



# Zerstörungsfreie Analyse des Strassenaufbaus und objektive Erfassung des Zustands bei Forststrassen

## Schlussbericht

Zollikofen, 30.11.2022

WHFF-CH gefördertes Projekt (2020.07)

**Impressum:****Projektleitung und -verantwortung:**

Dr. Martin Ziesak, Berner Fachhochschule, Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (HAFL),  
Länggasse 85, 3052 Zollikofen, [martin.ziesak@bfh.ch](mailto:martin.ziesak@bfh.ch)

**Projektarbeit HAFL:****Teil 1:**

Patrick Dietsch\* (Bericht und Projektbearbeitung)  
Matthias Rivera  
Marc Dumont

**Teil 2:**

Michael Starke\*  
Niclò Brodbeck

**Gesamtbericht:**

Patrick Dietsch ([patrick.dietsch@bfh.ch](mailto:patrick.dietsch@bfh.ch)), Michael Starke ([michael.starke@bfh.ch](mailto:michael.starke@bfh.ch))

\* Korrespondierender Autor

**Projektfinanzierung:**

Wald- und Holzforschungsförderung Schweiz (WHFF-CH), BAFU, Abteilung Wald, 3003 Bern

**Projektbegleitung BAFU:**

Claire-Lise Suter-Thalmann

**Fachliche Projektbegleitung:**

Fachstelle für Forstliche Bautechnik (Fobatec) – Walter Krättli

**Projektarbeit und -begleitung Feldaufnahmen**

Forstbetrieb Sigriswil: Björn Weber, Stefan Wenger, René Rufener, Michael Kämpf  
Sensors & Software Inc.: Greg Johnston  
Screening Eagle – proceq: Fernando Constantino, Dieter Griess, Manuela Kaufmann

**Titelbild:** Michael Starke, 2022

**Zitiervorschlag:**

Dietsch, P.; Starke, M.; Brodbeck, N.; Ziesak, M. Zerstörungsfreie Analyse des Strassenaufbaus und objektive Erfassung des Zustands bei Forststrassen: Schlussbericht, Zollikofen, 2022.

# Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	5
1 Einleitung	6
<b>«Ground Penetrating Radar» (GPR) - Schichtstärkenerkennung und Ableitung der Tragfähigkeit</b>	<b>7</b>
2 Grundlagen GPR und Schichtstärkenerkennung	8
2.1 Funktionsweise von GPR	8
2.2 Bearbeitung von GPR-Daten	9
2.3 Interpretation von GPR-Daten	10
3 Verwendete GPR Soft- und Hardware	11
3.1 FMCW-GPR-Systeme	11
3.2 SFCW-GPR System	14
4 Messkampagne GPR	15
4.1 Testmessungen und Systemtests	15
4.2 Messkampagne Sigriswil – Kiesgrube Meiersmaad	16
4.2.1 Profil 2: Einfacher Strassenaufbau mit normierter Tragschicht und starker Deckschicht	17
4.2.2 Ergebnisse Kiesgrube «Meiersmaad» – Alle Profile	19
4.3 Messkampagne Sigriswil – Rasteraufnahmen	21
4.4 GPR-Messungen bei Strassen mit unbekanntem Aufbau	27
5 Ableitung der Tragfähigkeit unter Einbezug von GPR-Daten	28
5.1 Grundlagen Dimensionierung unbefestigter Strassen mit geringem Verkehr	28
5.2 Excel-basierte Berechnungshilfe	30
6 Diskussion Messkampagne GPR & Ableitung Tragfähigkeit	31
<b>Fahrbahnoberflächenanalyse zur Beurteilung des Zustandes von Forststrassen</b>	<b>34</b>
7 Grundlagen zur Erarbeitung eines Wegemonitoring- Konzeptes	35
8 Basis-Zielparameter zur Beurteilung des Zustands von Forststrassen	35
8.1 Fahrbahn, Graben und Durchlass	35
8.1.1 Verschleissprozesse und Kennwerte	35
8.1.2 Schadausprägung Geometrie und Oberflächenrauigkeit	36
8.2 Böschungen	37
8.3 Umliegender Waldbestand	37
9 Messansätze und Eignung	38
9.1 Anwendung der BFH- Messlanze zur Fahrbahnoberflächenanalyse	38
9.1.1 Hardware der Messlanze	38
9.1.2 Erfassung der Fahrbahngeometrie	39
9.1.3 Zusammenfassung der Kampagne zur Überprüfung des Systems «BFH- Messlanze»	39
9.1.4 Fazit zur Nutzung der BFH- Messlanze	40

9.2 Nutzung von Industrie-LiDAR Sensoren zur Echtzeiterfassung des Strassenzustandes	41
9.2.1 Hardware des Solid-State LiDAR System «Cube1»	41
9.2.2 Messaufbau bei Durchführung der Feldaufnahmen	41
9.2.3 Kriterienkatalog zur Beurteilung und Überprüfung der Anwendung des Cube 1	43
9.2.3.1 Scanausschnitt und Erfassung der Fahrbahn	43
9.2.3.2 Graben	45
9.2.3.3 Lichtraumprofil	47
9.3 Test der automatischen Auswerteroutine mit Qualitätseinwertung	47
9.3.1 Klassenausscheidungen	47
9.3.2 Anwendung der automatischen Klassifizierung und Ergebnisse	48
10 Diskussion Messkampagne LiDAR	51
11 Folgerungen und Ausblick	52
12 Dank	53
13 Abbildungsverzeichnis	54
14 Tabellenverzeichnis	56
15 Literaturverzeichnis	56
16 Anhang	59

## Zusammenfassung

Als übergeordnete Ziele untersuchte das Forschungsvorhaben die Möglichkeiten zur zerstörungsfreien Ableitung der Tragfähigkeit von Forststrassen durch Nutzung von Ground Penetrating Radar (GPR) sowie die objektive Ableitung des Strassenzustands durch Nutzung verschiedener Technologien, um die Grundlage für ein umfassendes Unterhaltskonzept zu schaffen.

In Teil 1 des Forschungsvorhabens wurden verschiedene GPR-Systeme bezüglich ihrer Eignung zur Erkennung von Schichtstärken bei Forststrassen verglichen. In einer Kiesgrube wurden Strassenaufbau-Profile mit metallischen Referenzobjekten zur eindeutigen Erkennung der Schichtgrenzen erstellt.

Bei Nutzung eines Ultrabreitband-Sensors mit einer Frequenz war die 500 MHz-Frequenz zur Erkennung von Schichtgrenzen bis zu einer Tiefe von rund 1 m geeignet. Die 1000 MHz-Frequenz erreichte diese Detektionstiefe nicht bei allen Profilen, erkannte die Deckschicht jedoch zuverlässiger als die niedrigere Frequenz. Ein GPR mit moduliertem Frequenzbereich ermöglichte dank grösserer Bandbreite in den meisten Fällen die gleichzeitige Interpretation von Schichtgrenzen in unterschiedlicher Tiefe. Schwierigkeiten bereitet bei allen Systemen das Erkennen von Grenzen zwischen ähnlichen Materialien. Im Anschluss wurden auf Forststrassen Rasteraufnahmen durchgeführt, welche bei erhöhtem Messaufwand zusätzlich eine 3D-Darstellung der GPR-Untersuchungen ermöglichen. Der Strassenaufbau wurde durch Aufreissen der Strasse verifiziert. Die Rasteraufnahmen brachten keinen Mehrwert zur Detektion der Schichtgrenzen.

Weitere Tests auf Strassen mit unbekanntem Aufbau haben die mögliche Detektionstiefe von rund 1 m bestätigt. Fast immer war eine Schichtgrenze erkennbar, die vermutlich auf den Übergang von Oberbau zu Unterbau zurückzuführen ist. Die grundsätzliche Eignung der beiden getesteten GPR-Technologien zur Erkennung der Stärke des Oberbaus kann bestätigt werden. Datenerhebung und -bearbeitung sind jedoch zeitaufwändig, weswegen die Technologie ohne Teilautomatisierung der Prozesse noch nicht für grössere Datenerhebungskampagnen auf Waldstrassen geeignet scheint.

Nach Ermittlung der Mächtigkeit des Oberbaus mit GPR, kann daraus gefolgert werden, welche Massnahmen erforderlich sind, um die Tragfähigkeit der Strasse zu gewährleisten. Der Stärkenindex bestehender Strassen wurde dazu anhand der Schichtstärke und Tragfähigkeit des Materials berechnet. Der erforderliche Stärkenindex wurde anhand der über die Lebensdauer der Strasse zu erwartenden Belastung mit einer Dimensionierungsformel berechnet. Deren Faktoren waren bis auf die Untergrundtragfähigkeit einfach zu erheben. Böden mit geringer Untergrundtragfähigkeit sowie Strassen mit mehrschichtigem Aufbau und unbekanntem Baumaterial erfordern auch bei der Nutzung von GPR eine Verifizierung durch Aufreissen der Strasse. Dies empfiehlt sich vor allem vor teuren Massnahmen.

Teil 2 des Projekts untersuchte die Eignung von zwei Aufnahmegeräten zur Beurteilung des Strassenzustands. Getestet wurden die auf Ultraschall-Sensoren basierte «BFH- Messlanze» und das Solid-State LiDAR System «Cube1» der Firma Blickfeld. Hierzu wurden die Systeme Messungen eines hochauflösenden terrestrischen Laserscanners gegenübergestellt und deren Eignung zur Erfassung der Wegezustandsparameter Fahrbahngeometrie und Oberfläche, Graben, Böschung und Lichtraumprofil diskutiert und getestet. Anschliessend wurde darauf aufbauend ein automatisiertes Auswertekonzept erarbeitet und eine Zustandsklassifizierung einer Forststrasse vorgenommen.

Mit dem Solid State LiDAR System «Cube1» war es möglich, die Fahrbahngeometrie auch bei geringer Dachprofilausprägung zu beurteilen und auf längeren Streckenabschnitten dynamisch anzuwenden. Das System zeigte damit die grundsätzliche Eignung als Basis für ein Wegemonitoring- Konzept. Aufgesetzt auf der richtigen Plattform, verspricht es in niedrigem Preissegment die Mehrzahl praxisrelevanter Wegeparameter ausreichend genau zu erfassen und stellt dabei Funktionen für eine vollautomatisierte Echtzeitauswertung bereit, um eine andernfalls erforderliche Datenspeicherung zu umgehen. Für eine vollumfängliche Nutzung zur Wegezustandsbeurteilung fehlen jedoch Sensoren wie GPS, welche, ähnlich zum Konzept der Messlanze, integriert werden müssen.

Die Messlanzentechnik hingegen konnte in ihrem aktuellen Entwicklungszustand nicht zufriedenstellend in Anwendung gebracht werden. Durch die fehlende ständige Nivellierung des Systems, als auch die limitierte Auflösung der Sensorik, ist der Anwendungsbereich der Messtechnik stark auf spezielle Wegeausbaustandards mit überhöhtem Dachprofil limitiert, welche sich nicht mit den Wegebau-Standards der Partner-Forstbetriebe deckten.

# 1 Einleitung

Forststrassen erschliessen Nutz- und Schutzwälder und sind eine Grundvoraussetzung für deren Bewirtschaftung. Durch den Klimawandel ist mit einer Zunahme von biotischen und abiotischen Gefahren zu rechnen (Frei und Bolgé 2018). Die Aufarbeitung von Sturmschäden oder die Umsetzung von Massnahmen zur Wiederherstellung der Wald- und Schutzfunktionen erfordern ganzjährig befahrbare Erschliessung. Die Holzabfuhr führt jedoch zu einer hohen Beanspruchung der Forststrassen und damit zu einer stetigen Veränderung des Strassenzustandes (Grigolato et al. 2013).

Eine ausreichende Tragfähigkeit der Strassen ist erforderlich, um diese sachgemäss in die Forstlogistik einbinden zu können. Für eine bedarfsgerechte Nutzung und den damit einhergehenden Unterhalt muss der Strassenzustand und -aufbau bekannt sein. Erschwerend kommt hinzu, dass die Nutzungsdauer einer Forststrasse oft 40 Jahre oder mehr beträgt (SAFS 1986; Kuonen 1983), wodurch in den Forstbetrieben häufig Dokumentationen aus der Bauzeit der Strassen fehlen. Da Forststrassen nach dem damaligen Stand der Technik dimensioniert wurden, reichen die Anforderungen der Bauausführung für heutige gebräuchliche, deutlich schwerere Maschinen oftmals nicht mehr aus (Hirt 2001).

Das übergeordnete Ziel des Forschungsvorhabens ist eine objektive und zerstörungsfreie Beurteilung des Aufbaus und Zustands von Forststrassen als Grundlage für ein objektives Strassenunterhaltskonzept, mit welchem der aktuelle Zustand, die Tragfähigkeit und ggf. die notwendigen Unterhaltsmassnahmen von Strassen abgeschätzt werden können. In der Untersuchung wird die Forststrasse dabei in zwei Teile untergliedert.

Teil 1 umfasst die unterirdische Erfassung des Strassenaufbaus, welcher die Tragfähigkeit massgeblich beeinflusst. Teil 2 befasst sich mit der oberirdischen Beurteilung der geometrischen Oberfläche der Strasse, welche Aufschluss über die grundsätzliche Möglichkeit der Nutzung, den Grad des Verschleisses und die Funktionalität der Elemente der Fahrbahn und des Grabens gibt.

Der konstruktive Aufbau der Forststrasse wird mit dem Einsatz von «Ground Penetrating Radar» (GPR) Systemen erfasst. Mit GPR soll zunächst eine Trennung der verschiedenen Schichten der Strasse vorgenommen und durch Kombination mit weiteren Faktoren eine Abschätzung der Tragfähigkeit durchgeführt werden. Die unterschiedlichen Funktionsweisen verschiedener GPR-Technologien erforderten Voruntersuchungen, um die Anwendbarkeit für die Anforderungen des forstlichen Wegebbaus zu beurteilen. Um diese Eignung zu überprüfen, wurden verschiedene Wegeprofile künstlich angelegt. Zwischen den einzelnen Schichten wurden metallische Objekte als GPR-Reflektoren verbaut, um die Identifikation der Schichtgrenzen zu erleichtern. Auf Basis der Schlüsse, welche aus der Beurteilung der Wegeprofile gezogen wurden, werden weiter verschiedene Forststrassenabschnitte mit unterschiedlichen Scanmethoden erfasst, ein Fazit zur Anwendung der Systeme gegeben und eine Abschätzung zur Ermittlungsgenauigkeit der Tragfähigkeit vorgenommen.

Zur Beurteilung der Wegegeometrie, standen zwei Messsysteme zur Verfügung, welche den Zustand der Wege des Forstbetriebs Sigriswil beurteilen und Anwendung finden sollen:

1. Eine an der Anhängerkupplung eines Autos montierte Ultraschall- basierte Messlanze zur Erfassung des Wegequerprofils der Forststrasse und
2. Ein Solid-State LiDAR (Light Detection and Ranging) System, welches an einem Fahrzeug montiert, die Umgebung in zeitlich hochaufgelösten 3D-Sequenzen erfasst.

Beide Systeme bieten die Möglichkeit, Messungen in Bewegung mit einem Fahrzeug als Trägersystem durchzuführen und haben das Potenzial längere Wegeabschnitte zu erfassen. Da 3D- Scans gleichzeitig auch hohe Datenmengen generieren, liegt mit Blick auf die Anwendbarkeit der Systeme ein spezielles Augenmerk auf der Nutzung gering-aufgelöster Daten sowie der Echtzeitverarbeitung der Daten.

Für diese Studie musste dazu zunächst geprüft werden, welche Störungen der Wegequalität mit den genannten Messsysteme erfasst werden können. Beide Systeme wurden daher einer Überprüfung unterzogen, ob sich Wegeparameter, welche über hochaufgelöste terrestrische Laserscans erfasst werden können, mit den Ergebnissen der Anwendung der Messsysteme decken. Auf Basis der Erkenntnisse wurde eine automatisierte Auswerteroutine aufgesetzt, welche mit dem Messsystem Anwendung finden kann und Praxistauglichkeit verspricht. Die Auswerteroutine wurde auf einem längeren Wegeabschnitt angewendet und schliesslich hinsichtlich der Leistung qualitativ beurteilt.



## Teil 1

### «Ground Penetrating Radar» (GPR)

### Schichtstärkenerkennung und Ableitung der Tragfähigkeit

## 2 Grundlagen GPR und Schichtstärkenerkennung

### 2.1 Funktionsweise von GPR

«Ground Penetrating Radar» (GPR) ermöglicht zerstörungsfreie Untersuchungen des Untergrunds (Jol 2009). Über eine Antenne wird ein elektromagnetischer Impuls generiert, der in eine bestimmte Richtung gesendet wird (Annan 2003). Dieser wird von einem Gegenstand reflektiert und zurückgeworfen. Im Gegensatz zur Luft besteht Boden immer aus festen Objekten, welche den Impuls beeinflussen. GPR basiert daher nicht auf der Erfassung des Impulses, sondern auf der Intensitätsänderung des Impulses, die ein Material verursacht (Dolić 2015). Im Messprinzip wird bei den getesteten Systemen ein permanenter Impuls ausgesendet und die Frequenz des Impulses dabei verändert. Durch die Frequenzänderung kann die Zeit zwischen Senden und Ankommen einer wiederkehrenden Frequenzmodulation ermittelt werden. Die Systeme können in folgende Gruppen unterteilt werden (Wolff 2015):

- Frequenzmodulierte Dauerstrichradare (FMCW-GPR) weisen eine beinahe gleichbleibende Frequenz auf und sind auf einen Frequenzbereich begrenzt. Die Frequenz wird über einen kurzen Zeitraum leicht erhöht (moduliert) und wieder auf den Ausgangswert zurückgesetzt (Abbildung 1 links).
- Stufenweise frequenzmodulierte Dauerstrichradare (SFCW-Radare) erhöhen die Frequenz schrittweise über einen grösseren Frequenzbereich (Abbildung 1 rechts).

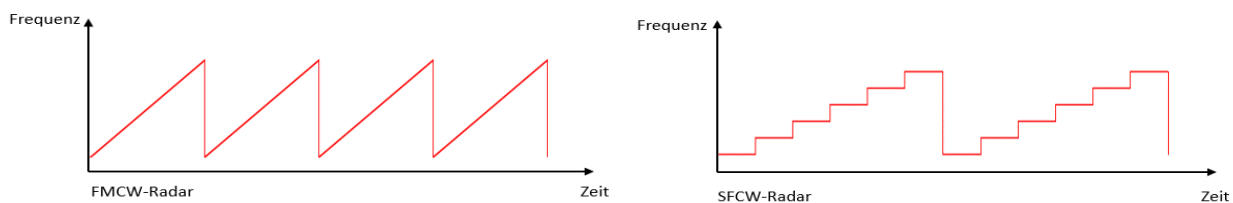


Abbildung 1: Darstellung der Frequenzänderung über die Zeit bei FMCW-GPR (links) und SFCW GPR (rechts) (nach Wolff 2015, verändert)

Bei GPR bestimmt die gesendete Frequenz die für die Erfassung erforderliche Objektgrösse und gleichzeitig die mögliche Eindringtiefe in den Boden. Die optimale Frequenz ist daher ein Kompromiss zwischen Auflösung, Detektionstiefe und Tragbarkeit des Systems (Dachroth 2017).

Die Arten der Signalausbreitung bei geringem Abstand zwischen Sender und Empfänger (Abbildung 2) sind je nach Zieltiefe sowie Abstand zwischen Sender und Empfänger unterschiedlich bedeutend.

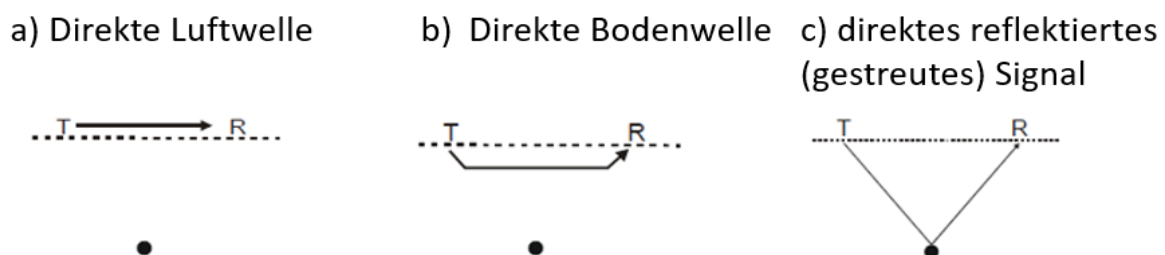


Abbildung 2: Möglichkeiten der Signalübertragung zwischen Sender und Empfänger (nach Annan 2003, verändert)

Luftwellen sind in die Luft entweichende und zurück zum Empfänger reflektierte Energie. Quellen von Luftwellen sind beliebige Objekte. Luftwellen können problematisch sein, da sie schwächere unterirdische Signale verdecken oder als Objekte im Boden interpretiert werden können (Annan 2003). Die direkte Bodenwelle (elektromagnetische Wellen verlaufen parallel zum Boden und werden vom Empfänger eingefangen) ist auf jeder GPR-Aufzeichnung vorhanden. Beim direkt reflektierten (gestreuten) Signal handelt es sich um die für GPR-Nutzer interessanten Antworten des Bodens.

## 2.2 Bearbeitung von GPR-Daten

Die erfassten Daten werden meist in Echtzeit angezeigt. Die Interpretation vor Ort kann bereits der Endpunkt der GPR-Untersuchung sein. Erfolgt eine Datenbearbeitung, werden die Änderungen visuell überwacht und idealerweise dokumentiert.

Bei den Rohdaten (normalerweise ein Amplituden-Zeit-Signal) ist der erste Schritt oftmals die zeitliche Filterung (Abbildung 3), um sehr niederfrequente Komponenten aus den Daten zu entfernen (Sensors & Software Inc. 2021a).

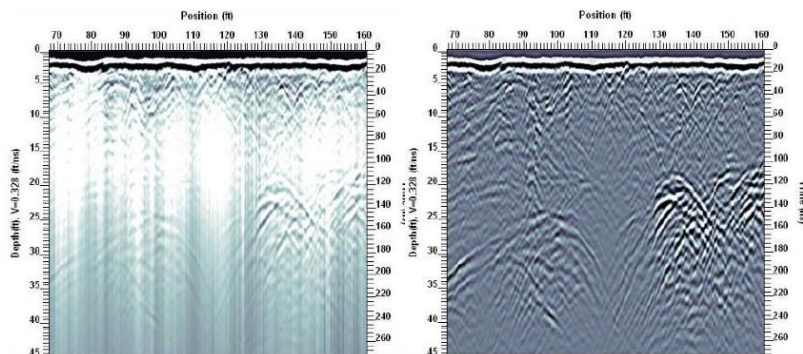


Abbildung 3: GPR-Daten ohne zeitliche Filterung (links) resp. nach Entfernen der niederfrequenten Signale (rechts) (Sensors & Software Inc. 2021a)

Als nächstes wird für den Datensatz eine Zeitverstärkung (Abbildung 4) ausgewählt. Durch die starke Abschwächung der Signale im Boden sind sie in grosser Tiefe nur schwach erkennbar. Dies erschwert bei der Nutzung einer Frequenz die gleichzeitige Anzeige von Objekten in verschiedenen Tiefen. Eine zeitabhängige Verstärkungsfunktion kompensiert die Abschwächung der GPR-Signale in grösseren Tiefen, indem die Signale entsprechend ihrer Laufzeit verstärkt werden (Annan 2003). Es existieren verschiedene Möglichkeiten der Verstärkung<sup>1</sup>. Die für die Arbeit verwendeten Arten der Verstärkung sind im ausführlichen technischen Bericht erläutert.

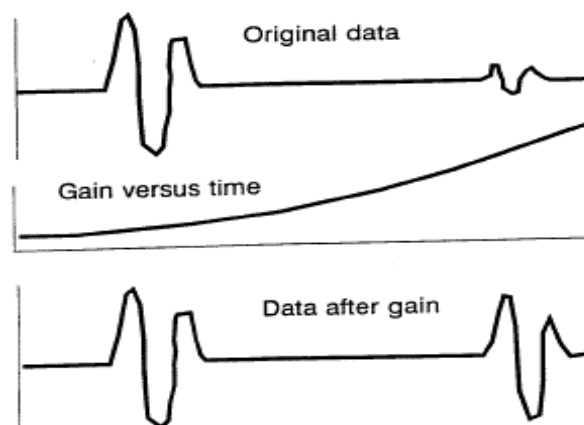


Abbildung 4: Prinzip der zeitabhängigen Verstärkung (Annan 2003)

<sup>1</sup> Das Ziel der Verstärkung sollte es sein die Daten so zu verändern, dass ihr voller Nutzen erhalten bleibt und keine Artefakte entstehen. Anschauliche Beispiele wie die einzelnen Filter wirken, sind unter [www.sensoft.ca/de/products/ekko-project/processing](http://www.sensoft.ca/de/products/ekko-project/processing) vorhanden.

Die weiteren Schritte der Datenbearbeitung erfordern Vorkenntnisse des Bedieners und können die Rohdaten erheblich verändern. Es können bspw. schwächere Signale sichtbar gemacht, bestimmte Komponenten für eine Interpretation verstärkt oder Informationen wie Geschwindigkeit und Abschwächung im Verhältnis zur Tiefe abgeleitet werden. Für diese Untersuchung wurde lediglich die Hintergrundsubtraktion (Abbildung 5) verwendet, um oberflächennahe GPR-Antworten sichtbar zu machen. Das Vorgehen ist oft notwendig, sollte aber nicht generell angewendet werden (Annan 2003).

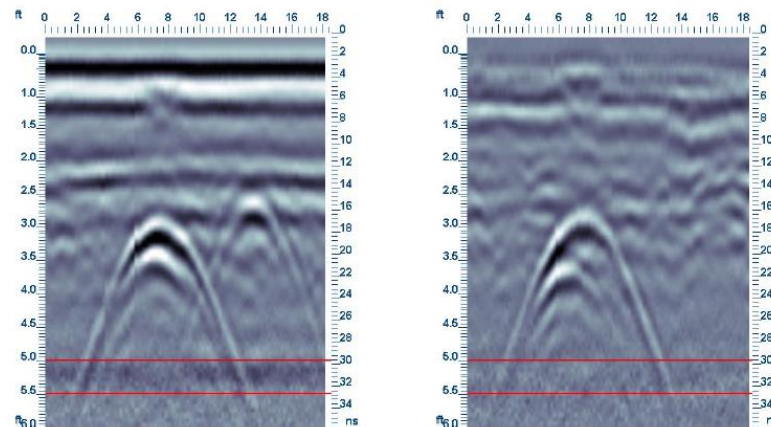


Abbildung 5: GPR-Aufnahme ohne Hintergrundsubtraktion (links) resp. mit Hintergrundsubtraktion (rechts) (Annan 2003)

### 2.3 Interpretation von GPR-Daten

Punkt-Objekte sind als Hyperbeln erkennbar. Der Scheitelpunkt der Hyperbel entspricht der Objekttiefe. Je tiefer ein Objekt liegt, desto flacher die Hyperbel und desto schwächer ist sie erkennbar. Bodenschichten hingegen verlaufen parallel zum Boden und das Signal wird immer in der gleichen Tiefe reflektiert. Es entsteht – wie auch bei Objekten mit einer parallel zur Oberfläche verlaufenden flachen Oberfläche – eine Linienform (Johnston 2018). Natürliche Grenzflächen werden oft durch die natürliche Ablagerungsfolge verwischt. Genauso können vom Menschen geschaffene Grenzflächen durch eine Vermischung der Materialien unscharf sein (Annan 2003).

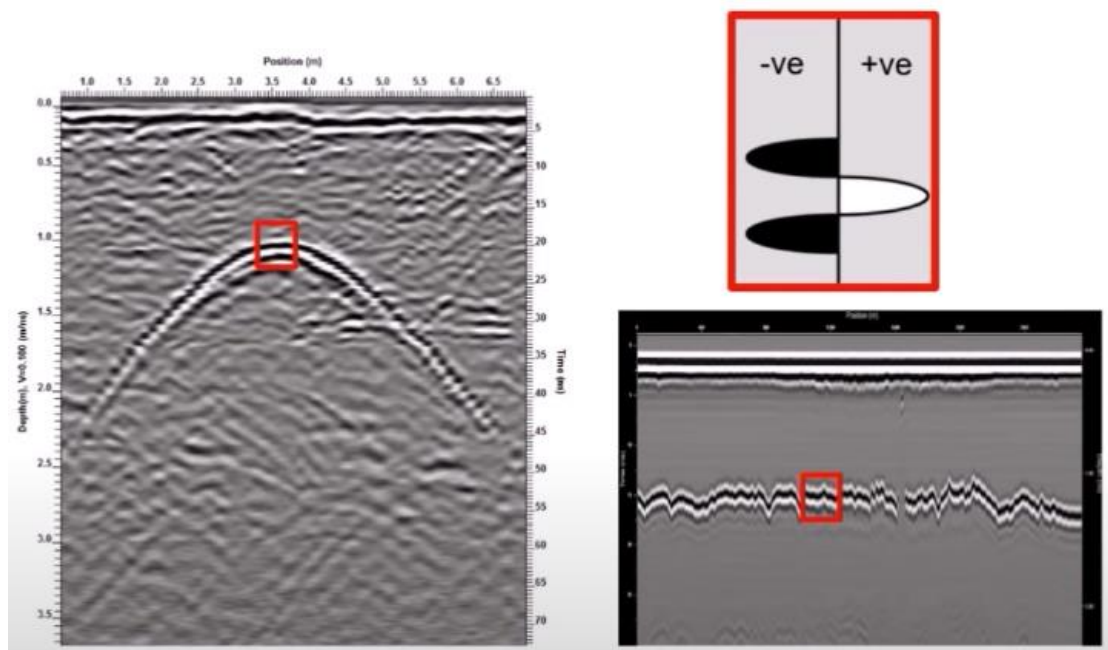


Abbildung 6: Reflexion eines Punkt-Objektes (links), Übergang zwischen zwei Materialien mit unterschiedlicher Leitfähigkeit (rechts unten) und Darstellung der Signalform (rechts oben), welche die Reflexion erklärt (Johnston 2018)

Die Datendarstellung ist fast immer eine Signalstärken-Zeit-Darstellung. Die Position befindet sich auf der x-Achse, die y-Achse bildet die Signallaufzeit [ns] ab. In dieser Darstellung gibt die Form die Impulsantwort des Systems und Bodens annähernd wieder (Johnston 2018). Die weiss-schwarz-weisse Linie beim Punkt 0 der Datenaufzeichnung ist auf jeder GPR-Aufnahme zu sehen und wird durch die direkt übertragenen Signale von Sender zu Empfänger (vgl. Kapitel 2.1) verursacht. Durch die Hintergrundsubtraktion können die überlagernden Signale entfernt werden. Dadurch können jedoch auch die gesuchten Reflexionen des Bodens (v.a. bei parallel zum Boden verlaufenden Schichten) entfernt werden (Johnston 2018). Unterhalb dieser dicken weiss-schwarz-weissen Linie folgen die Bodenantwort-Signale, welche GPR-Nutzer interessieren.

Der grösste Kostenfaktor ist die für die Datenerfassung und -bearbeitung erforderliche Zeit. Das Kosten-Nutzen-Verhältnis ist bei vielen kommerziellen Anwendungen oft so, dass die Bearbeitung bereits nach der Felderfassung beendet wird (Annan 2003). Es ist zu erwarten, dass die Bearbeitung von GPR-Daten in Zukunft einfacher und weniger zeitaufwändig wird. Damit wird das Kosten-Nutzen-Verhältnis positiv beeinflusst und die Rechtfertigung für die Daten-Prozessierung gegeben.

### 3 Verwendete GPR Soft- und Hardware

#### 3.1 FMCW-GPR-Systeme

Die für die Messkampagne verwendete FMCW-GPR-Hardware ist in Abbildung 7 ersichtlich. Unter dem handgeschobenen 4-rädrigen Wagen ist ein GPR-Sensor mit Verschleissplatte mit direktem Bodenkontakt montiert. Die modulare Bauweise ermöglicht den Austausch des GPR-Sensors sowie die Verwendung eines GNSS-Sensors.



Abbildung 7: Für das Projekt verwendete FMCW-GPR-Hardware (Sensors & Software Inc. 2021b, verändert)

Bei den Versuchen wurden zwei Ultrabreitband-GPR-Sensoren (Tabelle 1) mit Antennen mit direktem Bodenkontakt verwendet. Diese FMCW-Geräte sind im «konventionellen Strassenbau» etabliert und haben nach Herstellerangaben eine der besten auf dem Markt verfügbaren Auflösungen.

Tabelle 1: Leistungsmerkmale der verwendeten NOGGIN® Sensoren (Sensors & Software Inc 2021c, eigene Darstellung)

Kategorie	Einheit	NOGGIN®500	NOGGIN®1000
<b>Grösse</b>	cm	38 x 23 x 15	30 x 15 x 11
<b>Gewicht</b>	kg	3	2.3
<b>Mittelfrequenz</b>	MHz	500	1000
<b>Bandbreite</b>	MHz	250 - 750	500 - 1500
<b>Max. Tiefeneinstellung</b>	m	50	25
<b>Antennenabschirmung</b>	dB	> 20	20
<b>Max. Zeitfenster und Abtastrate</b>	ns / pt	1000 bei 0.2 ns/pt	500 bei 0.1 ns/pt
<b>Max. Erfassungsrate</b>	pt / s	100'000	100'000
<b>Leistungsfaktor</b>	dB	160	160

Über den Touchscreen-Video-Logger (DVL) ist es möglich die Parameter der Datenerfassung im Feld anzupassen, die Ergebnisse in Echtzeit anzuzeigen und Interpretationen hinzuzufügen. Für die Aufnahmen wurde das interne GNSS (GPS und GLONASS) mit einer Genauigkeit von ca. 10 m verwendet (Sensors & Software Inc. 2021b).

Für die Datenauswertung wurde die Software EKKO\_Project™ (V6 R1) von Sensoft® genutzt. Die Datenbearbeitung erfolgte im «line view». Mit der «Velocity Toolbar» wird die hyperbolische Geschwindigkeitskalibrierung (Abbildung 8) geöffnet. Für jede Aufnahme wurde die Signalgeschwindigkeit anhand einer gut sichtbaren Hyperbel ermittelt und mit der Literatur verglichen.

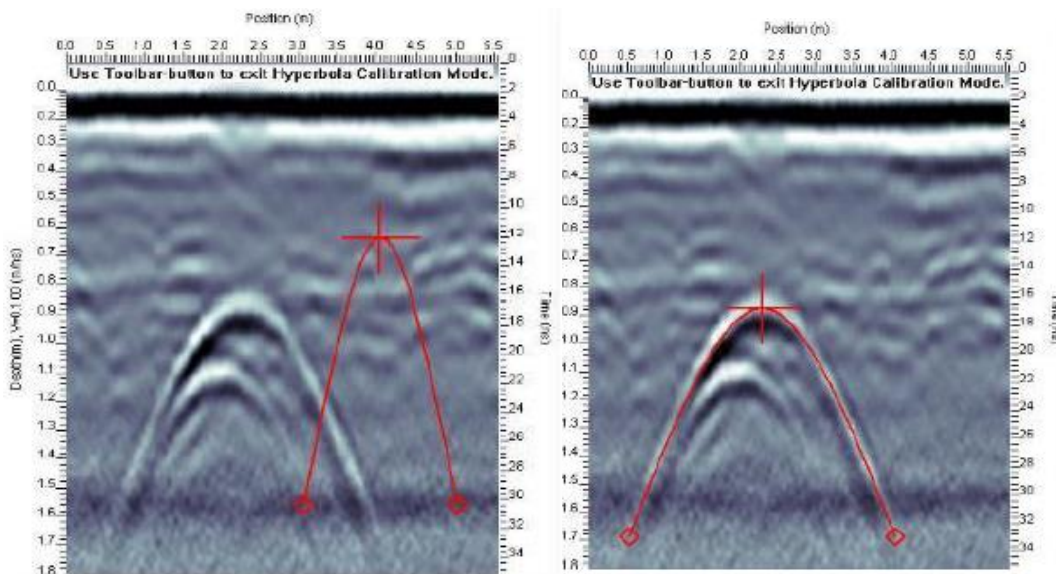


Abbildung 8 : Geschwindigkeitskalibrierung mit hyperbolischer Anpassung (Sensors & Software Inc. 2021d)

Die meisten weiteren Einstellungen mit dem Ziel die Schichtgrenzen im Aufbau einer Forststrasse zu erkennen, wurden mit der «View Toolbar» vorgenommen. Für die Darstellung wurde «Color Scale» und «Interpolation» angewendet. Interpolation glättet die Daten. Color Scale stellt die Signalamplitude (positive / negative Werte) farblich dar. Als Farbeinstellung wurde die Default-Einstellung (bone.cmp) verwendet. Dies entspricht den typischen schwarz-weißen Radarbildern. Für die meisten Aufnahmen ergab ein Kontrast zwischen 40 – 60 % die besten Resultate. Die Sensitivität bestimmt, wie empfindlich das Bild auf kleine Signalunterschiede reagiert. Eine Reduktion in der Sensitivität entfernt die schwach sichtbaren Signale (Sensors & Software Inc. 2021d). Weil nach kleinen Unterschieden in den Materialeigenschaften gesucht wurde, hat die Standardeinstellung (100 %) beste Ergebnisse erzielt. Im Menü Verstärkung / Filter (Abbildung 9) wurden für die Prozessierung der Daten relevante Parameter

festgelegt. Dewow (vgl. Kapitel 2.2) und DynaT (Dynamic Target) wurden für alle Datenauswertungen angewendet. DynaT berücksichtigt, dass kleine Ziele eine geringere Energiemenge reflektieren. Die Antwort von kleinen Zielen wird durch DynaT verstärkt, indem die relative Grösse in Abhängigkeit der Frequenz, mit welcher das Ziel detektiert wurde, abgebildet wird (Sensors & Software Inc. 2021d). Die Hintergrund-Subtraktion (vgl. Kapitel 2.2) wird in EKKO\_Project von jeder Signalamplitude abgezogen. Das Ziel ist es, Objekte sichtbar zu machen, die durch die Hintergrundsignale verdeckt werden. Eine Hintergrund-Subtraktion wurde bei den meisten Scans durchgeführt, um die Daten im oberflächennahen Bereich (Deckschicht) sichtbar zu machen. Die Anwendung der Hintergrundsubtraktion führte jedoch oft dazu, dass parallel verlaufende, tieferliegende Schichtgrenzen (Tragschicht-Unterbau) nicht mehr deutlich erkennbar waren. Deswegen wurde zu deren Bestimmung teils keine Hintergrundsubtraktion angewendet. Die Suche nach den besten Einstellungen erfolgte in einem iterativen Prozess.

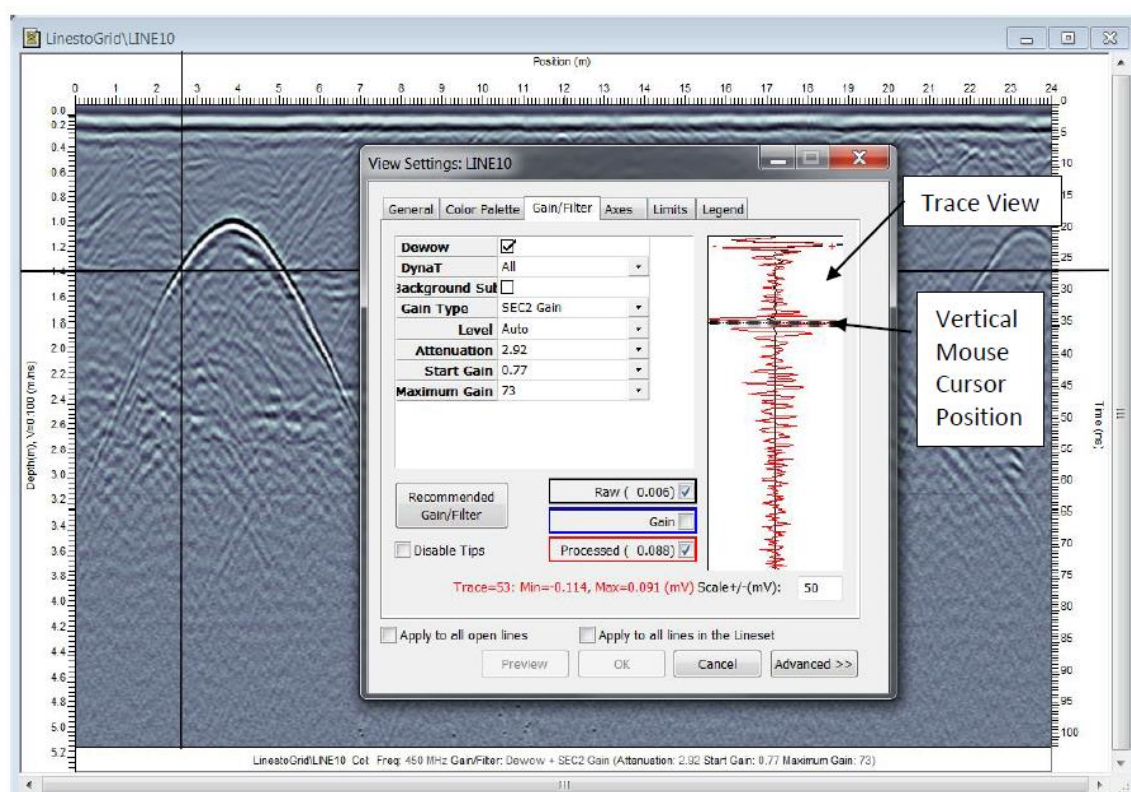


Abbildung 9: View Toolbar-Menü Verstärkung / Filter. Links: Eingabe-Parameter. Rechts: Signalspur des GPR-Signals als Schlangenlinie am Punkt, an dem sich der Maus-Cursor gerade befindet (Fadenkreuz). Angezeigt werden können die Rohdaten, prozessierten Daten und die Verstärkung (Sensors & Software Inc. 2021d)

Auf 3 Strassenabschnitten wurden neben der einfachen Profilmittlung zusätzlich Rasteraufnahmen durchgeführt. Diese bieten bei stark erhöhtem Messaufwand die Möglichkeit, Objekte und deren Orientierung im Raum zu bestimmen. Für die Rasterdaten-Auswertung wurde das SliceView Grid Modul aus EKKO\_Project verwendet (Sensors & Software Inc 2021e).

### 3.2 SFCW-GPR System

Als zusätzliches GPR-System wurde das mit der SFCW-Technologie arbeitende GS 8000 der Firma Screening Eagle getestet (ScreeningEagle 2022). Dieses System arbeitet in einem modulierten Frequenzbereich von 40 bis 3440 MHz. Mit einer Aufnahme werden somit verschiedenen Frequenzen abgedeckt und eine höhere Bandbreite genutzt. Dies bietet den Vorteil, dass beim Bearbeiten der Daten zeitgleich auf hohe und tiefe Frequenzen zugegriffen werden kann und somit detaillierte Messungen in geringer Tiefe und weniger hoch aufgelöste Messungen in einer grösseren Tiefe darstellbar sind. Verwendet wurde auch bei diesen Messungen ein handgeschobener 4-rädriger Wagen. Der GPR-Sensor hat auch bei diesem System über eine Verschleissplatte direkten Bodenkontakt.

Tabelle 2: Technische Spezifikationen GS 8000 (Screening Eagle 2022)

Kategorie	Einheit	GS 8000
Grösse	cm	61 x 57 x 28
Gewicht	kg	24
Modulierter Frequenzbereich	MHz	40 – 3 440
Bandbreite	MHz	3 200
Max. Tiefeneinstellung	m	10
Max. Erfassungsrate	Scans/m	100

Ähnlich wie bei den FMCW-GPR-Geräten (Kapitel 3.1) ist über einen digitalen Touchscreen die Parameter-Anpassung bei der Datenerfassung im Feld, die Echtzeitanzeige und das Hinzufügen von Interpretationen möglich.



Abbildung 10: GS 8000 von Screening Eagle (Screening Eagle 2022, verändert)

Das für die Visualisierung genutzte Tablet benötigt ein Apple-Betriebssystem. Die Datenübertragung erfolgt über Bluetooth direkt auf das Anzeigegerät. Zusätzlich werden die Daten in einer Cloud gespeichert. Die Datenauswertung erfolgt über die von Screening Eagle erstellte und unterhaltene registrierungspflichtige App «Proceq GPR Untergrund App», welche über den App Store kostenfrei zur Verfügung gestellt wird.

## 4 Messkampagne GPR

Die meisten Aufnahmen der Messkampagne (Abbildung 11) wurden auf Strassenabschnitten des Forstbetriebs Sigriswil realisiert. Die Teilschritte der Messkampagne werden nachfolgend beschrieben. In jedem Kapitel werden zuerst die vorbereitenden Arbeiten beschrieben und dann die Resultate dargestellt.



Abbildung 11: Aufbau der GPR-Messkampagne

### 4.1 Testmessungen und Systemtests

Die für die Datenauswertung erforderliche Software EKKO\_Project stand nur für eine begrenzte Zeit zur Verfügung. Als Alternative für die Datenauswertung wurde ein R-Script geschrieben. Dieses ermöglicht die Darstellung der GPR-Daten (Stärke der Signalamplitude), falls diese als .csv-Datei vorliegen. Zur Anwendung des Scripts ist ein Objekt mit bekannter Tiefe erforderlich. Damit wird die durch GPR-Software vorgenommene materialabhängige Signal-Geschwindigkeitskalibrierung (vgl. Kapitel 3.1) ersetzt. Die ersten Tests haben gezeigt, dass die Visualisierung der Daten in R, was als Grundlage zur Erarbeitung einer automatisierten Auswerterroutine dienen kann, deutlich mehr Zeit erfordert als mit kommerzieller GPR-Software. Weiter ist keine Anwendung von vordefinierten Filtern (bspw. zur Signalverstärkung / Hintergrundsubtraktion) zur Optimierung der Darstellung möglich. Aus diesen Gründen wurde der Auswertepfad mit R für die Daten nicht weiterverfolgt und zur Datenauswertung EKKO\_project genutzt. Abbildung 12 zeigt dazu den gleichen Strassenabschnitt mit einem vergrabenen Metallrohr (roter Punkt), dargestellt in EKKO\_project (oben) und R (unten).

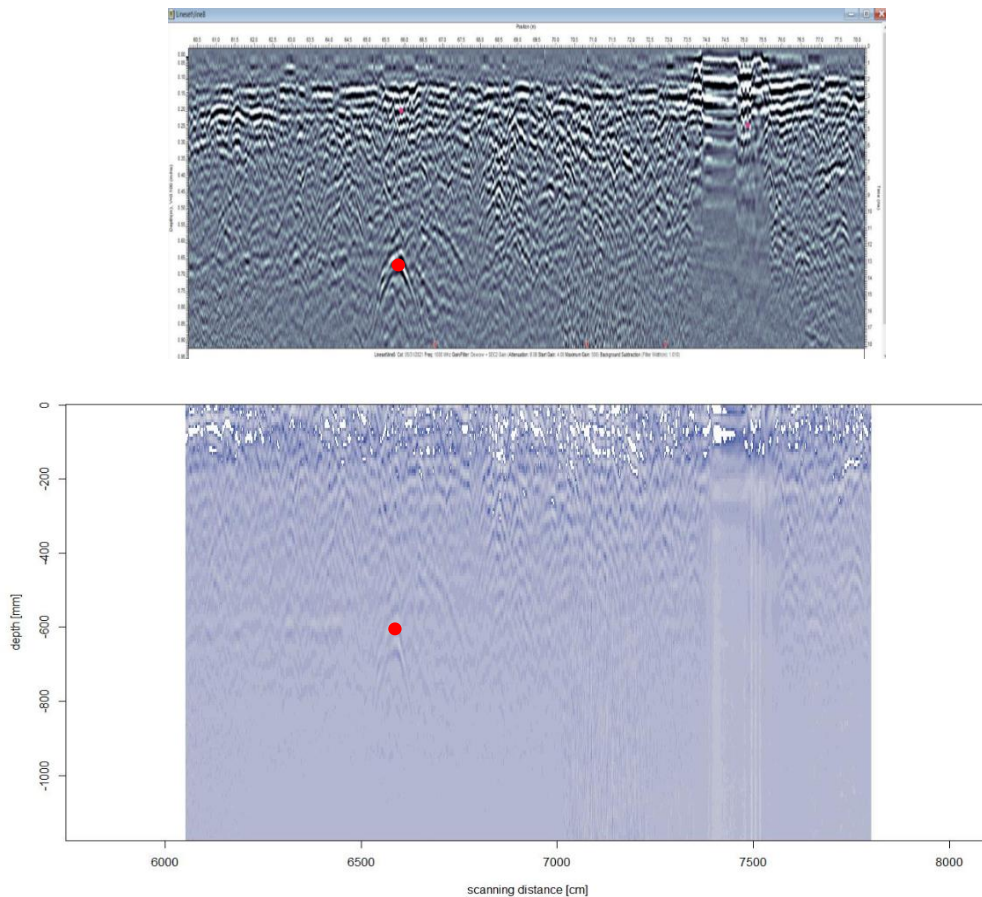


Abbildung 12: GPR-Scan eines Strassenabschnitt mit Metallrohr (roter Punkt) in EKKO\_project (oben) und R (unten)

## 4.2 Messkampagne Sigriswil – Kiesgrube Meiersmaad

Zur Evaluierung der Möglichkeiten und Grenzen der getesteten GPR-Geräte wurden in einer Kiesgrube in Meiersmaad (Sigriswil – Schwanden) fünf Strassenaufbau-Profile erstellt. Nachgebildet wurden dazu verschiedene im Forst gebräuchliche Bauweisen. Der schichtartige Aufbau der Profile wurde mit der Fachstelle für forstliche Bautechnik – Fobatec abgesprochen.

Weil bei Forststrassen oft eine einfache Bauweise mit lokal verfügbarem Material angewendet wird, ist zu erwarten, dass die Materialeigenschaften der einzelnen Schichten sich teils nur geringfügig unterscheiden und sich folglich auch die Schichtgrenzen mit GPR nur schwach abzeichnen. Um sicherzustellen, dass die Schichtgrenzen richtig interpretiert werden, wurde bei jedem Materialwechsel eine Metallplatte (20 x 35 x 0.3 cm) verbaut, welche mit GPR zu eindeutigen Reflexionen führen sollte. Nach dem Einbau jeder Schicht wurde alle 50 cm die Tiefe in der Mitte des Profils gemessen. Dies sollte gewährleisten, dass die richtigen Detektionen als Schichten interpretiert werden. Dadurch ist die ungefähre Mächtigkeit jeder Schicht bekannt, jedoch aufgrund der anschliessend erfolgten Verdichtung der Profile keine exakte Aussage zur Lage der Metallplatte oder der einzelnen Schichten möglich. Die Genauigkeit der Vermessung der Profile liegt im cm-Bereich.

Anschliessend wurde versucht die Ergebnisse der GPR-Untersuchungen statistisch greifbar zu machen. Die beim Aufbau der Profile gemessenen Schichtstärken wurden mit den Ergebnissen der GPR-Untersuchungen für 500 resp. 1000 MHz mit einem zweiseitigen T-Test für gepaarte Stichproben verglichen. Alle interpretierbaren Werte einer Frequenz wurden für die einzelnen Schichten (Trag- und Deckschicht) zusammen analysiert. Auf eine detaillierte statistische Analyse der einzelnen Profile wurde aufgrund der geringen Stichprobenanzahl (sechs Werte pro Profil) verzichtet. Bei den Resultaten muss beachtet werden, dass die Messungen beim Aufbau der Profile in unverdichtetem Zustand erfolgten. Die Schichtstärken nach der Verdichtung können (v.a. im Bereich der Deckschicht) von diesen Werten

abweichen. Eine zusätzliche visuelle Analyse erfolgte durch den Vergleich der Messergebnisse der FMCW- und der SFCW-Technologie.

Die Ergebnisse der Messkampagne werden anhand von Profil 2 erläutert. Für alle weiteren Profile sind die Ergebnisse in Kapitel 4.2.2 zusammenfassend dargestellt. Detaillierte Beschreibungen der einzelnen Profile und Messergebnisse finden sich im technischen Bericht.

#### 4.2.1 Profil 2: Einfacher Strassenaufbau mit normierter Tragschicht und starker Deckschicht

Profil 2 weist einen einfachen Aufbau aus normiertem Tragschichtmaterial (UG 0/63) und eine Deckschicht (UG 0/23) auf (Tabelle 3). Zur Trennung von Tragschicht und Untergrund wurde ein Vlies eingebaut. Die Deckschicht wurde mit einer Stärke von 8 - 15 cm bewusst stark dimensioniert. Insgesamt beträgt die Profiltiefe rund 50 cm. Die Verdichtung des Materials geschah durch Befahrung mit dem Bagger. Die Metallplatten sind nach 1 m und 2 m gemäss Abbildung 16 verbaut.

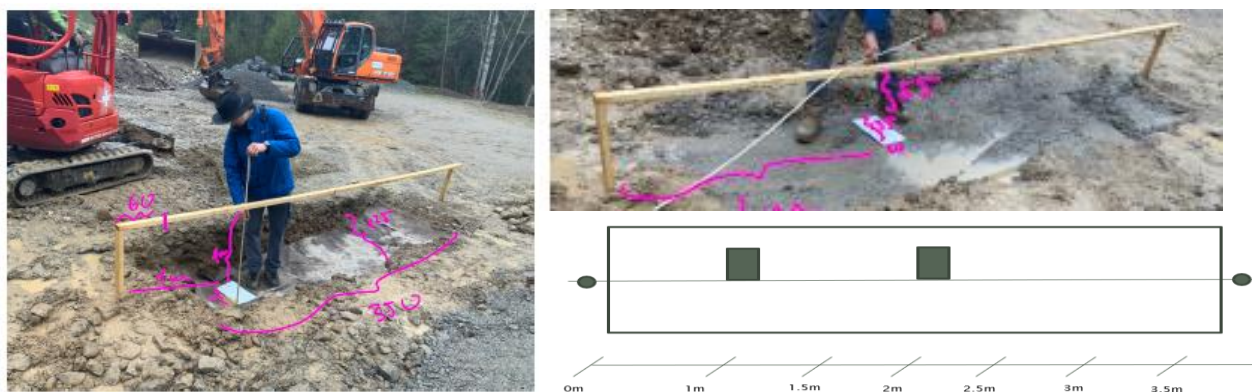


Abbildung 13: Fotos vom Aushub und der Vermessung von Profil 2

Tabelle 3: Messwerte Schichtstärken Profil 2 (orange = Metallplatte)

Messstelle [m]	Mächtigkeit der Schichten [cm]		
	Ganzes Profil	Tragschicht	Deckschicht
1	53	45	8
1.5	51	40	11
2	54	41	13
2.5	49	34	15
3	53	38	15
3.5	40	28	12

Die 500 MHz-Daten der FMCW-Technologie (Abbildung 14) ermöglichten die eindeutige Identifizierung beider Metallplatten. Die Metallplatte zur Markierung der Deckschicht wurde durch die Hintergrund-Subtraktion teilweise abgeschnitten. Genauso verhält es sich mit der gesamten Deckschicht. Diese ist teils erkennbar, jedoch nicht durchgehend. Die ermittelte materialabhängige Geschwindigkeit beträgt 0.085 m/ns und liegt damit zwischen den Werten von Schluff und Schiefer.

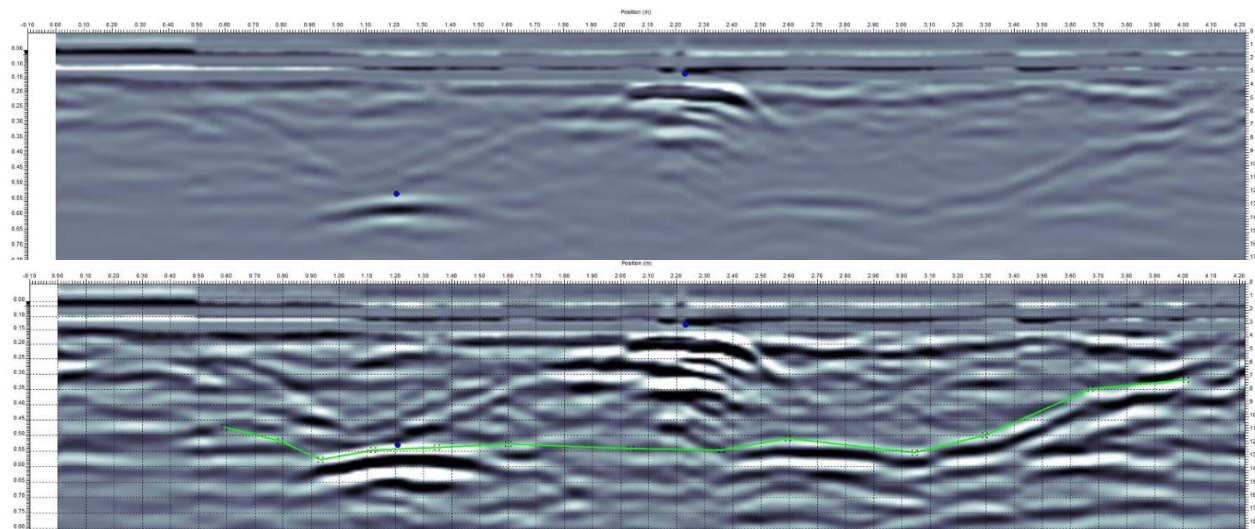


Abbildung 14: 500 MHz GPR-Aufnahmen Profil 2 Kiesgrube Meiersmaad. Oben: Erkennbare Metallplatten nach 1 m und 2m. Unten: Eingezeichnete Grenze zwischen Tragschicht und Untergrund

Auch anhand der 1000 MHz Daten (Abbildung 15) konnten beide Metallplatten eindeutig identifiziert werden. Bei der Metallplatte zur Trennung der Deck- und Tragschicht verursachte die Nähe zur Antenne ein Nachhallen. Die Tragschicht hebt sich weniger deutlich vom Untergrund ab, dafür ist die Deckschicht bedingt durch die höhere Auflösung der Daten und den geringeren Verlust durch die Hintergrund-Subtraktion, eindeutig und durchgehend erkennbar. Als materialabhängige Geschwindigkeit wurden Werte zwischen 0.088 und 0.091 m/ns ermittelt.

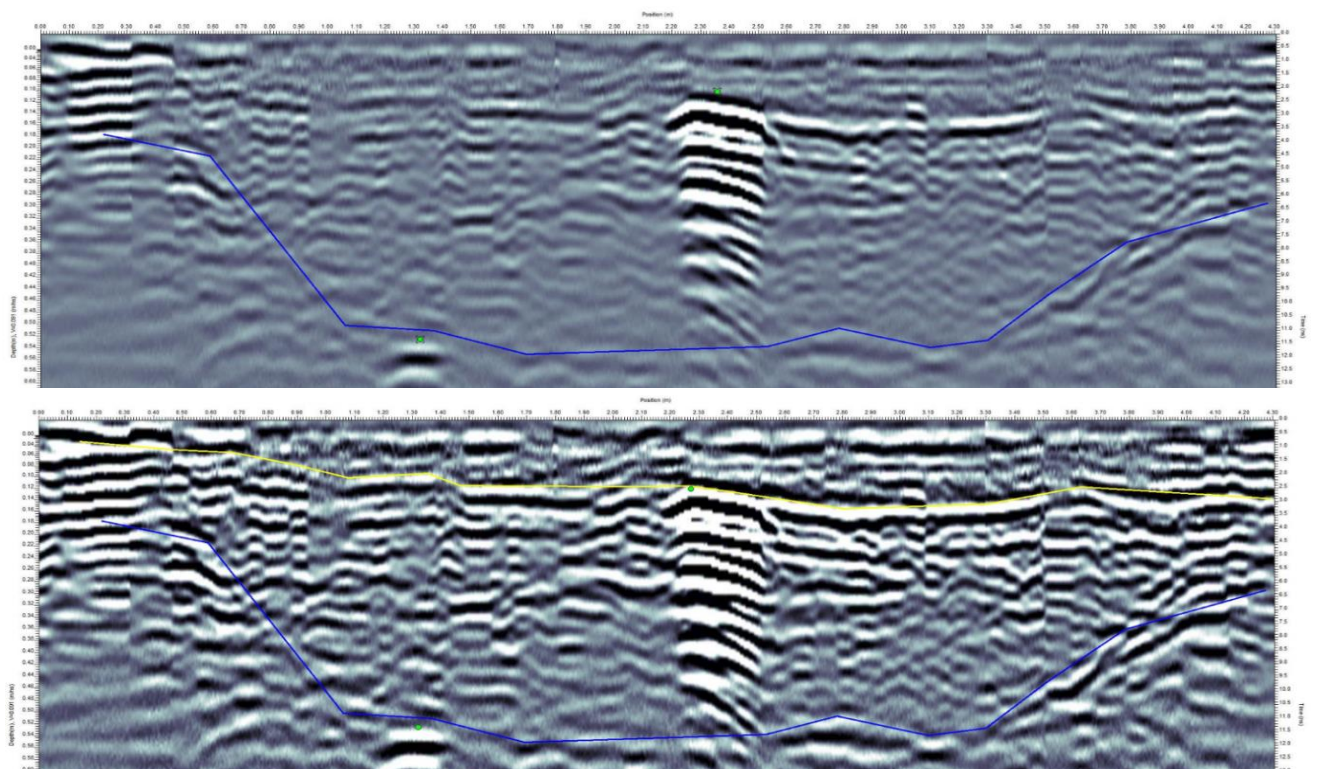


Abbildung 15: 1000 MHz GPR-Aufnahmen Profil 2 mit deutlich erkennbarer Trag- und Deckschicht, Markierung der Metallplatten und Nachhall der Metallplatte zur Markierung der Grenze zwischen Deck- und Tragschicht

Während bei der Verwendung einer Frequenz die Schwierigkeit besteht die Deck- und Tragschicht gleichzeitig deutlich abzubilden, ist dies mit den SFCW-Daten (Abbildung 16) möglich. Zudem ist die Schichtgrenze zwischen Tragschicht und Deckschicht durchgehend und eindeutig erkennbar.

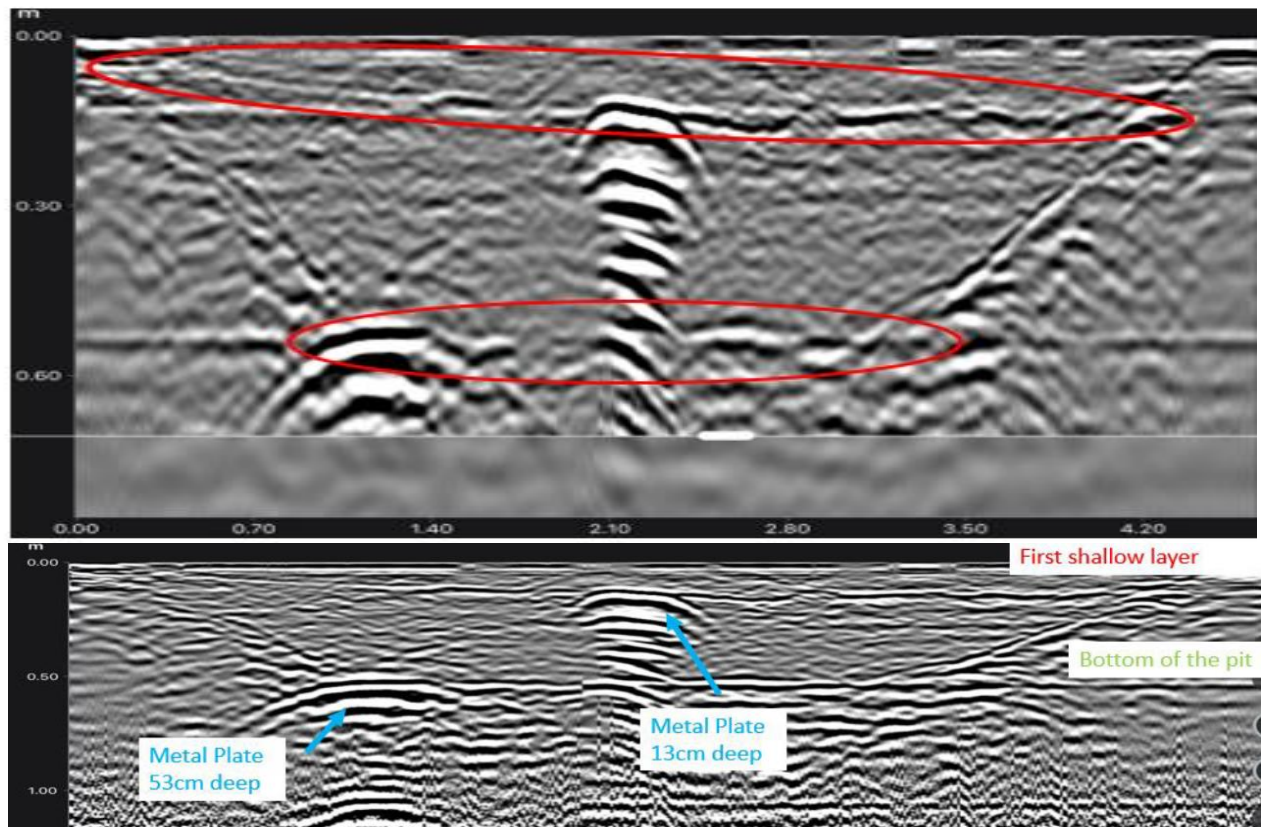


Abbildung 16: SFCW-Daten Profil 2 Kiesgrube «Meiersmaad». Oben Dateninterpretation nach Dumont (2022), unten Dateninterpretation nach Constantino (2022)

#### 4.2.2 Ergebnisse Kiesgrube «Meiersmaad» – Alle Profile

In der Kiesgrube «Meiersmaad» wurden bei der Verwendung eines Ultrabreitband-Sensors einer Frequenz mit dem 500 MHz Sensor bessere Resultate erreicht (Abbildung 17). Der Nachteil des 500 MHz Sensors ist, dass durch Anwenden der Hintergrundsubtraktion die oberflächennahen Deckschichten mit entfernt werden. Nicht getestet wurden Optionen der erweiterten Datenbearbeitung (bspw. Anpassung der Filteroptionen) zur Optimierung der Datendarstellung in oberflächennahen Bereichen. Bewährt hat sich die 500 MHz-Frequenz zur Beurteilung der Mächtigkeit des gesamten Oberbaus. Durch eine Kombination der beiden FMCW-Frequenzen (500 und 1000 MHz) konnten bei den Versuchen in der Kiesgrube die Grenzen der Schichten sowie auch die verbauten Referenzplatten mit Ausnahme von Profil 3 bestimmt werden. In Zukunft könnte bei der Verwendung von FMCW-Systemen deswegen die Verwendung mehrerer, parallel verwendeter Frequenzen ein erfolgsversprechender Ansatz sein. Dies wird bspw. von Noggin<sup>®</sup> mit dem SPIDAR<sup>®</sup> Multi-channel GPR bereits praktiziert (Sensors & Software Inc. 2022). Schwierigkeiten bereitet bei der FMCW-Technologie derzeit die Erkennung dünner, oberflächennaher Schichten sowie aufgrund der Vielzahl an Reflexionen die Trennung von Bodenschichten mit groben Komponenten.

Mit den SFCW-Daten konnten die Schichtgrenzen in der Kiesgrube «Meiersmaad» in vier von fünf Profilen bestimmt werden. Die Grenze zwischen Ober- und Unterbau war bei den Daten des SFCW-Radars bei allen Profilen erkennbar. Erste Tests mit dem SFCW-Radar sind vielversprechend für die Anwendung in der Zukunft. Es werden diverse Strukturen erkennbar, welche für die Ableitung der Schichtstärken wertvoll sind. Durch die grössere Bandbreite können Objekte und Grenzen in verschiedenen Tiefen schneller und einfacher analysiert werden. Dies hat sich insbesondere zur Erkennung dünner, oberflächennaher Schichten als Vorteil erwiesen.

	Aufbau des Profils	Schichtstärken (unverdichtet)	500 MHz FMCW	1000 MHz FMCW	SFCW
Profil 1	DS: UG 0/23 TS: UG 0/63, normiert	DS: 5 - 9 cm TS: 29 - 44 cm	Metallplatten & TS erkennbar, DS teils erkennbar	Metallplatten & TS erkennbar, DS teils erkennbar	Metallplatten, TS und DS erkennbar
Profil 2	DS: UG 0/23 TS: UG 0/63, normiert Vlies	DS: 8 - 15 cm TS: 28 - 45 cm	Metallplatten & TS erkennbar, DS teils erkennbar	Metallplatten, TS und DS erkennbar	Metallplatten, TS und DS erkennbar
Profil 3	DS: UG 0/26 TS: UG 0/63, normiert Schroppen: UG 46/120	DS: 2 - 6 cm TS: 19 - 29 cm Schroppen: 32 - 48 cm	Metallplatten & Grenze Unter-Oberbau erkennbar; DS & Grenze Schroppen / TS nicht	Metallplatten, TS und DS nicht erkennbar	Oberste Metallplatte & DS erkennbar, weitere Grenzen & Platten nicht eindeutig erkennbar
Profil 4	DS: UG 0/22 TS: UG 0/106, nicht normiert Geogitter	DS: 4 - 7 cm TS: 38 - 47 cm	TS & tieferliegende Metallplatte erkennbar; DS und 2. Metallplatte nicht	DS & Metallplatten erkennbar, TS schwach erkennbar	Metallplatten, TS und DS erkennbar
Profil 5	DS: UG 0/22 TS: Sickerkies Schwartenbretter	DS: 5 - 10 cm TS: 27 - 38 cm	Metallplatten & TS erkennbar; DS nicht erkennbar	Obere Metallplatte und DS erkennbar; untere Metallplatte & Grenze schwach erkennbar	Metallplatten, TS und DS erkennbar

Abbildung 17 : GPR-Systeme im Vergleich: «Kiesgrube Meiersmaad», Strassenaufbau-Profile. DS = Deckschicht; TS = Tragschicht; UG = Ungebundenes Gemisch (Dunkelgrün = wichtige Elemente vollständig erkennbar; hellgrün = wichtige Elemente mehrheitlich erkennbar; rot = wichtige Elemente nicht erkennbar)

Mit einem zweiseitigen T-Test für gepaarte Daten wurde für die FMCW-Messungen untersucht, ob sich die bei der Vermessung der Profile erfassten Werte statistisch signifikant von den Ergebnissen der GPR-Messungen unterscheiden. Die GPR-Daten wurden nach Frequenz und Schicht unterteilt, so dass 4-Teststatistiken resultierten:

- 500 MHz Schichtgrenze Tragschicht - Deckschicht
- 1000 MHz Schichtgrenze Tragschicht - Deckschicht
- 500 MHz Schichtgrenze Tragschicht - Unterbau
- 1000 MHz Schichtgrenze Tragschicht - Unterbau

Die Teststatistik (Anhang 1) ergab, dass nach Ausschluss der nicht interpretierbaren Profile lediglich die Resultate der 500 MHz-Aufnahmen bei der Deckschicht signifikant von den beim Aufbau der Profile durchgeführten Messungen abweichen. Bei den 1000 MHz-Daten der Deckschicht sowie bei beiden Frequenzen für die Tragschicht wichen die mit GPR erkannten Schichtstärken nicht signifikant von den bei der Erstellung der Profile gemessenen Werten ab.

Die Hintergrundsubtraktion hat bei den 500 MHz-Daten oft zur Entfernung der Deckschicht geführt. Die Vermutung der Autoren ist, dass der Versuch, die Deckschicht bei den 500 MHz-Daten einzuzichnen zu teilweise falschen Interpretationen geführt hat. Ein weiterer Grund für die Abweichung könnte die Verdichtung der Profile sein. Diese erfolgte nach der Messung der Schichtstärken und beeinflusst wegen der grösseren Materialmenge die Schichtgrenze zwischen Deck- und Tragschicht stärker als diejenige zwischen Tragschicht und Unterbau.



Abbildung 19 zeigt den durch Aufreissen der Strasse verifizierten Strassenaufbau. Die Deckschicht aus feinkörnig gebrochenem Kies (ca. UG 0/26) wurde mit einem mobilen Brecher mit lokal verfügbarem Material (Nagelfluh) hergestellt. Bis zur Brechtiefe (25 – 30 cm) besteht die Strasse aus gebrochenem, etwas größerem Material (ca. UG 0/63). Unterhalb befindet sich eine 10 – 20 cm dicke Schicht ungebrochene Nagelfluh, wobei es sich vermutlich um zugeführtes Material handelt, welches jedoch tiefer als die maximale Brechtiefe des mobilen Brechers liegt. Anschliessend folgt eine Schicht mit grober, stark lehmiger Nagelfluh, bei welcher es sich um die Untergrenze des Aushubs handelt. Die Mächtigkeit der einzelnen Schichten sind in Tabelle 4 zusammengefasst.



Abbildung 19: Strassenaufbau kürzlich sanierte Strasse im Gebiet mit dem Flurnamen Blueme

Tabelle 4: Mächtigkeit der Schichten beim kürzlich sanierten Strassenabschnitt Blueme

Bezeichnung der Schicht	Schichtstärke bei Messstellen [cm]			
	1m	1.5m	2m	2.5m
<b>Deckschicht</b>	9	14	10	9
<b>Feinkörnig gebrochene Tragschicht (Brechtiefe)</b>	24	25	29	31
<b>Tragschicht ungebrochen / Grobe Nagelfluh</b>	10	12	18	20
<b>Lokales Ausgangsmaterial (Lehm / Grobe Nagelfluh)</b>	45	46	47	40
<b>Gesamtes Profil</b>	88	97	106	100

Abbildung 20 zeigt die 500 MHz-Aufnahmen der linken Fahrspur, Fahrbahnmitte und rechten Fahrspur. Die starken oberflächennahen Reflexionen sind auf die metallischen Referenzobjekte zurückzuführen, welche bei der Erstellung des Rasters zur Orientierung vergraben wurden.

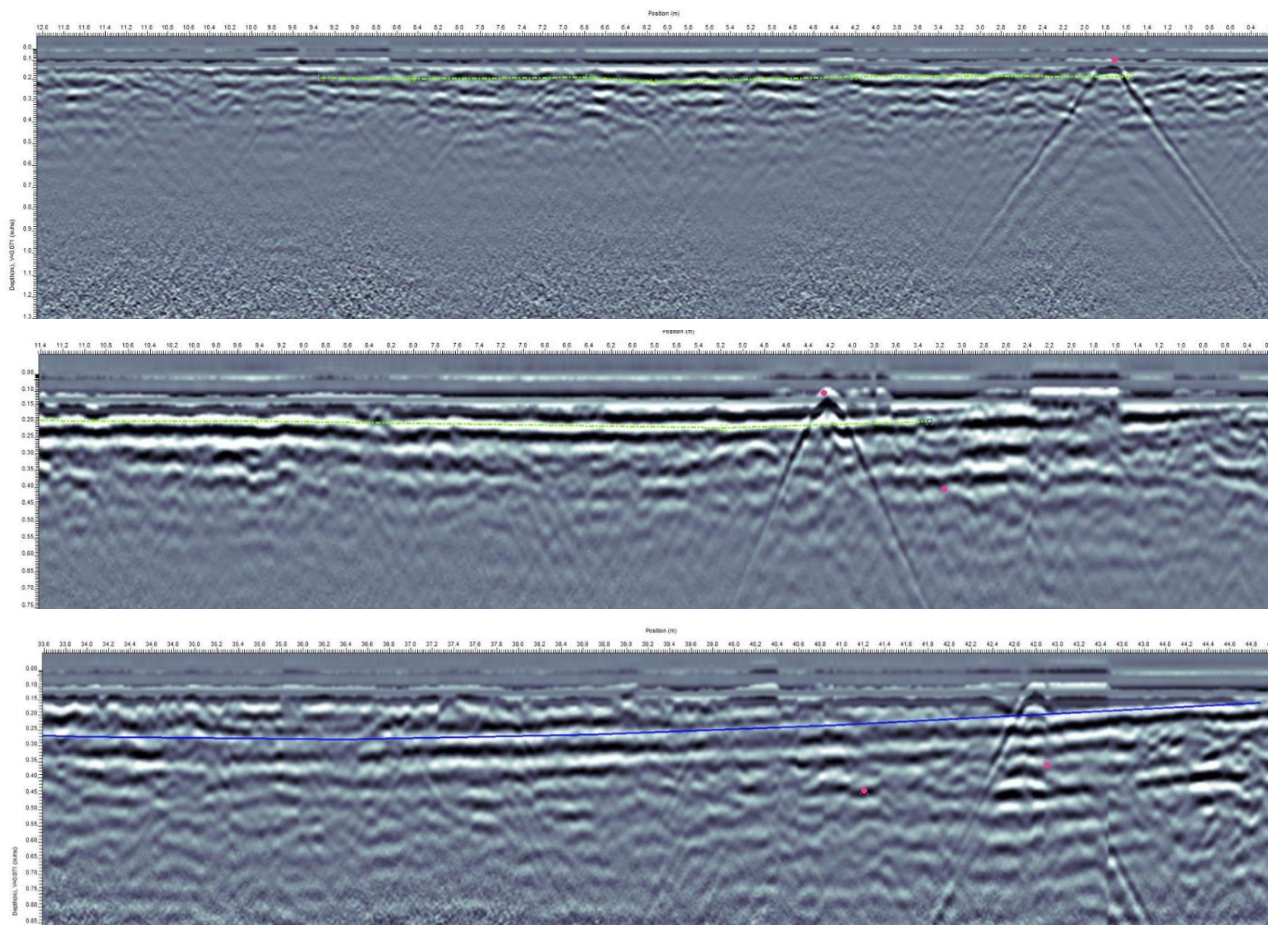


Abbildung 20: 500 MHz GPR-Aufnahmen der kürzlich sanierten Forststrasse im Gebiet «Blueme». Von oben nach unten: linke Fahrspur, Fahrbahnmitte, rechte Fahrspur

Werden die GPR-Daten mit den ermittelten Schichten verglichen fällt auf, dass wie bei den Aufnahmen in der Kiesgrube «Meiersmaad» die obersten rund 10 - 15 cm der Daten nach Anwendung der Hintergrund-Subtraktion nicht erkennbar sind. Dies betrifft die Deckschicht von rund 10 cm, welche teils angedeutet, jedoch nicht durchgehend erkennbar, ist. In einer Tiefe von rund 20 cm ist bei der linken Fahrspur und der Fahrbahnmitte resp. bei der rechten Fahrspur in ca. 30 cm Tiefe eine starke Reflexion erkennbar. Dabei handelt es sich vermutlich um die Brechtiefe des mobilen Brechers. In einer Tiefe von 40 - 45 cm ist eine weitere Schicht ansatzweise erkennbar, wobei es sich entweder um den Übergang der gebrochenen zur ungebrochenen Schicht oder um die Grenze Tragschicht - Untergrund handeln könnte. Diese Schicht zeichnet sich nur undeutlich ab. Die Erkennung der Grenze Tragschicht - Untergrund ist bei den vorliegenden GPR-Aufnahmen schwierig, da es sich sowohl beim Tragschicht- als auch beim Untergrund-Material um Nagelfluh handelt. In Bereichen tiefer als rund 80 cm überlagert das Hintergrundrauschen die GPR-Signale, so dass nur noch wenige, starke Reflexionen erkennbar sind.

Die 1000 MHz-Aufnahmen (Abbildung 26) ermöglichen es die Deckschicht zu erkennen. Die Mächtigkeit stimmt mit den rund 10 cm des Strassenaufbaus überein. Die starken Reflexionen werden wiederum durch die metallischen Referenzobjekte verursacht. Die tieferliegenden Schichten sind aufgrund der Vielzahl an Reflexionen, welche vermutlich durch die grösseren Steine der Nagelfluh verursacht wurden, schwierig zu interpretieren. Die Brechtiefe von ca. 30 cm ist nur in der Fahrbahnmitte eindeutig erkennbar. Tieferliegende Schichten wie der Übergang von Tragschicht zu Untergrund sind wegen überlagerndem Rauschen nicht erkennbar. Die Dateninterpretation ist bis zu einer Tiefe von ca. 40 cm möglich.

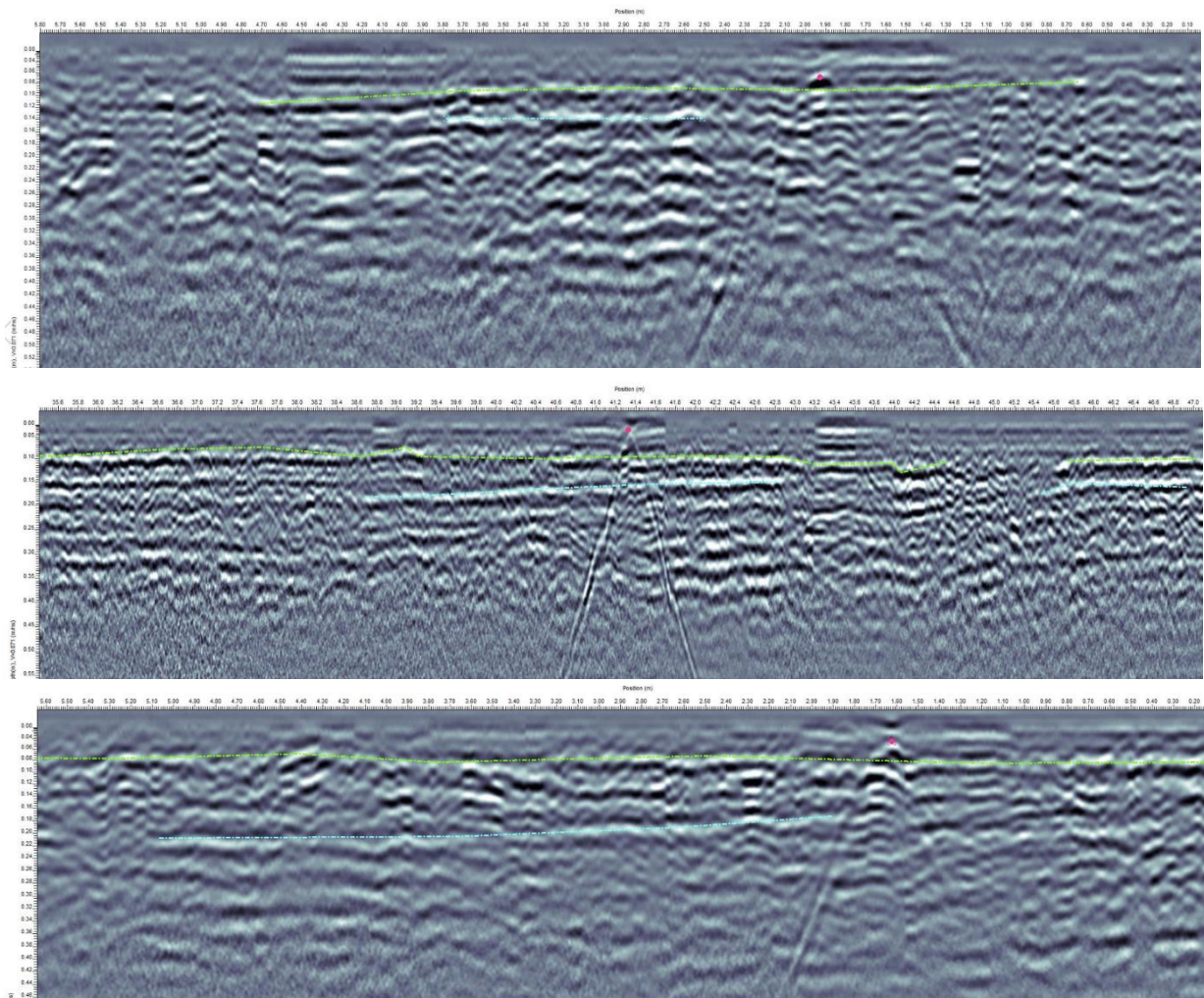


Abbildung 21: 1000 MHz GPR-Aufnahmen der kürzlich sanierten Forststrasse im Gebiet «Blueme». Von oben nach unten: linke Fahrspur, Fahrbahnmitte, rechte Fahrspur

Die Analyse der Rasteraufnahmen ist beispielhaft in Abbildung 22 dargestellt. Die Tiefenschnitte der 500 MHz-Aufnahmen zeigen jeweils einen Ausschnitt von 6 cm. Die Tiefenüberlappung zwischen zwei Aufnahmen beträgt 1 cm. Die Aufnahmen zeigen in einer Tiefe von 15 – 35 cm über das gesamte Raster starke Reflexionen (rot), welche auf einen Schichtwechsel hindeuten. Eine genaue Bestimmung der Schichtgrenzen ist somit nicht möglich.

Eine Erklärung dafür könnte sein, dass bei Materialwechslern auf Forststrassen keine scharfe Grenze wie bspw. beim Übergang von Beton zu Kies zu finden ist. Bei Forststrassen entstehen durch die sich vermischenden Materialien augenscheinlich diffuse Grenzen. Die Tiefenschnitte können somit helfen, die Interpretation der Linien-Scans zu bestätigen, jedoch keine genaueren Informationen liefern. Der Mehraufwand zur Erstellung und Interpretation solcher Rasterdaten ist relativ hoch, so dass der Nutzer sich die Frage stellen sollte, ob er gerechtfertigt ist.

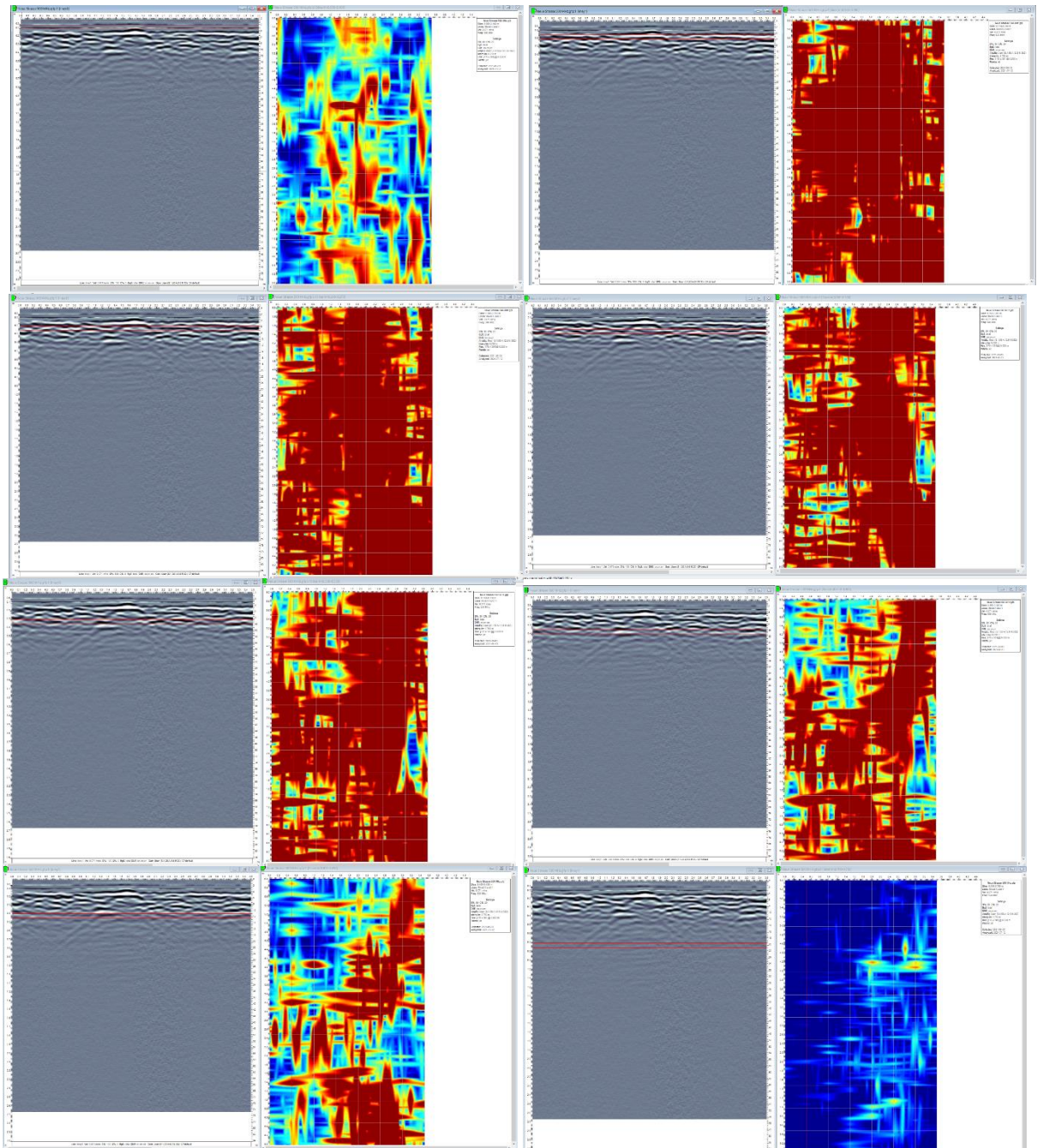


Abbildung 22: Tiefenschnitte der 500 MHz-Aufnahmen der kürzlich sanierten Forststrasse im Gebiet "Blueme". Von links oben nach rechts unten: 5 – 10 cm, 15 – 20 cm, 20 – 25 cm, 25 – 30 cm, 30 – 35 cm, 35 – 40 cm, 40 – 45 cm, 70 – 75 cm

In Abbildung 23 sind Tiefenschnitte der 1000 MHz-Aufnahmen abgebildet. Sie zeigen jeweils einen Ausschnitt von 3 cm mit einer Tiefenüberlappung von 1 cm. Auch mit diesen Aufnahmen konnten keine zusätzlichen Erkenntnisse gewonnen werden. Starke Reflexionen, die auf einen Schichtwechsel hindeuten sind bei 8 - 10 cm, 10 - 12 cm, 12 - 14 cm, 15 - 18 cm, 18 - 20 cm, 20 - 22 cm vorhanden.

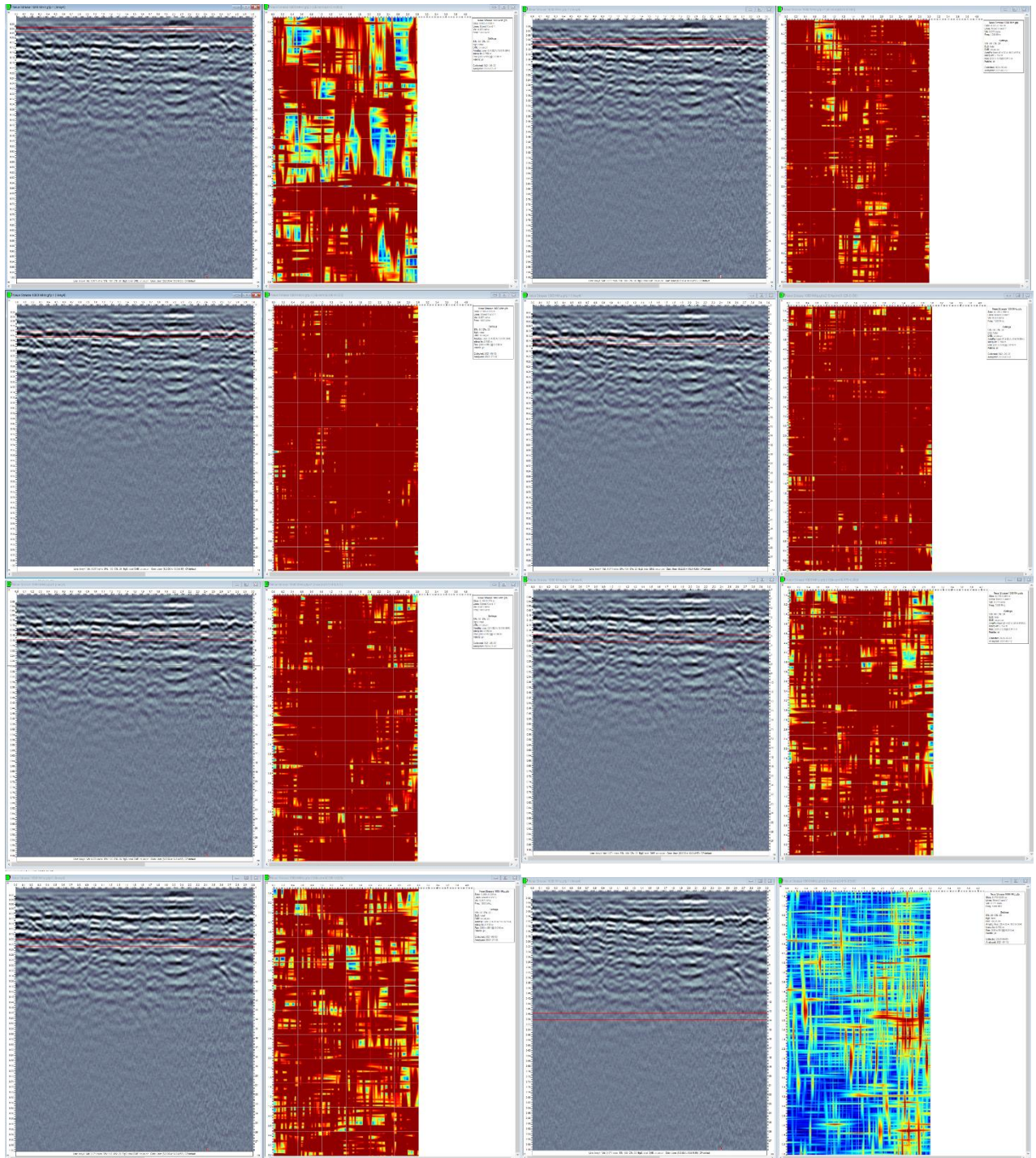


Abbildung 23: Tiefenschnitte der 1000 MHz-Aufnahmen der kürzlich sanierten Forststrasse im Gebiet "Blueme". Von links oben nach rechts unten: 0 - 5 cm, 8 - 10 cm, 10 - 12 cm, 12 - 14 cm, 15 - 18 cm, 18 - 20 cm, 20 - 22 cm, 48 - 50 cm

#### 4.4 GPR-Messungen bei Strassen mit unbekanntem Aufbau

In einem nächsten Schritt wurden auf 9 Strassenabschnitten im Forstbetrieb Sigriswil sowie 4 Strassenabschnitten des Forstbetriebs Burgergemeinde Bern GPR-Messungen durchgeführt. Geprüft wurde, ob GPR-Ergebnisse auch bei Strassen mit unbekanntem Aufbau interpretiert werden können. Bei sämtlichen Strassen wurde das 500 MHz GPR verwendet, welches sich in den vorherigen Aufnahmen zur Erkennung des gesamten Oberbaus bewährt hat. Erfasst wurden jeweils beide Fahrspuren. Die untersuchten Strassen des Forstbetriebs Sigriswil sind in Abbildung 24 ersichtlich.

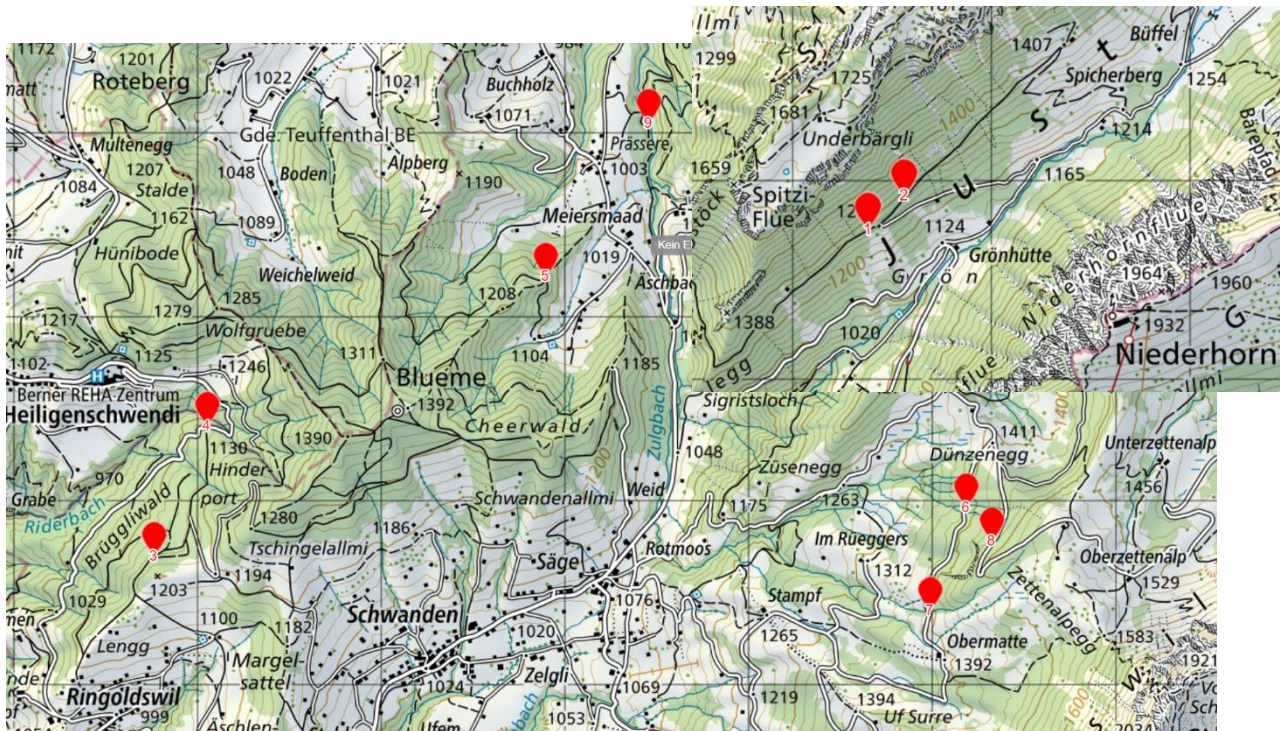


Abbildung 24: Mit GPR untersuchte Objekte im Forstbetrieb Sigriswil

Bei den meisten Aufnahmen ist bei mindestens einer der beiden Fahrspuren die eindeutige Erkennung des vermuteten Oberbaus möglich. Auffällig ist bei vielen Aufnahmen eine Schichtgrenze in rund 20 - 30 cm Tiefe, bei welcher es sich um die erreichbare Brechtiefe des betriebseigenen mobilen Anbaubrecher handeln könnte. Tieferliegende Schichtgrenzen sind bis rund 1 m erkennbar. Dabei beeinflussten das verwendete Baumaterial und das Ausgangsgestein, ob diese Grenzen klar erkennbar sind. Weiter fällt auf, dass die schwierig zu interpretierenden Aufnahmen (bspw. Aufnahmen 3 und 4) aus Gebieten mit Nagelfluh als Grundgestein stammen. Die Vermutung der Autoren ist, dass das Baumaterial aus einer lokalen Kiesgrube sehr ähnliche Eigenschaften wie der Unterbau der Strasse aufweist und deswegen keine eindeutigen Schichtgrenzen erkennbar sind.

Die weiter durchgeführten Aufnahmen auf den Strassen der Burgergemeinde Bern brachten keine wesentlichen neuen Erkenntnisse. Eindeutige Schichtgrenzen sind auf den Aufnahmen bis zu einer Tiefe von maximal 70 cm erkennbar. Deutliche Schichtgrenzen zeichnen sich bei den meisten Aufnahmen in 20 - 30 cm Tiefe ab. Ob es sich dabei um die gesamte Mächtigkeit des Oberbaus handelt oder diese Schichtgrenze eine in der Vergangenheit erfolgte Verstärkungsmassnahme der Strasse abbildet, kann ohne Sondierung nicht bestimmt werden.

Wie bei den Testprofilen, sind Details der GPR-Aufnahmen der einzelnen Strassenabschnitte und eine detailliertere Erläuterung der Ergebnisse im ausführlichen technischen Bericht enthalten.

## 5 Ableitung der Tragfähigkeit unter Einbezug von GPR-Daten

Aufbauend auf den Ergebnissen der GPR-Messkampagne wurde eine Berechnungshilfe erstellt, welche es ermöglicht die Tragfähigkeit der Strassen unter Berücksichtigung des bestehenden Aufbaus zu berechnen.

### 5.1 Grundlagen Dimensionierung unbefestigter Strassen mit geringem Verkehr

Die Dimensionierung des Oberbaus basiert auf den Ergebnissen des AASHO-Tests<sup>2</sup>. Das Verkehrsaufkommen auf Wald- und Güterstrassen ist meist gering. Gemäss Normen der Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS) gehören sie zur Gruppe «Strassen mit sehr leichtem Verkehr» (VSS-40320, Ausgabe 2019). Mit den SAFS-Merkblättern (1986) wurden die VSS-Normen an die einfache Bauweise und den unbefestigten Oberbau angepasst.

$$(1) \quad SN = \frac{2.67 (W * R)^{0.1068}}{10^{0.1647 * \log CBR - 0.0655}} - 2.54$$

Der Stärkenindex (SN) entspricht der Summe der Produkte aus den Schichtstärken D [cm] multipliziert mit ihren Tragfähigkeitskoeffizienten (a-Werte). Die Formel erfordert die Bestimmung des Dimensionierungsverkehrs (W), Regionalfaktors (R) und Untergrundtragfähigkeit (CBR-Wert).

Auch heute wird in der Praxis noch dieselbe Formel für die Dimensionierung verwendet, wie kantonale Weisungen (bspw. ALG 2018; WNA 2019) zeigen. Auch die von Heinimann (2015) präsentierte, vereinfachte Formel zur Bestimmung des Stärkenindex beruht auf dieser Grundlage:

$$(2) \quad SN = \frac{3.14 * (NAL * R)^{0.11}}{CBR^{0.16}} - 2.54$$

Beide Formeln sind darauf ausgelegt, Strassen für eine bestimmte Lebensdauer zu dimensionieren. Ist die Anzahl NAL (1 NAL = 8.2 t) überschritten, ist der Befahrbarkeitsindex (p) unter den zulässigen Wert gesunken und die Strasse nicht mehr mit genügender Sicherheit oder dem notwendigen Fahrkomfort befahrbar.

Der Dimensionierungsverkehr (W) kann über die Bewirtschaftungsregion oder den Strassentyp geschätzt werden (Tabelle 5). Eine Schätzung des Verkehrs ist ausreichend, da sich erst eine Verdopplung wesentlich auf den Stärkenindex auswirkt (SAFS 1986).

Tabelle 5: Richtwerte für den Dimensionierungsverkehr (W) auf Waldstrassen nach Strassentypen oder Bewirtschaftungsregion, wobei L = Strassenlänge in Meter (nach Burlet 1980 & SAFS 1986, verändert)

Strassentyp	Dimensionierungsverkehr (W) als Anzahl NAL von 8.2 t
<b>Erschliessungsstrassen</b>	
Bis 1.5 km Länge	5'000
1.5 – 3 km Länge	5'000 – 10'000
<b>Sammelstrassen</b>	
Kleines Einzugsgebiet (3 – 6 km Strassen)	10'000 – 20'000
Mittleres Einzugsgebiet (6 – 12 km Strassen)	20'000 – 40'000
Grosses Einzugsgebiet (12 – 18 km Strassen)	40'000 – 60'000
<b>Verbindungsstrassen</b>	100'000 – 200'000
<b>Region</b>	
Jura, Mittelland, Alpen	3 * L
Voralpen	4 * L

<sup>2</sup> Der AASHO-Strassentest wurde 1956-61 in den USA durchgeführt und ist der grösste Versuch über das Verhalten des Strassenoberbaus unter Verkehr. Untersucht wurden flexible und starre Bauweisen. Auf jedem Testabschnitt wurde eine Verkehrsbeanspruchung von 1.1 Mio. Normalachslasten (1 NAL = 8.2 t) erreicht. Die Ergebnisse des Versuchs erlaubten das Aufstellen empirischer Beziehungen zwischen dem Befahrbarkeitsindex (p) und den Faktoren Achslast (L), Anzahl Achslastwechsel (W), Lastanordnung (A) und der Dicke des Strassenoberbaus (SN).

Der Regionalfaktor berücksichtigt jahreszeitliche Schwankungen der Tragfähigkeit eines Strassenkörpers. Burllet (1980) und SAFS (1986) haben folgenden noch heute verwendeten Vorschlag präsentiert (Tabelle 6).

Tabelle 6: Regionalfaktoren für die Schweiz (Burllet 1980, verändert)

Umgebungsbedingungen	Regionalfaktor (R)
Günstig (Höhenlage unter 400 m ü.M.)	1.0
Normal (Höhenlagen von 400 – 800 m ü.M.)	1.5
Ungünstig (Höhenlagen über 800 m ü.M.)	2.0

Der am schwierigsten zu bestimmende Parameter der Dimensionierungsformel ist die Untergrundtragfähigkeit. Ein CBR-Wert unter 5 % hat einen wesentlichen Einfluss auf den Stärkenindex und eine genaue Bestimmung des CBR-Wertes (bspw. Farnell-Handpenetrometer) ist erforderlich. Bei CBR-Werten über 10 % ist eine Schätzung aufgrund der Bodenbeurteilung ausreichend (SAFS 1986). Für die wichtigsten Bodenarten der Schweiz sind die CBR-Wertebereiche zusammengefasst (Tabelle 7).

Tabelle 7: Untergrundtragfähigkeit (CBR-Werte) in der Schweiz oft vorkommender Bodenarten (SAFS 1986, verändert)

Bodenart	CBR-Wertebereich [%]
Feinkörniger Flyschschutt	0.5 – 2
Verwitterter Mergel	1 – 3
Verwitterter Sandstein	2 – 5
Gehängelehme	1 – 2
Feinkörnige Moräne	1 – 3
Moräne mit reichlich Kies	5 – 10
Grobkörnige Moräne	10 – 20
Schotter / Blockschutt	> 20

Der mit diesen Faktoren ermittelte Stärkenindex SN kann mit den Tragfähigkeitskoeffizienten der Materialien in Schichtstärken umgerechnet werden. Die Tragfähigkeitskoeffizienten können SAFS (1986), Burllet (1980) oder IMP (2021) entnommen werden.

## 5.2 Excel-basierte Berechnungshilfe

Auf Basis der Faktoren zur Ableitung der Tragfähigkeit wurde eine Excel-basierte Berechnungshilfe erstellt, mit welcher beurteilt werden kann, ob ein Strassenprofil für die erwartete Belastung einen ausreichenden Stärkenindex SN besitzt. Falls die Berechnungen einen ungenügenden SN ergeben, kann mit der Berechnungshilfe die erforderliche Verstärkung der Strasse für Hoch-, Tiefenbau oder ein kombiniertes Verfahren bestimmt werden. Die für die Dimensionierungsformel benötigten Angaben entsprechen für die Region Sigriswil typischen Werten.

Für die Strassenaufbau-Profile in der Kiesgrube «Meiersmaad» wurden die mit GPR bestimmten Schichtstärken ausgewertet. Exemplarisch wird damit die Ableitung der Tragfähigkeit unter Nutzung von GPR-Daten dargestellt.

### Berechnungshilfe Tragfähigkeit

Die Berechnungshilfe beruht auf der Dimensionierungsformel der SPS Merkblätter:

Eingabe erforderlich

$$SN = \frac{2.67 (W \cdot R)^{0.2968}}{10^{0.1647 \cdot \log CBR - 0.0655}} - 2.54$$

#### Dimensionierungsformel (Soll Stärkenindex)

Nachfolgende Werte sind für die konkrete Situation zu bestimmen/ zu schätzen um den erforderlichen Stärkenindex abzuleiten. Eine Unterstützung bietet die Exceltabelle "Faktoren Dimensionierungsformel"

CBR-Wert	Dimensionierungsverlehr (W) [Anzahl Normalachslasten à 82kN]	Regionalfaktor (R)	SN
			#ZAHL!

#### Dimensionierung (Strassenaufbauaktuell)

Nachfolgende Werte beschreiben den aktuellen Strassenaufbau. Die Schichtstärken werden durch destruktive Verfahren (Sonderschlitze) oder mit GPR erhoben. Die Deckschicht dient als Verschleisschicht und ist NICHT mit anzugeben. Die Tragfähigkeitskoeffizienten (a-Werte) der Baustoffe befinden sich in der Tabelle "Faktoren Dimensionierungsformel"

Schicht	Stärke [cm]	Material [a-Wert]	SN-Schicht	SN
D1			0	0.00
D2			0	
D3			0	
D4			0	
D5			0	
D6			0	

#### Differenz aus dem SN-Strassenaufbau und dem SN-Dimensionierungsformel

Positive Differenz: Die Tragfähigkeit der Strasse ist ausreichend, um die an sie gestellten Anforderungen zu erfüllen.

Negative Differenz: Die Tragfähigkeit der Strasse ist nicht ausreichend. Die Strasse muss mit einem der nachfolgenden Verfahren verstärkt werden, damit sie ihre Funktion erfüllen kann.

#ZAHL!

#### Hochbau

Die hinzugefügten Schichtstärken und die zugehörigen a-Werte sind anzugeben

Schicht	Stärke [cm]	Material [a-Wert]	Summe	Differenz zu SN-Dimensionierungsformel
D1+				0 #ZAHL!
D2+				0

#### Tiefenbau

Beim Tiefenbau ist die Stärke der entfernten Schicht(en) abzuziehen und die Schichtstärke des neuen Materials zu ergänzen

#### Entfernte Schicht(en)

Schicht	Stärke [cm]	Material [a-Wert]	Summe
D1-			0
D2-			0

#### Neue Schicht(en)

Schicht	Stärke [cm]	Material [a-Wert]	Summe	Differenz zu SN-Dimensionierungsformel
D1+				0 #ZAHL!
D2+				0

#### Kombiverfahren

Füllen sie die jeweiligen Angaben bei Hoch- UND Tiefenbau ein

Differenz zu SN-Dimensionierungsformel

#ZAHL!

Abbildung 25: Excel-basierte Berechnungshilfe zur Ableitung der Tragfähigkeit von Forststrassen

Die Anwendung der Berechnungshilfe wird hier an Profil 3 aufgezeigt. Weitere Berechnungen sind im detaillierten technischen Bericht enthalten. Analog kann die Tragfähigkeit bestehender Strassen mit Nutzung von GPR beurteilt werden. Die Excel-Tabelle ist als digitaler Anhang dem Schlussbericht beigelegt.

Bei Profil 3 besteht die Tragschicht aus zwei Schichten mit unterschiedlichen Tragfähigkeitsbeiwerten. Als typischer CBR-Wert bei dieser Bauweise wurde 5 % angenommen.

- CBR-Wert: 5 %
- W: 30'000
- R: 1.75
- a-Wert: 0.11 (Kies II, gebrochen) - Schroppen  
0.14 (Kies I, gebrochen) – UG 0/63

Gemäss Dimensionierungsformel resultiert ein erforderlicher Stärkenindex SN von 5.1.

Die FMCW-GPR-Daten zeigen eine Schichtgrenze in rund 50 cm Tiefe. Mit den Informationen zum Schichtaufbau kann auch die zweite, schwach erkennbare Materialgrenze zwischen den Schroppen und UG 0/63 zwischen 20 - 30 cm Tiefe erkannt werden. Somit ergeben sich zwei für die Dimensionierung relevante Schichten von 20 cm (Schroppen) und 30 cm (UG 0/63). Die Mächtigkeit der Tragschicht wird hier um 2 - 6 cm überschätzt, da die Deckschicht, welche in der Dimensionierung nicht berücksichtigt werden sollte, nicht erkannt wurde.

Die SFCW-Daten sind schwieriger zu interpretieren. In ca. 43 cm Tiefe ist die Grenze zwischen Planum und Oberbau zu erahnen, weitere Schichtstärken sind nicht erkennbar. Für die SFCW-Daten wurde deswegen mit einer 43 cm starken Tragschicht und einem a-Wert von 0.11 gerechnet. Es ergeben sich daraus die folgenden SN-Werte:

Dimensionierungsformel (Soll-Wert):	5.1
FMCW-Daten:	6.4
SFCW-Daten:	4.7

Während die Tragfähigkeit der Strasse bei der Interpretation der FMCW-Daten gegeben ist, ist der mit den SFCW-Daten bestimmte SN-Wert zu gering. Bei einem a-Wert von 0.11 müsste die Schichtstärke mind. 3 cm grösser sein, um die an die Strasse gestellten Anforderungen zu erfüllen. Wird bei einer Schichtstärke von 43 cm mit einem Tragfähigkeitsbeiwert von 0.14 gerechnet, ergibt dies mit 6.0 einen ähnlichen Wert wie bei den FMCW-Daten.

## 6 Diskussion Messkampagne GPR & Ableitung Tragfähigkeit

Beim Anwendungsfall «Forststrasse» wurde versucht mit GPR ähnliche Materialien gegeneinander abzugrenzen und Materialgrenzen zu erkennen. Die Materialien unterscheiden sich teils nur in der Korngrösse und weisen ansonsten sehr ähnliche Eigenschaften auf. Es handelt sich somit um einen Grenzfall der Anwendung von GPR, bei dem die technische Machbarkeit geprüft wurde.

In der Kiesgrube «Meiersmaad» wurden durch die Verwendung eines Ultrabreitband-Sensors einer Frequenz mit dem 500 MHz Sensor bessere Resultate erreicht. Der Nachteil des 500 MHz-Sensors ist, dass durch Anwenden der Hintergrundsubtraktion die oberflächennahen Deckschichten mit entfernt werden. Noch zu testen wäre, ob mit Optionen der erweiterten Datenbearbeitung (bspw. Anpassung der Filteroptionen) eine Optimierung der Datendarstellung in oberflächennahen Bereichen möglich ist. Bewährt hat sich die 500 MHz-Frequenz zur Beurteilung der Mächtigkeit des gesamten Oberbaus. In den meisten Fällen wurden damit interpretierbare Daten generiert, in einzelnen Fällen war die Identifikation der Grenze zwischen Ober- und Unterbau jedoch nicht zweifelsfrei möglich. Dies kann auf verschiedene Gründe zurückzuführen sein. Einerseits sind die verwendeten Baumaterialien in ihren Eigenschaften sehr ähnlich; andererseits war die erreichbare Detektionstiefe deutlich geringer als dies gemäss Herstellerangaben zu erwarten war. Ähnliche Detektionstiefen, wie die bei der Kiesgrube erreichten, finden sich auch in der Literatur wieder. Blindow et al. (2007) erreichten bei feinkörnigen, bindigen Böden eine Eindringtiefe von 2 m (trocken) resp. 1 m in feuchtem Zustand. Durch eine Kombination der beiden FMCW-Frequenzen (500 und 1000MHz) konnten die Schichtgrenzen der Profile sowie auch die verbauten Referenzplatten in der Regel bestimmt werden. Schwierigkeiten bereitet bei

der FMCW-Technologie derzeit die Erkennung dünner, oberflächennaher Schichten sowie aufgrund der Vielzahl an Reflexionen die Trennung von Bodenschichten mit groben Komponenten.

In Zukunft könnte bei der Verwendung von FMCW-Systemen die Verwendung mehrerer, parallel verwendeter Frequenzen ein erfolgsversprechender Ansatz sein. Dies wird bspw. von Noggin<sup>®</sup> mit dem SPIDAR<sup>®</sup> Multi-channel GPR bereits praktiziert (Sensors & Software Inc. 2022).

Mit den SFCW-Daten konnten die Schichtgrenzen in der Kiesgrube Meiersmaad in vier von fünf Profilen bestimmt werden. Die Grenze zwischen Ober- und Unterbau war bei den SFCW-Daten bei allen Profilen erkennbar. Die ersten Systemtests sind somit vielversprechend für die Anwendung in der Zukunft. Es werden diverse Strukturen erkennbar, welche für die Ableitung der Schichtstärken wertvoll sind. Durch die grössere Bandbreite können Objekte und Grenzen in verschiedenen Tiefen schneller und einfacher analysiert werden. Dies hat sich insbesondere zur Erkennung dünner, oberflächennaher Schichten als Vorteil erwiesen.

Rasteraufnahmen bieten bei Forststrassen zur Schichtstärken-Erkennung keine zusätzlichen Informationen. Sie können allenfalls helfen die durch Linien-Scans interpretierten Schichtstärken zu bestätigen. Die vermutlich durch die Vermischung der Materialien bedingten unscharfen Materialgrenzen führen dazu, dass Schichtgrenzen bei Rasteraufnahmen über eine Tiefe von rund 10 cm zu starken Reflexionen führen und somit keine eindeutige Grenze anhand von Rasteraufnahmen bestimmt werden kann.

Die GPR-Aufnahmen auf Strassen mit unbekanntem Aufbau in den Wäldern der Forstbetriebe Sigriswil und Burgergemeinde Bern haben die bisherigen Erfahrungen mit der Technologie bestätigt. In den meisten Fällen ist die Erkennung von Schichtgrenzen möglich, sofern diese maximal in einer Tiefe von ca. 1 m liegen. Die Interpretation der Aufnahmen erfordert Lokalwissen oder die Anwendung eines destruktiven Verfahrens zur Verifizierung der GPR-Aufnahmen. Schwierigkeiten bereitet die Abgrenzung des Oberbaus vom Untergrund, wenn sehr ähnliche Materialien verwendet werden.

Die Bedeutung der Datenbearbeitung ist bei GPR-Untersuchungen nicht zu unterschätzen. Die Suche nach den optimalen Einstellungen ist zeitintensiv. Die verwendete kommerzielle Software EKKO-Project bietet viele Möglichkeiten, die sich einem ungeübten Nutzer erst nach einiger Zeit erschliessen. Diesem Umstand ist es auch geschuldet, dass die Datenbearbeitung in vorliegender Untersuchung nicht reproduzierbar ist. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass bei einer längeren Projektlaufzeit und insbesondere bei längerer Verfügbarkeit der Software durch Nutzung der erweiterten Datenbearbeitung Einstellungen vorgenommen hätten werden können, welche zu eindeutigeren Ergebnissen geführt hätten. Auch Funktionen wie die Erstellung eines automatischen Reports oder eine Protokollierung der durchgeführten Bearbeitungsschritte hätte getestet werden können.

Die Auswertung der GPR-Untersuchungen enthält jedoch auch eine subjektive Komponente. Wird bspw. bei der Kalibrierung der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Signals (vgl. Kapitel 2.2) eine Änderung um wenige Nanosekunden vorgenommen, kann sich das je nach Mächtigkeit des Oberbaus bereits um 10 – 20 cm auswirken. Bei Strassenabschnitten ohne tiefliegende deutlich erkennbare Hyperbeln ist die Kalibrierung der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Signals schwierig. Ein Vergleich der ermittelten Ausbreitungsgeschwindigkeit mit der Literatur ermöglicht Plausibilitätskontrollen, jedoch keine exakte Bestimmung der tatsächlichen Ausbreitungsgeschwindigkeit. Die von Johnston (2018) angegebene Genauigkeit der Tiefenbestimmung mit +/- 10 % erscheint plausibel.

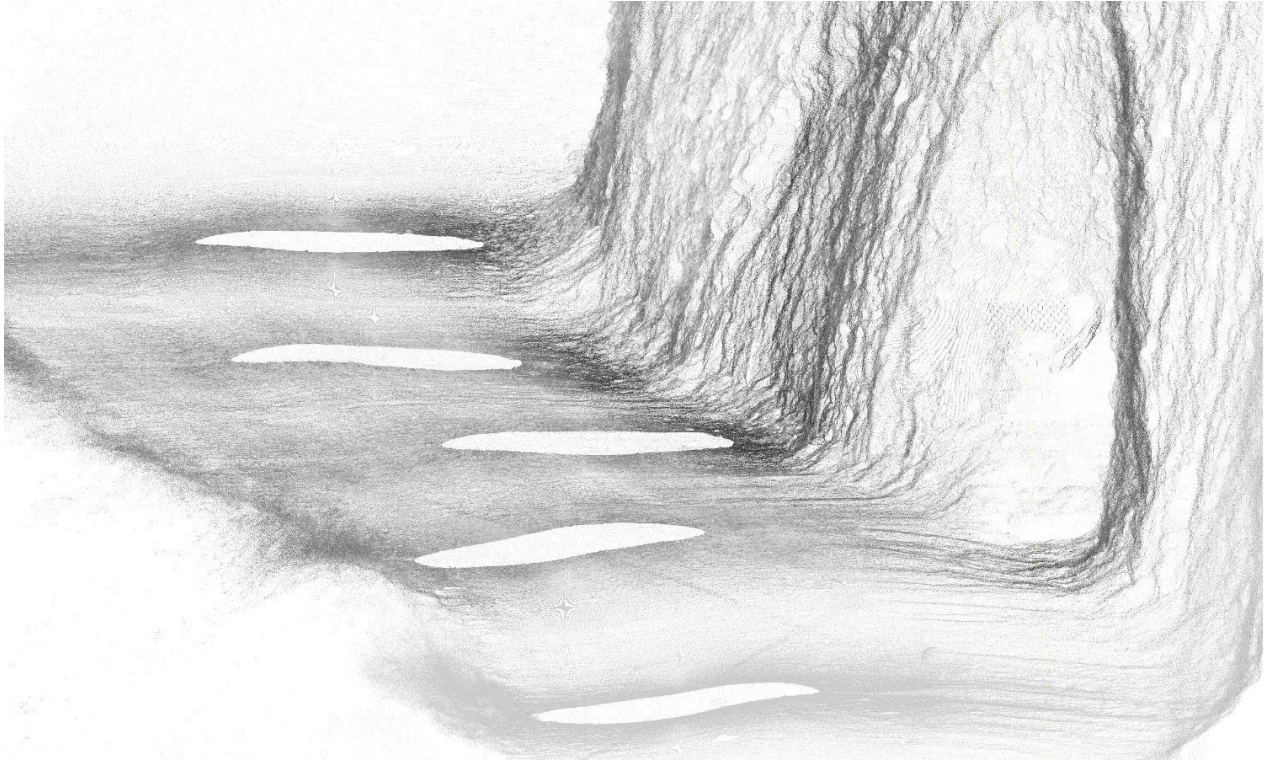
In Zukunft ist bei GPR-Analysen mit technischen Fortschritten zu rechnen, welche die Auswertung vereinfachen. Ein grosser Zeitgewinn würde sich durch eine automatische Schichtstärkenerkennung ergeben, welche bspw. zur automatischen Schichtstärkenerkennung auf Autobahnen (Cui et al. 2022) oder zur Erkennung der Eisdicke auf Eisstrassen (Sensors & Software Inc. 2016) bereits realisiert wurde. Die Eignung der verwendeten Algorithmen für Forststrassen, mit nur geringfügigen Unterschieden in den Eigenschaften der Materialien, wäre zu testen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass mit beiden getesteten GPR-Technologien bei der Mehrheit der untersuchten Strassenabschnitte mindestens die für die Berechnung der Tragfähigkeit erforderliche

Schichtstärke des Oberbaus ermittelt werden kann. Die für die Datenerhebung und vor allem die anschliessende Datenbearbeitung erforderliche Zeit verunmöglicht derzeit noch den flächigen Einsatz der Technologie zur Beurteilung der Tragfähigkeit eines Forstrassen-Netzes auf Betriebsebene. Die Technologie ist für die Zukunft interessant, da viele Forstrassen ihre Lebensdauer erreicht oder bereits überschritten haben. Mit GPR kann die Mächtigkeit des Oberbaus ermittelt und daraus gefolgert werden, welche Massnahmen erforderlich sind, um die Tragfähigkeit der Strasse zu gewährleisten. Dabei stand die Bestimmung des Stärkeindex (SN) im Fokus. Dieser Ansatz bietet den Vorteil, dass mit unterschiedlichen Eingangsdaten gearbeitet werden kann. Einerseits kann der Stärkenindex anhand der zu erwartenden Belastung und den Umweltbedingungen mit der Dimensionierungsformel (SAFS 1986) bestimmt werden. Andererseits kann er vom Aufbau eines Strassenprofils abgeleitet werden. Für die Bestimmung der Tragfähigkeit bestehender Strassen sind beide Ansätze wichtig. Durch die Dimensionierungsformel wird der mindestens zu erreichende SN-Wert definiert. Schwierigkeiten bereitet bei der Dimensionierungsformel einzig die Bestimmung des CBR-Werts, zur Abschätzung der Tragfähigkeit des Bodens unter der Strasse. Ab einem CBR-Wert von 5 % ist eine Schätzung anhand der Bodenansprache ausreichend. Viele Schweizer Böden weisen jedoch einen CBR-Wert im Bereich 0 - 5 % auf (SAFS 1986). Eine geplante flächige Bodenkartierung der Schweiz (NABODAT 2022) könnte in Zukunft für CBR-Werte genauere Informationen liefern. Genauere Informationen zur Bereitstellung sind jedoch aktuell nicht bekannt. Alternativ bleibt die Bestimmung des CBR-Wertes z.B. mit einem Handpenetrometer, wobei Messungen in der Nähe der Strasse als Näherungswert für den CBR-Wert des Bodens unter der Strasse dienen könnten.

Um den Stärkenindex einer bestehenden Strasse zu bestimmen, muss neben der Stärke der einzelnen Schichten das Material bekannt sein. Die Bestimmung des Materials ist mit GPR nicht möglich. Bei einfacher Bauweise der Strassen kann eine optische Analyse ausreichend sein, um die Tragfähigkeitskoeffizienten der verbauten Materialien zu bestimmen. Bei mehrschichtigem Strassenaufbau und nicht bekanntem Baumaterial ist weiterhin eine Sondierung erforderlich. Eine weitere Schwierigkeit bei der Anwendung von GPR ist, dass Materialien zur Stabilisierung des Strassenprofils (bspw. Geogitter) nicht erkannt werden. Diese können dazu führen, dass die erforderlichen Schichtstärken zur Gewährleistung der Tragfähigkeit deutlich reduziert werden können. Werden diese Materialien nicht erkannt, wird durch den Vergleich mit der Dimensionierungsformel ggf. die Tragfähigkeit als ungenügend beurteilt, obwohl sie durch die Stabilisierungsmassnahme ausreichend ist. Auch bei einer Strasse, bei welcher die Tragfähigkeit des vorhandenen Oberbaus bei einem Vergleich mit der Dimensionierungsformel als ungenügend beurteilt wird, empfiehlt sich deswegen vor einer ressourcenintensiven Verstärkung der Strasse eine Verifizierung der GPR-Ergebnisse durch ein destruktives Verfahren.

Einige für diese Arbeit verwendete Datengrundlagen gehen auf die 1980er-Jahre zurück. Kantonale Weisungen und Richtlinien (ALG 2018; WNA 2019). zeigen, dass die damals entwickelte Methodik auch heute noch angewendet wird. Ermöglicht wird dies durch die Umrechnung der Fahrzeuggewichte und Achslasten in Normachslasten anhand von Lastäquivalenzfaktoren. Eine Änderung des Strassenverkehrsgesetzes um das Jahr 2000 führte zur Anpassung des erlaubten Maximalgewichts und der maximalen Achslasten. Dies führte zu einer stärkeren Belastung der Strassen, auf welche diese nicht ausgelegt waren (Hirt 2001). Die Schädigung hat sich dadurch vor allem bei Fahrzeugen mit geringer Achszahl im Verhältnis zum erlaubten Mehrgewicht ungünstig verändert (Hirt 2001). Beim Bau neuer Strassen oder der Verstärkung bestehender Strassen kann dies berücksichtigt werden, sofern für die neuen Fahrzeuge die Achslasten bekannt sind und anhand derer die Lastäquivalenzfaktoren berechnet werden. Nach heutigem Recht darf eine Einzelachse (Zugfahrzeug sowie auch Anhänger) mit 10 Tonnen belastet werden (UVEK 2000). Weil die LSVA-Abgabe sich nach dem erlaubten Gesamtgewicht richtet, werden Fahrzeugkombinationen für den Holztransport oft so eingekauft, dass sie maximal 40 Tonnen schwer sein dürfen, um höhere Abgaben zu vermeiden (Huber 2019, persönliche Mitteilung).



## **Teil 2**

### **Fahrbahnoberflächenanalyse zur Beurteilung des Zustandes von Forststrassen**

## 7 Grundlagen zur Erarbeitung eines Wegemonitoring- Konzeptes

Wassergebundene Forststrassen unterliegen über ihren Lebenszyklus stetiger Veränderung. Erosion, Materialverlust, intensiver Verkehr oder Verformung zählen zu vielfältigen Verschleissprozessen, welche zu unterschiedlichen Schadausprägungen führen können (Heinimann 1997). Vor allem das Trockenhalten des Weges ist ein Kern-Grundsatz des Wegebaus und -unterhalts, um die Stabilität des Weges zu gewährleisten und Verschleisserscheinungen gering zu halten (Arbeitsblatt DWA-A 904 2005). Für das Aufsetzen eines Wegemonitoring- Systems muss daher unterschieden werden, ob Situationen welche Verschleissprozesse begünstigen, präventiv bzw. frühzeitig erfasst werden sollen, oder ob das Erfassen von bereits existierenden Schäden im Fokus der Betrachtung steht.

Ebenso wie das Konzept selbst, müssen jedoch auch die Anwendbarkeit und die Kosten eines Monitoring-Systems berücksichtigt werden. Innerhalb des Projekts wird angestrebt ein System zu identifizieren, welches das Potenzial hat, ein Wegesystem eines Forstbetriebs zu verwalten. Die Kosten bei der Beschaffung nötiger Messgeräte, manuelle Interaktion mit dem System, Datenbearbeitung als auch Speichern und Vorhalten von Rohdaten und die Möglichkeit der Echtzeitverarbeitung sind daher kritische Punkte der Entwicklung und der Tests und werden daher weiter in den Fokus gerückt.

## 8 Basis-Zielparameter zur Beurteilung des Zustands von Forststrassen

### 8.1 Fahrbahn, Graben und Durchlass

#### 8.1.1 Verschleissprozesse und Kennwerte

Die konstruktiven Elemente einer Forststrasse: Fahrbahn, Graben und Durchlass gewährleisten als Kollektiv die Drainage des Weges (Abbildung 26). Wasser auf der Fahrbahn wird über sie und über die Bankette / Sicherheitsstreifen in den Graben abgeleitet, wo es in Längsrichtung zu Durchlässen oder direkt in Wasserabschläge geleitet und abgeführt wird.

Die Fahrbahn, als erstes betrachtetes Element der Forststrasse, wird durch ihren in Teil 1 des Berichts abgehandelten Unterbau und ihre geometrische Erscheinung beschrieben. Die durch den Unterbau bedingten Tragfähigkeits-Eigenschaften sind jedoch nicht gänzlich statisch zu betrachten, sondern unterliegen ebenso äusseren Einflüssen. So konnten Holzleitner et al. (2020) aufzeigen, dass alleinig auftretender Niederschlag durch Eindringen von Wasser in den Wegekörper auch bei intakter Drainage einer Forststrasse bereits einen negativen Einfluss auf die Tragfähigkeit besitzt. Ist darüber hinaus die Drainage nicht intakt, potenziert sich dieser Effekt (Napper 2008), wodurch insbesondere bei gleichzeitiger weiterer Nutzung der Strasse erhöhter Verschleiss zu erwarten ist.

Das schnelle Ableiten von Wasser von der Fahrbahnoberfläche auf möglichst direktem, kurzem Weg stellt dabei einen Grundsatz für eine intakte Strassengeometrie dar. Verbleibt das abzuleitende Wasser länger auf dem Wegekörper, hat es zudem die Eigenheit verstärkt in die tragende Schicht einzudringen, wodurch die Aggregatsbindung des Wegekörpers und damit die Tragfähigkeit des Weges noch stärker abnimmt. Dieses Zusammenspiel kann über die Geometrie der Fahrbahnoberfläche beurteilt werden. Eine durchgehende seitliche Neigung von 5 - 8 (10) % (Kuonen 1983; Hölldorfer 2007) wird für Dachprofile als geeignet angesehen. Einseitig geneigte Strassen weisen geringere Neigungen von rund 3 % auf (Kuonen 1983). Weitere Einflussparameter wie Vegetationsaufwuchs auf dem Wegekörper behindern den Oberflächenabfluss, da die Abflussgeschwindigkeit des Wassers an der Oberfläche vermindert wird. Mit gleichzeitiger Durchwurzelung des Strassenkörpers, welche die verdichtete Oberfläche des Weges aufbricht und organisches Material einbringt, werden negative Effekte verstärkt.

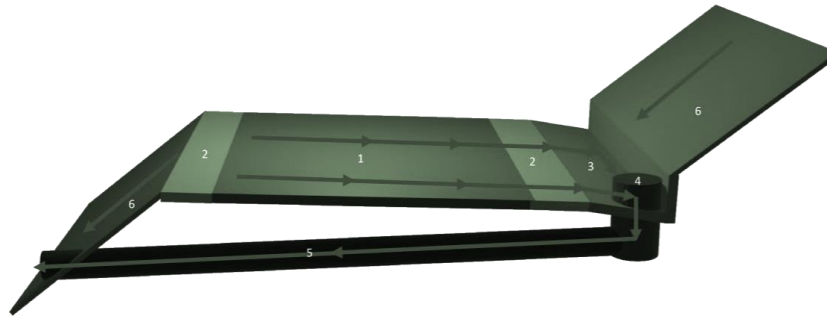


Abbildung 26: Wasserfluss über die konstruktiven Bestandteile einer Strasse ((1) Fahrbahn, (2) Bankett, (3) Graben, (4) Fassung, (5) Durchlass, (6) Böschung) in einseitig geneigter Bauausführung (Brodbeck 2021), geeignet für geringe Längsneigungen der Forststrasse

Die bei der Ableitung zurückgelegte Distanz des Wassers, ist als weiteres beschreibendes Element von Bedeutung. Nimmt diese zu, wird gleichzeitig mehr Wasser mit höherer erosiver Wirkung transportiert, wobei auch die Fliessgeschwindigkeit verstärkende Effekte mit sich bringt. Kann die durch das Wasser auf dem Weg zurückgelegte Distanz beschrieben werden, so kann auch hier präventiv eine Aussage über die konstruktive Qualität des Weges und die Resilienz gegenüber Starkniederschlägen erfolgen. Dachprofile halbieren beispielsweise die Wegedistanz des Wassers durch beidseitige Ableitung, was einen begünstigenden Effekt auf die Haltbarkeit des Weges verspricht (Heinimann 1997).

Mit dem Wasser erfolgt gleichzeitig auch der damit einhergehende Sedimenttransport von Material der Fahrbahn, über die Bankette / Sicherheitsstreifen in den Graben und weiter in den Durchlass, welcher zur talseitigen Abführung des Wassers in den umliegenden Waldbestand erforderlich ist. Die transportierten Sedimente können sich auf diesem Weg ablagern und Barrieren der Entwässerung schaffen. So ist die Funktionalität des Grabens zur Längsentwässerung des Weges durch seine durchgängige Längsneigung Richtung Durchlass (Neigung mindestens 3 % (Kuonen 1983)), die Barrierefreiheit des Wassers und durch sein Fassungsvermögen gekennzeichnet. Auch hier können neben Sedimenten oder allgemein Materialeintrag auch Vegetation die Funktionalität beeinträchtigen. Verschliesst sich der Durchlass oder ist allgemein eine Wasserableitung aus der Längsentwässerung nicht mehr möglich, kommt es bei hohen Wassereinträgen früh zu schwerwiegenden Schäden an der Waldstrasse, was in steilem Gelände zum Abrutschen des Weges durch vollständiges Auflösen der Bindekräfte auch im Unterbau der Strasse führen kann (Begos und Pertlik 2017). Die Dimensionierung von Gräben und Durchlässen sollte daher an die zu erwartende Wassermenge angepasst und aufeinander abgestimmt werden, wobei deren Leistungsfähigkeit im Unterhalt zu überwachen ist.

### 8.1.2 Schadausprägung Geometrie und Oberflächenrauigkeit

Ein Schaden einer Forststrasse kann dann gegeben sein, wenn bei Nutzung der Strasse an den passierenden Fahrzeugen erhöhter Verschleiss entsteht (Faiz und Staffini 1979) oder die Strasse selbst erste Anzeichen aufweist, ihre Funktionalität zu verlieren. Dies ist besonders dann von Interesse, wenn sie dabei einem beschleunigten Verfall unterliegt. Speziell Bereiche, an welchen der vorab beschriebene Wasserabfluss gestört ist, sind dazu zu identifizieren (Begos und Pertlik 2017). Als Schadausprägung können sie unter anderem als Schlaglöcher, Wellenbildung, Spurrillen oder Erosionsrinnen sichtbar werden, wobei ihre Entstehungen auf unterschiedliche Ursachen zurückzuführen sind (Heinimann 1997). Gemeinsam können sie für die Erfassung des Wegezustands als allgemeine Störungen der Fahrbahngeometrie zusammengefasst werden.

Neben der Geometrie einer Forststrasse, kann ebenso ihre Oberfläche, bzw. deren Rauigkeit analysiert werden. Als Ausprägung einer Verschleisserscheinung, zeigten Brown et al. (2003), dass der Strassenzustand über Vibrationen an einem Fahrzeug erfasst werden kann. Bei gröberer Struktur der Fahrbahnoberfläche, ist dabei gleichzeitig von der Erfassung mancher genannter Geometrieparameter auszugehen. Rauigkeit in feinerer Abstufung ist weiter vor allem bei Einbezug weiterer Nutzerinteressen wie Tourismus zu nennen. Die Toleranzgrenze der Oberflächenrauigkeit liegt hier meist tiefer. Marinello et al. (2017) haben dazu Untersuchungen vorgenommen. Mit unterschiedlichen Fahrzeugen konnte die erfasste Rauigkeit über Beschleunigungssensoren und somit auch der Komfort bei einer Überfahrt erfasst werden. Durch eine gleichzeitige Erfassung des Weges als 3D-Punktwolke und definierte

Rauhigkeits- Beschreibungen von Oberflächen (ISO 25178-2 2012) können Strassenoberflächen neben den Vibrationswerten, bei ausreichender Auflösung einer generierten 3D-Punktwolke gleichermaßen beschrieben werden. Anforderungen an die Fahrbahnoberfläche in Bezug auf Nutzungssicherheit durch gebräuchliche Korngrößenverteilungen des Materials in der Verschleisschicht (Arbeitsblatt DWA-A 904 2005) könnten beispielsweise so nachvollzogen werden.

## 8.2 Böschungen

Wichtig für den Erhalt des Weges ist die Sicherung von Böschungen durch den Erhalt stabiler Böschungswinkel. Sind diese nicht passend ausgeformt, kann es talseitig zu Abbrüchen des Weges, bergseitig zu überhöhtem Materialeintrag auf der Fahrbahnoberfläche kommen. Je nach Bausubstrat, also meist umliegender Bodenart, kann hier der bergseitige Böschungswinkel (Einschnittsböschung) bis  $45^\circ$  (1:1) ausgeformt werden, wobei Anschnitte mit  $38^\circ$  (4:5) als Standard gesehen werden (Hafner 1956; Kuonen 1983). Besteht ein Gesteinsanschnitt, oder sind Sonderbauten anzutreffen, können diese Werte auch höher ausfallen (Waas 2019), wobei in der Literatur für Felsanschnitte Böschungsneigungen bis zu  $84^\circ$  (10:1) genannt werden (Kuonen 1983). Die Neigungen talseitiger Böschungen (Auftragsböschungen) werden allgemein tiefer angesetzt. Je nach Geländesituation werden bis zu  $38^\circ$  (4:5) empfohlen (Kuonen 1983).

Durch die Substratabhängigkeit sollte generell eine Geländeansprache durchgeführt werden, um verlässlich einen Ziel- Böschungswinkel vorgeben zu können. Eine Beobachtung dieser Parameter, welche über potenzielles Hanggleiten einer stetigen Veränderung unterliegen, könnte ohne vorgegebene Referenzwerte alternativ über Zeitreihenanalysen realisiert werden.

## 8.3 Umliegender Waldbestand

Neben den bereits erwähnten negativen Effekten aufkommender Vegetation auf dem Wegekörper und im Strassengraben, welche auf den Forstweg wirken, ist ebenso die Überschirmung der Strasse von Bäumen von Interesse. Ein zu dichtes Kronendach kann das Abtrocknen des Wegekörpers verlangsamen und setzt damit in Feuchtperioden die Tragfähigkeit herab (Holzleitner et al. 2020). Es muss angemerkt werden, dass es aber auch gleichzeitig Schutz gegenüber Starkregenereignissen mit häufig einhergehender Oberflächenerosion, speziell im Gebirge an Orten mit erhöhtem Starkregentpotential (Heinimann 1997) dient. Für den laufenden Betrieb ist in jedem Fall die Passierbarkeit des Weges wichtig. Das Lichttraumprofil, als beschreibende Grösse des freigehaltenen Raumes über der Strasse, muss daher dementsprechend unterhalten werden (Abbildung 27). Verschiedene Autoren empfehlen dabei die Strasse auf einer Breite und Höhe von 4.0 m bis 4.5 m (Erb und Tilita AG 2011; Waas 2019) freizuhalten, um berührungsfreie Durchfahrten bei der Holzabfuhr zu ermöglichen.

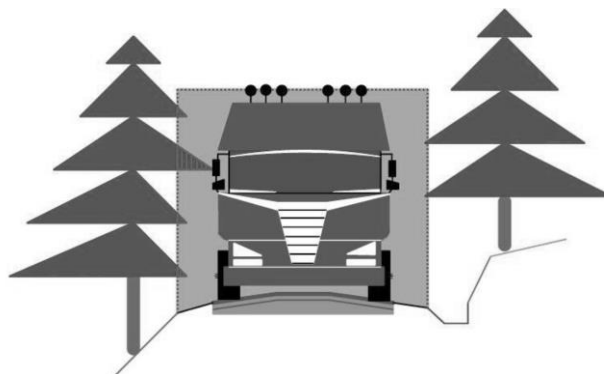


Abbildung 27: Schematische Darstellung des freizuhaltenden Lichttraumprofils in praxisangewandter Grössenordnung (Erb und Tilita AG 2011; Waas 2019) auf einer Breite und einer Höhe von je 4.5 m.

## 9 Messansätze und Eignung

In diesem Projekt wurden zwei Aufnahmegерäte auf Eignung des Einsatzes im Berner Oberland getestet: Die auf Ultraschall basierte «BFH- Messlanze», als auch das Solid-State LiDAR System «Cube1» der Firma Blickfeld. Zusätzlich wurden, um die Messungen mit möglichst realitätsnahen Referenzen zu versehen, Aufnahmen mit einem hochauflösenden terrestrischen Laserscanner (TLS), «FARO® Focus3D X330» durchgeführt.

Da Bauausführungen von Forststrassen historisch und regional stark variieren, können Zielparameter zum Abgleich mit der Realität nur bedingt und mit Vorwissen genutzt werden. Im Folgenden sollen daher für mehrere Bauausführungen gültige Parameter identifiziert werden, welche einen Strassenzustand so beschreiben können, dass sie innerhalb des jeweiligen Messprinzips und darüber hinaus weitestgehend allgemeingültig und direkt dienlich sind und weiterverwendet werden können.

### 9.1 Anwendung der BFH- Messlanze zur Fahrbahnoberflächenanalyse

#### 9.1.1 Hardware der Messlanze

Die BFH- Messlanze besteht aus drei Hauptkomponenten, welche für den Betrieb miteinander kabellos verbunden sind:

- (1) Messlanze mit zentraler Recheneinheit, GPS und Beschleunigungssensoren,
- (2) externer Beschleunigungssensor, montiert am Stossdämpfer des Träger- PKWs und
- (3) Tablet mit Überwachungscockpit zur Visualisierung des Betriebsstatus aller Komponenten, wie auch zur automatischen Datenübertragung (Abbildung 28).



Abbildung 28 : Montage der Messlanze an der Anhängerkupplung eines PKWs zur Erfassung des Querprofils einer Fahrbahnoberfläche (oben) auf einer Breite von 180 cm mittels 5 montierter Ultraschallsensoren im Abstand von 45 cm (unten)

Über die zentrale Einheit, welche mit Ultraschallsensoren ausgestattet ist, wird die Fahrbahngeometrie direkt unter den Sensoren erfasst, wohingegen der externe Beschleunigungssensor Aufschluss über die Oberflächenrauigkeit der Strasse geben soll.

### 9.1.2 Erfassung der Fahrbahngeometrie

Für die Nutzung des Systems wurde zunächst überprüft, ob Störungen der seitlichen Neigung und damit der Wasserableitung des Weges über die Hauptkomponente ausgeschlossen werden können. Hierzu wird vom höchsten Punkt des Weges ausgegangen (Abbildung 29) und die ermittelte Höhe des Weges mit den angrenzenden Höhenmessungen der weiteren Sensoren (S1-S5) verglichen. Die Differenz und das mathematische Vorzeichen zwischen zwei Messpunkten ( $dz$ ) gibt dabei Aufschluss über die relative Höhe und charakterisiert damit die Neigung der Fahrbahn und somit den Weg des abgeführten Wassers zwischen zwei Messpunkten.

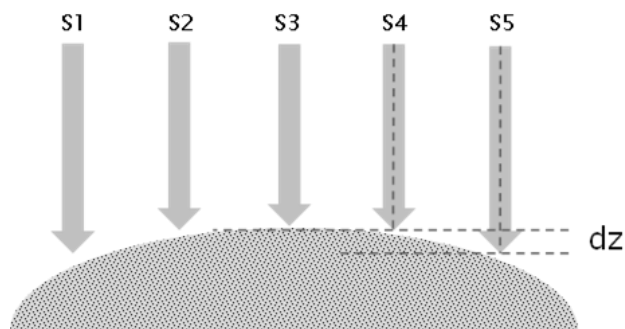


Abbildung 29: Messpunkte und relativer Höhenunterschied zur Ermittlung der Geometrie des Fahrbahn- Querschnittes (Starke et al. 2021)

In einem direkten Vergleich der Geometrien, welche manuell aus 3D- Modellen des Wegekörpers aus TLS Daten abgeleitet wurden und welche aus der Messlanze stammen, konnte in der Testmessung zur Erfassung der Wege- Geometrien des Erschliessungsnetzes des Forstbetriebs Sigriswil keine signifikante Übereinstimmung der Datenquellen gefunden werden. Da diese Erkenntnis früheren Ergebnissen von Messungen aus 2016, durchgeführt auf Forststrassen der Bayerischen Staatsforsten AöR, widerspricht, wurde eine separate Messkampagne gestartet, welche diesen Effekt näher beleuchten soll. Die nachfolgend zusammengefassten Ergebnisse dieser Messung wurden vertieft im Rahmen einer Publikation<sup>3</sup> aufbereitet (vgl. separat Anhang 1).

### 9.1.3 Zusammenfassung der Kampagne zur Überprüfung des Systems «BFH- Messlanze»

Um Aufschluss über den fehlenden Zusammenhang der Ergebnisse der Messsysteme zu bekommen, wurde auf einem 440 m langen Strassenabschnitt einer Schotterstrasse in mehreren Überfahrten die Messlanze getestet. Der Weg wurde in Abschnitte eingeteilt und die dabei abgeleiteten Segmentcharakteristiken mit den hochauflösten TLS Daten verglichen.

Bedingt durch die Messauflösung der einzelnen Sensoren, das Fehlen eines künstlichen Horizontes bei der Messlanze und die niedrige Messfrequenz, wurde in der Überprüfung des Systems nur in 54.3 % der Fälle eine Übereinstimmung der Messergebnisse zwischen Messlanze und TLS Daten erreicht. Diese Größenordnung entspricht auch den Ergebnissen aus Sigriswil, aufgrund derer diese Messüberprüfung initiiert wurde. Filtert man jedoch die Differenz der Profilmesspunkte  $dz$  nach dem relativen Höhenunterschied  $> 4$  cm, können Übereinstimmungen von bis zu 91.2 % erzielt werden. Kritisch ist dabei die verbleibende Anzahl an Beobachtungen zu werten, welche sich im Testaufbau auf unter 10 % reduzierte (Abbildung 30).

<sup>3</sup> Starke, M.; Kunneke, A.; Ziesak, M. Monitoring of Carriageway Cross Section Profiles on Forest Roads: Assessment of an Ultrasound Data Based Road Scanner with TLS Data Reference. *Forests* 2021, 12, 1191, doi:10.3390/f12091191.

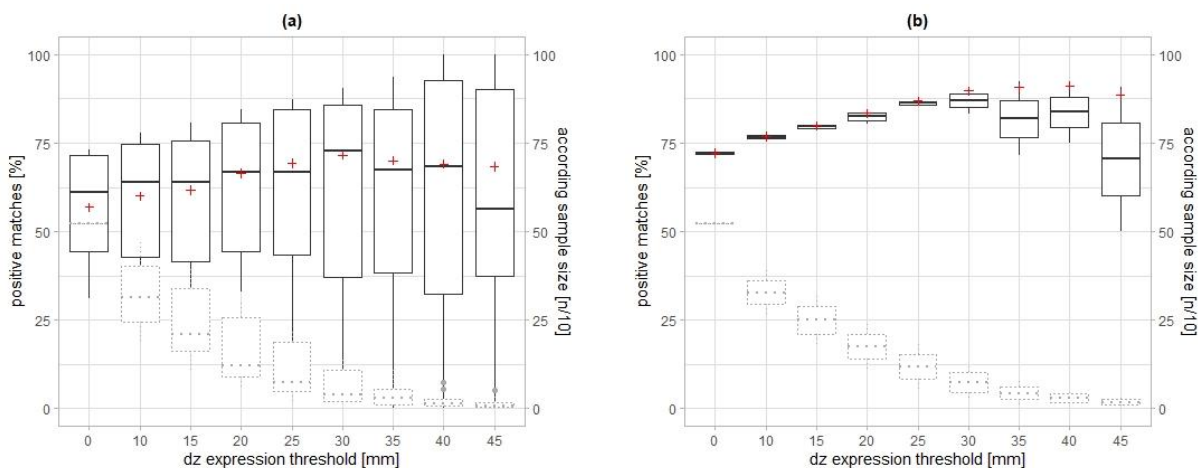


Abbildung 30 : Verschiedene Filtereffekte und Übereinstimmungsprozente zur Abschätzung der optimalen Anwendung der Messlanzentechnik durch Betrachtung von (a) ausschliesslich auf gleicher Höhe liegender Sensorpaare und (b) ausschliesslicher Berücksichtigung der Sensorpaare mit grösstmöglicher Höhendifferenz (Mitte des Weges und Aussenbereich), unter Berücksichtigung der gleichzeitigen Abnahme der Anzahl an Stichprobenpunkten (gestrichelte Boxplots) (Starke et al. 2021)

Dieses Ergebnis deckt sich mit früheren Beobachtungen (Messungen zur KWF Tagung 2016, unveröffentlicht). Durch die intensive Nutzung des Wegepflegegerätes «R 2005» bei den Bayerischen Staatsforsten, werden deutliche Dachprofile ausgeformt, welche sich an der oberen Grenze der Orientierungswerte des forstlichen Wegebbaus befinden (Kuonen 1983; Arbeitsblatt DWA-A 904 2005; Hölldorfer 2007). Dadurch wird ein passiver Filter geschaffen, welcher eine direkte Anwendung des Messlanzen-Systems ermöglicht. Durch Anwendung des Messsystems kann somit ein intaktes Profil bestätigt und unkritische Elemente mit ausgeprägter seitlicher Wasserableitung dokumentiert werden. In Bereichen, in welchen die Geometrie eines Dachprofils weniger deutlich ausgeprägt ist, kann durch zusätzlich angewendete Filter nur in Ausnahmefällen eine Aussage getroffen werden, da bei gleichzeitiger Abnahme der Stichprobendichte keine Informationen gesammelt werden können. Es muss damit auf diesen Bereichen immer von einem gestörten Dachprofil ausgegangen werden.

#### 9.1.4 Fazit zur Nutzung der BFH- Messlanze

Technische Einschränkungen des Systems machen es aktuell schwierig es in eine geeignete Anwendung zu bringen, Datenreihen zu generieren und darauf ein Wegemonitorings- Konzept aufzusetzen. Für einseitig geneigte Wege oder schwach ausgeprägte Dachprofile, wie sie beim Partner-Forstbetrieb des Projektes vorgefunden werden konnten, zeigt sich das System als aktuell ungeeignet (vgl. Starke et al. 2021). Durch die Bauausführung des Messsystems und die damit einhergehende Erfassung des Weges auf limitierte 1.8 m Breite, fehlen schon bei der Erfassung der Fahrbahn wichtige Informationen zu Sekundärerosion ausserhalb des Grabens (Kuonen 1983), was v.a. im Gebirge eine wichtige Grundinformation darstellt.

Im Projekt wurde daher der Fokus auf den Einsatz von LiDAR Sensoren gelegt, welche neben der vollständigen Überwachung der Strasse auch eine Erfassung des angrenzenden Raumes neben der Strasse ermöglichen. Für die Anwendung wurde das Stichproben- Messkonzept der Messlanze auf LiDAR Punktwolken übertragen, was innerhalb der Überprüfung der Messgenauigkeit auf TLS-Daten vorgenommen wurde.

## 9.2 Nutzung von Industrie-LiDAR Sensoren zur Echtzeiterfassung des Strassenzustandes

### 9.2.1 Hardware des Solid-State LiDAR System «Cube1»

Das System Cube1 der Firma Blickfeld<sup>4</sup> unterscheidet sich von LiDAR Systemen wie dem verwendeten Focus 3D X330 des Herstellers FARO®, oder dem hochauflösenden portablen Laserscannern ZEB Horizon der Firma GeoSLAM darin, dass es als echtzeitfähiges System für industrielle Anwendungen aufgebaut wurde. Durch die verwendete Solid-State Technologie werden hohe Messfrequenzen erreicht, was gute Voraussetzungen für einen Einsatz in Bewegung verspricht. Bei einer Auflösung des Scanners, zwischen 56 und 230 Zeilen, sind in der Voreinstellung Messfrequenzen von auflösungsabhängigen 2.3 Hz bis 9.6 Hz wählbar. Die zugrundeliegende geringe Datenrate und das dabei bereitgestellte Datenformat ermöglicht so grundsätzlich ebenso die Echtzeitverarbeitung der Daten ohne dauerhafte Datenspeicherung. Die Scandistanz des Systems beträgt 5 – 75 m, bei neueren Versionen kann ebenso der Nahbereich ab 1.5 m erfasst werden. Mit der verwendeten Hardware ist bei 200 Scanlinien eine Auflösung von mind. 1.3 cm (0.15° bei 5 m) zwischen den Scanlinien an der Grenze des Nahbereichs gegeben.

Die gleichzeitige Geolokalisierung und Darstellung auf der Karte als auch ein GPS-Signal werden vom Hersteller nicht proprietär bereitgestellt. Die Verortung des Scans, als auch die Erstellung einer grösseren 3D Punktwolke eines längeren Forststrassenabschnittes sind deswegen nicht direkt und nur bei manueller Dokumentation der Aufnahmen möglich. Daher muss zunächst in «Szenen» gearbeitet werden. Eine Szene repräsentiert dabei einen Durchlauf der vollständigen Erfassung des Scanbereichs, welche in der genannten Messfrequenz ausgelesen werden kann. Das Auswerte- Prinzip lässt sich so im Post-Processing verifizieren und später in eine Echtzeitauswertung übertragen.

### 9.2.2 Messaufbau bei Durchführung der Feldaufnahmen

Für den Betrieb des Systems muss der Scanner mit einem PC verbunden und mit Strom versorgt werden, wobei Zweites bei neueren Scanner-Versionen ebenfalls über den PC («power over ethernet») erfolgt. Für die Feldaufnahmen wurde das vollständige System im Kofferraum eines Transporters aufgebaut (Abbildung 31) und über die KFZ-Stromversorgung betrieben. Die Scanrichtung ist dabei entgegen der Fahrtrichtung vorgegeben und der Scanner auf den Mittelpunkt der Strasse ausgerichtet.



Abbildung 31: (a) Messaufbau zur Anwendung des Cube 1 aus dem fahrenden PKW, montiert auf einem Stativ mit (b) Detailansicht mit Echtzeitdarstellung des Scanbereichs

<sup>4</sup> <https://www.blickfeld.com/de/produkte/cube-1/>

Bei der Messung wurde in den Voreinstellungen die Einstellung mit der höchsten Punktdichte (230 Scanlinien) gewählt. Um die Sichtbarkeit der auszuscheidenden Parameter zu erhöhen, mussten die Scans zu einem späteren Zeitpunkt von einer Punktwolke in eine Mesh- Darstellung überführt werden, damit fokussierte Parameter sichtbar gemacht werden konnten (Abbildung 32).

In einem ersten Schritt wurden statische Messungen durchgeführt und zur Überprüfung der Datenqualität nach Bedarf mit TLS Scans des FARO Focus 3D verglichen.

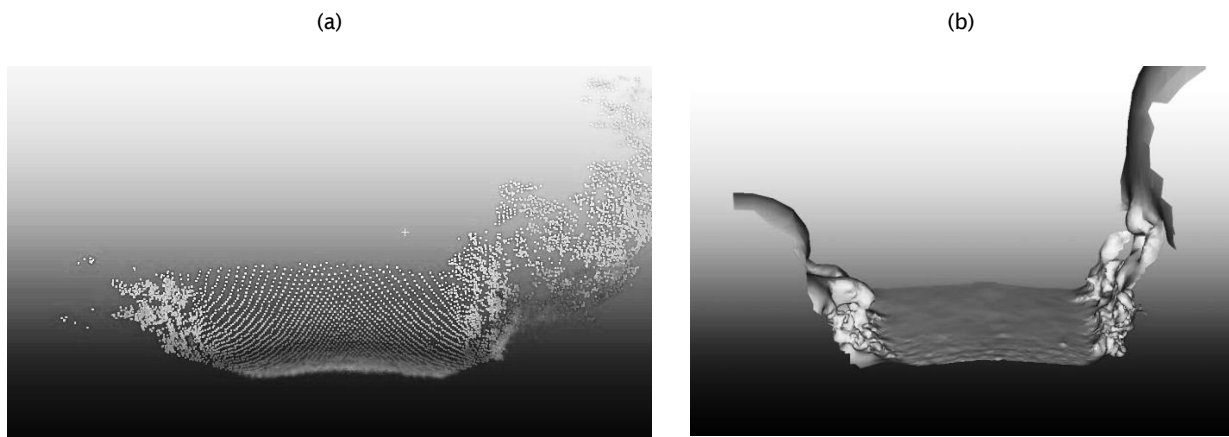


Abbildung 32: (a) Auflösung einer 3D Punktwolke der Aufnahme der Strassenoberfläche mit dem Scanner Cube 1 und (b) Nutzung einer aufbereiteten Darstellung mit geschlossener Oberfläche für bessere Sichtbarkeit der ausgeschiedenen Parameter innerhalb eines Szenenausschnitts.

## 9.2.3 Kriterienkatalog zur Beurteilung und Überprüfung der Anwendung des Cube 1

### 9.2.3.1 Scanausschnitt und Erfassung der Fahrbahn

Für die Auswertung der Scandaten wird der Nahbereich des Scans ausgewertet, in welchem mit der höchstmöglichen Punktdichte gearbeitet werden kann. Bei der Beurteilung der Fahrbahn kann wie eingangs beschrieben Wert auf die Geometrie der Strasse, als auch deren Oberflächenrauigkeit gelegt werden.

Für die Beurteilung der Fahrbahngeometrie wurde eine Scanszene auf eine Strassenbreite von 5.2 m (x-Richtung) und eine Tiefe (y-Richtung) von 50 cm limitiert und in 9 (zu Testzwecken teilweise in 7), 10 cm breite Stichprobenpunkte aufgeteilt (Abbildung 33).

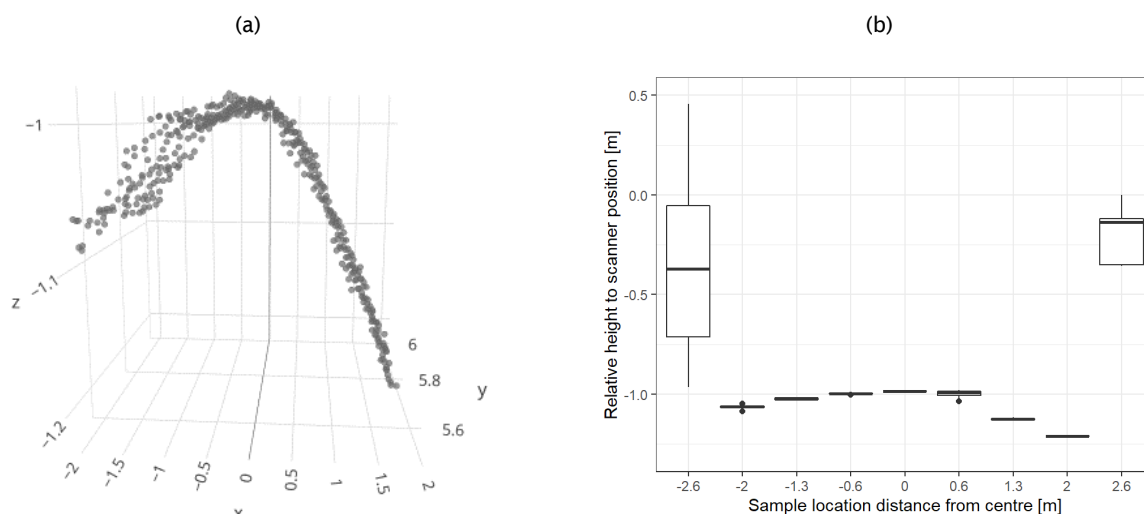


Abbildung 33: (a) Darstellung der berücksichtigten Punktwolke und (b) zugehörige Stichproben- Clustering zur Analyse eines Strassensegmentes hinsichtlich seiner geometrischen Funktionstüchtigkeit der Wasserableitung auf der Fahrbahn.

Ausgehend vom höchsten Punkt der Fahrbahn wird für eine Bestätigung eines intakten Profils die Durchgängigkeit der Wasserableitung in Richtung Strassengraben ausgewertet. Dabei werden bis zu vier Stichproben in einer Reihe miteinander verglichen.

Kritisch zeigten sich bei der Anwendung der Methode die Wahl der Tiefe des Wegesegments, und die Abgrenzung der Strasse von Graben und Böschung. Bei zu gross gewählten Wegesegmenten kann dabei eine schadhafte Stelle auf dem Wegesegment von Messpunkten einer tieferen Ebene in y-Richtung überlagert werden. Gerade bei Grenzsituationen einer Schadausprägung (Abbildung 34, a), kann dies zu Problemen der Beurteilung führen. Die gewählte Breite der Fahrbahn ist insbesondere wichtig, um Fahrspur und Graben voneinander trennen zu können. Die Fahrbahnbegrenzung wird in der Zustandsbeurteilung daher von eindeutigen, signifikanten Wechseln der Geometrie im Randbereich der Fahrbahn definiert. Wechselt dieser Bereich erneut, muss von einer Erosionsstelle ausgegangen werden. Ist kein eindeutiger Graben sichtbar (Abbildung 34, a, b), ist eine Zustandsbeurteilung ohne weitere Information kaum möglich.

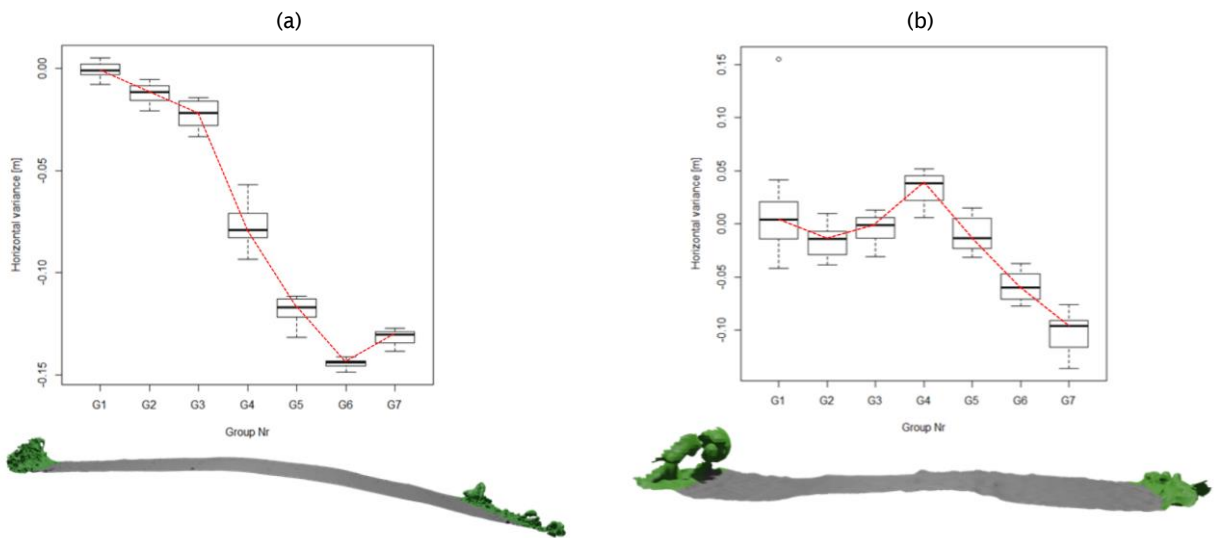


Abbildung 34: Zu diskutierende Bereiche der Qualitätseinstufung nach dem Stichprobenprinzip. (a) Darstellung eines potenziell ungestörten Wegeprofils mit erkannter einseitig Wasserableitung im Grenzbereich der Erfassung und (b) Situation undefinierter Wasserabführung durch fehlenden Graben

Zur Erfassung der Oberflächenrauigkeit konnte bei der Beurteilung des Nahbereichs keine abschliessende Aussage in der Anwendung des «Cube1» getroffen werden. Abbildung 35 zeigt den hochauflösenden Bereich des Cube- Scans im Nahbereich der ersten 50 cm, im Vergleich mit hochauflösenden Daten des terrestrischen Laserscanners. Hier wird deutlich, dass durch die allgemein geringere Punktdichte des Scanners Information verloren geht und damit feinere Unterteilungen, wie von Marinello et al. (2017) gezeigt, als Ergänzung zur Analyse der Geometrie wenig Mehrwert versprechen.



Abbildung 35: Vergleich von Strassengeometrie und Erfassung der Oberflächenrauigkeit. (a) Darstellung eines Scans des Cube 1 und (b) des Focus 3D in Mesh- Ansicht

### 9.2.3.2 Graben

Der Übergang zwischen Fahrbahn und Graben wurde in der Abgrenzung zur Fahrbahn als signifikante Änderung der Geometrie im Randbereich der Fahrbahn definiert.

Für eine allgemeine Ansprache des Grabens wird anstelle einer Ausmessung der Dimensionierung die generelle Existenz eines Grabens und Hinweise auf sekundäre Drainagesituationen gelegt. Typische Ausprägungen sind über die Geometrieansprache erkennbar (Abbildung 36). Der Übergang in den Böschungsbereich ist fließend.

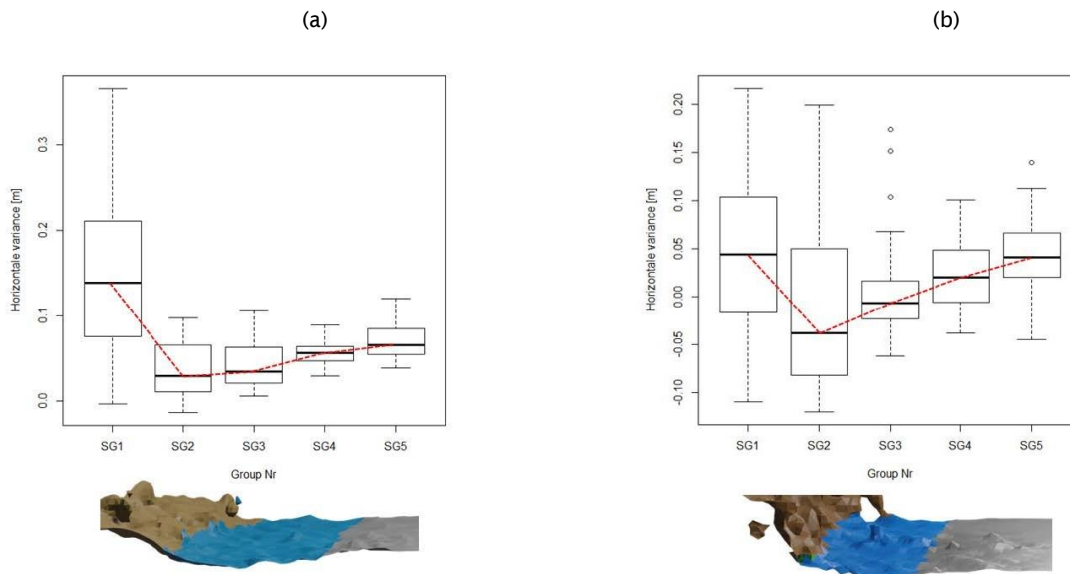


Abbildung 36: In Sigriswil vorgefundene Stichprobensignatur zweier schwach ausgeformten Spitzgräben als typische Ausprägung mit (a) geringer Neigung in Richtung Graben und (b) Einfluss von Vegetation im Grabenbereich durch seitliches überwachsen.

Für eine Beurteilung der Dimensionierung des Grabens, wurden weiter verschiedene theoretische Strassenquerprofile mit einem Wegeneubau verglichen. Abbildung 37 zeigt dabei, dass eine aus Anwendersicht intakte Ausformung eines Spitzgrabens selten den stark variierenden geometrischen Vorgaben der Theorie entspricht. Diesem Effekt muss daher im Einzelfall begegnet werden, um Gründe für die rein konstruktiven Abweichungen zu finden. Sind Abweichungen nicht begründbar, stellt sich an dieser Stelle durch die objektive Betrachtung bereits ein Vorteil der automatisierten Vermessung der Strassenkomponenten dar.

Im Untersuchungsgebiet waren Strassengräben jedoch meist durch Vegetation beeinträchtigt. Da keine separate Ausscheidung von Vegetation vorgenommen werden konnte, wurde die Dimensionierung von Gräben zunächst nicht berücksichtigt, um Falschklassifizierungen zu minimieren.

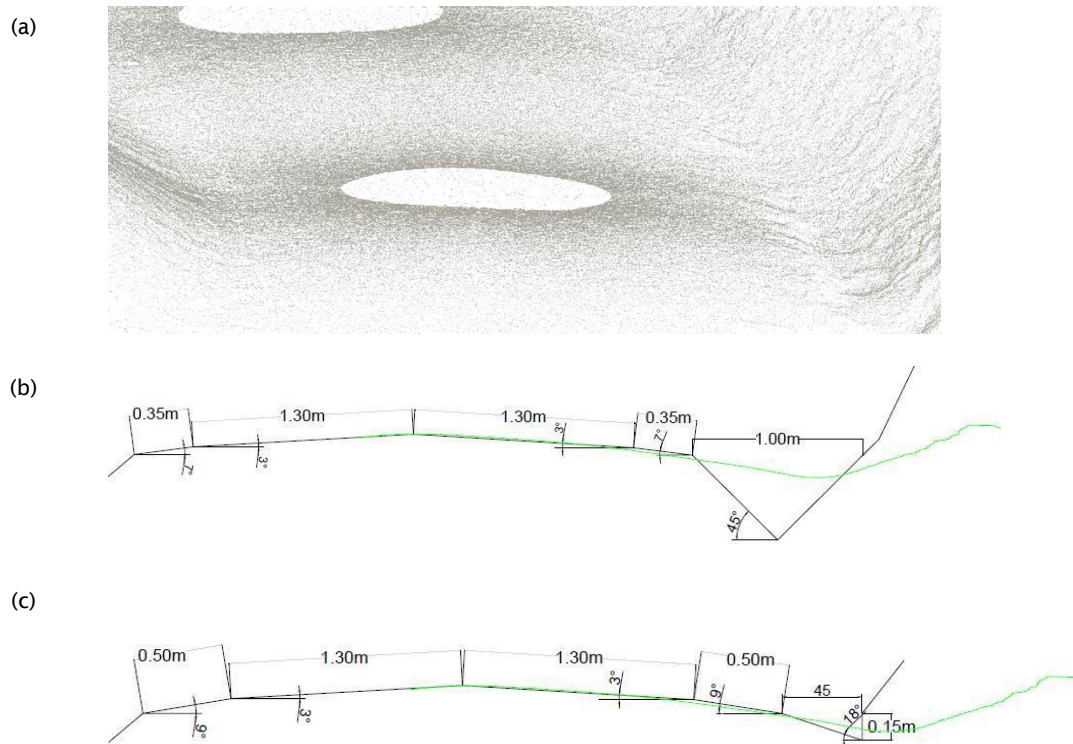


Abbildung 37: CAD- Modell Vergleich eines FARO® TLS Scans (a) eines üblich ausgeformten Spitzgrabens an einer Forststrasse des Forstbetriebs der Burgergemeinde Bern in Übereinstimmung mit Normparametern (b) nach dem Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt, 2009), (c) eines gepflasterten Spitzgrabens nach Hafner (1956)

Ebenso eingeschränkt ist die Auswertungsmöglichkeit der Stetigkeit der Längsneigung des Grabens. Hier wird deutlich, dass eine einfache Vermessung aus den Scandaten in der genutzten Methode und der limitierten Information in y-Richtung nicht möglich ist. Durch die konstante, relative Höhe des Scanners zur Strasse werden Längsneigungen nicht erfasst, da das Referenzsystem mit der Messung mitwandert. Die Szenenbetrachtung verhindert weiter die Abbildung der Strasse über längere Abschnitte, wodurch keine Referenzpunkte oder absolute z- Koordinaten eingebunden werden können. Die Einbindung der Höhenkoordinate aus einem hinzugefügtem GPS- Signal könnte einen Lösungsansatz darstellen.

### 9.2.3.3 Lichtraumprofil

Als letzter Parameter wird das Lichtraumprofil in der Zusammenstellung der Strassen-Beurteilungskriterien berücksichtigt. Dabei wurde zunächst getestet, ob die geringe Punktdichte des mobilen Scanners eine genügend hohe Punktdichte aufweist, um in die Fahrbahn reichende Zweige zu erkennen. Die dabei ermittelte Höhe über der Fahrbahn auf einer Breite von 4 m wird berücksichtigt und Beeinträchtigungen ausgeschieden. Im belaubten Zustand (Zeitpunkt der Feldmessungen) konnte die grundsätzliche Erfassung dieses Parameters bestätigt werden.

In der Auswertung wird der Scan über einen horizontalen Schnitt in 2 Teile zerlegt und Fahrbahn und Lichtraumprofil gesondert analysiert.



Abbildung 38: Visuelle Gegenüberstellung der Erfassung des Lichtraumprofils zur Beurteilung der Passierbarkeit der Strasse zwischen (a) Blickfeld Cube 1 und (b) FARO® Focus 3D Scans.

## 9.3 Test der automatischen Auswerteroutine mit Qualitätseinwertung

### 9.3.1 Klassenausscheidungen

Die Beurteilung des Strassenzustandes mit dem Blickfeld Cube1 wird mit folgenden Parametern vorgenommen, welche im Zuge der Anwendung näher erläutert werden:

- Geometrische Beurteilung: Geom\_Quality, (1= good, 2= bad)
- Verortung der Schadstelle: Issue [m from centreline], (in m)
- Graben: Ditch [side], (left, right)
- Lichtraumprofil- Beeinträchtigung: Clearance [height], (in m)
- Lichtraumprofil- Beeinträchtigung: Clearance [m from centreline], (in m)

Die Testmessungen in Bewegung wurden auf Strassen des Forstbetrieb Sigriswil durchgeführt. Hierzu wurde ein Wegeabschnitt gewählt, in welchem ebenso Teile der GPR-Messkampagne durchgeführt wurden. Der Weg wurde in 5 Abschnitte unterteilt, wovon Abschnitt 2 und 5 den Abschnitten der GPR-Messungen entsprechen (Abbildung 41), Abschnitt 1 ein neu Instand gesetztes Wegesegment, bzw. 3 und 4 Wegesegmente durchschnittlicher Qualität beinhalteten. Im Zuge der Aufnahme wurden so für das Post-Processing 2 GB an Daten, in 1740 Szenen zwischengespeichert und analysiert.

Die Szenen wurden im Anschluss automatisch über einen Programmcode analysiert, wobei eine Segment- Klassifizierung vorgenommen und grafisch als auch in Tabellenform ausgegeben wurde. Für die verschiedenen Klassen wurde schliesslich die Klassifizierung zusammen mit der zugehörigen 3D-

Punktwolke der jeweiligen Szene verglichen, um mögliche Abweichungen von der Zielausscheidung zu identifizieren.

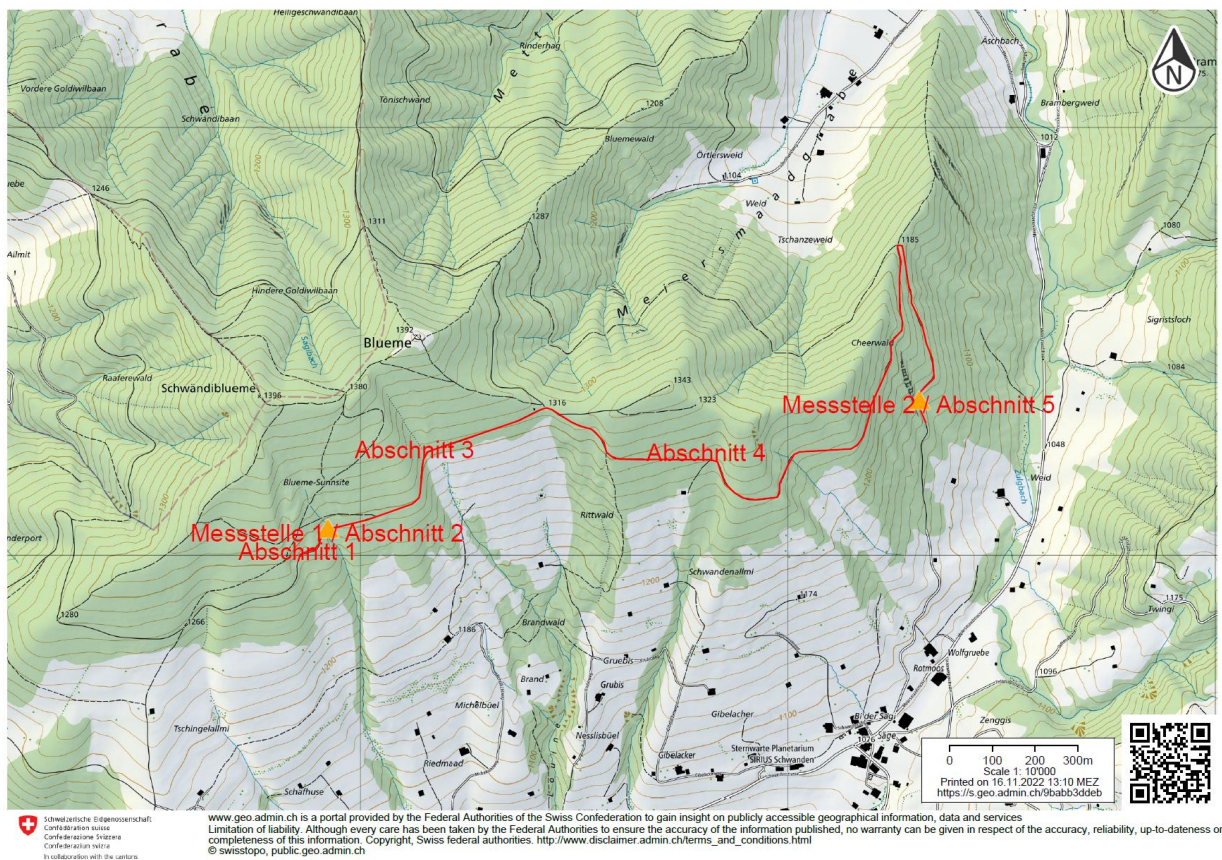


Abbildung 39: Test- Wegesegmente auf einer Länge von insgesamt 2.6 km zur Überprüfung der Anwendbarkeit der Cube-Auswertealgorithmen (Darstellung: Swisstopo)

### 9.3.2 Anwendung der automatischen Klassifizierung und Ergebnisse

Bei der Analyse der einzelnen Szenen wird die Fahrbahn vom höchsten Punkt ausgehend betrachtet. Wird eine Änderung der Wasserableitung erkannt, welche sich keiner Böschung anschliesst, wird die Geom\_Quality «2» ausgeschieden. Fehlende Stichprobenwerte innerhalb der Fahrbahn werden als ungültige Datensätze «invalid data» beurteilt. Ist der höchste Punkt der Fahrbahn um mehr als 1.3 m von der Mitte der Fahrbahn verschoben, so wurde er in dieser ersten Beurteilung als «asymmetric» deklariert.

Tabelle 8 : Klassifizierung « Geom\_Quality » der Wegesegmente auf Höhe der Messstelle 1.

	Geom_Quality	Issue [m from centreline]	Ditch [roadside]	Clearance [m]	Clearance [m from centreline]
41	1	NA	right	NA	NA
42	asymmetric	NA	NA	NA	NA
43	asymmetric	NA	NA	NA	NA
44	invalid data	NA	NA	NA	NA
45	1	NA	right	NA	NA
46	1	NA	right	NA	NA
47	1	NA	NA	NA	NA
48	1	NA	NA	NA	NA
49	1	NA	right	NA	NA
50	1	NA	right	NA	NA
51	1	NA	right	NA	NA

Für die gesamte Beurteilung des der GPR Messung «Messstelle 1» entsprechenden Wegesegments, ergibt sich daraus ein Gesamtbild der Qualitätsansprache (Abbildung 40), dargestellt als einzelne Szenen. Es konnten bei der Anwendung des Konzepts keine Einschränkungen der Strassenqualität erkannt werden. Am Anfang und am Ende der Messung fallen Bereiche auf, in welchen das Messpersonal den Laserscanner abschirmte, wodurch ungültige Datensätze entstanden. Die in Abbildung 41 gezeigten Beispiele zeigen zwei Besonderheiten der Querprofile auf: zum einen kann der höchste Punkt des Weges von der Mittellinie abweichen, was für unvollständig erfasste Querprofile die Einwertung als ungültigen Datensatz zur Folge hat (a) zum anderen, dass seitliche Abschattungen ungültige Datensätze produzieren (b).



Abbildung 40: Qualitätsansprache des Wegesegments "Messstelle 1" (Abschnitt 2), Fahrtrichtung von links nach rechts mit den Variablen Geometrische Qualität 1 (gut), asymmetrisches Wegequerprofil und der Kennzeichnung ungültiger Datensätze.

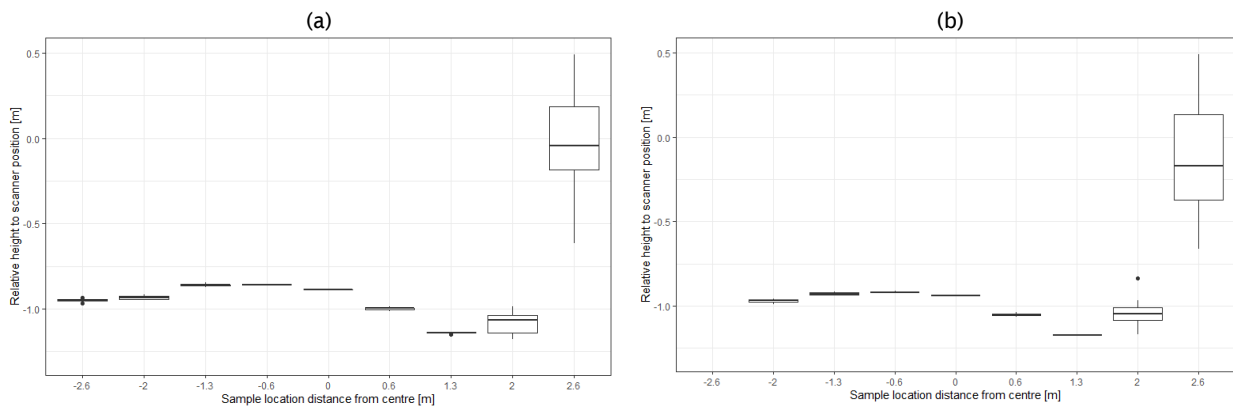


Abbildung 41: (a) Darstellung des Profils Nr. 43 mit zum Sample -1.3 m verschobenem Dachprofil und (b) des Profils Nr. 44 als ungültiger Datensatz durch Fehlen von Daten im Bereich -2.6 m und somit keine gültigen 4 Stichproben in eine Richtung, ausgehend vom höchsten Punkt und einem zentralen Dachprofil bei -0.6 m

In der Messung von Abschnitt 4 konnten als nächste Klassifizierung gestörte Dachprofile der «Geom\_Quality 2» identifiziert werden. In Abbildung 42 sind verschiedene Beispiele der dort erkannten Störungen im seitlichen Wasserablauf aufgeführt. Das Schadbild (b) zeigt dabei die zu erwartete, erste Eintiefung bei normaler Spurbreite eines PKWs - 1.3 m vom Zentrum des Weges auf. Die weiteren Ausprägungen zeigen, dass vielerorts Absenkungen der Strasse nahe dem höchsten Punkt der Wegegeometrie verortet sind (a, c). Eine deutliche Abgrenzung zwischen Gräben und des tieferen Punktes auf der Wegeoberfläche kann hier einen Grund darstellen, warum gerade diese Situationen häufiger auftreten.

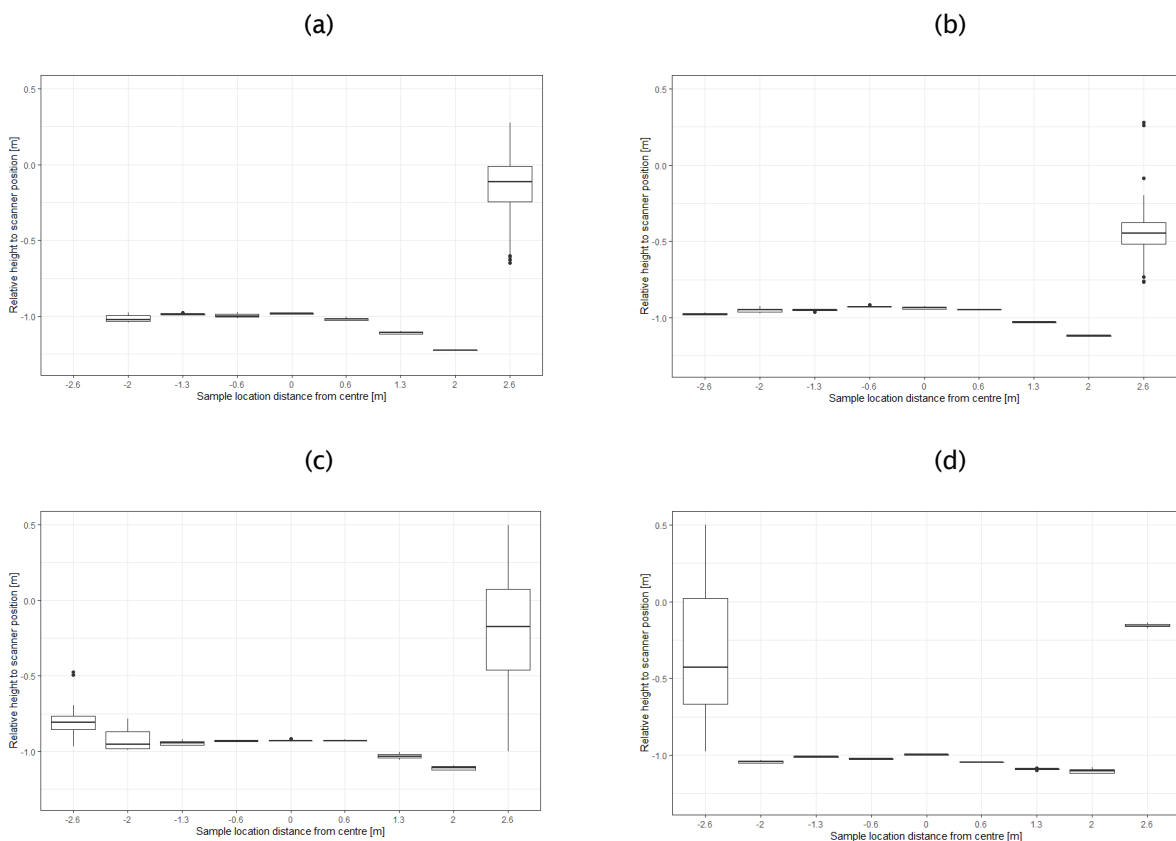


Abbildung 42: Störungen des Regelquerschnitts auf unterschiedlichen Segmenten (a-d) in unterschiedlicher Ausformung und Stärke an Position (a) -0.6 m, (b) -1.3 m, (c) 0 m und (d) - 0.6 m in stärkerer Ausprägung.

Auf Höhe der Messstelle 2 kann in direktem Vergleich mit einer hinterlegten, hochaufgelösten Referenzmessung (Abbildung 43) weiter ein optischer Eindruck gegeben werden, wie sich Spitzgraben und Stellen einer potenziellen sekundären Erosion in das Gesamtbild der Klassifizierung einordnen. In dem dargestellten Beispiel wird eine Grabensituation deutlich, welche sich aber ebenso als potenzielle Erosionssituation einordnen liesse. Die Software erkannte jedoch keine dieser Punkte, da die Asymmetrie des Weges bisher keine weitere Unterscheidung zulässt.

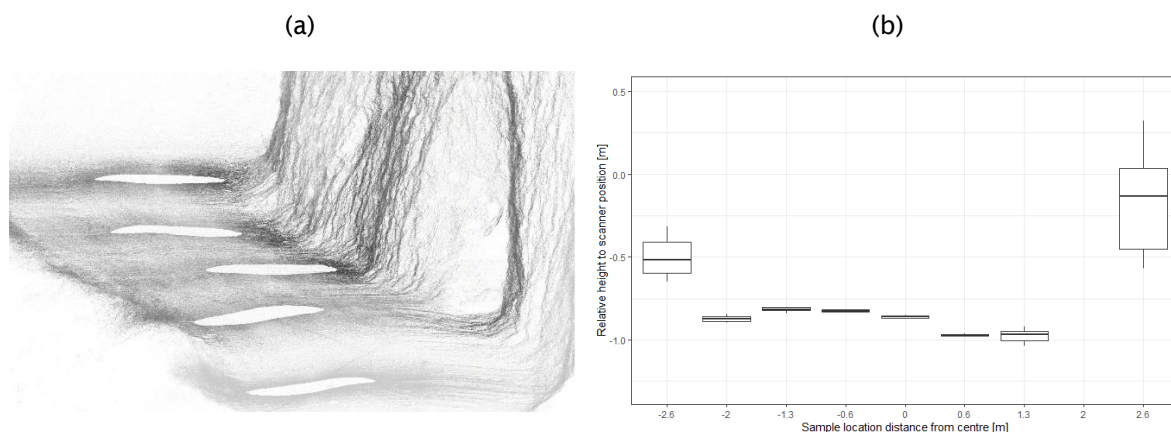


Abbildung 43: FARO- Scan des Abschnitts 5 (Messstelle 2) zur Darstellung eines bedingt eingeschränkten funktionalen Spitzgrabens als auch die teilweise (a) aufscheinende sichtbare erkannte Absenkung am oberen linken Ende des Scanabschnitts ohne schlechte Einstufung des Wegesegments in der (b) geometrischen Auswertung trotz Gefahr eines Oberflächenabflusses auf der Fahrbahn (gespiegelt).

Die Vermessung des Lichtraumprofils brachte indes auf keinem der Messabschnitte Ergebnisse. Dabei muss angemerkt werden, dass auf dem betrachteten Wegeabschnitt das Lichtraumprofil eine eher untergeordnete Rolle spielte. Durch die Aufnahme weiterer Situationen könnte dieses Element für dynamische Messungen näher betrachtet und die Robustheit der Ausscheidung weiter getestet werden.

## 10 Diskussion Messkampagne LiDAR

Mit dem Solid State LiDAR System Cube 1 war es gegenüber der Messlanzentechnik möglich, die Fahrbahngeometrie auch bei geringerer Dachprofilausprägung zu beurteilen und auf längeren Streckenabschnitten dynamisch anzuwenden. Durch den Messaufbau konnte eine Strecke beliebiger Länge gescannt und automatisch als einzelne Wegesegmente fortlaufend ausgewertet werden. Für eine weitere Einbindung des Systems für die Strassenzustandsermittlung ist es erforderlich, wie bei dem Messsystem «Messlanze» die Position des jeweils betrachteten Scans gleichzeitig zu verorten und mit in die Evaluierung einzubinden. Dadurch wird auch der Grad der Überprüfbarkeit der dynamischen Messung erhöht, was in dieser Studie zu Einschränkungen der Anwendung führte.

Als gut geeignet zeigte sich das System bezüglich der Qualität und Performanz der Beurteilung des Strassenquerprofils über gezogene Stichprobenpunkte. Alle kontrollierten Szenen- Klassifizierungen konnten nachvollzogen und dabei meist bestätigt werden. Die Unterscheidung zwischen den konstruktiven Elementen war dabei nicht immer gesichert, was aber meist der hohen Variabilität der von der Theorie abweichenden Querprofile zu Grunde liegt. Als Folge wurden kritische Übergangsbereiche zwischen intaktem Graben und ersten Anzeichen einer sekundären Drainage nicht eindeutig unterschieden. Zur Verbesserung des Systems könnte, z.B. über Mindeststrassenbreiten, die Plausibilitätskontrolle weiter verfeinert werden. Sehr vielversprechend zeigen sich ebenfalls Ansätze des maschinellen Lernens zur Differenzierung zwischen konstruktiven Komponenten (Pirker und Pirolt

2021) oder zur direkten Identifikation von Schadstellen (Starke und Geiger 2022), welche in parallelen Studien mit abweichender Datengrundlage und höherer Scanauflösung oder über optische Sensorik angewendet wurden.

## 11 Folgerungen und Ausblick

Wie in Teil 1 aufgezeigt wurde, hat GPR das Potential den Schichtaufbau von Forststrassen zerstörungsfrei zu ermitteln und bietet dazu in Zukunft einen Mehrwert. Mit der SFCW-Technologie können Schichtstärken meist zuverlässig erkannt werden, was mit einer Frequenz beim FMCW-GPR nicht immer möglich war. Vor allem die Abdeckung eines grossen Frequenzbereichs hat sich als Vorteil zur Erkennung von Schichten in verschiedenen Tiefen erwiesen. Die FMCW-Technologie eignet sich je nach Frequenz für die Erkennung unterschiedlich tief liegender Schichten. Eine Kombination verschiedener Frequenzbereiche ist möglich (bspw. Sensors & Software Inc. 2022) und könnte die Interpretation der Resultate erleichtern. Für eine effiziente Anwendung auf Betriebsebene ist eine Teilautomatisierung der Datenbearbeitung erforderlich. Derzeit sind noch viele manuelle, zeitintensive Schritte notwendig, die ein gutes Systemverständnis erfordern, um zweckmässig eingesetzt werden zu können.

Zur Bestimmung der verwendeten Materialien ist GPR nicht einsetzbar. Der Tragfähigkeitsbeiwert der verwendeten Materialien muss weiterhin optisch bestimmt werden. Dies ist bei einem zweischichtigen Strassenaufbau (Deckschicht und Tragschicht) mit geringem Aufwand möglich, bei mehrschichtiger Bauweise ist weiterhin die Anwendung eines destruktiven Verfahrens erforderlich. Die Tragfähigkeit kann folglich, vor allem bei mehrschichtigem Strassenaufbau, genauso aber auch bei der Verwendung stabilisierender Materialien, nicht zerstörungsfrei nachgewiesen werden. Für neuere Entwicklungen wie das Geogitter müssten Abklärungen erfolgen, wie stark sich diese auf den Stärkenindex SN auswirken. Die erstellte Berechnungshilfe kann für die Beurteilung der Tragfähigkeit von bestehenden Strassen (mit oder ohne Nutzung von GPR-Daten) unter Berücksichtigung der genannten Punkte genutzt werden.

Für die objektive Erfassung des Zustands einer Forststrasse wurde die Diskrepanz zwischen praxistauglicher Datenerfassung und Zeit / Kosten, bzw. Qualität der Aufnahme deutlich. Der Sprung von der projektbezogenen Analyse von Strassensegmenten, was mit gegenwärtiger Software und terrestrischen und mobilen Laserscans möglich ist, hin zu automatisierter Zustandsbeurteilung weitreichender Strassennetzwerke, birgt verschiedene Schwierigkeiten. Durch das Verwerfen des Konzeptes «Messlanze» war eine Übertragung der Auswertemethodik zur Beurteilung von Strassenprofilen erforderlich. Die Auswertemethodik von Starke et al. (2021) konnte auf die genutzte, niedrigpreisige Solid-State LiDAR Technik angewendet und erweitert werden. Ist es weiter möglich, die für die Studie analysierten Einzelszenen mit einer GPS- Position zu verknüpfen, was innerhalb des Studienzeitraums nicht durchgeführt werden konnte, steht mit diesem Messaufbau ein Monitoring-Konzept zur Verfügung, welches für ein Wegeunterhaltskonzept innerhalb eines Forstbetriebs genutzt werden könnte. Durch die in dieser Studie vorbereitete und für weitere Entwicklungen angestrebte Echtzeitauswertung der aufgenommenen Daten ist es mit diesem Ansatz nicht nötig grosse Datenmengen vorzuhalten. Die Datenspeicherung grosser Datenmengen erweist sich in Forstbetrieben oftmals als schwierig, was für die Praxisnähe dieser Entwicklung spricht.

## 12 Dank

Zur erfolgreichen Durchführung des Projekts unter durch Covid erschwerten Bedingungen haben verschiedene Personen einen wichtigen Beitrag geleistet. Dem Forstbetrieb Sigriswil wird für die tatkräftige Unterstützung bei der Erstellung der Testprofile und den Rasteraufnahmen gedankt.

Der Firma Sensors & Software Inc. wird für die zur Verfügung gestellte GPR-Technologie sowie den technischen Support bei Fragen zur Datenauswertung gedankt. Dank geht ausserdem an die Firma Screening Eagle -proceq, welche Tests mit einer zusätzlichen GPR-Technologie ermöglichten.

## 13 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Darstellung der Frequenzänderung über die Zeit bei FMCW-GPR (links) und SFCW GPR (rechts) (nach Wolff 2015, verändert)	8
Abbildung 2: Möglichkeiten der Signalübertragung zwischen Sender und Empfänger (nach Annan 2003, verändert)	8
Abbildung 3: GPR-Daten ohne zeitliche Filterung (links) resp. nach Entfernen der niederfrequenten Signale (rechts) (Sensors & Software Inc. 2021a)	9
Abbildung 4: Prinzip der zeitabhängigen Verstärkung (Annan 2003)	9
Abbildung 5: GPR-Aufnahme ohne Hintergrundsubtraktion (links) resp. mit Hintergrundsubtraktion (rechts) (Annan 2003)	10
Abbildung 6: Reflexion eines Punkt-Objektes (links), Übergang zwischen zwei Materialien mit unterschiedlicher Leitfähigkeit (rechts unten) und Darstellung der Signalform (rechts oben), welche die Reflexion erklärt (Johnston 2018)	10
Abbildung 7: Für das Projekt verwendete FMCW-GPR-Hardware (Sensors & Software Inc. 2021b, verändert)	11
Abbildung 8 : Geschwindigkeitskalibrierung mit hyperbolischer Anpassung (Sensors & Software Inc. 2021d)	12
Abbildung 9: View Toolbar-Menü Verstärkung / Filter. Links: Eingabe-Parameter. Rechts: Signalspur des GPR-Signals als Schlangenlinie am Punkt, an dem sich der Maus-Cursor gerade befindet (Fadenkreuz). Angezeigt werden können die Rohdaten, prozessierten Daten und die Verstärkung (Sensors & Software Inc. 2021d)	13
Abbildung 10: GS 8000 von Screening Eagle (Screening Eagle 2022, verändert)	14
Abbildung 11: Aufbau der GPR-Messkampagne	15
Abbildung 12: GPR-Scan eines Strassenabschnitt mit Metallrohr (roter Punkt) in EKKO_project (oben) und R (unten)	16
Abbildung 13: Fotos vom Aushub und der Vermessung von Profil 2	17
Abbildung 14: 500 MHz GPR-Aufnahmen Profil 2 Kiesgrube Meiersmaad. Oben: Erkennbare Metallplatten nach 1m und 2m. Unten: Eingezeichnete Grenze zwischen Tragschicht und Untergrund	18
Abbildung 15: 1000 MHz GPR-Aufnahmen Profil 2 mit deutlich erkennbarer Trag- und Deckschicht, Markierung der Metallplatten und Nachhall der Metallplatte zur Markierung der Grenze zwischen Deck- und Tragschicht	18
Abbildung 16: SFCW-Daten Profil 2 Kiesgrube «Meiersmaad». Oben Dateninterpretation nach Dumont (2022), unten Dateninterpretation nach Constantino (2022)	19
Abbildung 17 : GPR-Systeme im Vergleich: «Kiesgrube Meiersmaad», Strassenaufbau-Profile. DS = Deckschicht; TS = Tragschicht; UG = Ungebundenes Gemisch (Dunkelgrün = wichtige Elemente vollständig erkennbar; hellgrün = wichtige Elemente mehrheitlich erkennbar; rot = wichtige Elemente nicht erkennbar)	20
Abbildung 18: Skizze Rasteraufnahmen kürzlich sanierte Forststrasse	21
Abbildung 19: Strassenaufbau kürzlich sanierte Strasse im Gebiet mit dem Flurnamen Blueme	22
Abbildung 20: 500 MHz GPR-Aufnahmen der kürzlichen sanierten Forststrasse im Gebiet «Blueme». Von oben nach unten: linke Fahrspur, Fahrbahnmitte, rechte Fahrspur	23
Abbildung 21: 1000 MHz GPR-Aufnahmen der kürzlichen sanierten Forststrasse im Gebiet «Blueme». Von oben nach unten: linke Fahrspur, Fahrbahnmitte, rechte Fahrspur	24
Abbildung 22: Tiefenschnitte der 500 MHz-Aufnahmen der kürzlichen sanierten Forststrasse im Gebiet "Blueme". Von links oben nach rechts unten: 5 - 10 cm, 15 - 20 cm, 20 - 25 cm, 25 - 30 cm, 30 - 35 cm, 35 - 40 cm, 40 - 45 cm, 70 - 75 cm	25
Abbildung 23: Tiefenschnitte der 1000 MHz-Aufnahmen der kürzlichen sanierten Forststrasse im Gebiet "Blueme". Von links oben nach rechts unten: 0 - 5 cm, 8 - 10 cm, 10 - 12 cm, 12 - 14 cm, 15 - 18 cm, 18 - 20 cm, 20 - 22 cm, 48 - 50 cm	26

Abbildung 24: Mit GPR untersuchte Objekte im Forstbetrieb Sigriswil	27
Abbildung 25: Excel-basierte Berechnungshilfe zur Ableitung der Tragfähigkeit von Forststrassen	30
Abbildung 26: Wasserfluss über die konstruktiven Bestandteile einer Strasse ((1) Fahrbahn, (2) Bankett, (3) Graben, (4) Fassung, (5) Durchlass, (6) Böschung) in einseitig geneigter Bauausführung (Brodbeck 2021), geeignet für geringe Längsneigungen der Forststrasse	36
Abbildung 27: Schematische Darstellung des freizuhaltenden Lichtraumprofils in praxisangewandter Grössenordnung (Erb und Tilita AG 2011; Waas 2019) auf einer Breite und einer Höhe von je 4.5 m.	37
Abbildung 28 : Montage der Messlanze an der Anhängerkupplung eines PKWs zur Erfassung des Querprofils einer Fahrbahnoberfläche (oben) auf einer Breite von 180 cm mittels 5 montierter Ultraschallsensoren im Abstand von 45 cm (unten)	38
Abbildung 29: Messpunkte und relativer Höhenunterschied zur Ermittlung der Geometrie des Fahrbahn- Querschnittes (Starke et al. 2021)	39
Abbildung 30 : Filtereffekt der gesammelten Sensordaten durch Entnahme der im Dachprofil als (a) auf gleicher Höhe liegender Sensoren und (b) ausschliesslicher Berücksichtigung der Sensorpaare mit grösstmöglicher Höhendifferenz (Mitte des Weges und Aussenbereich), unter Berücksichtigung der gleichzeitigen Abnahme der Anzahl an Stichprobenpunkten (gestrichelte Boxplots) (Starke et al. 2021)	40
Abbildung 31: (a) Messaufbau zur Anwendung des Cube 1 aus dem fahrenden PKW, montiert auf einem Stativ mit (b) Detailansicht mit Echtzeitdarstellung des Scanbereichs	41
Abbildung 32: (a) Auflösung einer 3D Punktwolke der Aufnahme der Strassenoberfläche mit dem Scanner Cube 1 und (b) Nutzung einer aufbereiteten Darstellung mit geschlossener Oberfläche für bessere Sichtbarkeit der ausgeschiedenen Parameter innerhalb eines Szenenausschnitts.	42
Abbildung 33: (a) Darstellung der berücksichtigten Punktwolke und (b) zugehörige Stichproben-Clusterung zur Analyse eines Strassensegmentes hinsichtlich seiner geometrischen Funktionstüchtigkeit der Wasserableitung auf der Fahrbahn.	43
Abbildung 34: Zu diskutierende Bereiche der Qualitätseinstufung nach dem Stichprobenprinzip. (a) Darstellung eines potenziell ungestörten Wegeprofils mit erkannter einseitig Wasserableitung im Grenzbereich der Erfassung und (b) Situation undefinierter Wasserabführung durch fehlenden Graben	44
Abbildung 35: Vergleich von Strassengeometrie und Erfassung der Oberflächenrauigkeit. (a) Darstellung eines Scans des Cube 1 und (b) des Focus 3D in Mesh- Ansicht	44
Abbildung 36: In Sigriswil vorgefundene Stichprobensignatur zweier schwach ausgeformten Spitzgräben als typische Ausprägung mit (a) geringer Neigung in Richtung Graben und (b) Einfluss von Vegetation im Grabenbereich durch seitliches überwachsen.	45
Abbildung 37: CAD- Modell Vergleich eines FARO® TLS Scans (a) eines üblich ausgeformten Spitzgrabens an einer Forststrasse des Forstbetriebs der Burgergemeinde Bern in Übereinstimmung mit Normparametern (b) nach dem Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt, 2009), (c) eines gepflasterten Spitzgrabens nach Hafner (1956)	46
Abbildung 38: Visuelle Gegenüberstellung der Erfassung des Lichtraumprofils zur Beurteilung der Passierbarkeit der Strasse zwischen (a) Blickfeld Cube 1 und (b) FARO® Focus 3D Scans.	47
Abbildung 39: Test- Wegesegmente auf einer Länge von insgesamt 2.6 km zur Überprüfung der Anwendbarkeit der Cube- Auswertalgorithmen (Darstellung: Swisstopo)	48
Abbildung 40: Qualitätsansprache des Wegesegments "Messstelle 1" (Abschnitt 2), Fahrtrichtung von links nach rechts mit den Variablen Geometrische Qualität 1 (gut), asymmetrisches Wegequerprofil und der Kennzeichnung ungültiger Datensätze.	49
Abbildung 41: (a) Darstellung des Profils Nr. 43 mit zum Sample -1.3 m verschobenem Dachprofil und (b) des Profils Nr. 44 als ungültiger Datensatz durch Fehlen von Daten im Bereich -2.6 m und somit keine gültigen 4 Stichproben in eine Richtung, ausgehend vom höchsten Punkt und einem zentralen Dachprofil bei -0.6 m	50
Abbildung 42: Störungen des Regelquerschnitts auf unterschiedlichen Segmenten (a-d) in unterschiedlicher Ausformung und Stärke an Position (a) -0.6 m, (b) -1.3 m, (c) 0 m und (d) - 0.6 m in stärkerer Ausprägung.	50

---

Abbildung 43: FARO- Scan des Abschnitts 5 (Messstelle 2) zur Darstellung eines bedingt eingeschränkten funktionalen Spitzgrabens als auch die teilweise (a) aufscheinende sichtbare erkannte Absenkung am oberen linken Ende des Scanabschnitts ohne schlechte Einstufung des Wegesegementes in der (b) geometrischen Auswertung trotz Gefahr eines Oberflächenabflusses auf der Fahrbahn (gespiegelt).

---

51

## 14 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Leistungsmerkmale der verwendeten NOGGIN® Sensoren (Sensors & Software Inc 2021c, eigene Darstellung)	12
Tabelle 2: Technische Spezifikationen GS 8000 (Screening Eagle 2022)	14
Tabelle 3: Messwerte Schichtstärken Profil 2 (orange = Metallplatte)	17
Tabelle 4: Mächtigkeit der Schichten beim kürzlich sanierten Strassenabschnitt Blueme	22
Tabelle 5: Richtwerte für den Dimensionierungsverkehr (W) auf Waldstrassen nach Strassentypen oder Bewirtschaftungsregion, wobei L = Strassenlänge in Meter (nach Burlet 1980 & SAFS 1986, verändert)	28
Tabelle 6: Regionalfaktoren für die Schweiz (Burlet 1980, verändert)	29
Tabelle 7: Untergrundtragfähigkeit (CBR-Werte) in der Schweiz oft vorkommender Bodenarten (SAFS 1986, verändert)	29
Tabelle 8 : Klassifizierung « Geom_Quality » der Wegesegemente auf Höhe der Messstelle 1.	49

## 15 Literaturverzeichnis

- ALG, 2018. Güterstrassenbau. Grundlagen und Normen. Amt für Landwirtschaft und Geoinformation (ALG), Chur, 28 S.
- Annan A.P, 2003. Ground Penetrating Radar Principles, Procedures & Applications. Sensors & Software Inc, 286 S.
- Arbeitsblatt DWA-A 904, 2005. Richtlinien für den ländlichen Wegebau. DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef.
- Begus J, Pertlik E, 2017. Guide for planning, construction and maintenance of forest roads. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 64 S.
- Blindow N, Eisenburger D, Illich B, Petzold H, Richter T, 2007. Ground Penetrating Radar. In: Environmental Geology. Springer, Berlin, Heidelberg, doi.org/10.1007/978-3-540-74671-3\_10
- Brodbeck N, 2021. Erarbeitung von geometrischen Parametern zur Quantifizierung von forstlichen Strassenzuständen mit echtzeitfähigen LiDAR Systemen. Bachelor Thesis, unveröffentlicht. Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (HAFL), Zollikofen, 63S.
- Brown M, Mercier S, Provencher Y, 2003. Road Maintenance with Opti-Grade®. Maintaining Road Networks to Achieve the Best Value. Transp. Res. Rec., 1819, 282–286.
- Burlet E, 1980. Dimensionierung und Verstärkung von Strassen mit geringem Verkehr und flexiblem Oberbau. PhD-Thesis, ETH Zürich, 86 S, <https://doi.org/10.3929/ethz-a-000207974>
- Constantino F, 2022. GPR-Experte Screening Eagle – proceq. Auswertung der GPR-Aufnahmen Kiesgrube Meiersmaad, unveröffentlicht, 8S.

- Cui F, Ning M, Shen J, Shu X, 2022. Automatic recognition and tracking of highway layer-interface using Faster R-CNN. *Journal of Applied Geophysics* (196), doi.org/10.1016/j.jappgeo.2021.104477
- Dachroth W, 2017. *Handbuch der Baugeologie und Geotechnik* (4. Überarbeitete Auflage). Springer Spektrum, 762S.
- Dolić J, 2015. *Bodenradar-Ground Penetrating Radar*. TU Graz, Institut für Hochfrequenztechnik, Masterarbeit, 71S.
- Dumont M, 2022. GPR-unterstützte Ableitung der Tragfähigkeit von Forststrassen. Praxistauglichkeitsversuche. Bachelorarbeit, unveröffentlicht. Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (HAFL), Zollikofen, 55 S.
- Erb M, Tilita AG, 2011. *Baumschnittsrichtlinien*, unveröffentlicht. Bau- und Verkehrsdepartment des Kantons Basel-Stadt, Basel, 122 S.
- Faiz A, Staffini E, 1979. Engineering economics of the maintenance of earth and gravel roads. *Transp. Res. Rec.*, 207, 260–268.
- Frei M, Bolgé R, 2018. *Infrastrukturmanagement im Waldbereich - Grundlagenanalyse und erste Lösungsansätze*. MFrei Infra GmbH im Auftrag des BAFU. Projektbericht, 67 S.
- Grigolato S, Pellegrini M, Cavalli R, 2013. Temporal analysis of the traffic loads on forest road networks. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 6 (5), 255–261.
- Hafner F, 1956. *Forstlicher Strassen- und Wegebau*. Verlage Georg Fromme und Co, Wien und München.
- Heinimann H.R, 2015. *Waldstrassen- Anforderungen des Verkehrs und konstruktive Durchbildung*. Land Use Engineering, 18.06.2015, [www.planfor.ch/sites/default/files/HR\\_Heinimann.pdf](http://www.planfor.ch/sites/default/files/HR_Heinimann.pdf)
- Heinimann HR, 1997. Aggregate-surfaced Forest Roads - Analysis Of Vulnerability Due to Surface Erosion. In: *Proceedings of the IUFRO / FAO Seminar*, S. 30–37. Abgerufen am 29.07.2016, <http://www.uni-kassel.de/upress/online/frei/978-3-933146-12-0.volltext.frei.pdf#page=39>
- Hirt R, 2001. 40-Töner auch auf den Güter- und Waldstrassen. In: *Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik (VPK) 2/2001*, S.82-84; [www.e-periodica.ch/digbib/view?pid=geo-006:2001:99::983#102](http://www.e-periodica.ch/digbib/view?pid=geo-006:2001:99::983#102)
- Hölldorfer B, 2007. Einfach, aber wirkungsvoll - das R2005- Gerät. *LWF aktuell*, 59, 30–31. Abgerufen am 15.02.2021, [https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/service/dateien/a59\\_einfach\\_aber\\_wirkungsvoll\\_das\\_r2\\_geraet.pdf](https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/service/dateien/a59_einfach_aber_wirkungsvoll_das_r2_geraet.pdf)
- Holzleitner F, Fritz M, Sokol W, Zott F, Kanzian C, 2020. Predicting forest road´s bearing capacity using smart sensing technology. In: Björheden R, Callesen I (Hrsg.). *NB NORD2020. Forest Operations for the Future*, 22-24.9.2020, S. 27–32. Abgerufen am 30.09.2021, [https://nordicforestresearch.org/wp-content/uploads/2020/11/arbetsrapport-1061-2020\\_.pdf](https://nordicforestresearch.org/wp-content/uploads/2020/11/arbetsrapport-1061-2020_.pdf)
- Huber H, 2019. *Geschäftsführer Huber Bau AG*. Persönliche Mitteilung an M. Dumont im Rahmen der Bachelorarbeit, 01.07.2019.
- IMP 2021. *Handbuch 21 - Bituminöser Strassenbau und Brückenabdichtungen*. 12. Überarbeitete Ausgabe, IMP Institut für Materialprüfung, Bauberatung und Analytik, Oberbuchsitzen, 69S.
- ISO 25178-2, 2012. *Geometrical product specifications (GPS) - Surface texture: Areal - Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters (ISO 25178-2:2012)*, unveröffentlicht, 59 S.
- Johnston G, 2018. *Webseite Sensors & Software - Webinare - Die Grundlagen der Interpretation von GPR-Daten Teil 1 & 2*, [www.sensoft.ca/de/georadar/webinars/](http://www.sensoft.ca/de/georadar/webinars/)

- Jol H M, 2009. Ground Penetrating Radar. Theory and Applications. Elsevier Science, 2. Aufl. 544S. (ISBN 978-0-444-53348-7)
- Kuonen V, 1983. Wald- und Güterstrassen: Planung - Projektierung - Bau. Eigenverlag des Verfassers, Pfaffhausen, 743 S, <http://e-collection.ethbib.ethz.ch/show?type=bericht&nr=854>
- Marinello F, Rosario Proto A, Zimbalatti G, Pezzuolo A, Cavalli R, Grigolato S, 2017. Determination of forest road surface roughness by Kinect depth imaging. Annals of Forest Research, 0 (0).
- NABODAT, 2020. Bodendatensatz Schweiz - Version 6 (April 2022), zuletzt geprüft am 23.11.2022, [www.nabodat.ch/index.php/de/service/bodendatensatz](http://www.nabodat.ch/index.php/de/service/bodendatensatz)
- Napper C, 2008. Soil and Water Road-Condition Index - Field Guide. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, 104 S.
- Pirker M, Pirolt J, 2021. Einsatz eines personengetragenen Laserscanners zur automatischen Detektion und Vermessung von Forststrassen. Bachelor Thesis, unveröffentlicht. Universität für Bodenkultur (BOKU) Wien, Vienna, Austria.
- Rivera M, 2021. Ermittlung der Schichtstärken bestehender Forststrassen und Überlegungen zur Ableitung der Tragfähigkeit mit Radar-Daten. Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (HAFL), Zollikofen, 60 S. (unveröffentlicht)
- SAFS 1986. Merkblätter über den Bau und Unterhalt von Wald- und Güterstrassen. Schweizerische Arbeitsgemeinschaft für forstlichen Strassenbau (SAFS), Zürich, 194S.
- ScreeningEagle, 2022. Webseite ScreeningEagle - Produkte - Proceq GS8000, zuletzt geprüft am 21.11.2022, [www.screeningeagle.com/de/products/proceq-gs8000](http://www.screeningeagle.com/de/products/proceq-gs8000)
- Sensors & Software Inc, 2016. Best practices for measuring winter road ice thickness using GPR. Mississauga, Canada, 11 S.
- Sensors & Software Inc, 2021a. EKKO\_Project LineView&Interpretation Modules. User's Guide. Mississauga, Canada, 131S.
- Sensors & Software Inc, 2021b. Webseite Sensors & Software - NOGGIN® Anpassbare GPR-Systeme, zuletzt geprüft am 21.11.2022, [www.sensoft.ca/products/noggin/overview](http://www.sensoft.ca/products/noggin/overview)
- Sensors & Software Inc, 2021c. Webseite Sensors & Software - Spezifikationen. Zuletzt geprüft am 21.11.2022, [www.sensoft.ca/de/products/noggin/specification/](http://www.sensoft.ca/de/products/noggin/specification/)
- Sensors & Software Inc, 2021d. EKKO\_Project LineView & Interpretation Modules. User's Guide. Mississauga, Canada, 137 S.
- Sensors & Software Inc. 2021e. EKKO\_Project SliceView Module. Users Guide. Mississauga, Canada, 118S.
- Sensors & Software Inc. 2022. SPIDAR® Multi-channel GPR. Webseite Sensors & Software - Products - Overview. Zuletzt geprüft am 23.11.2022, [www.sensoft.ca/products/spidar/overview](http://www.sensoft.ca/products/spidar/overview)
- Starke M, Geiger C, 2022. Machine vision based waterlogged area detection for gravel road condition monitoring. International Journal of Forest Engineering, 1-7.
- Starke M, Kunneke A, Ziesak M, 2021. Monitoring of Carriageway Cross Section Profiles on Forest Roads: Assessment of an Ultrasound Data Based Road Scanner with TLS Data Reference. Forests, 12 (9), 1191.
- UVEK 2000. LSWA, 34t-Limite und 40t-Kontingente ab 1. Januar 2001. Medienmitteilung vom 01.11.2000, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, Bern

VSS-40320: Dimensionierung des Strassenaufbaus; Äquivalente Verkehrslast, VSS-Norm (Ausgabe 2019)

Waas S, 2019. Forstwege - Planung Bau und Pflege, unveröffentlicht. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Freising.

Wolff C, 2015. Ground penetrating radar. Webseite Radartutorial.eu, zuletzt geprüft am 23.11.2021, [www.radartutorial.eu/02.basics/Ground%20penetrating%20radar.de.html](http://www.radartutorial.eu/02.basics/Ground%20penetrating%20radar.de.html)

WNA, 2019. Weisung 1305.1 – Forstliche Infrastrukturanlagen. Amt für Wald und Natur Staat Freiburg. 06.12.2019, 30S.

## 16 Anhang

Anhang 1: Teststatistik Kiesgrube «Meiersmaad»

60

---

### Digitaler Anhang

- 1) Parallel durchgeführte Publikation zur Verifizierung und Akzeptanz der Messgenauigkeit des Systems «Messlanze» und zur Übertragung des Messprinzips auf LiDAR Technik:

Starke, M.; Kunneke, A.; Ziesak, M. Monitoring of Carriageway Cross Section Profiles on Forest Roads: Assessment of an Ultrasound Data Based Road Scanner with TLS Data Reference. Forests 2021, 12, 1191, doi:10.3390/f12091191.

- 2) Excel-basierte Berechnungshilfe Stärkenindex SN

## Anhang 1: Teststatistik Kiesgrube Meiersmaad

### Deckschicht 500 MHz

Zweistichproben t-Test bei abhängigen Stichproben (Paarvergleichstest)

	Variable 1	Variable 2
Mittelwert	7.08333333	8.79166667
Varianz	14.1666667	7.73731884
Beobachtungen	24	24
Pearson Korrelation	0.66202868	
Freiheitsgrade (df)	23	
t-Statistik	-2.95124458	
P(T<=t) zweiseitig	0.00716329	
Kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test	2.06865761	

### Tragschicht 500 MHz

Zweistichproben t-Test bei abhängigen Stichproben (Paarvergleichstest)

	Variable 1	Variable 2
Mittelwert	39.7222222	39.5833333
Varianz	46.1492063	74.3071429
Beobachtungen	36	36
Pearson Korrelation	0.63419414	
Freiheitsgrade (df)	35	
t-Statistik	0.12262839	
P(T<=t) zweiseitig	0.90310282	
Kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test	2.03010793	

### Deckschicht 1000 MHz

Zweistichproben t-Test bei abhängigen Stichproben (Paarvergleichstest)

	Variable 1	Variable 2
Mittelwert	8.16666667	7.54166667
Varianz	10.4057971	11.5634058
Beobachtungen	24	24
Pearson Korrelation	0.66522693	
Freiheitsgrade (df)	23	
t-Statistik	1.12746904	
P(T<=t) zweiseitig	0.27116939	
Kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test	2.06865761	

### Tragschicht 1000 MHz

Zweistichproben t-Test bei abhängigen Stichproben (Paarvergleichstest)

	Variable 1	Variable 2
Mittelwert	37.4583333	36.875
Varianz	43.4764493	63.0706522
Beobachtungen	24	24
Pearson Korrelation	0.74840551	
Freiheitsgrade (df)	23	
t-Statistik	0.53846154	
P(T<=t) zweiseitig	0.59543188	
Kritischer t-Wert bei zweiseitigem t-Test	2.06865761	