



Standardverfahren zur Bodenanalyse für Gefahrenbeurteilungen

Projektbericht

Kim von Wattenwyl, Massimiliano Schwarz
10.09.2024

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Problemstellung	3
2	Projektübersicht	4
2.1	Teil SBB	4
2.2	Teil AWN	4
3	Methoden zur Bestimmung der Bodengranulometrie	4
3.1	Trockensiebung	5
3.2	Nasssiebung	5
3.3	Schlämmanalysen	5
3.3.1	Schlämmanalyse mit Aerometermessung	6
3.3.2	Schlämmanalyse mit der Pipettiermethode	6
3.4	Bestimmung USCS	6
3.5	Literaturgrundlagen zur Ableitung bodenmechanischer Parameter	6
3.6	Scherversuche	6
3.7	Beschrieb Flaschenmethode	8
3.8	Übersicht der ausgewerteten Standorte	9
4	Ergebnisse	10
4.1	Methodenteil	10
4.1.1	Ermittlung Dispergierungsmittel	10
4.1.2	Einfluss der Fluidichte	14
4.1.3	Berechnungsmethode Anteil Bodenfraktion	14
4.2	Einzelne Kornverteilungskurven	16
4.2.1	Standorte Projektteil SBB	16
4.2.2	Standorte Projektteil AWN	22
4.3	Ausarbeitung und Validierung Ausschlussschema	25
4.3.1	Herleitung bodenmechanischer Parameter aus Normdaten	25
4.3.2	Bodenmechanische Parameter Projektteil AWN	26
4.3.3	Vergleich berechneter Scherfestigkeiten aus Parametern verschiedener Methoden	28
4.3.4	Rückrechnung historischer Ereignisse von Trub und Diemtigen	29
4.4	Ergänzende Labordaten zur Norm SN 670010b	31
4.5	Vergleich des Aufwandes zwischen Laboranalysen und der vereinfachten Flaschenmethode	32
5	Folgerungen	34
6	Abbildungsverzeichnis	35
7	Tabellenverzeichnis	36
8	Literaturverzeichnis	37
9	Anhangsverzeichnis	37
	Anhang 1:	37
	Anhang 2:	37
	Anhang 3:	37
	Anhang 4:	37
	Anhang 6:	37

1 Einleitung und Problemstellung

Um die Gefahr von flachgründigen Rutschungen zu beurteilen, werden oft Hangstabilitätsmodelle verwendet, die verschiedenen Bodenparameter als Eingangsgrössen benötigen. In den verschiedenen Ebenen des Naturgefahrenmanagements wie z.B. Gefahrenhinweiskarte, Gefahrenkarte oder Objektschutz werden unterschiedliche Ansprüche an die Genauigkeit dieser Parameter gestellt (Abbildung 1). Die Genauigkeit hängt auch vom Produkt ab: z.B. Gefahrenbeurteilung, Wirksamkeitsanalyse, Risikoanalyse, oder Kosten-Nutzen Analyse.

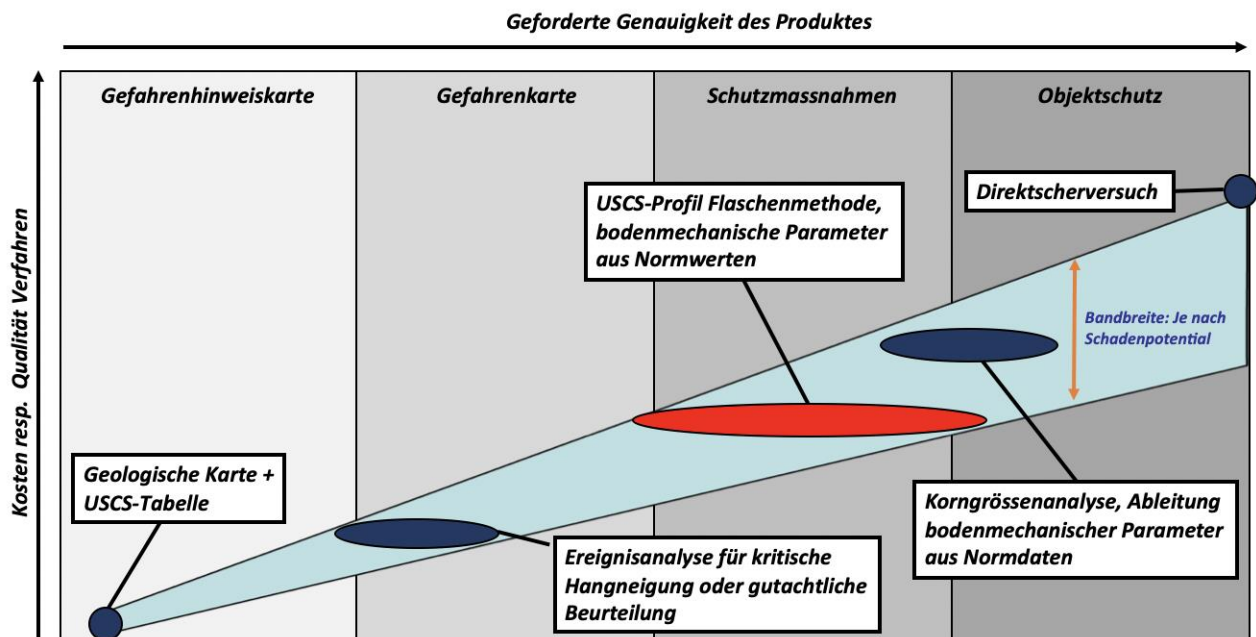


Abbildung 1: Anspruch an die Genauigkeit von bodenmechanischen Parametern für verschiedene Ebenen des Naturgefahrenmanagements in Abhängigkeit der Kosten/Qualität der Bestimmungsmethoden (weisse Kästen). Rot markiert ist die methodische Lücke des Ansatzes der vereinfachten Flaschenmethode, der in diesem Projekt untersucht wird.

Gängige Verfahren zur Ermittlung bodenmechanischer Kenngrössen sind verschiedene Versuche (Scherversuche, Sieb- und Schlämmanalysen etc.), die in geotechnischen Laboren durchgeführt werden. Solche Laboranalysen sind zeit- und kostenaufwändig und können deshalb bei Gefahrenbeurteilungen mit geringem Schadenpotential oft nicht gerechtfertigt werden. Alternativ dazu existieren Verfahren die auf gutachtlichen Schätzungen beruhen und dadurch grosse Unsicherheiten aufweisen. Deshalb wird ein kostengünstiges Verfahren benötigt, welches eine schnelle Beurteilung von Bodenparametern auf einer nachvollziehbaren und quantitativen Grundlage erlaubt. Ein mögliches Verfahren ist eine vereinfachte Version der Sieb- und Schlämmanalyse mit Flaschen, zur Ermittlung der Granulometrie des Bodens (in Bericht «Flaschenmethode» genannt). Aus den Klassen der Granulometrie des Bodens können bodenmechanische Parameter von Literaturwerten (SN 670010b) abgeleitet werden. Die Menge und Qualität der Daten für die Ableitung bodenmechanischer Parameter ist zentral für die Anwendung dieses Ansatzes, wie in der SN 670010b angewendet und in Dysli und Rybisar (1992) dokumentiert. Ziel dieses Projektes ist es, ein vereinfachtes Verfahren für die Bestimmung der Granulometrie zu prüfen und soweit als möglich zu standardisieren. Zusätzlich wurden die Grundlagen für die Ableitung der bodenmechanischen Parameter mit neue Labordaten erweitert und analysiert. Aus den Resultaten dieser Untersuchungen wird ein Leitfaden für die Praxisanwendung verfasst.

2 Projektübersicht

Das Projekt kann in 2 Teile gegliedert werden, die von 2 Auftraggebern (SBB/AWN) finanziert werden. Zur besseren Nachvollziehbarkeit des Gesamtkontextes werden die Inhalte beider Projektteile in den folgenden Abschnitten kurz beschrieben.

2.1 Teil SBB

In diesem Projektteil wird das standardisierte Verfahren zur vereinfachten Bodenanalyse geprüft und ein Leitfaden für die Praxis verfasst. Zuerst wurde die Methodik des vereinfachten Sedimentationsverfahrens optimiert, die wichtigste Frage war dabei, welches Lösungsmittel die besten Resultate liefert. Dazu wurden für einen Referenzboden die Korngrössenverteilungen von 5 Siebanalysen aus einem geotechnischen Labor mit denen von jeweils 5 Versuchen mit der Flaschenmethode für 3 verschiedene Lösungsmittel verglichen (+ 5 Versuche ohne Lösungsmittel).

Das Lösungsmittel welches die besten Resultate erzielte, wurde für die weiteren Analysen verwendet. Anschliessend wurden an 10 Standorten jeweils 5 Bodenproben genommen und mit der Flaschenmethode ausgewertet. Die Resultate wurden mit den Siebanalysen eines zertifizierten Labors (AHB Burgdorf) für dieselben Standorte verglichen (jeweils 1 Siebanalyse pro Standort). Aus den Daten der bodenmechanischen Norm SN 670010b (Dysli und Rybisar 1992) wurde ein Ausschlussschema erstellt, dass die Ermittlung von bodenmechanischen Parametern (effektiver Reibungswinkel und effektive Kohäsion) aus der Korngrössenverteilung des vereinfachten Sedimentationsverfahrens ermöglicht. Die Erkenntnisse wurden in diesem Bericht und in einem Leitfaden für die Praxis festgehalten.

2.2 Teil AWN

Ergänzend zum Hauptprojekt SBB beinhaltet dieses Teilprojekt die zusätzliche Entnahme und Auswertung von je 5 Bodenproben von 5 verschiedenen Standorten in rutschungsanfälligen Gebieten des Kantons Bern. Für jeden Standort werden jeweils 1 Siebanalyse, 1 Scherversuch (beinhaltet 3 Teilversuche) und 5 Sedimentationsversuche mit der Flaschenmethode durchgeführt. Zusätzlich wird überprüft, wie gut bodenmechanische Parameter der Norm VSS mit denen von Labordaten für USCS-Böden übereinstimmen. Dazu werden Daten aus geotechnischen Laboren statistisch ausgewertet. Neben der Überprüfung kann die bestehende Norm mit diesen neuen Daten auch ergänzt werden. Dadurch kann wiederum die Ableitung bodenmechanischer Parameter aus der Korngrössenverteilung verbessert werden, und so auch die Genauigkeit des in diesem Projektteil geprüften Verfahrens ansteigen.

3 Methoden zur Bestimmung der Bodengranulometrie

Ziel einer Korngrössenanalyse ist es, die Massenanteile der normierten Korngrössen zu ermitteln (Abbildung 2), im Vergleich zur Korngrössenverteilung beschreibt die Bodenart nur die Korngrössen < 2mm. Bei der Bestimmung der Korngrössenverteilung von Böden werden bei gängigen Verfahren grundsätzlich grössere Partikel (Sand und Kies) durch Siebung getrennt, während zur Bestimmung der Feinanteile (Schluff und Ton) meist Schlämmanalysen (Sedimentation) zum Einsatz kommen. Daneben existieren zur Bestimmung der Feinanteile weitere Methoden (Mikroskopie, Laserlichtstreuung, Zentrifugation, Trübungsmessgeräte etc.) bei denen die Mineralien weder zerstört noch aufgelöst werden, diese Methoden wurden aber eher für industrielle Bereiche wie die Pulvertechnologie entwickelt (Gee und Bauder 2018). Bei der Siebanalyse kann zwischen der Trocken- und Nasssiebung unterschieden werden, wobei mit der Nasssiebung kleinere Partikelgrössen extrahiert werden können als bei der Trockensiebung; mit Sieben aus Nylongewebe können mittlerweile auch Feinanteile bis 1µm bestimmt werden (Ma et al. 2023). Bei Schlämmanalysen werden die Partikelgrössen anhand ihrer Sedimentationsgeschwindigkeit in einer Suspension getrennt, dieses Prinzip basiert auf der der stokeschen Gleichung (siehe Abschnitt 3.3.). Es kann bei Schlämmanalysen grundsätzlich zwischen 2 Messmethoden unterschieden werden: 1) Messung der Dichte der Suspension mittels Aerometer, 2) Messung des Gewichtes pipettierter Flüssigkeit.

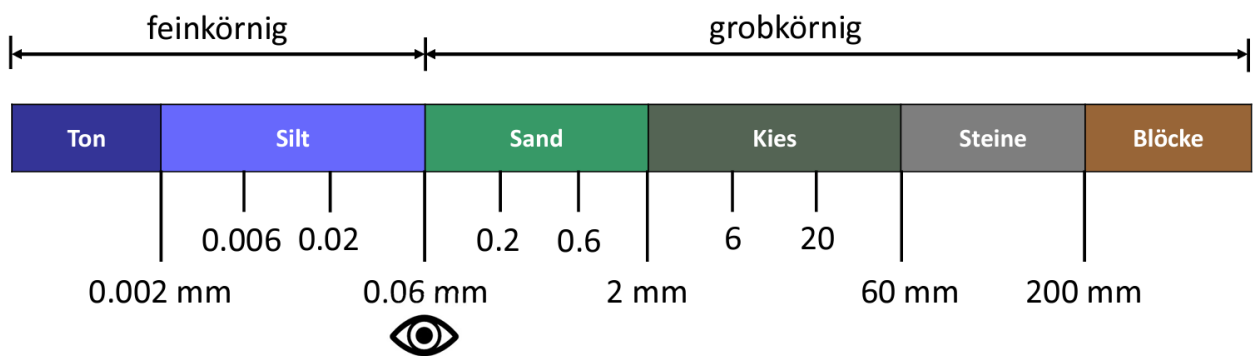


Abbildung 2: Grössenbereiche der Bodenfraktionen, das Auge kennzeichnet die Grenze der sichtbaren Korngrösse
Quelle: AHB Burgdorf

3.1 Trockensiebung

Die getrocknete Materialprobe wird auf einen Siebturm gegeben (Abbildung 3), bei dem die Maschen-durchmesser der Siebe von oben nach unten abnehmen. Anschliessend wird die Rüttelmaschine unter dem Siebturm eingeschaltet wodurch die Korngrössen in den entsprechenden Sieben zurückbleiben und gewogen werden können.



Abbildung 3: Siebturm zur Trockensiebung, Quelle: innovativbeton-muenchen

3.2 Nasssiebung

Die bei der Trockensiebung verbliebenen Feinanteile werden bei der Nasssiebung zuerst zu einer Suspension aufgeschlämmt und homogenisiert. Daraufhin werden die Korngrössen auf einem Nasssiebe-turm durch Schütteln und Wasserdurchfluss getrennt. Die einzelnen Siebe mit den darauf verbliebenen Bodenpartikeln werden in einem Trockenschrank getrocknet und schliesslich eingewogen.

3.3 Schlämmanalysen

Schlämmanalysen basieren auf dem Prinzip der stokeschen Gleichung und werden bei gängigen Ver-fahren für Partikelgrössen $< 0.063 \text{ mm}$ verwendet. Die Theorie zur Sinkgeschwindigkeit ermöglicht die Bestimmung der Sedimentationszeit t_s (s) für die verschiedenen Partikelfractionen aus der Gravita-tionsbeschleunigung g (m/s^2), der Partikeldichte ρ_p (kg/m^3), des Partikeldurchmessers d_p (m) der Sedi-mentationshöhe h_s (m), der Wasserdichte ρ_w (kg/m^3) und der Viskosität η_f ($\text{Pa}\cdot\text{s}$).

$$t_s = \frac{18 * h_s * \eta_f}{d_p^2 * g * (\rho_p - \rho_f)}$$

3.3.1 Schlämmanalyse mit Aerometermessung

Bei dieser Methode wird der Probenanteil aus Ton- und Schluffpartikeln in Wasser durch die Zugabe eines Dispersionsmittels gelöst. Die Suspension wird in einen Messzylinder gegeben und gut durchmischt, sodass alle Partikelgrößen homogen in der Lösung verteilt sind. Nachdem der Zylinder abgestellt wurde, erfolgen Dichtemessungen in unterschiedlichen Zeitintervallen. Mit einem Aerometer kann die Dichte einer Suspension in einer bestimmten Höhe gemessen werden, das Prinzip basiert auf dem hydrostatischen Auftrieb in Abhängigkeit der Fluidichte. Anhand der Sedimentationsgeschwindigkeit der Bodenpartikel und der Dichtemessungen kann schliesslich die Korngrößenverteilung bestimmt werden.

3.3.2 Schlämmanalyse mit der Pipettiermethode

Dieses Verfahren unterscheidet sich von nur durch die Messmethode von der Schlämmanalyse mittels Aerometer: Anstatt die Suspensionsdichte direkt im Messzylinder zu bestimmen, wird in unterschiedlichen Zeitintervallen ein bestimmtes Volumen entnommen. Die entnommene Suspension wird getrocknet und gewogen, wodurch das Gewicht und schliesslich der Anteil einer Partikelgrösse bestimmt werden kann.

3.4 Bestimmung USCS

USCS (Unified Soil Classification System) ist das international gängige Bodenklassifizierungssystem. Neben der Korngrößenverteilung eines Bodens wird für die Klassifizierung nach USCS auch der Plastizitätsindex (Differenz zwischen Fließ- und Ausrollgrenzen) sowie die Krümmung einer Kornverteilungskurve (Krümmungs- und Ungleichförmigkeitszahl) benötigt. Bei dem in diesem Projekt verwendeten Ansatz wird der Bodentyp nach USCS nicht direkt bestimmt, sondern nur auf Basis der Korngrößenverteilung Gruppen mit ähnlichen bodenmechanischen Parametern ausgeschieden. Diese Gruppen werden anhand eines Ausschlussschemas, das auf den Daten der Norm SN 670010b beruht, ausgeschieden. Das konkrete Vorgehen ist in Kapitel 4.6 beschrieben.

3.5 Literaturgrundlagen zur Ableitung bodenmechanischer Parameter

Wichtigste Datengrundlage für bodenmechanische Kennwerte und Korngrößenverteilungskurven ist die «statistische Behandlung der Kennwerte der Schweizer Böden» von Dysli und Rybisar (1992). Auf Basis dieser Studie wurden für die Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS) die Norm «SN 670010b – Bodenkennziffern», erstellt.

3.6 Scherversuche

Mit Scherversuchen können die effektive Kohäsion (c') und der innere effektive Reibungswinkel (φ') eines Bodens ermittelt werden, welche zentrale Kenngrößen in bodenmechanischen Berechnungen sind. Die Scherparameter φ' und c' können durch direkte Scherversuche mit Rahmenschergeräten oder mit Triaxialversuchen bestimmt werden (Schwiteilo und Herrle 2016). Für die Auswertungen dieses Projektberichtes wurden direkte Scherversuche durchgeführt, die folgenden Ausführungen dieses Abschnittes beziehen sich darum auf direkte Scherversuche.

Die Kohäsion setzt sich aus einer scheinbaren (c_u) und einer effektiven (c') Komponente zusammen. Die effektive Kohäsion entspricht dem inneren Zusammenhalt der Bodenteilchen in bindigen Böden, die scheinbare Kohäsion entsteht durch Saugspannungen im Boden, und ist dadurch vom Wassergehalt abhängig. Da die scheinbare Kohäsion mit zunehmendem Wassergehalt abnimmt resp. komplett wegfällt, sollte sie für Hangstabilitätsberechnungen im Naturgefahrenbereich nicht berücksichtigt werden.

Der innere Reibungswinkel eines Bodens beschreibt das Verhältnis zwischen der Scherfestigkeit τ (horizontal zur Scherfläche) die durch eine Normalspannung σ resultiert (senkrecht zur Scherfläche) und entspricht dadurch der Steigung der Geraden in Abbildung 4 links. Die effektive Kohäsion gibt die Festigkeit bei $\sigma = 0$ an (0-Interzept), ihre Wirkung ist daher unabhängig von der Normalspannung immer gleich gross.

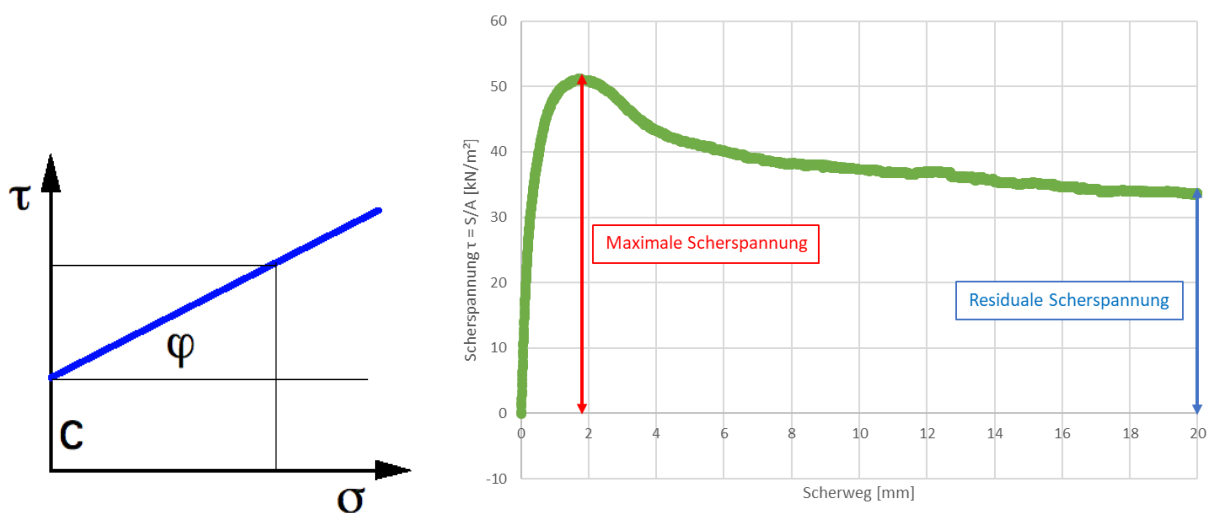


Abbildung 4 : Schematische Darstellung einer Schergeraden (links), Unterschied zwischen residualer und maximaler Scherspannung (rechts).

Bei der Kohäsion und dem inneren Reibungswinkel wird zwischen drainierten/undrainierten sowie gesättigten/ungesättigten Werten unterschieden. Wird der Versuch drainiert durchgeführt, kann Wasser während des Schervorgangs aus der Bodenprobe entweichen und sich kein Porenwasserdruck aufbauen, wogegen bei einem undrainierten Versuch Porenwasserdruck entstehen kann. Kohäsion und Reibungswinkel aus drainierten Versuchen werden mit einem Apostroph gekennzeichnet (φ' und c') und als «effektive» Werte beschrieben. Für die Berechnung der Scherparameter aus Scher- und Normalspannung sollte immer auch berücksichtigt werden, ob mit der maximalen oder der residualen Scherspannung, die sich nach einem längeren Scherweg einstellt, gerechnet wurde (Abbildung 4 rechts).

Bei konsolidierten Scherversuchen wird das Bodenmaterial vor den Versuchen über einen längeren Zeitraum (im Bereich von 24 h) mit einer Normalspannung belastet und vorverdichtet. Durch diese Vorverdichtung wird der maximale Scherwiderstand nach einem kürzeren Scherweg erreicht, als mit unkonsolidiertem Material (Engl et al. 2008).

Die Scherversuche für dieses Projekt wurden gesättigt, drainiert und konsolidiert durchgeführt. In den Auswertungen wird der unterschiedliche Einfluss von maximaler und residualer Scherspannung auf die Scherparameter φ' und c' geprüft und die Parameter mit beiden Ansätzen berechnet.

3.7 Beschrieb Flaschenmethode

Das vereinfachte Sedimentationsverfahren das in diesem Projekt erprobt wird, beinhaltet keine eigentliche Trockensiebung: Grosse Steine werden aus der feuchten Bodenprobe von Hand aussortiert, sowie die Fraktion 20-63 mm grob gesiebt. Die Korngrößen von 20 – 2 mm (Kies) werden durch Nasssiebung extrahiert, die kleineren Partikel (Sand, Schluff und Ton) werden durch Sedimentation getrennt.

Die detaillierte Praxisanwendung der vereinfachten Sedimentationsmethode wird im Leitfaden in Anhang 2 beschrieben. Die Probeentnahme im Feld erfolgt mit einem Metallzylinder dessen Volumen bekannt ist (für diese Analyse $V = 0.785 \text{ L}$), damit die Porosität bestimmt werden kann. Abbildung 5 zeigt eine Übersicht der Arbeitsschritte zur Trennung der einzelnen Bodenfraktionen, bei der für alle 7 Boden-Wassergemische jeweils das Gewicht und das Volumen gemessen werden. Die Methode erfolgt in 4 Hauptschritten:

1. Extraktion Grobkomponenten $\varnothing > 63 \text{ mm}$ von Hand und Schätzung/Siebung Grobkomponenten $\varnothing > 20 \text{ mm}$ im Feld. Probeentnahme des Materials mit dem Metallzylinder (repräsentativ für $\varnothing < 20 \text{ mm}$).
2. Siebung der Kiesfraktion: Nachdem die Gesamte Bodenprobe mit Wasser und evtl. Dispergierungsmittel gut vermischt und für mindestens 24 h gelöst wurde, wird der Kies mit einem 2mm-Sieb von der restlichen Probe getrennt.
3. Die verbleibende Bodenprobe ohne Kies wird gut geschüttelt, nach der Sedimentationszeit von Sand (Sedimentationszeiten berechnet gem. Gleichung in Abschnitt 3.3) wird die Suspension mit Ton und Schluff in eine weitere Flasche abgegossen.
4. Das Gemisch aus Schluff und Ton wird gut geschüttelt, nach der Sedimentationszeit von Schluff wird die Suspension mit Ton in eine weitere Flasche abgegossen.

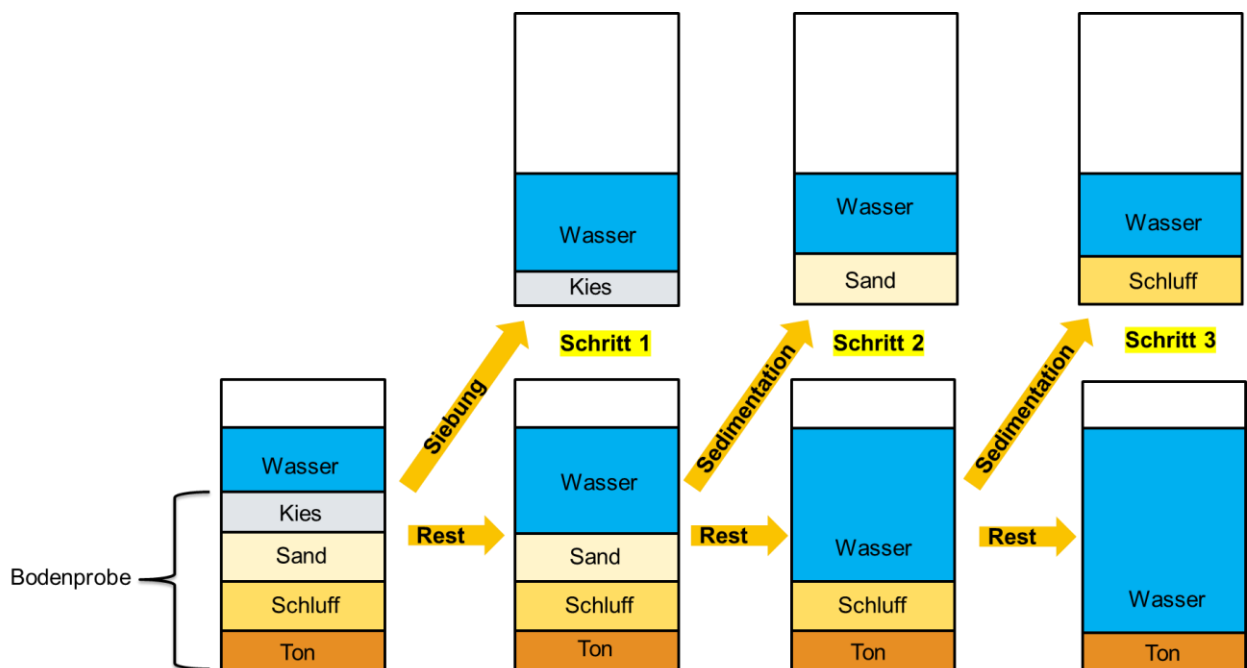


Abbildung 5 : Vorgehen bei der vereinfachten Sedimentationsmethode

Auf Basis der Theorie der Massenbilanz kann Anhand der folgenden Gleichung mit der Totalmasse $m_t(\text{kg})$ und dem Totalvolumen $v_t(\text{m}^3)$ eines Boden-Wassergemisches die Partikelmasse bestimmt werden. Dazu muss eine Partikeldichte (auch Feststoffdichte genannt) angenommen werden, die aufgrund des im Untersuchungsgebietes vorherrschenden Ausgangsgesteines gewählt wird. Die Partikeldichte hat zwar einen Einfluss auf die einzelnen Partikelmassen, aber nicht auf die Anteile an der gesamten Bodenprobe resp. die Bodengranulometrie.

$$m_p = \frac{\rho_p * (m_t - \rho_f * v_t)}{\rho_p - \rho_f}$$

Partikelmasse m_p (kg)
 Totalmasse m_t (kg)
 Totalvolumen v_t (m³)
 Partikeldichte ρ_p (kg/m³)
 Fluidichte ρ_f (kg/m³)

Um die Porosität zu bestimmen wird anhand des Volumens des Messzylinders die feuchte Dichte des Bodenmaterials bestimmt, woraus das Probenvolumen der verwendeten Probemasse berechnet werden kann. Aus dem Verhältnis Volumens der Partikelmassen der Probe zum Probenvolumen kann schliesslich die Porosität berechnet werden.

3.8 Übersicht der ausgewerteten Standorte

Die folgenden Tabellen 1 und 2 zeigen eine Übersicht der ausgewerteten Untersuchungsgebiete in denen Proben entnommen und ausgewertet wurden.

Teil SBB

Tabelle 1 : Übersicht Standorte Projektteil SBB

Gebiet	Anzahl Standorte	Projektteil
Rüschegg «Birrhübel» BE	1	Ermittlung Lösungsmittel
Grindelwald «Brandegg» BE	2	Validierung Verfahren
Plaffeien «Oberi Eltschinger» FR	2	Validierung Verfahren
Wolhusen »Schafrage» LU	1	Validierung Verfahren
Serine, Begnins VD	3	Validierung Verfahren
Bressonaz «Bois de Sepey» FR	2	Validierung Verfahren

Teil AWN

Tabelle 2 : Übersicht Standorte Projektteil AWN

Gebiet	Anzahl Standorte	Projektteil
Rüschegg «Birrhübel» BE	1	Validierung Verfahren / Überprüfung der Norm
Trubschachen «Chrümpelgrube» BE	1	Validierung Verfahren / Überprüfung der Norm
Trub «Riedwald» BE	1	Validierung Verfahren / Überprüfung der Norm
Därstetten «Zihl» BE	1	Validierung Verfahren / Überprüfung der Norm
Diemtigen «Trogmatte» BE	1	Validierung Verfahren / Überprüfung der Norm

4 Ergebnisse

Das Ergebniskapitel kann in 5 Teile gegliedert werden:

1. Der Methodenteil, der die Ermittlung des besten Lösungsmittels für die Flaschenmethode beschreibt. In diesem Teil werden ausserdem die Einflüsse unterschiedlicher Probemengen (200g / 400g) und Berechnungsparameter (Fluidichte, Berechnungsmethode Massenanteile) auf die Resultate der Korngrössenverteilung eruiert.
2. Die Validierung des Verfahrens, bei dem für 10 Standorte des Projektteiles SBB und 5 Standorte des Projektteiles AWN die Resultate von Laboranalysen mit denen des vereinfachten Verfahrens verglichen werden.
3. Die Ausarbeitung und Validierung eines Ausschlussschemas aus Daten der Norm SN 670010b (VSS 1999), mit dem anhand der Anteile der Bodenfraktionen (Kies/Sand/Schluff/Ton) der effektive innere Reibungswinkel (ϕ') des Bodens und die effektive Kohäsion (c') bestimmt werden können. Dieses Schema wird für die 10 ausgewerteten Standorte geprüft. Mit dem Vergleich der 5 Direktscherversuche des Projektteiles AWN können die Resultate des Ausschlussschema validiert werden.
4. Die Auswertung der ergänzenden Labordaten um Korrelationen zwischen bodenmechanischen Parametern und USCS-Bodentypen zu überprüfen/ergänzen.
5. Die Aufwandschätzung des Verfahrens im Vergleich zu alternativen Methoden.

4.1 Methodenteil

4.1.1 Ermittlung Dispergierungsmittel

Erste Versuche haben gezeigt, dass bei dem vereinfachten Sedimentationsverfahren Tonanteile tendenziell unterschätzt wurden. Es galt die Annahme, dass die Bodenfraktionen nicht ausreichend voneinander gelöst wurden, da zu wenig oder das falsche Dispergierungsmittel zum Einsatz kamen. Deshalb wurde der Einfluss verschiedener Dispergierungsmittel mit derselben Dosierung geprüft. Dazu wurde ein Boden mit vermutet hohem Ton- und Schluffanteil untersucht (Rüschegg «Birrhübel»), für den 5 Siebanalysen in einem geotechnischen Labor durchgeführt wurden, die als Referenzwert dienen sollten. Für die Ermittlung des besten Dispergierungsmittels wurden 4 Varianten gemäss Tabelle 3 geprüft. Für jede Variante wurden je 5 Versuche mit 2 Probemassen (200g / 400g Feuchtmasse) durchgeführt, was insgesamt 50 Versuche ergab. Die Resultate pro Bodenfraktion werden folgend beschrieben.

Tabelle 3 : Übersicht Varianten Dispergierungsmittel

Variante	Dosierung	Beschrieb
«Geschirrspülmittel»	10 % des Gewichtes der Bodenprobe	Herkömmliches Geschirrspülmittel in Pulverform, gekauft im Detailhandel.
«Zitronensäure und Salz»	Salz 10 % des Gewichtes der Bodenprobe, Zitronensäure 5 % des Gewichtes der Bodenprobe	Salz und Zitronensäure aus Detailhandel.
«NA6O18P6»	10 % des Gewichtes der Bodenprobe	Natriumhexametaphosphat gekauft bei Chemielieferant, Kauf ohne Sonderbewilligung möglich. Gängiges Dispergierungsmittel bei Laboranalysen in geotechnischen Laboren.
«Kein Dispergierungsmittel»		Keine Zugabe eines Dispergierungsmittels

Die Laboranalysen ergaben einen sehr tiefen Kiesanteil, der bei allen 5 Proben unter 0.5% lag (Abbildung 6). Bei einer Probenmasse von 200g wurde der Kiesanteil mit allen geprüften Varianten innerhalb eines tolerierbaren Fehlerbereiches von deutlich unter 10% geschätzt. Bei einer Probenmasse von 400g war die Abweichung einzig bei «NA6O18P6» erhöht, wobei die Streuung der Werte klein ist.

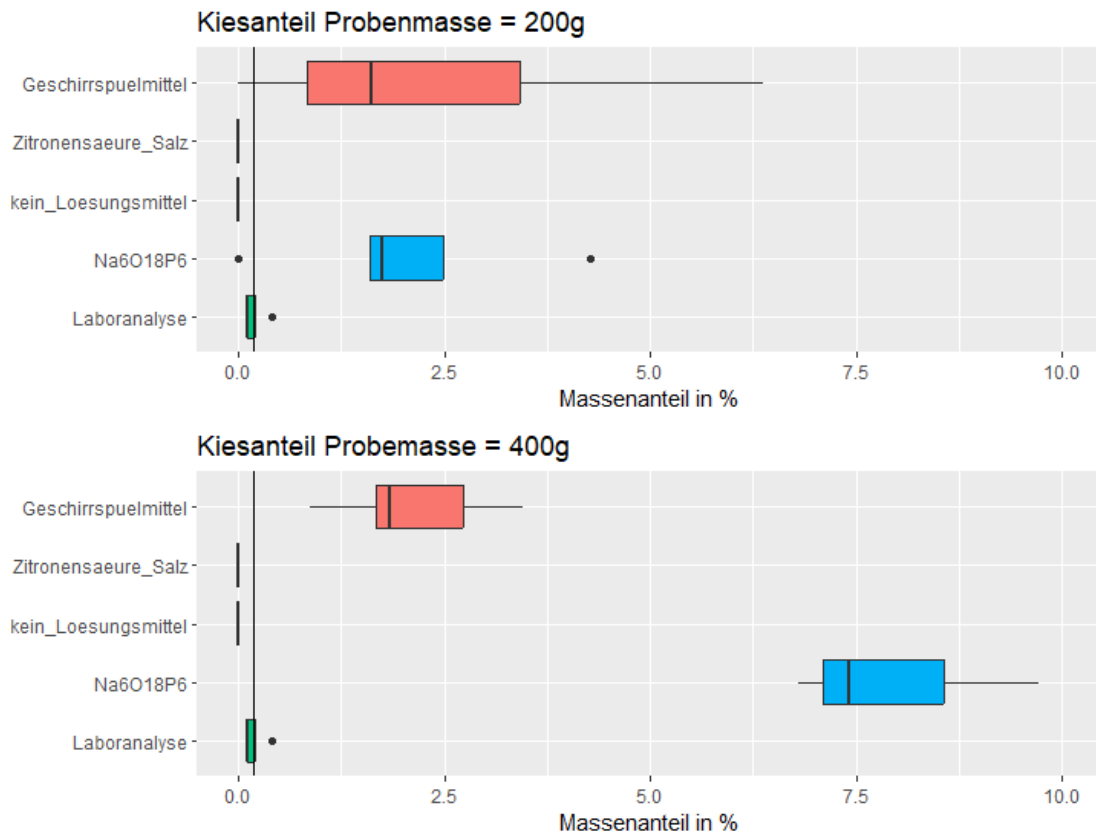


Abbildung 6 : Vergleich berechneter Kiesanteile mit unterschiedlichen Dispergierungsmitteln im Vergleich zur Laboranalyse, der schwarze Strich über alle Varianten entspricht dem Mittelwert der Laboranalyse

Der Sandanteil der Laboranalysen wurde bei einer Probemasse von 200g durch die Variante «Geschirrspülmittel» am besten geschätzt (Abbildung 7). Bei «Zitronensäure und Salz» wird die Abweichung bei der kleinen Probemasse als tolerierbar angesehen, während bei den Varianten «kein Lösungsmittel» und «NA6O18P6» sehr grosse Abweichungen zustande kamen. Bei einer Probemenge von 400g wurde der Wert der Laborprobe von der Variante «Zitronensäure und Salz» am besten geschätzt, «kein Lösungsmittel» und «NA6O18P6» lieferten wiederum nicht brauchbare Resultate.

Der Schluffanteil der Laborprobe wird bei beiden Probemassen von «Zitronensäure und Salz» am besten repräsentiert, auch die Variante «Geschirrspülmittel» ist im 10%-Fehlerbereich (Abbildung 8). Auffällig ist, dass beim Schluffanteil die Streuung der Werte bei allen 4 Varianten deutlich tiefer ist, als dies bei der Sand- und Kiesfraktion der Fall ist, nur wenn kein Lösungsmittel zugegeben wird, streuen die Werte breiter. Die Werte der Variante «NA6O18P6» unterscheiden sich sehr deutlich von denen der Laborprobe. Bei der Bestimmung des Tonanteiles liefern die Varianten «Zitronensäure und Salz» und «Geschirrspülmittel» die besten Resultate (Abbildung 9). Wird kein Lösungsmittel zur Probe gegeben, wird der Tonanteil deutlich unterschätzt, während er mit der Variante «NA6O18P6» deutlich überschätzt wird.

Der Vergleich der verschiedenen Dispergierungsmittel hat gezeigt, dass die besten Resultate über alle Fraktionen durch «Zitronensäure und Salz» und «Geschirrspülmittel» erzielt wurden. Der Kiesanteil könnte durch die Inhomogenität der Probe, resp. durch die Entnahme der Probemasse aus einer Probe verfälscht werden: Wird aus einem Plastikbeutel mit einer Zylinderprobe 200g Probematerial entnommen, das einen grösseren Stein von z.B. 50g beinhaltet, kann dieser die Probe entscheiden

beeinflussen. Es sollte auch bedacht werden, dass das Volumen des Probezylinders von 0.785 L nur für die Korndurchmesser < 20mm als repräsentativ angesehen werden kann, denn je grösser die grösste Korngrösse ist, desto grösser muss die entnommene Probemasse sein. Deshalb sollten in Böden mit Korndurchmessern > 20 mm repräsentativen Probenmassen (je nach maximaler Korngrösse im Boden bis 40kg, gemäss Schweizer Norm) entnommen werden. Idealerweise werden für weitere Analysen Grobkomponenten > 20mm bereits im Feld extrahiert, sodass nur der Probenanteil mit Korndurchmessern < 20mm mitgenommen werden muss. Für die in diesem Projektteil analysierten Probevolumen des Metallzylinders werden die Resultate als repräsentativ angesehen, lediglich bei der Probe «Plaffeien Weide» schienen grössere Steine die Resultate entscheidend zu beeinflussen. Deshalb wird diese Bodenprobe für die Auswertungen über alle 10 Proben SBB (Kapitel 4.1.2 und 4.1.3) nicht berücksichtigt, bei den Auswertungen die nur die einzelnen Standorte betreffen (Kapitel 4.2 und 4.3) wurde der Standort trotzdem abgebildet.

Die Sandanteile wurden von allen Dispergierungsmitteln unterschätzt. Bei der Validierung der Methode wurde festgestellt, dass bei der Nasssiebung des Kiesel relativ grosse Sandanteile im Sieb verbleiben. Deshalb wurde bei den folgenden Analysen der Sand durch das Sieb gespült.

Bei den Ton- und Schluffanteilen zeigte «NA6O18P6», welches auch in geotechnischen Laboren verwendet wird, erstaunlich grosse Abweichungen. Dies könnte an der Dosierung liegen: Durch eine zu hohe Dosierung könnte die Sedimentation der Schluffpartikel verlangsamt werden, wodurch der Tonanteil deutlich überschätzt wird. Zusätzlich zur Dosierung in Relation zum Probengewicht wurden auch Versuche mit einer 10-prozentigen NA6O18P6-Lösung durchgeführt, diese Analyse zeigte jedoch nur eine sehr geringfügige Abweichung und wurde deshalb nicht dargestellt. Um «NA6O18P6» optimal einsetzen zu können, wären weitere Untersuchungen nötig. Zwar erzielte die Variante «Geschirrspülmittel» erstaunlich gute Resultate, jedoch erwies sie sich als nicht praktikabel: Einerseits wird durch das Geschirrspülmittel Druck erzeugt, wodurch es beim Öffnen der Flasche zum überschäumen kommt, andererseits wird das Granulat trotz starkem Schütteln nicht vollständig gelöst.

Deshalb wurde für die weiteren Analysen (10 Standorte) die Variante «Zitronensäure und Salz» gewählt. Beide Probenmassen (200g/400g) zeigten einen Fehler im ähnlichen Bereich, insbesondere weil der Anteil von Korngrössen >2-20 mm durch eine grössere Probemasse besser repräsentiert wird, wurde für die folgenden Analysen mit 400g Probemasse durchgeführt.

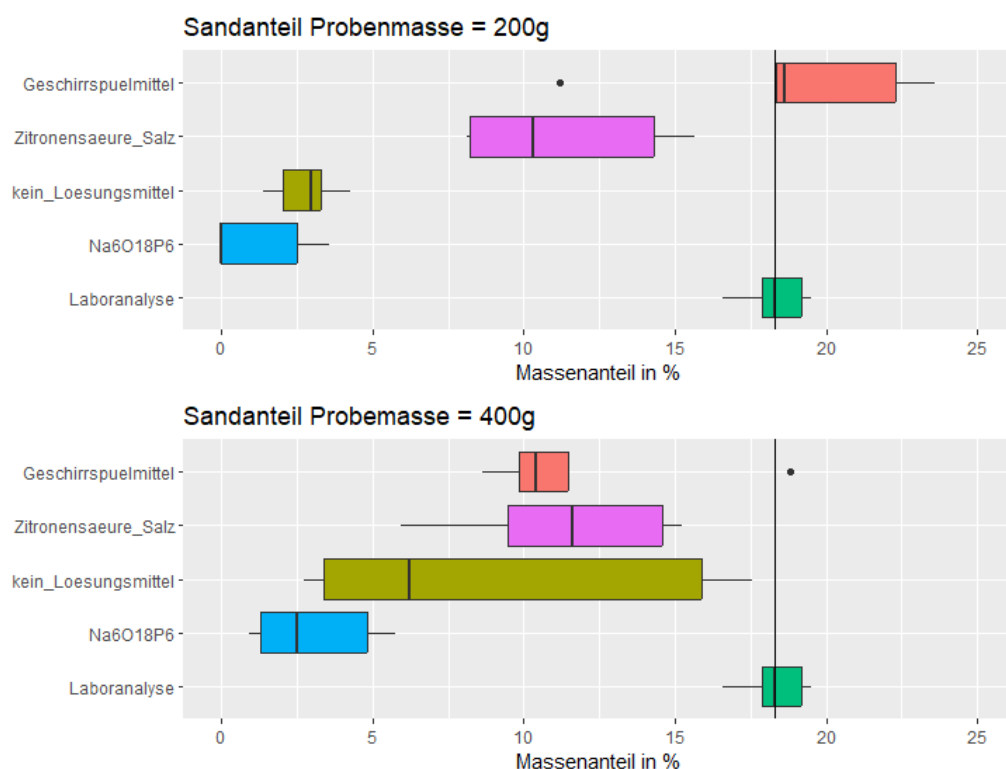


Abbildung 7 : Vergleich berechneter Sandanteile mit unterschiedlichen Dispergierungsmitteln im Vergleich zur Laboranalyse, der schwarze Strich über alle Varianten entspricht dem Mittelwert der Laboranalyse

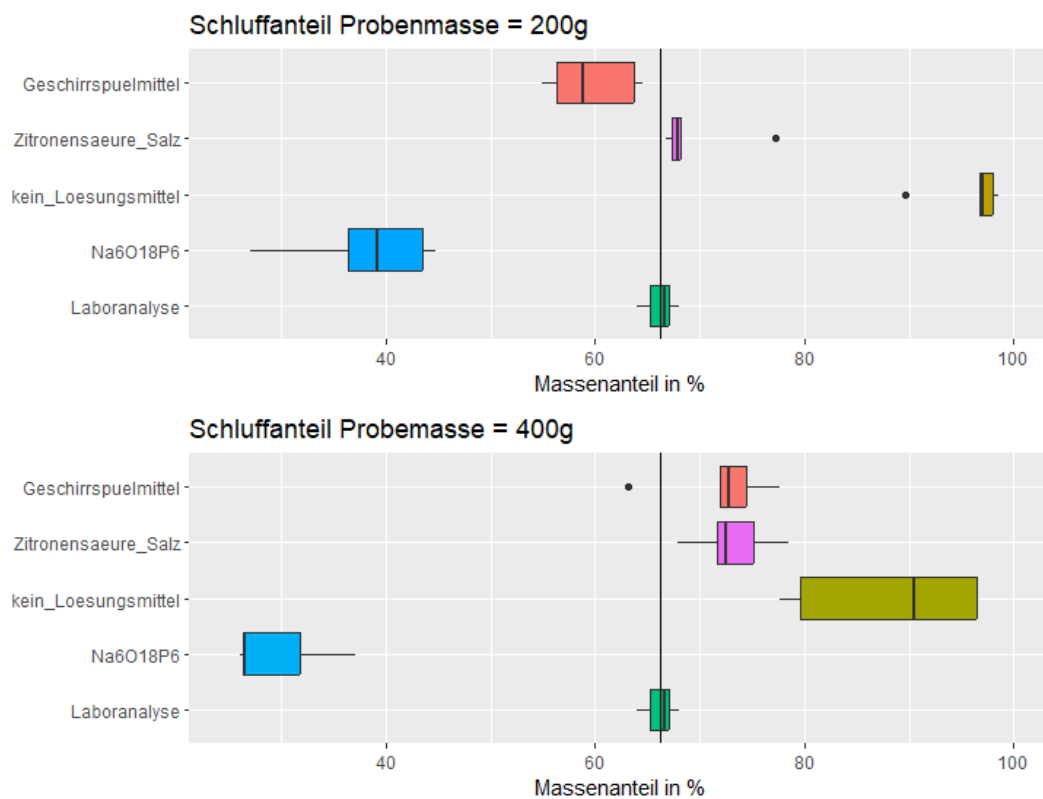


Abbildung 8 : Vergleich berechneter Schluffanteile mit unterschiedlichen Dispergierungsmitteln im Vergleich zur Laboranalyse, der schwarze Strich über alle Varianten entspricht dem Mittelwert der Laboranalyse

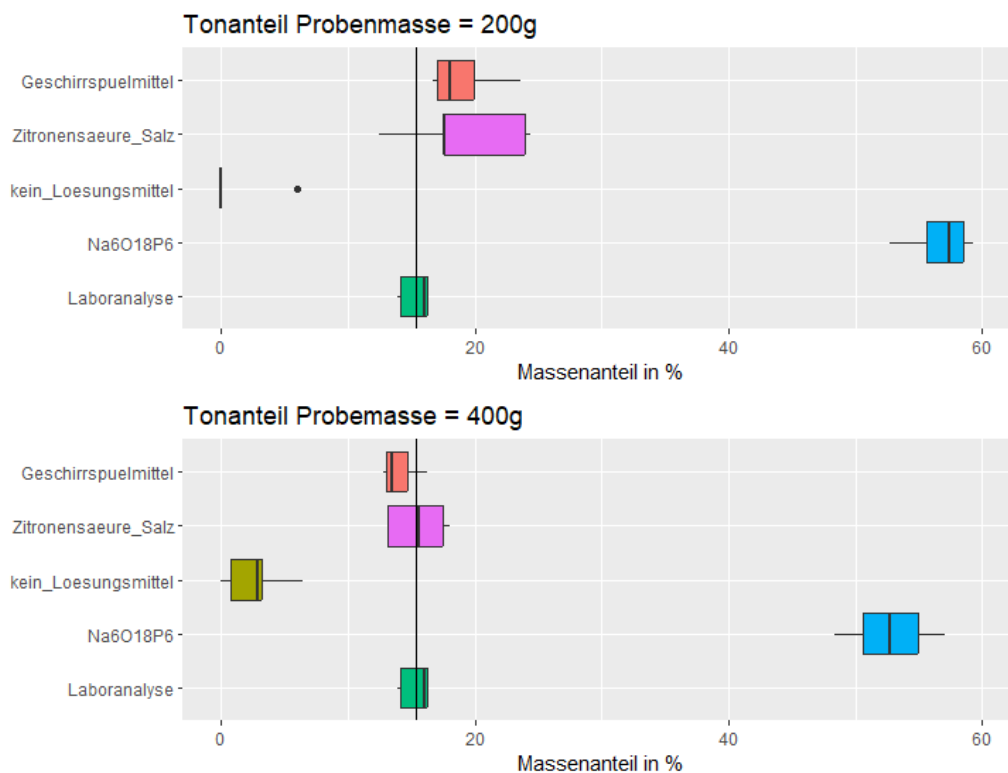


Abbildung 9 : Vergleich berechneter Tonanteile mit unterschiedlichen Dispergierungsmitteln im Vergleich zur Laboranalyse, der schwarze Strich über alle Varianten entspricht dem Mittelwert der Laboranalyse

4.1.2 Einfluss der Fluidichte

In Abbildung 10 ist der Einfluss der Fluidichte auf die absoluten Fehler der einzelnen Bodenfraktionen ersichtlich (45 Proben der 10 Standorte mit Zitronensäure und Salz). Ziel dieser Analyse war es, den Einfluss der für die Gleichung zur Massenbilanz angenommenen Fluidichte zu prüfen (vgl. Kapitel 3.7). Da keine detaillierten chemischen Berechnungen zu den einzelnen Dispergierungsmitteln gemacht wurden, sollte so eruiert werden, welcher Wert die besten Resultate liefert. Die Werte wurden anhand der Wasserdichte bei 20° (0.998 g/ml), der maximalen Wasserdichte bei 4° (1.0 g/ml), sowie 2 erhöhten Dichten (1.04 und 1.08 g/L, unter der Annahme dass ein Teil des verwendeten Salzes im Wasser gelöst ist) berechnet. Bei einer Fluidichte von 1.0 g/L wurde über alle Bodenfraktionen die besten Resultate erzielt. Ein Teil des verwendeten Salzes scheint im Wasser gelöst zu sein, da bei einer Raumtemperatur im Bereich von 20° (keine genormte Raumtemperatur) gearbeitet wurde, auch wenn sich die 2 tiefsten Fluidichten nur beim Fehler des Tonanteils merklich unterscheiden.

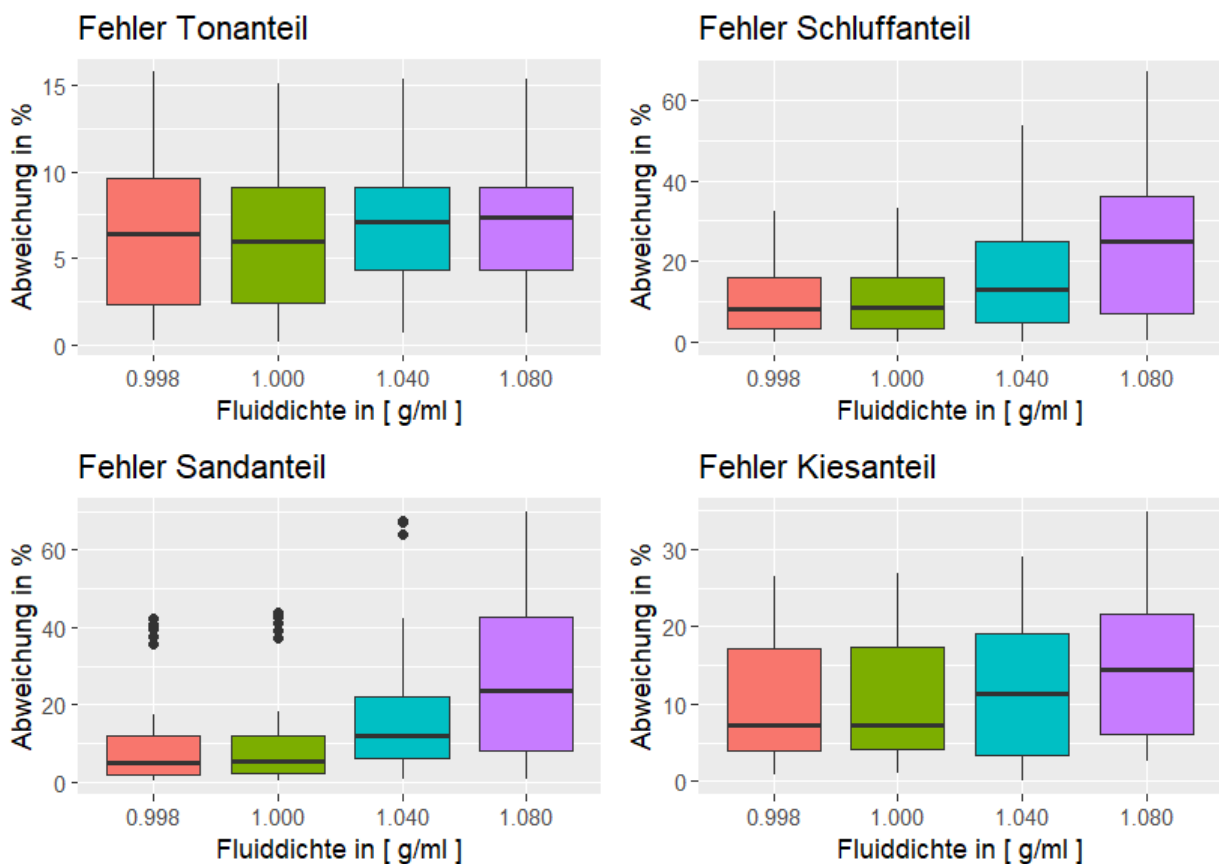


Abbildung 10: Absoluter Fehler aller mit der Flaschenmethode analysierten Proben Teil SBB ohne Plaffeien Weide (n=45) zum Wert der Laboranalysen (n=10) mit unterschiedlichen Annahmen zur Fluidichte.

4.1.3 Berechnungsmethode Anteil Bodenfraktion

Um den die Anteile der Bodenfraktionen zu berechnen, wurde 2 unterschiedliche Berechnungsmethoden geprüft (Abbildung 10). Bei der Berechnungsmethode A werden die Anteile anhand der Summe der einzelnen Partikelmassen berechnet. Dabei werden eventuelle Verluste nicht in der Gesamtmasse berücksichtigt.

$$\text{Anteil Fraktion} = \frac{\text{Partikelmasse Fraktion}}{\sum \text{Partikelmasse aller Bodenfraktionen}}$$

Bei der Berechnungsmethode B wurden versucht, Verluste zu berechnen, indem für das Gesamtgewicht der Bodenprobe jeweils die Anteile der bereits bestimmten Bodenfraktionen berücksichtigt wurden. Mit folgender Gleichung wurde beispielsweise der Sandanteil mit der Berechnungsmethode B bestimmt:

$$\text{Anteil Sand} = \frac{\text{Partikelmasse Sand}}{\text{Partikelmasse Schluff/Ton/Sand} + \text{Anteil Kies} * (\text{Partikelmasse Kies} + \text{Partikelmasse Schluff/Ton/Sand})}$$

Der Vergleich der beiden Berechnungsmethoden zeigte keine deutlichen Unterschiede (Abbildung 11). Während mit der Berechnungsmethode A die Kiesanteile besser geschätzt wurden, konnte mit Berechnungsmethode B dies Ton- und Sandanteile etwas besser schätzen.

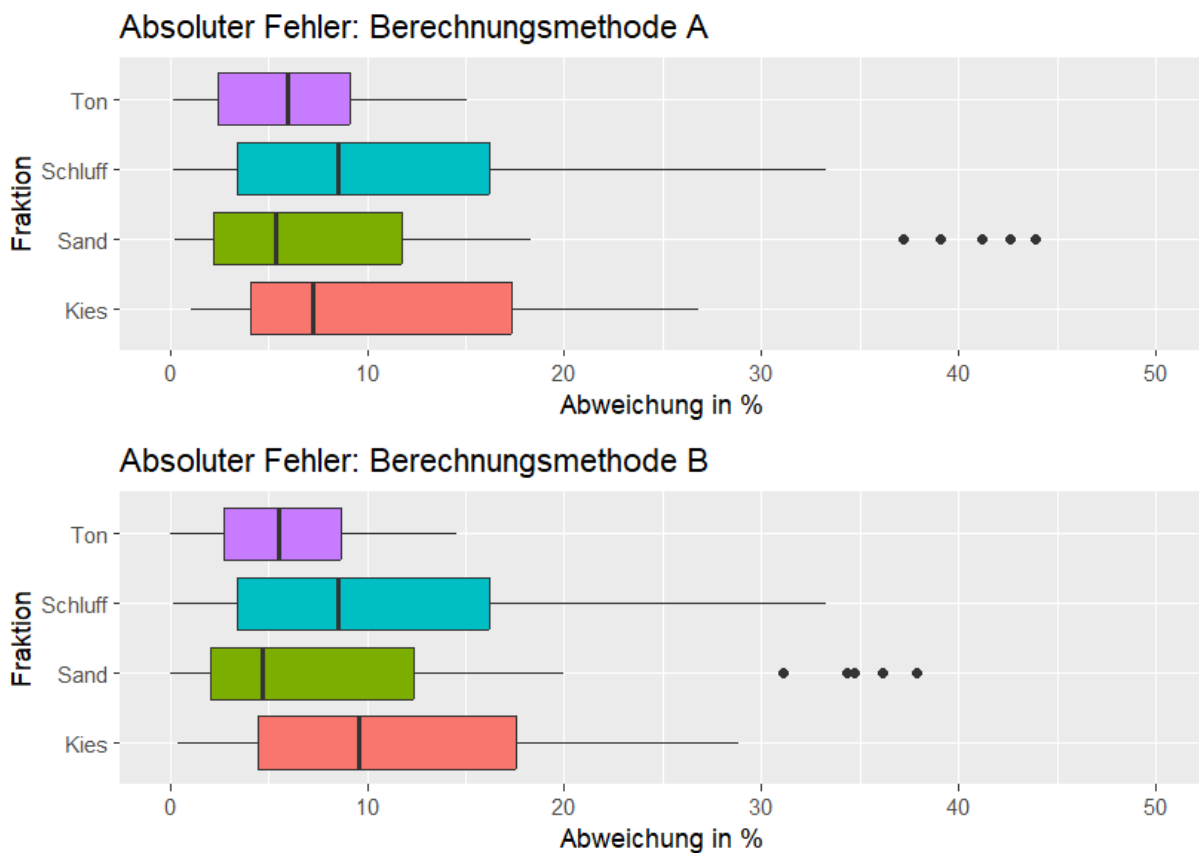


Abbildung 11: Absoluter Fehler aller mit der Flaschenmethode analysierten Proben Teil SBB ohne Plaffeien Weide (n=45) zum Wert der Laboranalysen (n=10) je nach Berechnungsmethode (A und B).

4.2 Einzelne Kornverteilungskurven

In diesem Kapitel werden die berechneten Kornverteilungskurven der einzelnen Standorte beschrieben, die Berechnungen wurden mit einer Fluidichte von 1.0 g/ml und der Berechnungsmethode A durchgeführt. Die linke Grafik zeigt jeweils den Vergleich der Kornverteilungskurve aus den Labordaten mit denen der vereinfachten Flaschenmethode, der graue Bereich ist die Streuung der 5 Sedimentationsversuche. Die rechte Grafik zeigt jeweils den absoluten Fehler der Bodenfraktionen, die mit der vereinfachten Flaschenmethode berechnet wurde zum Referenzwert der Laboranalyse. Die Porosität wurde anhand einer Feststoffdichte von 2600 kg / m³ berechnet.

4.2.1 Standorte Projektteil SBB

Die Kornverteilungskurve der Labordaten der Probe Serine A konnte mit der vereinfachten Flaschenmethode gut reproduziert werden, lediglich der Schluffanteil wurde etwas überschätzt. Auffällig ist die geringe Streuung der Werte (Abbildung 12).

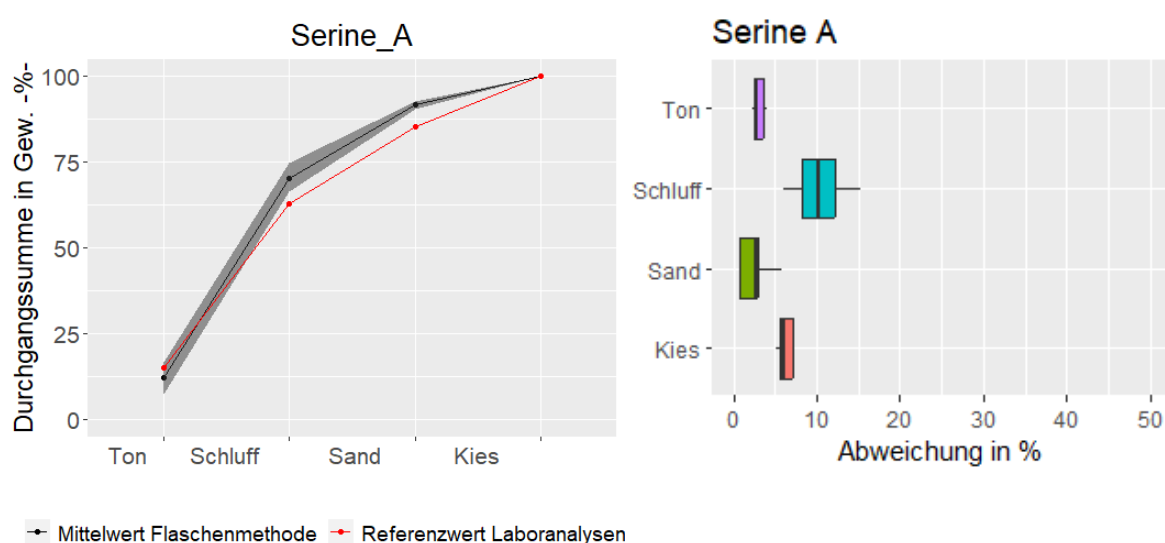


Abbildung 12: Kornverteilungskurven Standort Serine A

Beim Standort Serine B wurde der Tonanteil deutlich überschätzt, wodurch die ganze Kurve angehoben wurde (Abbildung 13). Die Werte aus den vereinfachten Sedimentationsversuchen zeigen beim Sand und Kies eine deutlich höhere Streuung als bei der Probe Serine A, was durch sehr kleinräumige Unterschiede der Bodenzusammensetzung begründet werden könnte.

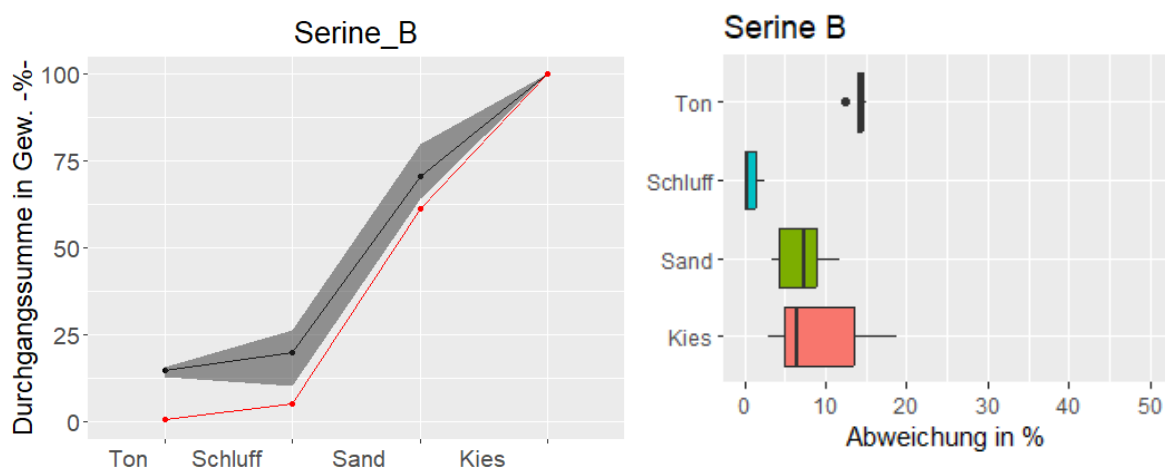


Abbildung 13 : Kornverteilungskurven Standort Serine B

Bei der Probe Serine C konnten Ton- und Kiesanteil gut geschätzt werden, während der Schluffanteil deutlich unterschätzt und der Sandanteil deutlich überschätzt wurde (Abbildung 14).

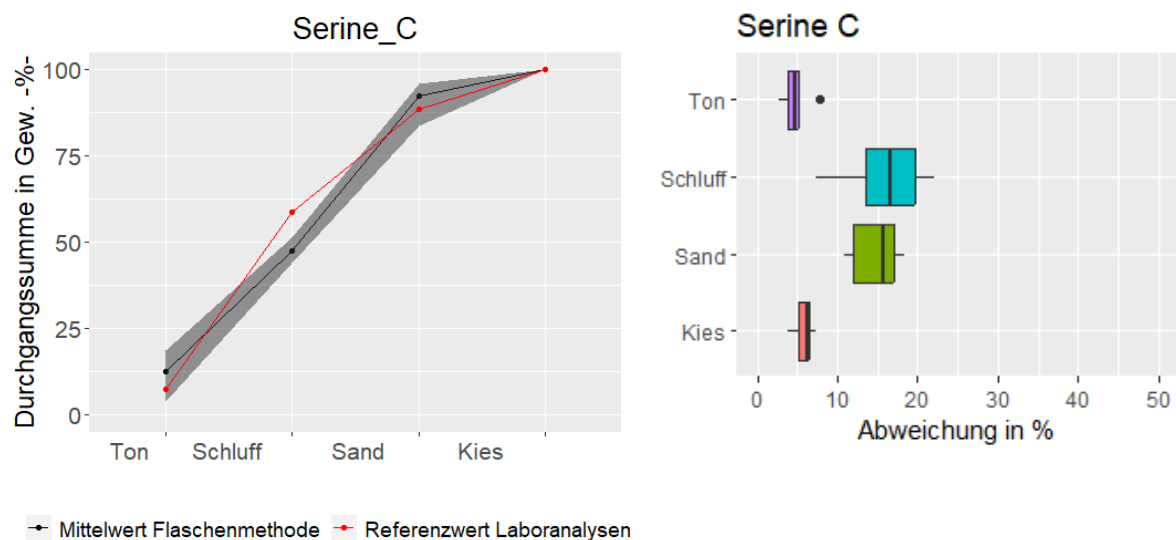


Abbildung 14: Kornverteilungskurven Standort Bressonaz 1

Die Auswertung des Standortes Bressonaz 1 ergab für alle Fraktionen ausser Ton eine sehr schlechte Reproduktion der Anteile aus den Laboranalysen (Abbildung 15). Da die Streuung der Flaschenmethode gernig ist, kann für diesen Standort angenommen werden, dass die Probe der Laboranalyse nicht exakt an demselben Ort wie die Proben der Flaschenmethode genommen wurden resp. dass an diesem Standort kleinräumig grosse Unterschiede in der Bodenzusammensetzung existieren.

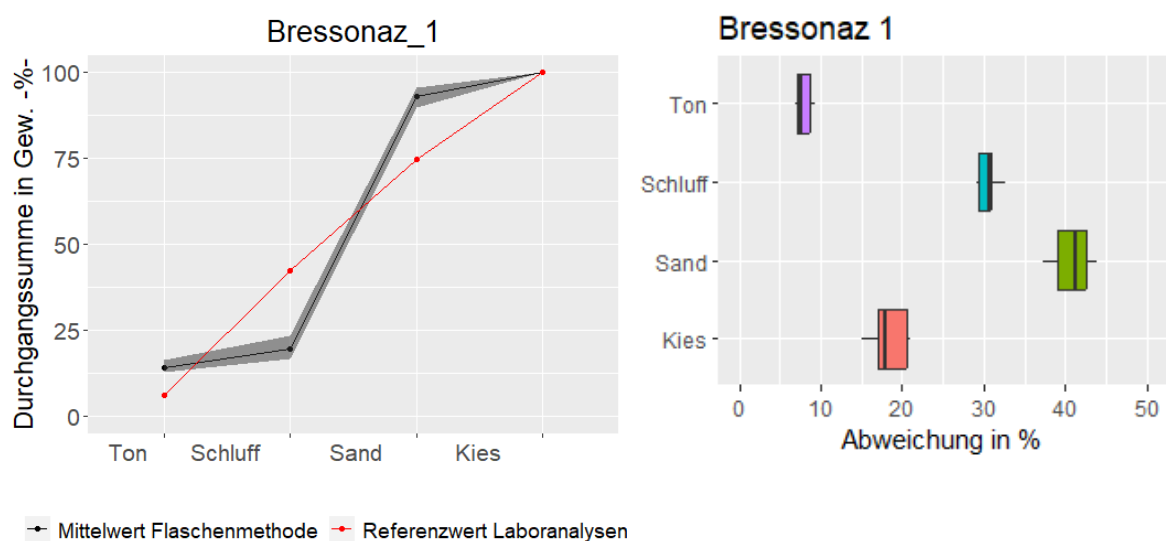


Abbildung 15 : Kornverteilungskurven Standort Bressonaz 1

Bei dem Standort Bressonaz 2 konnte die Korngrößenverteilung der Labordaten relativ gut wiedergegeben werden, auch wenn die Streuung beim Kiesanteil relativ gross ist (Abbildung 16).

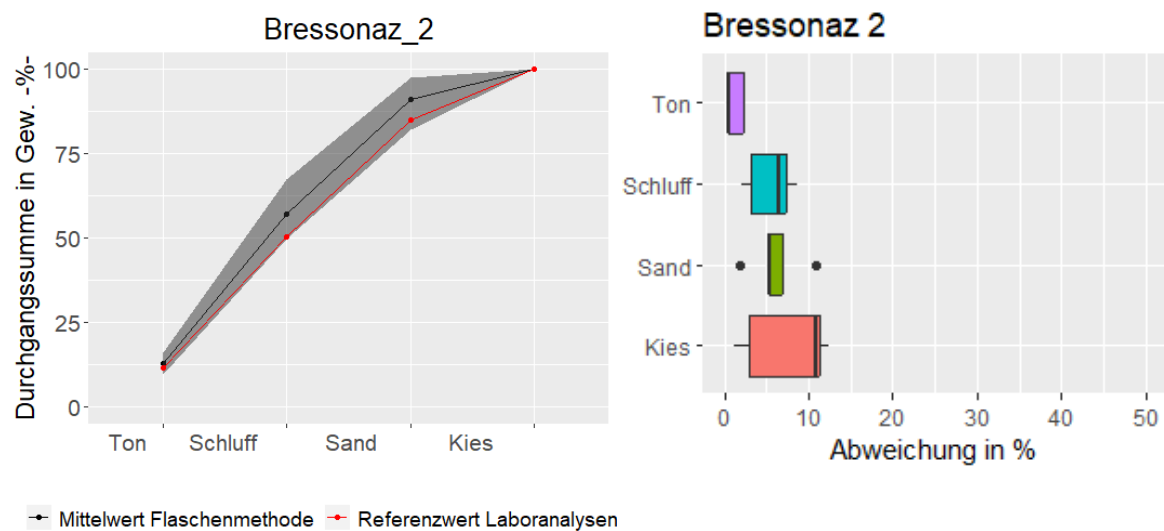


Abbildung 16 : Kornverteilungskurven Standort Bressonaz 2

Der Standort Grindelwald Wiese ergab eine deutlichere Abweichung beim Kiesanteil, der unterschätzt wurde und beim Tonanteil, der überschätzt wurde (Abbildung 17).

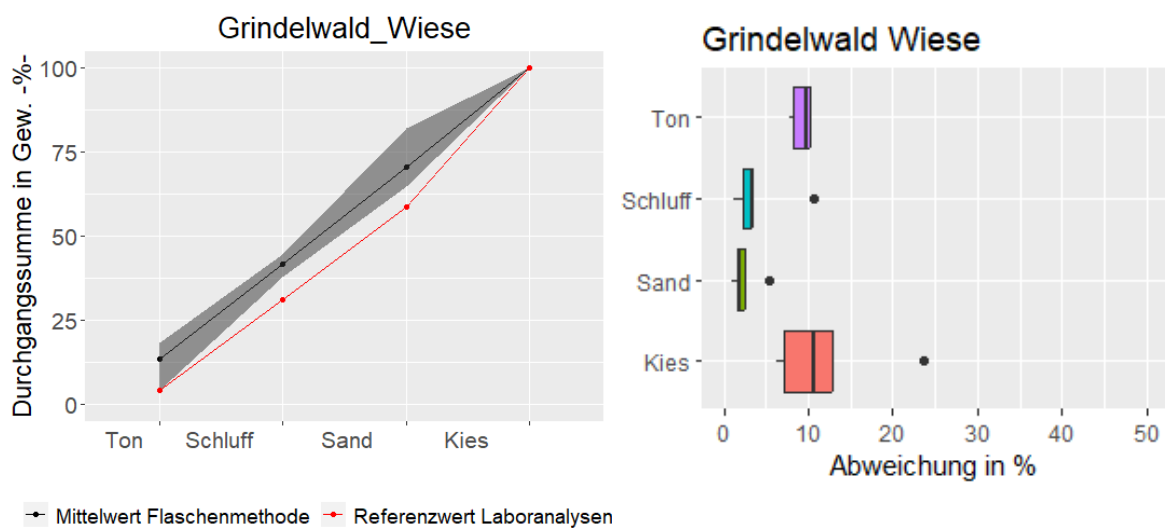


Abbildung 17 : Kornverteilungskurven Standort Grindelwald Wiese

Wie auch beim Standort Grindelwald Weide wurde der Kiesanteil beim Standort Grindelwald Wald deutlich unterschätzt, wodurch die Form der Korngrößenverteilung verfälscht wird (Abbildung 18).

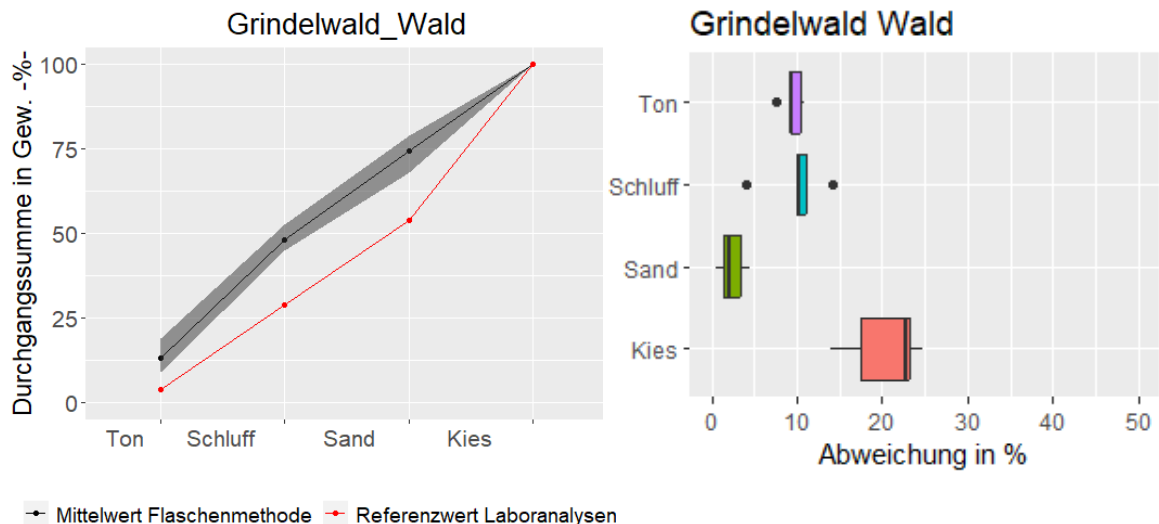


Abbildung 18 : Kornverteilungskurven Standort Grindelwald Wald

Die Analyse mit der vereinfachten Flaschenmethode der Bodenprobe Plaffeien Wald ergab sehr ähnliche Werte wie die Laboranalyse, die Abweichungen betrugen mehrheitlich deutlich unter 10% (Abbildung 19).

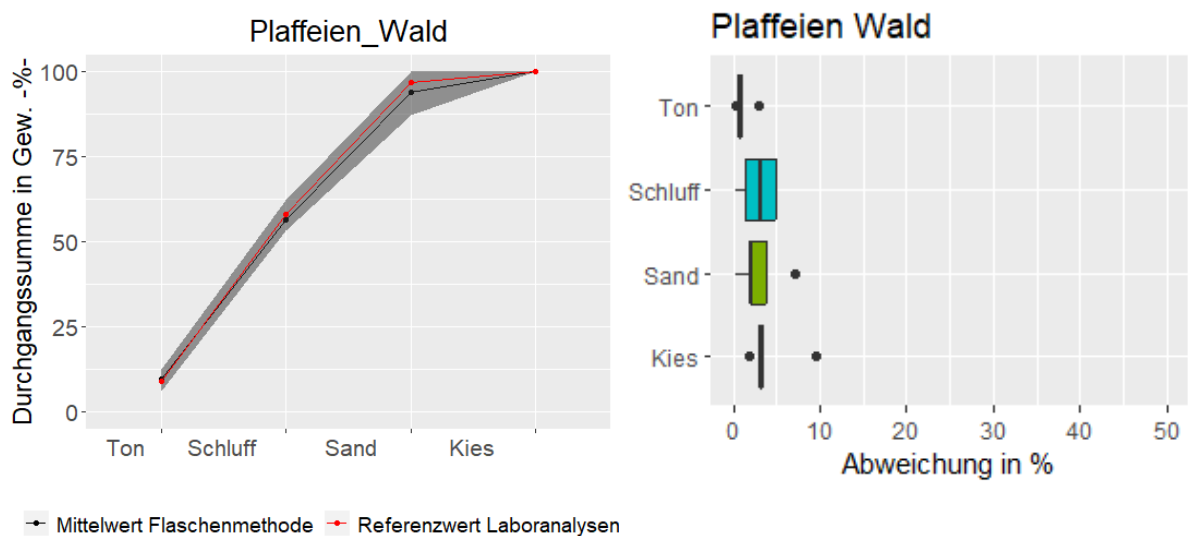


Abbildung 19 : Kornverteilungskurven Standort Plaffeien Wald

Beim Standort Plaffeien Weide wird die Analyse grundsätzlich nicht als repräsentativ angesehen, da die Probemengen für den grossen Anteil an Steinen nicht als repräsentativ angesehen wird (vgl. Kapitel 4.1). Dadurch wurde der Kiesanteil deutlich unterschätzt und die Korngrössenverteilung der Laboranalyse sehr schlecht abgebildet (Abbildung 20).

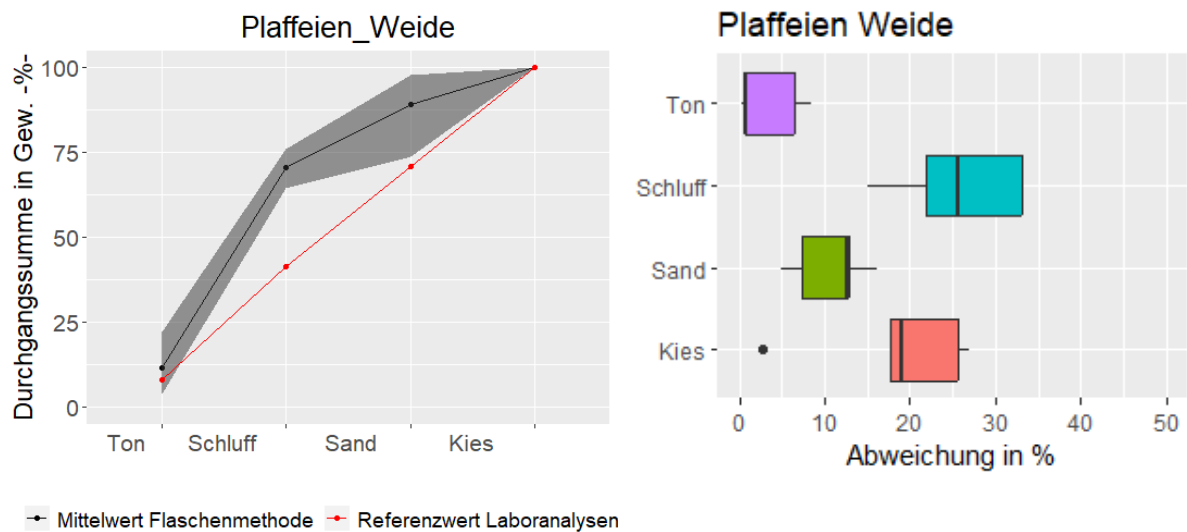


Abbildung 20 : Kornverteilungskurven Standort Plaffeien Weide

Die Kornverteilungskurve Laboranalyse wird von der Analyse mit der vereinfachten Flaschenmethode für den Standort Wolhusen gut wiedergegeben, die Abweichung lag mehrheitlich unter 10% wobei die Werte bei Sand und Schluff relativ breit streuten (Abbildung 21).

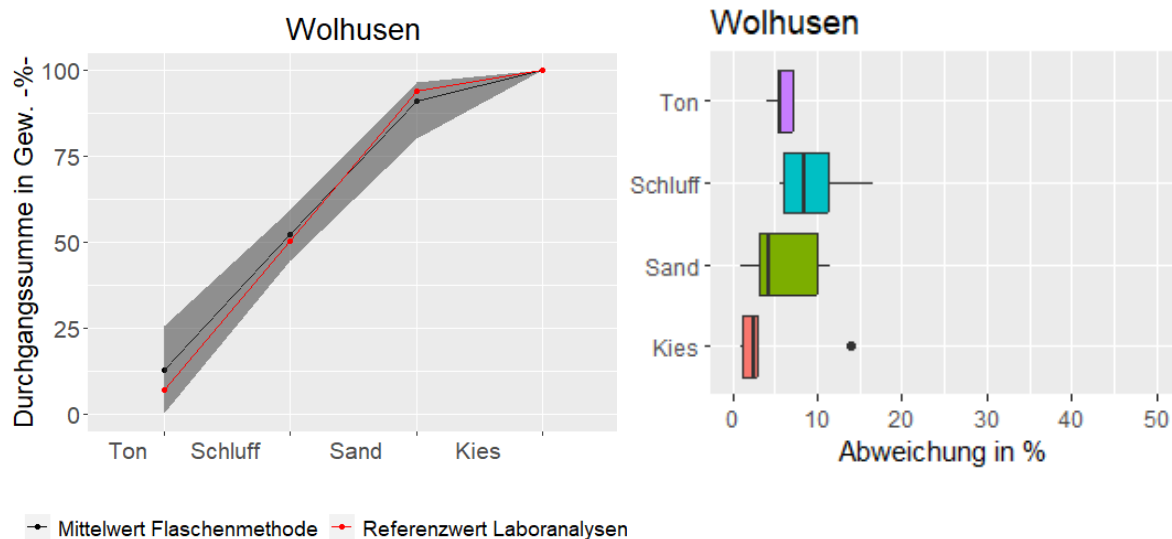


Abbildung 21 : Kornverteilungskurven Standort Wolhusen

In Abbildung 22 sind die berechneten Porositäten (%-Anteil Porenvolumen im Boden) der 10 Untersuchungsstandorte SBB dargestellt. In der Tabelle 4 sind die Mittelwerte der Berechnungen zusammengefasst, in der Spalte «Literaturwert» wurden zum Vergleich die Literaturwerte gemäss SN 670010b für die USCS-Klassifizierungen der Laboranalysen eingetragen.

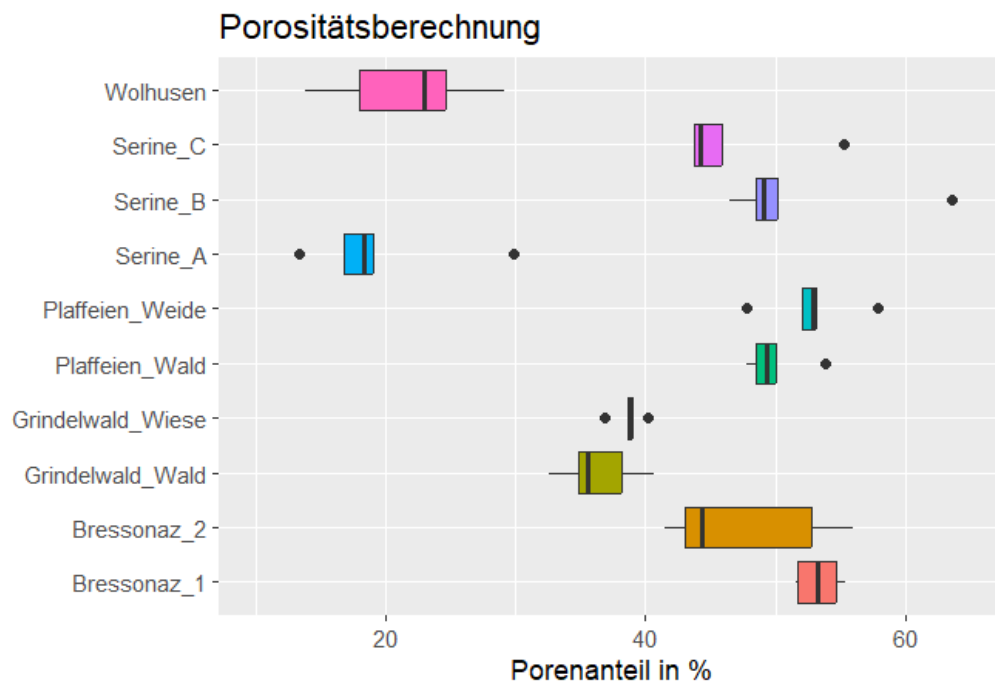


Abbildung 22 : Berechnete Porositätswerte in % für alle Proben (n=50) der 10 Untersuchungsstandorte SBB

Die Literaturwerte der Norm SN 670010b für die Porosität sind tendenziell tiefer, als die berechneten Werte der vereinfachten Flaschenmethode. Grössere Abweichungen sind besonders bei kiesig-sandigen Böden resp. nicht-kohäsiven Böden erkennbar.

Tabelle 4 : Porositätswerte aus der Flaschenmethode und Literaturwerte für die Laborwerte USCS

Standort	Mittelwert Flaschenmethode	USCS / Literaturwert
Wolhusen	22 %	CL-ML / 35 %
Serine C	47 %	CL / 35 %
Serine B	52 %	SP / 38 %
Serine A	19 %	CL / 35 %
Plaffeien Weide	53 %	SM / 38 %
Plaffeien Wald	50 %	ML / 44 %
Grindelwald Wiese	39 %	GM / 19 %
Grindelwald Wald	36 %	GC / 22 %
Bressonaz 2	46 %	CL / 35 %
Bressonaz 1	53 %	SC / 28 %

4.2.2 Standorte Projektteil AWN

Der hohe Tonanteil des Standortes Därstetten wurde durch das vereinfachte Flaschenverfahren deutlich unterschätzt (Abbildung 23), während der Schluffanteil deutlich überschätzt wurde. Der Tonanteil von fast 25% aus den Laboranalysen ist der mit Abstand höchste aller 15 analysierten Standorte.

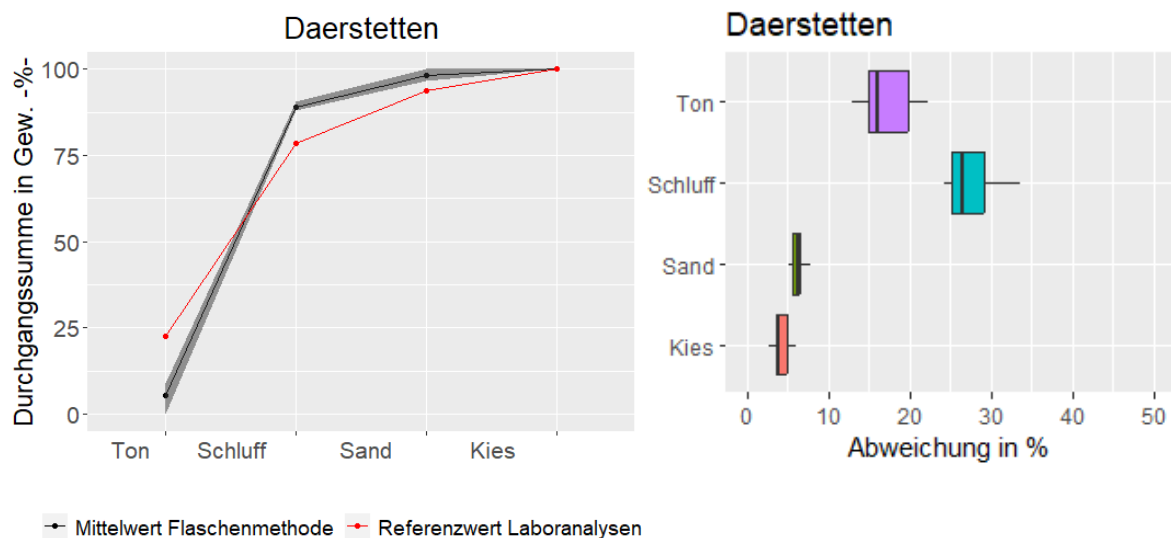


Abbildung 23 : Kornverteilungskurven Standort Därstetten

Die Laborwerte des Standortes Diemtigen (Abbildung 24) konnten mit der Flaschenmethode sehr gut reproduziert werden.

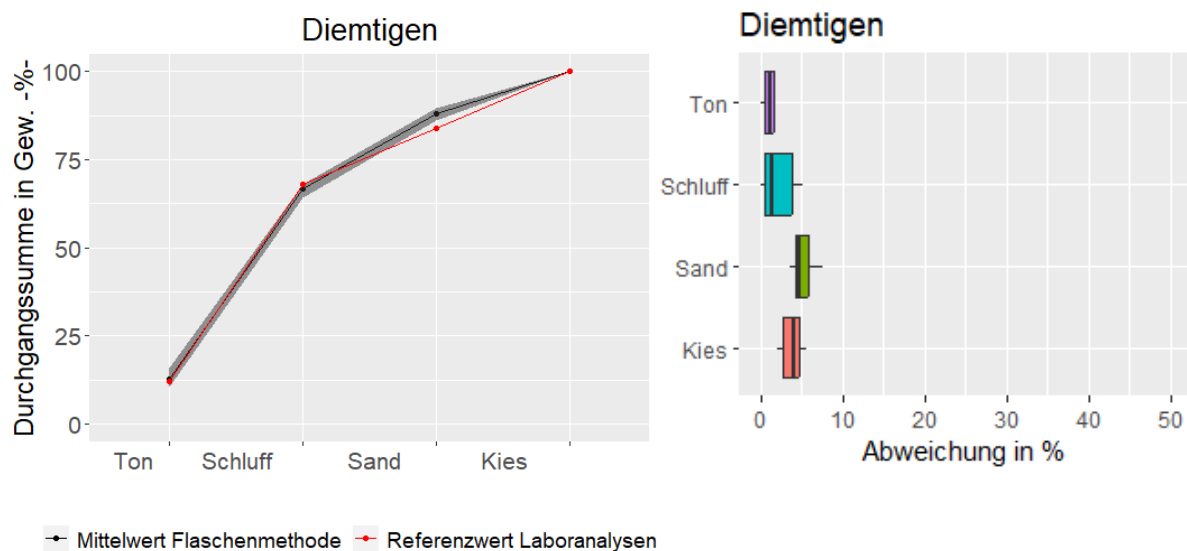


Abbildung 24: Kornverteilungskurven Standort Diemtigen

Die Anteile der Bodenfraktionen des Standorts Rüschegg konnten durch die Flaschenmethode sehr gut geschätzt werden. Über alle Proben, scheinen Böden mit kleinen Kiesanteilen in der Regel besser abgebildet werden zu können als solche mit grossen Anteilen (Abbildung 25).

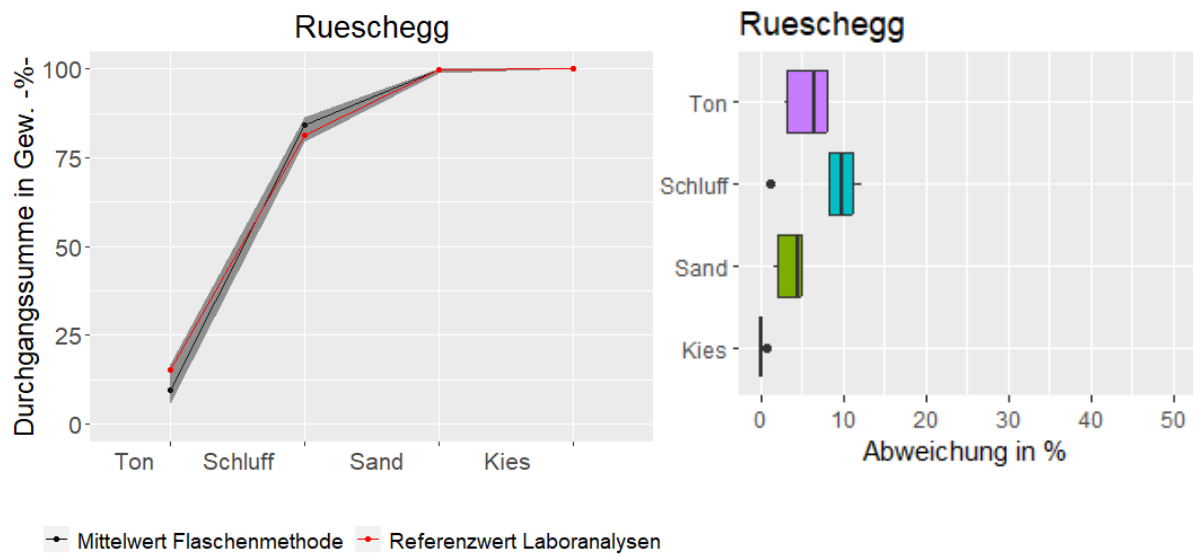


Abbildung 25: Kornverteilungskurven Standort Rueschegg

Beim Standort Trub lag der Fehler zwar mehrheitlich unter 10 %, durch einige Ausreisser ist die Streuung in der Grafik entsprechend gross. Die Probe diesen Standort wies einen bedeutenden Anteil Grobkomponenten $\varnothing > 20\text{mm}$ auf (Abbildung 26).

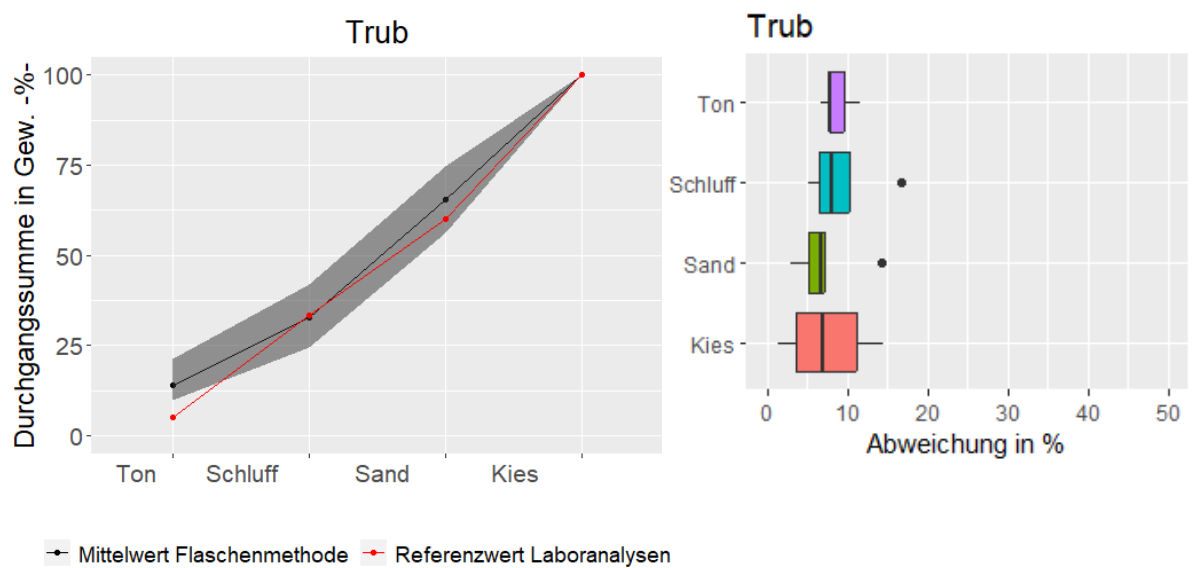


Abbildung 26: Kornverteilungskurven Standort Trub

Beim Standort in Trubschachen wurde der Schluffanteil deutlich überschätzt, während die restlichen Fraktionen gut abgebildet werden konnten (Abbildung 27).

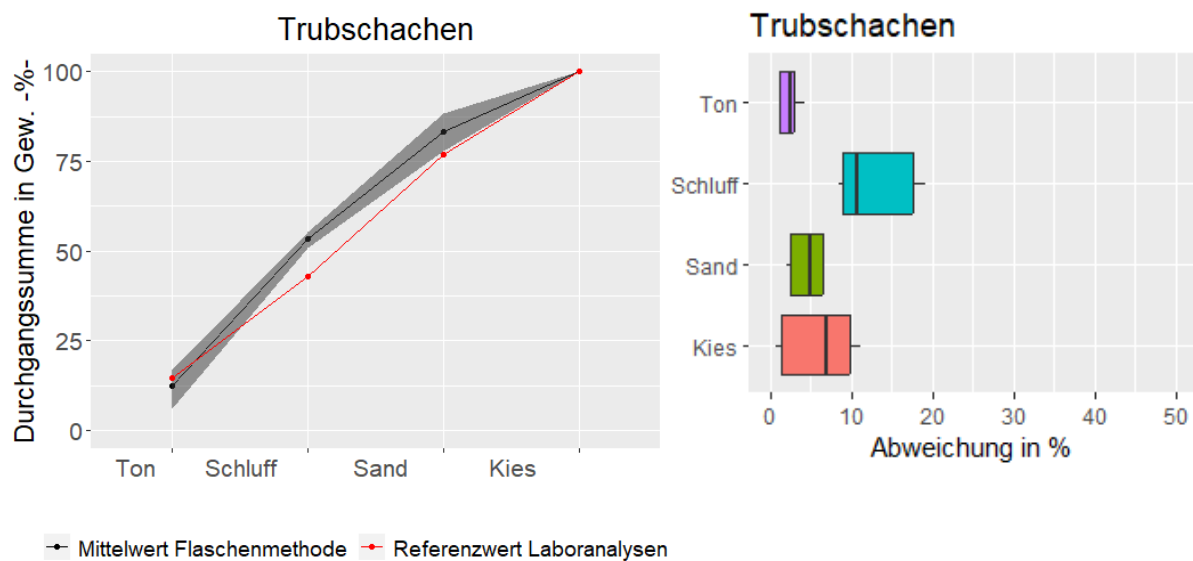


Abbildung 27: Kornverteilungskurven Standort Trubschachen

In Abbildung 28 sind die berechneten Porositäten (%-Anteil Porenvolumen im Boden) der 5 Untersuchungsstandorte AWN dargestellt. In der Tabelle 5 sind die Mittelwerte der Berechnungen zusammengefasst, in der Spalte «Literaturwert» wurden zum Vergleich die Literaturwerte aus der SN 670010b für die USCS-Klassifizierungen der Laboranalysen eingetragen.

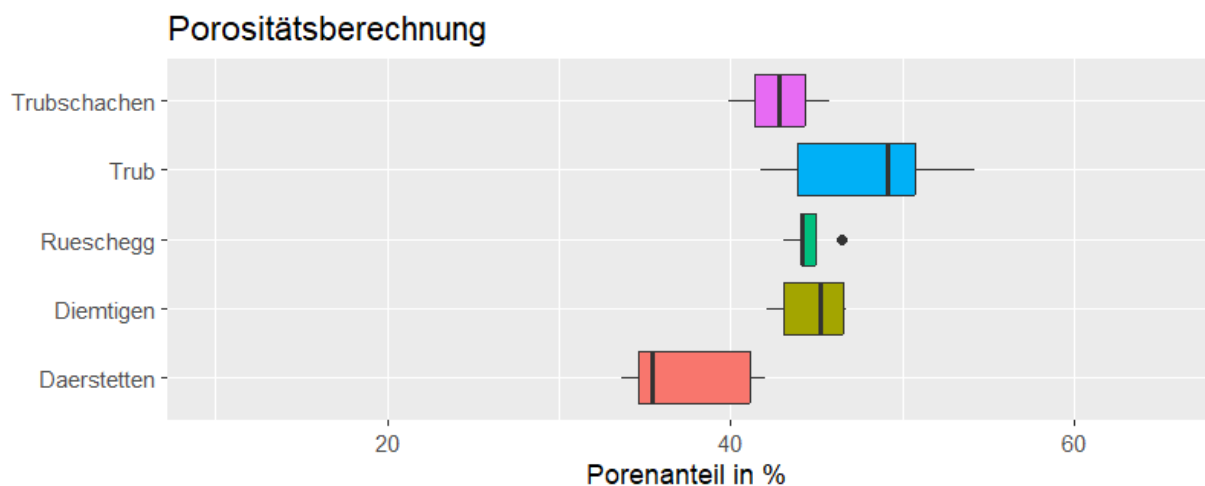


Abbildung 28 : Berechnete Porositätswerte in % für alle Proben (n=18) der 5 Untersuchungsstandorte AWN

Während die Porositätsberechnungen für den USCS-Typ Silt «ML» sehr gut mit dem Normwert übereinstimmen, werden sie für die kiesig-sandigen Böden wie auch bei den Standorten SBB deutlich überschätzt (Tabelle 5, vgl. Tabelle 4). Auch beim elastischen Silt «MH» resultieren mit der Flaschenmethode deutlich tiefere Werte als in der SN 670010b angegeben sind. Es gilt zu erwähnen, dass für den Standort «Trubschachen» nur 2 Probezylindermassen und für den Standort «Rueschegg» nur 1 Probezylindermasse verfügbar waren.

Tabelle 5 : Porositätswerte aus der Flaschenmethode und Literaturwerte für die Laborwerte USCS

Standort	Mittelwert Flaschenmethode	USCS / Literaturwert
Trubschachen	43 %	SC / 28 %
Trub	48 %	GC / 22 %
Rueschegg	45 %	ML / 44 %
Diemtigen	45 %	ML / 44 %
Daerstetten	37 %	MH / 62 %

4.3 Ausarbeitung und Validierung Ausschlussschema

4.3.1 Herleitung bodenmechanischer Parameter aus Normdaten

Um aus den bestimmten Korngrössenverteilungen bodenmechanische Parameter abzuleiten, wurden aus der Norm SN 670010b anhand der mittleren Kornverteilungskurve die Werte für alle USCS-Böden bestimmt (Abbildung 29). Für jeden USCS-Boden wurden ausserdem die bodenmechanischen Parameter und die Anzahl Versuche pro Parameter erfasst. Die Resultate sind in der Tabelle in Anhang 4 zusammengefasst. Aus den Daten der Norm wurde ein Ausschlussschema erstellt, mit dem die Böden nur anhand der Kornverteilung klassifiziert werden können. Mit diesem Schema ist werden die Böden anhand der Kornverteilung in Gruppen mit ähnlichen Scherparametern zusammengefasst (Anhang 1). Aus allen Böden dieser Gruppen wurden jeweils die pessimistischsten Werte für Kohäsion und Reibungswinkel gewählt. Die Kohäsion wurde nur bei Tonen und Silten berücksichtigt.

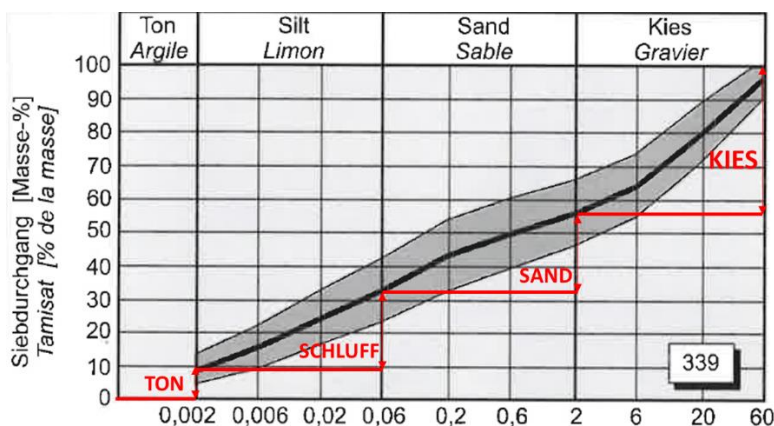


Abbildung 29: Beispiel für Bestimmung der Kornfraktionen aus der Norm SN 670010b, schwarze Linie entspricht der mittleren Kornverteilungskurve

Im Ingenieurwesen wird für Widerstandswerte von Materialien in der Regel ein charakteristischer Wert verwendet, der dem 5.-Perzentil der statistischen Bandbreite entspricht. Für den tatsächlich verwendeten Bemessungswert wird der charakteristische Wert zusätzlich durch einen partiellen Sicherheitsfaktor geteilt. Die Annahme der Mittelwerte ist also je nach Verteilung der Werte deutlich zu optimistisch. Im Projektteil AWN werden die Verteilungen der Werte zusätzlich miteinbezogen, ausserdem werden anstatt der in der Norm verwendeten t-Verteilungen neu logarithmische Normalverteilungen berechnet, die nur positive Werte annehmen können. Durch diese ergänzenden Analysen könnten die Werte des Ausschlussschemas entsprechend verbessert werden.

Tabelle 6 : Mittlere Bodenparameter nach Bodenklassifizierung USCS, Quelle Norm SN 670010b.

Bodenbezeichnung	USCS Labor	Parameter für USCS Labor aus Norm	USCS-Gruppe Flaschenmethode Schema	Parameter durch Schema aus Flaschenmethode
Serine A	CL	$\phi' = 30.7^\circ$ $c' = 4.2 \text{ kPa}$	ML, MH, CL-ML, CL	$\phi' = 30.7^\circ$ $c' = 4.2 \text{ kPa}$
Serine B	SP	$\phi' = 36^\circ$ $c' = 0 \text{ kPa}$	SW-SC, SP-SC	$\phi' = 32.0^\circ$ $c' = 0 \text{ kPa}$
Serine C	CL	$\phi' = 30.7^\circ$ $c' = 4.2 \text{ kPa}$	SM, SC, SC-SM	$\phi' = 30.0^\circ$ $c' = 0 \text{ kPa}$
Bressonaz 1	SC	$\phi' = 34.8$ $c' = 5.3 \text{ kPa}$	SW-SM, SP-SM	$\phi' = 35.0^\circ$ $c' = 0 \text{ kPa}$
Bressonaz 2	CL	$\phi' = 30.7^\circ$ $c' = 4.2 \text{ kPa}$	ML, MH, CL-ML, CL	$\phi' = 30.7^\circ$ $c' = 4.2 \text{ kPa}$
Grindelwald Wiese	GM	$\phi' = 35^\circ$ $c' = 0 \text{ kPa}$	SM, SC, SC-SM	$\phi' = 30.0^\circ$ $c' = 0 \text{ kPa}$
Grindelwald Wald	GC	$\phi' = 31.4^\circ$ $c' = 20 \text{ kPa}$	SM, SC, SC-SM	$\phi' = 30.0^\circ$ $c' = 0 \text{ kPa}$
Plaffeien Weide	SM	$\phi' = 30^\circ$ $c' = 20 \text{ kPa}$	ML, MH, CL-ML, CL	$\phi' = 30.7^\circ$ $c' = 4.2 \text{ kPa}$
Plaffeien Wald	ML	$\phi' = 33.9^\circ$ $c' = 6.5 \text{ kPa}$	SM, SC, SC-SM	$\phi' = 30.0^\circ$ $c' = 0 \text{ kPa}$
Wolhusen	CL-ML	$\phi' = 32.7^\circ$ $c' = 9.3 \text{ kPa}$	ML, MH, CL-ML, CL	$\phi' = 30.7^\circ$ $c' = 4.2 \text{ kPa}$

In Tabelle 6 sind für die 10 analysierten Standorte jeweils die USCS-Bodenklassifizierungen aus den Laboranalysen vermerkt. Im Vergleich zur vereinfachten Flaschenmethode, wurde für diese USCS-Klassifizierung auch der Plastizitätsindex und die Krümmung der Kornverteilungskurve verwendet (vgl. Abschnitt 3.5). Für beide USCS-Klassifizierungen (vereinfachte Flaschenmethode und Laboranalyse) wurden die bodenmechanischen Parameter bestimmt, für die Daten der vereinfachten Flaschenmethode wurde das Ausschlussschema angewandt, die mittleren Werte für die Laboranalysen wurden direkt der Norm SN 670010b entnommen. Grundsätzlich waren die Werte der bestimmten Reibungswinkel durch die vereinfachte Flaschenmethode geringer als bei den Laboranalysen, Grund dafür ist die Zusammenfassung in Gruppen, von denen jeweils der pessimistischste Wert verwendet wird (vgl. Abschnitt 4.4), dasselbe gilt auch für die Werte der Kohäsion, bei der im Ausschlussschema nur bei Schluffen und Tonen mit einer Kohäsion gerechnet wird. In vielen Hangstabilitätsmodellen wird zugunsten des Sicherheitsfaktors meist auf die Berücksichtigung der Kohäsion verzichtet.

4.3.2 Bodenmechanische Parameter Projektteil AWN

Die Resultate der 5 Scherversuche in Tabelle 7 zeigen, dass bei den Laborversuchen grundsätzlich höhere Kohäsionswerte resultieren (sofern mit maximalen Scherspannungen gerechnet wird), als bei der Ableitung über die Granulometrie. Bei der Spalte «Direktscher Labor, $c' = 0$ » wurde ein 0-Durchgang der Regressionsgeraden erzwungen, wodurch die Steigung der Schergeraden zunimmt und höhere Werte für ϕ' resultieren.

Tabelle 7 : Vergleich der Bodenparameter aus Scherversuchen (mit/ohne Kohäsion, berechnet aus maximalem Scherwiderstand) mit abgeleiteten mittleren Normwerten aus Korngrössenverteilungen von Labor- und vereinfachter Sedimentationsanalyse

Bodenbezeichnung	USCS Labor	Direktscher Labor	Direktscher Labor, $c' = 0$	USCS Labor Norm SN	Schema Flaschenmethode
Därstetten	MH	$\phi' = 27.9^\circ$ $c' = 12.3 \text{ kPa}$	$\phi' = 36.9^\circ$ $c' = 0 \text{ kPa}$	$\phi' = 34.4^\circ$ $c' = 7.7 \text{ kPa}$	$\phi' = 30.7^\circ$ $c' = 4.2 \text{ kPa}$
Diemtigen	ML	$\phi' = 27.9^\circ$ $c' = 8.8 \text{ kPa}$	$\phi' = 34.5^\circ$ $c' = 0 \text{ kPa}$	$\phi' = 33.9^\circ$ $c' = 6.5 \text{ kPa}$	$\phi' = 30.7^\circ$ $c' = 4.2 \text{ kPa}$
Rüschegg	ML	$\phi' = 33^\circ$ $c' = 7.2 \text{ kPa}$	$\phi' = 37.9^\circ$ $c' = 0 \text{ kPa}$	$\phi' = 33.9^\circ$ $c' = 6.5 \text{ kPa}$	$\phi' = 30.7^\circ$ $c' = 4.2 \text{ kPa}$
Trub	GC	$\phi' = 33.8^\circ$ $c' = 2.4 \text{ kPa}$	$\phi' = 35.4^\circ$ $c' = 0 \text{ kPa}$	$\phi' = 31.4^\circ$ $c' = 20.0 \text{ kPa}$	$\phi' = 30^\circ$ $c' = 0 \text{ kPa}$
Trubschachen	SC	$\phi' = 30.2^\circ$ $c' = 8.0 \text{ kPa}$	$\phi' = 36.6^\circ$ $c' = 0 \text{ kPa}$	$\phi' = 34.8^\circ$ $c' = 5.3 \text{ kPa}$	$\phi' = 30^\circ$ $c' = 0 \text{ kPa}$

Um den Grössenunterschied der Parameter berechnet aus residualer und maximaler Scherspannung aufzuzeigen, wurden die Scherparameter zusätzlich mit den Scherspannungen bei 10mm Scherweg (halber Scherweg) sowie 20mm Scherweg (maximaler Scherweg) berechnet (vgl. Abschnitt 3.6). Die Berechnung ergab für die siltig-tonigen Böden der Standorte Därstetten und Rüschegg deutliche Unterschiede zwischen residualer und maximaler Spannung (Tabelle 8, Abbildung 30). Bei den übrigen Standorten wirkten sich die unterschiedlichen Scherspannungen insbesondere auf die Kohäsionswerte aus. Die Betrachtung der Scherspannung-Weg-Diagramme zeigt dementsprechende Unterschiede: Während die Scherspannung bei den Standorte Trub, Trubschachen und Diemtigen nach dem Erreichen des Maximums relativ konstant auf diesem Wert bleibt, fällt sie bei den Standorten Rüschegg und Därstetten nach 10 und 20mm Scherweg auf deutlich tiefere Werte. Für die folgenden Berechnungen der Abschnitte 4.3.3 und 4.3.4 wurden für die Laborwerte die Scherparameter berechnet aus maximalen Werten verwendet.

Tabelle 8 : Vergleich der Scherparameter aus maximaler und residualer Scherspannung nach 10 und 20 mm Scherweg

Bodenbezeichnung	USCS Labor	Direktscher Labor: Max. Scherspannung	Direktscher Labor: Scherspannung bei 10mm Scherweg	Direktscher Labor: Scherspannung bei 20mm Scherweg
Därstetten	MH	$\phi' = 27.9^\circ$ $c' = 12.3 \text{ kPa}$	$\phi' = 23.6^\circ$ $c' = 5.2 \text{ kPa}$	$\phi' = 22.0^\circ$ $c' = 3.7 \text{ kPa}$
Diemtigen	ML	$\phi' = 27.9^\circ$ $c' = 8.8 \text{ kPa}$	$\phi' = 29.5^\circ$ $c' = 6.0 \text{ kPa}$	$\phi' = 30.0^\circ$ $c' = 4.9 \text{ kPa}$
Rüschegg	ML	$\phi' = 33^\circ$ $c' = 7.2 \text{ kPa}$	$\phi' = 26.9^\circ$ $c' = 4.1 \text{ kPa}$	$\phi' = 21.4^\circ$ $c' = 5.1 \text{ kPa}$
Trub	GC	$\phi' = 33.8^\circ$ $c' = 2.4 \text{ kPa}$	$\phi' = 33.4^\circ$ $c' = 1.1 \text{ kPa}$	$\phi' = 32.2^\circ$ $c' = 2.9 \text{ kPa}$
Trubschachen	SC	$\phi' = 30.2^\circ$ $c' = 8.0 \text{ kPa}$	$\phi' = 33.5^\circ$ $c' = 2.6 \text{ kPa}$	$\phi' = 33.1^\circ$ $c' = 1.7 \text{ kPa}$

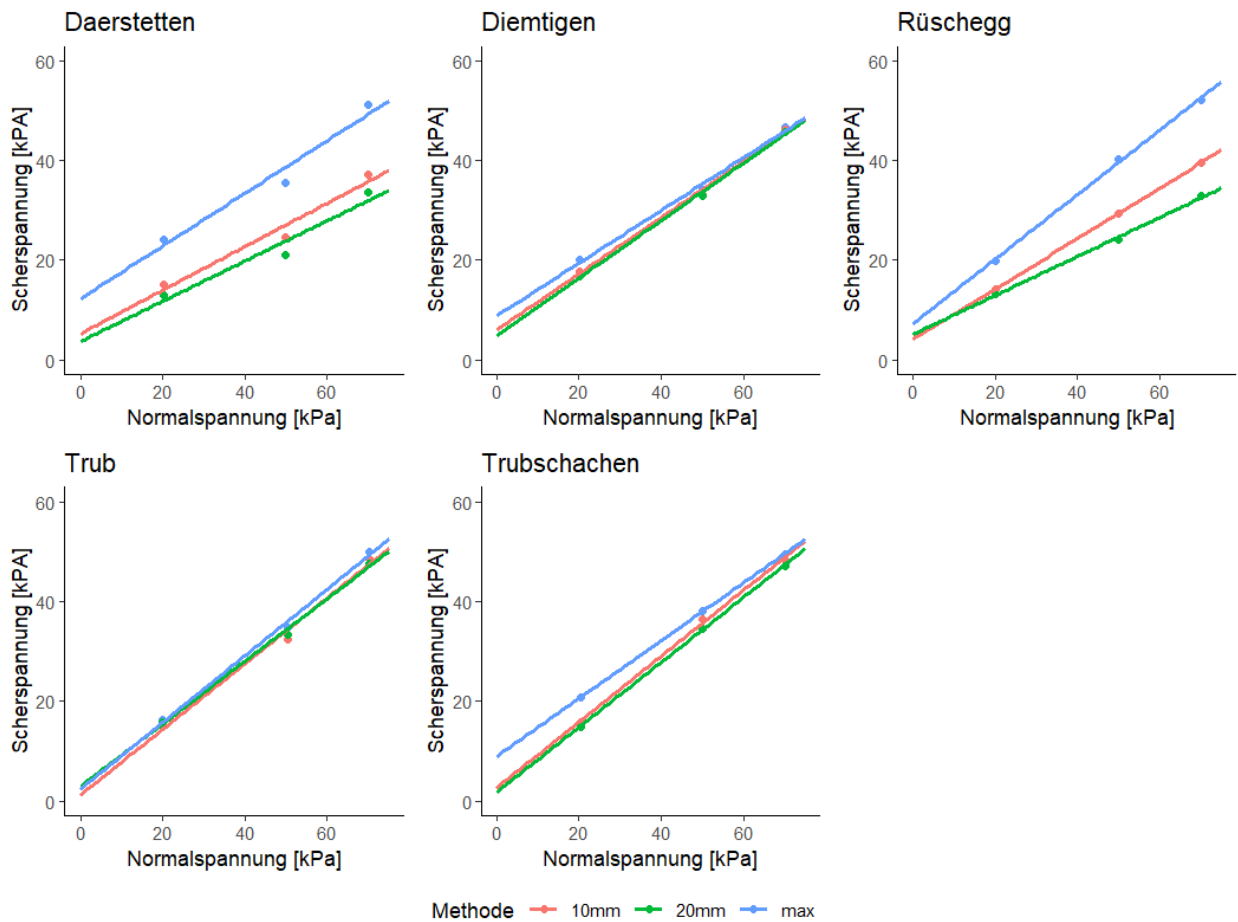


Abbildung 30: Schergeraden der Labordaten für maximale und residuale Scherspannung nach 10 und 20mm Scherweg

4.3.3 Vergleich berechneter Scherfestigkeiten aus Parametern verschiedener Methoden

Um den Effekt der bodenmechanischen Parameter pro Standort und Methode auf die Scherfestigkeit zu vergleichen, wurden die Scherfestigkeiten für verschiedene Hangneigungen und Rutschmächtigkeiten analog zur rückhaltenden Kraft R im Modell der endlosen Böschung berechnet (Abbildung 31).

$$\text{Sicherheitsfaktor} = \frac{R}{E}$$

$$R = \text{Scherfestigkeit} = c' + \tan(\phi') * (\sigma'_N - u)$$

$$E = \text{treibende Kraft} = W * \sin(\alpha)$$

wobei

c' = effektive Kohäsion
 ϕ' = effektiver Reibungswinkel
 σ'_N = Normalkraft senkrecht zur Rutschfläche
 W = Gewichtskraft des Rutschpaketes
 α = Hangneigung
 u = Porenwasserdruckkraft

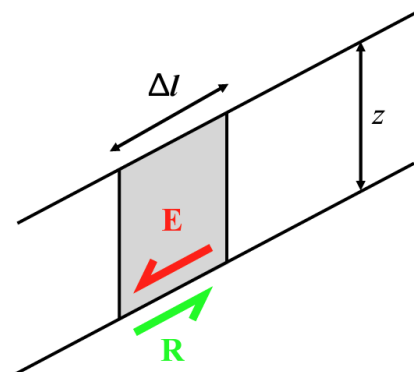


Abbildung 31: Schematische Darstellung der Berechnungsmethode «unendliche Böschung»

Die berechnete Scherfestigkeit aus abgeleiteten Normwerten des Schemas HAFL ist grundsätzlich immer tiefer als diejenige aus den Laborversuchen (Abbildung 32). Die Scherfestigkeiten, die auf Basis

der aus Korngrössenanalysen abgeleiteten Normwerten berechnet wurden (grün), sind denen der Laboranalysen am nächsten. Beim Standort Trub ist die Scherfestigkeit wegen der hohen Kohäsion der Normwerte (vgl. Tabelle 7) jedoch deutlich überschätzt worden. Bei geringen Mächtigkeiten hat die Hangneigung kaum einen Effekt auf die Abweichung zur Laboranalyse, da die Abweichungen hauptsächlich durch die unterschiedlichen Kohäsionswerte zustande kommen, deren Effekt mit zunehmender Tiefe abnimmt. Dementsprechend nimmt bei grösseren Anrissmächtigkeiten die Abweichung der Methoden «Direktscher ohne Kohäsion» und «SN aus Korngrösse Labor» ab.

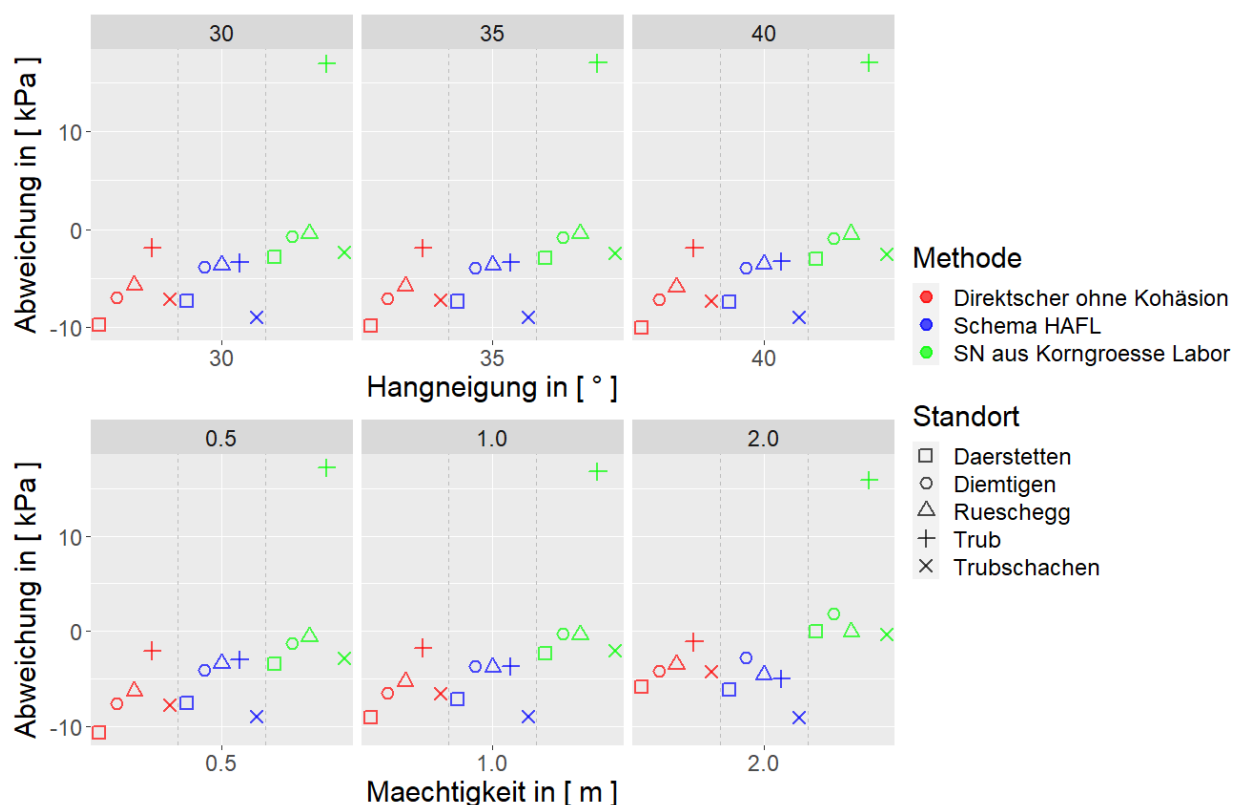


Abbildung 32 : Abweichung der Scherfestigkeit in Abhängigkeit von Anrissmächtigkeit und Hangneigung zum Direktscherversuch mit Kohäsion als Referenzwert. Bei den Hangneigungsklassen wurde mit einer Mächtigkeit von 0.75 m gerechnet (~Mittelwert Hangmurendatenbank WSL 2024) und bei den Mächtigkeitsklassen mit einer Hangneigung von 35° (~Mittelwert Hangmurendatenbank WSL 2024))

4.3.4 Rückrechnung historischer Ereignisse von Trub und Diemtigen

Um die Plausibilität der ermittelten bodenmechanischen Parameter zusätzlich zu prüfen, wurde für 2 historische Ereignisse (Tabelle 9) der Standorte Trub und Diemtigen die Porenwasserdrücke zurückgerechnet.

Tabelle 9 : Eingangsparameter aus der Datenbank StoreMe (Werte überprüft/teilweise korrigiert)

Standort	StoreMe-Nummer	USCS	Hangneigung	Mächtigkeit
Trub	BE-2005-R-00593	GC	39°	0.9 m
Diemtigen	BE-2005-R-00189	ML	34°	1.5 m

Anhand des Porenwasserdruckes kann gut abgeschätzt werden, ob die Resultate realistisch sind, da er sich aus: $\text{Gesättigte Bodenmächtigkeit} \cdot \text{Gravitationsbeschleunigung} \cdot \text{Wasserdichte} \cdot \cos(\text{Neigung})$

berechnen lässt. Dazu wurde mit dem Modell der endlosen Böschung (Abbildung 31) gerechnet, welche Porenwasserdrucke mindestens geherrscht haben müssten, damit die Böschungen abgerutscht wären ($SF = 1$). Da die Sättigung einen Einfluss auf die Gewichtskraft des Bodens hat, wurden für die Rückrechnung verschiedene Sättigungen (5,10,30,50,100%) verwendet. Deren Einfluss auf die Resultate ist aber minim, wie sich anhand der Streuung der Boxplots in Abbildung 33 zeigt.

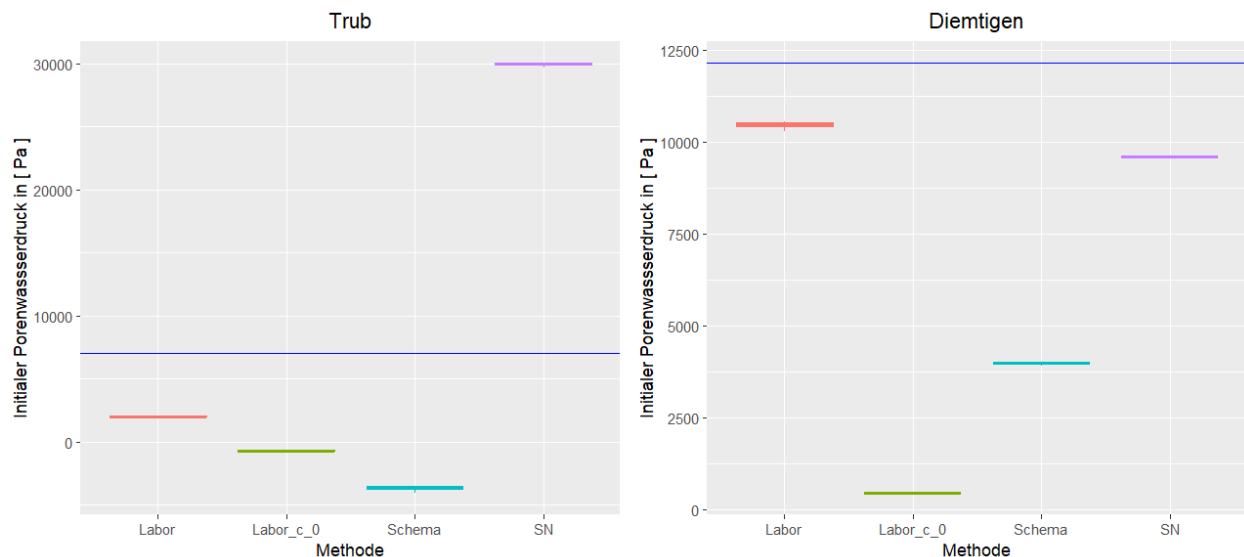


Abbildung 33 : Nötiger Porenwasserdruck zur Auslösung der Ereignisse in Abhängigkeit der Methode mit der die bodenmechanischen Parameter bestimmt wurden. Die blaue Linie kennzeichnet den maximal möglichen Porenwasserdruck bei voller Sättigung

Die Rückrechnung des Rutschungsereignisses des Standortes Trub ergab für die 2 Methoden «Schema» und «Labor_c_0» (bei beiden Methoden $c' = 0$) negative Werte für den auslösenden Porenwasserdruck. Negative Porenwasserdrucke bedeuten bei dieser Berechnung, dass die Böschung bereits ohne Porenwasserdruck instabil wäre, respektive dass eine Kohäsion vorhanden sein muss, damit die Böschung nicht abrutscht. Die Laborwerte erscheinen für die Rückrechnung des Ereignisses in Trub am realistischen zu sein, der Porenwasserdruck im Bereich von 1000 Pa bedeutet eine gesättigte Bodenmächtigkeit von 10 – 15 cm. Durch die Kohäsion von 20 kPa der Norm SN für den USCS-Typ «GM» wäre ein Porenwasserdruck von fast 30 kPa zur Auslösung nötig, dieser Druck liegt deutlich über dem, der mit einer kompletten Sättigung der berücksichtigten Bodenmächtigkeit von 0.9 überhaupt möglich wäre. Dies lässt auf eine deutliche Überschätzung der Kohäsion schliessen. Für das Ereignis in Diemtigen resultieren für die Normdaten «SN» wiederum hohe Werte. Bei der Methode «Labor» wurde für diesen Standort mit der höchsten Kohäsion gerechnet, dementsprechend ist auch der initiale Porenwasserdruck für eine Hanginstabilität am grössten. Bei den Laborwerten ohne Kohäsion werden die tiefsten Werte erreicht, an diesem Standort wurde nur bei dieser Methode ohne Kohäsion gerechnet. Die Porenwasserdrucke für die Methoden «Schema» und «Labor_c_0» erscheinen an diesem Standort in einem plausiblen Bereich zu sein, da sie einer gesättigten Bodenmächtigkeit von ungefähr 5 cm bei der Methode «Labor_c_0» und 50 cm bei der Methode «Schema» entsprechen, während der Druck der Methode «Labor» einer gesättigten Bodenmächtigkeit von ca. 130 cm und bei der Methode «SN» 120 cm entspricht.

Diese Berechnungen verdeutlichen, wie gross der Einfluss der Kohäsion bei flachgründigen Rutschungen auf die Hangstabilität ist. Werden die bodenmechanischen Parameter aus der Norm SN abgeleitet, so sind bei den 2 betrachteten Ereignissen für ein Abrutschen des Hanges unrealistisch hohe Porenwasserdrucke nötig. Beim Blick auf die Verteilung der Normwerte für die Kohäsion des Bodentyps «GC» fällt die sehr breite Streuung der Werte auf (vgl. Abbildung 35). Die Wahl eines positiven Bemessungswertes, der einer einstelligen Perzentile (z.B. 5.-Perzentil) entspricht, würde die Überschätzung der Kohäsion verhindern. Die Methoden «Schema» und «Labor_c_0» eignen sich für konservative

Berechnungen. Es sollte bedacht werden, dass die Bodenmächtigkeiten und Hangneigungen für diese Berechnungen von StoreMe-Erfassungen entnommen wurden, die Hangneigungen wurden zusätzlich in GIS mit einem dem 0.5 h Höhenmodell SwissALTI3D überprüft. Die Bodenmächtigkeit aus dem StoreMe-Eintrag für den Standort «Diemtigen» betrug 3 m, anhand der Feldbegehung und Fotoanalysen wurde die Mächtigkeit auf 1.5m korrigiert. Abweichungen dieser Parameter können die Resultate entscheidend beeinflussen.

4.4 Ergänzende Labordaten zur Norm SN 670010b

Für die Ergänzung der Korrelationen zwischen Bodentypen nach USCS und bodenmechanischer Parameter der Norm SN 670010b wurden Daten der geotechnischen Labore «AHB Burgdorf» und «De Céréville» ausgewertet. In Abbildung 34 sind die Normdaten und die ergänzenden Daten für den Scherwinkel ersichtlich. Die Grafik zeigt auf, dass die Werte des Reibungswinkels ϕ' der Norm SN 670010b lediglich bei 11 USCS-Typen auf Daten aus Versuchen beruhen (dort wo blaue Balken) und bei diesen teilweise nur wenige Versuche vorhanden waren. Für mehrere USCS-Typen konnten neu Daten aus Versuchen ergänzt werden, wegen der geringen Anzahl muss diese Ergänzung aus statistischer Hinsicht als bedingt aussagekräftig angesehen werden. Bei den USCS-Typen «GC-GM», «GM» und «SM» wurden zusätzlich der in der Norm angegebene Bereich dargestellt, der lediglich auf Schätzwerten beruht. Insbesondere bei «GM» und «SM» erscheint eine Anpassung der Normwerte durch die ergänzende Datengrundlage sinnvoll. Auffällig ist der deutliche Unterschied beim USCS-Typ «CH».

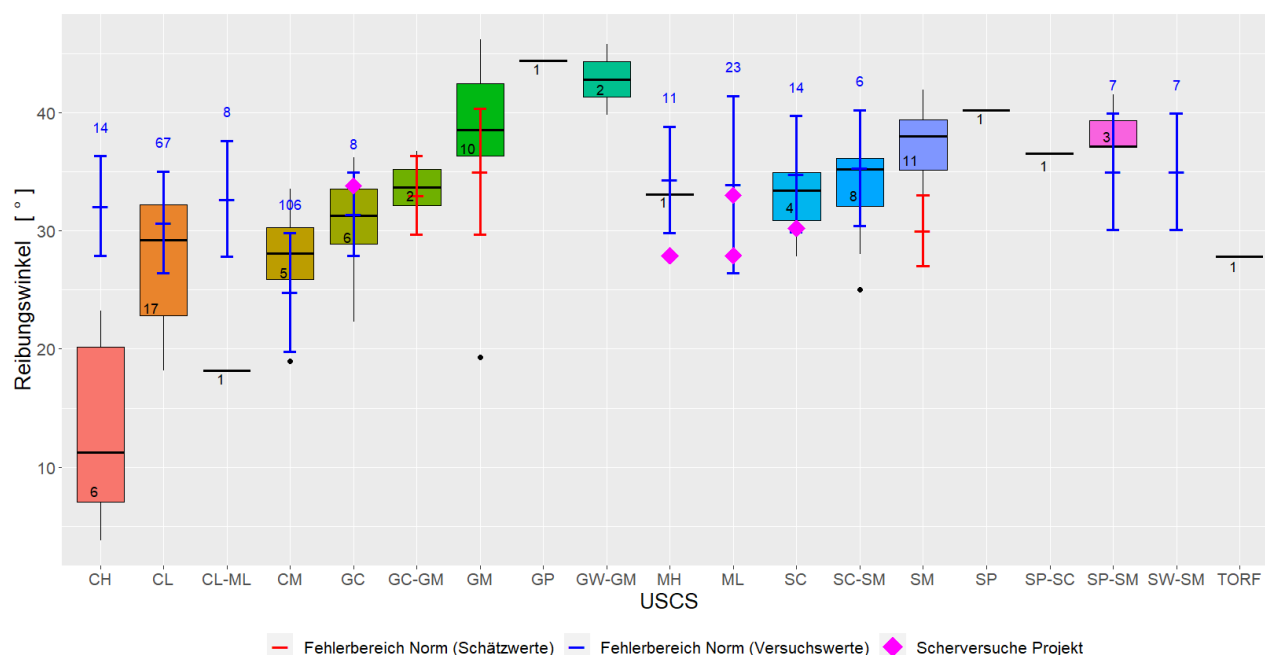


Abbildung 34: Werte für den Scherwinkel je nach Boden USCS. Die blauen Balken stellen die Standardabweichung der Normdaten dar, der Querstrich kennzeichnet den mittleren Wert wobei die blaue Zahl jeweils die Anzahl Versuche angibt. Die Boxplots visualisieren die ergänzenden Daten, wobei die schwarze Zahl in den Boxen resp. unterhalb des Medians jeweils die Anzahl der ergänzenden Versuche angibt. Die roten Balken stellen die Schätzwerte aus der Norm dar (keine Versuche vorhanden).

In Abbildung 35 sind die Normdaten und die ergänzenden Daten für die effektive Kohäsion c' ersichtlich. Durch die T-Verteilung die in den Normdaten angewandt wurde, sind negative Werte möglich, was rein rechnerisch destabilisierend wirken würde und für die effektive Kohäsion nicht möglich ist. Deshalb wurde der Bereich der Standardabweichung bei 0 abgeschnitten. Eine Auswertung dieser Daten mit einer logarithmischen Normalverteilung würde negative Werte verhindern. Bezüglich der Anzahl Versuche sind die bestehenden und ergänzenden Daten der Kohäsion denen des

Reibungswinkels sehr ähnlich, weil bei einem Scherversuch in der Regel auch immer ein Wert für die Kohäsion bestimmt wird. Auch bei der Kohäsion unterscheidet sich der Bodentyp «CH» zwischen bestehenden und neuen Daten deutlich.

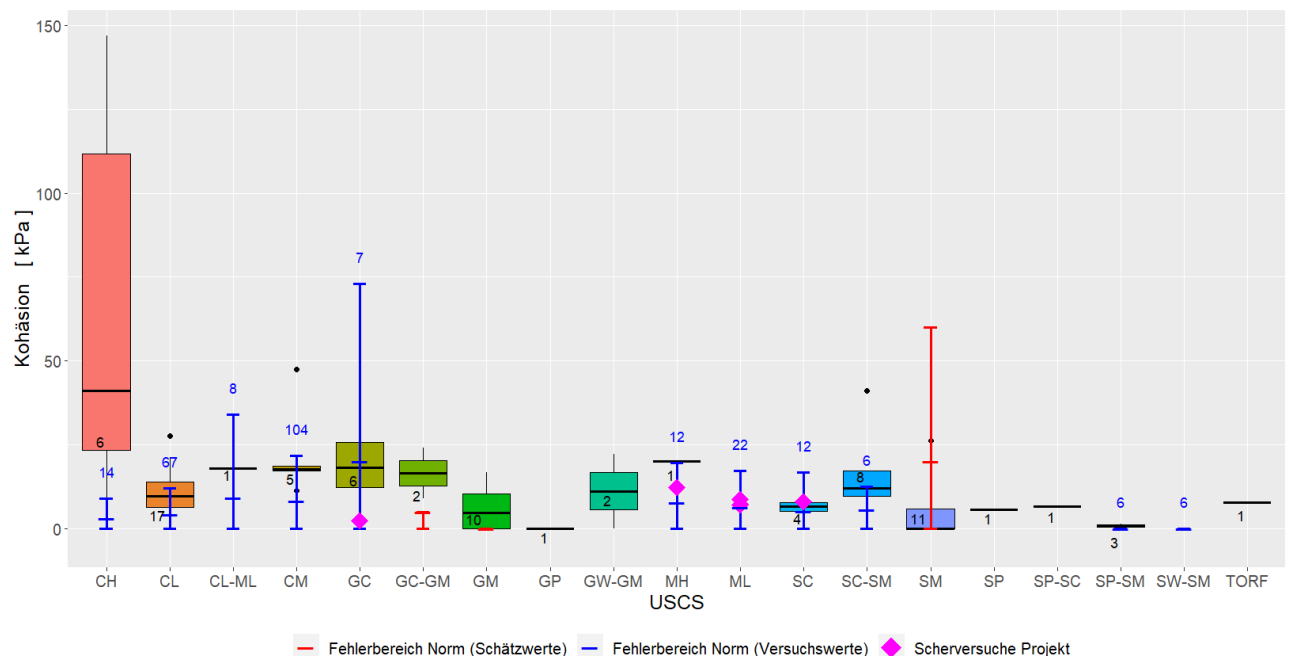


Abbildung 35 : Werte für die effektive Kohäsion je nach Boden USCS. Die blauen Balken stellen die Standardabweichung der Normdaten dar (bei 0 abgeschnitten da keine negativen Werte möglich sind), der Querstrich kennzeichnet den mittleren Wert wobei die blaue Zahl jeweils die Anzahl Versuche angibt. Die Boxplots visualisieren die ergänzenden Daten, wobei die schwarze Zahl in den Boxen resp. unterhalb des Medians jeweils die Anzahl der ergänzenden Versuche angibt. Die roten Balken stellen die Schätzwerte aus der Norm dar (keine Versuche vorhanden).

4.5 Vergleich des Aufwandes zwischen Laboranalysen und der vereinfachten Flaschenmethode

Um den Aufwand zwischen dem vereinfachten Flaschenverfahren und den Laboranalysen zu vergleichen wurden in den Tabellen 10 und 11 die Aufwände geschätzt. In Tabelle 11 werden 2 Varianten beschrieben: 1) Die Untersuchung der Scherparameter, 2) Die Durchführung einer USCS-Klassifikation mit anschliessender Bestimmung der Scherparameter aus Normwerten. Es wurden jeweils finanzielle Aufwände, Arbeits- und Wartezeiten angegeben. Die Angaben beziehen sich auf Erfahrungswerte der eigenen Analysen sowie Angaben des geotechnischen Labors der AHB Burgdorf (2023).

Tabelle 10 : Aufwandsschätzung der vereinfachten Flaschenmethode

Aufwandsschätzung vereinfachte Flaschenmethode		
Probeentnahme	Probeentnahme im Feld. Es müssen ca. 2 kg Material mitgenommen werden. Korngrößen > 20mm können im Feld getrennt werden (Genaue Methodik muss noch geprüft werden).	Arbeitszeit 30 min / Probe
Probeprobereitung	Probemenge wird mit Wasser und Dispergierungsmittel eingewogen und anschliessend für min. 24h gelöst.	Arbeitszeit 10 min / Probe, Wartezeit 24 h

Durchführung der Korngrössentrennung	<i>Siebung Kies</i> : Arbeitszeit ca. 20 min / Probe <i>Sedimentation Sand</i> : Arbeitszeit 15 min/Probe inklusive Wartezeit Sedimentation < 2 min <i>Sedimentation Schluff</i> : Arbeitszeit 10 min / Probe, Wartezeit je nach Sedimentationshöhe 7 – 20 h.	Arbeitszeit 45 min / Probe, Wartezeit 7 – 20 h
Auswertung	Datenauswertung und Ableitung Scherparameter	20 min / Probe
Totale Aufwände	Insgesamt kann mit einem effektiven Arbeitsaufwand von ca. 1.75 h / Probe gerechnet werden, wodurch anhand gängiger Ansätze für Ingenieurbüros <u>Kosten im ca. 250.- pro Probe resultieren</u> . Die Wartezeit beträgt in zwischen 31 und 44 h, in der Regel kann die Durchführung des Versuchs am übernächsten Tag nach der Probevorbereitung abgeschlossen werden. Zusätzlich sollte bei der vereinfachten Flaschenmethode auch bedacht werden, dass die Einführung in die Methode mit einem Zeitaufwand verbunden ist, der je nach Vorwissen sicherlich sehr unterschiedlich sein kann.	
Güte der Resultate	Mittlere Abweichung der Korngrössen im Bereich von 10% gemäss Resultaten Kap. 4. Genauigkeit der Scherparameter ist von Normwerten abhängig. Die Werte der dudenmechanischen Parameter werden gemäss dem Schema in Anhang 1 gruppiert.	

Tabelle 11 : Aufwandschätzung der Laboranalysen

Aufwandschätzung Laboranalysen		
Probeentnahme	Es müssen je nach maximaler Korngrösse 200 g bis 40 kg entnommen werden.	Arbeitszeit je nach maximaler Korngrösse sehr unterschiedlich. 15 min – 1.5 h
Probevorbereitung	Ablieferung in geotechnischem Labor / Paketversand	Arbeitszeit 0.5 -1.5 h, je nach Probemenge / Lage Labor
Auswertung Labor	<i>USCS-Profil</i>	Wartezeit 1.5 Wochen, Kosten 900.- (effektive Arbeitszeit Labor 8-10 h). Persönlicher Zeitaufwand von 10 min für Ableitung Bodenparameter aus Norm.
	<i>Scherversuch</i> (3 Teilversuche)	Wartezeit 1 - 2 Wochen, Kosten 2250.- (effektive Arbeitszeit ca. 20 h) + allfällige Zusatzaufwände.
Totale Aufwände	<i>USCS-Profil</i> : Zeitaufwand ca. 1-3 h, Wartezeit 1.5 Wochen (Annahme das Labor Auftrag sofort bearbeiten kann), <u>Kosten: 900.-</u> . <i>Scherversuch</i> : Zeitaufwand ca. 1-3 h, Wartezeit 1-2 Wochen (Annahme das Labor Auftrag sofort bearbeiten kann), <u>Kosten: > 2250.-</u> (3 Teilversuche).	
Güte der Resultate	Falls nur eine Siebanalyse gemacht wird, ist die Genauigkeit der Scherparameter ist von Normwerten abhängig (vgl. Abschnitt 4.5). Bei Scherversuchen werden Resultate eines zertifizierten Verfahrens geliefert.	

5 Folgerungen

Mit dem vereinfachten Flaschenverfahren ist es möglich, die Bodengranulometrie mit geringem Aufwand und ohne spezielle Geräte zu bestimmen. Über alle Bodenfraktionen zeigt das Verfahren eine Abweichung im Bereich von 10 % zu den Analysen eines geotechnischen Labors.

Mit dem Dispergierungsmittel «Zitronensäure und Salz» wurden über alle Bodenfraktionen die besten Resultate erzielt, während das gängige Dispergierungsmittel aus geotechnischen Laboren «NA6O18P6» besonders bei den feinen Körnern schlechte Resultate erzielte. Grund dafür könnte eine zu hohe Dosierung sein, deshalb sollten weitere Analysen mit verschiedenen Dosierungen von «NA6O18P6» proportional zu Probenmasse erfolgen.

Die berechneten Porositätswerte scheinen in der Tendenz zu hoch zu sein, dies ist schwierig abzuschätzen, da hierfür keine Laboranalysen vorhanden sind. Die Werte können lediglich anhand von Literaturwerten auf ihre Plausibilität geprüft werden. Es gilt hierzu aber anzumerken, dass die Konsolidation bei Laboranalysen nicht der tatsächlichen Konsolidation im Feld entspricht, während bei der vereinfachten Flaschenmethode versucht wird, den Zustand im Feld wiederzugeben. Die hohen Werte bei nicht-kohäsiven Böden entstehen sehr wahrscheinlich durch eine Auflockerung des Materials bei der Probeentnahme.

Durch ein einfaches Ausschlussschema auf Basis der Norm SN 670010b ist aus der Bodengranulometrie eine Ableitung bodenmechanischer Parameter möglich, werden diese Werte aus der USCS-Klassifikation eines geotechnischen Labors abgeleitet, sind sie grundsätzlich optimistischer. Beim Vergleich der bodenmechanischen Parameter je nach Herleitungsmethode stellte sich heraus, dass die Parameter die auf Basis von Korngrössenanalysen im Labor und der SN ermittelt wurden, in der Regel näher an den Parametern der Direktscherversuche liegen, als wenn sie über die Flaschenmethode und das Ausschlussschema bestimmt werden. Jedoch wurden die Werte der Direktscherversuche durch das Ausschlussschema nie überschätzt, während es bei der Ableitung aus der USCS-Laborklassifizierung vereinzelt zu einer starken Überschätzung der Kohäsion kam. Diese Überschätzung der Kohäsion verdeutlichte sich auch in der Rückrechnung des Porenwasserdrucks historischer Ereignisse. Deshalb erscheint die Wahl der pessimistischsten Parametern aus einer Gruppe ähnlicher Böden -wie diese beim Ausschlussschema der Fall ist- ein pragmatischer Lösungsansatz zu sein.

Der Vergleich der Parameter berechnet aus residualer und maximaler Scherspannung zeigte deutliche Unterschiede auf. Die Auslösung einer flachgründigen Rutschung kann in mehrere Phasen unterteilt werden; nach einem initialen Riss, bei dem die maximale Scherspannung wirksam ist, kann in den darauffolgenden Phasen nur mit residualen Werten gerechnet werden, da bereits eine bestimmte Verschiebung (analog zum Scherweg der Laborversuche) stattgefunden hat (Schwarz 2019). Deshalb sollte grundsätzlich hinterfragt werden, ob für Hangstabilitätsberechnungen maximale Scherspannungen verwendet werden sollten.

Sollen geotechnische Parameter über Korrelationen mit der Bodengranulometrie resp. dem USCS-Typ bestimmt werden, muss eine ausreichend breite Grundlage an Labordaten vorhanden sein. In der SN 670010b sind für die Parameter ϕ' und c' für die Mehrheit der USCS-Bodentypen wenig bis keine Versuchsdaten vorhanden. Durch die Ergänzung der SN 670010b mit Daten aus geotechnischen Laboren konnte zumindest für einige USCS-Typen neue und ergänzende Daten gewonnen werden. Für die USCS-typen «GM» und «SM» erscheint eine Anpassung der Normdaten anhand der neu gewonnenen Daten sinnvoll. Trotzdem besteht in der Ergänzung der Norm noch viel Nachholbedarf um das gesamte Spektrum an Böden in der Schweiz abzudecken.

Die Kosten der vereinfachten Flaschenmethode werden auf 250.- pro Probe geschätzt, dies liegt deutlich unter den Kosten der Laboranalysen eines geotechnischen Labors. Ein USCS-Profil, woraus Literaturwerte abgeleitet werden können, kostet 900.-, für einen direkten Scherversuch muss mit 2250.- gerechnet werden. Im Hinblick auf die zu erwartende Genauigkeit der Verfahren, wird die vereinfachte Flaschenmethode als günstiges Verfahren für grossflächige Gefahrenanalysen angesehen. Vorteilhaft sind auch die kurzen Wartezeiten, denn bei Laboranalysen muss oft mehrere Wochen auf die Resultate gewartet werden, mit dem vereinfachten Flaschenverfahren ist die gesamte Analyse bereits innert 2-4 Tagen abgeschlossen.

6 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Anspruch an die Genauigkeit von bodenmechanischen Parametern für verschiedene Ebenen des Naturgefahrenmanagements in Abhängigkeit der Kosten/Qualität der Bestimmungsmethoden (weisse Kästen). Rot markiert ist die methodische Lücke des Ansatzes der vereinfachten Flaschenmethode, der in diesem Projekt untersucht wird.	3
Abbildung 2: Grössenbereiche der Bodenfraktionen, das Auge kennzeichnet die Grenze der sichtbaren Korngrösse Quelle: AHB Burgdorf	5
Abbildung 3: Siebturm zur Trockensiebung, Quelle: innovativbeton-muenchen	5
Abbildung 4 : Schematische Darstellung einer Schergeraden (links), Unterschied zwischen residualer und maximaler Scherspannung (rechts).	7
Abbildung 5 : Vorgehen bei der vereinfachten Sedimentationsmethode	8
Abbildung 6 : Vergleich berechneter Kiesanteile mit unterschiedlichen Dispergierungsmitteln im Vergleich zur Laboranalyse, der schwarze Strich über alle Varianten entspricht dem Mittelwert der Laboranalyse	11
Abbildung 7 : Vergleich berechneter Sandanteile mit unterschiedlichen Dispergierungsmitteln im Vergleich zur Laboranalyse, der schwarze Strich über alle Varianten entspricht dem Mittelwert der Laboranalyse	12
Abbildung 8 : Vergleich berechneter Schluffanteile mit unterschiedlichen Dispergierungsmitteln im Vergleich zur Laboranalyse, der schwarze Strich über alle Varianten entspricht dem Mittelwert der Laboranalyse	13
Abbildung 9 : Vergleich berechneter Tonanteile mit unterschiedlichen Dispergierungsmitteln im Vergleich zur Laboranalyse, der schwarze Strich über alle Varianten entspricht dem Mittelwert der Laboranalyse	13
Abbildung 10: Absoluter Fehler aller mit der Flaschenmethode analysierten Proben Teil SBB ohne Plaffeien Weide (n=45) zum Wert der Laboranalysen (n=10) mit unterschiedlichen Annahmen zur Fluiddichte.	14
Abbildung 11: Absoluter Fehler aller mit der Flaschenmethode analysierten Proben Teil SBB ohne Plaffeien Weide (n=45) zum Wert der Laboranalysen (n=10) je nach Berechnungsmethode (A und B).	15
Abbildung 12: Kornverteilungskurven Standort Serine A	16
Abbildung 13 : Kornverteilungskurven Standort Serine B	16
Abbildung 14: Kornverteilungskurven Standort Bressonaz 1	17
Abbildung 15 : Kornverteilungskurven Standort Bressonaz 1	17
Abbildung 16 : Kornverteilungskurven Standort Bressonaz 2	18
Abbildung 17 : Kornverteilungskurven Standort Grindelwald Wiese	18
Abbildung 18 : Kornverteilungskurven Standort Grindelwald Wald	19
Abbildung 19 : Kornverteilungskurven Standort Plaffeien Wald	19
Abbildung 20 : Kornverteilungskurven Standort Plaffeien Weide	20
Abbildung 21 : Kornverteilungskurven Standort Wolhusen	20
Abbildung 22 : Berechnete Porositätswerte in % für alle Proben (n=50) der 10 Untersuchungsstandorte SBB	21
Abbildung 23 : Kornverteilungskurven Standort Därstetten	22
Abbildung 24: Kornverteilungskurven Standort Diemtigen	22
Abbildung 25: Kornverteilungskurven Standort Rüschegg	23
Abbildung 26: Kornverteilungskurven Standort Trub	23
Abbildung 27: Kornverteilungskurven Standort Trubschachen	24
Abbildung 28 : Berechnete Porositätswerte in % für alle Proben (n=18) der 5 Untersuchungsstandorte AWN	24
Abbildung 29: Beispiel für Bestimmung der Kornfraktionen aus der Norm SN 670010b, schwarze Linie entspricht der mittleren Kornverteilungskurve	25

Abbildung 30: Schergeraden der Labordaten für maximale und residuale Scherspannung nach 10 und 20mm Scherweg	28
Abbildung 31: Schematische Darstellung der Berechnungsmethode «unendliche Böschung»	28
Abbildung 32 : Abweichung der Scherfestigkeit in Abhängigkeit von Anrissmächtigkeit und Hangneigung zum Direktscherversuch mit Kohäsion als Referenzwert. Bei den Hangneigungsklassen wurde mit einer Mächtigkeit von 0.75 m gerechnet (~Mittelwert Hangmurendatenbank WSL 2024) und bei den Mächtigkeitsklassen mit einer Hangneigung von 35° (~Mittelwert Hangmurendatenbank WSL 2024))	29
Abbildung 33 : Nötiger Porenwasserdruck zur Auslösung der Ereignisse in Abhängigkeit der Methode mit der die bodenmechanischen Parameter bestimmt wurden. Die blaue Linie kennzeichnet den maximal möglichen Porenwasserdruck bei voller Sättigung	30
Abbildung 34: Werte für den Scherwinkel je nach Boden USCS. Die blauen Balken stellen die Standardabweichung der Normdaten dar, der Querstrich kennzeichnet den mittleren Wert wobei die blaue Zahl jeweils die Anzahl Versuche angibt. Die Boxplots visualisieren die ergänzenden Daten, wobei die schwarze Zahl in den Boxen resp. unterhalb des Medians jeweils die Anzahl der ergänzenden Versuche angibt. Die roten Balken stellen die Schätzwerte aus der Norm dar (keine Versuche vorhanden).	31
Abbildung 35 : Werte für die effektive Kohäsion je nach Boden USCS. Die blauen Balken stellen die Standardabweichung der Normdaten dar (bei 0 abgeschnitten da keine negativen Werte möglich sind), der Querstrich kennzeichnet den mittleren Wert wobei die blaue Zahl jeweils die Anzahl Versuche angibt. Die Boxplots visualisieren die ergänzenden Daten, wobei die schwarze Zahl in den Boxen resp. unterhalb des Medians jeweils die Anzahl der ergänzenden Versuche angibt. Die roten Balken stellen die Schätzwerte aus der Norm dar (keine Versuche vorhanden).	32

7 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 : Übersicht Standorte Projektteil SBB	9
Tabelle 2 : Übersicht Standorte Projektteil AWN	9
Tabelle 3 : Übersicht Varianten Dispergierungsmittel	10
Tabelle 4 : Porositätswerte aus der Flaschenmethode und Literaturwerte für die Laborwerte USCS	21
Tabelle 5 : Porositätswerte aus der Flaschenmethode und Literaturwerte für die Laborwerte USCS	25
Tabelle 6 : Mittlere Bodenparameter nach Bodenklassifizierung USCS, Quelle Norm SN 670010b.	26
Tabelle 7 : Vergleich der Bodenparameter aus Scherversuchen mit abgeleiteten mittleren Normwerten aus Korngrößenverteilungen von Labor- und vereinfachter Sedimentationsanalyse	27
Tabelle 8 : Vergleich der Scherparameter aus maximaler und residualer Scherspannung	27
Tabelle 9 : Eingangssparameter aus der Datenbank StoreMe (Werte überprüft/teilweise korrigiert)	29
Tabelle 10 : Aufwandsschätzung der vereinfachten Flaschenmethode	32
Tabelle 11 : Aufwandsschätzung der Laboranalysen	33

8 Literaturverzeichnis

- Batel, W. (1957). Kritische Betrachtungen zur Teilchengrößenbestimmung durch Siebanalyse, Windsichten, Sedimentieren und den Blaine-Test. In *Chemie Ingenieur Technik* (Vol. 29, Issue 9, pp. 581–589).
- Colon, F. J. (1965). Siebanalysen mit 5- μ m-Mikrosieben. In *Chemie Ingenieur Technik* (Vol. 37, Issue 2, pp. 143–145).
- Dysli, M., & Rybisar, J. (1992). STATISTIQUE SUR LES CARACTERISTIQUES DES SOLS SUISSES.
- Engl, D.A., Fellin, W., & Zangerl, C. (2008). Scherfestigkeiten von Scherzonen-Gesteinen: ein Beitrag zur geotechnischen Bewertung von tektonischen Störungen und Gleitzonen von Massenbewegungen. In *Bulletin für angewandte Geologie* 13 (2008).
- Gee, G. W., & Bauder, J. W. (2018). Particle-size Analysis. In *SSSA Book Series* (pp. 383–411). In *Soil Science Society of America, American Society of Agronomy*.
- Ma, S., Song, Y., Liu, J., Kang, X., & Yue, Z. Q. (2023). Extended wet sieving method for determination of complete particle size distribution of general soils. In *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. Elsevier BV.
- Schwarz, M. (2019). Wurzelverstärkung und Hangstabilitätsberechnungen: ein Überblick. In *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* (Vol. 170, Issue 6, pp. 292–302).
- Schwiteilo, E., Herrle, I. (2016). Plausibilitätsbewertung von Laborversuchen zur Bestimmung von Scherkennwerten. In *BAWMitteilungen* 99 (2016).
- Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS), (1999). SN 670010b – Bodenkennziffern. Schweizer Norm, eingetragene Norm in der Schweizer Normenvereinigung. Zürich.

9 Anhangsverzeichnis

- Anhang 1:** Ausschlussschema
- Anhang 2:** Leitfaden Feldaufnahmen
- Anhang 3:** Leitfaden Probenauswertung
- Anhang 4:** Labordaten USCS-Bestimmung
- Anhang 5:** Labordaten Scherversuche
- Anhang 6:** Tabelle Bodenkennwerte der Norm SN 670010b