

A17 Bodenprofil Bonaduz

A17.1 Themenbereich «Bodenbildungsfaktoren und Profilmorphologie»

A17.1.1 Zusammenfassende Angaben zum Profil und zu den Bodenbildungsfaktoren

Das Bodenprofil ist in [Abb.A17.1](#) dargestellt. Einen Eindruck vom Bestand vermittelt [Abb.A17.2](#). [Tab.A17.1](#) fasst wichtige Angaben zum Boden und Profilort Bonaduz zusammen und [Tab.A17.2](#) orientiert über die Bodenbildungsfaktoren.

A17.1.2 Verbreitung gemäss Bodeneignungskarte der Schweiz

Das Profil gehört zur Kartierungseinheit U5 (alpine Kalk-Berglandschaften, steile Südhänge, Hangneigung > 35%). 543 Stichproben des Landesforstinventars gehören dieser Kartierungseinheit an. Das Profil repräsentiert damit 4.6% der mit dem LFI insgesamt erfassten 11'863 Stichproben.

A17.1.3 Besonderheiten am Profilort

Da der Profilort im Einflussbereich des Flimser Bergsturzes liegt, hat dieses Ereignis die Ablagerung des Ausgangsgesteins beeinflusst.

A17.1.4 Profilmorphologie und Klassierung

Die im Profil angesprochenen morphologischen Bodenmerkmale sind in [Tab.A17.3](#) zusammen mit einer Profilskizze dargestellt.

Der Boden ist von einer Streuschicht (L) bedeckt, die von Nadelbäumen, von Rotbuchen und von krautigen Pflanzen stammt. Die Streu wird innerhalb eines Jahres weitgehend zersetzt, so dass die organische Auflage lediglich aus einer Streuschicht besteht. Mit der Horizontfolge L-Ah1 wird die Humusform als Mull klassiert.



Abb. A17.1 (links) Bodenprofil Bonaduz

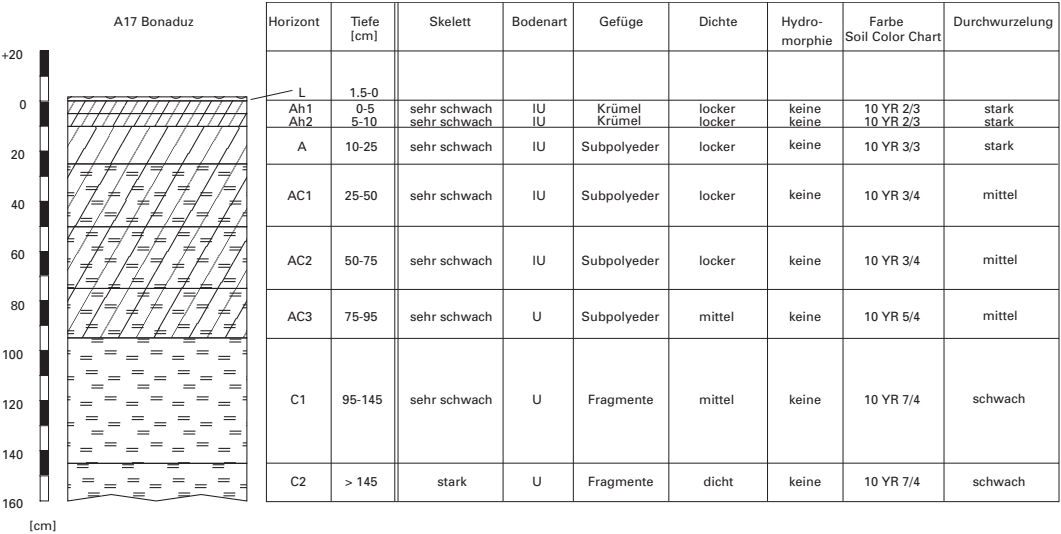
Abb. A17.2 (rechts) Bestand am Profilort Bonaduz

| Tab. A17.1 Zusammenfassende Angaben zum Profil Bonaduz | |
|---|---|
| Lokalname | Crestas (Kanton Graubünden, Gemeinde Bonaduz) |
| Lage | Landeskarte 1:25 000 Blatt 1195, Reichenau Koordinaten 746000 / 185000 |
| Waldgesellschaft (Ellenberg und Klötzli 1972) | Nr. 17: Eiben-Buchenwald (<i>Taxo-Fagetum</i>) |
| Horizontfolge | L-Ah1-Ah2-A-AC1-AC2-AC3-C1-C2 |
| Humusform | Mull |
| Bodentyp | Pararendzina |
| Bodentyp nach FAO (1988) | Calcaric Regosol |

| Tab. A17.2 Bodenbildungsfaktoren am Profilort Bonaduz | | | |
|--|---------------------------------------|--|--|
| Relief | Höhe ü. M. | 970 m | |
| | Exposition | SSW | |
| | Neigung | 82 % | |
| | Geländeform | Mittelhang | |
| Ausgangsgestein | Tektonik/Geologie | Penninikum; Mesozoische Sedimente (Bergsturzmaterial, Bündnerschiefer) | |
| | Lithofazies (nach Tuchschnid 1995) | Nr.31: Wildbachablagerungen und Gehängeschutt physikalische Verwitterbarkeit Gestein: mittel chemische Verwitterbarkeit Gestein: mittel Tongehalt Gestein: sehr niedrig–niedrig | |
| | | | |
| Klima | T/N Jahresmittel | 6.8°C/1123 mm | |
| | T/N Januarmittel | –2.1°C/72 mm | |
| | T/N Julimittel | 16.6°C/117 mm | |
| | Tage mit Schneedecke | 104 | |
| | Wärmegliederung | kühl | |
| | Länge der Vegetationsperiode | 180–190 Tage | |
| Pflanzen | Schicht | Deckung | häufigste Arten |
| | Baumschicht (14 m Höhe) | 60 % | 25 % Fichte (<i>Picea abies</i>) 25 % Wald-Föhre (<i>Pinus sylvestris</i>) 10 % Rotbuche (<i>Fagus sylvatica</i>) |
| | Strauchschicht | 5 % | – |
| | Krautschicht | 60 % | Weisse Segge (<i>Carex alba</i>) Fieder-Zwenke (<i>Brachypodium pinnatum</i>) Adlerfarn (<i>Pteridium aquilinum</i>) |
| | Mooschicht | 5 % | – |
| | | | |

Tab. A17.3

Profilskizze und Morphologie des Bodenprofils Bonaduz
 Bodenart: IU Schluff-Lehm, U Schluff



Morphologisch können im Profil unter der Streuschicht sechs Horizonte unterschieden werden. Die Tiefenstufe 0–10 cm und 25–75 cm wurden je in zwei verschiedenen Tiefen beprobt (Ah1 und Ah2 bzw. AC1 und AC2), so dass im Mineralboden insgesamt acht Horizonte beprobt wurden. In 0–10 cm Tiefe ist die Feinerde bräunlich-schwarz gefärbt (Abb. A17.1). Der Bereich von 10–75 cm Tiefe ist dunkelbraun und das Ausgangsgestein matt gelb-orange. Der Boden ist bis 145 cm Tiefe sehr schwach, tiefer im Profil stark skeletthaltig. Die Bodenart ist bis 75 cm Tiefe ein Schluff-Lehm, darunter ein Schluff. Das Gefüge ist bis 10 cm Tiefe krümelig. Zwischen 10 und 95 cm Tiefe kommt eine Subpolyeder- und weiter unten eine Fragmentstruktur vor. Der Boden ist bis 75 cm Tiefe locker, zwischen 75 bis 145 cm Tiefe mittel und darunter dicht gelagert. Im ganzen Profil sind keine hydro-morphen Merkmale zu erkennen.

Aufgrund der morphologischen Merkmale des Profils werden die Horizonte mit L-Ah1-Ah2-A-AC1-AC2-AC3-C1-C2 gekennzeichnet und der Boden als Pararendzina klassiert.

Ergänzende Bodenmerkmale

Der Boden ist im ganzen Profil karbonathaltig. Die Durchwurzelung ist bis 25 cm Tiefe stark, zwischen 25 und 95 cm mittel und im angewitterten Ausgangsgestein schwach. Im Boden sind keine Grenzen für das Wurzelwachstum sichtbar. Unterhalb einer Tiefe von 145 cm ist Kalkflaum zu beobachten.

A17.2 Themenbereich «Physikalische Bodenkennwerte»

A17.2.1 Beschrieb einiger physikalischer Bodenkennwerte

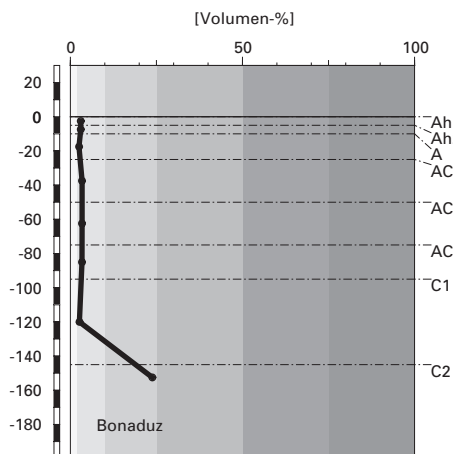
Skelettgehalt

Bedenkt man, dass dieses Profil in der Region Alpen liegt, ist sein Skelettgehalt als ausserordentlich gering zu bewerten. Der Boden ist bis 145 cm Tiefe schwach skeletthaltig (Abb. A17.3). Der C2-Horizont, welcher die Profilschle bildet, enthält eine mittlere Skelettmenge.

Bodenart

Die Feinerde ist überwiegend schluffig (Abb. A17.4). Es fällt auf, dass sich die Horizonte in ihrer Korngrössenzusammensetzung stark unterscheiden. Dies ist möglicherweise auf die Ablagerung des Ausgangsgesteins als Bergsturzmaterial zurückzuführen, bei der das Substrat durch Bewegungs-

Skelettgehalt



Klassierung Skelettgehalt

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

Bodenart

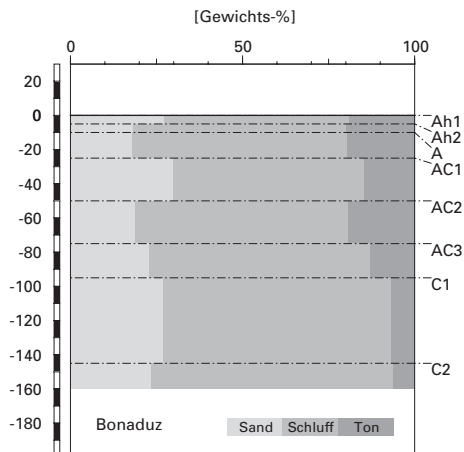


Abb. A17.3 (links) Skelettgehalt

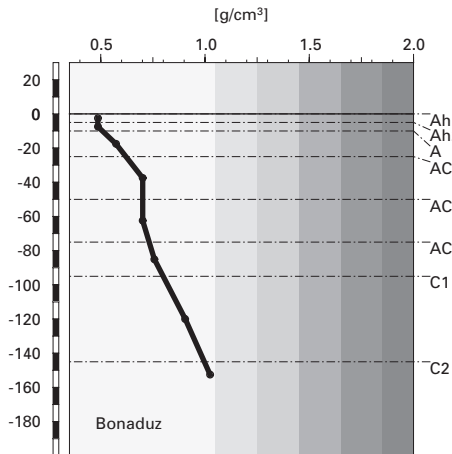
Abb. A17.4 (rechts) Bodenart

prozesse sortiert wurde, was zu einem geschichteten Aufbau des Bodens geführt hat. Gemessen am Tonanteil handelt es sich bis 90 cm Tiefe um mittelschweren, in den C-Horizonten um leichten Boden. Die Analyse der Bodenart mit Labor- und Feldmethode ergab vergleichbare Resultate.

Dichte der Feinerde

Die Feinerde-Dichte nimmt zwar mit der Tiefe zu, wird aber dennoch in allen Horizonten als äusserst gering klassiert (**Abb. A17.5**). Sie ist in den Ah-Horizonten mit 0.49 g/cm^3 minimal und im C2-Horizont mit 1.02 g/cm^3 am grössten. Bei der Bodenansprache im Feld wurde die Dichte im Unterboden überschätzt (**Tab. A17.3**).

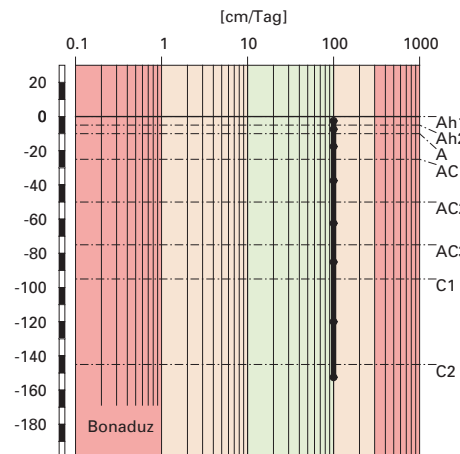
Feinerde-Dichte



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. A17.5 (links) Dichte der Feinerde

Abb. A17.6 (rechts) Wasserleitfähigkeit im gesättigten Boden

Wasserleitfähigkeit im gesättigten Boden

Der Boden ist aufgrund seiner äusserst geringen Dichte und in den C-Horizonten auch aufgrund des geringen Tonanteils hoch durchlässig (Abb. A17.6).

Pflanzenverfügbares Wasser

Die Wasserspeicherkapazität des Bodens bis 120 cm Tiefe wird mit 292 l/m² als äusserst hoch klassiert (Abb. A17.7), was vor allem auf den geringen Skelettanteil zurückzuführen ist.

pflanzenverfügbares Wasser

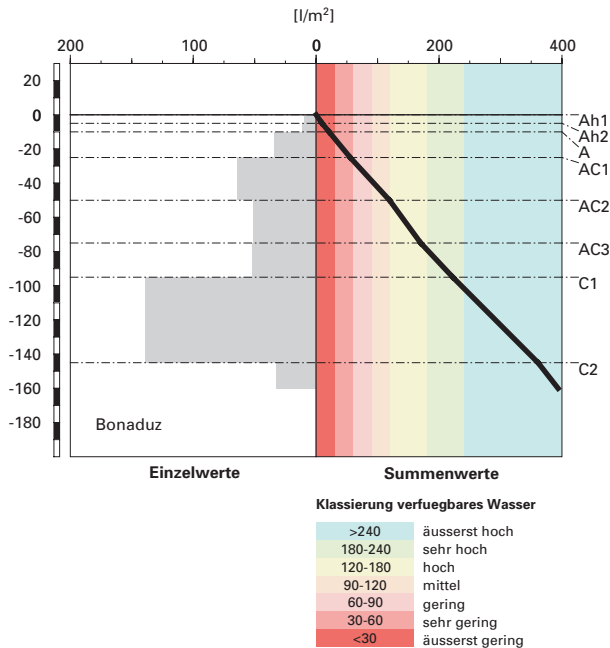


Abb. A17.7 Pflanzenverfügbares Wasser

A17.2.2

Bodenkundliche und ökologische Interpretationen

Wasser- und Lufthaushalt des Bodens

In dieser Pararendzina kommen aufgrund der hohen Durchlässigkeit (Abb. A17.6) keine Vernässungsmerkmale vor. Phasen mit Wassersättigung und ungenügender Durchlüftung treten demnach höchstens für sehr kurze Zeit auf.

Durchwurzelbarkeit des Bodens

Der Boden kann von allen Baumarten mindestens profilumfassend durchwurzelt werden, da die Dichtewerte überall weit unter dem kritischen Wert von 1.4 g/cm^3 liegen und die Durchlüftung in allen Horizonten stets ausreichend ist. Der Wurzelraum ist nicht eingeschränkt und mit $>120 \text{ cm}$ Mächtigkeit sehr tiefgründig. Der Boden wird vom aktuellen Mischbestand aus Fichte, Waldföhre und Buche gut genutzt, denn Wurzeln sind bis zur

Profilsohle (160 cm) vorhanden und dringen wahrscheinlich noch tiefer in den Unterboden ein.

Wasserversorgung des Baumbestandes

Für die Referenztiefe von 120 cm ergeben unsere Berechnungen, dass der Bestand in Trockenperioden ohne bedeutende Niederschläge nach rund 35 Tagen an Wassermangel zu leiden beginnt. Ab 145 cm Tiefe ist Kalkflaum vorhanden. Böden, in denen Kalkflaum oberhalb von rund 100 cm vorkommt, werden im Sommer bei Niederschlagsereignissen oft nur oberflächlich befeuchtet. Der Unterboden bleibt trocken und kann nur begrenzt als Wasserspeicher wirken. Im Profil Bonaduz kommt der Kalkflaum so tief im Boden vor (ab 145 cm), dass sich daraus keine nachteiligen Auswirkungen auf die Verfügbarkeit des Bodenwassers ableiten lassen. Da der speicherstarke Boden sehr tiefgründig ist und zudem ein recht günstiges Klima herrscht, wird das Risiko für Trockenstress an diesem Buchenstandort (EK17) als klein beurteilt. In lang andauernden Trockenperioden leiden vor allem die Buchen und die Fichten, weniger die Waldföhren unter Wassermangel.

Bodenbefahrbarkeit

Dieser schluffreiche Boden reagiert in nassem Zustand sehr empfindlich auf Befahren mit schweren Maschinen, weil er bis in grosse Tiefen kaum Skelett enthält. Mit einer Hangneigung von 82 % ist der Waldbestand allerdings nicht befahrbar.

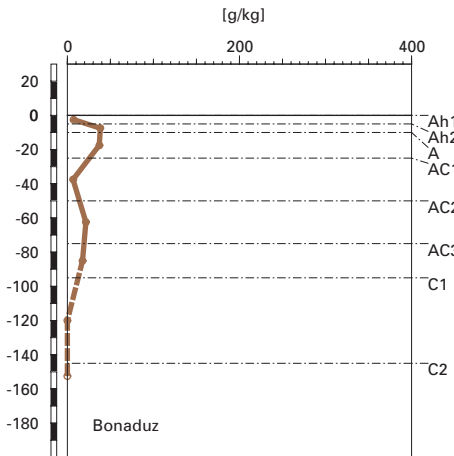
A17.3 Themenbereich «Bodenhauptbestandteile»

A17.3.1 Charakterisierung der Bodenhauptbestandteile

Organische Substanz

Das Bodenprofil bei Bonaduz befindet sich in einem Mischwald, der zu je 40 % aus Fichte und Wald-Föhre und zu rund 20 % aus Rotbuche besteht. Die Baumkronen überschirmen den Boden zu 60 %. Damit fällt viel Licht auf den Boden, so dass sich eine Krautschicht mit einem Deckungsgrad von 60 % entwickeln konnte. Die Pflanzen in der Krautschicht sind zur Hauptsache weisse Segge, Fieder-Zwenke und Adlerfarn. Die Streu setzt sich aus Überresten der Baum- und Krautschicht zusammen und ist mässig bis schlecht abbaubar.

organischer Kohlenstoff



Kohlenstoff-Vorrat

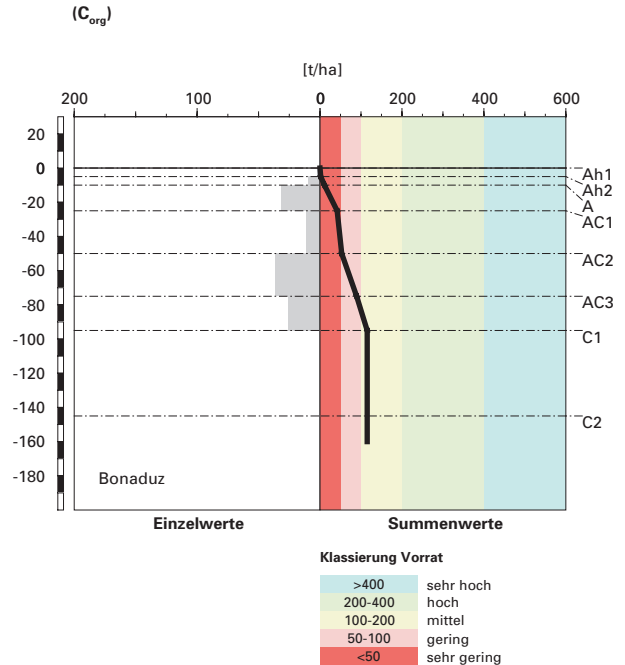


Abb. A17.8 (links) Gehalt an organischem Kohlenstoff

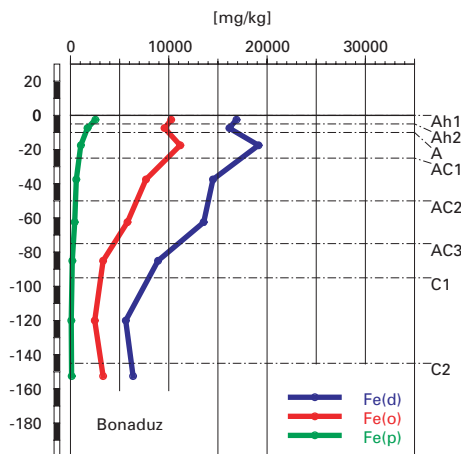
Abb. A17.9 (rechts) Vorrat an organischem Kohlenstoff

Der Gehalt an organischem Kohlenstoff (C_{org}) variiert im Boden relativ stark (Abb. A17.8). Auffallend ist der mächtige, bis 95 cm Tiefe reichende Oberboden. Allerdings korrespondiert die Farbe der Feinerde nicht mit dem C_{org} -Gehalt. Im Ah1- und im AC1-Horizont ist er mit 0.7% minimal und im Ah2- sowie im A-Horizont mit rund 4% maximal. Aufgrund des bräunlich-schwarzen Ah1- und Ah2-Horizontes würde man hier grössere Gehalte als in den tiefer gelegenen Horizonten erwarten. Auffallend ist zudem der erneute Anstieg des C_{org} -Gehaltes innerhalb der drei AC-Horizonte. In den C-Horizonten konnte kein C_{org} nachgewiesen werden. Der Vorrat an organischem Kohlenstoff beträgt im gesamten Mineralboden 115 t/ha (Abb. A17.9).

Tonverteilung sowie Verteilung von Aluminium- und Eisenoxiden

Der Tongehalt nimmt mit der Tiefe ab (Abb. A17.4). Er beträgt im Oberboden, mit Ausnahme des AC1- und AC3-Horizontes zwischen 19 und 20%.

Eisen-Oxide (Gehalte)



Aluminium-Oxide (Gehalte)

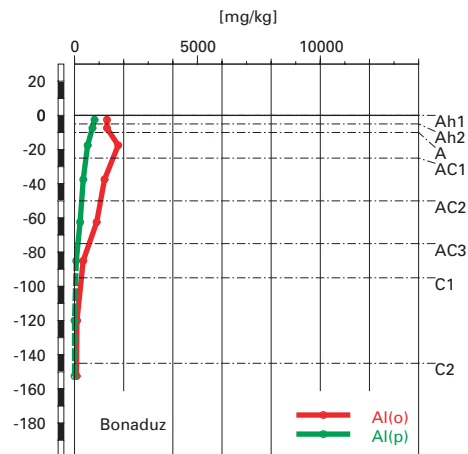


Abb. A17.10 (links) Gehalte an Dithionit- (Fe_d), Oxalat- (Fe_o) und Pyrophosphat- (Fe_p) extrahierbarem Eisen

Abb. A17.11 (rechts) Gehalte an Oxalat- (Al_o) und Pyrophosphat- (Al_p) extrahierbarem Aluminium

Eisen- und Aluminiumoxide (Verhältnisse)

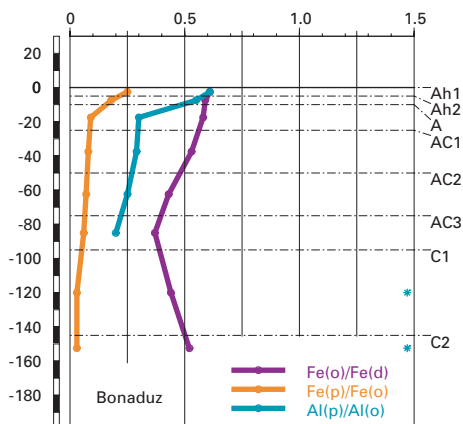


Abb. A17.12 Verhältnisse der Fe- und Al-Oxide

Im AC1-Horizont beträgt er rund 15 % und im AC3-Horizont 13 %. Die C-Horizonte enthalten zwischen 6 und 7 % Ton.

Das Dithionit- und das Oxalat-extrahierbare Eisen (Fe_d bzw. Fe_o) haben eine fast gleichläufige Tiefenverteilung ihrer Gehalte, wobei die Fe_d -Gehalte vor allem im Oberboden grösser sind als jene von Fe_o (Abb. A17.10). Vom Ah1-Horizont erfolgt zuerst eine geringe Abnahme bis in den Ah2-Horizont. Das Maximum befindet sich im A-Horizont, von wo der Gehalt allmählich bis zum Minimum im C1-Horizont abnimmt. Das Oxalat-extrahierbare Aluminium (Al_o) zeigt eine vergleichbare Tiefenverteilung mit einer Zunahme des Gehaltes bis zum Maximum im A-Horizont und einer kontinuierlichen Abnahme bis zum Minimum im C2-Horizont (Abb. A17.11). Die Pyrophosphat-extrahierbaren Aluminium- und Eisengehalte (Al_p bzw. Fe_p) sind dagegen im Ah1-Horizont maximal und nehmen bis zum Minimum im Unterboden ab (Abb. A17.10 und A17.11).

Das Fe_o/Fe_d -Verhältnis nimmt vom Maximum von 0.6 im Ah1-Horizont bis zum Minimum von rund 0.4 im AC3-Horizont ab und danach bis zum C2-Horizont wieder auf rund 0.5 zu (Abb. A17.12). Die Al_p/Al_o - und Fe_p/Fe_o -Verhältnisse verlaufen mehr oder weniger parallel (Abb. A17.12). Sie nehmen vom Maximum im Ah1-Horizont bis in den A-Horizont relativ stark, darunter etwas schwächer bis auf das Minimum im AC3- bzw. C2-Horizont ab. Das Al_p/Al_o -Verhältnis wird im Unterboden nicht berechnet, da Al_p unterhalb der Bestimmungsgrenze von 40 mg/kg liegt.

A17.3.2 Bodenkundliche Interpretation

Die Streu am Profilort bei Bonaduz wird trotz der lediglich mässigen Abbaubarkeit innerhalb eines Jahres vollständig zersetzt und als Humusform hat sich ein Mull gebildet. Dies liegt vor allem am Klima. Im ziemlich feuchten und kühlen Klima am Profilort bei Bonaduz mit durchschnittlichen jährlichen Niederschlägen von 1123 mm und einer Jahresdurchschnittstemperatur von 6.8°C besteht ein kleines Risiko für Trockenstress, so dass während der meisten Zeit genügend Feuchtigkeit und, mit einer durchschnittlichen Julitemperatur von 16.6°C am SSW-exponierten Standort, auch genügend Wärme für eine hohe biologische Aktivität vorhanden ist. Der pH-Wert liegt im ganzen Profil im alkalischen Bereich, was sich ebenfalls positiv auf die biologische Aktivität auswirkt. Die Feinerde hat als Folge davon in den obersten 10 cm eine Krümelstruktur. Das C/N- und C/P-Verhältnis im Ah1-Horizont wird aufgrund eines unrealistisch geringen C_{org} -Gehaltes nicht weiter diskutiert. Im Ah2-Horizont wird das C/N-Verhältnis mit rund 14 als mässig eng klassiert und die Mineralisierungsrate der organischen Substanz als hoch eingeschätzt.

Im ganzen Oberboden, welcher 95 cm mächtig ist, konnten Spuren von Wurm-tätigkeit beobachtet werden. Die Regenwürmer sorgen für eine innige Durchmischung von organischer Substanz und Mineralerde. Die Humusstoffe werden so durch die Bildung von Ton-Humus-Komplexen vor weiterer Mineralisierung geschützt. Trotz der grossen biologischen Aktivität konnte sich auf diese Weise ein im gesamtschweizerischen Vergleich mittlerer Vorrat von 115 t/ha bilden (Abb. A17.9).

Es ist eher unwahrscheinlich, dass die Zunahme des C_{org} -Gehaltes in den obersten 10 cm des Mineralbodens und das sekundäre Maximum im AC2-Horizont auf Verlagerungsprozesse zurückzuführen sind. Dazu fehlen die entsprechenden bodenchemischen und -physikalischen Voraussetzungen. Vermutlich ist die Variation im C_{org} -Gehalt ein Artefakt der Messung des totalen bzw. anorganischen Kohlenstoffes (C_{tot} bzw. C_{anorg}), da C_{org} als Differenz zwischen totalem und anorganischem Kohlenstoffgehalt berechnet wird. Sowohl C_{tot} als auch C_{anorg} zeigen keine kontinuierliche Tiefenverteilung. Normalerweise nimmt in karbonathaltigen Böden C_{tot} mit der Tiefe kontinuierlich ab, C_{anorg} hingegen kontinuierlich zu. Im Bodenprofil bei Bonaduz wurde Kalkflaum beobachtet, was eine grosse Inhomogenität in der räumlichen Verteilung des anorganischen Kohlenstoffes verursacht. Dies kann dazu führen, dass einzelne, unabhängige Teilproben aus einem Horizont stark differierende C_{tot} - bzw. C_{anorg} -Gehalte aufweisen. Diese zufällige Variation erklärt möglicherweise die starke Variation und die nicht kontinuierliche Abnahme der C_{org} -Gehalte im Profil.

Der Tongehalt nimmt mit der Tiefe entsprechend dem zunehmend roheren Zustand des Bodens ab (Abb. A17.4). Dabei ist er in den obersten 75 cm mit einem Maximum von 20% ziemlich gross. Der geringere Gehalt im AC1-Horizont kann nicht mit Verlagerung erklärt werden, da bei den herrschenden alkalischen Verhältnissen die Tonminerale durch Kalzium geflockt sind. Es wird vielmehr eine Inhomogenität im Profilaufbau vermutet.

Auch die in den obersten 10 cm geringeren Fe_d -, Fe_o - und Al_o -Gehalte können nicht mit Verlagerung erklärt werden. Eine allfällige Verlagerung müsste bei den aktuellen pH-Werten in Form von gelösten metall-organischen Verbindungen erfolgen. Da weder Al_p noch Fe_p , welche die mit der organischen Substanz assoziierten Aluminium- und Eisenverbindungen repräsentieren, eine solche Verlagerung anzeigen, muss auch hier von einer Inhomogenität im Profilaufbau ausgegangen werden.

Die Tiefenverteilungen der Eisenverbindungen über das gesamte Bodenprofil sind charakteristisch für einen Boden mit einer intensiven Verbraunung. Der Fe_o -Gehalt nimmt in den Oberbodenhorizonten gegen die Bodenoberfläche zu, was mit der intensiven Verwitterung in Zusammenhang steht. Es ist allerdings nicht vorstellbar, dass es sich dabei um eine

echte Verbraunung, das heisst Eisenfreisetzung aus Fe(II)-haltigen Silikaten und anschliessende Bildung braun gefärbter Eisenoxide handelt, da der Karbonatgehalt der Feinerde gross ist (Tab. A149 in Blaser et al. 2005) und noch keine bedeutende Silikatverwitterung stattfindet. Vielmehr handelt es sich dabei um eine Freisetzung von lithogenen Eisenoxiden als Folge der Karbonatauflösung. Interessanterweise nimmt der Al_o -Gehalt viel weniger stark zu als der Fe_o -Gehalt. Sedimente enthalten zwar meistens mehr Aluminium als Eisen. Aluminium liegt aber vielfach in silikatischer, durch Oxalat nicht extrahierbarer Form vor, während Eisen oft als Oxid im Sediment enthalten ist, vor allem bei biogen-chemischer Sedimentation. Die mit Oxalat extrahierbaren Eisengehalte sind in diesem Boden grösser als jene von Aluminium, obwohl der effektive, durch Röntgen-Fluoreszenz bestimmte Totalgehalt von Aluminium mehr als doppelt so gross ist als jener von Eisen (Daten nicht gezeigt).

Die Pyrophosphat-extrahierbaren Aluminium- und Eisengehalte folgen den Gehalten an organischem Kohlenstoff, da dieser Extrakt das mit der organischen Substanz verbundene Aluminium bzw. Eisen repräsentiert. Das mit der Tiefe kontinuierlich abnehmende Al_p bzw. Fe_p (Abb. A17.10 und A17.11) kommt durch den kontinuierlich abnehmenden C_{org} -Gehalt zustande. Dies ist ein weiteres Indiz für die fehlerbehaftete Bestimmung des C_{org} -Gehaltes.

Aufgrund des Fe_p/Fe_o -Verhältnisses sind im Ah1-Horizont rund ein Viertel der amorphen Eisenverbindungen mit der organischen Substanz assoziiert. Dieser Anteil nimmt bis zum Minimum von rund 3% in den C-Horizonten stark ab. Ähnliches gilt für den Anteil des mit der organischen Substanz verbundenen Aluminiums. Nur ist der Anteil der Aluminium-organischen Verbindungen in allen Horizonten bedeutend grösser. Das Fe_o/Fe_d -Verhältnis ist im ganzen Boden relativ gross, was anzeigt dass die Eisenoxide zu einem grossen Anteil in amorpher Form vorliegen.

Aufgrund der morphologischen Merkmale wurde dieser Boden als Pararendzina klassiert, was durch die Interpretation der Bodenhauptbestandteile bestätigt werden kann. Die Gehalte der Aluminium- und Eisenverbindungen sind im Oberboden deutlich grösser als im Unterboden, was auf eine Verbraunung schliessen liesse. Es ist allerdings zu beachten, dass es sich bei diesem Phänomen nicht um eine echte Verbraunung im Sinne der Verwitterung von Fe(II)-haltigen Silikaten und der anschliessenden Bildung von braunen Eisenoxiden handelt. Vielmehr ist diese scheinbare Verbraunung als Rückstandsanreicherung von lithogenen Eisenoxiden nach der Auflösung von Karbonaten zu betrachten.

A17.4 Themenbereich «Säurezustand»

A17.4.1 Charakterisierung des Säurezustandes

pH-Wert

Die Feinerde ist im ganzen Profil karbonathaltig und der pH-Wert deshalb alkalisch (Abb. A17.13). Alle Horizonte befinden sich in der Säureklasse 1.

Austauschbare Kationen und Basensättigung

Der Kationenaustauscher ist im ganzen Profil praktisch vollständig mit Kalziumionen belegt (Abb. A17.14). Die übrigen Kationen sind in so geringen Mengen vorhanden, dass sie in Abb. A17.14 nicht erkennbar sind. Austauschbares Kalium ist nur im Ah1-Horizont analytisch nachweisbar (Tab. A145 in Blaser et al. 2005). Die Basensättigung beträgt im ganzen Profil 100% (Abb. A17.15).

A17.4.2 Interpretationen zum Säurezustand

Stand der Bodenversauerung

Diese Pararendzina ist sehr schwach versauert. Der ganze Boden befindet sich in der Säureklasse 1 und der pH-Wert variiert mit der Tiefe nur wenig. Eine Versauerungsfront ist nicht feststellbar und der Kationenaustauscher ist vollständig basengesättigt. Die Säurepufferung erfolgt entsprechend der Säureklasse 1 sehr wirksam durch Kalkgesteinsverwitterung.

Risiko für Boden und Pflanzen

Die Empfindlichkeit des Bodens für eine weitere pH-Abnahme ist im ganzen Profil sehr klein, da sich alle Horizonte in der gut puffernden Säureklasse 1 befinden. Eine pH-Abnahme in den schwach sauren Bereich kann erst erfolgen, wenn ein Horizont vollständig entkarbonatet ist und der Boden dort in die Säureklasse 2 gelangt. Obschon der Boden im ganzen Profil nur schwach skeletthaltig ist, dürfte es noch sehr lange dauern, bis dieser Zustand eintreten wird. Auch unter solchen Bedingungen ist aber nicht damit zu rechnen, dass die Basensättigung rasch abnehmen wird, weil in Böden mit hoch anstehender Kalkgrenze der Kationenaustauscher in der Regel mit Nährstoffkationen gesättigt bleibt.

Bezüglich des Wachstums säureempfindlicher Pflanzen besteht weder im aktuellen Zustand noch in absehbarer Zukunft ein Risiko. Das BC/AI-Verhältnis ist im ganzen Profil weit oberhalb der als kritisch erachteten Grenze von 0.2 (Tab. A145 in Blaser et al. 2005).

pH-Wert
(CaCl₂)

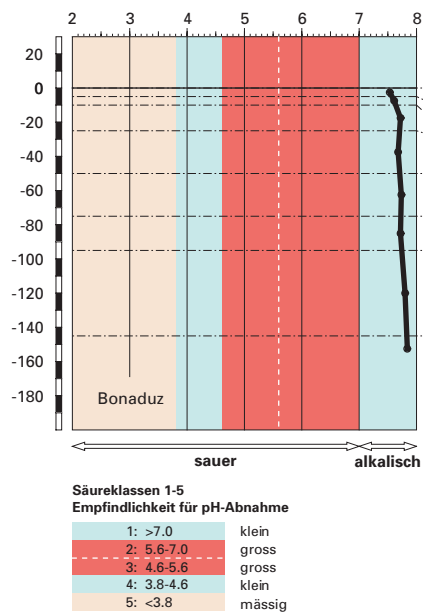


Abb. A17.13 (links) pH-Wert und Säureklassen

austauschbare Kationen

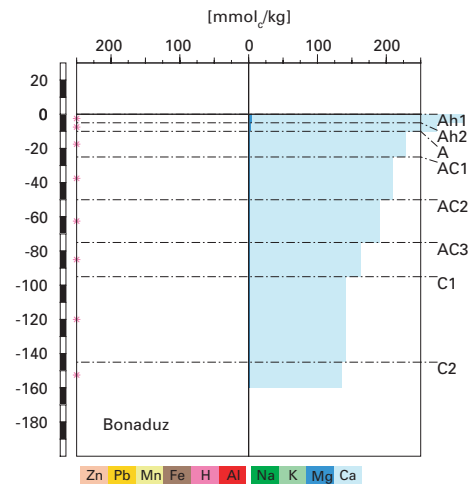


Abb. A17.14 (rechts) Belegung des Kationenaustauschers

Basensättigung

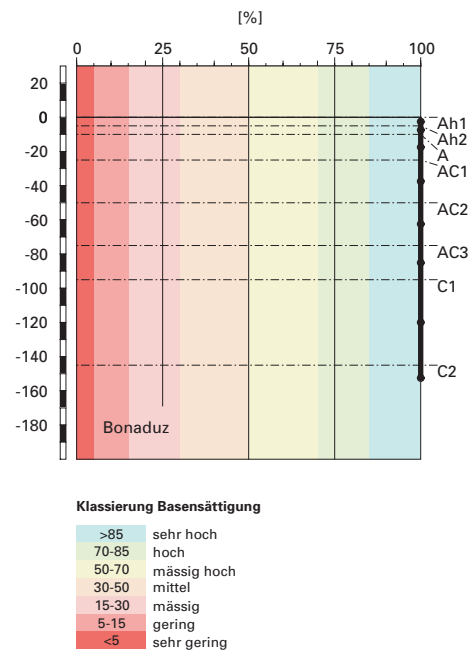


Abb. A17.15 Basensättigung

A17.5 Themenbereich «Schwermetalle»

A17.5.1 Tiefenverteilung der Schwermetalle

Tendenziell nehmen in diesem Profil die Cr-, Zn- und Pb-Gehalte mit der Bodentiefe ab (Abb. A17.16). Ausnahmen bilden die Zunahme von Cr und Zn vom Ah1- bis zum A-Horizont sowie von Zn vom C1- zum C2-Horizont. Kupfer und Pb sind praktisch im ganzen Profil unter der Bestimmungsgrenze.

A17.5.2 Wertung der Schwermetallgehalte im untersten Mineralerde-Horizont im geochemischen Vergleich

Bezogen auf das Ausgangsgestein, Gehängeschutt aus Bündnerschiefer, liegen die Gehalte aller Schwermetalle im C2-Horizont innerhalb typischer Wertebereiche. Da für Gehängeschutt (Lithofazies 31) keine geochemischen Angaben vorhanden sind, wurde die geologisch nächstverwandte Lithofazies mit geochemischen Angaben (Lithofazies 12, Kiesel- bis Sandkalksteine) für die Beurteilung beigezogen.

A17.5.3 Beurteilung der quellenunabhängigen Belastung nach VBBo

Bezogen auf die VBBo sind die Gehalte aller Schwermetalle profilumfassend sehr niedrig bis niedrig (Abb. A17.17). Die Richtwerte der VBBo werden nicht überschritten.

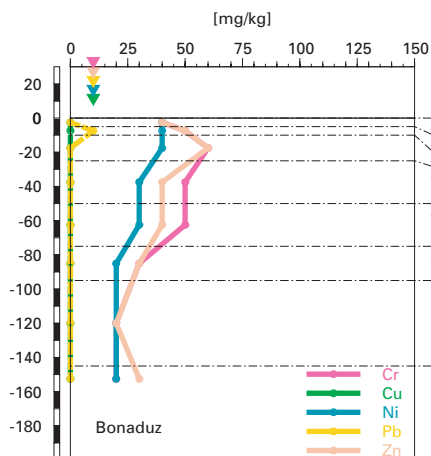
A17.5.4 Anreicherungsfaktoren

Der ganze Boden ist an Zn und etwas an Ni verarmt (Tab. A17.4). Dieses Verhalten lässt sich bei dem profilumfassend hohen pH-Wert nicht erklären. Die Zunahme der Gehalte zur Bodenoberfläche hin (Abb. A17.16) lässt sich gut mit Rückstandsanreicherung als Folge der Karbonatverwitterung erklären. Dies steht im Einklang mit höheren Zr-Gehalten im oberen Teil des Bodens (Tab. A148 in Blaser et al. 2005).

A17.5.5 Schätzung der Mobilität der Schwermetalle

Diese Pararendzina ist profilumfassend alkalisch (Abb. A17.13). Dementsprechend wird die Mobilität der meisten Schwermetalle als sehr gering bis gering eingestuft (Abb. A17.18). Bindung an feste organische Substanz

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



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

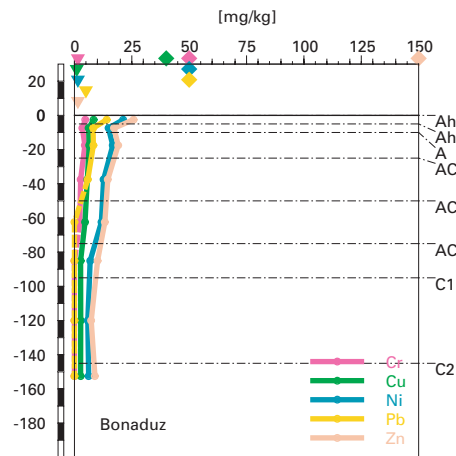


Abb. A17.16 (links) Schwermetalle: effektive Totalgehalte

Abb. A17.17 (rechts) Schwermetalle: Salpetersäure-extrahierbare Gehalte

verringert die Mobilität von Cr, Cu und Pb zusätzlich im Ah2-, A-, AC2- und AC3-Horizont. Die teilweise mittlere Einstufung der Cu-Mobilität kommt durch die hohen Karbonatgehalte zustande, welche die Bildung von Cu-Karbonat-Komplexen fördern.

Die Mobilität der meisten Schwermetalle ist in diesem Boden so gering, dass kein Risiko für eine Belastung des Grund- bzw. Hangwassers besteht. Das mobilste Schwermetall, Cu, bedeutet angesichts seiner profilumfassend sehr niedrigen Gehalte ebenfalls kein Risiko.

Tab. A17.4

Anreicherungs faktoren

| Horizont | Tiefe [cm] | Anreicherungs faktor | | | | |
|----------|---------------|----------------------|------|------|------|------|
| | | Cr | Cu | Ni | Pb | Zn |
| Ah1 | 0– 5 | 0.67 | n.b. | 0.67 | n.b. | 0.44 |
| Ah2 | 5– 10 | 0.83 | n.b. | 0.67 | n.b. | 0.56 |
| A | 10– 25 | 0.90 | n.b. | 0.60 | n.b. | 0.60 |
| AC1 | 25– 50 | 1.07 | n.b. | 0.64 | n.b. | 0.57 |
| AC2 | 50– 75 | 1.07 | n.b. | 0.64 | n.b. | 0.57 |
| AC3 | 75– 95 | 0.90 | n.b. | 0.60 | n.b. | 0.60 |
| C1 | 95–145 | 0.75 | n.b. | 0.75 | n.b. | 0.50 |
| C2 | >145 | 1.00 | n.b. | 1.00 | n.b. | 1.00 |

Schwermetallmobilität

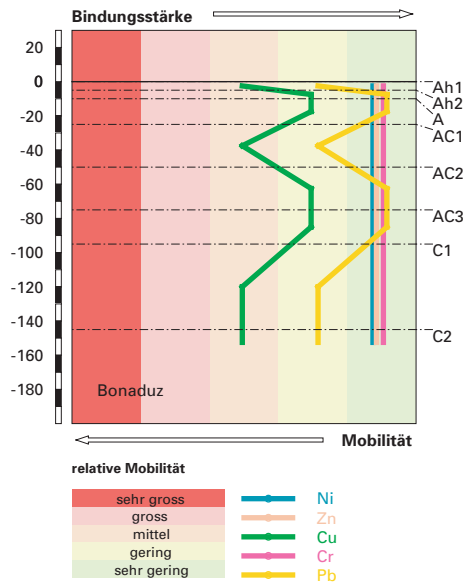


Abb. A17.18 Mobilität der Schwermetalle

A17.5.6 Schätzung der Gefährdung von Mikroorganismen

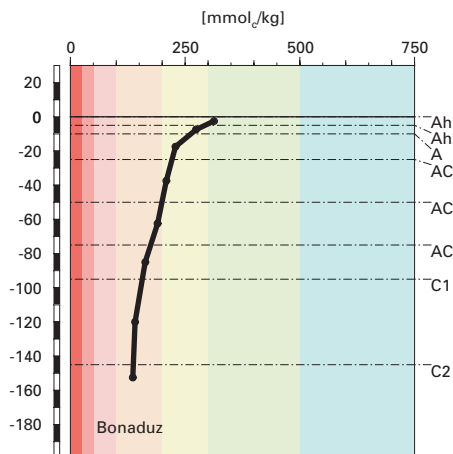
In den Ah-Horizonten liegen alle Schwermetalle in Gehalten vor, welche für pflanzliche und tierische Mikroorganismen in Waldböden unkritisch sind.

A17.6 Themenbereich «Nährstoffe»

A17.6.1 Nährstoffverfügbarkeit im Oberboden

In diesem Laubmischwald hat sich eine Humusform vom Typ Mull entwickelt, die auf eine gute Nährstoffverfügbarkeit schliessen lässt. Die Krümelstruktur in den Ah-Horizonten ist ein Zeichen für eine optimale Aktivität der Bodenfauna. Auch das mässig enge C/N-Verhältnis von 14 im Ah2-Horizont (im Ah1-Horizont ist das C/N-Verhältnis unrealistisch klein) ist typisch für einen Mull und besagt, dass die Mineralisierungsrate der organischen

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)

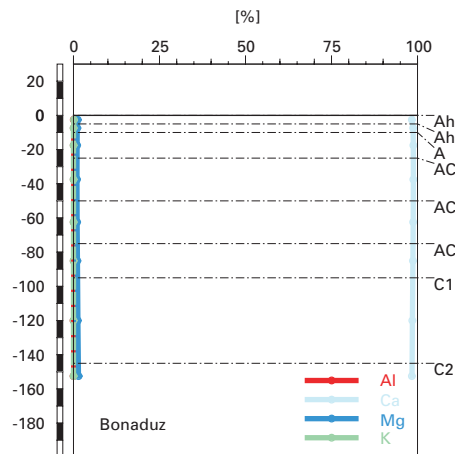


Abb. A17.19 (links) Kationenaustauschkapazität

Abb. A17.20 (rechts) Belegung des Kationenaustauschers

Substanz hoch ist und die Umsetzungsprozesse rasch ablaufen. In dieselbe Richtung verweist auch das mittlere C/P-Verhältnis von 209 im Ah2-Horizont.

A17.6.2

Nährstoffgehalte

Die Kationenaustauschkapazität ist bis zum AC1-Horizont in 50 cm Tiefe hoch bis sehr hoch, in allen tiefer gelegenen Horizonten mittel (**Abb. A17.19**). Im Tiefenverlauf folgt die Kationenaustauschkapazität ungefähr der Tonverteilung im Boden. Die Austauscherplätze am Kationenaustauscher sind im ganzen Profil fast ausschliesslich mit Kalzium-Ionen belegt, denn der ganze Boden befindet sich in der Säureklasse 1, in der die Säuren durch Verwitterung des Kalkgesteins erfolgt (**Abb. A17.20**). Saure Kationen sowie austauschbares Kalium kommen nur in kaum messbaren Mengen vor. Austauschbares Magnesium ist in allen Bodentiefen mit einem Anteil von rund 1% am Kationenaustauscher vertreten.

Der Vorrat an Kalzium nimmt im Tiefenverlauf sehr stark, der Mg-Vorrat langsam und der Kaliumvorrat gar nicht zu (Abb.A17.21–A17.23). Im Hauptwurzelraum bis 60 cm Tiefe werden die Vorräte wie folgt beurteilt:

Ca sehr hoch
Mg mässig
K sehr gering

Da der Boden sehr tiefgründig und bis mindestens 160 cm durchwurzelbar ist, kann der Mg-Vorrat unter Berücksichtigung der gesamten Aufschlusstiefe insgesamt als mittel bewertet werden. Betreffend die beiden anderen Nährstoffe ändert sich an der Vorratsbeurteilung nichts. In diesem Boden ist das Vorratsangebot der drei Nährstoffkationen sehr unausgewogen. Der Vorrat von Kalium ist bemerkenswert gering.

Dieser SSW-exponierte Standort ist hinsichtlich eines Trockenstresses mit einem kleinen Risiko behaftet, wodurch die Nutzung dieser Nährstoffvorräte während der gesamten Vegetationszeit praktisch uneingeschränkt möglich ist.

Kalzium-Vorrat

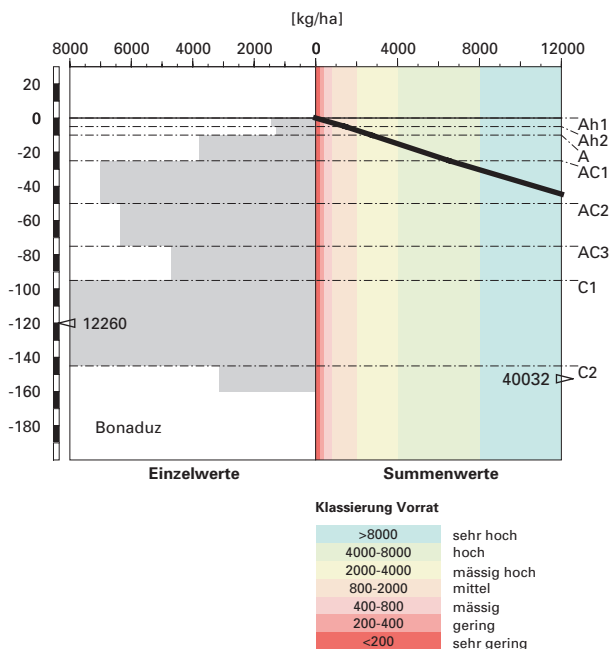


Abb.A17.21 Vorrat an Kalzium

Magnesium-Vorrat

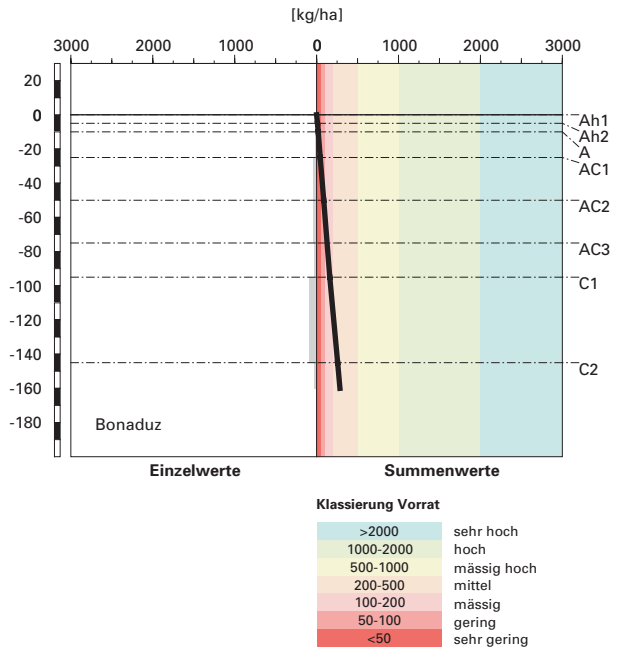


Abb. A17.22 Vorrat an Magnesium

Kalium-Vorrat

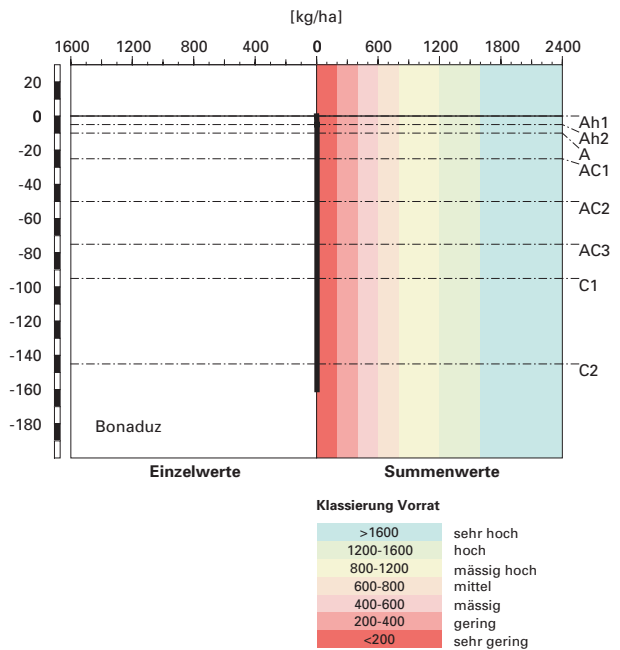


Abb. A17.23 Vorrat an Kalium

A17.7 Themenbereich «Waldbaulich relevante Bodenkennwerte und Baumartenwahl»

A17.7.1 Steckbrief für die Waldbehandlung

Der Steckbrief (Tab. A17.5) orientiert über waldbaulich relevante Standortfaktoren und Bodenkennwerte.

A17.7.2 Baumartenwahl

Naturnähe von Bestand und Oberboden

Der Bestand ist ein Mischwald aus Fichten, Waldföhren und Buchen. Im Naturwald wäre der Laubholzanteil vermutlich etwas grösser. Die vorhandene Humusform Mull bewerten wir als standorttypisch.

Baumartenwahl gemäss standortkundlichen Grundlagenwerken

Gemäss BUWAL (2005) sind an diesem Buchenstandort (Nr.17) folgende Baumarten für die Waldverjüngung geeignet: Buche, Eibe, Tanne, Waldföhre, Fichte und Mehlbeere.

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 zu vernachlässigen.

■ Trockenstress-Risiko für die Bäume

Es besteht nur ein kleines Risiko für Trockenstress. 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 profilumfassend alkalisch. Es besteht kein Risiko für Al-Toxizität. Da der Boden insgesamt nur sehr schwach versauert ist, schränkt der Säurezustand die Baumartenauswahl nicht ein.

■ Nährstoffangebot im Boden

Die Mineralisierung der Nährstoffe verläuft trotz der Humusform Mull nicht ganz optimal. Die biologische Aktivität lässt sich durch eine besser abbaubare Streumischung leicht erhöhen. Ein Verbesserungspotential ist durch Einbringen von etwas mehr Laubholz gegeben.

Tab. A17.5 Steckbrief für die Waldbehandlung (Bonaduz)**Standortangaben**

| | | |
|------------------|--|---|
| Relief | Höhe | 970 m |
| | Exposition | SSW |
| | Neigung | 82 % |
| Klima | Jahresniederschlag | 1123 mm |
| | Jahrestemperatur | 6.8°C |
| Ausgangsgestein | Bergsturzmaterial aus karbonathaltigem Gestein | |
| Baumbestand | Struktur | mehrheitlich einschichtig |
| | Schlussgrad | 60 % |
| | Baumarten (Deckung) | 25 % Fichte, 25 % Waldföhre, 10 % Buche |
| | Oberhöhe | 14 m |
| Waldgesellschaft | nach E&K 1972 | Nr. 17: Eiben-Buchenwald |
| | nach BUWAL 2005 | Nr. 17: Eiben-Buchenwald |

Bodenkennwerte

| | | |
|--------------------------|---|---|
| Bodensystematik | Bodentyp | Pararendzina |
| | Humusform | Mull |
| Wasser- und Lufthaushalt | Durchlüftung | Es sind keine Vernässungsmerkmale vorhanden, 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 ein kleines Risiko für Trockenstress. |
| | | |
| Säurezustand | pH-Wert/Kalkgrenze | Die Mineralerde enthält profilumfassend Karbonat und reagiert dementsprechend alkalisch. |
| | Aluminium-Toxizität | Es besteht kein Risiko für Al-Toxizität. |
| Nährstoffe | Verfügbarkeit im Oberboden | Wie die Humusform Mull weist auch das mässig enge C/N-Verhältnis im Ah-Horizont auf eine hohe Mineralisierungsrate hin. Aufgrund des mittleren C/P-Verhältnisses im Ah-Horizont erfolgt eine etwas pessimistischere Einschätzung der biologischen Aktivität. Sie wird gesamthaft als mittel bis hoch beurteilt. |
| | 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 | Dieser schluffreiche Boden reagiert in nassem Zustand sehr empfindlich auf Befahren mit schweren Maschinen, weil er bis in grosse Tiefen kaum Skelett enthält. Mit einer Hangneigung von 82 % ist der Waldbestand allerdings nicht befahrbar. | |

Viele Baumarten haben bezüglich Nährstoffversorgung des Bodens eine weite ökologische Amplitude. Das Nährstoffangebot dürfte daher an diesem Standort für die meisten Baumarten ausreichend sein. Dies gilt selbst für die nährstoffbedürftigen Edellaubhölzer, denn die Vorräte an Kalzium und Magnesium sind relativ gross.

A17.7.3 **Baumartenempfehlung**

Die Baumartenempfehlung des BUWAL (Tab.A17.6) ist aus bodenkundlicher Sicht einzig aufgrund des einseitigen und für Kalium sehr geringen Nährstoffangebotes im Boden zu hinterfragen.

Ein erhöhter Laubholzanteil liefert eine etwas besser abbaubare Streumischung. Dadurch kann die biologische Aktivität im Oberboden leicht erhöht werden und die in der Streu gebundenen Nährstoffe werden noch rascher mineralisiert. Das BUWAL sieht an diesem Standort zwar nur die beiden Laubhölzer Buche und Mehlbeere. Wir können uns aber auch den Bergahorn und sogar die Esche vorstellen. Da jedoch die Bodenpflege aufgrund der alkalischen Verhältnisse eher sekundär ist, wird der Empfehlung des BUWAL nicht widersprochen.

| Tab.A17.6 Baumartenempfehlung für den Hauptbestand | |
|---|--|
| Referenz | Baumarten |
| Grundlagenwerke (Einheit 17; BUWAL 2005) | Buche, Eibe, Tanne, Waldföhre, Fichte, Mehlbeere |
| Bodenkundliche Kriterien | Buche, Eibe, Tanne, Waldföhre, Fichte, Mehlbeere |

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.

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