

S2 Bodenprofil Gagetto

S2.1 Themenbereich «Bodenbildungsfaktoren und Profilmorphologie»

S2.1.1 Zusammenfassende Angaben zum Profil und zu den Bodenbildungsfaktoren

Das Bodenprofil ist in [Abb. S2.1](#) dargestellt. Einen Eindruck vom Bestand vermittelt [Abb. S2.2](#). [Tab. S2.1](#) fasst wichtige Angaben zum Boden und Profilort Gagetto zusammen und [Tab. S2.2](#) orientiert über die Bodenbildungsfaktoren.

S2.1.2 Verbreitung gemäss Bodeneignungskarte der Schweiz

Das Profil gehört zur Kartierungseinheit T3 (Bündnerschiefer im Bereich des oberen Rhonetals und Tessin, Steilhänge, Hangneigung >35%). 59 Stichproben des Landesforstinventars gehören dieser Kartierungseinheit an. Das Profil repräsentiert damit 0.5% der mit dem LFI insgesamt erfassten 11'863 Stichproben.

S2.1.3 Besonderheiten am Profilort

Das Bodenprofil S2 Gagetto liegt rund 30 Meter oberhalb einer relativ neu erstellten Strassenböschung. Der Profilaufbau wurde durch den Strassenbau nicht beeinflusst.

S2.1.4 Profilmorphologie und Klassierung

Die im Profil angesprochenen morphologischen Bodenmerkmale sind in [Tab. S2.3](#) zusammen mit einer Profilskizze dargestellt.

Der Boden ist von einer Streuschicht und einem Fermentationshorizont bedeckt. Die überwiegend von Fichten und von Pflanzen der üppigen 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.



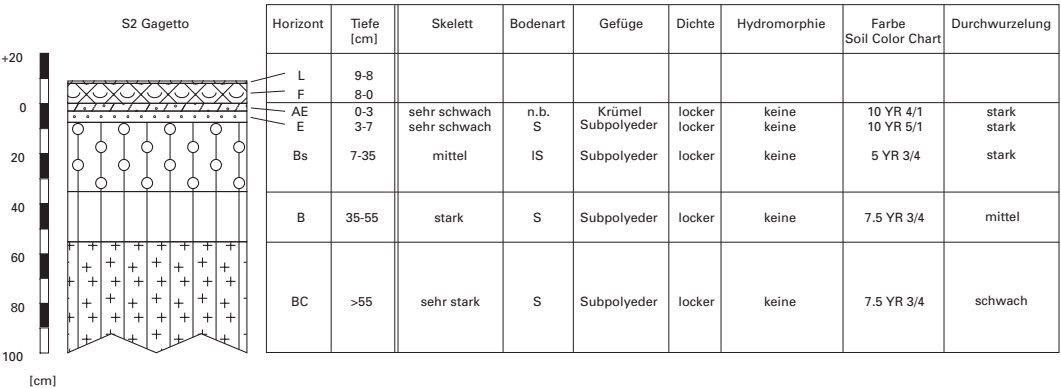
Abb. S2.1 (links) Bodenprofil Gassetto

Abb. S2.2 (rechts) Bestand am Profilort Gassetto

Tab. S2.1 Zusammenfassende Angaben zum Profil Gassetto	
Lokalname	Gassetto (Kanton Tessin, Gemeinde Quinto)
Lage	Landeskarte 1:25 000 Blatt 1252, Ambri-Piotta Koordinaten 696700/150475
Waldgesellschaft (Ellenberg und Klötzli 1972)	Nr. 57: Torfmoos-Fichtenwald mit Landschilf (<i>Sphagno-Piceetum calamagrostietosum villosae</i>)
Horizontfolge	L-F-AE-E-Bs-B-BC
Humusform	Moder
Bodentyp	Eisenpodsol
Bodentyp nach FAO (1988)	Podzol

Tab. S2.2 Bodenbildungsfaktoren am Profilort Gagetto			
Relief	Höhe ü. M.	1690 m	
	Exposition	N	
	Neigung	70 %	
	Geländeform	Mittelhang	
Ausgangsgestein	Tektonik/Geologie	Penninikum; Mesozoische Sedimente (Bündnerschiefer)	
	Lithofazies	Nr. 11: Mergel- und Tonschiefer (Flysch, Bündnerschiefer und Lias)	
	(nach Tuchs Schmid 1995)	physikalische Verwitterbarkeit Gestein: gross chemische Verwitterbarkeit Gestein: klein–mittel	
	Tongehalt Gestein:	mittel	
Klima	T/N Jahresmittel	3.6°C/2095 mm	
	T/N Januarmittel	–2.6°C/122 mm	
	T/N Julimittel	12.3°C/155 mm	
	Tage mit Schneedecke	189	
	Wärmegliederung	rauh	
	Länge der Vegetationsperiode	135–150 Tage	
Pflanzen	Schicht	Deckung	häufigste Arten
	Baumschicht (29 m Höhe)	70 %	60 % Fichte (<i>Picea abies</i>)
	Strauchschicht	2 %	–
	Krautschicht	70 %	Wolliges Reitgras (<i>Calamagrostis villosa</i>) Drahtschmiele (<i>Avenella flexuosa</i>) Hasenlattich (<i>Prenanthes purpurea</i>) Berg-Bärlapp (<i>Lycopodium annotinum</i>) Wald-Habichtskraut (<i>Hieracium murorum</i>) Wald-Hainsimse (<i>Luzula sylvatica</i>)
	Mooschicht	15 %	–

Tab. S2.3 **Profilskizze und Morphologie des Bodenprofils Gagetto**
 Bodenart: S Sand, IS lehmiger Sand; n.b. nicht bestimmt



Morphologisch lassen sich im Mineralboden unterhalb der organischen Auflage fünf Horizonte unterscheiden. In 0–3 cm Tiefe ist der Boden bräunlich grau gefärbt. Die örtlich etwas hellere Farbe ist ein Hinweis auf eine beginnende Podsolierung. Dieser Horizont besitzt eine Krümelstruktur. Die Auswaschungszone zwischen 3 und 7 cm Tiefe ist deutlich heller gefärbt und hat eine Subpolyederstruktur. In 7 bis 35 cm Tiefe ist der Boden unregelmässig dunkel rötlich braun gefärbt, was als eine Anreicherungszone gedeutet wird. Zwischen 35 und 55 cm ist die Feinerde wieder regelmässig dunkel braun gefärbt, mit nur noch kleinflächig erkennbaren rötlichen Anzeichen einer Anreicherung (Abb.S2.1). Darunter folgt in 55 cm Tiefe der weniger verwitterte Übergangsbereich zum Ausgangsgestein. Der Skelettgehalt nimmt mit der Profiltiefe zu, ist bis 7 cm sehr schwach dann mittel und ab 35 cm Tiefe stark bzw. sehr stark. Die Bodenart der Feinerde ist in 7 bis 35 cm Tiefe lehmiger Sand. Darunter ist das Profil bis zur Sohle sandig. Bis auf die obersten 3 cm des Mineralbodens hat der Boden eine Subpolyederstruktur. Die Dichte ist profilumfassend locker. Im ganzen Profil sind keine hydromorphen Merkmale zu erkennen.

Aufgrund der morphologischen Merkmale des Profils werden die Horizonte mit L-F-AE-E-Bs-B-BC gekennzeichnet und der Boden als Eisenpodsol klassiert.

Ergänzende Bodenmerkmale

Gemäss pH-Hellige ist die Feinerde im ganzen Profil sehr sauer. Im Boden sind keine Hindernisse für das Wurzelwachstum erkennbar. Die Durchwurzelung ist bis 35 cm Tiefe stark und nimmt mit zunehmender Profiltiefe ab.

S2.2 Themenbereich «Physikalische Bodenkennwerte»

S2.2.1 Beschrieb einiger physikalischer Bodenkennwerte

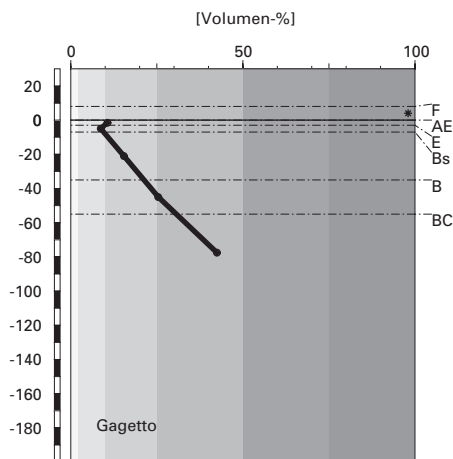
Skelettgehalt

Der Skelettgehalt nimmt mit der Tiefe stetig und deutlich zu (Abb.S2.3). Der BC-Horizont enthält mit rund 40% am meisten Skelett. Insgesamt ist der Boden allerdings nur mässig skeletthaltig.

Bodenart

Die Feinerde ist im gesamten Profil sehr sandig, Schluff und vor allem Ton kommen in deutlich kleineren Anteilen vor (Abb.S2.4). Im Bs-Horizont

Skelettgehalt



Klassierung Skelettgehalt

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

Bodenart

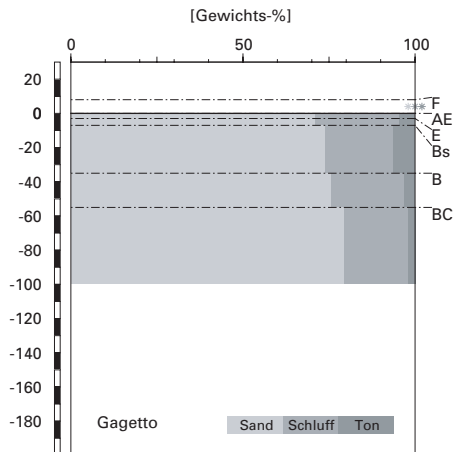


Abb. S2.3 (links) Skelettgehalt

Abb. S2.4 (rechts) Bodenart

scheint neben Sesquioxiden und organischer Substanz auch Ton angereichert zu sein. Entsprechend ist der Tongehalt im Bs-Horizont um rund 1% grösser als im AE- und E-Horizont. In Bezug auf den Tongehalt handelt es sich im Bs-Horizont um leichten, in allen anderen Horizonten um sehr leichten Boden.

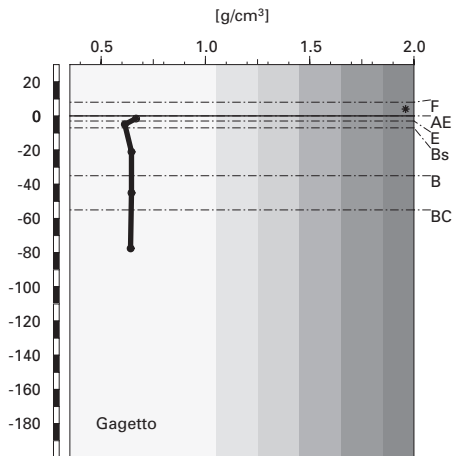
Die im Bodenprofil mit der Fingerprobe bestimmte Bodenart stimmt gut mit den Laborwerten überein (Tab. S2.3).

Dichte der Feinerde

Die Dichte der Feinerde ist im gesamten Mineralboden äusserst gering (Abb. S2.5). Sie beträgt überall weniger als 0.7 g/cm^3 . Es fällt auf, dass die Feinerde-Dichte vom Oberboden bis zur Profilsohle nahezu konstant ist.

Die an der Profilwand mittels Eindringwiderstand eines Messers bestimmten Dichtewerte stimmen gut mit den Laborwerten überein (Tab. S2.3).

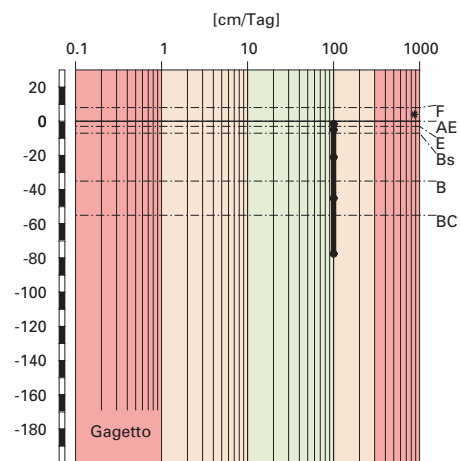
Feinerde-Dichte



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. S2.5 (links) Dichte der Feinerde

Abb. S2.6 (rechts) Wasserleitfähigkeit im gesättigten Boden

Wasserleitfähigkeit im gesättigten Boden

Die äusserst geringe Dichte der Feinerde und der kleine Tongehalt führen dazu, dass die Wasserdurchlässigkeit im ganzen Profil hoch ist (Abb. S2.6).

Pflanzenverfügbares Wasser

Die Wasserspeicherkapazität des Bodens bis 120 cm Tiefe wird mit 212 l/m² als sehr hoch klassiert (Abb. S2.7).

S2.2.2

Bodenkundliche und ökologische Interpretationen

Wasser- und Lufthaushalt des Bodens

In diesem Eisenpodsol kommen aufgrund der hohen Durchlässigkeit (Abb. S2.6) keine Vernässungsmerkmale vor. Gesättigte Phasen sind also höchstens von kurzer Dauer.

pflanzenverfügbares Wasser

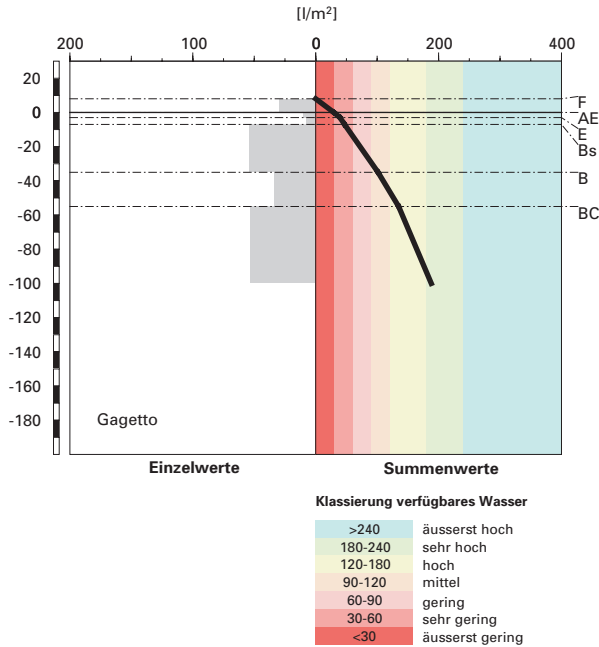


Abb. S2.7 Pflanzenverfügbares Wasser

Durchwurzelbarkeit des Bodens

Der Boden ist für alle Baumarten mindestens profilumfassend durchwurzelbar, da die Dichtewerte durchwegs weniger als 1.4 g/cm^3 betragen 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 besteht, gut genutzt. Wurzeln sind bis zur Profilssole (100 cm) vorhanden und dringen sicher noch tiefer in den Unterboden ein.

Wasserversorgung des Baumbestandes

Bei einer Referenztiefe von 120 cm ist gemäss unseren Berechnungen davon auszugehen, dass der Bestand in Trockenperioden ohne nennenswerte Niederschläge nach rund 25 Tagen an Wassermangel zu leiden beginnt. Da der Boden tiefer als 120 cm durchwurzelbar ist, kann Trockenstress auch

später eintreten. An diesem subalpinen Fichtenstandort (EK 57) besteht unter den gegebenen klimatischen Verhältnissen kein Risiko für Trockenstress.

Bodenbefahrbarkeit

Die obersten 55 cm des Bodens sind in nassem Zustand empfindlich auf Verdichtung durch Befahren mit schweren Maschinen, weil dort relativ wenig Skelett vorhanden ist. Der Bestand kann allerdings nicht mit schweren Maschinen befahren werden, weil er in zu steilem Gelände liegt.

S2.3 Themenbereich «Bodenhauptbestandteile»

S2.3.1 Charakterisierung der Bodenhauptbestandteile

Organische Substanz

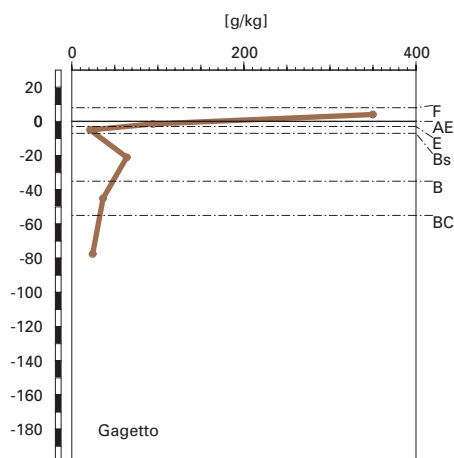
Die Baumschicht in Gaggero hat nur einen Kronenschluss von rund 70%. Darunter gedeiht eine üppige Krautvegetation vor allem aus wolligem Reitgras, Drahtschmiele, Hasenlattich, Berg-Bärlapp, Wald-Habichtskraut sowie Wald-Hainsimse. Dadurch wird die Fichtenstreu aus der Baumschicht mit der Streu aus der Krautschicht ergänzt, was die Abbaubarkeit leicht verbessern dürfte. Insgesamt ist die Streu jedoch als mässig bis schlecht abbaubar zu beurteilen. Unter einer 1 cm dicken Streuschicht hat sich ein F-Horizont von 8 cm Mächtigkeit gebildet.

Entsprechend seiner vorwiegend organischen Zusammensetzung enthält der F-Horizont rund 35% organischen Kohlenstoff (Abb.S2.8). Der AE-Horizont hebt sich durch eine deutlich dunklere Farbe vom E-Horizont ab. Er enthält rund 9.5% organischen Kohlenstoff (C_{org}) im Vergleich zum Minimum von 2.1% im E-Horizont. Im Bs-Horizont ist der Gehalt an organischem Kohlenstoff mit 6.4% wieder deutlich grösser. Mit zunehmender Profiltiefe nimmt er bis auf 2.4% im BC-Horizont ab. Der Vorrat an organischem Kohlenstoff beträgt 251t/ha (Abb.S2.9), wobei für die Vorratsberechnung im F-Horizont eine Dichte von 0.2 g/cm³ angenommen wurde.

Tonverteilung sowie Verteilung von Aluminium- und Eisenoxiden

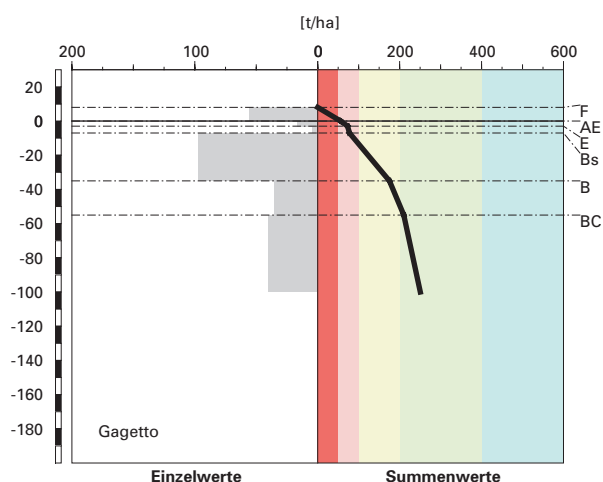
Der Tongehalt ist im gesamten Profil sehr klein und hat im Bs-Horizont mit 6.3% das Maximum (Abb.S2.4). Ober- und unterhalb dieses Horizontes ist der Tongehalt kleiner.

organischer Kohlenstoff



Kohlenstoff-Vorrat

(C_{org})



Klassierung Vorrat

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

Abb. S2.8 (links) Gehalt an organischem Kohlenstoff

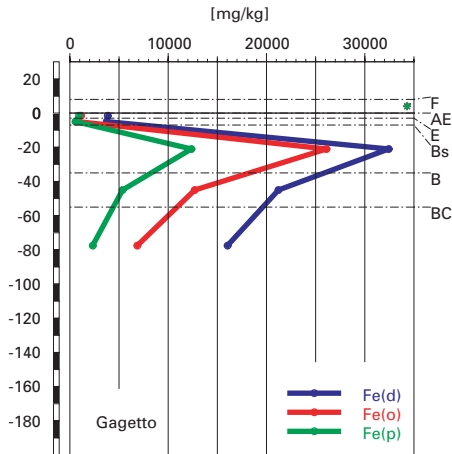
Abb. S2.9 (rechts) Vorrat an organischem Kohlenstoff

Alle extrahierbaren Al- und Fe-Fractionen zeigen eine analoge Tiefenverteilung (**Abb. S2.10 und S2.11**). Bei allen nehmen die Gehalte vom AE- in den E-Horizont, wo sie das Minimum aufweisen, leicht ab. Danach erfolgt eine markante Zunahme der Gehalte bis zu ihren Maxima im Bs-Horizont. Unterhalb des Bs-Horizontes ist bei den Al-Verbindungen eine mehr oder weniger lineare Abnahme bis in den BC-Horizont zu beobachten. Die extrahierbaren Fe-Verbindungen nehmen hingegen vom Bs- in den B-Horizont viel stärker ab, als vom B- in den BC-Horizont (Tab. A231 in Blaser et al. 2005).

Das Fe_o/Fe_d -Verhältnis ist im E-Horizont mit einem Wert von 0.2 besonders klein (**Abb. S2.12**). Im Bs-Horizont ist es mit 0.8 sehr gross und nimmt bis in den BC-Horizont auf 0.4 ab. Die Tiefenverteilung des Al_p/Al_o -Verhältnisses ist analog jener des C_{org} -Gehaltes (**Abb. S2.12**). Das Fe_p/Fe_o -Verhältnis nimmt vom AE-Horizont bis zum Bs-Horizont stark ab. Bis zur Profilssole ist die Abnahme nur noch klein (**Abb. S2.12**).

Eisen-Oxide

(Gehalte)



Aluminium-Oxide

(Gehalte)

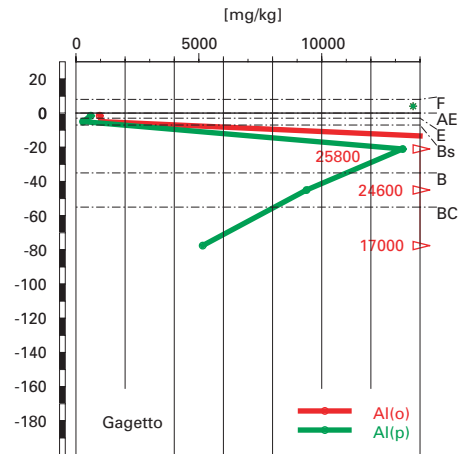


Abb.S2.10 (links) Gehalte an Dithionit- (Fe_d), Oxalat- (Fe_o) und Pyrophosphat- (Fe_p) extrahierbarem Eisen

Abb.S2.11 (rechts) Gehalte an Oxalat- (Al_o) und Pyrophosphat- (Al_p) extrahierbarem Aluminium

Eisen- und Aluminiumoxide

(Verhältnisse)

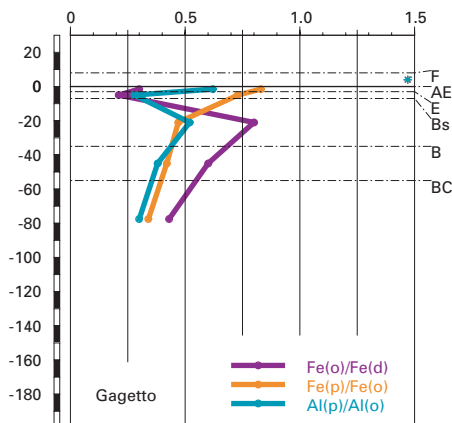


Abb.S2.12 Verhältnisse der Fe- und Al-Oxide

Die anfallende Streu stammt von der Fichte und zu einem geringeren Anteil von Krautpflanzen. Sie ist mässig bis schlecht abbaubar. Zudem bietet das rauhe Klima (durchschnittliche jährliche Niederschläge: 2095 mm; Jahresdurchschnittstemperatur: 3.6°C) am N-exponierten, auf 1690 m.ü.M. gelegenen Standort Gagetto keine idealen Voraussetzungen für den Streuabbau. Die anfallende Streu wird nicht innerhalb eines Jahres abgebaut. Am Profilort haben sich eine 1 cm dicke Streuschicht und ein 8 cm mächtiger F-Horizont gebildet. Die Humusform wird deshalb als Moder bezeichnet.

Im F-Horizont wird das C/N-Verhältnis mit 24 als mässig weit klassiert und die Mineralisierung der organischen Substanz wird aufgrund der relativen Stickstoffarmut als niedrig eingeschätzt. Auch das mässig weite C/P-Verhältnis von 520 deutet eine relative Phosphorarmut der organischen Substanz im F-Horizont an. Dadurch ist die organische Substanz eine schlechte Nahrungsgrundlage für die Mikroorganismen was den Streuabbau hemmt. Gelöste organische Substanz wird mit dem Sickerwasser in die Tiefe verlagert. Der gebleichte E-Horizont ist an C_{org} verarmt. In den tiefer gelegenen Horizonten fallen die gelösten organischen Substanzen aus und bauen zum Teil unter der katalytischen Wirkung von Eisenoxiden höher polymere organische Substanzen auf. Die weiten C/N-Verhältnisse im Bs- und B-Horizont zeigen, dass während der Verlagerung und Ausfällung verstärkt stickstoffhaltige Verbindungen mineralisiert werden.

Im Oberboden und nach der Verlagerung werden die Humusstoffe an mineralische Al- und Fe-Verbindungen adsorbiert und so vor weiterem Abbau geschützt, weshalb die Humusgehalte profilumfassend relativ hoch sind. Der Vorrat an organischem Kohlenstoff beträgt 251 t/ha, was im gesamtschweizerischen Vergleich hoch ist.

Die Tiefenverteilungen der extrahierbaren Al- und Fe-Verbindungen sind charakteristisch für eine Podsolierung. Im E-Horizont sind Aluminium und Eisen ausgewaschen und im Bs-Horizont angereichert. Die Verlagerungsindices für Al_o bzw. Fe_o (Quotient aus dem Maximum im Bs- und dem Minimum im E-Horizont) sind sehr gross. Sie betragen für Al_o 27 und für Fe_o 36. Demnach scheint Eisen bis in den Bs-Horizont quantitativ stärker verlagert worden zu sein als Aluminium. Die Al_o -Gehalte sind jedoch unterhalb des Bs-Horizontes rund doppelt so hoch wie die Fe_o -Gehalte (Tab. A231 in Blaser et al. 2005). Damit ist Aluminium über das ganze Bodenprofil betrachtet quantitativ stärker und vor allem tiefer verlagert worden als Eisen.

Das Fe_o/Fe_d -Verhältnis ist im E-Horizont am kleinsten. Hier beträgt der pH-Wert nur 3, was heisst, dass Säuren durch Auflösung amorpher Al- und Fe-Verbindungen gepuffert werden. Dadurch reichern sich schwer lösliche, Dithionit-extrahierbare Fe-Verbindungen im Rückstand an und das Fe_o/Fe_d -Verhältnis wird kleiner. Im Bs-Horizont, wo die verlagerten Fe-Verbindungen ausfallen und dadurch die amorphe Fraktion im Verhältnis zum Dithionit-extrahierbaren Eisen stetig zunimmt, ist das Fe_o/Fe_d -Verhältnis am grössten.

Das Al_p/Al_o -Verhältnis widerspiegelt die Tiefenverteilung des C_{org} -Gehaltes. Es ist in jenen Horizonten am kleinsten, in denen der C_{org} -Gehalt am geringsten ist und umgekehrt (Abb. S2.8 und S2.12). Gleiches gilt für das Fe_p/Fe_o -Verhältnis mit der Ausnahme des E-Horizontes. In diesem Horizont ist das Verhältnis mit 0.7 relativ gross. Offensichtlich ist das in geringen Mengen vorliegende Eisen zu einem grossen Teil mit der ebenfalls in geringen Mengen vorliegenden organischen Substanz assoziiert.

Aufgrund der morphologischen Merkmale wurde der Boden als Eisenpodsol bezeichnet, insbesondere weil kein Bh-Horizont beobachtet werden konnte. Mit den bodenchemischen Untersuchungen lässt sich eine Verlagerung von Humus nachweisen, womit der Boden als Eisen-Humuspodsol zu bezeichnen wäre.

S2.4 Themenbereich «Säurezustand»

S2.4.1 Charakterisierung des Säurezustandes

pH-Wert

Im F-Horizont beträgt der pH-Wert 3.1 (Abb. S2.13). Im AE- und E-Horizont beträgt er 2.9 respektive 3.0. Diese Horizonte sind sehr stark sauer und befinden sich in der Säureklasse 5. Mit der Tiefe nimmt der pH-Wert rasch zu. Im Bs- und im B-Horizont liegt er bei 4.0 und 4.5. Die Feinerde befindet sich damit in der Säureklasse 4. Im BC-Horizont beträgt der pH-Wert 4.7. Dieser Horizont ist nur noch mässig sauer und liegt in der Säureklasse 3.

Austauschbare Kationen und Basensättigung

Bis in eine Tiefe von 35 cm ist der Kationenaustauscher überwiegend mit sauren Kationen belegt (Abb. S2.14). Bis in den B-Horizont ist der Kationenaustauscher in der Mineralerde hauptsächlich mit Aluminium belegt. Vom F- bis in den E-Horizont sind daneben beträchtliche Mengen Protonen in austauschbarer Form gebunden. Entsprechend den stark bis sehr stark

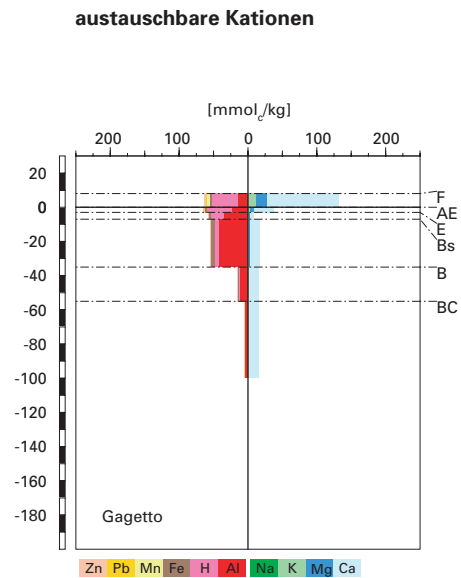
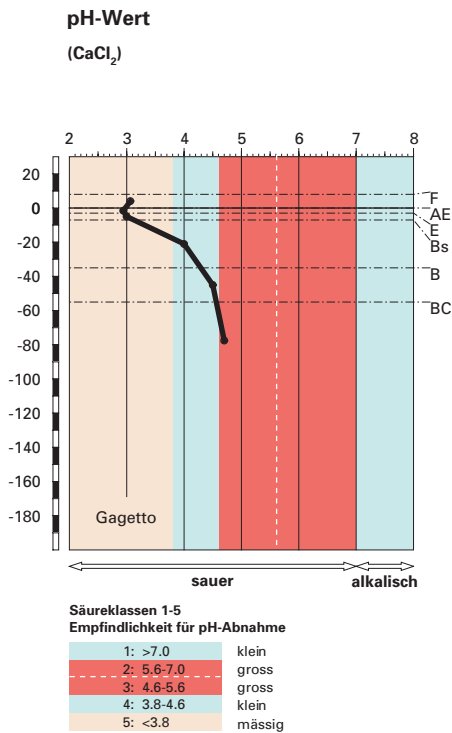


Abb.S2.13 (links) pH-Wert und Säureklassen

Abb.S2.14 (rechts) Belegung des Kationenaustauschers

sauren pH-Werten kommt auch Eisen in austauschbarer Form vor. Die maximalen Anteile von 8.8% sind im Bs-Horizont zu finden und sind ein Ausdruck der Podsolierung, die in diesem Boden stattgefunden hat.

Trotz den tiefen pH-Werten ist der Anteil von austauschbarem Kalzium in allen Horizonten relativ gross. Das Minimum befindet sich mit 8.5% im E-Horizont. Im B- und BC-Horizont hat es mehr austauschbares Kalzium als Aluminium. Die Basensättigung ist im F-Horizont mit beinahe 68% mässig hoch (Abb.S2.15). Im E-Horizont ist sie minimal und wird mit 13% als gering klassiert. Bis in den BC-Horizont nimmt sie stark zu. Sie beträgt dort 77%, was als hoch bewertet wird.

Basensättigung

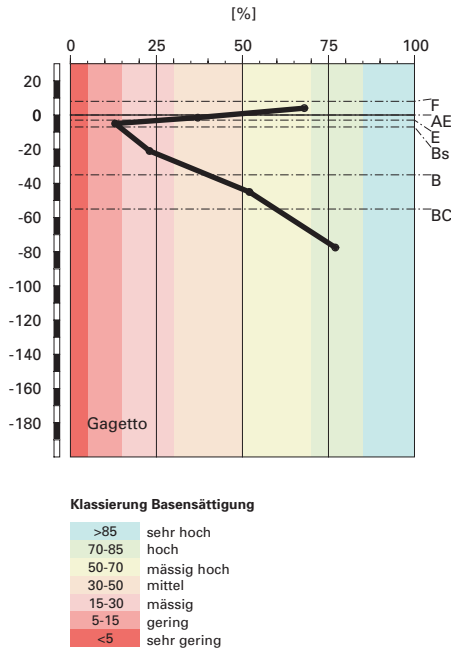


Abb. S2.15 Basensättigung

S2.4.2 Interpretationen zum Säurezustand

Stand der Bodenversauerung

Wie der Boden S1 (Piotta) besteht das Ausgangsgestein auch hier aus einem vergleichsweise basenreichen Bündnerschiefer, in welchem die pH-Werte zu Beginn der Bodenentwicklung mit grosser Wahrscheinlichkeit im alkalischen Bereich lagen. Heute liegt die Kalkgrenze unterhalb des Profilaufschlusses und es wird festgelegt, dass sich die Feinerde dort in der Säureklasse 1 befindet. Da sich die obersten Mineralerdehorizonte in der Säureklasse 5 befinden, erstreckt sich der pH-Gradient über fünf Säureklassen und wird somit als sehr stark versauert klassiert. Die Versauerungsfront, erkennbar am austauschbaren Aluminium am Kationenaustauscher, liegt tiefer als die Profilsohle. Im BC-Horizont beträgt die Austauscherbelegung mit Aluminium noch immer 4%.

Unter dem rauen Klima auf rund 1690 m.ü.M. in N-Exposition hat sich ein deutlich mächtigerer Moder gebildet als in Piotta. Die Voraussetzungen für eine Versauerung, wie lange Nass-Kalt Phasen und geringe biologische Aktivität sind in Gagetto ausgeprägter als in Piotta und begründen die stärkere Versauerung des Bodens von Gagetto.

Im AE- und E-Horizont werden die Säuren durch die Auflösung von Eisen- und Aluminiumverbindungen gepuffert. Im Bs- und B-Horizont erfolgt die Säurepufferung vorwiegend durch Auflösung von Aluminiumverbindungen. Trotzdem ist die Belegung des Kationenaustauschers mit Eisen im Bs- und B-Horizont als Folge der Podsolierung grösser als im AE- und E-Horizont. Eisen wurde aus dem AE- und E-Horizont in den Bs- und B-Horizont verlagert und dort zumindest teilweise in austauschbarer Form gebunden. Im BC-Horizont erfolgt die Säurepufferung durch Kationenaustausch und durch die Protonierung variabler Ladungen. Die Nährstoffkationen sind hier nur teilweise durch Aluminium und Eisen von ihren Austauscherplätzen verdrängt worden. Die Bäume erschliessen mit ihren Wurzeln die basenreichen Horizonte im Unterboden und bringen Nährstoffkationen mit der Streu wieder an die Bodenoberfläche. Dadurch ist die Basensättigung selbst im E-Horizont mit 13% für die Region vergleichsweise hoch. Auch die im Vergleich zum E-Horizont grössere Basensättigung im AE-Horizont lässt sich durch den Nährstoffkreislauf erklären. Trotz der sehr starken Versauerung und trotz der Podsolierung ist dieser Kryptopodsol wesentlich nährstoffreicher als vergleichbare Böden auf Graniten und Gneisen.

Risiko für Boden und Pflanzen

Das Risiko für eine weitere pH-Abnahme wird im Boden von Gassetto als mässig beurteilt, weil sich rund 37% der Feinerde in der schlecht puffernden Säureklasse 3 befinden. Dies betrifft nur den BC-Horizont. Der Bs- und B-Horizont befinden sich in der gut puffernden Säureklasse 4 und sind gegenüber einer weiteren pH-Abnahme wenig empfindlich. Hingegen sind der AE- und E-Horizont in der mässig puffernden Säureklasse 5, so dass die Empfindlichkeit einer weiteren pH-Abnahme in diesen Horizonten erhöht ist. Bei anhaltendem Versauerungsdruck werden die pH-Werte somit vor allem in den obersten 7 cm Tiefe des Bodens abnehmen.

Im aktuellen Zustand besteht im ganzen Boden kein Risiko für die Pflanzen durch Aluminiumtoxizität, denn die BC/AI-Verhältnisse liegen zwischen 0.23 im AE-Horizont und 3.66 im BC-Horizont. Solange eine allfällige pH-Abnahme im Oberboden nicht mit einer Verarmung an Nährstoffkationen verbunden ist, ändert sich an diesem Zustand wenig. Wenn die Pflanzen hingegen die Nährstoffkationen mit dem Nährstoffkreislauf nicht mehr ausreichend nachliefern können, dürfte das BC/AI-Verhältnis im E-Horizont allerdings relativ bald in den als kritisch erachteten Bereich < 0.2 gelangen und für empfindliche Pflanzenarten ein gewisses Risiko darstellen. Allerdings ist zu beachten, dass infolge des basenreichen Ausgangsgesteins die Basensättigung auch bei tiefen pH-Werten über das ganze Profil betrachtet vergleichsweise hoch bleiben wird, so dass das Risiko für die Pflanzen insgesamt als klein zu bewerten ist.

S2.5 Themenbereich «Schwermetalle»

S2.5.1 Tiefenverteilung der Schwermetalle

Bei der Tiefenverteilung können die Schwermetalle in diesem Boden in 3 Gruppen unterschiedlichen Verhaltens eingeteilt werden (Abb. S2.16).

Chrom und Ni nehmen vom AE- zum E-Horizont stark zu und bleiben darunter in etwa konstant.

Die Cu- und Zn-Gehalte im Profil verlaufen bis zum Bs-Horizont ähnlich wie die Cr- und Ni-Gehalte, nehmen dann aber bis in den BC-Horizont extrem stark zu.

Blei verhält sich im Unterboden ähnlich wie Cu und Zn. Im AE-Horizont ist der Pb-Gehalt jedoch gegenüber dem E-Horizont stark erhöht (Tab. A236 in Blaser et al. 2005).

S2.5.2 Wertung der Schwermetallgehalte im untersten Mineralerde-Horizont im geochemischen Vergleich

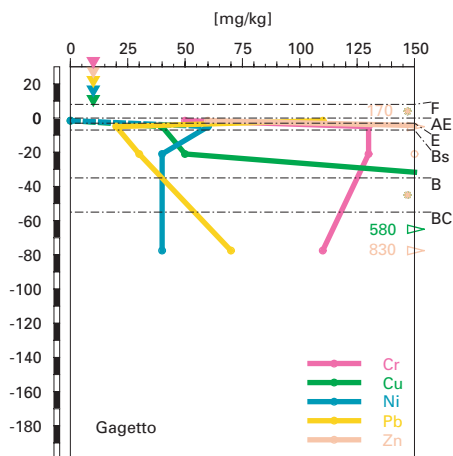
Bezogen auf das Ausgangsgestein Bündnerschiefer (Lithofazies 11), liegt der Ni-Gehalt im BC-Horizont innerhalb des typischen Wertebereichs. Alle anderen Schwermetalle weisen Gehalte oberhalb der typischen Wertebereiche auf.

Anmerkung: Weil das Ausgangsgestein, aus dem sich der Boden entwickelt hat, nicht aufgeschlossen werden konnte, werden für den geochemischen Vergleich die Schwermetallgehalte im BC-Horizont beigezogen. Die Tiefenverteilungen und Anreicherungsfaktoren von Cu, Zn und Pb mit deutlichen Maxima im BC-Horizont (Abb. S2.16, Tab. S2.4) legen nahe, dass diese Schwermetalle im Verlauf der Podsolierung mit gelöster organischer Substanz aus dem oberen Teil des Bodens in diesen Horizont verlagert wurden. Die Bewertungen der Schwermetallgehalte im untersten Mineralerdehorizont für Cu, Zn und Pb dürften deshalb zu hoch sein.

S2.5.3 Beurteilung der quellenunabhängigen Belastung nach VBBö

Im F- und AE-Horizont wurden aufgrund des hohen Humusgehaltes die volumenbezogenen Konzentrationen (mg/dm^3 ; Tab. A235 in Blaser et al. 2005) beurteilt. Diese sind niedriger als die massenbezogenen Gehalte (mg/kg ; Abb. S2.17), da die Dichte kleiner ist als $1 \text{ g}/\text{cm}^3$. Bei der organischen Auflage wurde mangels Messwert eine Dichte von $0.2 \text{ g}/\text{cm}^3$ angenommen.

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



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

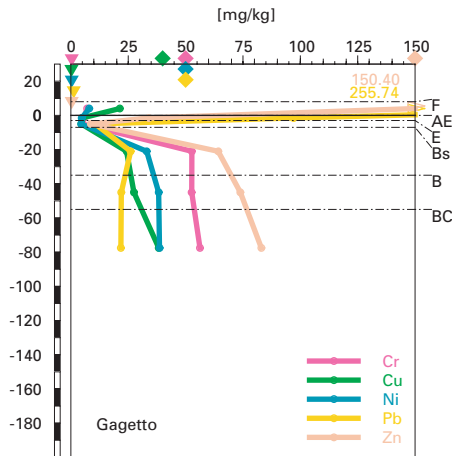


Abb. S2.16 (links) Schwermetalle: effektive Totalgehalte

Abb. S2.17 (rechts) Schwermetalle: Salpetersäure-extrahierbare Gehalte

Bezogen auf die VBBo sind die F-, AE- und E-Horizonte durch sehr niedrige Konzentrationen bzw. Gehalte der meisten Schwermetalle charakterisiert. Eine Ausnahme bilden die Pb-Konzentration im F- und der Pb-Gehalt im AE-Horizont, die sehr hoch sind und damit den Richtwert der VBBo überschreiten. Vom Bs- bis zum BC-Horizont sind die Zn- und Pb-Gehalte niedrig bis erhöht, die Ni- und Cu-Gehalte erhöht bis hoch und die Cr-Gehalte sehr hoch. Letztere überschreiten damit ebenfalls den Richtwert der VBBo.

S2.5.4 **Anreicherungsfaktoren**

Weil das Ausgangsgestein, aus dem sich der Boden entwickelt hat, nicht aufgeschlossen werden konnte, wurden die Anreicherungsfaktoren relativ zum BC-Horizont berechnet. Es können deshalb in diesem Podsol keine Aussagen bezüglich Anreicherung oder Verarmung gegenüber dem Ausgangsgestein gemacht werden.

Der AE-Horizont ist gegenüber dem BC-Horizont signifikant verarmt an Cr, Ni, Cu und Zn sowie etwas angereichert an Pb (Tab. S2.4). Unterhalb des AE-Horizontes nehmen die Anreicherungsfaktoren für Cr und Ni zu bis zu

Tab. S2.4 Anreicherungsfaktoren						
Horizont	Tiefe [cm]	Anreicherungsfaktor				
		Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
AE	0– 3	0.36	< 0.01	< 0.20	1.26	0.06
E	3– 7	0.57	0.03	0.73	0.14	0.10
Bs	7–35	1.35	0.10	1.14	0.49	0.21
B	35–55	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
BC	> 55	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

maximalen Werten von etwas über 1 im Bs-Horizont. Demgegenüber sind auch der E- und Bs-Horizont gegenüber dem BC-Horizont sehr stark an Cu, Zn und Pb verarmt.

Anreicherungsfaktoren und Tiefenverteilung (Abb. S2.16) reflektieren die unterschiedlich starke Verlagerung der Schwermetalle, entweder säurebedingt unter den bis in den B-Horizont stark bis sehr stark sauren Verhältnissen oder gebunden an gelöste organische Substanz. Dabei werden Cr und Ni ähnlich weit wie Al verlagert (Abb. S2.11). Die übrigen drei Schwermetalle werden extrem stark bis in den BC-Horizont verlagert, evtl. sogar aus dem Profil ausgewaschen. Dies betrifft einerseits Zink, welches unter sauren Bedingungen besonders mobil ist, aber nicht wie Ni durch feste organische Substanz in seiner Verlagerungsintensität behindert wird. Andererseits sind es Cu und Pb, die eine starke Tendenz haben, an gelöste organische Substanz gebunden verlagert zu werden. Angesichts der starken Verarmung des E-Horizontes deutet der Anreicherungsfaktor von 1.26 für Pb im AE-Horizont auf atmogenen Eintrag von anthropogenem Pb. Diese Vermutung wird durch die gegenüber den darunterliegenden Horizonten stark erhöhten totalen und Salpetersäure-extrahierbaren Pb-Gehalte im F- und AE-Horizont bestärkt (Abb. S2.16 und S2.17).

S2.5.5 **Schätzung der Mobilität der Schwermetalle**

In den sehr stark sauren F-, AE- und E-Horizonten ist die Mobilität von Ni und Zn gross bis sehr gross (Abb. S2.18), wobei die Schätzung für Ni wegen des hohen Humusgehaltes (Abb. S2.8) in der Auflage eine Stufe geringer ausfällt. Chrom und Cu haben in diesen Horizonten eine mittlere bis grosse, Pb eine geringe bis mittlere Mobilität. Der hohe Humusgehalt im F- und AE-Horizont wirken auch bei diesen Elementen mobilitätsverringend. In den tieferliegenden Horizonten wird die Mobilität aller Schwermetalle geringer geschätzt, diejenige von Ni und Zn als mittel bis gross, diejenige von Cr, Cu und Pb als sehr gering bis gering. Aufgrund der Tiefenverteilung (Abb. S2.16) und der Anreicherungsfaktoren (Tab. S2.4) muss aber davon aus-

Schwermetallmobilität

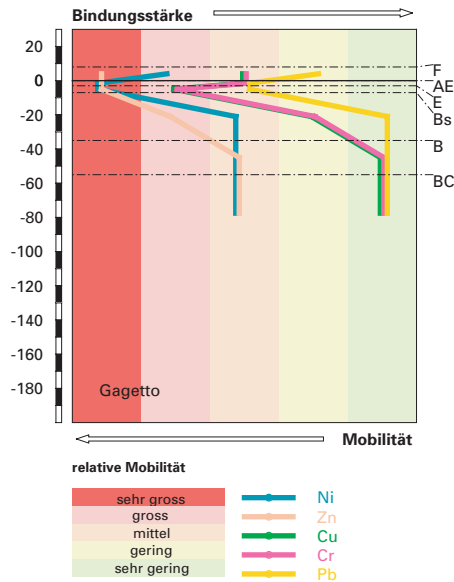


Abb. S2.18 Mobilität der Schwermetalle

gegangen werden, dass zumindest die effektive Mobilität von Cu und Pb durch Verlagerung mit gelöster organischer Substanz gegenüber der in Abb. S2.18 dargestellten Schätzung stark erhöht ist.

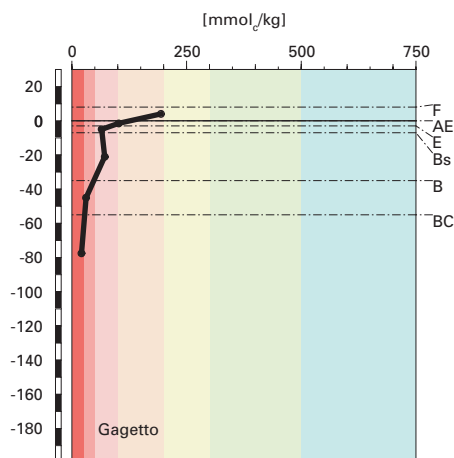
Aufgrund der geschätzten Mobilitäten und der gemessenen Tiefenverteilungen und Anreicherungsfaktoren dürfte das Risiko einer Belastung des Grundwassers mit Cu, Zn und Pb in diesem Boden gross sein.

S2.5.6

Schätzung der Gefährdung von Mikroorganismen

In den obersten 10 cm des Bodens sind Ni, Cu und Zn in Gehalten vorhanden, welche für pflanzliche und tierische Mikroorganismen in Waldböden unkritisch sind. Hingegen bedeuten der Cr-Gehalt im E- und Bs-Horizont ein Risiko für Mikroorganismen. Zudem liegt der Pb-Gehalt im AE-Horizont im Grenzbereich zur Toxizität.

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)

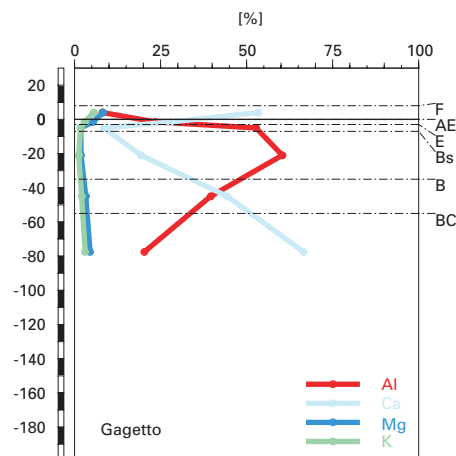


Abb. S2.19 (links) Kationenaustauschkapazität

Abb. S2.20 (rechts) Belegung des Kationenaustauschers

S2.6 Themenbereich «Nährstoffe»

S2.6.1 Nährstoffverfügbarkeit im Oberboden

Entsprechend den sehr stark sauren pH-Verhältnissen in den obersten 7 cm des Mineralbodens hat sich in diesem Nadelwaldbestand ein Moder gebildet, der auf eine gehemmte Nährstoffverfügbarkeit hinweist. Im nur 3 cm mächtigen AE-Horizont ist allerdings eine Krümelstruktur entstanden, die auf eine rege biologische Aktivität schließen lässt. Das mässig weite C/N-Verhältnis von 24 im F-Horizont ist dennoch typisch für einen Moder und lässt den Schluss zu, dass die Mineralisierungsrate der organischen Substanz niedrig ist. Auch das im F-Horizont mässig weite C/P-Verhältnis von 520 weist auf die Nährstoffarmut der organischen Substanz in der Auflage hin.

Alle diese Indikatoren lassen den Schluss zu, dass die Mineralisierung der organischen Substanz im obersten Mineralerdehorizont leicht gehemmt ist, so dass von einer entsprechend gehemmten Nährstoffverfügbarkeit im Oberboden auszugehen ist.

S2.6.2 Nährstoffgehalte

In Übereinstimmung mit den erhöhten Gehalten an organischer Substanz in den obersten 35 cm des Profils ist die Kationenaustauschkapazität in diesem Teil des Bodens zwar ebenfalls erhöht, sie ist aber dennoch als gering zu klassieren. In den tiefer gelegenen Horizonten nimmt die Kationenaustauschkapazität auf extrem geringe Werte ab (Abb. S2.19). Bis in den Bs-Horizont ist der Kationenaustauscher zum grössten Teil mit Aluminiumionen belegt. Mit einem Anteil von 60 % ist die Al-Belegung im Bs-Horizont maximal (Abb. S2.20). Mit zunehmender Tiefe geht dieser Anteil auf 20 % zurück und entsprechend nimmt der Anteil von austauschbaren Nährstoffkationen, in erster Linie von Kalzium, zu. Die Kalium- und Magnesium-Anteile am Kationenaustauscher sind bescheiden und nehmen im Tiefenverlauf vom E- zum BC-Horizont nur leicht zu.

S2.6.3 Nährstoffvorräte

Die starke Belegung des Kationenaustauschers mit Al- und Ca-Ionen hat zur Folge, dass der Magnesium- und Kaliumvorrat klein ist. Im Tiefenverlauf nehmen die Vorräte in der Reihenfolge $\text{Ca} > \text{K} > \text{Mg}$ zu, wobei die Zunahme von austauschbarem Kalzium weitaus am stärksten ist (Abb. S2.21–S2.23). Bis zur Referenztiefe von 60 cm werden die Vorräte wie folgt klassiert:

Ca mittel
Mg gering
K sehr gering

Der Boden ist allerdings wesentlich mächtiger als 60 cm und die Durchwurzelbarkeit ist nicht eingeschränkt. Wurzeln sind bis mindestens 100 cm Tiefe vorhanden. Unter Berücksichtigung dieser Aspekte resultiert in der Gesamtbeurteilung des Bodens für Ca ein mittlerer, für Mg ein mässiger und für K ein geringer Vorrat. Da an diesem Waldstandort kein Risiko für Trockenstress besteht, sind die Nährstoffe für die Pflanzen während der gesamten Vegetationszeit nahezu uneingeschränkt verfügbar.

Kalzium-Vorrat

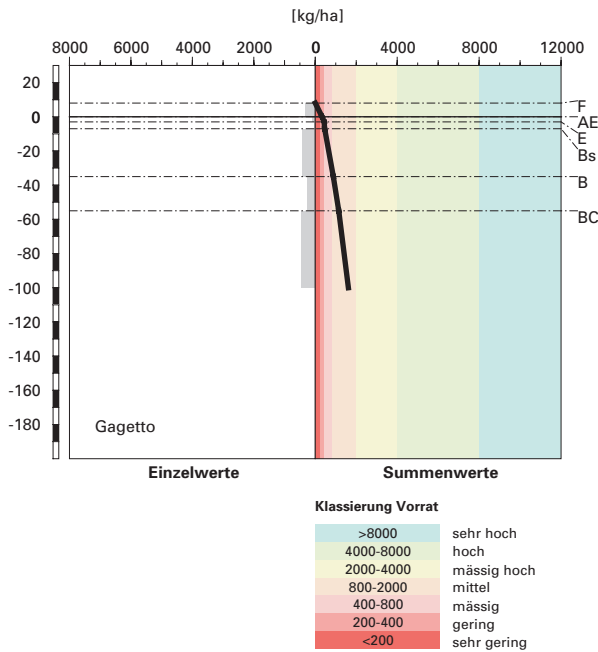


Abb. S2.21 Vorrat an Kalzium

Magnesium-Vorrat

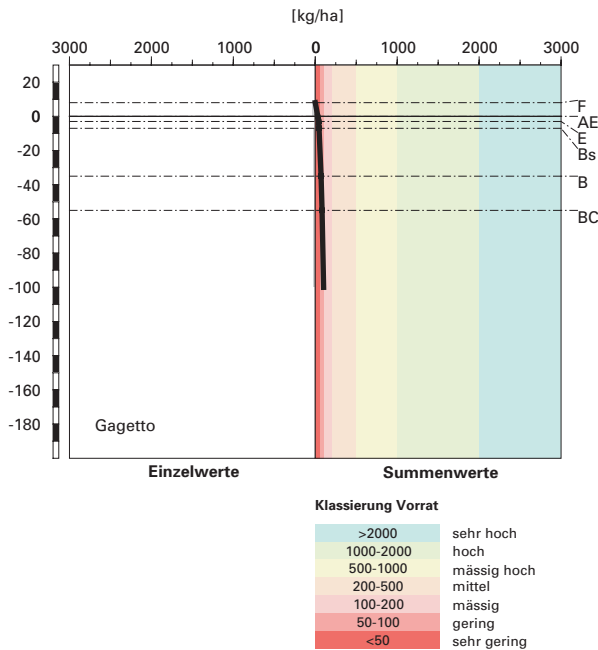


Abb. S2.22 Vorrat an Magnesium

Kalium-Vorrat

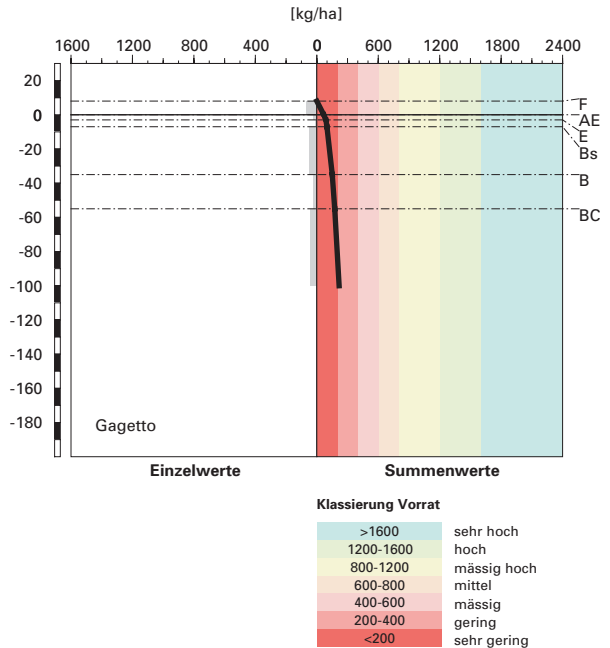


Abb. S2.23 Vorrat an Kalium

S2.7 Themenbereich «Waldbaulich relevante Bodenkennwerte und Baumartenwahl»

S2.7.1 Steckbrief für die Waldbehandlung

Der Steckbrief (Tab. S2.5) orientiert über waldbaulich relevante Standortfaktoren und Bodenkennwerte.

S2.7.2 Baumartenwahl

Naturnähe von Bestand und Oberboden

Der Bestand ist ein nahezu reiner Fichtenwald, was für die Höhenlage und den Standortstyp (EK Nr. 57) natürlich ist. Nach Ott et al. (1997) trifft man an diesem Standort häufig Moder oder Rohhumus an. Die Humusform Moder schätzen wir demnach als standorttypisch ein.

Tab. S2.5 Steckbrief für die Waldbehandlung (Gagetto)**Standortangaben**

Relief	Höhe	1690 m
	Exposition	N
	Neigung	70%
Klima	Jahresniederschlag	2095 mm
	Jahrestemperatur	3.6°C
Ausgangsgestein	Bündnerschiefer	
Baumbestand	Struktur	einschichtig bis stufig
	Schlussgrad	70%
	Baumarten (Deckung)	60 % Fichte
	Oberhöhe	29 m
Waldgesellschaft	nach E & K 1972	Nr. 57: Torfmoos-Fichtenwald mit Landschilf
	nach BUWAL 2005	Nr. 57C: Alpenlattich-Fichtenwald mit Wollreitgras

Bodenkennwerte

Bodensystematik	Bodentyp	Eisenpodsol
	Humusform	Moder
Wasser- und Lufthaushalt	Durchlüftung	Im Boden sind keine Vernässungsmerkmale erkennbar, was zeigt, dass der Boden stets gut durchlüftet ist.
	Durchwurzelbarkeit	Der Boden ist für alle Baumarten mindestens profilumfassend durchwurzelbar. Der Wurzelraum wird mit mehr als 120 cm Mächtigkeit als sehr tiefgründig klassiert. Wurzeln sind bis zur Profilsohle vorhanden.
	pflanzenverfügbares Wasser	Unter den gegebenen klimatischen Verhältnissen besteht kein Risiko für Trockenstress.
Säurezustand	pH-Wert/Kalkgrenze	Der Boden ist bis 7 cm Tiefe sehr stark, zwischen 7 und 55 cm stark und weiter unten im Profil mässig sauer. Die Kalkgrenze liegt unterhalb der Profilsohle, also tiefer als 100 cm.
	Aluminium-Toxizität	Es besteht kein 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 mittel, der Mg-Vorrat mässig und der K-Vorrat gering.
Verankerung	Da der Boden sehr tiefgründig ist, wird die Verankerung des Baumbestandes als gut bewertet.	
Befahrbarkeit	Die obersten 55 cm des Bodens sind in nassem Zustand empfindlich auf Verdichtung durch Befahren mit schweren Maschinen, weil dort relativ wenig Skelett vorhanden ist. Der Bestand kann allerdings nicht mit schweren Maschinen befahren werden, weil er in zu steilem Gelände liegt.	

Baumartenwahl gemäss standortkundlichen Grundlagenwerken

Gemäss BUWAL (2005) kommen an diesem Fichtenstandort (Nr.57C) nur die Fichte und die Vogelbeere für die Waldverjüngung in Frage. Diese stark eingeschränkte Auswahl ist vor allem durch das rauhe Klima bedingt.

Bodenkundliche Kriterien für die Baumartenwahl

An Waldstandorten mit rauem bis kaltem Klima, wo aufgrund der kurzen Vegetationsperiode nur Fichten, Lärchen und Arven sowie Vogelbeeren und Grünerlen gedeihen, spielt der Boden bei der Baumartenwahl eine marginale Rolle. In den Regionen Alpen und Alpensüdseite findet man ein derartiges Klima an den subalpinen Waldstandorten Nr.57, 59 und 60 (Nr. nach Ellenberg und Klötzli 1972). An diesen Standorten werden die bodenkundlichen Kriterien für die Baumartenwahl nicht besprochen.

S2.8 Literatur

Blaser, P. / Zimmermann, S. / Luster, J. / Walthert, 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.

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

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