

A20 Bodenprofil Arosa

A20.1 Themenbereich «Bodenbildungsfaktoren und Profilmorphologie»

A20.1.1 Zusammenfassende Angaben zum Profil und zu den Bodenbildungsfaktoren

Das Bodenprofil ist in [Abb.A20.1](#) dargestellt. Einen Eindruck vom Bestand vermittelt [Abb.A20.2](#). [Tab.A20.1](#) fasst wichtige Angaben zum Boden und Profilort Arosa zusammen und [Tab.A20.2](#) orientiert über die Bodenbildungsfaktoren.

A20.1.2 Verbreitung gemäss Bodeneignungskarte der Schweiz

Das Profil gehört zur Kartierungseinheit U7 (alpine Kalk-Berglandschaften, steile Nordhänge, Hangneigung > 35%). 810 Stichproben des Landesforstinventars gehören dieser Kartierungseinheit an. Das Profil repräsentiert damit 6.8% der mit dem LFI insgesamt erfassten 11'863 Stichproben.

A20.1.3 Besonderheiten am Profilort

An der Bodenoberfläche sind vereinzelt Steine und Blöcke zu beobachten ([Abb.A20.2](#)). Der Profilort liegt am Rand eines Baches und einer Lawinenrunse. Bedingt durch die Lawindynamik stellt sich ein Bergföhrenwald ein, was keiner Klimaxgesellschaft entspricht.

A20.1.4 Profilmorphologie und Klassierung

Die im Profil angesprochenen morphologischen Bodenmerkmale sind in [Tab.A20.3](#) zusammen mit einer Profilskizze dargestellt.

Die überwiegend von Föhren aus der Baumschicht und auch von Zwergsträuchern aus der Krautschicht sowie in geringen Mengen von Rückständen aus der Moosschicht stammende Streu wird nur langsam abgebaut, so dass die organische Auflage aus einer Streuschicht, einem Fermentations- und einem Humusstoffhorizont besteht. Mit der Horizontfolge L-F-H-Ah wird die Humusform als Tangel klassiert. In diesem Fall wird die Klassierung der Humusform als Tangel und nicht als Rohhumus vorgenommen,



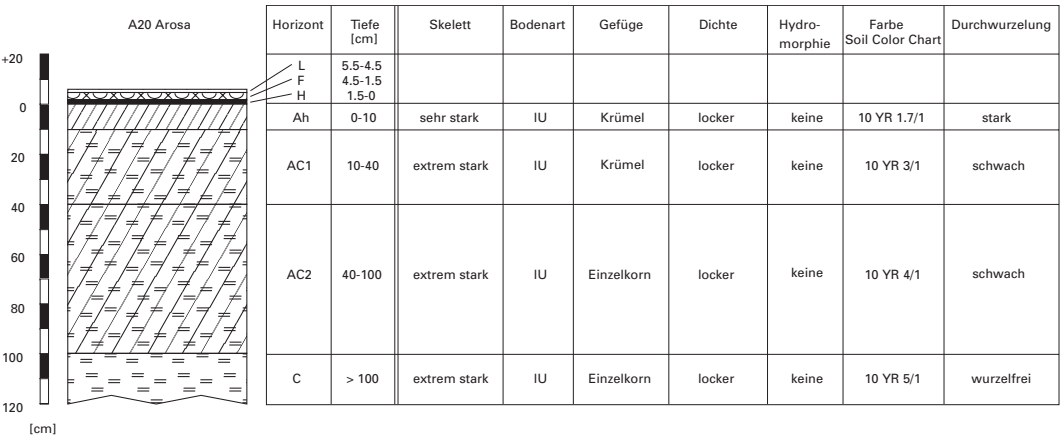
Abb. A20.1 (links) Bodenprofil Arosa

Abb. A20.2 (rechts) Bestand am Profilort Arosa

Tab. A20.1 Zusammenfassende Angaben zum Profil Arosa	
Lokalname	Iselwald (Kanton Graubünden, Gemeinde Arosa)
Lage	Landeskarte 1:25 000 Blatt 1196, Arosa Koordinaten 772325/182830
Waldgesellschaft (Ellenberg und Klötzli 1972)	Nr. 69: Steinrosen-Bergföhrenwald (<i>Rhododendro hirsuti-Pinetum montanae</i>)
Horizontfolge	L-F-H-Ah-AC1-AC2-C
Humusform	Tangel
Bodentyp	Rendzina
Bodentyp nach FAO (1988)	Rendzic Leptosol, mollic

Tab. A20.2		Bodenbildungsfaktoren am Profilort Arosa	
Relief	Höhe ü. M.	1725 m	
	Exposition	NNW	
	Neigung	75 %	
	Geländeform	Mittelhang	
Ausgangsgestein	Tektonik/Geologie	Ostalpin; Mesozoische Sedimente (Gehängeschutt, im Hang sind zusätzlich Sedimente der Aroser Schuppenzone anstehend)	
	Lithofazies (nach Tuchschild 1995)	Nr.31: Wildbachablagerungen und Gehängeschutt physikalische Verwitterbarkeit Gestein: mittel chemische Verwitterbarkeit Gestein: mittel Tongehalt Gestein: sehr niedrig–niedrig	
Klima	T/N Jahresmittel	2.5°C/1258 mm	
	T/N Januarmittel	–5.3°C/72 mm	
	T/N Julimittel	11.6°C/140 mm	
	Tage mit Schneedecke	190	
	Wärmegliederung	ziemlich kalt	
	Länge der Vegetationsperiode	100–120 Tage	
Pflanzen	Schicht	Deckung	häufigste Arten
	Baumschicht (3–5 m Höhe)	55 %	45 % Aufrechte Berg-Föhre (<i>Pinus mugo subsp. uncinata</i>)
	Strauchschicht	55 %	–
	Krautschicht	95 %	Echte Moorbeere (<i>Vaccinium uliginosum</i>) Preiselbeere (<i>Vaccinium vitis-idaea</i>) Heidelbeere (<i>Vaccinium myrtillus</i>) Einseitswendiges Wintergrün (<i>Orthilia secunda</i>)
	Mooschicht	70 %	–

Tab. A20.3 Profilskizze und Morphologie des Bodenprofils Arosa
Bodenart: IU Schluff-Lehm



weil die organische Auflage nur schwach sauer (pH-Hellige) ist und nicht im stark sauren Bereich wie bei einem Rohhumus liegt.

Im Mineralboden lassen sich morphologisch vier Horizonte unterscheiden. Der aufgeschlossene Boden ist durch die organische Substanz bis 40 cm Tiefe schwarz bis bräunlich-schwarz gefärbt. Darunter dominieren bräunlich-graue Farben. Das Profil ist in den obersten 10 cm bereits sehr stark skeletthaltig. Alle übrigen Tiefenbereiche dieses Bodens sind sogar extrem skeletthaltig. Die Bodenart ist im ganzen Profil Schluff-Lehm. Bis 40 cm Tiefe weist die Feinerde eine Krümelstruktur auf, wobei es sich um keine typischen Krümel handelt, sondern um flockige und kleinstrukturierte Aggregate. Die darunter folgenden Zonen besitzen ein Einzelkorngefüge. Der Boden ist profilumfassend locker gelagert und es sind im Profil keine hydromorphen Merkmale zu erkennen.

Die Horizonte werden als L-F-H-Ah-AC1-AC2-C bezeichnet und der Boden als Rendzina klassiert.

Ergänzende Bodenmerkmale

Im gesamten Profil ist Kalk in der Feinerde vorhanden. Die Durchwurzelung ist in den obersten 10 cm stark, in den AC-Horizonten von 10–100 cm Tiefe schwach und das Ausgangsgestein ist wurzelfrei. Im Boden ist kein unüberwindbares Hindernis für das Wurzelwachstum erkennbar.

A20.2 Themenbereich «Physikalische Bodenkennwerte»

A20.2.1 Beschrieb einiger physikalischer Bodenkennwerte

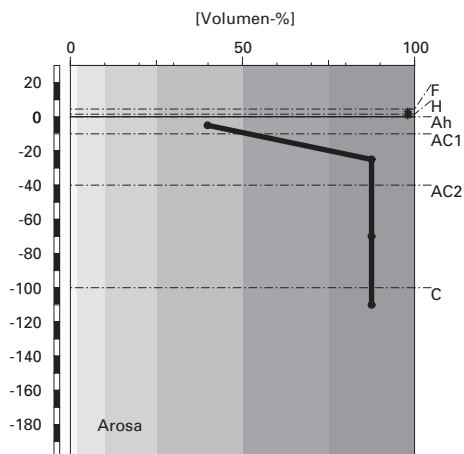
Skelettgehalt

Der Skelettgehalt nimmt mit der Tiefe stark zu, wobei bereits der Ah-Horizont stark skeletthaltig ist (Abb. A20.3). Ab 10 cm Tiefe ist der Boden mit rund 90 % extrem skeletthaltig.

Bodenart

Im gesamten Profil sind etwa gleich grosse Anteile an Schluff und Sand vorhanden (Abb. A20.4). Der Tongehalt ist relativ klein. Er nimmt mit der Tiefe analog dem Verwitterungsgrad des Bodens von rund 17 auf 6 % ab, wobei in 40 cm Tiefe ein auffälliger Sprung im Tongehalt zu beobachten ist. In Bezug auf den Tongehalt handelt es sich bis 40 cm Tiefe um mittelschweren, darunter um leichten Boden. Die im Bodenprofil mit der Fingerprobe ermittelte Bodenart weicht von den Resultaten der Laboranalyse ab. Mit

Skelettgehalt



Klassierung Skelettgehalt

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

Bodenart

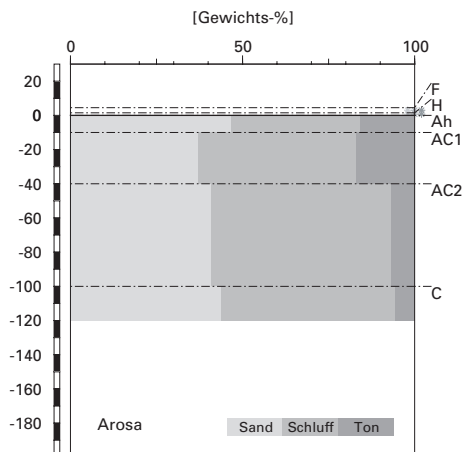


Abb. A20.3 (links) Skelettgehalt

Abb. A20.4 (rechts) Bodenart

der Feldmethode wurde bis 40 cm Tiefe der Schluffanteil, weiter unten im Profil der Tonanteil überschätzt (Tab. A20.3).

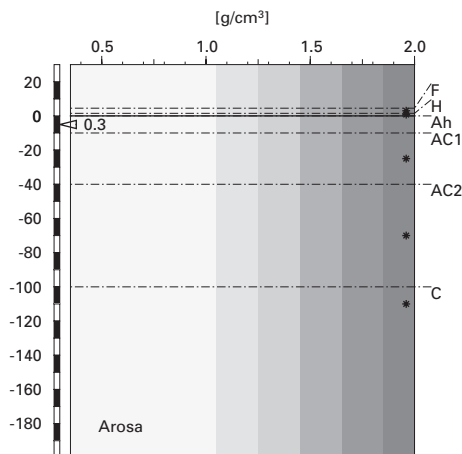
Dichte der Feinerde

Aus technischen Gründen konnte nur im Ah-Horizont eine Dichteprobe entnommen werden. Die Feinerde-Dichte beträgt dort etwa 0.3 g/cm^3 und wird damit als äusserst gering klassiert (Abb. A20.5). Dass auch alle übrigen Horizonte locker gelagert sind zeigt die morphologische Beschreibung des Bodenprofils (Tab. A20.3).

Wasserleitfähigkeit im gesättigten Boden

Alle Horizonte dieses lockeren und relativ tonarmen Bodens sind hoch durchlässig (Abb. A20.6).

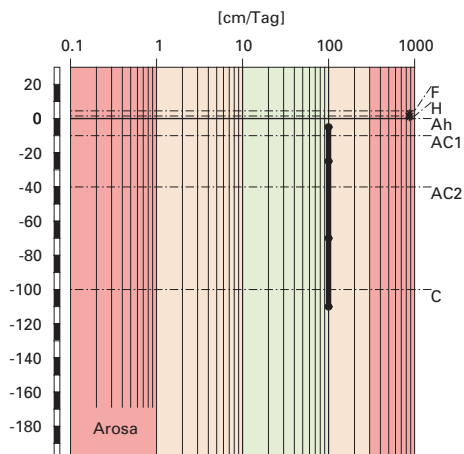
Feinerde-Dichte



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. A20.5 (links) Dichte der Feinerde

Abb. A20.6 (rechts) Wasserleitfähigkeit im gesättigten Boden

Pflanzenverfügbares Wasser

Bis zur Referenztiefe von 120 cm kann der Boden 89 l/m² pflanzenverfügbares Wasser speichern. Damit wird die speicherbare Wassermenge als gering klassiert (Abb. A20.7). Der hohe Skelettgehalt reduziert das Speichervermögen beträchtlich.

A20.2.2

Bodenkundliche und ökologische Interpretationen

Wasser- und Lufthaushalt des Bodens

Diese Rendzina ist so stark durchlässig (Abb. A20.6), dass sich keine Veräussungsmerkmale bilden können. Phasen mit Wassersättigung treten demnach höchstens für kurze Zeit auf.

pflanzenverfügbares Wasser

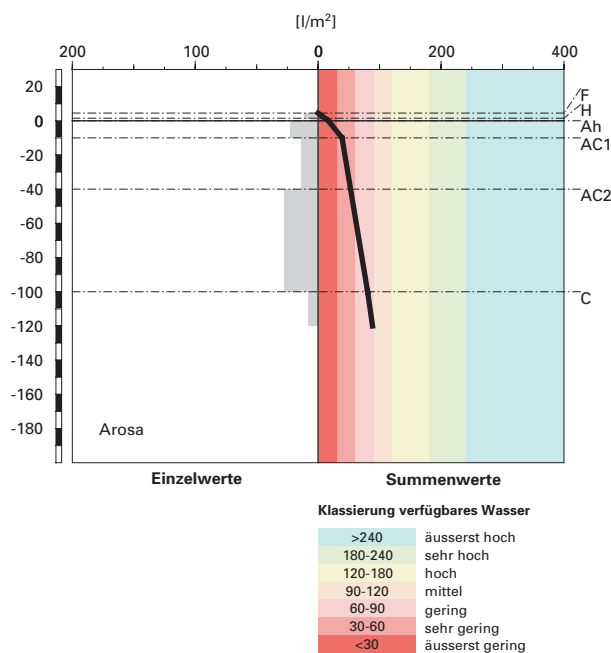


Abb. A20.7 Pflanzenverfügbares Wasser

Durchwurzelbarkeit des Bodens

Der Boden kann von allen Baumarten mindestens profilumfassend durchwurzelt werden, da die Dichtewerte die kritische Grenze von 1.4 g/cm^3 nicht erreichen und die Durchlüftung in allen Horizonten stets ausreichend ist. Der Wurzelraum ist nicht eingeschränkt und wird mit $>120 \text{ cm}$ Mächtigkeit als sehr tiefgründig klassiert. Der Boden wird vom aktuellen Bestand aus Bergföhren, Fichten und Lärchen nicht optimal genutzt, denn Wurzeln sind nur bis 100 cm Tiefe vorhanden. Diese begrenzte Durchwurzelungstiefe liegt möglicherweise daran, dass in der Umgebung des Bodenprofils nur kleinwüchsige Bäume mit entsprechend kleinem Wurzelwerk vorhanden sind (Abb. A20.2).

Wasserversorgung des Baumbestandes

Unsere Berechnungen gehen generell von einem Wasserverbrauch des Bestandes von 4 mm pro Tag aus und beziehen sich auf einen Wurzelraum

von 120 cm Mächtigkeit. Unter diesen Voraussetzungen würde der Bestand bei Arosa während Trockenperioden nach rund 10 Tagen an Wassermangel zu leiden beginnen. Die Bergföhren und Lärchen erreichen an diesem Standort wegen dem Lawineneinfluss Baumhöhen von nur einigen wenigen Metern. Der Wasserverbrauch des Bestandes ist daher sicher geringer als der Wert von 4 mm pro Tag, der für Wälder mit mächtigen Bäumen von rund 30 m Höhe gilt. Daher kommen wir zum Schluss, dass an diesem Bergföhrenstandort (EK 69) unter den gegebenen klimatischen Verhältnissen trotz geringem Wasserspeichervermögen des Bodens ein kleines Risiko für Trockenstress besteht.

Bodenbefahrbarkeit

Der Mineralboden reagiert selbst in nassem Zustand wenig empfindlich auf Befahren mit schweren Maschinen, weil er viel Skelett enthält. Die organische Auflage hingegen würde durch ein Befahren stark in Mitleidenschaft gezogen, mit nachteiligen Folgen für die in der organischen Auflage zahlreich vorkommenden Baumwurzeln. Mit 75% Hangneigung kann der Waldbestand jedoch nicht mit grossen Maschinen befahren werden.

A20.3 Themenbereich «Bodenhauptbestandteile»

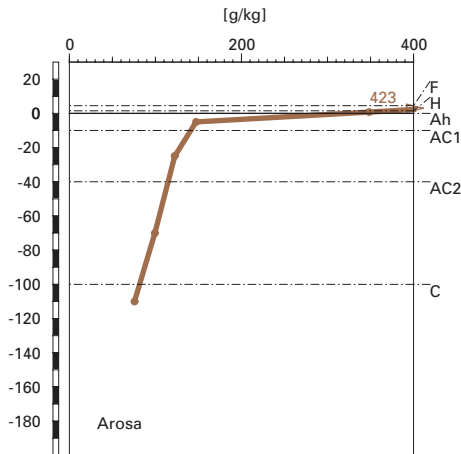
A20.3.1 Charakterisierung der Bodenhauptbestandteile

Organische Substanz

Am Profilort Arosa dominiert die Berg-Föhre im Baumbestand, welcher einen Deckungsgrad von 55 % hat. Damit fällt viel Licht auf den Boden und es gedeiht praktisch flächendeckend eine üppige Kraut- und Zwergstrauchvegetation, welche vor allem aus echter Moorbeere, Preiselbeere, Heidelbeere und einseitwendigem Wintergrün besteht. Die Streu ist sehr schwer abbaubar und es haben sich ein 3 cm mächtiger F- und ein 1.5 cm dicker H-Horizont gebildet.

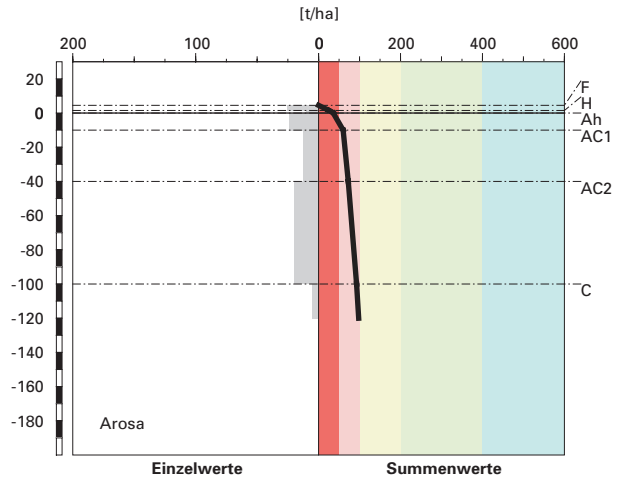
Entsprechend ihrer vorwiegend organischen Zusammensetzung ist der Gehalt an organischem Kohlenstoff (C_{org}) im F- bzw. H-Horizont mit 42 bzw. 35 % sehr hoch (Abb. A20.8). Auch die Mineralbodenhorizonte besitzen grosse C_{org} -Gehalte. Im schwarzen Ah-Horizont beträgt er rund 15 % und nimmt dann im bräunlich-schwarzen AC1- bzw. in den bräunlich-grau gefärbten AC2- und C-Horizonten kontinuierlich bis auf das Minimum von 7.6 % im C-Horizont ab. Aufgrund dieses Humusgehaltes müsste der C-Horizont eigentlich als AC3-Horizont bezeichnet werden. Bei der Feld-

organischer Kohlenstoff



Kohlenstoff-Vorrat

(C_{org})



Klassierung Vorrat

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

Abb. A20.8 (links) Gehalt an organischem Kohlenstoff

Abb. A20.9 (rechts) Vorrat an organischem Kohlenstoff

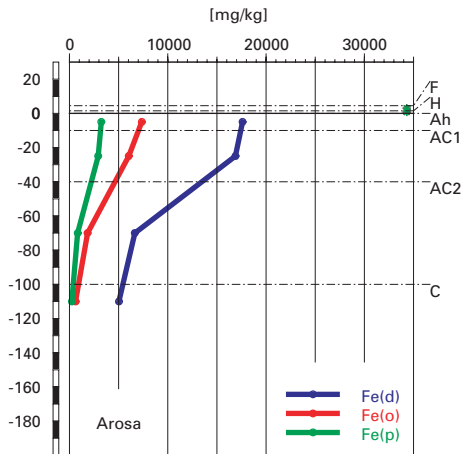
beurteilung wurde der Humusgehalt offensichtlich unterschätzt. Trotz diesen hohen C_{org} -Gehalten beträgt der Vorrat an organischem Kohlenstoff nur 98 t/ha (Abb. A20.9), wobei für die Berechnung des Vorrates im F- und H-Horizont jeweils eine Dichte von 0.2 g/cm³ angenommen wurde.

Tonverteilung sowie Verteilung von Aluminium- und Eisenoxiden

Der Tongehalt nimmt mit der Tiefe ab (Abb. A20.4). Er beträgt im Ah- und AC1-Horizont 16 bzw. 17 % und nimmt auf das Minimum von rund 6 % im C-Horizont ab. Die Abnahme vom AC1- in den AC2-Horizont ist markant.

Alle extrahierbaren Aluminium- und Eisengehalte nehmen mit der Tiefe kontinuierlich ab (Abb. A20.10 und A20.11). Dabei ist bei allen die Abnahme vom AC1- in den AC2-Horizont am ausgeprägtesten. Das Dithionit-extrahierbare Eisen (Fe_d) weist in den oberen beiden Horizonten im regionalen Vergleich relativ grosse Gehalte auf, während sie in den unteren Horizonten relativ klein sind. Dasselbe gilt auch für die Oxalat- und Pyrophosphat-extrahierbaren Gehalte (Fe_o , Al_o , Fe_p bzw. Al_p).

Eisen-Oxide (Gehalte)



Aluminium-Oxide (Gehalte)

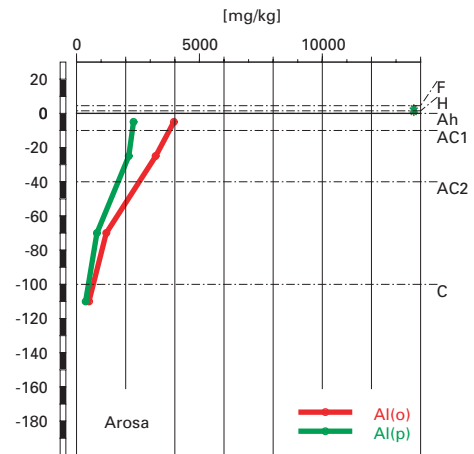


Abb. A20.10 (links) Gehalte an Dithionit- (Fe_d), Oxalat- (Fe_o) und Pyrophosphat- (Fe_p) extrahierbarem Eisen

Abb. A20.11 (rechts) Gehalte an Oxalat- (Al_o) und Pyrophosphat- (Al_p) extrahierbarem Aluminium

Eisen- und Aluminiumoxide (Verhältnisse)

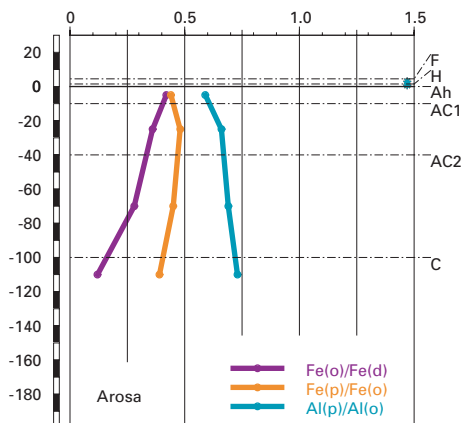


Abb. A20.12 Verhältnisse der Fe- und Al-Oxide

Das Fe_o/Fe_d -Verhältnis nimmt mit der Tiefe kontinuierlich vom Maximum von 0.4 im Ah- auf das Minimum von 0.1 im C-Horizont ab (Abb. A20.12). Das Fe_p/Fe_o -Verhältnis variiert im ganzen Profil nur wenig zwischen 0.4 und 0.5 (Abb. A20.12). Es steigt vom Ah- in den AC1-Horizont zuerst leicht an und nimmt dann bis in den C-Horizont kontinuierlich auf das Minimum ab. Das Al_p/Al_o -Verhältnis hingegen steigt mit der Tiefe von rund 0.6 im Ah- auf das Maximum von rund 0.7 im C-Horizont an.

A20.3.2

Bodenkundliche Interpretation

Die Streu am Profilort Arosa wird innerhalb eines Jahres nicht vollständig abgebaut. Es haben sich ein F- und H-Horizont von 3 bzw. 1.5 cm Mächtigkeit gebildet, weshalb die Humusform als Tangel bezeichnet wird. Die Gründe für diesen stark verzögerten Abbau sind vor allem in der Streuqualität, im Klima und der Lage des Profilortes zu suchen. Die Streu der Berg-Föhren und Zwergsträucher ist sehr schwer abbaubar und enthält zahlreiche phenolische Substanzen, welche durch die Mikroorganismen nur schwer verwertet und mineralisiert werden können. Das C/N-Verhältnis ist im F- bzw. H-Horizont mit rund 25 bzw. 24 mässig weit, womit die Mineralisierung der organischen Substanz als niedrig eingeschätzt wird. Auch das mässig weite C/P-Verhältnis von 622 im F- und das weite Verhältnis von 846 im H-Horizont bestätigen die schlechte Qualität, bzw. den geringen Nährstoffgehalt der sich im Abbau befindenden Streu. Zudem bietet die Jahresdurchschnittstemperatur von 2.5°C (durchschnittliche Julitemperatur: 11.6°C) am NNW-exponierten Hang während der meisten Zeit des Jahres nur ungenügende Wärmeverhältnisse für eine hohe biologische Aktivität. Die Krümelstruktur in den obersten 40 cm des Mineralbodens ist eher auf den relativ hohen pH-Wert und die grosse Ca-Sättigung (Tab. A170 in Blaser et al. 2005) der organischen Substanz zurückzuführen, als auf eine hohe biologische Aktivität.

Als Folge der niedrigen Mineralisierung in der organischen Auflage fallen bei den Abbauprozessen lösliche organische Substanzen an, welche mit dem Sickerwasser in den Mineralboden verlagert werden. Im Mineralboden ist der pH-Wert grösser als 7 und es ist freies Karbonat in der Feinerde vorhanden. Es bilden sich dadurch stabile Ca-Humate, wodurch die Humusstoffe wirksam vor einem weiteren Abbau geschützt werden. Durch diese Verlagerung und Stabilisierung der organischen Substanz können die relativ grossen C_{org} -Gehalte bis zur Aufschlusstiefe in 120 cm erklärt werden. Trotzdem ist der Vorrat an organischem Kohlenstoff mit 98 t/ha (Abb. A20.9) im gesamtschweizerischen Vergleich bloss gering. Das liegt vor allem am extrem grossen Skelettgehalt im Mineralboden und an der geringen Dichte der organischen Auflagehorizonte.

Der Tongehalt nimmt mit der Tiefe entsprechend dem abnehmenden Verwitterungsgrad ab (Abb. A20.4). Auch die Gehalte der extrahierbaren Aluminium- und Eisenverbindungen nehmen entsprechend dem mit der Tiefe abnehmenden Verwitterungsgrad ab. Obwohl der Boden im ganzen Profil karbonathaltig ist, scheint die Verbraunung im Oberboden bereits eingesetzt zu haben. Dies lässt sich aus dem mit der Tiefe abnehmenden Fe_o/Fe_d -Verhältnis schliessen (Abb. A20.12). Das besagt, dass im Ah-Horizont über 40% der extrahierbaren Eisenverbindungen in amorpher Form vorliegen, während es im C-Horizont nur 12% sind. Die amorphen Eisenverbindungen sind Neubildungen, welche während der Bodenentwicklung entstanden sind. Ihre grösseren Gehalte im Oberboden gegenüber dem Unterboden können jedoch auch durch Rückstandsanreicherung verursacht sein. In diesem Fall würde man nicht von einer Verbraunung sprechen. Da der C_{org} -Gehalt im ganzen Boden sehr gross ist, wird eine Kristallisation der amorphen Verbindungen stark gehemmt.

Die grossen C_{org} -Gehalte sind auch der Grund für die im ganzen Boden relativ grossen Fe_p/Fe_o - bzw. Al_p/Al_o -Verhältnisse (Abb. A20.12). Zwischen rund 40 und 45% der amorphen Eisenverbindungen sind mit der organischen Substanz assoziiert und bei den Aluminiumverbindungen sind es sogar zwischen rund 60 und über 70%.

Die aufgrund der morphologischen Merkmale vorgenommene Klassierung des Bodens als Rendzina wird durch die Interpretation der extrahierbaren Aluminium- und Eisenverbindungen grundsätzlich bestätigt. Das grössere Fe_o/Fe_d -Verhältnis im Oberboden gegenüber dem C-Horizont ist vermutlich auf Rückstandsanreicherung von amorphen Eisenoxiden und nicht auf eine Verbraunung zurückzuführen.

A20.4 Themenbereich «Säurezustand»

A20.4.1 Charakterisierung des Säurezustandes

pH-Wert

Der F- bzw. H-Horizont besitzt einen pH-Wert von 5.5 bzw. 6.4 und ist somit mässig bzw. schwach sauer, was den Säureklassen 3 bzw. 2 entspricht (Abb. A20.13). Der Mineralboden ist im ganzen Profil alkalisch und befindet sich in der Säureklasse 1. Mit der Tiefe nimmt der pH-Wert im Mineralboden nur leicht von 7.3 auf 7.7 zu.

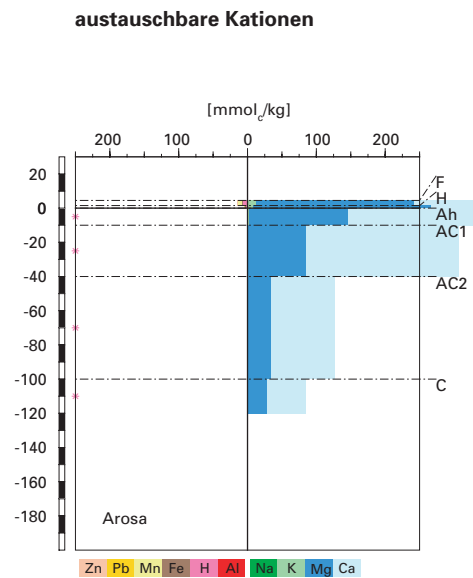
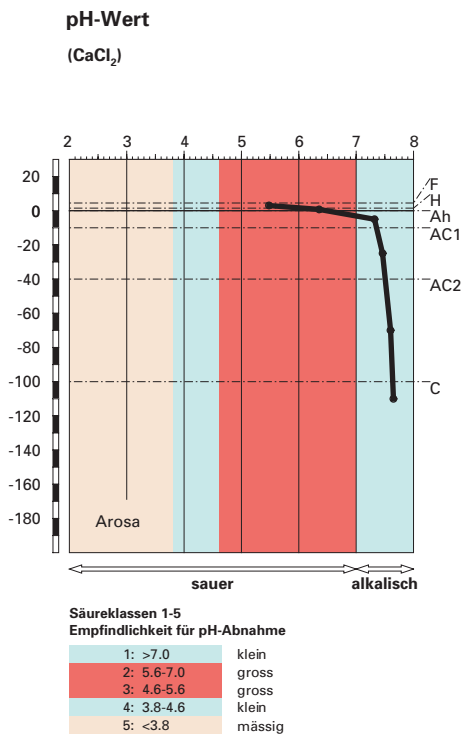


Abb. A20.13 (links) pH-Wert und Säureklassen

Abb. A20.14 (rechts) Belegung des Kationenaustauschers

Austauschbare Kationen und Basensättigung

Am Kationenaustauscher ist praktisch nur Kalzium und Magnesium in austauschbarer Form gebunden, wobei Kalzium ungefähr in 2- bis 3-fachen Mengen vertreten ist (Abb. A20.14). Alle anderen Kationen treten am Austauscher kaum in Erscheinung und lassen sich grafisch nicht mehr darstellen. Die Basensättigung ist im ganzen Boden mit rund 100% sehr hoch (Abb. A20.15).

A20.4.2 Interpretationen zum Säurezustand

Stand der Bodenversauerung

Diese Rendzina ist sehr schwach versauert. Die Differenz des pH-Wertes zwischen dem Ah- und dem C-Horizont beträgt nur rund 0.3 pH-Einheiten. Der gesamte Mineralboden befindet sich in der Säureklasse 1, in der die Säurepufferung sehr wirksam durch die Verwitterung des Karbonatge-

Basensättigung

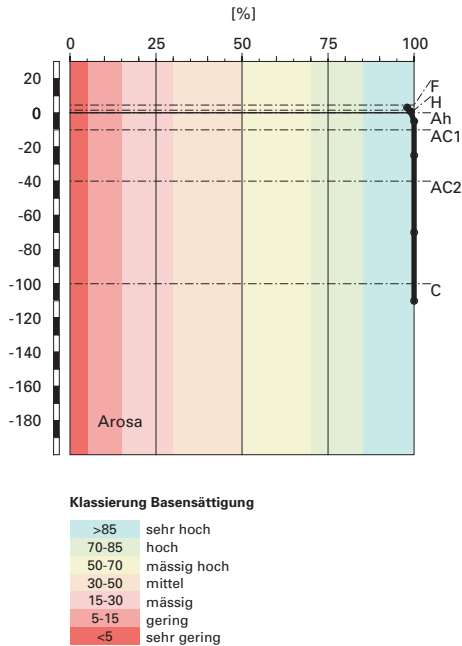


Abb. A20.15 Basensättigung

steins erfolgt. Aus diesem Grund ist der pH-Wert überall alkalisch und der Kationenaustauscher vollständig basengesättigt.

Risiko für Boden und Pflanzen

Die Empfindlichkeit des Bodens für eine weitere pH-Abnahme ist sehr klein, weil der ganze Mineralboden sich im Karbonatpufferbereich der Säureklasse 1 befindet. Der Boden enthält überdies sehr viel Skelett aus Karbonatgestein, so dass er auch über sehr grosse Zeiträume hinweg in diesem Pufferbereich verharren wird. Auch die Basensättigung wird sehr hoch bleiben.

Ein Risiko für das Wachstum säureempfindlicher Pflanzen besteht nicht und wird auch in absehbarer Zukunft nicht auftreten. Im gegenwärtigen Zustand ist das BC/Al-Verhältnis mit Werten um 2000 weit von dem als kritisch erachteten Grenzwert von 0.2 entfernt (Tab. A170 in Blaser et al. 2005).

A20.5 Themenbereich «Schwermetalle»

A20.5.1 Tiefenverteilung der Schwermetalle

In diesem Boden nehmen die Gehalte an Cr, Ni, Zn und Pb mit der Tiefe stark ab (Abb. A20.16). Im AC2- und C-Horizont ist nur noch Zn oberhalb der Bestimmungsgrenze. Kupfer liegt im ganzen Profil unter der Bestimmungsgrenze.

A20.5.2 Wertung der Schwermetallgehalte im untersten Mineralerde-Horizont im geochemischen Vergleich

Bezogen auf das Ausgangsgestein, Gehängeschutt aus mesozoischen Sedimenten liegen der Cr- und Ni-Gehalt im C-Horizont unterhalb, der Zn- und Pb-Gehalt innerhalb und der Cu-Gehalt oberhalb typischer Wertebereiche. Da für Gehängeschutt (Lithofazies 31) keine geochemischen Angaben vorhanden sind, wurde die geologisch nächstverwandte Lithofazies mit geochemischen Angaben (Lithofazies 19, Dolomite und Rauhwacken) für die Beurteilung beigezogen.

Anmerkung: Der hohe Humusgehalt des C-Horizontes von 12% weist darauf hin, dass dieser Horizont bereits zumindest etwas durch Bodenentwicklung beeinflusst ist. Dies betrifft einerseits Rückstandsanreicherung aus der Karbonat-Verwitterung, andererseits Verdünnung durch Aufbau organischer Substanz. Wie gut die auf dem C-Horizont beruhende Beurteilung die Verhältnisse im Ausgangsgestein repräsentiert, lässt sich deshalb nicht sagen.

A20.5.3 Beurteilung der quellenunabhängigen Belastung nach VBBo

Für die organischen Auflage-, den Ah- und die AC-Horizonte wurden wegen ihres hohen Humusgehaltes (Abb. A20.8) die volumenbezogenen Konzentrationen (mg/dm^3 ; Tab. A173 in Blaser et al. 2005) beurteilt. Diese sind niedriger als die massenbezogenen Gehalte (mg/kg ; Abb. A20.17), da die Dichte kleiner ist als $1 \text{ g}/\text{cm}^3$. Mangels Messwerten wurden für den F- und H-Horizont eine Dichte von $0.2 \text{ g}/\text{cm}^3$, für den Ah- bzw. die AC-Horizonte von 0.4 bzw. $0.5 \text{ g}/\text{cm}^3$ angenommen.

Bezogen auf die VBBo sind die Konzentrationen und Gehalte aller Schwermetalle im ganzen Boden sehr niedrig bis niedrig. Die Richtwerte der VBBo werden nicht überschritten.

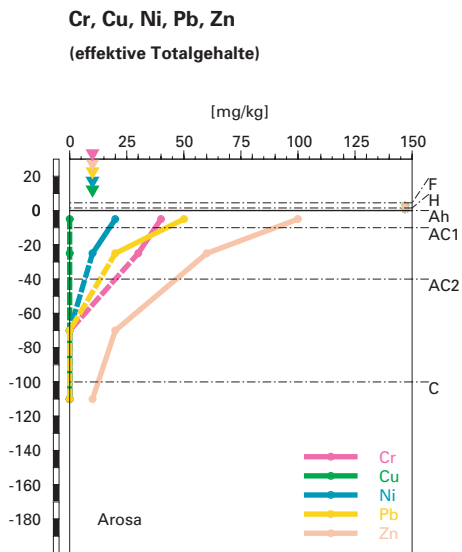


Abb. A20.16 (links) Schwermetalle: effektive Totalgehalte

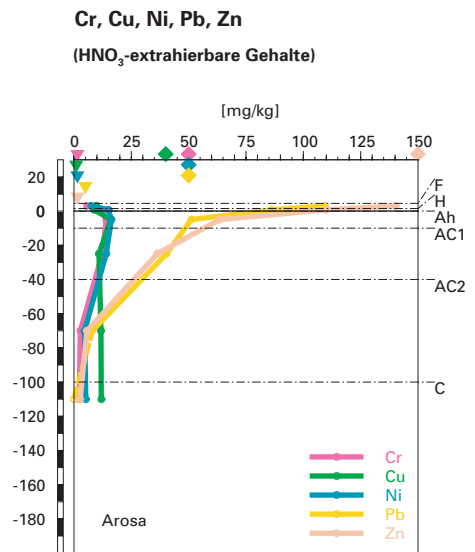


Abb. A20.17 (rechts) Schwermetalle: Salpetersäure-extrahierbare Gehalte

Schwermetallmobilität

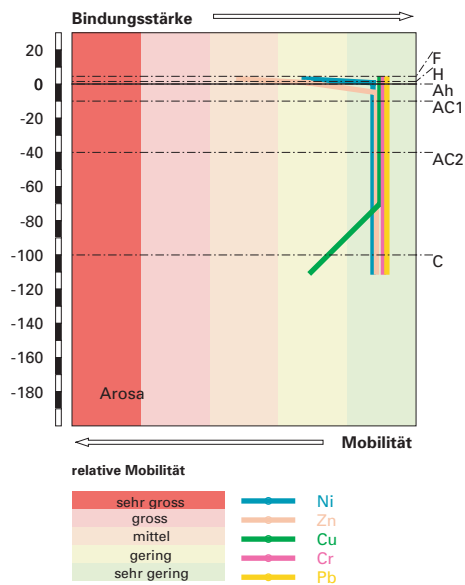


Abb. A20.18 Mobilität der Schwermetalle

Tab. A20.4**Anreicherungs-faktoren**

Horizont	Tiefe [cm]	Anreicherungs-faktor				
		Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
F	4.5– 1.5	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
H	1.5– 0	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Ah	0– 10	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	3.75
AC1	10– 40	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	3.00
AC2	40–100	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	3.00
C	>100	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	1.00

A20.5.4**Anreicherungs-faktoren**

Da die Gehalte der meisten Schwermetalle im C-Horizont unter der Bestimmungsgrenze liegen (Abb. A20.16), konnten Anreicherungs-faktoren nur gerade für Zn berechnet werden (Tab. A20.4). Die Zr-Gehalte (Tab. A174 in Blaser et al. 2005) zeigen deutlich eine Anreicherung schwerlöslicher Minerale im Rückstand der Karbonat-Verwitterung. Rückstands-anreicherung dürfte deshalb der Hauptgrund für die Zunahme von Cr und Ni zur Bodenoberfläche hin sein. Zink ist im Vergleich zur Referenz Zr im entwickelten Teil des Mineralbodens nochmals signifikant angereichert (Tab. A20.4). Dies kann mit dem Nährstoffkreislauf der Vegetation erklärt werden. Die Bäume können Zn offenbar auch aus dem C-Horizont bzw. Untergrund aufnehmen und führen es mit der Streu wieder dem Oberboden zu. Im Zuge der Bodenentwicklung hat dies dazu geführt, dass dieser wichtige Mikronährstoff, der im Ausgangsgestein nur in sehr geringen Gehalten vorkommt, im Boden in einem engen Kreislauf gehalten und angereichert wird. In wie weit analoge Überlegungen für den Mikronährstoff Ni mit einer ähnlichen Tiefenverteilung wie Zn (Abb. A20.16) gelten, lässt sich wegen des zu tiefen Gehaltes im C-Horizont nicht beantworten. Bei Pb hingegen dürfte zusätzlich zur Rückstands-anreicherung anthropogener Eintrag und anschliessende Anreicherung in der organischen Substanz für die gegenüber den darunterliegenden Horizonten besonders stark erhöhten Gehalte im Ah-Horizont und in der organischen Auflage verantwortlich sein (Abb. A20.16 und A20.17).

A20.5.5**Schätzung der Mobilität der Schwermetalle**

In der mässig bis schwach sauren organischen Auflage dieses Bodens wird die Mobilität von Zn als gering bis mittel, diejenige der übrigen Schwermetalle als sehr gering bis gering eingestuft (Abb. A20.18). Dabei wirkt der hohe Gehalt an organischer Substanz bei allen Schwermetallen mit Ausnahme von Zn mobilitätsverringend.

Im alkalischen Mineralboden ist die Mobilität aller Schwermetalle sehr gering bis gering, wobei auch hier der profilumfassend hohe Gehalt an organischer Substanz (Abb. A20.8) die Mobilitätsschätzung für alle Schwermetalle mit Ausnahme von Zn beeinflusst.

Es besteht kein Risiko für eine Belastung des Grundwassers mit Schwermetallen.

A20.5.6 Schätzung der Gefährdung von Mikroorganismen

Im Ah-Horizont liegen alle Schwermetalle in Gehalten vor, welche für pflanzliche und tierische Mikroorganismen in Waldböden unkritisch sind.

A20.6 Themenbereich «Nährstoffe»

A20.6.1 Nährstoffverfügbarkeit im Oberboden

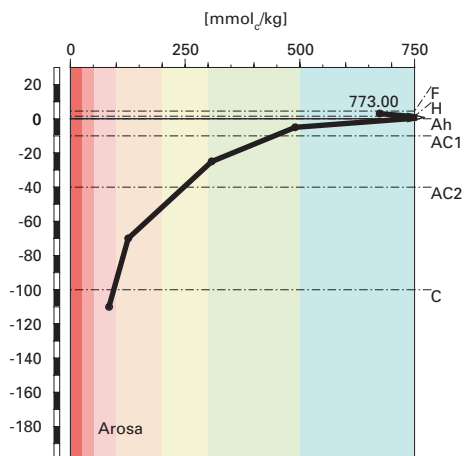
Die Humusform dieser Rendzina ist ein Tangel. Dieser ist einem Rohhumus sehr ähnlich, entsteht aber auf Kalk- und Dolomitgestein und ist in der Regel weniger sauer als ein typischer Rohhumus. Trotz diesem Unterschied zeigt auch diese Humusform eine nicht optimale Nährstoffverfügbarkeit im Oberboden an. Eine ähnliche Information liefern das mässig weite C/N-Verhältnis von 22 sowie das mittlere C/P-Verhältnis von 286, die zwar eher für die Humusform Moder kennzeichnend sind, aber Ausdruck einer niedrigen Mineralisierungsrate der organischen Substanz sind. Die ausgeprägte Krümelstruktur, welche bis in den AC1-Horizont zu beobachten ist, wird durch die Bodenfauna gebildet und zeigt, dass die Vermischung von organischem und mineralischem Material im ganzen Oberboden gut ist.

A20.6.2 Nährstoffgehalte

Die Kationenaustauschkapazität ist bis in den AC1-Horizont sehr hoch und nimmt mit der Tiefe bis in den AC2-Horizont rasch auf mittlere Werte ab (Abb. A20.19). Im anschliessenden C-Horizont erfolgt die Abnahme auf einen geringen Wert nur noch langsam. Der Tiefenverlauf der Kationenaustauschkapazität folgt im Wesentlichen der Verteilung der organischen Substanz im Profil.

Der Kationenaustauscher ist fast ausschliesslich von Kalzium und Magnesium belegt, wobei der Magnesiumanteil aussergewöhnlich hoch ist (Abb. A20.20). Diese Austauscherbelegung kommt durch die Zusammen-

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)

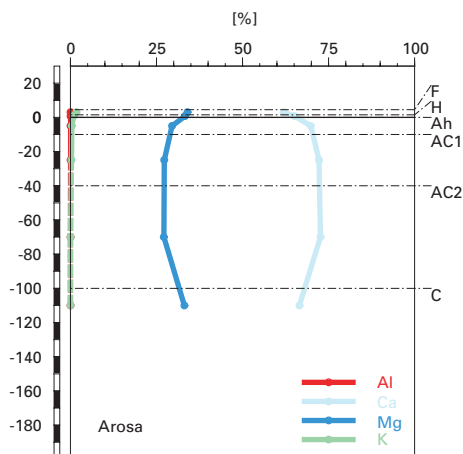


Abb. A20.19 (links) Kationenaustauschkapazität

Abb. A20.20 (rechts) Belegung des Kationenaustauschers

setzung des Dolomits, einem Ca/Mg-Karbonat, zustande. Der ganze Mineralboden ist zudem alkalisch, so dass die Säurepufferung durch Auflösung des karbonathaltigen Gesteins erfolgt. Saure Kationen sind an den Austauscherplätzen kaum nachweisbar (Tab. A170 in Blaser et al. 2005).

A20.6.3

Nährstoffvorräte

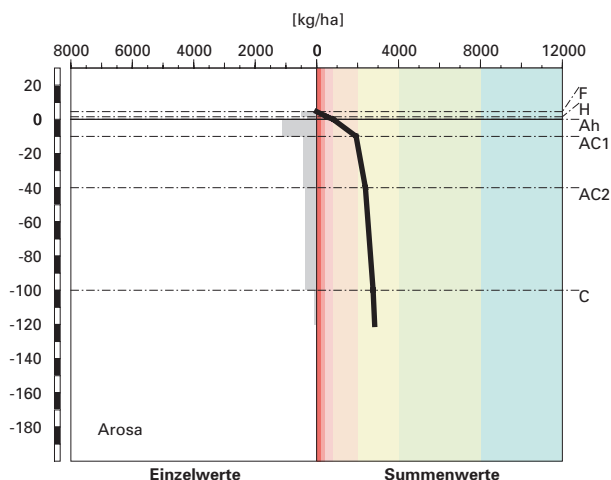
Die Abb. A20.21–A20.23 zeigen den Tiefenverlauf der Vorratzzunahme von Ca, Mg und K. Diese sind für Kalzium und Magnesium sehr ähnlich, deren Vorräte mit der Tiefe langsam aber stetig zunehmen, wogegen der Kalium-Vorrat mit der Tiefe konstant bleibt. Für den Hautwurzelraum bis 60 cm Tiefe werden die Nährstoffvorräte wie folgt beurteilt:

Ca mässig hoch
Mg mässig hoch
K sehr gering

Der extrem grosse Skelettanteil macht sich hier bezüglich der Nährstoffvorräte nachteilig bemerkbar, denn die Vorräte sind trotz der vergleichsweise grossen Kationenaustauschkapazität und der sehr hohen Basensättigung eher bescheiden. Der Boden ist dennoch potentiell bis in 120 cm Tiefe durchwurzelbar obwohl im C-Horizont keine Wurzeln mehr zu beobachten waren. Trotzdem ändert sich unter Berücksichtigung der gesamten Aufschlusstiefe an der Bewertung der Nährstoffvorräte nichts.

Das kleine Risiko für Trockenstress schränkt eine optimale Nutzung dieser Nährstoffe kaum ein.

Kalzium-Vorrat



Klassierung Vorrat

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

Abb. A20.21 Vorrat an Kalzium

Magnesium-Vorrat

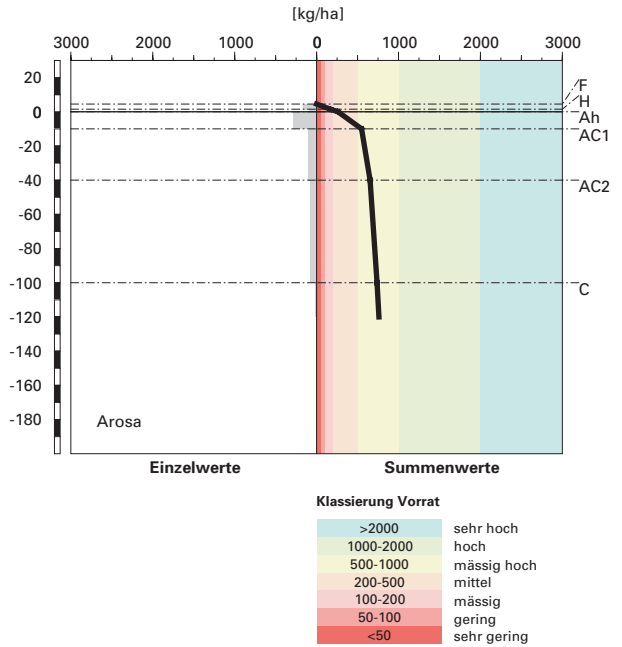


Abb. A20.22 Vorrat an Magnesium

Kalium-Vorrat

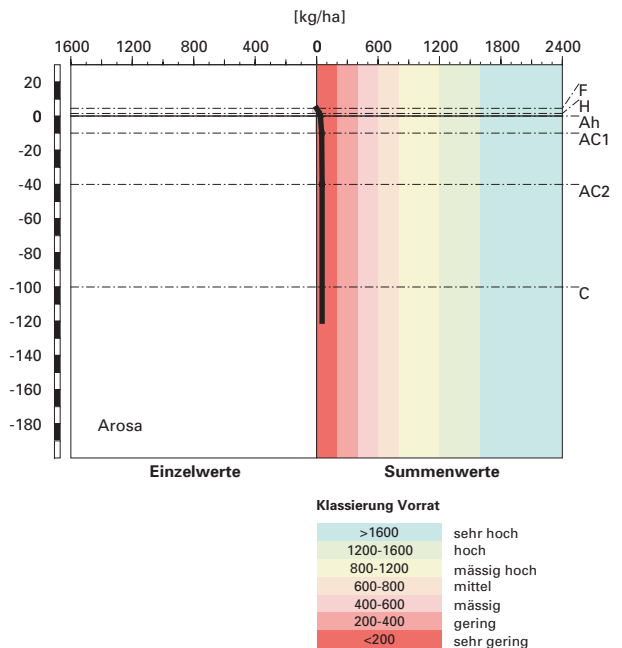


Abb. A20.23 Vorrat an Kalium

A20.7 Themenbereich «Waldbaulich relevante Bodenkennwerte und Baumartenwahl»

A20.7.1 Steckbrief für die Waldbehandlung

Der Steckbrief (Tab. A20.5) orientiert über waldbaulich relevante Standortfaktoren und Bodenkennwerte.

A20.7.2 Baumartenwahl

Der Steinrosen-Bergföhrenwald (EK Nr. 69) ist ein subalpiner Waldstandort. Er müsste in unserem Buch eigentlich wie die subalpinen Waldgesellschaften Nr. 57, 59 und 60 behandelt werden. An diesen klimatisch rauen bis kalten Standorten bestimmt fast nur noch das Klima die Baumartenwahl – der Boden dagegen hat eine marginale Bedeutung. Wegen der geringen Bedeutung des Bodens erfolgt die Baumartenempfehlung in den subalpinen Gesellschaften Nr. 57, 59 und 60 ausschliesslich gemäss BUWAL (2005), also ohne Besprechung der Bodeneigenschaften. Als Ausnahme bei den subalpinen Waldgesellschaften besprechen wir die Baumartenwahl im Steinrosen-Bergföhrenwald (EK Nr. 69) aus bodenkundlicher Sicht, weil hier von extremen Bodeneigenschaften ausgegangen werden muss, welche sich sehr wohl auf die Baumartenwahl auswirken.

Naturnähe von Bestand und Oberboden

Der Bestand besteht aus Berg- und Legföhren sowie aus einzelnen Fichten und Lärchen. Alle Bäume sind auffällig klein (Abb. A20.2). Die Baumartenmischung bewerten wir als naturnah. Lärchen und Fichten an einem Bergföhrenstandort mögen als unpassend erscheinen – wir werden nachfolgend erläutern, wieso diese Baumarten hier vorkommen. Nach Ott et al. (1997) trifft man an diesem Standort (EK Nr. 69) häufig Moder, Rohhumus oder Tangel an. Der vorhandene Tangel ist demnach standorttypisch.

Baumartenwahl gemäss standortkundlichen Grundlagenwerken

Gemäss BUWAL (2005) sind an diesem Waldstandort (Nr. 69) nur gerade die aufrechte Bergföhre und die Legföhre für die Waldverjüngung geeignet.

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.

Tab. A20.5 Steckbrief für die Waldbehandlung (Arosa)		
Standortangaben		
Relief	Höhe	1725 m
	Exposition	NNW
	Neigung	75 %
Klima	Jahresniederschlag	1258 mm
	Jahrestemperatur	2.5 °C
Ausgangsgestein	Gehängeschutt aus karbonathaltigem Gestein	
Baumbestand	Struktur	stufig
	Schlussgrad	55 %
	Baumarten (Deckung)	45 % Bergföhre
	Oberhöhe	3–5 m
Waldgesellschaft	nach E&K 1972	Nr. 69: Steinrosen-Bergföhrenwald
	nach BUWAL 2005	Nr. 69: Steinrosen-Bergföhrenwald
Bodenkennwerte		
Bodensystematik	Bodentyp	Rendzina
	Humusform	Tangel
Wasser- und Lufthaushalt	Durchlüftung	Es sind keine Vernässungsmerkmale vorhanden. Der Boden ist also stets gut durchlüftet.
	Durchwurzelbarkeit	Der Boden ist für alle Baumarten mindestens profilumfassend durchwurzelbar. Der Wurzelraum wird mit mehr als 120 cm Mächtigkeit als sehr tiefgründig klassiert. Zurzeit sind allerdings nur bis in eine Tiefe von 100 cm Wurzeln vorhanden. Diese begrenzte Durchwurzelungstiefe liegt möglicherweise daran, dass in der Umgebung des Bodenprofils nur kleinwüchsige Bäume mit entsprechend kleinem Wurzelwerk wachsen.
	pflanzenverfügbares Wasser	Unter den gegebenen klimatischen Verhältnissen besteht in diesem Bestand mit kleinwüchsigen Bäumen ein nur kleines Risiko für Trockenstress.
Säurezustand	pH-Wert/Kalkgrenze	Die organische Auflage reagiert schwach bis mässig sauer. Der Mineralboden ist in allen Horizonten alkalisch. Die Kalkgrenze verläuft unmittelbar unter der organischen Auflage an der Obergrenze des Ah-Horizontes.
	Aluminium-Toxizität	Es besteht kein Risiko für Al-Toxizität.
Nährstoffe	Verfügbarkeit im Oberboden	Die Humusform Tangel und das mässig weite C/N-Verhältnis in der organischen Auflage weisen auf eine niedrige Mineralisierungsrate hin. Unterstützt wird diese Aussage durch das mässig weite bis weite C/P-Verhältnis in der organischen Auflage. Die biologische Aktivität wird gesamthaft als niedrig beurteilt.
	Nährstoffvorräte (Ca, Mg, K)	Die Vorräte der Nährstoffkationen sind recht unausgewogen. Der Ca- und Mg-Vorrat sind mässig hoch und der K-Vorrat ist sehr gering.
Verankerung	Da der Boden sehr tiefgründig ist, wird die Verankerung des Baumbestandes als gut bewertet.	
Befahrbarkeit	Der Mineralboden reagiert selbst in nassem Zustand wenig empfindlich auf Befahren mit schweren Maschinen, weil er viel Skelett enthält. Die organische Auflage hingegen würde durch ein Befahren stark in Mitleidenschaft gezogen, mit nachteiligen Folgen für die in der organischen Auflage zahlreich vorkommenden Baumwurzeln. Mit 75 % Hangneigung kann der Waldbestand jedoch nicht mit grossen Maschinen befahren werden.	

■ Entwässerung des Bodens durch die Bäume

In diesem hoch durchlässigen Boden kann das Kriterium der biologischen Entwässerung bei der Baumartenwahl vernachlässigt werden.

■ 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

Der Boden gilt insgesamt als sehr schwach versauert und es besteht kein Risiko für Al-Toxizität. Trotz dem Vorhandensein einer organischen Auflage besteht kein Bedarf, den Säurezustand mit gezielter Baumartenwahl zu verbessern. Die lediglich schwach bis mässig saure organische Auflage zeigt, dass die beim Humusabbau entstehenden Säuren recht wirkungsvoll gepuffert werden.

■ Nährstoffangebot im Boden

Die Nährstoffumsetzung im Oberboden ist gehemmt. Eine Erhöhung der Mineralisierungsrate ist theoretisch möglich. Die Baumartenmischung ist jedoch naturnah und der Tangel standorttypisch. Waldbauliche Eingriffe können sich somit auf den Erhalt der aktuellen Baumartenmischung beschränken.

Viele Baumarten haben bezüglich Nährstoffversorgung des Bodens eine weite ökologische Amplitude. Das Angebot an Nährstoffkationen dürfte an diesem Standort für die meisten Baumarten ausreichend sein. Ob und wie stark sich der gehemmte Abbau der organischen Substanz ungünstig auf die Gehalte anderer Nährstoffe (z.B. Stickstoff und Phosphor) auswirkt, können wir mit den verfügbaren Daten nicht beantworten.

A20.7.3

Baumartenempfehlung

An diesem ziemlich kalten Standort hat der Waldbauer eine stark eingeschränkte Baumartenauswahl. Die in [Tab. A20.6](#) enthaltene Baumartenempfehlung des BUWAL (2005) ist aus bodenkundlicher Sicht einzig aufgrund des Nährstoffangebotes zu hinterfragen.

Die oben besprochenen bodenkundlichen Kriterien lassen an diesem Standort nicht einen Bergföhrenwald erwarten. Die Bodeneigenschaften sind dafür zu wenig extrem. Der einzige Hinweis, der auf ungünstige Bodenbedingungen deutet, ist die stark gehemmte Nährstoffumsetzung im Oberboden. Dies könnte mit einem kritischen Angebot an Nährstoffen wie Stickstoff oder Phosphor verbunden sein. Wir vermuten, dass die Existenz dieses Bergföhrenwaldes den Lawinen zuzuschreiben ist. Durch das nahe gelegene Tobel schiessen im Winter Lawinen zu Tale. Dabei werden die

Tab. A20.6 Baumartenempfehlung für den Hauptbestand	
Referenz	Baumarten
Grundlagenwerke (Einheit 69; BUWAL 2005)	aufrechte Bergföhre, Legföhre
Bodenkundliche Kriterien	aufrechte Bergföhre, Legföhre

grösseren Bäume von der Lawine geknickt oder beschädigt. Die Legföhren sind zum Teil unter dem Schnee begraben und sind so von den schädlichen Wirkungen der Lawinen geschützt. Durch das periodische Auskämmen der grösseren Bäume können sich die Berg- und Legföhren an diesem Standort behaupten. Ohne Lawineneinfluss würde an diesem Standort ein subalpiner Fichtenwald wachsen, wie im Hintergrund des Bestandesphotos zu sehen ist (Abb. A20.2). Es handelt sich hier also nicht um einen klassischen Bergföhrenstandort, wo sich aufgrund von Trockenheit, Vernässung oder bewegtem Boden nur noch die Berg- oder Legföhre behaupten kann.

Dieser Standort sollte seiner natürlichen Dynamik überlassen bleiben. Waldbauliche Eingriffe zur Bestandesregulierung sind nicht nötig.

A20.8 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.

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