

A19 Bodenprofil Maladers

A19.1 Themenbereich «Bodenbildungsfaktoren und Profilmorphologie»

A19.1.1 Zusammenfassende Angaben zum Profil und zu den Bodenbildungsfaktoren

Das Bodenprofil ist in [Abb.A19.1](#) dargestellt. Einen Eindruck vom Bestand vermittelt [Abb.A19.2](#). [Tab.A19.1](#) fasst wichtige Angaben zum Boden und Profilort Maladers zusammen und [Tab.A19.2](#) orientiert über die Bodenbildungsfaktoren.

A19.1.2 Verbreitung gemäss Bodeneignungskarte der Schweiz

Das Profil gehört zur Kartierungseinheit S5 (alpine Flysch-Berglandschaft, Bündnerschiefer, steile Südhänge, Hangneigung >35%). 330 Stichproben des Landesforstinventars gehören dieser Kartierungseinheit an. Das Profil repräsentiert damit 2.8% der mit dem LFI insgesamt erfassten 11'863 Stichproben.

A19.1.3 Besonderheiten am Profilort

Am Profilort ist die Gründigkeit des Bodens über dem stark angewitterten Bündnerschiefer sehr variabel. Zwischen der [Abb.A19.1](#) und der [Tab.A19.3](#) gibt es bezüglich Aufschlusstiefe des festen Ausgangsgesteins deutliche Unterschiede. Die Ursache dieser Differenzen liegt beim kleinflächig wechselnden Standortsmosaik.

A19.1.4 Profilmorphologie und Klassierung

Die im Profil angesprochenen morphologischen Bodenmerkmale sind in [Tab.A19.3](#) zusammen mit einer Profilskizze dargestellt.

Der Boden ist durchwegs von einer Streuschicht (L) bedeckt, die überwiegend von Nadelbäumen und von Pflanzen aus der Krautschicht stammt. Sie wird innerhalb eines Jahres weitgehend zersetzt, so dass die organische Auflage lediglich aus einer Streuschicht besteht. Mit der Horizontfolge L-Ah wird die Humusform als Mull klassiert.

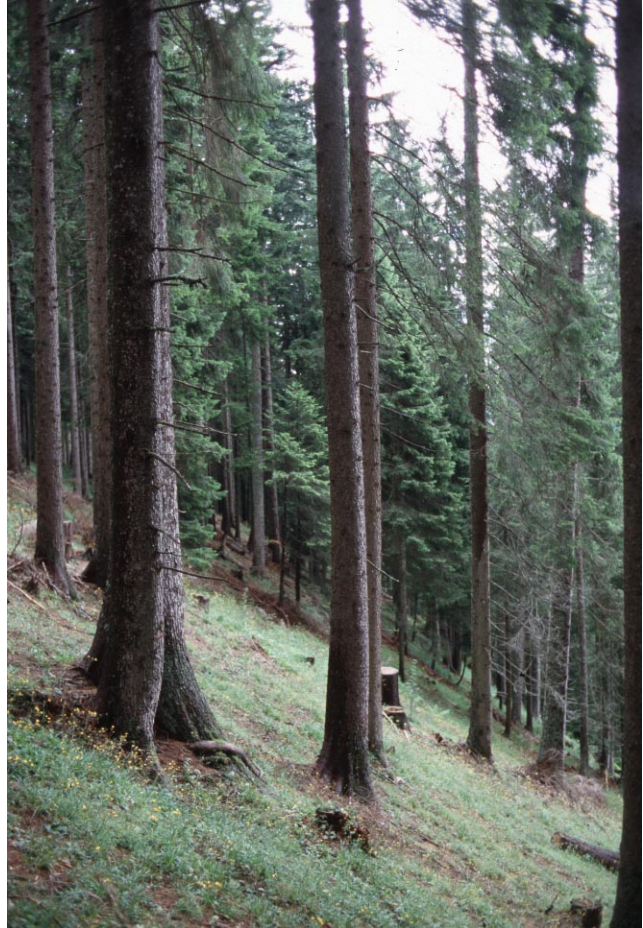


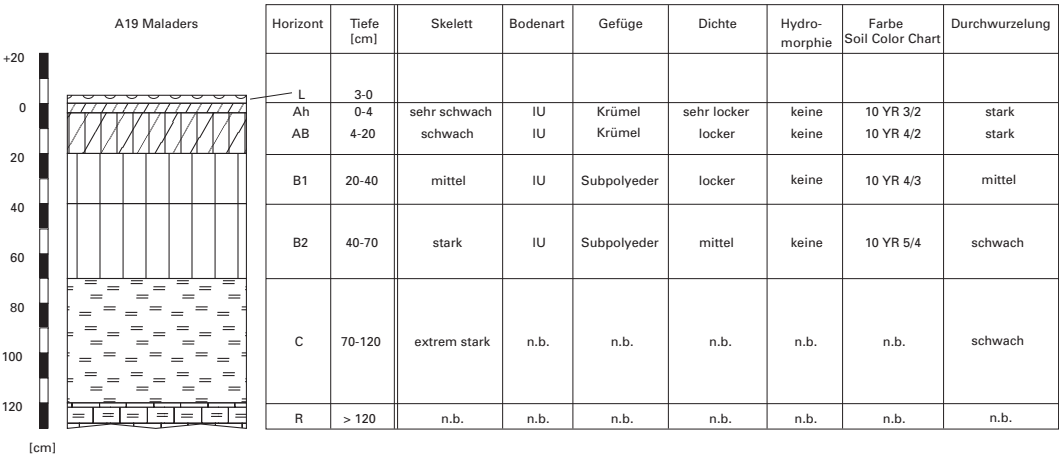
Abb. A19.1 ([links](#)) Bodenprofil Maladers

Abb. A19.2 ([rechts](#)) Bestand am Profilort Maladers

Tab. A19.1 Zusammenfassende Angaben zum Profil Maladers	
Lokalname	Bawald (Kanton Graubünden, Gemeinde Maladers)
Lage	Landeskarte 1:25 000 Blatt 1196, Arosa Koordinaten 762100 / 190500
Waldgesellschaft (Ellenberg und Klötzli 1972)	Nr. 51: Labkraut-Fichten-Tannenwald (<i>Galio-Abietetum</i>)
Horizontfolge	L-Ah-AB-B1-B2-C-R
Humusform	Mull
Bodentyp	Braunerde
Bodentyp nach FAO (1988)	Eutric Cambisol

Tab. A19.2	Bodenbildungsfaktoren am Profilort Maladers		
Relief	Höhe ü. M.	1445 m	
	Exposition	S	
	Neigung	60 %	
	Geländeform	Mittelhang	
Ausgangsgestein	Tektonik/Geologie	Penninikum; Mesozoische Sedimente (Bündnerschiefer)	
	Lithofazies	Nr. 12: Kiesel- bis Sandkalksteine	
	(nach Tuchschnid 1995)	(Flysch und Bündnerschiefer)	
		physikalische Verwitterbarkeit Gestein:	klein–mittel
	chemische Verwitterbarkeit Gestein:	mittel	
	Tongehalt Gestein:	sehr niedrig	
Klima	T/N Jahresmittel	5.9°C/1025 mm	
	T/N Januarmittel	–2.0°C/55 mm	
	T/N Julimittel	15.2°C/109 mm	
	Tage mit Schneedecke	156	
	Wärmegliederung	rauh	
	Länge der Vegetationsperiode	135 – 150 Tage	
Pflanzen	Schicht	Deckung	häufigste Arten
	Baumschicht (30 m Höhe)	70 %	65 % Fichte (<i>Picea abies</i>) 3 % Weiss-Tanne (<i>Abies alba</i>)
	Strauchschicht	5 %	–
	Krautschicht	60 %	Siebers Hainsimse (<i>Luzula sieberi</i>) Wald-Wachtelweizen (<i>Melampyrum sylvaticum</i>) Sanikel (<i>Sanicula europaea</i>) Rundblättriges Labkraut (<i>Galium rotundifolium</i>) Quirlblättrige Weisswurz (<i>Polygonatum verticillatum</i>)
	Moosschicht	10 %	–

Tab. A19.3 Profilskizze und Morphologie des Bodenprofils Maladers
Bodenart: IU Schluff-Lehm; n.b. nicht bestimmt



Im Mineralboden können aufgrund der morphologischen Merkmale fünf Horizonte unterschieden werden. Der Skelettgehalt nimmt mit zunehmender Tiefe von sehr schwach direkt unter der Bodenoberfläche bis extrem stark ab 70 cm Tiefe zu. Farblich hebt sich die bräunlich schwarze Zone direkt unterhalb der organischen Auflage vom übrigen Oberboden ab. Der Übergangsbereich von 4 bis 20 cm ist gräulich gelb-braun. Das Profil wird im Unterboden zwischen 20 und 70 cm hauptsächlich durch matt gelblich braune Farben gekennzeichnet. Unterhalb von 70 cm Tiefe hat die Feinerde die Farbe des Ausgangsgesteins. Mit der Fühlprobe wurde die Bodenart im ganzen Profil als Schluff-Lehm bestimmt. In den obersten 20 cm Tiefe hat das Gefüge eine Krümelstruktur, in den tiefer gelegenen Horizonten eine Subpolyederstruktur. Die Dichte bleibt bis 40 cm Tiefe locker und wechselt bis zum Ausgangsgestein zu mittel. Im ganzen Profil sind keine hydromorphen Merkmale vorhanden.

Aufgrund der morphologischen Merkmale werden die Horizonte mit L-Ah-AB-B1-B2-C-R gekennzeichnet und der Boden als Braunerde klassiert.

Ergänzende Bodenmerkmale

Gemäss pH-Hellige ist die Feinerde des Bodens bis 20 cm sauer, tiefer im Profil schwach sauer. Die Durchwurzelung des Bodens ist bis 20 cm Tiefe stark, zwischen 20 und 40 cm mittel und ab 40 cm bis zum festen Ausgangsgestein schwach. Im Profil ist das Wurzelwachstum ab 120 cm durch Fels stark eingeschränkt.

A19.2 Themenbereich «Physikalische Bodenkennwerte»

A19.2.1 Beschrieb einiger physikalischer Bodenkennwerte

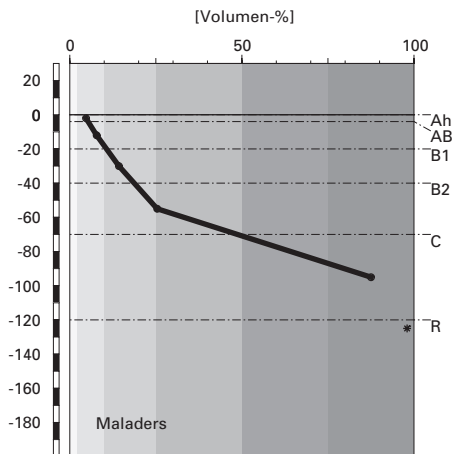
Skelettgehalt

Der Skelettgehalt nimmt zur Tiefe hin rasch zu (Abb. A19.3). Der Oberboden ist schwach, der Unterboden mittel bis extrem stark skeletthaltig. In 120 cm Tiefe ist Fels aus Bündnerschiefer anstehend.

Bodenart

Die Feinerde wird mit zunehmender Profiltiefe grobkörniger, was gut mit dem Verwitterungszustand des Bodens übereinstimmt (Abb. A19.4). Der wenig verwitterte C-Horizont ist mit 58% relativ sandreich. Die darüber liegenden, stärker entwickelten Horizonte enthalten deutlich mehr Schluff und Ton. Gemessen am Tongehalt handelt es sich im C-Horizont um leicht-

Skelettgehalt



Klassierung Skelettgehalt

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

Bodenart

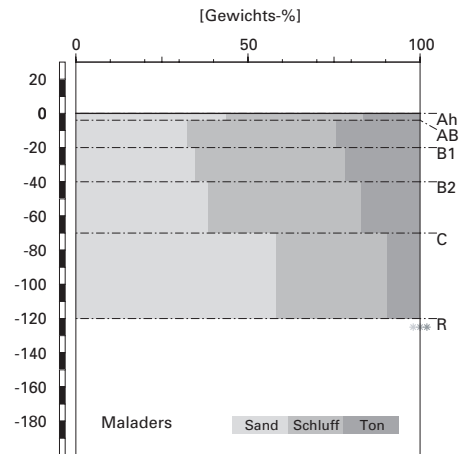


Abb. A19.3 (links) Skelettgehalt

Abb. A19.4 (rechts) Bodenart

ten, im Rest des Profils um mittelschweren Boden. Feld- und Laborbestimmung der Bodenart ergeben unterschiedliche Resultate. Im Feld wurde der Schluffgehalt überschätzt (Tab. A19.3).

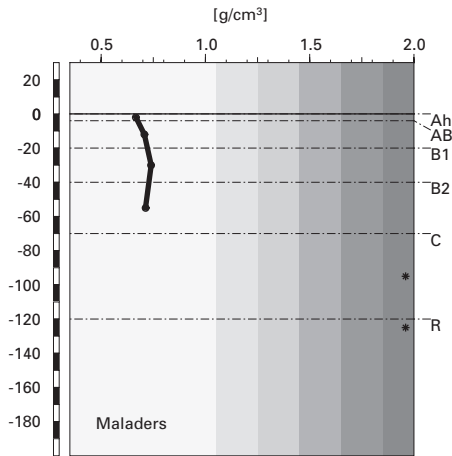
Dichte der Feinerde

Die Dichte ist in allen Horizonten bemerkenswert konstant. Sie wird mit Werten zwischen 0.67 und 0.74 g/cm³ durchwegs als äusserst gering klassiert (Abb. A19.5). Bei der Profilsprache im Feld wurde die Dichte im B2-Horizont überschätzt (Tab. A19.3).

Wasserleitfähigkeit im gesättigten Boden

Alle Horizonte sind aufgrund ihrer äusserst geringen Dichte hoch durchlässig (Abb. A19.6). Das schiefrige Gestein im Unterboden dürfte die Durchlässigkeit etwas reduzieren. Wir können seinen Einfluss auf die gesättigte Wasserdurchlässigkeit allerdings nicht quantifizieren.

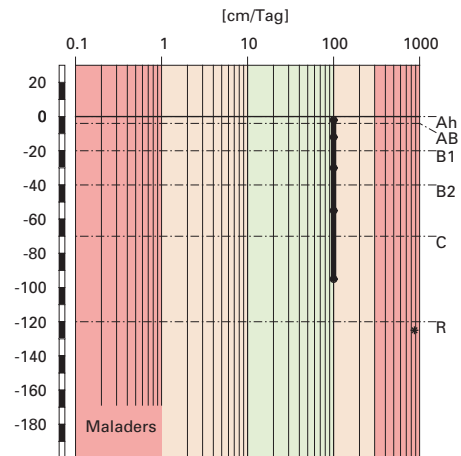
Feinerde-Dichte



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. A19.5 (links) Dichte der Feinerde

Abb. A19.6 (rechts) Wasserleitfähigkeit im gesättigten Boden

Pflanzenverfügbares Wasser

Die Wasserspeicherkapazität des Bodens bis 120 cm Tiefe wird mit 147 l/m² als hoch klassiert (Abb. A19.7).

A19.2.2

Bodenkundliche und ökologische Interpretationen

Wasser- und Lufthaushalt des Bodens

In dieser Braunerde kommen aufgrund der äusserst hohen Durchlässigkeit (Abb. A19.6) keine Vernässungsmerkmale vor. Die schiefrigen Felsschichten im Unterboden leiten das Sickerwasser talwärts ab, so dass es im Boden nicht zu einem länger andauernden Wasserstau kommt. Gesättigte Phasen mit ungenügender Durchlüftung sind also höchstens von sehr kurzer Dauer.

pflanzenverfügbares Wasser

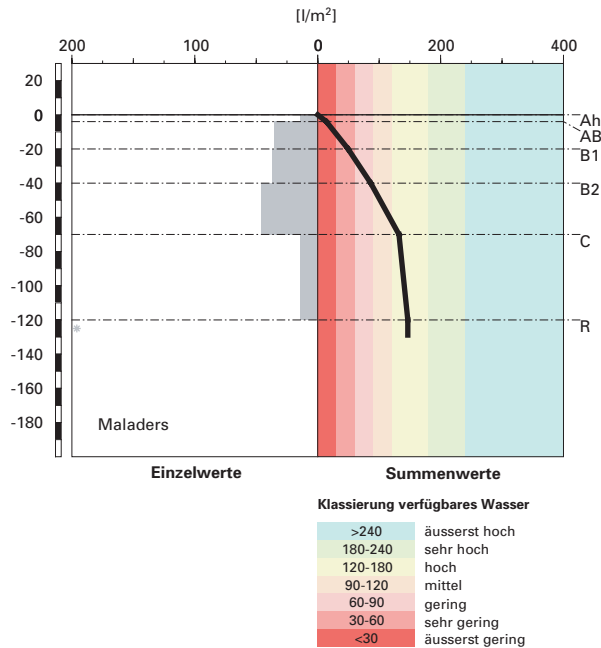


Abb. A19.7 Pflanzenverfügbares Wasser

Durchwurzelbarkeit des Bodens

Da in 120cm Tiefe Fels ansteht, ist der Wurzelraum für alle Baumarten begrenzt. Der Boden ist mit 120cm Mächtigkeit aber dennoch sehr tiefgründig. In 0–120cm Tiefe ist das Wurzelwachstum durch die schiefrigen Felsplatten zwar eingeschränkt aber nicht vollständig unterbunden. Hinsichtlich der Feinerde-Dichtewerte, die weit unter dem kritischen Wert von 1.4 g/cm^3 liegen und der Durchlüftung, die in allen Horizonten stets ausreichend ist, herrschen günstige Bedingungen für das Wurzelwachstum.

Der Boden wird von den Bäumen gut genutzt, denn Wurzeln von Fichten und Tannen sind bis zur Profilsohle (120 cm) vorhanden. Wie tief die Bäume ihre Wurzeln in Spalten und Ritzen des Bündnerschiefers vortreiben, wissen wir nicht.

Wasserversorgung des Baumbestandes

Nach unseren Berechnungen, welche sich auf einen Wurzelraum von 120 cm Mächtigkeit beziehen, beginnt der Bestand in Trockenperioden ohne nennenswerte Niederschläge nach rund 20 Tagen an Wassermangel zu leiden. Das nicht optimale Speichervermögen des Bodens, seine begrenzte Gründigkeit und die eher ungünstigen klimatischen Bedingungen bewegen uns dazu, das Risiko für Trockenstress an diesem Fichten-Tannen-Standort (EK 51) als mässig zu beurteilen. Die Bäume dürften somit während der Vegetationszeit gelegentlich unter Trockenstress leiden.

Bodenbefahrbarkeit

Der Boden reagiert in nassem Zustand empfindlich auf Befahren mit schweren Maschinen, weil er bis 40 cm Tiefe weniger als 20 % Skelett enthält und zudem recht schluff- und tonreich ist. Bei einer Hangneigung von 60 % ist der Waldbestand allerdings nicht befahrbar.

A19.3 Themenbereich «Bodenhauptbestandteile»

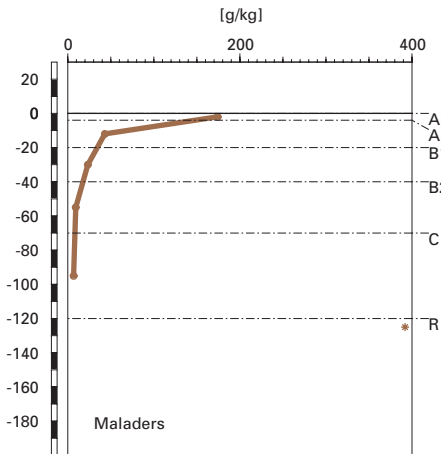
A19.3.1 Charakterisierung der Bodenhauptbestandteile

Organische Substanz

Am Profilort Maladers bilden vor allem Fichten und einzelne Weiss-Tannen den Baumbestand, dessen Kronen den Boden zu 70 % überschirmen. Der lückige Bestand lässt genügend Licht auf den Boden, so dass auf rund 60 % der Fläche eine Krautschicht vor allem aus Siebers Hainsimse, Wald-Wachtelweizen, Sanikel, rundblättrigem Labkraut und quirlblättriger Weisswurz gedeiht. Die relativ schwer abbaubare Fichtenstreu wird innerhalb eines Jahres praktisch vollständig abgebaut. Es ist kein F-Horizont, sondern nur eine Streuschicht vorhanden.

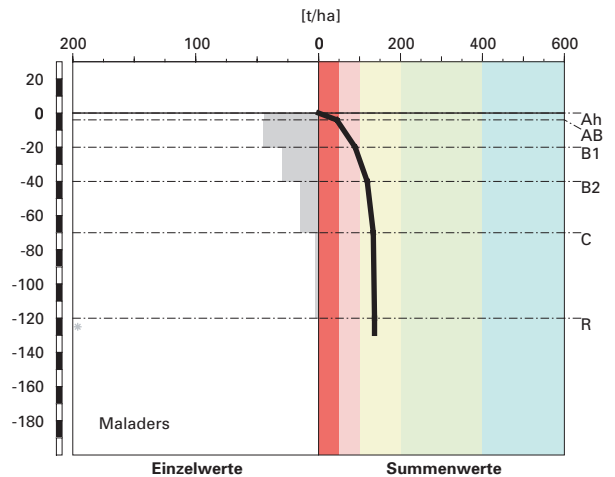
Der sehr dunkle, 4 cm mächtige Ah-Horizont hebt sich deutlich von den tiefer gelegenen gräulich gelb-braunen bis matt gelblich-braunen Horizonten ab. Der Ah-Horizont enthält etwas mehr als 17 % organischen Kohlenstoff (C_{org} ; Abb. A19.8). Bis in den AB-Horizont nimmt der C_{org} -Gehalt markant auf rund 4 % ab. Im weiteren Tiefenverlauf geht er allmählich auf 0.7 % im C-Horizont zurück. Aus diesen C_{org} -Gehalten resultiert ein Vorrat an organischem Kohlenstoff von 136 t/ha (Abb. A19.9).

organischer Kohlenstoff



Kohlenstoff-Vorrat

(C_{org})



Klassierung Vorrat

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

Abb. A19.8 (links) Gehalt an organischem Kohlenstoff

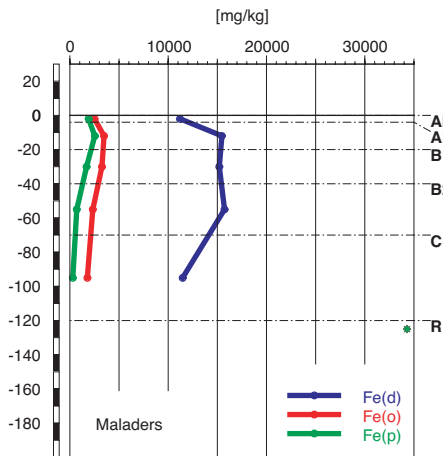
Abb. A19.9 (rechts) Vorrat an organischem Kohlenstoff

Tonverteilung sowie Verteilung von Aluminium- und Eisenoxiden

Der Tongehalt beträgt im Ah-Horizont rund 17%, ist im AB-Horizont mit 24% am grössten und nimmt im weiteren Tiefenverlauf allmählich auf ein Minimum von rund 10% im C-Horizont ab (Abb. A19.4).

Alle extrahierbaren Eisengehalte sind im obersten Horizont durch den relativ grossen Gehalt an organischer Substanz beeinflusst. Sie nehmen alle vom Ah- bis in den AB-Horizont zu (Abb. A19.10). Bezieht man die Gehalte jedoch auf die C_{org} -freie Mineralerde, nehmen die Gehalte vom Ah- in den AB-Horizont hingegen leicht ab. Der Dithionit-extrahierbare Eisengehalt (Fe_d) ist vom AB- bis in den B2-Horizont mehr oder weniger gleich gross und nimmt im C-Horizont auf das Minimum ab. Die Oxalat- und Pyrophosphat-extrahierbaren Eisengehalte (Fe_o und Fe_p) sind im AB-Horizont am grössten. Mit der Tiefe nehmen sie gleichförmig ab. Im C-Horizont sind die Gehalte der beiden Eisenfraktionen am kleinsten (Abb. A19.10).

Eisen-Oxide (Gehalte)



Aluminium-Oxide (Gehalte)

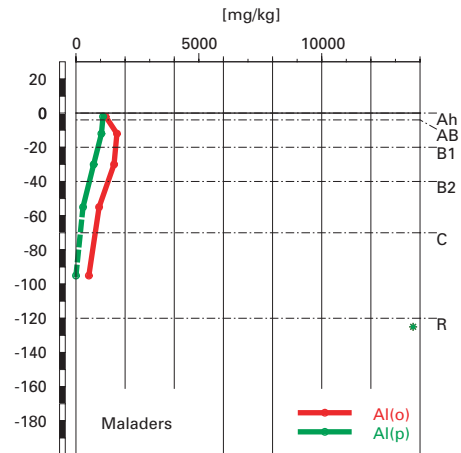


Abb. A19.10 (links) Gehalte an Dithionit- (Fe_d), Oxalat- (Fe_o) und Pyrophosphat- (Fe_p) extrahierbarem Eisen

Abb. A19.11 (rechts) Gehalte an Oxalat- (Al_o) und Pyrophosphat- (Al_p) extrahierbarem Aluminium

Eisen- und Aluminiumoxide (Verhältnisse)

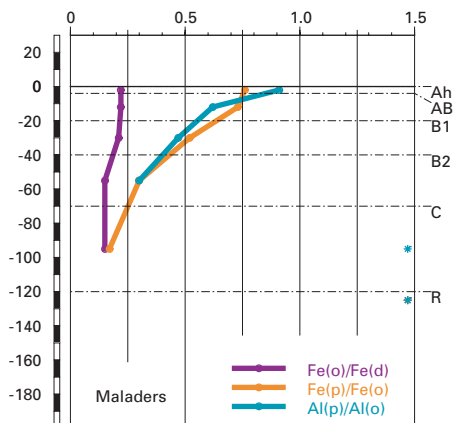


Abb. A19.12 Verhältnisse der Fe- und Al-Oxide

Die extrahierbaren Aluminiumgehalte verhalten sich analog den entsprechenden Eisengehalten. Der Pyrophosphat-extrahierbare Aluminiumgehalt (Al_p) zeigt allerdings in Abweichung zu Fe_p vom Ah- in den AB-Horizont keine Zu- sondern eine Abnahme (Abb. A19.11).

Das Fe_o/Fe_d -Verhältnis hat im ganzen Profil relativ kleine Werte zwischen 0.15 und 0.22, wobei diese in den obersten 40 cm etwas grösser als 0.2 sind und unterhalb 40 cm Tiefe zwischen 0.1 und 0.2 liegen (Abb. A19.12). Sowohl das Fe_p/Fe_o - als auch das Al_p/Al_o -Verhältnis nehmen mit der Tiefe deutlich ab (Abb. A19.12).

A19.3.2 Bodenkundliche Interpretation

Die Streu am Profilort Maladers wird innerhalb eines Jahres weitgehend abgebaut. Es ist zwar eine 3 cm mächtige Streuschicht aus Nadeln, jedoch kein F-Horizont zu beobachten. Die Möglichkeit der Streuverfrachtung kann allerdings am praktisch vegetationslosen Profilort mit einer Hangneigung von 60 % nicht ausgeschlossen werden. Die Humusform wird als Mull klassiert. Zu dieser relativ raschen Umsetzung der schwer abbaubaren Fichtenstreu trägt vor allem das Klima bei, welches die biologische Aktivität begünstigt. Das Klima bietet an diesem auf 1445 m.ü.M. in S-Exposition gelegenen Standort mit durchschnittlichen jährlichen Niederschlägen von 1025 mm und einer Jahresdurchschnittstemperatur von 5.9°C (durchschnittliche Julitemperatur: 15.2°C) genügend Wärme und Feuchtigkeit für eine aktive Bodenmikrofauna und -flora. Zudem sind praktisch im ganzen Profil bis zum karbonathaltigen Ausgangsgestein einzelne Wurmgänge zu beobachten. Diese relativ hohe biologische Aktivität zeigt sich in den obersten 20 cm des Bodens in einer Krümelstruktur. Allerdings deuten der nur 4 cm mächtige Ah-Horizont und der ausgeprägte Gradient im C_{org} -Gehalt zwischen Ah- und AB-Horizont auf eine nicht optimale Umsetzung der organischen Substanz hin. Das C/N-Verhältnis wird im Ah-Horizont mit rund 23 (Tab. A166 in Blaser et al. 2005) als mässig weit klassiert und die Mineralisierungsrate der organischen Substanz ist entsprechend niedrig. Auch das C/P-Verhältnis ist im Ah-Horizont mit 513 (Tab. A166 in Blaser et al. 2005) mässig weit. Diese Parameter lassen eine gehemmte Mineralisierung der organischen Substanz erwarten. Infolge der Aktivität von Regenwürmern werden teilzersetzte Streureste mit der tonhaltigen Feinerde innig vermischt und zu abbauresistenten Ton-Humus-Komplexen umgewandelt. Der Vorrat an organischem Kohlenstoff im Mineralboden ist mit 136 t/ha im gesamtschweizerischen Vergleich als mittel zu bewerten.

Mit Ausnahme des Ah-Horizontes nimmt der Tongehalt mit der Tiefe kontinuierlich ab (Abb. A19.4). Im Ah-Horizont beträgt er nur rund 17 % ge-

genüber 24% im AB-Horizont. Dies dürfte aber im Ah-Horizont aufgrund des grossen Humusgehaltes eher mit einem Artefakt bei der Messung als mit einer Tonverlagerung im Zusammenhang stehen. Der mit der Tiefe abnehmende Tongehalt widerspiegelt den zur Tiefe hin abnehmenden Verwitterungsgrad des Bodens.

Die mit der Tiefe kleiner werdenden Gehalte von extrahierbaren Aluminium- und Eisenverbindungen können mit einer Verbraunung der obersten 70 cm des Bodenprofils interpretiert werden, was sich dort in einem leicht erhöhten Fe_o/Fe_d -Verhältnis widerspiegelt (Abb. A19.12). Allerdings ist dieses Verhältnis in allen Horizonten relativ klein, was auf einen hohen Kristallinitätsgrad der Eisenoxide hinweist und anzeigt, dass der Boden nur schwach verbraunt ist.

Die relativ grossen Gehalte an organischer Substanz bewirken, dass von den amorphen Aluminium- und Eisenverbindungen ein Grossteil mit der organischen Substanz assoziiert ist. Dies belegen die grossen Fe_p/Fe_o - und Al_p/Al_o -Verhältnisse im Oberboden (Abb. A19.12). Mit abnehmendem C_{org} -Gehalt werden die Verhältnisse kleiner.

Aufgrund der morphologischen Merkmale wurde dieser Boden als Braunerde bezeichnet. Dies kann mit den chemischen Analysen der Aluminium- und Eisenverbindungen bestätigt werden. Die Verbraunung ist erst schwach ausgeprägt.

A19.4 Themenbereich «Säurezustand»

A19.4.1 Charakterisierung des Säurezustandes

pH-Wert

Die Feinerde ist bis in den AB-Horizont mässig sauer und befindet sich in der Säureklasse 3 (Abb. A19.13). Mit der Tiefe nimmt der pH-Wert zu. Die B-Horizonte sind schwach sauer und befinden sich in der Säureklasse 2. Im Übergang zum C-Horizont steigt der pH-Wert über 7, die Feinerde ist alkalisch und befindet sich in der Säureklasse 1, was auf Anwesenheit von Karbonat hindeutet. Dieses konnte allerdings in der Analyse nicht nachgewiesen werden.

Austauschbare Kationen und Basensättigung

Trotz dem tiefen pH-Wert im Ah-Horizont ist der Kationenaustauscher überwiegend mit Kalzium- und Magnesium-Ionen belegt (Abb. A19.14). Unter den sauren Kationen ist Mangan im ganzen Profil am stärksten vertreten

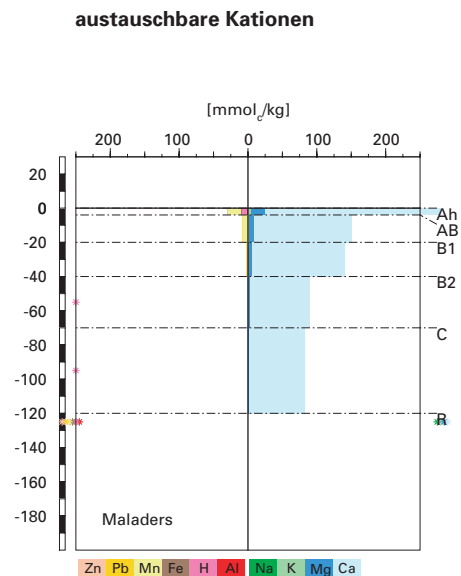
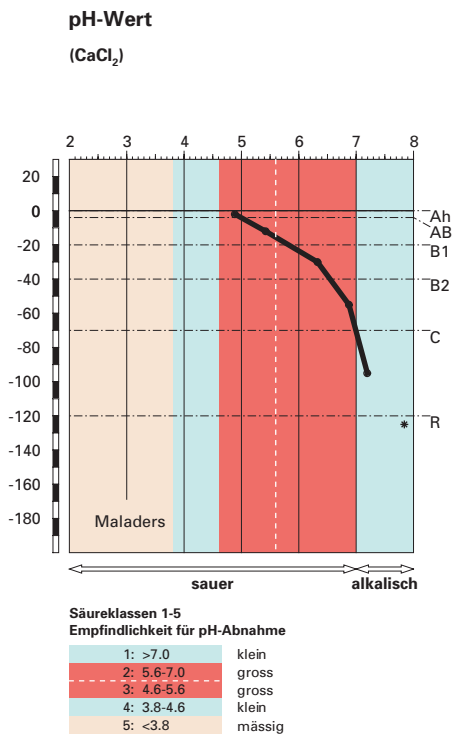


Abb. A19.13 (links) pH-Wert und Säureklassen

Abb. A19.14 (rechts) Belegung des Kationenaustauschers

(Tab. A161 in Blaser et al. 2005). Austauschbare Protonen sind nur im Ah-Horizont zu finden. Ab 20 cm Tiefe ist der Kationenaustauscher praktisch vollständig mit Kalzium und Magnesium belegt, wobei Kalzium bei weitem vorherrscht. Die Basensättigung ist im ganzen Profil sehr hoch (Abb. A19.15).

A19.4.2 Interpretationen zum Säurezustand

Stand der Bodenversauerung

Diese Braunerde ist mässig versauert, denn der pH-Gradient zwischen dem Ah- und C-Horizont umfasst 3 Säureklassen. Die Kalkgrenze konnte in den aufgeschlossenen 120 cm Tiefe des Bodens nicht festgestellt werden. Andererseits lässt sich auch keine Versauerungsfront festlegen, da die grösste Aluminiumbelegung des Kationenaustauschers im Ah-Horizont nur 0.5% beträgt. In diesem Boden wurden im Laufe der Bodenentwicklung alle

Basensättigung

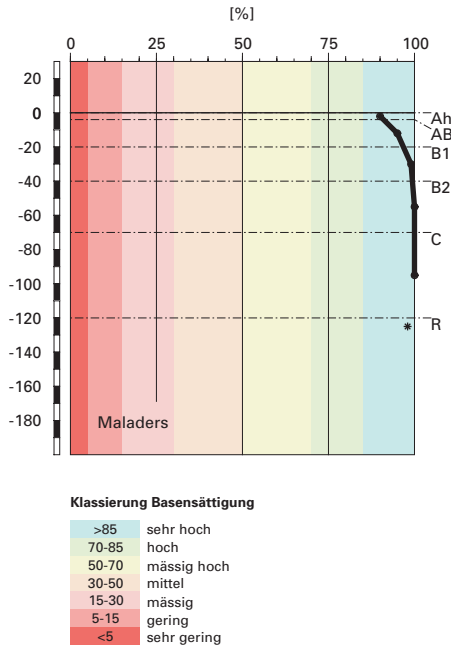


Abb. A19.15 Basensättigung

Karbonate in der Feinerde durch die Säurepufferung aufgelöst. Dennoch ist die Basensättigung im ganzen Profil sehr hoch geblieben. Dies ist typisch für nur mässig versauerte Böden auf karbonathaltigem Ausgangsgestein, deren Feinerde überwiegend in den Säureklassen 2 und 3 liegt und in der die Säurepufferung hauptsächlich durch Silikatverwitterung, sowie durch Protonierung variabler Ladungen stattfindet. Im pH-Bereich dieses Bodens ist die Aluminium-Freisetzung durch Säurepufferung von untergeordneter Bedeutung, weshalb die Nährstoffkationen praktisch nicht von ihren Austauscherplätzen verdrängt werden und die Basensättigung hoch bleibt. Eine Bemerkung verdient die vergleichsweise hohe Mn-Belegung des Kationenaustauschers, insbesondere in den obersten 20 cm des Profils. Bei der Gesteinsverwitterung wird auch Mangan freigesetzt. Dieses nimmt an den Austauschprozessen teil und belegt entsprechend den Gesetzmässigkeiten des Ionenaustausches einen Teil der Austauscherplätze. Im alkalischen pH-Bereich der Säureklasse 1 wird das Mangan durch das viel häufi-

gere Kalzium-Ion am Kationenaustauscher stark konkurrenziert und erscheint dort deshalb meistens nur in kaum messbaren Mengen. Im stark sauren pH-Bereich der Säureklasse 4, werden die Mn-Ionen sehr rasch durch das dreiwertige Aluminium verdrängt, weshalb man dieses Element auch in sauren Böden nur noch in unbedeutenden Mengen in austauschbarer Form vorfindet. Aus diesen Gründen findet man Mn nur in einem relativ engen, mässig bis schwach sauren pH-Bereich in grösseren Mengen am Kationenaustauscher vor, wie dies in dieser Braunerde der Fall ist.

Risiko für Boden und Pflanzen

Die Empfindlichkeit des Bodens für eine weitere pH-Abnahme bei anhaltendem Versauerungsdruck wird als gross beurteilt, weil sich über 90% der Feinerde in den nur schlecht puffernden Säureklassen 2 und 3 befindet. Der pH-Wert liegt im Ah-Horizont an der unteren Grenze der Säureklasse 3. Bei einer nur geringen pH-Abnahme gelangt dieser Horizont in die Säureklasse 4, wo die Säureneutralisation vorwiegend durch Auflösung von Aluminiumverbindungen stattfindet. Eine weitere pH-Abnahme wird sich dann verlangsamen, aber die austauschbaren Nährstoffkationen werden mehr und mehr von den Aluminium-Ionen verdrängt werden. Es ist deshalb damit zu rechnen, dass sich in absehbarer Zeit eine Versauerungsfront bemerkbar machen wird, die durch grössere Anteile von austauschbarem Aluminium am Kationenaustauscher gekennzeichnet ist. Trotz dieser absehbaren Versauerung wird diese auch in Zukunft nicht mit einer entsprechenden Abnahme der Basensättigung im Ah-Horizont einhergehen, weil infolge des karbonathaltigen Ausgangsgesteins, das von den Wurzeln erschlossen bleibt, Nährstoffkationen in einem engen Kreislauf verbleiben und die Austauscherplätze stets neu belegt werden.

Im gegenwärtigen Zustand besteht kein Risiko für eine Wachstumsbeeinträchtigung säureempfindlicher Pflanzen weil das BC/Al-Verhältnis im ganzen Boden mit Werten über 100 (Tab. A161 in Blaser et al. 2005) weit über dem kritischen Grenzwert von 0.2 liegt. Dies wird sich auch in absehbarer Zukunft nicht ändern, da ständig Nährstoffkationen mit der Streu an die Bodenoberfläche gelangen und das BC/Al-Verhältnis ausserhalb des kritischen Bereiches verharren wird.

A19.5.1 Tiefenverteilung der Schwermetalle

Mit Ausnahme von Blei nehmen in diesem Boden alle Schwermetalle tendenziell mit der Tiefe zu (Abb. A19.16). Chrom zeigt einen intensiven Anstieg vom Ah- bis zum B1-Horizont. In grösserer Tiefe nimmt sein Gehalt nur noch wenig zu. Der Ni-Gehalt nimmt nur gerade innerhalb des Oberbodens zu und bleibt dann mehr oder weniger konstant. Kupfer wiederum nimmt praktisch linear mit der Tiefe stark zu. Der Zn-Gehalt ist im Ah-Horizont etwas höher als im AB-Horizont. Im Unterboden nimmt er linear zu. Blei schliesslich ist nur gerade im Ah-Horizont gegenüber dem übrigen Boden etwas erhöht.

A19.5.2 Wertung der Schwermetallgehalte im untersten Mineralerde-Horizont im geochemischen Vergleich

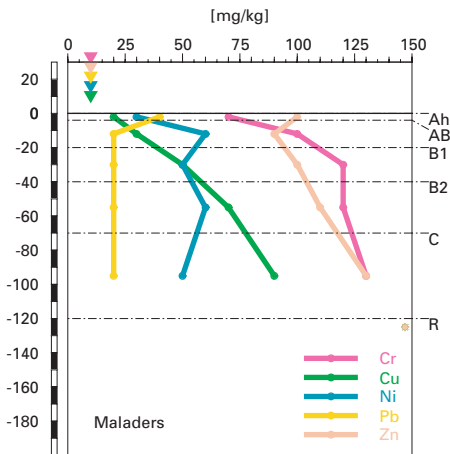
Bezogen auf das Ausgangsgestein, einem Bündnerschiefer (Lithofazies 12), liegen alle Schwermetallgehalte im C-Horizont oberhalb – Cr, Cu und Zn sogar weit oberhalb – typischer Wertebereiche. Die weit oberhalb liegenden Gehalte lassen eine falsche geochemische Zuordnung vermuten. Sie würden viel besser zur pelitischen Lithofazies 11 (Mergel und Tonschiefer; für feinkörnigen Bündnerschiefer) passen. Im Vergleich mit den typischen Wertebereichen der Lithofazies 11 liegen der Ni- und Pb-Gehalt innerhalb, die übrigen Schwermetallgehalte etwas oberhalb.

A19.5.3 Beurteilung der quellenunabhängigen Belastung nach VBBo

Für den Ah-Horizont wurden wegen seines hohen Humusgehaltes (Abb. A19.8) die volumenbezogenen Konzentrationen (mg/dm^3 ; Tab. A164 in Blaser et al. 2005) beurteilt. Diese sind niedriger als die massenbezogenen Gehalte (mg/kg ; Abb. A19.17), da die Dichte kleiner ist als $1 \text{ g}/\text{cm}^3$.

Bezogen auf die VBBo sind die Konzentrationen und Gehalte von Cr und Zn im ganzen Boden sehr niedrig bis niedrig (Abb. A19.17). Die Ni- und Cu-Konzentration im Ah-Horizont sind ebenfalls niedrig. Darunter sind die Gehalte dieser beiden Schwermetalle erhöht bis hoch. Der Cu-Gehalt ist im C-Horizont sogar sehr hoch und überschreitet damit den Richtwert der VBBo. Blei ist im Oberboden erhöht, im Unterboden niedrig.

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



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

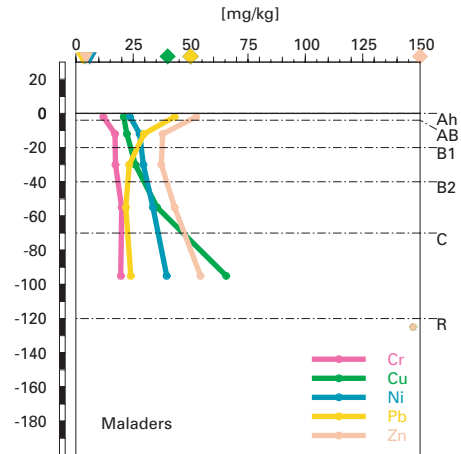


Abb. A19.16 (links) Schwermetalle: effektive Totalgehalte

Abb. A19.17 (rechts) Schwermetalle: Salpetersäure-extrahierbare Gehalte

A19.5.4 **Anreicherungsfaktoren**

Dieser Boden ist gegenüber dem C-Horizont deutlich an Cu verarmt (Tab. A19.4). Geringere Abreicherungen werden für Cr und Zn berechnet. Blei ist im Ah-Horizont signifikant angereichert.

In diesem mässig sauren bis alkalischen Boden kann die Verarmung an Cu bzw. die starke Zunahme der Cu-Gehalte mit der Bodentiefe (Abb. A19.16) nur mit Verlagerung und Auswaschung gebunden an gelöste organische Substanz erklärt werden. Kupfer ist für seine besonders stabilen Komplexe mit gelöster organischer Substanz bekannt. Die Pb-Anreicherung im Ah-Horizont ist auf anthropogenen Eintrag und Bindung an die organische Substanz in diesem stark humosen Horizont zurückzuführen. Der gegenüber dem AB-Horizont erhöhte Zn-Gehalt im Ah-Horizont (Abb. A19.16 und A19.17) ist ein Indiz für die Rückführung dieses Mikronährstoffs mit der Streu in den Boden. Umgekehrt sind die gegenüber dem AB-Horizont deutlich niedrigeren Cr- und Ni-Gehalte im Ah-Horizont vermutlich durch eine Verdünnung der Feinerde mit organischer Substanz zustande gekommen.

Tab. A19.4 Anreicherungsfaktoren						
Horizont	Tiefe [cm]	Anreicherungsfaktor				
		Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Ah	0– 4	0.62	0.26	0.69	2.31	0.89
AB	4– 20	0.64	0.28	1.00	0.83	0.58
B1	20– 40	0.77	0.46	0.83	0.83	0.64
B2	40– 70	0.77	0.65	1.00	0.83	0.71
C	70–120	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

A19.5.5 Schätzung der Mobilität der Schwermetalle

Die Mobilität der Schwermetalle wird in diesem Boden meist als sehr gering bis gering eingestuft (Abb. A19.18). Dies erklärt sich mit den schwach sauren bis alkalischen Verhältnissen im Unterboden (Abb. A19.13) sowie dem hohen Humusgehalt im Oberboden und B1-Horizont. Eine etwas höhere Mobilität wird nur gerade für Ni im AB- und für Zn im Ah- und AB-Horizont geschätzt.

Tiefenverteilung und Anreicherungsfaktoren (Abb. A19.16; Tab. A19.4) lassen allerdings vermuten, dass die effektive Mobilität von Cu aufgrund starker Verlagerung mit gelöster organischer Substanz in der Bodenlösung deutlich grösser ist als sie aufgrund von Eigenschaften der Bodenfestphase (pH-Wert, Ton- und Humusgehalt) geschätzt wird und in Abb. A19.18 dargestellt ist. Durch diesen Sachverhalt kann sogar eine Gefährdung des Grundwassers durch Belastung mit Cu nicht ausgeschlossen werden, zumal der Salpetersäure-extrahierbare Gehalt im C-Horizont den Richtwert der VBBo überschreitet (Abb. A19.17).

A19.5.6 Schätzung der Gefährdung von Mikroorganismen

Mit Ausnahme von Cr liegen die Schwermetallgehalte im Oberboden in Gehalten vor, welche für pflanzliche und tierische Mikroorganismen in Waldböden unkritisch sind. Der Cr-Gehalt im AB-Horizont liegt im Grenzbereich zur Toxizität für Mikroorganismen.

Schwermetallmobilität

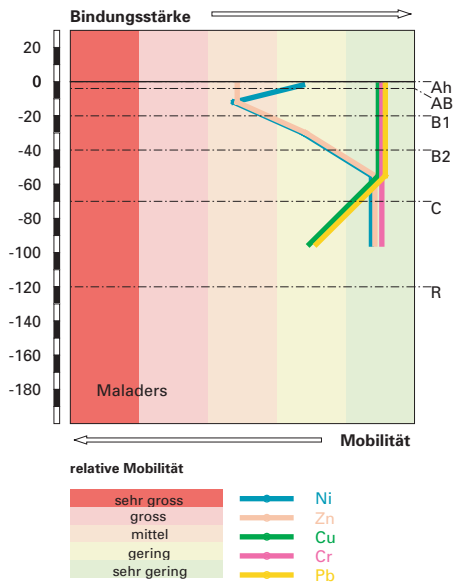


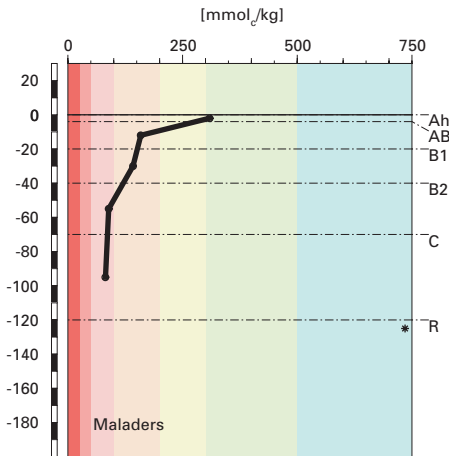
Abb. A19.18 Mobilität der Schwermetalle

A19.6 Themenbereich «Nährstoffe»

A19.6.1 Nährstoffverfügbarkeit im Oberboden

Obwohl dieser Fichten-Tannenwald eine schwer abbaubare Nadelstreu liefert, hat sich eine Humusform vom Typ Mull gebildet, die auf eine optimale Nährstoffverfügbarkeit schliessen lässt. Die Krümelstruktur, die im ganzen Oberboden vorhanden ist, entstand durch die Wirkung einer regen Bodenfauna und garantiert eine gute Durchmischung der organischen Substanz mit der mineralischen Feinerde. Das mässig weite C/N-Verhältnis von 23 im Ah-Horizont zeigt allerdings an, dass durch eine niedrige Mineralisierungsrate der organischen Substanz die Nährstoffverfügbarkeit etwas gehemmt ist. Das ebenfalls mässig weite C/P-Verhältnis von 513 deutet in dieselbe Richtung. Diese beiden bodenchemischen Parameter stehen etwas in Widerspruch zur morphologischen Humusansprache. Es ist zu vermuten, dass unter den nur mässig bis schwach sauren pH-Bedingungen die Regenwürmer eine Moderbildung verhindern.

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)

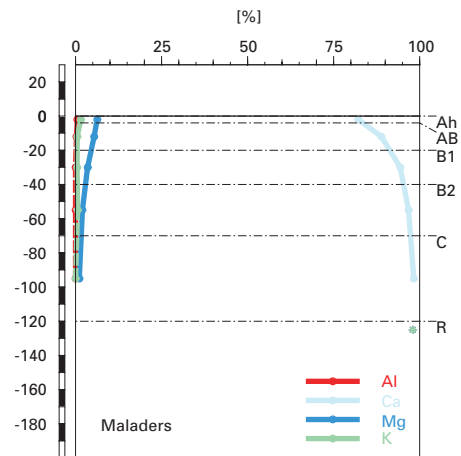


Abb. A19.19 (links) Kationenaustauschkapazität

Abb. A19.20 (rechts) Belegung des Kationenaustauschers

A19.6.2

Nährstoffgehalte

Die Kationenaustauschkapazität folgt im Tiefenverlauf weitgehend der Tiefenverteilung der organischen Substanz. Sie ist im Ah-Horizont sehr hoch (Abb. A19.19). Bereits im AB-Horizont ist sie nur noch als mittel zu bewerten. Im Tiefenverlauf nimmt sie weiter ab und im BC-Horizont ist sie nur noch gering. Die Austauscherplätze sind im ganzen Profil überwiegend mit Nährstoffkationen, insbesondere mit Kalzium belegt (Abb. A19.20). Der Anteil von austauschbarem Magnesium ist vergleichsweise hoch. Im Tiefenverlauf nimmt es von rund 6.5% auf 0.1% ab. Der Anteil von austauschbarem Kalium ist in allen Horizonten sehr klein. Austauschbares Aluminium ist nur bis in 20 cm Tiefe in Spuren nachweisbar. Die Austauscherbelegung steht im Einklang mit den wirksamen Puffersystemen. Der durchwegs hohe Kalziumanteil am Kationenaustauscher ist durch das karbonathaltige Ausgangsgestein vorgegeben und weil sich der Boden bis zum B2-Horizont in den Säureklassen 2 und 3 befindet, in denen die Säure-

renpufferung durch Silikatverwitterung sowie durch Protonierung variabler Ladungen erfolgt, werden die Nährstoffe nirgends durch Aluminium von ihren Austauscherplätzen verdrängt.

A19.6.3 Nährstoffvorräte

Den [Abb.A19.21–A19.23](#) ist zu entnehmen, dass im Tiefenverlauf der Kalziumvorrat sehr rasch zunimmt, eine Zunahme von Magnesium und Kalium dagegen nur langsam erfolgt. Bis zur Referenztiefe von 60 cm werden die Nährstoffvorräte wie folgt bewertet:

Ca sehr hoch
Mg mittel
K sehr gering

Der Boden kann allerdings bis zum anstehenden Fels in 120 cm Tiefe durchwurzelt werden, wie dies bei der Profilanlage auch festgestellt wurde. Dennoch ändert dies an der Beurteilung der Nährstoffvorräte nichts, da der Unterboden sehr skelettreich ist und die Feinerde nur noch eine geringe Kationenaustauschkapazität besitzt. Das Risiko für Trockenstress wird an

Kalzium-Vorrat

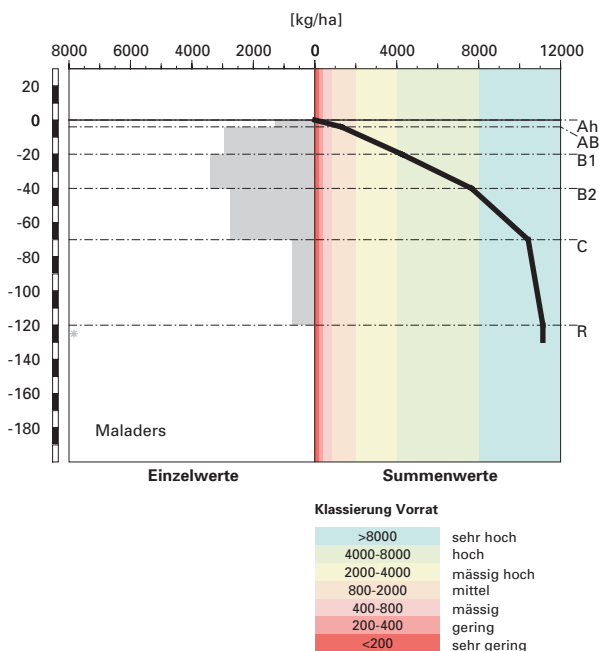


Abb. A19.21 Vorrat an Kalzium

Magnesium-Vorrat

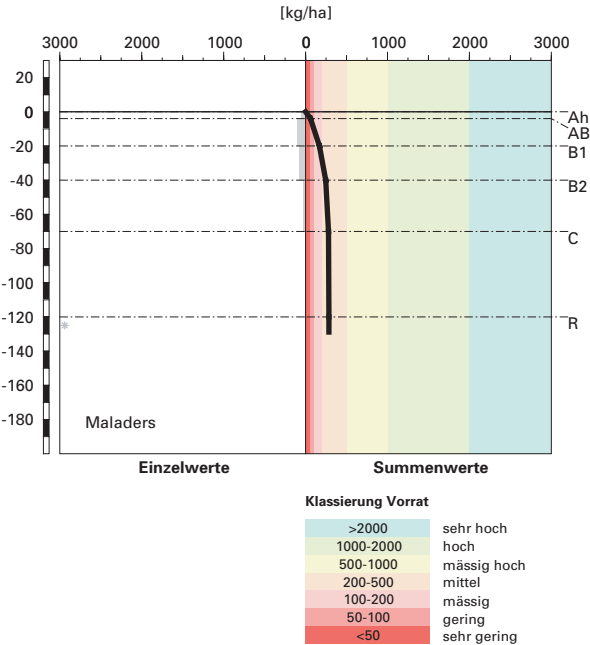


Abb. A19.22 Vorrat an Magnesium

Kalium-Vorrat

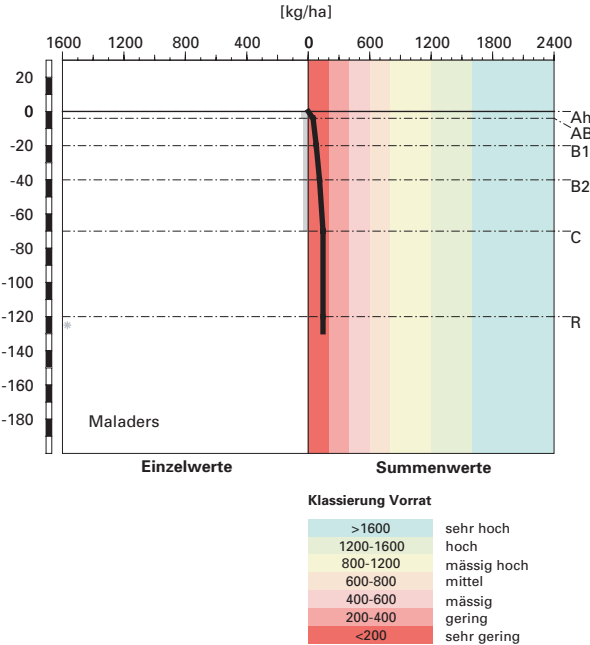


Abb. A19.23 Vorrat an Kalium

diesem Standort als mässig beurteilt, so dass damit zu rechnen ist, dass die Nutzung dieser Nährstoffvorräte durch die Pflanzen temporär etwas eingeschränkt ist.

A19.7 Themenbereich «Waldbaulich relevante Bodenkennwerte und Baumartenwahl»

A19.7.1 Steckbrief für die Waldbehandlung

Der Steckbrief (Tab. A19.5) orientiert über waldbaulich relevante Standortfaktoren und Bodenkennwerte.

A19.7.2 Baumartenwahl

Naturnähe von Bestand und Oberboden

Der Bestand ist ein nahezu reiner Fichtenwald mit einzelnen beigemischten Tannen. Im Naturwald wären neben der Fichte wahrscheinlich mehr Tannen und auch etwas Laubholz vertreten. Nach Ott et al. (1997) trifft man an diesem Standort (EK Nr. 51) häufig Moder an. Demnach ist die vorhandene Humusform Mull nicht standorttypisch.

Baumartenwahl gemäss standortkundlichen Grundlagenwerken

Gemäss BUWAL (2005) sind an diesem Tannen-Fichten-Standort (Nr. 51) folgende Baumarten für die Waldverjüngung geeignet: Tanne, Fichte, Bergahorn, Esche und Vogelbeere. Diese relativ kleine Auswahl ist vor allem durch das rauhe 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 kann das Kriterium der biologischen Entwässerung des Bodens bei der Baumartenwahl vernachlässigt werden.

■ Trockenstress-Risiko für die Bäume

Das Risiko für Trockenstress ist aufgrund des relativ kleinen Wasserspeichervermögens des Bodens und aus klimatischen Gründen mässig.

Tab. A19.5 Steckbrief für die Waldbehandlung (Maladers)**Standortangaben**

Relief	Höhe	1445 m
	Exposition	S
	Neigung	60%
Klima	Jahresniederschlag	1025 mm
	Jahrestemperatur	5.9°C

Ausgangsgestein Bündnerschiefer

Baumbestand	Struktur	mehrheitlich einschichtig
	Schlussgrad	70%
	Baumarten (Deckung)	65 % Fichte, 3 % Weisstanne
	Oberhöhe	30 m

Waldgesellschaft nach E&K 1972 Nr. 51: Labkraut-Fichten-Tannenwald
nach BUWAL 2005 Typischer Labkraut-Tannen-Fichtenwald

Bodenkennwerte

Bodensystematik	Bodentyp	Braunerde
	Humusform	Mull

Wasser- und Lufthaushalt	Durchlüftung	Im Boden sind keine Vernässungsmerkmale erkennbar, was zeigt, dass der Boden stets gut durchlüftet ist.
	Durchwurzelbarkeit	Da in 120 cm Tiefe Bündnerschiefer ansteht, ist der Wurzelraum für alle Baumarten begrenzt. Er wird mit 120 cm Mächtigkeit aber dennoch als sehr tiefgründig klassiert. Wie tief die Bäume im Fels- untergrund vorhandene Spalten durchwurzeln, wissen wir nicht.
	pflanzenverfügbares Wasser	Das Risiko für Trockenstress bewerten wir unter den gegebenen klimatischen Verhältnissen als mässig.

Säurezustand	pH-Wert/Kalkgrenze	Der Boden ist bis 70 cm Tiefe mässig bis schwach sauer, tiefer im Profil alkalisch. Die Kalkgrenze liegt tiefer als 120 cm, unterhalb der Profilsohle.
	Aluminium-Toxizität	Es besteht kein Risiko für Al-Toxizität.

Nährstoffe	Verfügbarkeit im Oberboden	Die Humusform Mull weist auf eine hohe Mineralisierungsrate hin, was im Widerspruch zum mässig weiten C/N-Verhältnis im Ah-Horizont steht. Auch das mässig weite C/P-Verhältnis im Ah-Horizont lässt auf eine gehemmte biologische Aktivität schliessen. Sie wird gesamthaft als mittel bewertet.
	Nährstoffvorräte (Ca, Mg, K)	Die Vorräte der Nährstoffkationen sind unausgewogen. Der Ca-Vorrat ist sehr hoch, der Mg-Vorrat mittel und der K-Vorrat sehr gering.

Verankerung Da der Boden sehr tiefgründig ist, wird die Verankerung des Baumbestandes als gut bewertet.

Befahrbarkeit Der Boden reagiert in nassem Zustand empfindlich auf Befahren mit schweren Maschinen, weil er bis 40 cm Tiefe weniger als 20% Skelett enthält und zudem recht schluff- und tonreich ist. Bei einer Hangneigung von 60% ist der Waldbestand allerdings nicht befahrbar.

Es sollten nur Baumarten verjüngt werden, die Trockenheit relativ gut ertragen.

■ Säurezustand und Aluminium-Toxizität

Der Oberboden ist mässig sauer und es besteht kein Risiko für Al-Toxizität. Eine Verbesserung des Säurezustandes ist in diesem Boden erwünscht, da die Empfindlichkeit für eine weitere pH-Abnahme gross ist. Da die Humusform ein Mull ist, besteht jedoch keine Möglichkeit, den Säurezustand mit der Baumartenwahl wesentlich zu verbessern. Eine Beimischung von Laubhölzern würde die Mineralisierung jedoch fördern.

■ Nährstoffangebot im Boden

An diesem Standort ist untypischerweise ein Mull vorhanden. Normalerweise würde man einen Moder antreffen (Ott et al. 1997). Aufgrund der offenbar untypisch hohen biologischen Aktivität drängt sich keine Verbesserung der Nährstoffumsetzung im Oberboden auf. Allenfalls liesse sich die biologische Aktivität durch eine besser abbaubare Streumischung leicht erhöhen. Da der aktuelle Bestand fast nur aus Fichten besteht, ist ein Verbesserungspotential durch Einbringen von Tanne und Laubholz gegeben.

Viele Baumarten haben bezüglich Nährstoffversorgung des Bodens eine weite ökologische Amplitude. Das Nährstoffangebot ist daher an diesem Standort für die meisten Baumarten ausreichend. Obwohl der Boden mässig versauert ist, schätzen wir das Nährstoffangebot selbst für die nährstoffbedürftigen Edellaubhölzer als ausreichend ein, denn die Vorräte an Kalzium und Magnesium sind relativ gross.

A19.7.3 **Baumartenempfehlung**

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. A19.6, BUWAL 2005) ist aus bodenkundlicher Sicht vor allem aufgrund des Risikos für Trockenstress, des Säurezustandes und des Nährstoffangebotes im Boden zu hinterfragen.

Mit einem erhöhten Anteil von Tanne, Vogelbeere und Bergahorn wird die biologische Aktivität im Oberboden verbessert, so dass mehr Nährstoff-

Tab. A19.6 Baumartenempfehlung für den Hauptbestand

Referenz	Baumarten
Grundlagenwerke (Einheit 51; BUWAL 2005)	Tanne, Fichte, Bergahorn, Esche, Vogelbeere
Bodenkundliche Kriterien	Tanne, Fichte, Bergahorn, Vogelbeere, (Esche)

fe mineralisiert werden. Die standorttypische Humusform Mull bleibt dabei erhalten. Da die Vorräte von Ca und Mg relativ gross sind, gehen wir trotz der mässigen Bodenversauerung und trotz dem mässigen Trockenstress-Risiko davon aus, dass diese Nährstoffkationen für den Bergahorn in ausreichendem Masse verfügbar sind. Für die Esche dürfte das Klima an diesem auf 1445 m.ü.M. gelegenen Standort zu rauh sein.

A19.8 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.
