt

## Photos



Abbildung 10.5.2: Fahrbahn von Norden betrachtet



Abbildung 10.5.3: Seitenansicht von Osten betrachtet

## Radarmessung, Radarergebnisse und Vergleich mit der Realität

### Erhaltene Angaben

- Pläne der Brücke: Schalungsplan
- Eisenbetonplan
- Abbruchplan
- Mündliche Informationen durch die Herren Roger Cadonau und Peter Hänni von der DSP AG

### Ausführung der Messungen

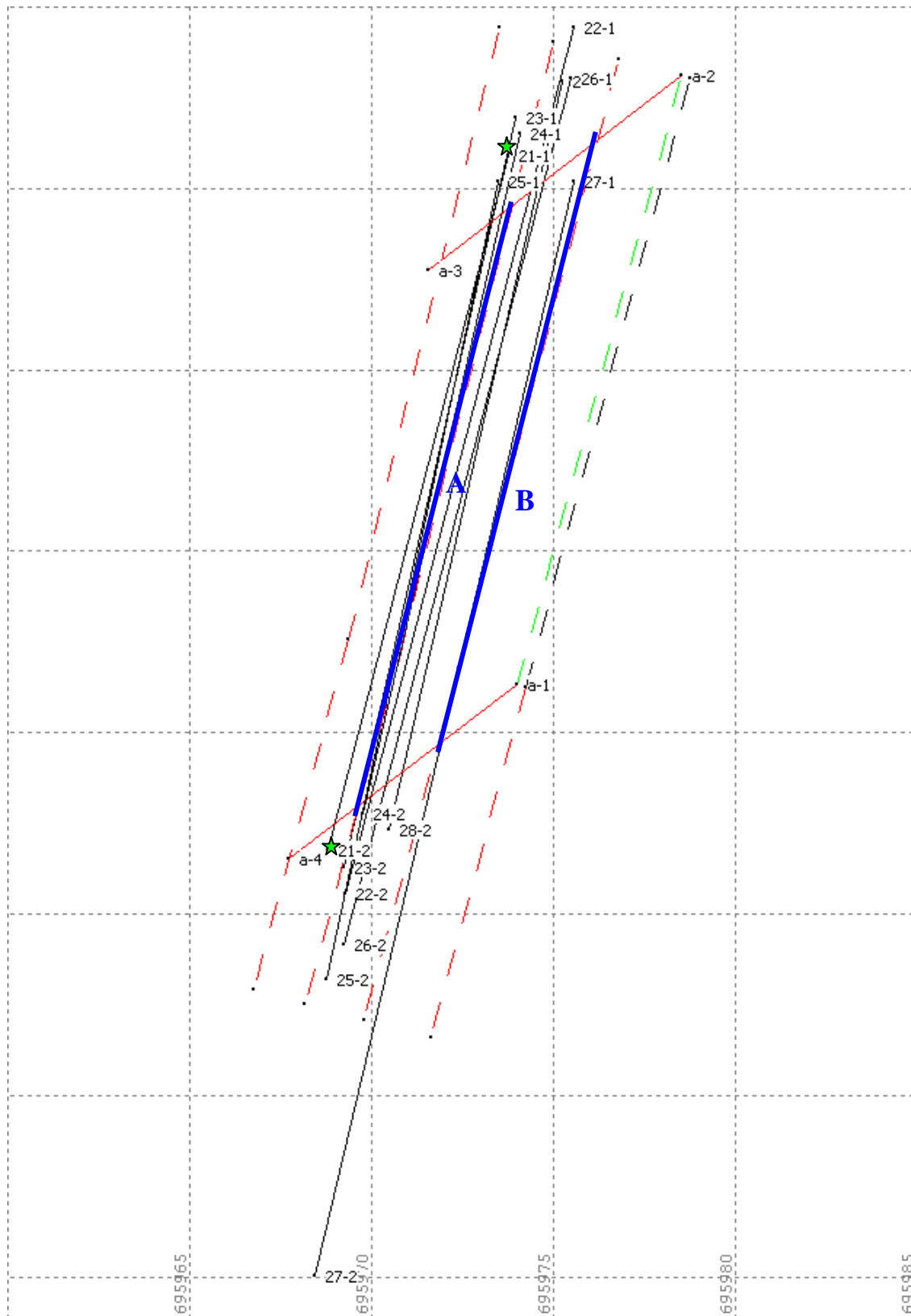
Die Messungen wurden am Vormittag des 04. Juni 2004 bei trockener Witterung durchgeführt. Zu diesem Zeitpunkt war die westliche Hälfte der Brücke bereits abgebrochen und der Belag auf dem noch vorhandenen Brückenteil entfernt worden. Der Verkehr wurde wegen der vorhandenen Baustelle einspurig in Richtung Nord-Süd geführt. Die Radarmessung wurde im einspurig fließenden Verkehr durchgeführt.

Da die zukünftigen Schnittpositionen auf dem noch vorhandenen Brückenteil zum Zeitpunkt der Radarmessung noch nicht bekannt waren, wurden versucht möglichst viele Messlinien aufzuzeichnen und deren Position mittels GPS zu bestimmen. Hierbei stellte sich das Problem, dass durch die zahlreich vorhandenen Bäume und die dadurch verursachte Abdeckung der GPS-Satelliten die Genauigkeit der Positionsbestimmung nur auf einer Linie ausreichend war. Da die Fahrbahn nicht abgesperrt war, konnten die Positionen der Messlinien auch nicht anderweitig eingemessen werden.

Die *Abbildung 10.5.4* zeigt die mittels GPS eingemessenen Eckpunkte der bestehenden Struktur (a-1, a-2, a-3, a-4) sowie die mittels GPS eingemessenen Radar-Messlinien (21.1/2 bis 28-1/2). Ausser den Eckpunkten konnte lediglich die Position der Punkte 21-1 und 21-2 (grüner Stern) mit einer ausreichenden Genauigkeit (0.065m bzw. 0.007m) bestimmt werden. Die anderen Messpunkte (22-1/2 bis 28-1/2) wiesen lediglich Genauigkeiten um 0.5m auf.



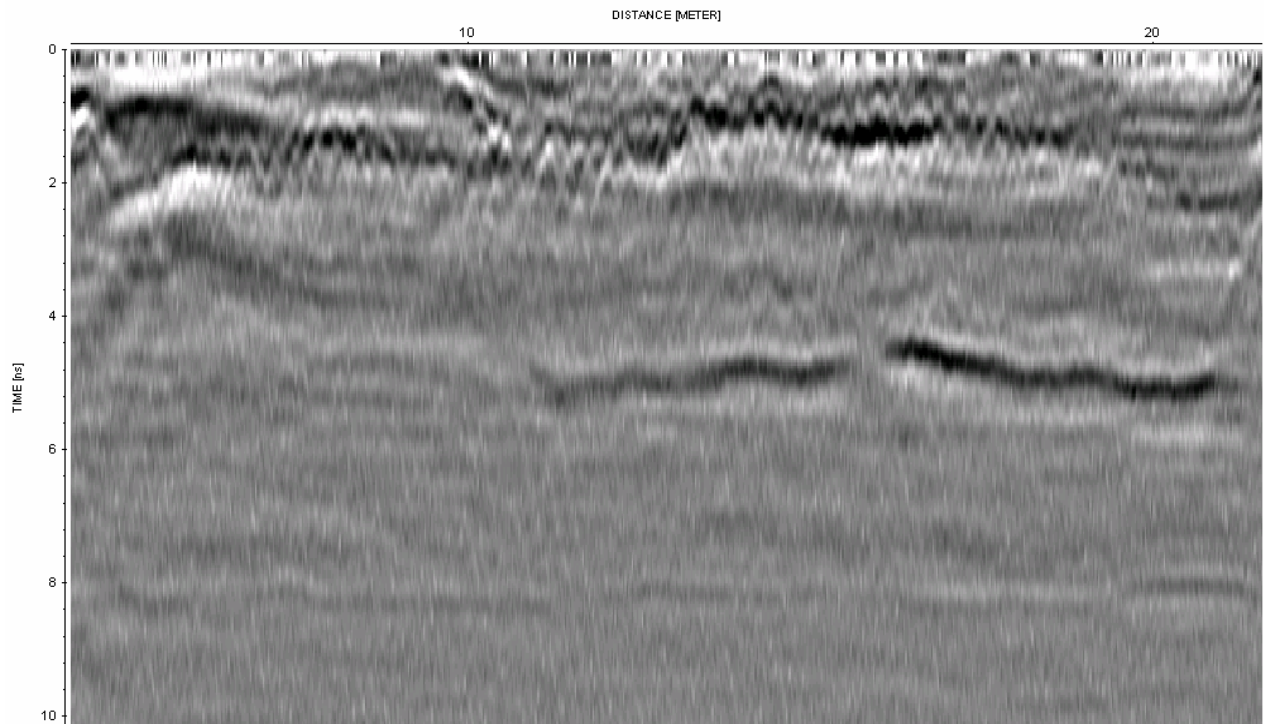
Die blauen Linien A und B in *Abbildung 10.5.4* zeigen die nachträglich bestimmten Positionen der Schnittlinien. Darauf wird in weiter unten eingegangen.



*Abbildung 10.5.4: Eckpunkte der bestehenden Struktur, Mess- und Schnittlinien*

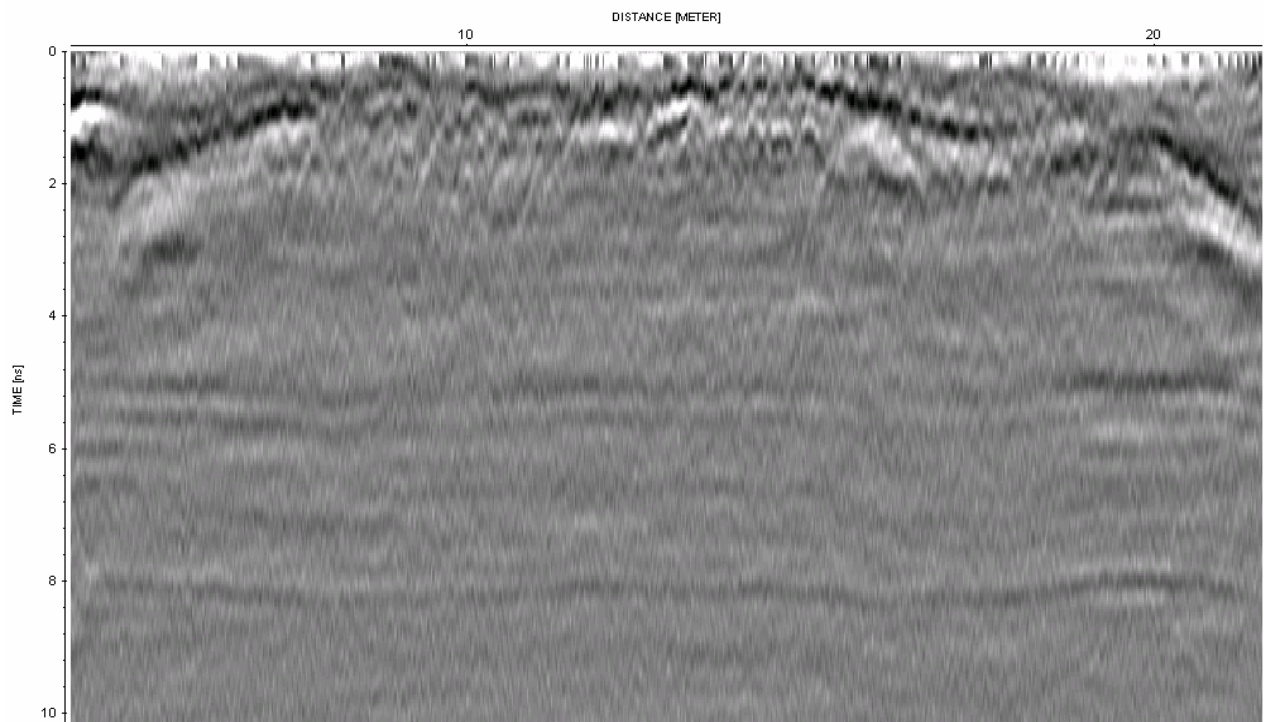
Die Daten der Messlinien 21 und 27 nach der Datenverarbeitung sind in der *Abbildung 10.5.5* und der *Abbildung 10.5.6* dargestellt.

1. C:\EmpaDaten\Reflexdaten\aabach-uster\PROCDA\U-21\_\_\_\_.06T / traces: 1175 / samples: 537



*Abbildung 10.5.5: Daten der Messlinie 21 nach Datenbearbeitung*

1. C:\EmpaDaten\Reflexdaten\aabach-uster\PROCDA\U-27\_\_\_\_.06T / traces: 1075 / samples: 531



*Abbildung 10.5.6: Daten der Messlinie 27 nach Datenbearbeitung*

## Untersuchungsergebnisse und Vergleich mit der Realität

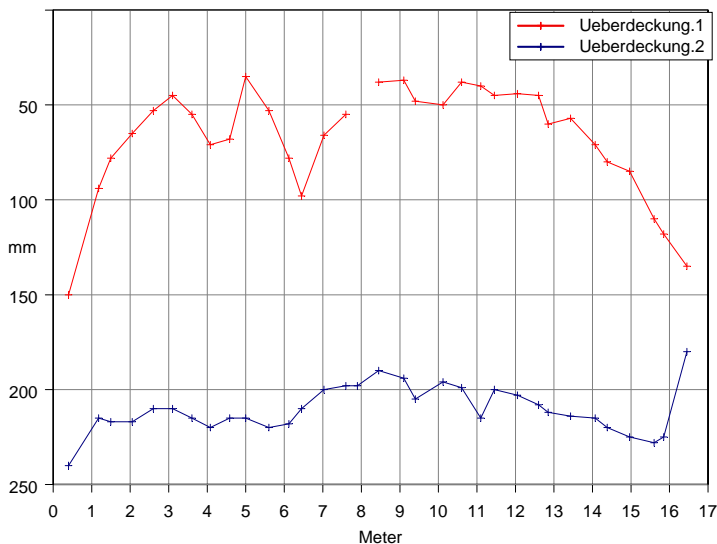
Da die Positionen der Schnittlinien vor dem Abbruch nicht bekannt waren, wurden die Radardaten zunächst nicht ausgewertet. Anhand der Breite der geschnittenen Teile auf der Deponie (*Abbildung 10.5.7, Abbildung 10.5.8*) wurden die Schnittpositionen nachträglich bestimmt. Sie sind in der *Abbildung 10.5.4* als blaue Linien eingezeichnet. Es stellte sich heraus, dass die einzige mit ausreichender Genauigkeit positionierte Linie (21-1/2) ca. 0.5m vom Schnitt A entfernt liegt und sich die Linie 27-1/2 zwar teilweise recht gut mit dem Schnitt B deckt, jedoch eine horizontale Positionsgenauigkeit von lediglich 0.65m aufweist. Da Eisenüberdeckungen erfahrungsgemäss auf engstem Raum erhebliche Variationen aufweisen können, wurde entschieden lediglich einen qualitativen Vergleich durchzuführen.



*Abbildung 10.5.7: Brückenteile auf der Deponie*



*Abbildung 10.5.8: Brückenteile auf der Deponie*



*Abbildung 10.5.9: Eisenüberdeckung der beiden Bewehrungslagen entlang der Linie A*

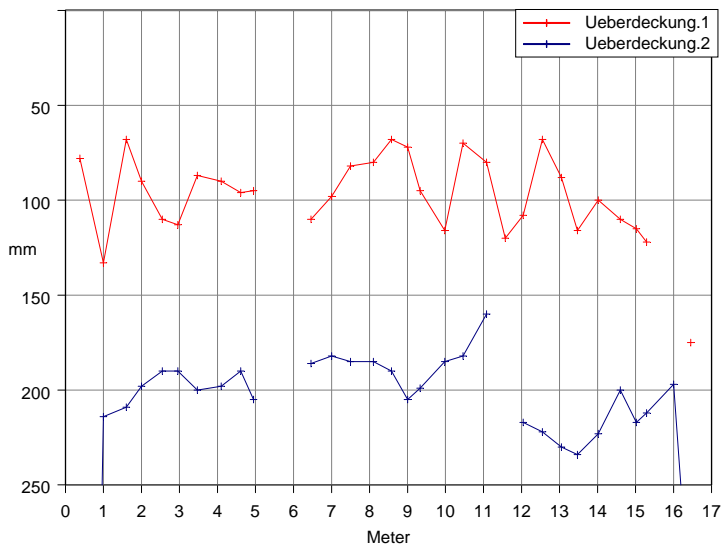


Abbildung 10.5.10: Eisenüberdeckung der beiden Bewehrungslagen entlang der Linie B

Die sonst übliche Kalibration der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Radarsignals im Beton wurde bei dieser Untersuchung nicht durchgeführt, da weder Sondierungen noch sonstige Vergleichsmöglichkeiten zur Verfügung standen. Stattdessen wurde überall eine Ausbreitungsgeschwindigkeit von  $0.80 \cdot 10^8$  m/s verwendet. Diese Geschwindigkeit liegt etwa in der Mitte des bei bisherigen Untersuchungen ermittelten Geschwindigkeitsbereiches.

Die Abbildung 10.5.11 zeigt den Vergleich zwischen den Radarergebnissen für die Eisenüberdeckung der obersten Bewehrungslage und der an der 0.5m entfernten Schnittlinie A ermittelten tatsächlichen Überdeckung. Die beiden Kurven zeigen einen recht ähnlichen Verlauf. Auf eine quantitative Untersuchung der Genauigkeit wurde wegen des Abstandes von 0.5m verzichtet.

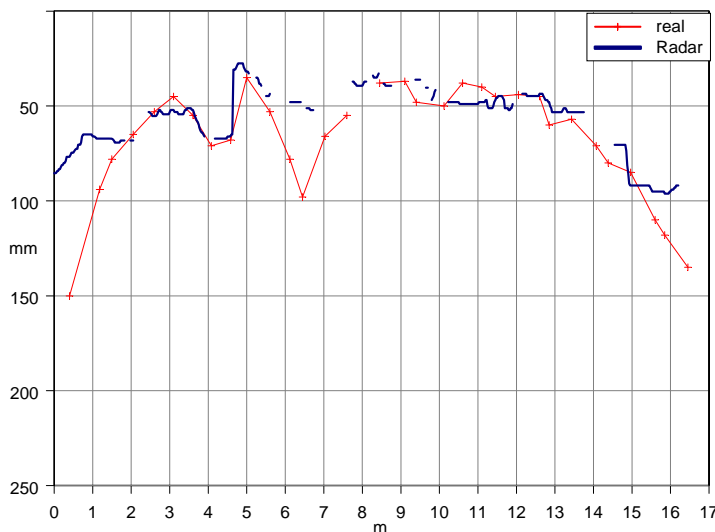


Abbildung 10.5.11: Vergleich Radar – Realität für die Linie A, Eisenüberdeckung oberste Bewehrungslage

Ein anderes Bild ergibt sich aus dem Vergleich an der Linie B (Abbildung 10.5.12). Hier ergeben sich erhebliche Unterschiede. Da die Position der Radarmessung nur sehr ungenau bekannt ist, soll auf diese Messung nicht weiter eingegangen werden.

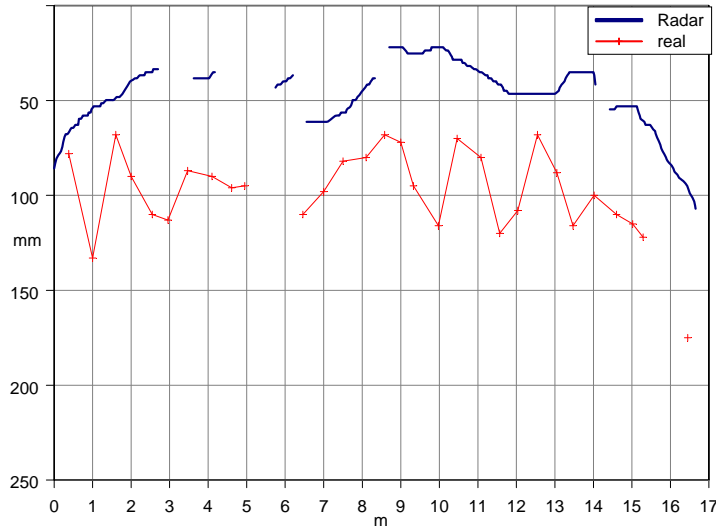


Abbildung 10.5.12: Vergleich Radar – Realität für die Linie B, Eisenüberdeckung oberste Bewehrungslage

Der Datensatz der Linie 21 weist eine deutlich ausgeprägte Reflexion zwischen 4 und 6 Nanosekunden auf (Abbildung 10.5.19, rote Pfeile). Ein Vergleich mit der Überdeckung der zweiten Bewehrungslage (Abbildung 10.5.14) ergibt eine gute Übereinstimmung. Der Abstand zwischen der Obergrenze der zweiten Bewehrungslage und der Untergrenze Beton beträgt an den meisten Stellen etwas über 0.03m (Abbildung 10.5.15–Abbildung 10.5.18). Somit kann nicht definitiv festgestellt werden ob es sich um die Reflexion an der zweiten Bewehrungslage oder an der Untergrenze Beton handelt.

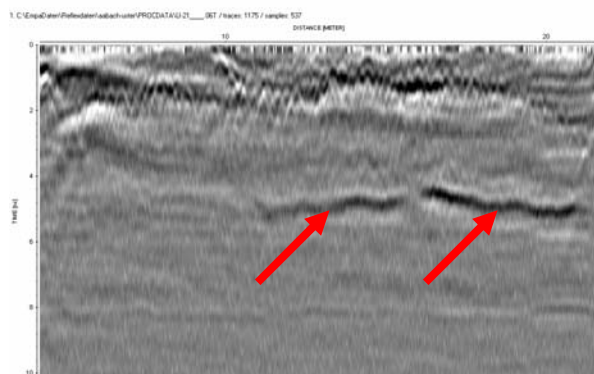


Abbildung 10.5.13: Datensatz der Linie 21

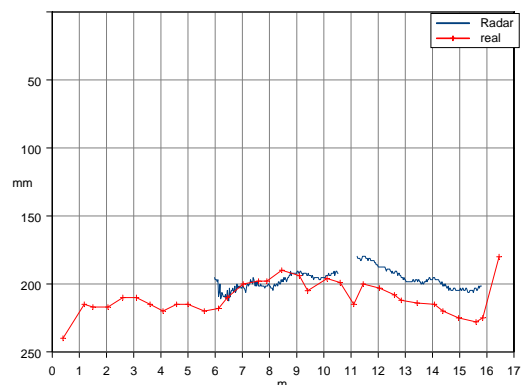


Abbildung 10.5.14: Vergleich Radar – Realität für die Linie A, zweite Bewehrungslage



Abbildung 10.5.15: Linie A, 6.50m



Abbildung 10.5.16: Linie A, 7.0m



Abbildung 10.5.17: Linie A 14.0m



Abbildung 10.5.18: Linie A, 15.0m

Die Maschenweite der obersten Bewehrungslage entlang der Linie A beträgt im Mittel 246mm und ist damit im Vergleich zu den bisher untersuchten Brücken deutlich grösser. Vermutlich ist dies ein Grund für die doch recht grossen Lücken im Radarergebnis für die oberste Bewehrungslage. Die Auswertung der Radardaten bzgl. Der Maschenweite ergibt ebenfalls Werte von deutlich über 0.2m. Ein Beispiel davon zeigt der Ausschnitt der *Abbildung 10.5.19* und der *Abbildung 10.5.20*.

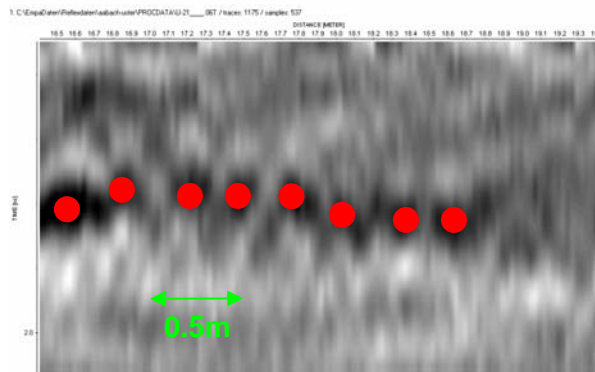


Abbildung 10.5.19: Datensatz der Linie 21 (Ausschnitt)

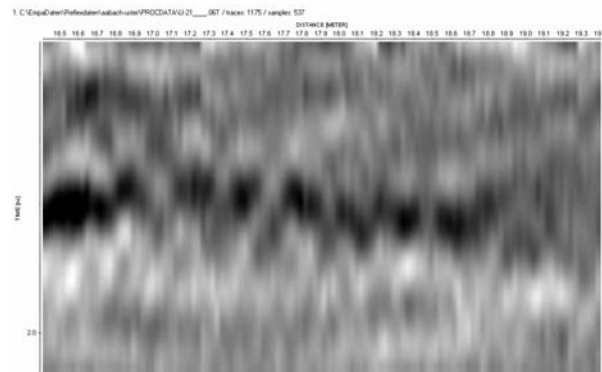


Abbildung 10.5.20: Datensatz der Linie 21 (Ausschnitt), rote Punkte bezeichnen einzelne Bewehrungsseisen

## **11 Beilage: Wegleitung für Praktiker**

# Georadar auf Brücken

Eine Wegleitung für Praktiker

Johannes Hugenschmidt, Empa  
Dezember 2004  
Version 1.9



## Begriffe

**Manuelle Messung:** Radarantenne wird von Hand über das Untersuchungsobjekt geführt

**Mobile Messung:** Messung mit der mobilen Georadar-Anlage

## Hinweise

Diese Wegleitung kann ab Februar 2005 unter [www.empa.ch/abt113/](http://www.empa.ch/abt113/) „Georadar auf Brücken – eine Wegleitung für Praktiker“ heruntergeladen werden.

Wir planen diese Wegleitung in Zukunft bei Bedarf zu aktualisieren. Bitte schicken Sie Hinweise und Kommentare an [johannes.hugenschmidt@empa.ch](mailto:johannes.hugenschmidt@empa.ch).



## Grundlagen

### ***Mögliche Untersuchungstiefe***

Grundsätzlich gilt, je grösser die Untersuchungstiefe, desto schlechter das Auflösungsvermögen. Somit hängt die mögliche Untersuchungstiefe direkt von der Fragestellung ab. Zusätzlich spielt das untersuchte Objekt eine wesentliche Rolle. Dicht liegende Bewehrung kann darunterliegende Strukturen abschirmen.

Das Radarsignal kann durchgehende Metallflächen nicht durchdringen. Somit stellt beispielsweise die Tiefe einer metallisch beschichteten Bitumenbahn gleichzeitig die in diesem Fall mögliche maximale Untersuchungstiefe dar.

### ***Sonstiges***

Die Anwendung des Georadar Verfahrens hat keinerlei Auswirkungen auf das untersuchte Objekt.

Messungen können zu jeder Tages- und Nachtzeit sowie zu jeder Jahreszeit durchgeführt werden.

Ausser bei Gewitter kann das Verfahren für die meisten Anwendungen bei jedem Wetter eingesetzt werden. Lediglich bei Anwendungen, bei denen die Feuchtigkeit im untersuchten Objekt eine wesentliche Rolle spielt (z. B. Detektierung von Belagsschäden) ergeben sich Einschränkungen.

## Anwendungsgebiete

### ***Belagsdicke***

Die Belagsdicke kann im Normalfall fast überall mit einer mobilen Messung bestimmt werden. Ein mittlerer Fehler von 10mm oder weniger ist realistisch.

### ***Dicke einzelner Belagsschichten***

Die Dicke einzelner Belagsschichten kann in vielen Fällen mit einer mobilen Messung untersucht werden. Voraussetzung ist allerdings ein Kontrast in den elektrischen Eigenschaften der einzelnen Schichten und eine minimale Schichtdicke von ca. 30mm. Im Zweifelsfall empfiehlt sich ein Vorversuch.

### ***Belagsschäden***

Belagsschäden wie Korn- und Schichtablösungen können mit einer mobilen Messung untersucht werden. Über den Grad der Schädigung können nur qualitative Aussagen gemacht werden.

### ***Eisenüberdeckung der obersten Bewehrungslage***

Die Eisenüberdeckung der obersten Bewehrungslage kann im Normalfall mit einer mobilen Messung über weite Bereiche bestimmt werden, einzelne Lücken im Ergebnis sind wahrscheinlich. Ein mittlerer Fehler von 10mm ist realistisch.

### ***Maschenweite der obersten Bewehrungslage***

Die Maschenweite kann vor allem dort bestimmt werden, wo die Bewehrung nicht zu tief im Beton liegt. Im Zweifelsfall ist eine manuelle einer mobilen Messung vorzuziehen.

### ***Tiefere Bewehrungslagen***

Können normalerweise nicht mit der mobilen Anlage untersucht werden. Möglich ist vielfach eine manuelle Messung von der Brückenunterseite.

### ***Ortung von Vorspannkabeln***

Die Ortung von Vorspannkabeln ist mit manuellen Messungen direkt auf der Betonoberfläche mit einer Genauigkeit von besser als 50mm möglich. Mit der mobilen Anlage auf Asphalt liegen noch nicht genügend Erfahrungen vor. Der Anteil aufgefundener Kabel hängt ab vom investierten Zeitaufwand und vom untersuchten Objekt.

### ***Chloridgehalt im Beton***

Zonen mit erhöhtem Chloridgehalt können gemäss den bisherigen Erfahrungen (Erfahrung beschränkt aus eine Brücke) detektiert werden. Die Ermittlung genauer Chloridgehalte erscheint auch in Zukunft eher unrealistisch.

## **Empfehlungen**

### ***Ausrüstung***

Für Messungen auf Brücken sind hochfrequente Antennen (> 1GHz) erforderlich. Sofern Messungen mit einer mobilen Anlage vorgenommen werden, muss das System eine hohe Messrate haben (>100 Messpunkte pro Sekunde)

### ***Personal***

Trotz aller technischen Fortschritte sollte das Personal Erfahrung mit dem Georadar-Verfahren und dessen Anwendung auf Brücken haben.

### ***Untersuchtes Objekt***

Die Oberfläche des untersuchten Objektes sollte frei von Verschmutzungen und Tausalz sein.

### ***Untersuchungsbericht***

Der Untersuchungsbericht sollte die eingesetzte Ausrüstung, die Vorgehensweise und das eingesetzte Personal benennen. Die Radardaten sind zumindest anhand von Beispielen zu zeigen, um eine Plausibilitätsüberprüfung durch Dritte zu ermöglichen.

## ***Planung von Radarmessungen***

Zwar können mit mobilen Georadar-Anlagen Messungen auch mit hohen Fahrgeschwindigkeiten (z.B. EMPA-Anlage max. 80 km/h) vorgenommen werden, jedoch sind auf Brücken zur Einhaltung vorgegebener Messlinien und wegen der Genauigkeit der Positionsbestimmung geringere Fahrgeschwindigkeiten (z.B. 10 km/h) empfehlenswert. Hierzu sind die entsprechenden Sicherheitsvorkehrungen (temporäre Absperrung einzelner Spuren, fahrbare Wand) einzuplanen.

Auf Baustellen ist sicherzustellen, dass die vorgesehenen Messlinien nicht mit Hindernissen verstellt sind. Für manuelle Messungen sollte die Betonoberfläche möglichst nicht aufgeraut sein.

GPS unterstützte Messkampagnen können beispielsweise in Strassenschluchten durch die Abdeckung der Satelliten durch Häuser verunmöglicht werden. Auch beim Einsatz moderner Vermessungstechnik, empfiehlt es sich zumindest über vereinzelte Markierungen mit bekannter Position zu verfügen.

Vereinzelte Sondierungen oder Bohrungen sind für die Auswertung von Radardaten immer nützlich und meist erforderlich. Wenn möglich, sollten deren Positionen erst nach Sichtung der Radardaten festgelegt werden.

## ***Allgemeines***

Eine guter Informationsfluss zwischen dem für das Bauwerk zuständigen Ingenieur und dem Radarspezialisten ist für den Erfolg oft entscheidend. Radardaten enthalten Vieldeutigkeiten und die richtige Interpretation ist oft nur mit Hilfe von Zusatzinformation möglich.