

S13 Bodenprofil Girso

S13.1 Themenbereich «Bodenbildungsfaktoren und Profilmorphologie»

S13.1.1 **Zusammenfassende Angaben zum Profil und zu den Bodenbildungsfaktoren**

Das Bodenprofil ist in [Abb.S13.1](#) dargestellt. Einen Eindruck vom Bestand vermittelt [Abb.S13.2](#). [Tab.S13.1](#) fasst wichtige Angaben zum Boden und Profilort Girso zusammen und [Tab.S13.2](#) orientiert über die Bodenbildungsfaktoren.

S13.1.2 **Verbreitung gemäss Bodeneignungskarte der Schweiz**

Das Profil gehört zur Kartierungseinheit V7 (alpine kristalline Berglandschaft, steile Nordhänge, Hangneigung > 35 %). 354 Stichproben des Landesforstinventars gehören dieser Kartierungseinheit an. Das Profil repräsentiert damit 3.0 % der mit dem LFI insgesamt erfassten 11'863 Stichproben.

S13.1.3 **Besonderheiten am Profilort**

Das Bodenprofil liegt an der bergseitigen Böschung eines Ausstellplatzes.

S13.1.4 **Profilmorphologie und Klassierung**

Die im Profil angesprochenen morphologischen Bodenmerkmale sind in [Tab.S13.3](#) zusammen mit einer Profilskizze dargestellt.

Der Boden ist von einer Streuschicht und einem Fermentationshorizont bedeckt. Die überwiegend von Nadelbäumen und in geringen Mengen von Pflanzen der Krautschicht stammenden Rückstände werden nicht innerhalb eines Jahres zersetzt. Der Abbau verläuft demnach gehemmt. Mit der Horizontfolge L-F-AE wird die Humusform als Moder klassiert.

Morphologisch lassen sich im Profil unterhalb der organischen Auflage fünf Horizonte unterscheiden. Die Tiefenstufe 3 bis 30 cm wurde in zwei verschiedenen Tiefen beprobt (Bs1 und Bs2), so dass sich im Mineralboden insgesamt sechs Horizonte ergeben.

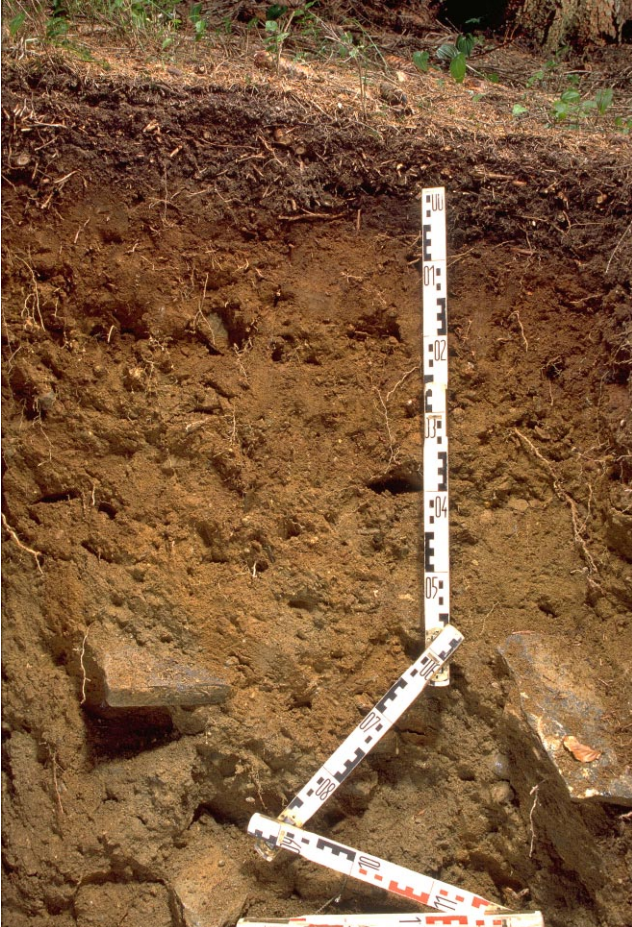


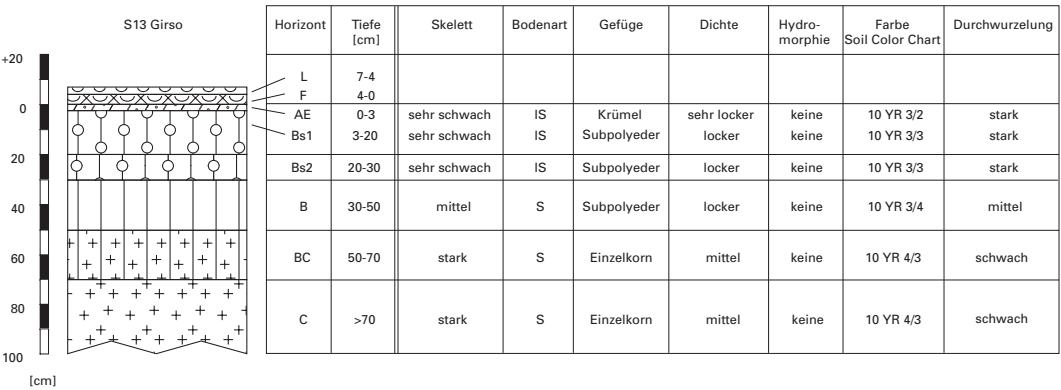
Abb. S13.1 (links) Bodenprofil Girso

Abb. S13.2 (rechts) Bestand am Profilort Girso

Tab. S13.1 Zusammenfassende Angaben zum Profil Girso	
Lokalname	Girso (Kanton Graubünden, Gemeinde Roveredo)
Lage	Landeskarte 1:25 000 Blatt 1314, Passo S. Jorio Koordinaten 728475/118975
Waldgesellschaft (Ellenberg und Klötzli 1972)	Nr. 47: Landschilf-Fichten-Tannenwald (<i>Calamagrostio villosae-Abietetum</i>)
Horizontfolge	L-F-AE-Bs1-Bs2-B-BC-C
Humusform	Moder
Bodentyp	Braunerde, podsoliert
Bodentyp nach FAO (1988)	Humic Cambisol

Tab.S13.2 Bodenbildungsfaktoren am Profilort Girso			
Relief	Höhe ü. M.	1458 m	
	Exposition	N	
	Neigung	52 %	
	Geländeform	Mittelhang	
Ausgangsgestein	Tektonik/Geologie	Penninikum, Moräne inkl. rezente Moränen (aus Gneis)	
	Lithofazies	Nr. 29: Moräneablagerungen (grobklastisch)	
	(nach Tuchschnid 1995)	physikalische Verwitterbarkeit Gestein:	variabel
		chemische Verwitterbarkeit Gestein:	variabel
Klima	Tongehalt Gestein:	sehr niedrig – mittel	
	T/N Jahresmittel	4.9 °C/1773 mm	
	T/N Januarmittel	– 1.6 °C/76 mm	
	T/N Julimittel	13.8 °C/141 mm	
	Tage mit Schneedecke	166	
	Wärmegliederung	rauh	
Pflanzen	Länge der Vegetationsperiode	135 – 150 Tage	
	Schicht	Deckung	häufigste Arten
	Baumschicht (10 – 15 m Höhe)	80 %	15 % Weiss-Tanne (<i>Abies alba</i>) 15 % Fichte (<i>Picea abies</i>)
	Strauchschicht	10 %	–
	Krautschicht	30 %	Wolliges Reitgras (<i>Calamagrostis villosa</i>) Eichenfarn (<i>Gymnocarpium dryopteris</i>) Schattenblume (<i>Maianthemum bifolium</i>) Gemeiner Sauerklee (<i>Oxalis acetosella</i>)
	Mooschicht	15 %	–

Tab.S13.3 **Profilskizze und Morphologie des Bodenprofils Girso**
 Bodenart: IS lehmiger Sand, S Sand



In 0 bis 3 cm Tiefe ist der Boden bräunlich schwarz gefärbt. Die örtlich etwas hellere Farbe ist ein Hinweis auf eine beginnende Podsolierung. In 3 bis 30 cm Tiefe erscheint der Boden dunkel-braun, örtlich aber auch unregelmässig leicht rötlich gefärbt, was als Hinweis auf eine Anreicherungszone gedeutet wird. Zwischen 30 und 50 cm ist der Boden wieder regelmässiger dunkel-braun gefärbt. Unterhalb 50 cm bis zur Profilsohle ist die Farbe matt gelblich-braun. Der Skelettgehalt ist bis 30 cm Tiefe sehr schwach, von 30 bis 50 cm Tiefe mittel und darunter stark. Die Bodenart der Feinerde entspricht bis 30 cm einem lehmigen Sand. Unterhalb 30 cm bis zur Profilsohle ist die Bodenart Sand. In 0 bis 3 cm Tiefe besitzt die Feinerde eine Krümelstruktur. Von 3 bis 50 cm liegt eine Subpolyederstruktur vor und unterhalb 50 cm ist ein Einzelkorngefüge vorhanden. Die Feinerde ist nur in den obersten Zentimetern sehr locker gelagert. Von 3 bis 50 cm Tiefe ist die Dichte locker, darunter mittel. Im ganzen Profil sind keine hydromorphen Merkmale zu erkennen.

Aufgrund der morphologischen Merkmale des Profils werden die Horizonte mit L-F-AE-Bs1-Bs2-B-BC-C gekennzeichnet und der Boden als podsolierte Braunerde klassiert.

Ergänzende Bodenmerkmale

Gemäss pH-Hellige ist die Feinerde des Bodens im ganzen Profil sehr sauer. Im Boden sind keine Hindernisse für das Wurzelwachstum sichtbar. Die Durchwurzelung ist bis 30 cm Tiefe stark und nimmt mit zunehmender Profiltiefe ab.

S13.2 Themenbereich «Physikalische Bodenkennwerte»

S13.2.1 Beschrieb einiger physikalischer Bodenkennwerte

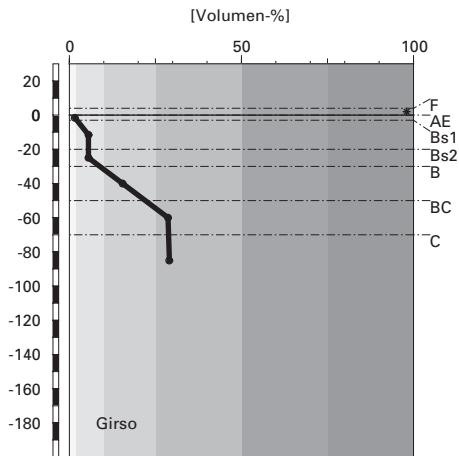
Skelettgehalt

Der Boden ist bis 30 cm Tiefe schwach, darunter mittel bis stark skeletthaltig (Abb. S13.3). Ab 50 cm Tiefe kommen auffällig kantige, plattenartige Steine vor (Abb. S13.1).

Bodenart

Die Feinerde ist überwiegend sandig. Während die Schluff- und Tonanteile in den obersten Horizonten noch bedeutend sind, nehmen sie mit der Tiefe deutlich ab (Abb. S13.4). Vor allem im C-Horizont dominiert die Sandfraktion, was sich mit dem geringen Verwitterungsgrad des Ausgangsgesteins

Skelettgehalt



Klassierung Skelettgehalt

>75	extrem stark
50-75	sehr stark
25-50	stark
10-25	mittel
2-10	schwach
<2	sehr schwach

Bodenart

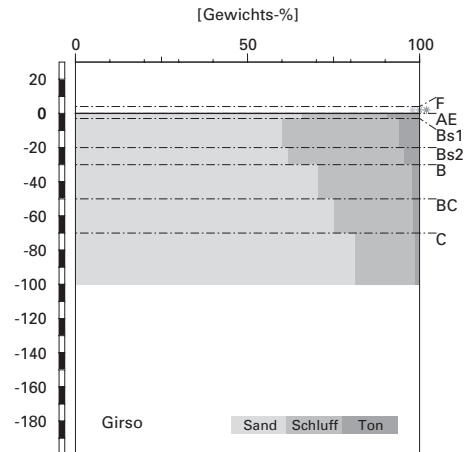


Abb.S13.3 (links) Skelettgehalt

Abb.S13.4 (rechts) Bodenart

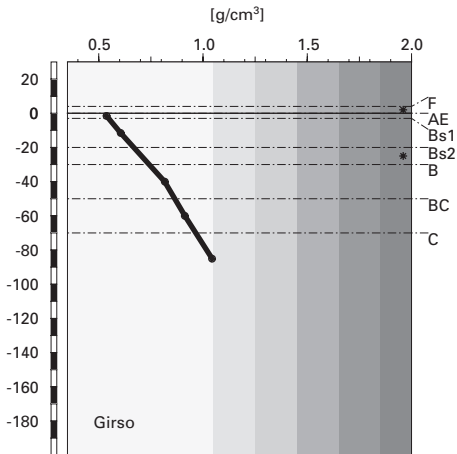
in diesem Horizont erklären lässt. Der Tonanteil ist vor allem ab 30 cm Tiefe sehr klein. In Bezug auf den Tongehalt handelt es sich, je nach Horizont, um leichten bis sehr leichten Boden.

Die im Bodenprofil mit der Fingerprobe bestimmte Bodenart stimmt gut mit den Werten der Laboranalyse überein (Tab. S13.3).

Dichte der Feinerde

Die Dichte der Feinerde nimmt zwar mit der Tiefe deutlich zu, wird aber dennoch in allen Horizonten als äusserst gering klassiert (Abb. S13.5). Unterhalb 50 cm Tiefe besteht ein Widerspruch zu den Dichtewerten, die an der Profilwand mittels Eindringwiderstand eines Messers erfasst wurden. Mit der Messer-Methode wurde die Dichte offensichtlich überschätzt (Tab. S13.3).

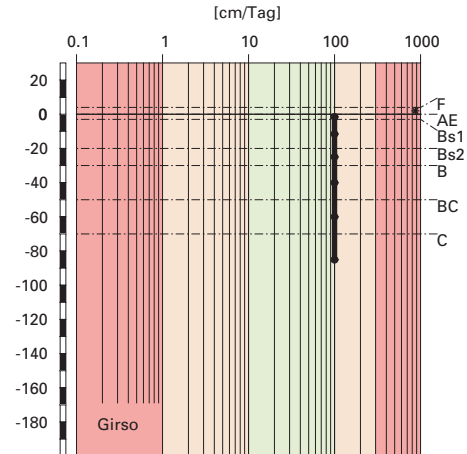
Feinerde-Dichte



Klassierung Dichte

>1.85	sehr hoch
1.65-1.85	hoch
1.45-1.65	mittel
1.25-1.45	gering
1.05-1.25	sehr gering
<1.05	äusserst gering

gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_{sat})



Klassierung k_{sat}

>300	äusserst hoch
100-300	sehr hoch
40-100	hoch
10-40	mittel
1-10	gering
<1	sehr gering

Abb.S13.5 (links) Dichte der Feinerde

Abb.S13.6 (rechts) Wasserleitfähigkeit im gesättigten Boden

Wasserleitfähigkeit im gesättigten Boden

Der Boden ist aufgrund der äusserst geringen Dichte und des kleinen Tonanteils in allen Horizonten hoch durchlässig (Abb.S13.6).

Pflanzenverfügbares Wasser

Die Wasserspeicherkapazität des Bodens bis 120 cm Tiefe wird mit 235 l/m² als sehr hoch klassiert (Abb.S13.7). Positiv auf die Speicherleistung wirkt sich insbesondere der relativ niedrige Skelettgehalt aus.

S13.2.2

Bodenkundliche und ökologische Interpretationen

Wasser- und Lufthaushalt des Bodens

Im gesamten Profil kommen keine Vernässungsmerkmale vor, was angesichts der hohen Durchlässigkeitswerte nicht erstaunt (Abb.S13.6). Gesättigte Phasen sind in diesem Boden höchstens von kurzer Dauer.

pflanzenverfügbares Wasser

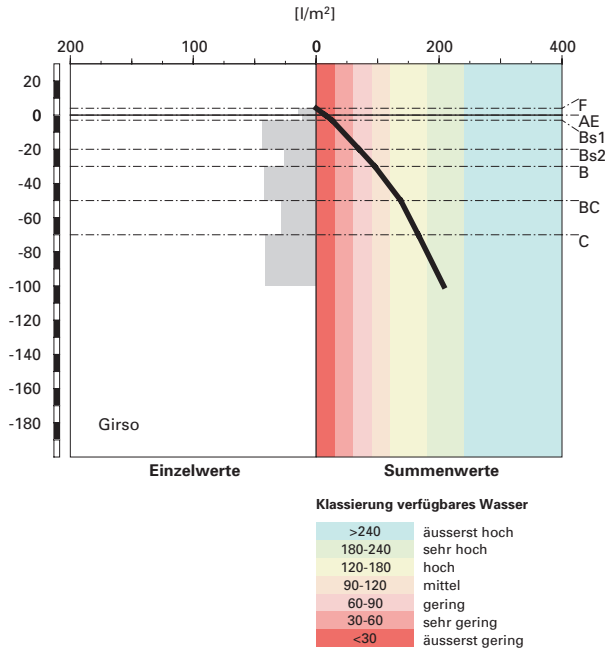


Abb. S13.7 Pflanzenverfügbares Wasser

Durchwurzelbarkeit des Bodens

Der Boden ist für alle Baumarten mindestens profilumfassend durchwurzelbar, da die Dichte der Feinerde durchwegs weniger als 1.4 g/cm^3 beträgt und die Durchlüftung in allen Horizonten stets ausreichend ist. Die Gründigkeit des Bodens ist nicht eingeschränkt und wird mit $>120 \text{ cm}$ als sehr tiefgründig klassiert. Der Wurzelraum wird vom aktuellen Bestand, der überwiegend aus Fichten und Tannen besteht, gut genutzt. Wurzeln sind, wenn auch nur vereinzelt, bis zur Profilsohle (105 cm) vorhanden und dringen mit Sicherheit noch tiefer in den Unterboden ein.

Wasserversorgung des Baumbestandes

Für die von uns gewählte Referenztiefe von 120 cm ergibt sich aus unseren Berechnungen, dass der Bestand in Trockenperioden ohne nennenswerte Niederschläge nach rund 30 Tagen an Wassermangel zu leiden beginnt. Da der Boden tiefer als 120 cm durchwurzelbar ist, dürfte Trockenstress sogar

noch später eintreten. Das Risiko für Trockenstress wird an diesem Fichten-Tannenstandort unter den gegebenen klimatischen Verhältnissen als klein beurteilt.

Bodenbefahrbarkeit

Der Boden würde in nassem Zustand trotz der organischen Auflage empfindlich auf Befahren mit schweren Maschinen reagieren. Ausschlag gebend für diese Beurteilung ist vor allem der geringe Skelettgehalt bis 30 cm Tiefe. Beim Befahren würden zudem die zahlreichen in der organischen Auflage vorhandenen Wurzeln beschädigt. Da der Wald an einem Steilhang liegt, ist ein Befahren des Bestandes allerdings nicht möglich.

S13.3 Themenbereich «Bodenhauptbestandteile»

S13.3.1 Charakterisierung der Bodenhauptbestandteile

Organische Substanz

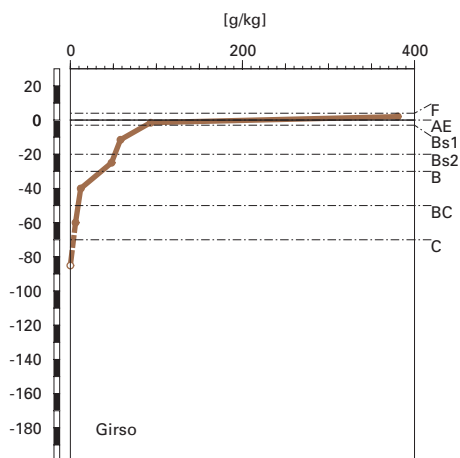
Der Baumbestand am Profilort Girso setzt sich aus Fichten, Tannen und einzelnen Lärchen zusammen. Die Baumschicht erreicht einen Kronenschluss von 80 %. In der Strauchschicht sind vor allem junge Bäume zu finden und die Krautschicht, welche einen Deckungsgrad von 30 % aufweist, besteht hauptsächlich aus Reitgras und Eichenfarn. Die anfallende Streu aus der Baum- und Krautschicht ist schwer abbaubar. Es haben sich eine 3 cm mächtige Streuschicht aus unzersetzten Nadeln und ein 4 cm mächtiger F-Horizont gebildet. Die Humusform ist ein Moder.

Der nur 3 cm mächtige AE-Horizont ist deutlich dunkler gefärbt als die darunter folgenden Bs-Horizonte. Er enthält 9.3 % organischen Kohlenstoff (C_{org}) (Abb. S13.8). Der C_{org} -Gehalt nimmt mit der Profiltiefe bis in den B-Horizont auf 1.2 % ab. Vom B- bis in den BC-Horizont erfolgt eine weitere Abnahme auf 0.6 % und der C-Horizont ist frei von organischer Substanz. Aus diesen Gehalten resultiert ein Vorrat an organischem Kohlenstoff von 155 t/ha (Abb. S13.9), wobei für die Vorratsberechnung im F-Horizont ein C_{org} -Gehalt von 40 % und eine Dichte von 0.2 g/cm³ angenommen wurden.

Tonverteilung sowie Verteilung von Aluminium- und Eisenoxiden

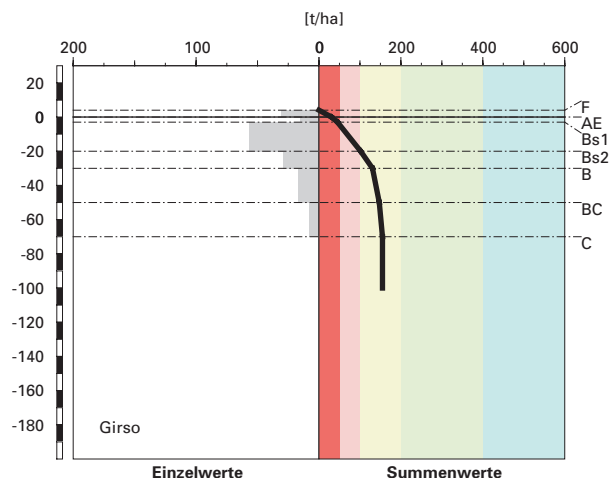
Der Anteil der Tonfraktion nimmt mit der Profiltiefe kontinuierlich ab (Abb. S13.4). Im AE-Horizont beträgt er 9.3 % und im C-Horizont sind es nur noch 1.4 %.

organischer Kohlenstoff



Kohlenstoff-Vorrat

(C_{org})



Klassierung Vorrat

>400	sehr hoch
200-400	hoch
100-200	mittel
50-100	gering
<50	sehr gering

Abb. S13.8 (links) Gehalt an organischem Kohlenstoff

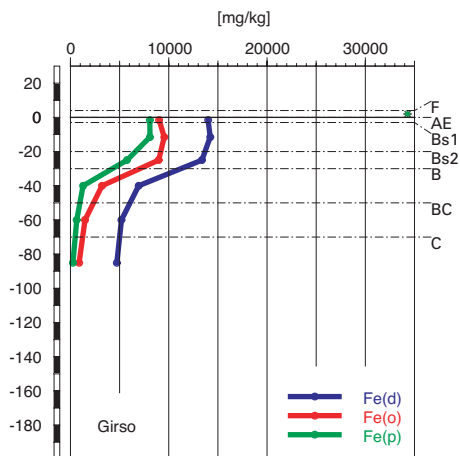
Abb. S13.9 (rechts) Vorrat an organischem Kohlenstoff

Das Dithionit-extrahierbare Eisen (Fe_d) besitzt in den obersten drei Horizonten die höchsten Gehalte (rund 14 g/kg; [Abb. S13.10](#)). Vom Bs2- bis in den B-Horizont ist eine markante Abnahme auf die Hälfte zu beobachten. In noch grösserer Tiefe nimmt das Fe_d nur noch langsam auf 4.7 g/kg im C-Horizont ab.

Die Tiefenverteilungen der Oxalat-extrahierbaren Aluminium- und Eisengehalte (Al_o bzw. Fe_o) sind unterschiedlich ([Abb. S13.10 und S13.11](#)). Während das Fe_o praktisch parallel dem Fe_d verläuft, steigt der Al_o-Gehalt vom AE-Horizont von 4.5 g/kg auf 19 g/kg im Bs2-Horizont an. Unterhalb des Bs2-Horizontes erfolgt eine ebenso markante Abnahme bis zum Minimum von rund 3 g/kg im C-Horizont.

Die Pyrophosphat-extrahierbaren Aluminium- und Eisengehalte (Al_p bzw. Fe_p) verlaufen parallel den entsprechenden Gehalten von Al_o bzw. Fe_o ([Abb. S13.10 und S13.11](#)).

Eisen-Oxide (Gehalte)



Aluminium-Oxide (Gehalte)

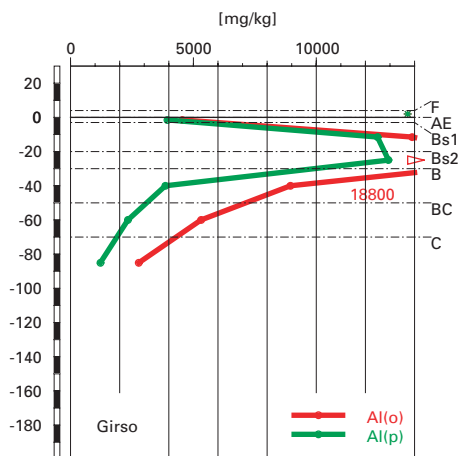


Abb.S13.10 (links) Gehalte an Dithionit- (Fe_d), Oxalat- (Fe_o) und Pyrophosphat- (Fe_p) extrahierbarem Eisen

Abb.S13.11 (rechts) Gehalte an Oxalat- (Al_o) und Pyrophosphat- (Al_p) extrahierbarem Aluminium

Eisen- und Aluminiumoxide (Verhältnisse)

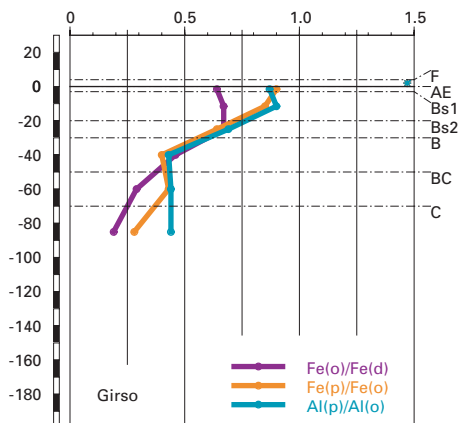


Abb.S13.12 Verhältnisse der Fe- und Al-Oxide

Das Fe_o/Fe_d -Verhältnis variiert in den obersten drei Horizonten um 0.7 und nimmt zum C-Horizont linear auf 0.2 ab (Abb. S13.12). Damit weist es ein ähnliches Tiefenprofil auf, wie die entsprechenden Fe_o - bzw. Fe_d -Gehalte.

Die Fe_p/Fe_o - und Al_p/Al_o -Verhältnisse haben in den obersten beiden Horizonten Werte um 0.9 (Abb. S13.12). Bis in den B-Horizont nehmen diese Werte linear auf 0.4 ab und bleiben dann bis in den C-Horizont mehr oder weniger konstant bei diesem Wert.

S13.3.2 Bodenkundliche Interpretation

Da die Krautschicht am Profilort relativ spärlich ausgebildet ist und die Strauchschicht fast vollständig fehlt, fällt die Streu hauptsächlich von den Fichten und Tannen der Baumschicht an. Diese Streu ist schwer abbaubar. Zudem liegt der Profilort auf beinahe 1500 m.ü.M., ist N-exponiert in einem entsprechend rauhen Klima mit jährlichen Niederschlägen von 1773 mm und einer Jahresdurchschnittstemperatur von rund 5°C. Deshalb ist der Streuabbau nur sehr langsam und es haben sich eine 3 cm dicke Streuschicht und ein 4 cm mächtiger F-Horizont gebildet. Die Humusform wird deshalb als Moder bezeichnet. Im F-Horizont beträgt das C/N-Verhältnis 23 und ist damit typisch für diese Humusform. Es wird als mässig weit klassiert, womit die Mineralisierung der organischen Substanz in der Auflage als niedrig beurteilt wird.

Die nicht mineralisierte organische Substanz wird in Form von Humusstoffen in den Mineralboden eingewaschen und dort entweder durch Adsorption an aktive mineralische Oberflächen stabilisiert, weiter mineralisiert, oder sie wird in Form von gelöster organischer Substanz tiefer ins Bodenprofil verlagert. Das C/N- bzw. C/P-Verhältnis im AE-Horizont beträgt 18 bzw. 231 und wird als mittel klassiert. Die Feinerde besitzt in diesem Horizont eine Krümelstruktur, weshalb die Bodenbiologie im obersten Bereich des Mineralbodens als aktiv und die entsprechende Mineralisierung aufgrund der C/N- und C/P-Verhältnisse als mittel beurteilt wird. Aufgrund des tiefen pH-Wertes im Oberboden und der geringen Mächtigkeit des AE-Horizontes wird die Tätigkeit von Organismen, welche die Mineralerde und die organische Substanz vermischen, gering sein. Somit erfolgt die Tiefenverlagerung der organischen Substanz vor allem durch Transport von nicht mineralisierten Komponenten in gelöster Form. Dies können Nebenprodukte des mikrobiellen Abbaus sein. Das ist am C/N-Verhältnis ersichtlich, welches vom AE- bis in den Bs2-Horizont von 18 auf 24 zunimmt. Im tiefer gelegenen B-Horizont nimmt es wieder auf 20 ab (Tab. A335 in Blaser et al. 2005).

Aufgrund der Mächtigkeit und Ausprägung der durch organische Substanz dunkel gefärbten Zone im Bodenprofil, ist nicht viel Humus stabilisiert worden. Dies liegt weniger an den fehlenden Voraussetzungen der Humusstabilisierung als vielmehr an der geringen Biomasseproduktion an diesem Standort. Deshalb konnte sich im gesamtschweizerischen Vergleich nur ein mittlerer Vorrat von 155 t/ha an organischem Kohlenstoff ausbilden.

Das Ausgangsgestein wird durch eine Moräne aus Gneis gebildet, welche natürlicherweise wenig Tonminerale enthält. Zudem verwittert dieser Gneis relativ grobkörnig, weshalb der Anteil der Tonfraktion im ganzen Profil unterhalb von 10% liegt. Er nimmt entsprechend der abnehmenden Verwitterungsintensität mit der Profiltiefe ab. Bei den vorherrschenden pH-Verhältnissen im Mineralboden werden keine Tonminerale gebildet.

Die unterschiedlich extrahierbaren Eisenverbindungen zeigen alle ein ähnliches Tiefenprofil. Dabei sind die Gehalte von Fe_d , Fe_o und Fe_p im AE-, Bs1- und Bs2-Horizont am grössten, bevor eine markante Abnahme zum B-Horizont erfolgt. Ein anderes Muster zeigen die Al_o - und Al_p -Gehalte: sie weisen zuerst eine markante Zunahme vom AE- in die Bs-Horizonte auf, bevor vom Bs2- zum B-Horizont eine ebenso markante Abnahme erfolgt (Abb. S13.11). Diese unterschiedlichen Muster können mit der weiter gehenden Verlagerung von Aluminium im Vergleich zu Eisen erklärt werden. Der AE-Horizont ist bereits deutlich an Aluminium verarmt, was sich in einem Verlagerungsindex von 5.0, gebildet aus dem Quotienten von Al_o im Bs2- und im AE-Horizont, äussert. Der AE-Horizont weist bezüglich Al_o und Al_p ähnlich tiefe Gehalte wie der BC- bzw. B-Horizont auf. Das Maximum von Al_o und Al_p in den Bs-Horizonten ist auf Komplexbildung mit gelöster organischer Substanz und Verlagerung in diese Horizonte zu erklären. Eisen hingegen wird aus dem AE-Horizont praktisch nicht oder nur sehr wenig verlagert. Der entsprechende Verlagerungsindex für Fe_o , gebildet aus dem Quotienten des maximalen Gehaltes im Bs1- und dem Gehalt im AE-Horizont, beträgt nur 1.0. Einerseits ist das auf die im Gegensatz zu Aluminium bei tieferen pH-Werten erfolgende Lösung von Eisen zurückzuführen. Andererseits kann es aber auch durch eine grössere Affinität von gelöster organischer Substanz für Eisen im Vergleich zu Aluminium erklärt werden (Mokma und Buurman 1982). Bei dem tiefen pH-Wert von 3.3 im AE-Horizont kann davon ausgegangen werden, dass auch Eisen gelöst wird. Durch die grössere Affinität von gelöster organischer Substanz für Eisen werden diese in einer geringeren Bodentiefe mit Fe gesättigt und dadurch ausgefällt. Nicht gesättigte, gelöste organische Substanzen sickern weiter in den Boden ein, sättigen sich in tieferen Bereichen mit Aluminium und werden entsprechend tiefer im Boden ausgefällt.

Dass die amorphen Eisen- und Aluminiumverbindungen in den AE- und Bs-Horizonten mit der organischen Substanz assoziiert sind, zeigen die Al_p/Al_o - bzw. Fe_p/Fe_o -Verhältnisse, welche nahe bei 1 liegen. In den Horizonten mit sehr tiefem Gehalt an organischem Kohlenstoff werden diese Verhältnisse deutlich enger.

Das Fe_o/Fe_d -Verhältnis ist in den obersten drei Horizonten ebenfalls sehr weit. Dies widerspiegelt die kristallisationshemmende Wirkung der organischen Substanz. Sobald der C_{org} -Gehalt im B-Horizont auf 1.2% zurückgeht, wird das Verhältnis bedeutend enger, was heisst, dass sich neben den organischen Verbindungen auch mineralische Eisenoxide hoher Kristallinität bilden. Entsprechend niedrig ist das Fe_o/Fe_d -Verhältnis im B-Horizont.

Die aufgrund morphologischer Kriterien vorgenommene Klassierung als podsolierte Braunerde kann durch die Interpretation der Tiefenverteilung der organischen Substanz und der Fe- und Al-Oxide bestätigt werden.

S13.4 Themenbereich «Säurezustand»

S13.4.1 Charakterisierung des Säurezustandes

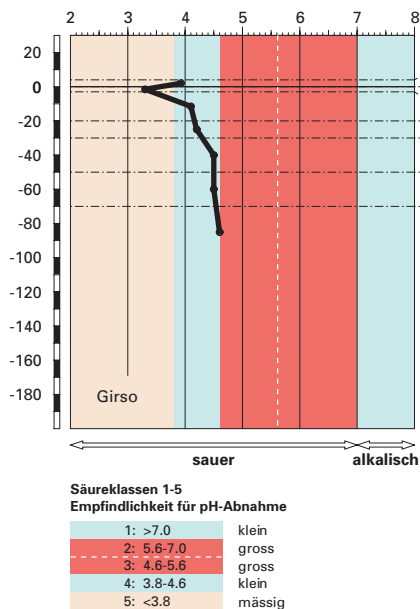
pH-Wert

In diesem stark bis sehr stark sauren Boden liegt der pH-Wert im geringmächtigen AE-Horizont in der Säureklasse 5, in allen anderen Horizonten in der Säureklasse 4 (Abb. S13.13). Er beträgt im F-Horizont 3.9, nimmt im AE-Horizont auf 3.3 ab und steigt mit der Profiltiefe allmählich auf 4.6 im C-Horizont an.

Austauschbare Kationen und Basensättigung

Der grösste Teil der Austauscherplätze wird mit Ausnahme des F-Horizontes in allen Horizonten von Aluminium besetzt (Abb. S13.14). Im AE-Horizont sind grössere Mengen an austauschbaren Protonen vorhanden. Mit Ausnahme des F- und AE-Horizontes sind im ganzen Profil nur unbedeutende Mengen von Nährstoffkationen in austauschbarer Form gebunden. Die Basensättigung ist mit Ausnahme des F- und des nur 3 cm mächtigen AE-Horizontes gering und variiert nur wenig mit der Tiefe (Abb. S13.15). Im AE-Horizont ist die Basensättigung mässig und mehr als doppelt so hoch als in den tiefer gelegenen Horizonten. In der organischen Auflage ist sie mit rund 89% am grössten und wird damit als sehr hoch klassiert.

pH-Wert (CaCl₂)



austauschbare Kationen

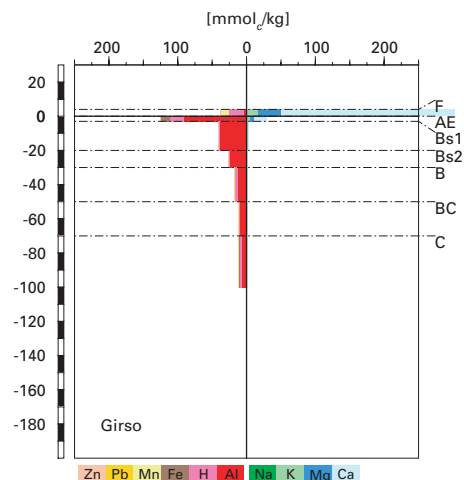


Abb.S13.13 (links) pH-Wert und Säureklassen

Abb.S13.14 (rechts) Belegung des Kationenaustauschers

S13.4.2 Interpretationen zum Säurezustand

Stand der Bodenversauerung

Dieser Boden hat sich aus einer gneishaltigen Moräne entwickelt. Er ist sehr stark versauert. Die Belegung des Kationenaustauschers im ganzen Profil mit sauren Kationen beträgt rund 91 %. Die Versauerungsfront befindet sich bereits tiefer als die Profilschle in 100 cm Tiefe. Dies ist an der grossen Al-Belegung des Austauschers bis in den C-Horizont zu erkennen. Das saure Ausgangsgestein, das rauhe Klima auf 1458 m. ü. M. in N-Exposition und die Nadelwaldvegetation begünstigen die Versauerung. Allerdings sind morphologisch kaum Anzeichen einer Podsolierung erkennbar, was möglicherweise durch die gramineenreiche Krautvegetation bedingt ist. Schwach entwickelte, junge Böden auf Gneis und Granit haben in den Mineralerdehorizonten pH-Werte, die in den schlecht puffernden Säureklassen 3 oder 2 zu finden sind. Im Laufe der Bodenentwicklung wird dieser

Basensättigung

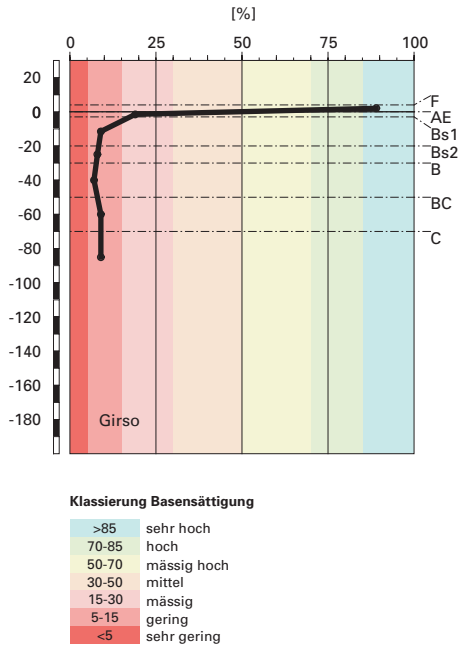


Abb. S13.15 Basensättigung

pH-Bereich relativ rasch durchschritten. Weitaus häufiger befinden sich deshalb die pH-Werte in solchen Böden in der Säureklasse 4, in welcher die Säurepufferung durch Auflösung von Aluminiumverbindungen erfolgt. Die Belegung des Kationenaustauschers mit Aluminium ist deshalb ein gutes Mass zur Beurteilung der Bodenentwicklung und -versauerung auf solchen Ausgangsgesteinen.

Risiko für Boden und Pflanzen

Das Risiko für eine weitere pH-Abnahme ist in diesem Boden insgesamt sehr klein, da kein Horizont in der schwach puffernden Säureklasse 2 oder 3 liegt. Allerdings ist ein spezielles Augenmerk auf den AE-Horizont, welcher dem grössten Versauerungsdruck ausgesetzt ist, zu richten, denn dieser Horizont befindet sich in der mässig puffernden Säureklasse 5. Eine allfällige pH-Abnahme wird sich zuerst in diesem Horizont manifestieren. Allerdings weist der AE-Horizont von allen Mineralerdehorizonten die grösste Basensättigung auf. Dies wird durch den Nährstoffkreislauf verursacht, der mit der Streu immer wieder Nährstoffe an die Bodenoberfläche bringt. In den anderen Horizonten ist das Risiko einer weiteren pH-Abnah-

me klein, da sie sich in einem pH-Bereich befinden, welcher durch die Auflösung von Al-Verbindungen stark gepuffert ist.

Das Risiko für das Pflanzenwachstum ist bereits beim aktuellen Säurezustand gross, denn mit Ausnahme des AE-Horizontes ist das BC/Al-Verhältnis in allen Bodentiefen kleiner als 0.2 und damit im kritischen Bereich. Damit befinden sich 96% der Feinerde des gesamten Profils in diesem kritischen Bereich. Die BC/Al-Verhältnisse variieren hier zwischen 0.08 und 0.11 (Tab. A330 in Blaser et al. 2005). Eine weitere Bodenversauerung wird diese Situation verschärfen und zusätzlich die Nährstoffversorgung weiter verschlechtern.

S13.5 Themenbereich «Schwermetalle»

S13.5.1 Tiefenverteilung der Schwermetalle

In diesem Boden verhalten sich die Schwermetalle Cr, Ni und Zn ähnlich (Abb. S13.16). Sie zeigen ein ausgeprägtes Maximum im Bs2 und/oder im B-Horizont. Die Cr- und Zn-Gehalte weisen zudem ein zweites Maximum im C-Horizont auf. Kupfer hingegen bleibt vom AE- bis zum Bs2-Horizont gleich und nimmt dann bis zum BC-Horizont stark zu. Blei verhält sich umgekehrt, d. h. sein Gehalt nimmt vom AE- zum Bs2-Horizont stark ab, bleibt dann bis zum BC-Horizont gleich und sinkt darunter unter die Bestimmungsgrenze.

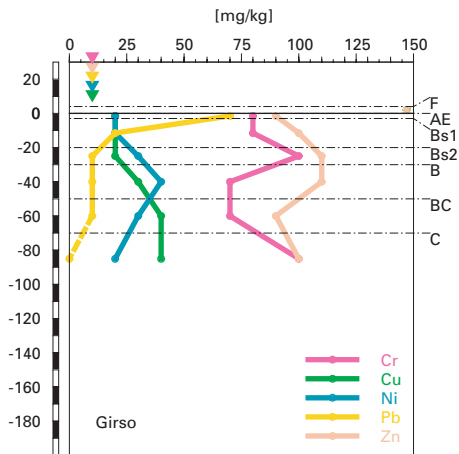
S13.5.2 Wertung der Schwermetallgehalte im untersten Mineralerde-Horizont im geochemischen Vergleich

Bezogen auf das Ausgangsgestein, einer Moräne aus Gneis, liegen der Cr-, Cu- und Zn-Gehalt im C-Horizont oberhalb, der Ni- und Pb-Gehalt unterhalb typischer Wertebereiche. Da für Moräne (Lithofazies 29) keine geochemischen Angaben vorhanden sind, wurde die geologisch nächstverwandte Lithofazies mit geochemischen Angaben (Lithofazies 24, Glaziallehme) für die Beurteilung beigezogen.

S13.5.3 Beurteilung der quellenunabhängigen Belastung nach VBBo

Für den F- und AE-Horizont wurden wegen ihres hohen Humusgehaltes (Abb. S13.8) die volumenbezogenen Konzentrationen (mg/dm^3 ; Tab. A333 in Blaser et al. 2005) beurteilt. Diese sind niedriger als die massenbezo-

Cr, Cu, Ni, Pb, Zn
(effektive Totalgehalte)



Cr, Cu, Ni, Pb, Zn
(HNO₃-extrahierbare Gehalte)

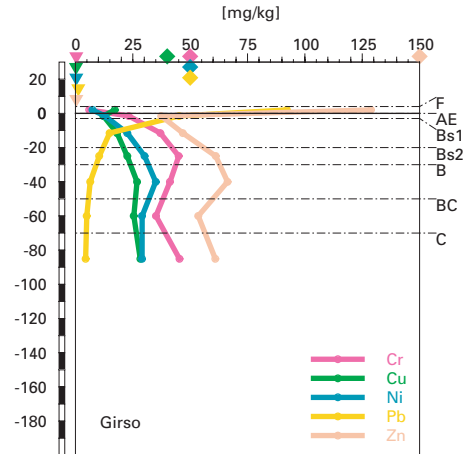


Abb. S13.16 (links) Schwermetalle: effektive Totalgehalte

Abb. S13.17 (rechts) Schwermetalle: Salpetersäure-extrahierbare Gehalte

genen Gehalte (mg/kg; [Abb. S13.17](#)), da die Dichte kleiner ist als 1 g/cm³. Mangels Messwert wurde für den F-Horizont eine Dichte von 0.2 g/cm³ angenommen.

Bezogen auf die VBBo liegen für Pb und Zn profilumfassend sehr niedrige bis niedrige Konzentrationen bzw. Gehalte vor ([Abb. S13.17](#)). Die Cr-, Cu- und Ni-Konzentrationen sind im F- und AE-Horizont sehr niedrig. Unterhalb des AE-Horizontes ist der Cr-Gehalt hoch. Der Ni- und Cu-Gehalt sind im Bs1-Horizont niedrig, darunter erhöht bis hoch.

Die Richtwerte der VBBo werden nicht überschritten.

S13.5.4 **Anreicherungsfaktoren**

Dieser Boden ist profilumfassend deutlich an Cr und Cu und etwas an Zn verarmt ([Tab. S13.4](#)). Im Detail widerspiegeln die Anreicherungsfaktoren auch die Maxima und Minima in der Tiefenverteilung der Metall-Gehalte ([Abb. S13.16](#)). Nickel ist im Bs2- und B-Horizont leicht angereichert, wobei der maximale Anreicherungsfaktor mit dem maximalen Gehalt im B-Horizont zusammenfällt. Tiefenverteilung und Anreicherungsfaktoren aller vier

Tab. S13.4 Anreicherungsfaktoren						
Horizont	Tiefe [cm]	Anreicherungsfaktor				
		Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
AE	0– 3	0.73	0.46	0.91	n.b.	0.82
BS1	3–20	0.67	0.42	0.84	n.b.	0.84
BS2	20–30	0.88	0.44	1.31	n.b.	0.96
B	30–50	0.51	0.54	1.45	n.b.	0.80
BC	50–70	0.54	0.78	1.17	n.b.	0.70
C	>70	1.00	1.00	1.00	n.b.	1.00

bereits besprochenen Schwermetalle lassen sich mit Verlagerung durch Podsolierungsprozesse erklären, wobei sie alle eher weiter verlagert werden als Fe und Al (Abb. S13.10 und S13.11). Dabei spielen tiefer pH-Wert und Verlagerung mit gelöster organischer Substanz eine Rolle. Kupfer, welches sich durch besonders stabile Verbindungen mit gelöster organischer Substanz auszeichnet, wurde auch am weitesten verlagert bzw. ausgewaschen. Am anderen Ende der Skala steht Ni, welches zwar verlagert, aber bis jetzt kaum ausgewaschen wurde.

Die Tiefenverteilung von Pb hingegen wird durch die Anreicherung anthropogener Einträge im AE-Horizont dominiert.

S13.5.5 **Schätzung der Mobilität der Schwermetalle**

Für Zn wird aufgrund der stark bis sehr stark sauren Verhältnisse in diesem Boden eine mittlere bis sehr grosse Mobilität geschätzt (Abb. S13.18). Bei der Abschätzung der Mobilität der übrigen Schwermetalle wirkt vom F- bis zum B-Horizont die organische Substanz verringernd. Der Vergleich mit der Tiefenverteilung (Abb. S13.16 und S13.17) und den Anreicherungsfaktoren (Tab. S13.4) zeigt aber, dass insbesondere die Mobilität von Cr und Cu unterschätzt wird. Dies liegt ziemlich sicher daran, dass in diesem Profil die Verlagerung mit gelöster organischer Substanz, welche bei der Abschätzung der in Abb. S13.18 dargestellten Mobilitätsindizes nicht berücksichtigt wird, die Verteilung der Schwermetalle im Profil wesentlich bestimmt.

Aufgrund der abgeschätzten Mobilitäten und der gemessenen Anreicherungsfaktoren muss mit einer Belastung des Grundwassers mit Cr, Cu und Zn gerechnet werden.

S13.5.6 **Schätzung der Gefährdung von Mikroorganismen**

Im AE- und Bs1-Horizont sind die meisten Schwermetalle in Gehalten vorhanden, welche für pflanzliche und tierische Mikroorganismen in Wald-

Schwermetallmobilität

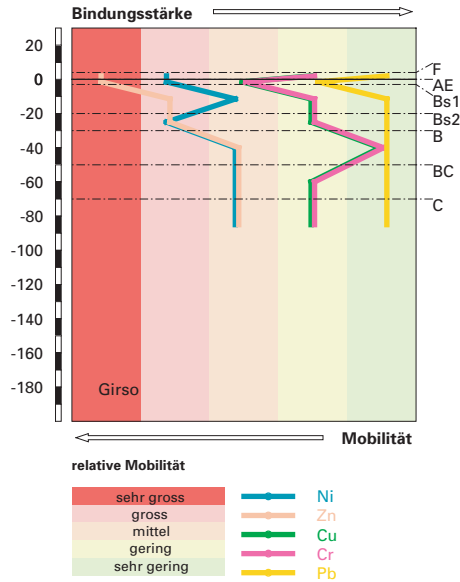


Abb. S13.18 Mobilität der Schwermetalle

böden unkritisch sind. Der Cr-Gehalt liegt im Grenzbereich zur Toxizität für Mikroorganismen.

S13.6 Themenbereich «Nährstoffe»

S13.6.1 Nährstoffverfügbarkeit im Oberboden

Das rauhe Klima, die kürzere Vegetationszeit auf rund 1460 m.ü.M. in N-Exposition, die schwer abbaubare Nadelstreu sowie die sehr stark saure Feinerde im AE-Horizont wirken einem zügigen Streuabbau entgegen. Es hat sich ein F-Horizont von 4 cm Mächtigkeit entwickelt, weshalb die Humusform als Moder klassiert wird. Das C/N-Verhältnis im F-Horizont beträgt 23 und ist typisch für die Humusform Moder. Es wird als mässig weit klassiert, was mit einer entsprechend niedrigen Mineralisierungsrate der

organischen Substanz verbunden ist. Das mässig weite C/P-Verhältnis im F-Horizont bestätigt diese Einschätzung.

Die Krümelstruktur im AE-Horizont lässt hingegen auf eine bessere Nährstoffumsetzung schliessen. Da dieser Horizont nur 3 cm mächtig ist, wird dieses Kriterium nicht stark gewichtet, so dass die Nährstoffverfügbarkeit im Oberboden insgesamt als gehemmt eingeschätzt wird.

S13.6.2 **Nährstoffgehalte**

Die Kationenaustauschkapazität der Feinerde folgt im Wesentlichen der Ton- und Humusverteilung. Sie ist im F-Horizont sehr hoch und im AE-Horizont mittel. Mit der Profiltiefe nimmt sie kontinuierlich ab. Ab 30 cm Tiefe ist sie extrem gering (Abb. S13.19). Die Nährstoffmengen, welche im Umlauf gehalten werden, sind bemerkenswert klein. Nur im F-Horizont sind fast 90% des Kationenaustauschers mit Nährstoffkationen belegt. Selbst im nährstoffreichsten Mineralbodenhorizont (AE-Horizont) sind nur knapp 20% der Austauscherplätze mit Nährstoffkationen belegt. In allen anderen Horizonten beträgt die Basensättigung weniger als 10%. Die Tiefenverteilungen der Austauscherbelegung von Ca, Mg und K sind sich sehr ähnlich und die austauschbaren Gehalte unterscheiden sich nur unwesentlich voneinander (Abb. S13.20). Auffallend ist dennoch der im Unterboden im Vergleich zu Mg grössere K-Gehalt. Ebenfalls auffällig ist die durch die Podsolierung bedingte hohe Al-Belegung in den Bs-Horizonten. Aluminium hat in diesen Horizonten die Protonen von den Humusstoffen verdrängt. Die austauschbaren Protonen sind deshalb in den Bs-Horizonten minimal und nehmen erst wieder in den tiefer gelegenen Horizonten zu.

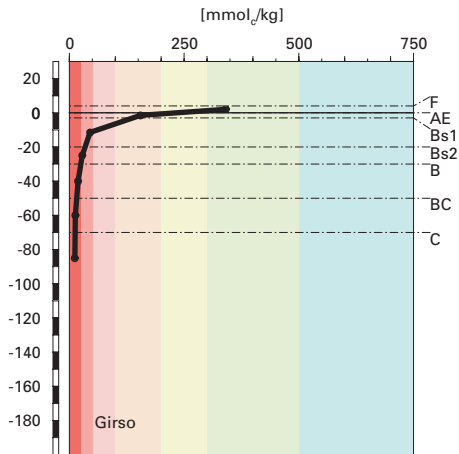
S13.6.3 **Nährstoffvorräte**

Bedingt durch die sehr geringe bis extrem geringe Kationenaustauschkapazität und die geringe Basensättigung ab 3 cm Tiefe, handelt es sich um einen nährstoffarmen Boden. Aus den Abb. S13.21–S13.23 ist zu entnehmen, dass die Vorräte bis 60 cm Tiefe wie folgt bewertet werden:

Ca mässig
Mg gering
K sehr gering

Der Boden ist jedoch sehr tiefgründig und mindestens profilumfassend durchwurzelt. Unter Berücksichtigung der grösseren Mächtigkeit des durchwurzeltbaren Bodenvolumens wird der K-Vorrat als gering bewertet. An der Beurteilung der beiden anderen Vorräte ändert sich nichts. Die Nut-

Kationenaustauschkapazität (KAK)



Klassierung KAK

>500	extrem hoch
300-500	sehr hoch
200-300	hoch
100-200	mittel
50-100	gering
25-50	sehr gering
<25	extrem gering

Austauscherbelegung mit Ca, Mg, K und Al (in % der KAK)

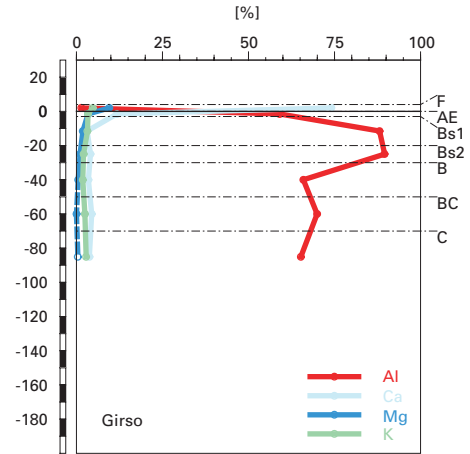
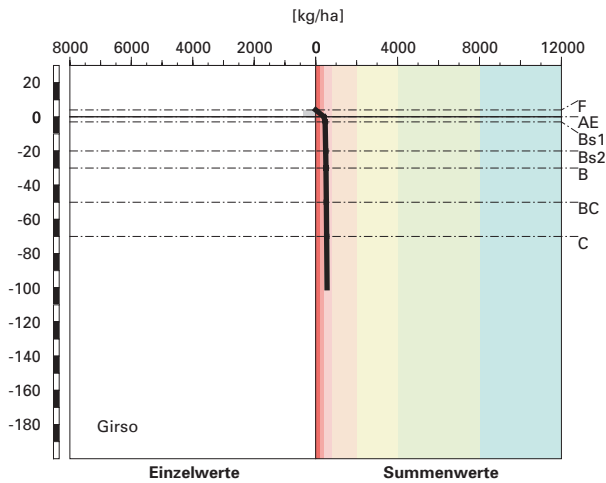


Abb. S13.19 (links) Kationenaustauschkapazität

Abb. S13.20 (rechts) Belegung des Kationenaustauschers

zung dieser mässigen bis sehr geringen Nährstoffvorräte ist durch das kleine Risiko für Trockenstress und die gute Durchwurzelbarkeit prinzipiell nicht eingeschränkt. Es gilt allerdings zu beachten, dass 76% des Ca-Vorrates in der organischen Auflage gespeichert sind. Deshalb kann es auch in kurzen Trockenphasen zu Problemen in der Nährstoffversorgung führen.

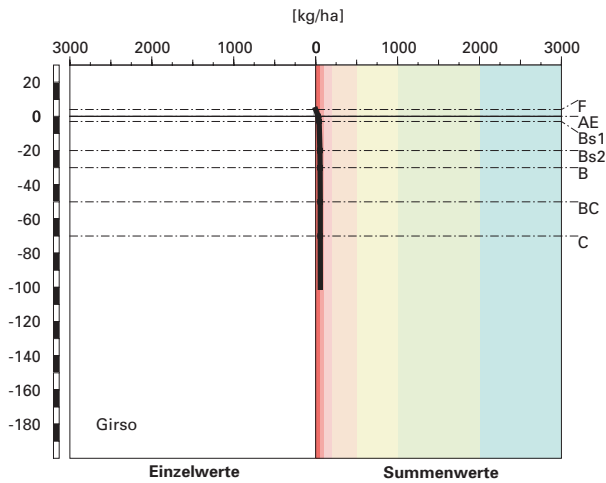
Kalzium-Vorrat



Klassierung Vorrat	
>8000	sehr hoch
4000-8000	hoch
2000-4000	mässig hoch
800-2000	mittel
400-800	mässig
200-400	gering
<200	sehr gering

Abb.S13.21 Vorrat an Kalzium

Magnesium-Vorrat



Klassierung Vorrat	
>2000	sehr hoch
1000-2000	hoch
500-1000	mässig hoch
200-500	mittel
100-200	mässig
50-100	gering
<50	sehr gering

Abb.S13.22 Vorrat an Magnesium

Kalium-Vorrat

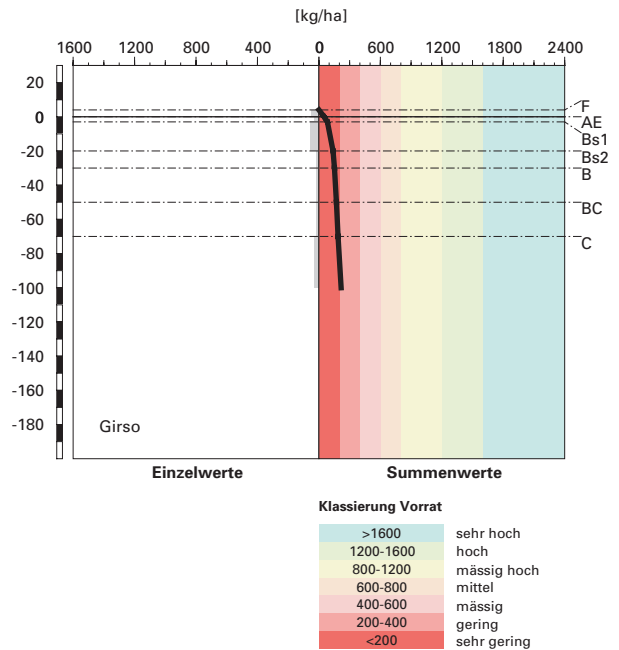


Abb. S13.23 Vorrat an Kalium

S13.7 Themenbereich «Waldbaulich relevante Bodenkennwerte und Baumartenwahl»

S13.7.1 Steckbrief für die Waldbehandlung

Der Steckbrief (Tab. S13.5) orientiert über waldbaulich relevante Standortfaktoren und Bodenkennwerte.

S13.7.2 Baumartenwahl

Naturnähe von Bestand und Oberboden

Der Bestand ist ein Mischwald aus Fichten und Tannen, der dem Naturwald recht gut entspricht. Nach Ott et al. (1997) trifft man an diesem Standort (EK Nr. 47) häufig Moder an. Die Humusform Moder bewerten wir demnach als standorttypisch.

Tab.S13.5 Steckbrief für die Waldbehandlung (Girso)**Standortangaben**

Relief	Höhe	1458 m
	Exposition	N
	Neigung	52%
Klima	Jahresniederschlag	1773 mm
	Jahrestemperatur	4.9°C
Ausgangsgestein	karbonatfreie Moräne	
Baumbestand	Struktur	stufig
	Schlussgrad	80%
	Baumarten (Deckung)	15% Weiss-Tanne, 15% Fichte
	Oberhöhe	10–15 m
Waldgesellschaft	nach E&K 1972	Nr. 47: Landschilf-Fichten-Tannenwald
	nach BUWAL 2005	Nr. 47D: Farnreicher Wollreitgras-Tannen-Fichtenwald

Bodenkennwerte

Bodensystematik	Bodentyp	Braunerde, podsoliert
	Humusform	Moder
Wasser- und Lufthaushalt	Durchlüftung	Im Boden sind keine Vernässungsmerkmale erkennbar, was zeigt, dass der Boden stets gut durchlüftet ist.
	Durchwurzelbarkeit	Der Boden lässt sich von allen Baumarten mindestens profilumfassend durchwurzeln. Der Wurzelraum ist mit mehr als 120 cm Mächtigkeit sehr tiefgründig. Wurzeln sind bis zur Profilsohle vorhanden.
	pflanzenverfügbares Wasser	Das Risiko für Trockenstress schätzen wird unter den gegebenen klimatischen Verhältnissen als klein ein.
Säurezustand	pH-Wert/Kalkgrenze	Mit Ausnahme der Tiefenstufe 0–3 cm, die sehr stark sauer reagiert, ist der Boden überall stark sauer. Das Ausgangsgestein enthält kein Karbonat.
	Aluminium-Toxizität	Ab 3 cm Tiefe besteht ein Risiko für Al-Toxizität.
Nährstoffe	Verfügbarkeit im Oberboden	Wie die Humusform Moder weist auch das mässig weite C/N-Verhältnis auf eine niedrige Mineralisierungsrate hin.
	Nährstoffvorräte (Ca, Mg, K)	Die Vorräte der Nährstoffkationen sind relativ bescheiden. Der Ca-Vorrat ist mässig, der Mg- und K-Vorrat sind gering.
Verankerung	Da der Boden sehr tiefgründig ist, wird die Verankerung des Baumbestandes als gut bewertet.	
Befahrbarkeit	Der Boden würde in nassem Zustand trotz der organischen Auflage empfindlich auf Befahren mit schweren Maschinen reagieren. Ausschlag gebend für diese Beurteilung ist vor allem der geringe Skelettgehalt bis 30 cm Tiefe. Beim Befahren würden zudem die zahlreichen in der organischen Auflage vorhandenen Wurzeln beschädigt. Da der Wald an einem Steilhang liegt, ist ein Befahren des Bestandes allerdings nicht möglich.	

Baumartenwahl gemäss standortkundlichen Grundlagenwerken

Gemäss BUWAL (2005) sind an diesem Tannen-Fichten-Standort (Nr.47D) folgende Baumarten für die Waldverjüngung geeignet: Tanne, Fichte, Lärche, Birke und Vogelbeere. Diese relativ kleine Auswahl ist vor allem durch das raue Klima bedingt.

Bodenkundliche Kriterien für die Baumartenwahl

■ **Durchwurzelbarkeit des Bodens**

Da dieser Boden von allen Baumarten tief durchwurzelt werden kann, schränkt dieses Kriterium die Baumartenauswahl nicht ein.

■ **Entwässerung des Bodens durch die Bäume**

Der Boden ist gut durchlüftet und sehr durchlässig. Daher ist das Kriterium der biologischen Entwässerung des Bodens bei der Baumartenwahl vernachlässigbar.

■ **Trockenstress-Risiko für die Bäume**

Das Risiko für Trockenstress ist klein. Im Boden dürfte für alle Baumarten ein stets ausreichender Wasservorrat verfügbar sein. Dieses Kriterium schränkt die Baumartenauswahl nicht ein.

■ **Säurezustand und Aluminium-Toxizität**

Die Feinerde ist derart sauer, dass nahezu im gesamten Profil ein Risiko für Al-Toxizität besteht. Die sehr sauren pH-Verhältnisse mit gehemmter biologischer Aktivität verlangen nach Baumarten mit gut abbaubar Streu, wodurch die Säureproduktion im Oberboden verringert würde. Die Baumartenmischung ist jedoch naturnah und die Humusform Moder standorttypisch. Waldbauliche Eingriffe können sich also auf den Erhalt der aktuellen Baumartenmischung beschränken.

■ **Nährstoffangebot im Boden**

Die Nährstoffumsetzung im Oberboden ist gehemmt. Eine Erhöhung der Mineralisierungsrate ist potentiell möglich. Wie bereits beim Säurezustand erwähnt, besteht jedoch kein Anlass, die bestehenden Verhältnisse durch entsprechende Baumartenwahl zu verbessern.

Viele Baumarten haben bezüglich Nährstoffversorgung des Bodens eine weite ökologische Amplitude. Das Nährstoffangebot ist daher an diesem Standort für die meisten Baumarten ausreichend. Eine Ausnahme bilden die nährstoffbedürftigen Edellaubhölzer. Das Angebot an Kalium und Magnesium im Mineralboden dürfte für ein konkurrenzstarkes Gedeihen der Edellaubhölzer (z.B. Bergahorn) zu gering sein.

Dem Waldbauer stehen vor allem wegen dem rauen Klima nur wenige Baumarten für die Waldverjüngung zur Verfügung. Die zu einem grossen Teil durch das Klima gegebene Baumartenauswahl (Tab. S13.6, BUWAL 2005) ist aus bodenkundlicher Sicht aufgrund des Säurezustandes und des Nährstoffangebotes zu hinterfragen.

Durch den Erhalt der naturnahen Baumartenmischung bleibt die Mineralisierungsrate der Nährstoffe im Oberboden stabil und die Humusform ein standorttypischer Moder. Auch die Produktion von organischen Säuren bei den Abbauprozessen verbleibt unverändert. Die Lärche mit ihrer sehr schwer abbaubaren Streu sollte aus bodenkundlicher Sicht nur vereinzelt beigemischt werden.

Tab. S13.6 **Baumartenempfehlung für den Hauptbestand**

Referenz	Baumarten
Grundlagenwerke (Einheit 47D; BUWAL 2005)	Tanne, Fichte, Lärche, Birke, Vogelbeere
Bodenkundliche Kriterien	Tanne, Fichte, Vogelbeere, Birke, (Lärche)

Blaser, P. / Zimmermann, S. / Luster, J. / Walther, L. / Lüscher, P., 2005: Waldböden der Schweiz. Band 2. Regionen Alpen und Alpensüdseite. Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Bern, Hep Verlag.

BUWAL, 2005: Nachhaltigkeit im Schutzwald und Erfolgskontrolle. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion. Bern, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, in Vorbereitung.

Ellenberg, H./Klötzli, F., 1972: Waldgesellschaften und Waldstandorte der Schweiz. Mitt. Eidgenöss. Forschungsanst. Wald Schnee Landsch. 48, 4: 587–930.

FAO, 1988: FAO/Unesco Soil Map of the World, Revised Legend, with corrections and updates. World Soil Resources Report 60, FAO, Rome. Reprinted with updates as Technical Paper 20, ISRIC, Wageningen, 1997. 140 S.

Mokma, D.L. and Buurman, P., 1982: Podzols and podzolization in temperate regions. ISM Monograph 1, ISRIC, Wageningen, 126 pp.

Ott, E./Frehner, M./Frey, H.-U./Lüscher, P., 1997: Gebirgsnadelwälder. Ein praxisorientierter Leitfaden für die standortgerechte Waldbehandlung. Haupt, Bern. 287 S.

Tuchschruid, M.P., 1995: Quantifizierung und Regionalisierung von Schwermetall- und Fluorgehalten bodenbildender Gesteine der Schweiz. Umweltmaterialien 32, BUWAL, Bern. 130 S.
