

S3 Bodenprofil Intragna

S3.1 Themenbereich «Bodenbildungsfaktoren und Profilmorphologie»

S3.1.1 Zusammenfassende Angaben zum Profil und zu den Bodenbildungsfaktoren

Das Bodenprofil ist in [Abb. S3.1](#) dargestellt. Einen Eindruck vom Bestand vermittelt [Abb. S3.2](#). [Tab. S3.1](#) fasst wichtige Angaben zum Boden und Profilort Intragna zusammen und [Tab. S3.2](#) orientiert über die Bodenbildungsfaktoren.

S3.1.2 Verbreitung gemäss Bodeneignungskarte der Schweiz

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

S3.1.3 Besonderheiten am Profilort

Der Profilort liegt in einer grösseren Waldlichtung. Die Vegetationsaufnahme wurde in einem geschlossenen Bestand gemacht.

S3.1.4 Profilmorphologie und Klassierung

Die im Profil angesprochenen morphologischen Bodenmerkmale sind in [Tab. S3.3](#) zusammen mit einer Profilskizze dargestellt.

An der Bodenoberfläche ist eine 6 cm mächtige Streuschicht vorhanden. Die überwiegend von Birken und Kastanien aus der Baumschicht sowie aus der Krautschicht stammende Streu wird innerhalb eines Jahres nahezu vollständig abgebaut. Mit der Horizontfolge L-Ah wird die Humusform als Mull klassiert.

Unter der Streuauflage lassen sich im Mineralboden aufgrund der morphologischen Merkmale fünf Horizonte unterscheiden. Die obersten 8 cm im Profil heben sich durch die bräunlich schwarz gefärbte Feinerde von den



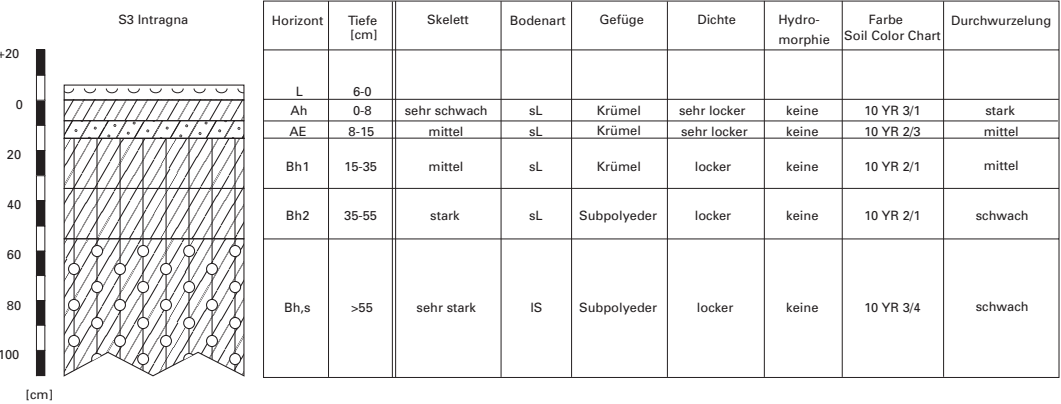
Abb. S3.1 (links) Bodenprofil Intragna

Abb. S3.2 (rechts) Bestand am Profilort Intragna

Tab. S3.1 Zusammenfassende Angaben zum Profil Intragna	
Lokalname	Intragna (Kanton Tessin, Gemeinde Intragna)
Lage	Landeskarte 1:25 000 Blatt 1312, Locarno Koordinaten 697960/114285
Waldgesellschaft (Ellenberg und Klötzli 1972)	Nr. 33: Geissbart-Eschenmischwald mit Edelkastanie (<i>Arunco-Fraxinetum castanosum</i>)
Horizontfolge	L-Ah-AE-Bh1-Bh2-Bh,s
Humusform	Mull
Bodentyp	Kryptopodsol
Bodentyp nach FAO (1988)	Podzol

Tab. S3.2 Bodenbildungsfaktoren am Profilort Intragna			
Relief	Höhe ü. M.	540 m	
	Exposition	NW	
	Neigung	45 %	
	Geländeform	Mittelhang	
Ausgangsgestein	Tektonik/Geologie	Penninikum; Metagranitoide (Granitgneise, vorwiegend Orthogestein)	
	Lithofazies (nach Tuchs Schmid 1995)	Nr.3: Orthogneise physikalische Verwitterbarkeit Gestein: mittel chemische Verwitterbarkeit Gestein: klein Tongehalt Gestein: sehr niedrig	
Klima	T/N Jahresmittel	9.2°C/2101 mm	
	T/N Januarmittel	–0.2°C/83 mm	
	T/N Julimittel	19.4°C/152 mm	
	Tage mit Schneedecke	44	
	Wärmegliederung	ziemlich warm	
	Länge der Vegetationsperiode	215–225 Tage	
Pflanzen	Schicht	Deckung	häufigste Arten
	Baumschicht (21 m Höhe)	90 %	60 % Hänge-Birke (<i>Betula pendula</i>) 15 % Edelkastanie (<i>Castanea sativa</i>)
	Strauchschicht	5 %	–
	Krautschicht	75 %	Adlerfarn (<i>Pteridium aquilinum</i>) Strand-Pfeifengras (<i>Molinia arundinacea</i>) Busch-Windröschen (<i>Anemone nemorosa</i>) Maiglöckchen (<i>Convallaria majalis</i>)
	Mooschicht	2 %	–

Tab. S3.3 Profilskizze und Morphologie des Bodenprofils Intragna
 Bodenart: sL sandiger Lehm, IS lehmiger Sand



tiefer gelegenen Horizonten ab. Spuren einer Podsolierung sind im Tiefenbereich zwischen 8 und 15 cm nur schwer zu erkennen. Die Farbe dieser Zone ist ebenfalls bräunlich schwarz, allerdings etwas heller als in 0 bis 8 cm Tiefe. Hingegen ergeben sich Hinweise auf Verlagerungsprozesse in die Anreicherungszone unterhalb 15 cm Tiefe. Die sehr dunklen Farben sind auf angereicherte Humusstoffe zurückzuführen. Der Bereich von 15 bis 55 cm Tiefe ist schwarz gefärbt. Unterhalb 55 cm Tiefe lassen dunkelbraune Farbtöne eine Sesquioxidanreicherung vermuten. Der Skelettanteil nimmt mit zunehmender Profiltiefe stetig zu. Die Bodenart ist bis 55 cm Tiefe sandiger Lehm, darunter lehmiger Sand. Bis in 35 cm Tiefe besitzt die Feinerde eine Krümelstruktur, die in grösserer Tiefe in eine Subpolyederstruktur übergeht. Die Dichte ist bis 15 cm sehr locker. Ab 15 cm bis zur Aufschlusstiefe ist sie locker. Im ganzen Profil sind keine hydromorphen Merkmale zu erkennen.

Aufgrund der morphologischen Merkmale werden die Horizonte mit L-Ah-AE-Bh1-Bh2-Bh,s bezeichnet und der Boden als Kryptopodsol klassiert.

Ergänzende Bodenmerkmale

Die Feinerde des Bodens ist gemäss pH-Hellige sehr sauer. Im Profil sind keine unüberwindbaren Hindernisse für das Wurzelwachstum vorhanden. Die Durchwurzelung ist bis 8 cm Tiefe stark und nimmt dann nach unten deutlich ab.

S3.2 Themenbereich «Physikalische Bodenkennwerte»

S3.2.1 Beschrieb einiger physikalischer Bodenkennwerte

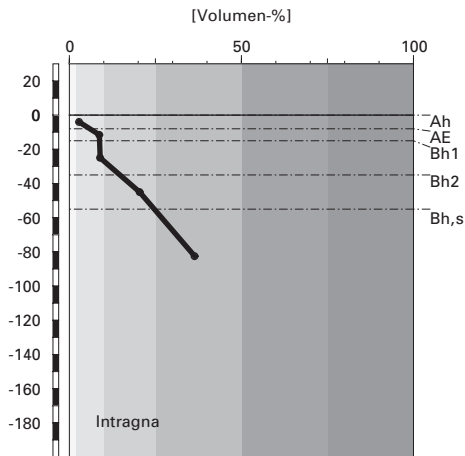
Skelettgehalt

Der Skelettgehalt nimmt mit der Tiefe deutlich und kontinuierlich bis zu einem Maximum von rund 35% im Bh,s-Horizont zu ([Abb. S3.3](#)). Die obersten 35 cm sind schwach skeletthaltig. Insgesamt enthält der Boden mittlere Skelettmengen.

Bodenart

Die Feinerde ist im gesamten Profil überwiegend sandig. Schluff und vor allem Ton kommt in kleineren Anteilen vor ([Abb. S3.4](#)). Auffällig ist, dass der Schluff- und Tongehalt nicht wie in vielen Böden beobachtet mit der Tiefe abnehmen, sondern in den Bh-Horizonten relativ gross sind. Vor allem

Skelettgehalt



Klassierung Skelettgehalt

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

Bodenart

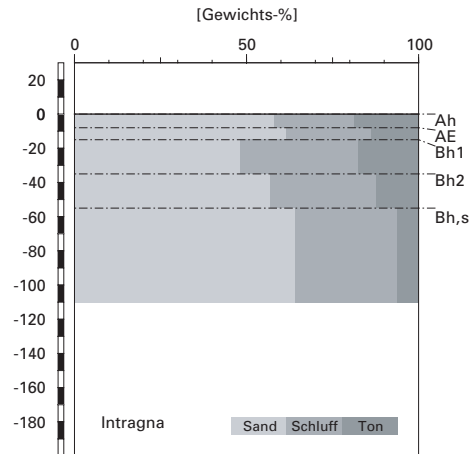


Abb. S3.3 (links) Skelettgehalt

Abb. S3.4 (rechts) Bodenart

im Bh1-Horizont scheinen neben organischer Substanz auch Ton und Schluff angereichert zu sein. In Bezug auf den Tongehalt handelt es sich in den meisten Horizonten um mittelschweren, im untersten Horizont um leichten Boden.

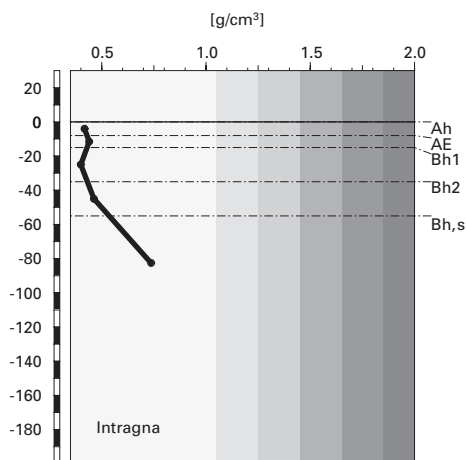
Die im Bodenprofil mit der Fingerprobe bestimmte Bodenart stimmt gut mit den Laborwerten überein (Tab. S3.3).

Dichte der Feinerde

Die Dichte der Feinerde beträgt in den obersten 55 cm des Profils weniger als 0.5 g/cm^3 und erreicht selbst im untersten Horizont einen Wert von nur rund 0.75 g/cm^3 . Die Dichte ist damit, nicht zuletzt aufgrund des grossen Humusgehaltes, im gesamten Profil äusserst gering (Abb. S3.5).

Die im Labor ermittelten Dichtewerte stimmen gut mit jenen überein, die mit der Feldmethode an der Profilwand geschätzt wurden (Tab. S3.3).

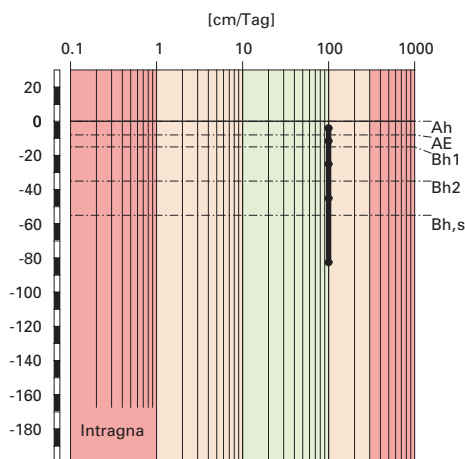
Feinerde-Dichte



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. S3.5 (links) Dichte der Feinerde

Abb. S3.6 (rechts) Wasserleitfähigkeit im gesättigten Boden

Wasserleitfähigkeit im gesättigten Boden

Die durchwegs geringen Dichtewerte in diesem Boden haben zur Folge, dass alle Horizonte hoch durchlässig sind (Abb. S3.6).

Pflanzenverfügbares Wasser

Der lediglich moderate Skelettgehalt und der bis 55 cm Tiefe bemerkenswert grosse Humusanteil wirken sich positiv auf das Speichervermögen des Bodens aus. Dieses beträgt bis 120 cm Tiefe 292 l/m² und ist damit äusserst hoch (Abb. S3.7).

S3.2.2

Bodenkundliche und ökologische Interpretationen

Wasser- und Lufthaushalt des Bodens

Im Boden wurden keine hydromorphen Merkmale festgestellt, was angesichts der hohen Wasserdurchlässigkeit nicht erstaunt (Abb. S3.6). Gesät-

pflanzenverfügbares Wasser

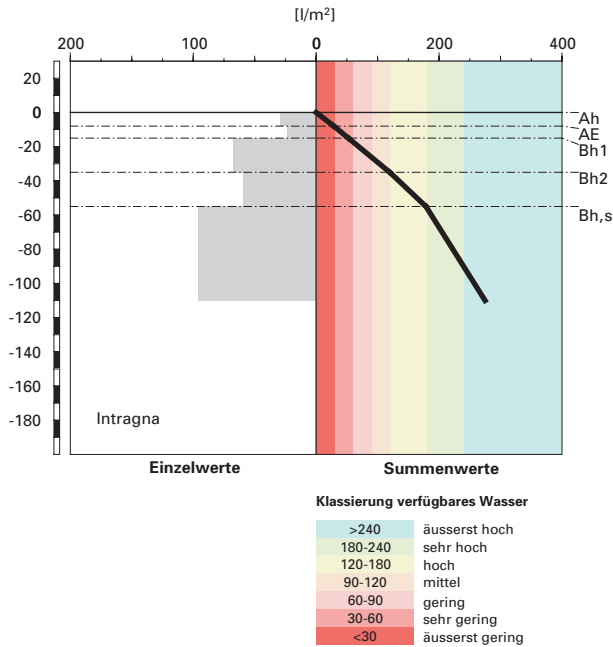


Abb. S3.7 Pflanzenverfügbares Wasser

tigte Phasen sind, falls sie überhaupt vorkommen, von so kurzer Dauer, dass sie nicht zu Vernässungsmerkmalen führen.

Durchwurzelbarkeit des Bodens

Aus bodenphysikalischer Sicht können diesen Boden alle Baumarten mindestens profilumfassend durchwurzeln, da die Dichte der Feinerde im ganzen Profil weniger als 1.4 g/cm^3 beträgt und die Durchlüftung in allen Horizonten stets ausreichend ist. Die Gründigkeit des Bodens ist nicht eingeschränkt und wird mit $>120 \text{ cm}$ als sehr tiefgründig klassiert. Der Wurzelraum wird vom aktuellen Bestand, der sich überwiegend aus Birken und Edelkastanien zusammensetzt, gut genutzt. Wurzeln sind bis zur Profilssole (110 cm) vorhanden und dringen sicher noch tiefer in den Unterboden ein.

Wasserversorgung des Baumbestandes

Der bis 120 cm Tiefe berechnete Wasservorrat reicht in Trockenperioden ohne bedeutende Niederschläge für rund 35 Tage. Danach leidet der Baumbestand an Wassermangel. Da der Boden tiefer als 120 cm durchwurzelbar ist, dürfte Trockenstress sogar noch später eintreten. Das Risiko für Trockenstress bewerten wir an diesem Eschenmischwald-Standort (EK 33) unter den gegebenen klimatischen Bedingungen als klein.

Bodenbefahrbarkeit

Der Boden reagiert in nassem Zustand empfindlich auf Befahren mit schweren Maschinen, weil er bis 55 cm Tiefe relativ wenig Skelett enthält. Ein Befahren des Bestandes mit schweren Maschinen ist allerdings nicht möglich, denn das Gelände ist mit rund 45% Neigung zu steil.

S3.3 Themenbereich «Bodenhauptbestandteile»

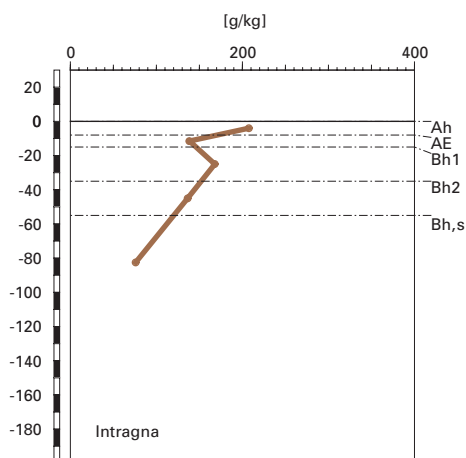
S3.3.1 Charakterisierung der Bodenhauptbestandteile

Organische Substanz

Die Baumschicht in Intragna weist einen Deckungsgrad von 90 % auf und besteht zu zwei Dritteln aus Birke und zu rund 20% aus Kastanie. Unter den Baumkronen gedeiht trotz dem hohen Deckungsgrad eine üppige Krautschicht vor allem aus Adlerfarn und Strand-Pfeifengras. Die Streu stammt somit von verschiedenen Pflanzenarten und ist mit Ausnahme der Kastanienstreu relativ gut abbaubar. Die Kastanie bildet am Profilort Intragna, welcher auf 540 m.ü.M. liegt noch reichlich Früchte und liefert mit den Fruchtschalen schwer abbaubare Streuanteile. Allerdings liegt der Profilort am Rand einer Waldlichtung, womit die Streu vor allem aus der Krautschicht stammt. Es hat sich eine 6 cm dicke Streuschicht gebildet.

Die obersten vier Mineralerde-Horizonte sind sehr dunkel gefärbt. Der Ah- und der AE-Horizont enthalten 20.7% bzw. 13.8% organischen Kohlenstoff (C_{org} ; Abb. S3.8). Die beiden Bh-Horizonte sind schwarz gefärbt. Sie sind sogar noch dunkler als der Ah-Horizont, enthalten jedoch mit 16.8% bzw. 13.6% nicht ganz so viel C_{org} wie der Ah-Horizont, sind aber reicher an organischer Substanz als der AE-Horizont. Auch der Bh_s-Horizont weist noch einen mittleren C_{org} -Gehalt von 7.6% auf. Durch diese grossen Humusgehalte ergibt sich ein Vorrat an organischem Kohlenstoff von 524 t/ha (Abb. S3.9).

organischer Kohlenstoff



Kohlenstoff-Vorrat

(C_{org})

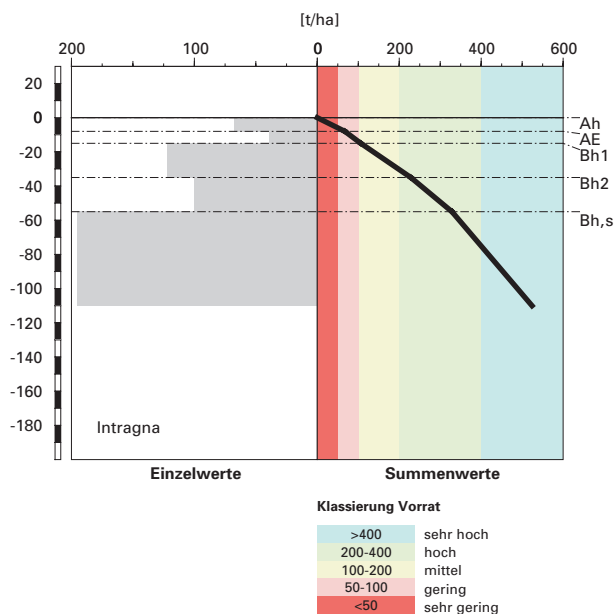


Abb. S3.8 (links) Gehalt an organischem Kohlenstoff

Abb. S3.9 (rechts) Vorrat an organischem Kohlenstoff

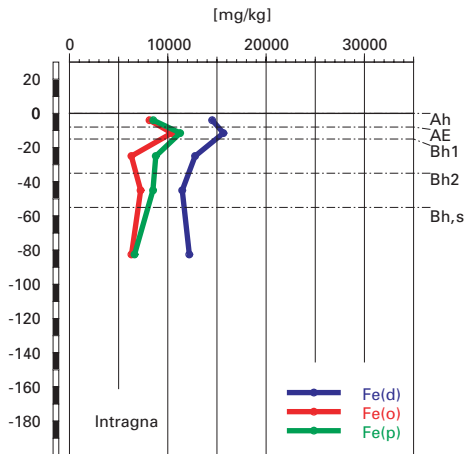
Tonverteilung sowie Verteilung von Aluminium- und Eisenoxiden

Die Tiefenverteilung des Tongehaltes verläuft genau parallel zu jener des organischen Kohlenstoffes. Das Maximum befindet sich im Ah-Horizont, im AE-Horizont ist eine Abnahme um rund 5% zu verzeichnen, bevor im Bh1-Horizont ein zweites Maximum folgt (Abb. S3.4). Gegen den Bh,s-Horizont nimmt der Tongehalt wieder ab.

Die Tiefenverteilungen der extrahierbaren Al- und Fe-Verbindungen sind so, wie sie in Abb. S3.10 und S3.11 ersichtlich sind, nur schwer interpretierbar. Durch die grossen Humusgehalte werden die extrahierbaren Al- und Fe-Gehalte je nach Horizont unterschiedlich stark verdünnt, was beispielsweise zu relativ grossen Eisengehalten im AE-Horizont führt (Abb. S3.10). Deshalb werden für die anschliessende Interpretation alle Gehalte auf die humusfreie Mineralerde bezogen (in Abb. S3.10 und S3.11 nicht dargestellt) und in diesem Kapitel die auf humusfreie Mineralerde bezogenen Gehalte vorgestellt. Für das Dithionit-extrahierbare Eisen (Fe_d)

Eisen-Oxide

(Gehalte)



Aluminium-Oxide

(Gehalte)

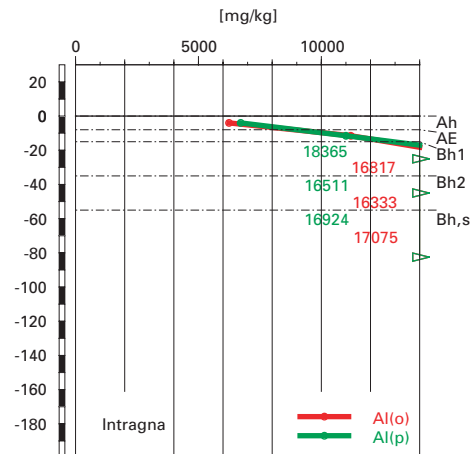


Abb.S3.10 (links) Gehalte an Dithionit- (Fe_d), Oxalat- (Fe_o) und Pyrophosphat- (Fe_p) extrahierbarem Eisen

Abb.S3.11 (rechts) Gehalte an Oxalat- (Al_o) und Pyrophosphat- (Al_p) extrahierbarem Aluminium

Eisen- und Aluminiumoxide

(Verhältnisse)

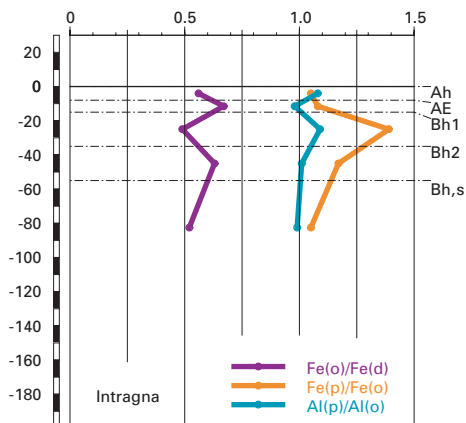


Abb.S2.12 Verhältnisse der Fe- und Al-Oxide

resultiert dadurch eine Tiefenverteilung mit dem grössten Gehalt im Ah-Horizont und einer Abnahme der Gehalte mit der Profiltiefe. Beim Oxalat- und Pyrophosphat-extrahierbaren Eisen (Fe_o bzw. Fe_p) befindet sich das Maximum trotz Berücksichtigung der Verdünnung durch die organische Substanz im AE-Horizont. Die Zunahme vom Ah- zum AE-Horizont beträgt bei Fe_o 0.5 g/kg und beim Fe_p rund 1 g/kg. Unterhalb des AE-Horizontes nehmen beide Gehalte auf das Minimum im Bh,s-Horizont ab. Auffallend und ungewöhnlich ist, dass die Fe_p -Gehalte im ganzen Profil grösser sind als die Fe_o -Gehalte (Abb. S3.10).

Dies gilt mit Ausnahme des AE- und des Bh,s-Horizontes auch für die Al_p - bzw. Al_o -Gehalte (Tab. A240 in Blaser et al. 2005), nur sind hier die Differenzen weniger ausgeprägt. Die Tiefenverteilungen dieser beiden Fraktionen sind identisch. Vom Ah- bis zum Maximum im Bh1-Horizont erfolgt eine lineare Zunahme um 14.7 g/kg bei Al_o und um 16.2 g/kg bei Al_p (Abb. S3.11). In den tiefer gelegenen Horizonten nehmen die Gehalte bis in den Bh,s-Horizont wieder ab, jedoch nur um 5.2 g/kg bzw. 7.7 g/kg.

Das Fe_o/Fe_d -Verhältnis hat profilumfassend mehr oder weniger konstante Werte um 0.6 und die Fe_p/Fe_o - sowie Al_p/Al_o -Verhältnisse streuen im ganzen Profil um den Wert 1 (Abb. S3.12). Das Fe_p/Fe_o -Verhältnis ist im Bh1-Horizont mit 1.4 unrealistisch gross (Abb. S3.12).

S3.3.2

Bodenkundliche Interpretation

Die Streu, welche in Intragna vor allem von Birke, Kastanie, Adlerfarn und Strand-Pfeifengras stammt, ist mit Ausnahme der Kastanienstreu relativ gut abbaubar. Zudem sind im milden Klima mit durchschnittlichen jährlichen Niederschlägen von 2101 mm und einer Jahresdurchschnittstemperatur von 9.2°C sowohl die Feuchtigkeits- als auch die Temperaturverhältnisse für den Abbau der organischen Substanz gut. Durch die NW-Exposition des Profilortes dürften extreme Trockenphasen im Sommer zeitlich begrenzt sein. Am Profilort hat sich eine Streuschicht von 6 cm Mächtigkeit angesammelt. Ein F-Horizont ist jedoch nicht erkennbar.

Im Ah-Horizont werden die C/N- bzw. C/P-Verhältnisse mit rund 18 bzw. 301 als mittel klassiert. Aufgrund des C/N-Verhältnisses ist im Ah-Horizont eine mittlere Mineralisierung der organischen Substanz zu erwarten. Die Krümelstruktur bis in eine Tiefe von 35 cm weist ebenfalls auf eine rege biologische Aktivität hin. Allerdings wird die Mikroflora bei pH-Werten von 3.7 bis 4.1 von Pilzen dominiert, welche die Streu nur unvollständig abbauen und für die Produktion von organischen Säuren und Humusstoffen verantwortlich sind. Zwar sind die meisten Streukomponenten gut abbaubar, jedoch sind die Kastanienstreu und von dieser vor allem die Fruchtschalen,

schlecht mineralisierbar und tragen somit stark zu einer Humusbildung bei. Bestimmte Humusstoffe werden in gelöster Form im Boden in die Tiefe verlagert und an Al- und Fe-Verbindungen adsorbiert, womit sie gegen weiteren Abbau weitgehend geschützt sind. Die Humusverlagerung ist am leicht tieferen C_{org} -Gehalt im AE-Horizont und an den erhöhten Gehalten in den Bh-Horizonten ersichtlich (Abb. S3.8). Durch die Humusbildung und -stabilisierung konnte sich im Mineralboden ein Vorrat an organischem Kohlenstoff von 524 t/ha aufbauen (Abb. S3.9), was im gesamtschweizerischen Vergleich ein sehr hoher Wert ist.

Die Tongehalte sind für einen Boden auf Gneis relativ hoch, da das Ausgangsgestein natürlicherweise einen kleinen Tonmineralgehalt hat und eher grobkörnig verwittert. Weil die Tongehalte absolut parallel mit den C_{org} -Gehalten verlaufen, besteht der Verdacht, dass die grossen Tongehalte ein Artefakt der Messung sind.

Die Tiefenverteilungen der auf humusfreie Mineralerde bezogenen Gehalte der extrahierbaren Fe-Verbindungen lassen keine ausgeprägte Verlagerung von Eisen erkennen. Die Abnahme von Fe_d mit der Profiltiefe widerspiegelt den gleichsinnig abnehmenden Verwitterungsgrad. Einzig die leichte Zunahme von Fe_o und Fe_p vom Ah- in den AE-Horizont deutet auf eine schwache Fe-Verlagerung hin. Der Verlagerungsindex von Fe_o (Quotient von Fe_o im AE- und im Ah-Horizont bezogen auf humusfreie Mineralerde) beträgt jedoch nur 1.04.

Aluminium hingegen wurde deutlich verlagert. Sowohl Al_o als auch Al_p haben ein ausgeprägtes Maximum im Bh1-Horizont. Der Verlagerungsindex von Al_o (Quotient von Al_o im Bh1- und im Ah-Horizont) beträgt 2.4. Allerdings wurde Aluminium vermutlich bereits tiefer als in den Bh1-Horizont verlagert. Oft beobachtet man in sauren Braunerden und Kryptopodsolen eine Aluminiumverlagerung bis in jene Tiefe, in welcher der pH einen Wert von rund 4.5 erreicht (Blaser et al. 1997). Der pH-Wert ist profilumfassend kleiner als 4.5, so dass Aluminium vermutlich aus der erschlossenen Profiltiefe ausgewaschen wurde. Das erklärt auch die nur im Unterboden im Vergleich zu Eisen grösseren Aluminiumgehalte (Abb. S3.10 und S3.11).

Das Fe_o/Fe_d -Verhältnis streut zwischen 0.5 und 0.7 ohne klaren Trend (Abb. S3.12). Das bedeutet, dass mehr als 50% der extrahierbaren Fe-Verbindungen in amorpher Form vorliegen. Der grosse Humusgehalt verhindert eine Kristallisation der im Boden gebildeten amorphen Fe-Verbindungen. Diese sind, wie auch die Al-Verbindungen, stark mit der organischen Substanz assoziiert, was an den sehr grossen Fe_p/Fe_o - und Al_p/Al_o -Verhältnissen ersichtlich ist. Dass Pyrophosphat mehr Al- und Fe-Verbindungen extrahiert als Oxalat, hängt vermutlich mit den extrem grossen Humus-

gehalten zusammen. Zudem dürfte der Pyrophosphat-Extrakt in diesem Boden stark dispergierend wirken.

Aufgrund der morphologischen Merkmale wurde dieser Boden als Kryptopodsol bezeichnet, insbesondere weil die schwarz gefärbte Zone in 15 bis 55 cm Tiefe auf verlagerte und hier angereicherte organische Substanz hinweist. Zudem wurde in mehr als 55 cm Tiefe aufgrund der stellenweise rötlichen Farbe ein Bh_s-Horizont definiert. Die Interpretation der Al- und Fe-Oxide legt aber eher eine Klassierung als Humuspodsol nahe. Dieser Widerspruch zwischen der Interpretation im Feld und den Laboranalysen kann in diesem Fall nicht vollständig ausgeräumt werden. Eine mögliche Hypothese beruht auf der Annahme, dass die Dominanz der Birke an diesem Standort auf ehemalige Waldbrände hinweist. Zusätzliche Hinweise auf Waldbrände liefern Kohlereste, welche im Boden vorhanden sind. Bei intensiven Waldbränden kann die organische Substanz bis in relativ grosse Bodentiefen verglimmen und verkohlen. Die schwarze Farbe der Bh-Horizonte stützt diese Hypothese. Unter der Hitzeentwicklung während dieser Verkohlung können amorphe Al- und Fe-Oxide entwässern und kristallisieren. Damit werden die für Kryptopodsole charakteristischen Tiefenverteilungen der amorphen Oxide rückgängig gemacht, weshalb die Tiefenverteilung der Al- und Fe-Oxide im heutigen Zustand eher auf einen Humuspodsol hinweist.

S3.4 Themenbereich «Säurezustand»

S3.4.1 Charakterisierung des Säurezustandes

pH-Wert

Die Feinerde im Boden bei Intragna ist sehr stark bis stark sauer (Abb. S3.13). Die pH-Werte variieren im ganzen Bodenprofil nur wenig. Sie nehmen vom Ah-Horizont, wo der pH-Wert mit 3.7 in der Säureklasse 5 liegt, auf einen maximalen Wert von 4.3 im Bh_s-Horizont zu. Der überwiegende Teil des Bodens befindet sich in der Säureklasse 4.

Austauschbare Kationen und Basensättigung

Mit Ausnahme des Ah-Horizontes, in welchem verhältnismässig grosse Mengen austauschbarer Nährstoffkationen vorhanden sind, ist der Kationenaustauscher zum grössten Teil mit sauren Kationen, insbesondere mit Aluminium, besetzt (Abb. S3.14). Im Ah-Horizont, der sich im Eisen-Pufferbereich befindet, hat das austauschbare Eisen einen Anteil am Kationen-

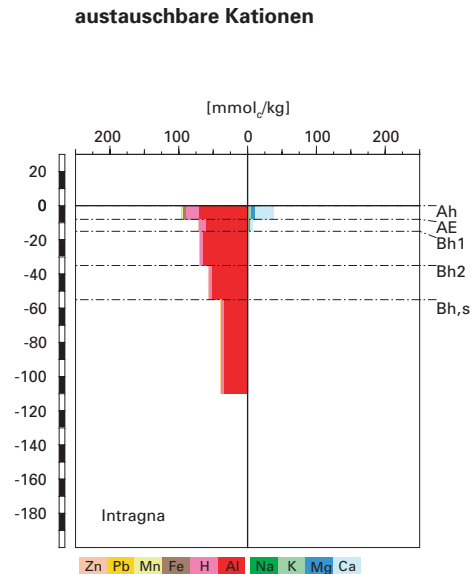
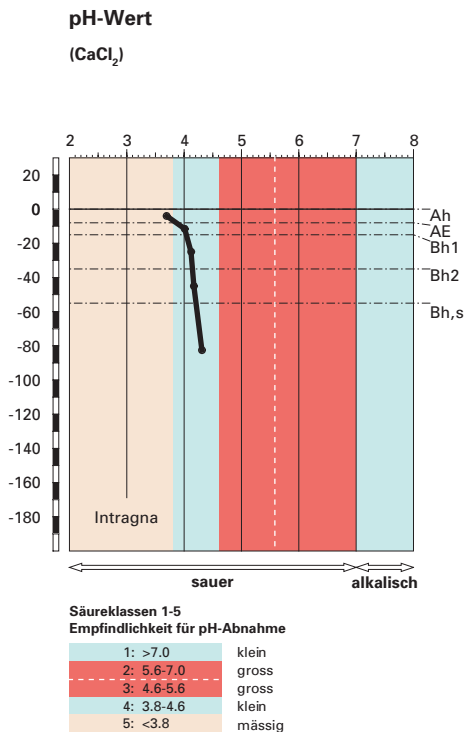


Abb.S3.13 (links) pH-Wert und Säureklassen

Abb.S3.14 (rechts) Belegung des Kationenaustauschers

austauscher von rund 3.5%. Hervorzuheben ist, dass im ganzen Profil Protonen am Kationenaustauscher austauschbar gebunden sind. Im Ah-Horizont beträgt deren Anteil rund 14%. Mit der Tiefe nimmt er auf etwa die Hälfte ab. Die Basensättigung ist im Ah-Horizont mit rund 30% gegenüber allen anderen Horizonten erhöht und wird als mässig klassiert (Abb.S3.15). Im AE-Horizont ist die Basensättigung gering, in allen tiefer gelegenen Horizonten sehr gering.

S3.4.2 Interpretationen zum Säurezustand

Stand der Bodenversauerung

Dieser Kryptopodsol ist sehr stark versauert. Beinahe 95% der gesamten Austauschkapazität der Feinerde ist mit sauren Kationen belegt und der maximale pH-Wert beträgt nur 4.3. Die Versauerungsfront, erkennbar am austauschbaren Aluminium, befindet sich tiefer als die Profilssole. Da die

Basensättigung

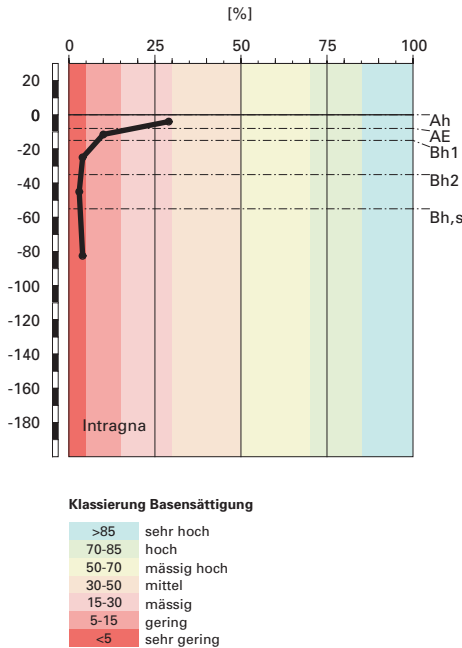


Abb. S3.15 Basensättigung

Säurepufferung fast im ganzen Boden überwiegend durch die Auflösung von Aluminiumverbindungen erfolgt, wurden die Nährstoffkationen zu einem grossen Teil von den Austauscherplätzen verdrängt, was im grössten Teil des Profils zu einer sehr geringen Basensättigung führte. Im Ah-Horizont erfolgt die Säurepufferung zusätzlich durch Auflösung von Eisenverbindungen. Dies widerspiegelt sich in der Belegung des Kationenaustauschers, der nur im Ah-Horizont eine markante Belegung mit Eisen aufweist. Der grosse Anteil austauschbarer Protonen ist durch den grossen Humusgehalt im gesamten Boden zu erklären.

Diese sehr starke Versauerung ist etwas aussergewöhnlich, denn der Standort befindet sich in einem ziemlich warmen Klima auf nur 540 m. ü. M. und die Vegetation ist ein aufgelichteter Laubmischwald. Als mögliche Ursache dieses Versauerungszustandes kommen das basenarme Ausgangsgestein, das aus Granitgneis besteht, die grosse Durchlässigkeit des Bodens sowie die hohen Niederschlagsmengen in Frage. Durch das Zusammenwirken dieser Faktoren erfolgt ein steter Säureexport aus der Streuauflage in grössere Bodentiefen, so dass auch diese der Versauerung unterliegen.

Risiko für Boden und Pflanzen

Das Risiko für eine weitere pH-Abnahme ist in diesem Kryptopodsol sehr klein, da sich kein Horizont in den schlecht puffernden Säureklassen 2 oder 3 befindet. Der Ah-Horizont befindet sich in der nur mässig puffernden Säureklasse 5. Da der Versauerungsdruck im Oberboden am grössten ist, ist hier die Empfindlichkeit für eine weitere pH-Abnahme erhöht. Der Nährstoffkreislauf bewirkt allerdings, dass die Basensättigung trotz der sehr stark sauren Feinerde im Ah-Horizont vergleichsweise hoch bleibt.

Das Risiko für Al-Toxizität ist bei empfindlichen Baumarten bereits im aktuellen Zustand gross, denn rund 91% der Feinerde des Bodens weisen ein kritisches BC/Al-Verhältnis auf. Mit Ausnahme des Ah-Horizontes, wo das BC/Al-Verhältnis 0.53 beträgt, liegen die BC/Al-Verhältnisse zwischen 0.04 und 0.13 und sind somit durchwegs im kritischen Bereich <0.2 (Tab. A241 in Blaser et al. 2005).

S3.5 Themenbereich «Schwermetalle»

S3.5.1 Tiefenverteilung der Schwermetalle

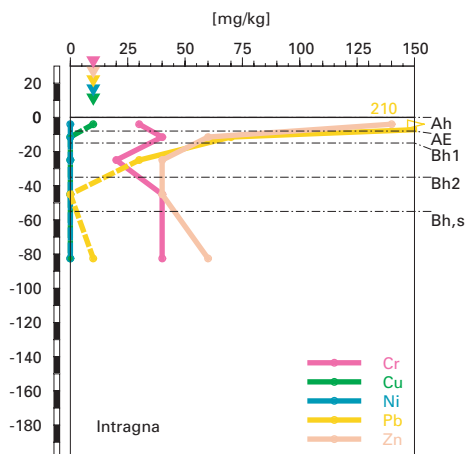
In diesem Boden verhalten sich Zn und Pb ähnlich (Abb. S3.16). Beide Schwermetalle haben ihre bei weitem höchsten Gehalte im Ah-Horizont. Mit der Tiefe nimmt der Pb-Gehalt bis zum Bh2-Horizont stark ab und nimmt dann wieder bis zum Bh,s-Horizont leicht zu. Der Zn-Gehalt nimmt vom Ah- zum AE-Horizont stark, darunter nur wenig bis zum Bh1-Horizont ab. Vom Bh2- zum Bh,s-Horizont wird er, wie derjenige von Pb, wieder etwas höher.

Mit Ausnahme eines ausgeprägten Minimums im Bh1-Horizont variiert der Cr-Gehalt im Profil nur wenig. Kupfer und Ni liegen, mit Ausnahme von Cu im Ah-Horizont, unter der Bestimmungsgrenze.

S3.5.2 Wertung der Schwermetallgehalte im untersten Mineralerde-Horizont im geochemischen Vergleich

Bemerkung: Für Cu und Ni ist die Basis für den geochemischen Vergleich der Gehalt im Salpetersäure-Extrakt. Bezogen auf das Ausgangsgestein Orthogneis (Lithofazies 3), liegen der Pb-Gehalt im Bh,s-Horizont unterhalb, der Cu-Gehalt innerhalb, der Cr-, Ni- und Zn-Gehalt oberhalb typischer Wertebereiche.

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



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

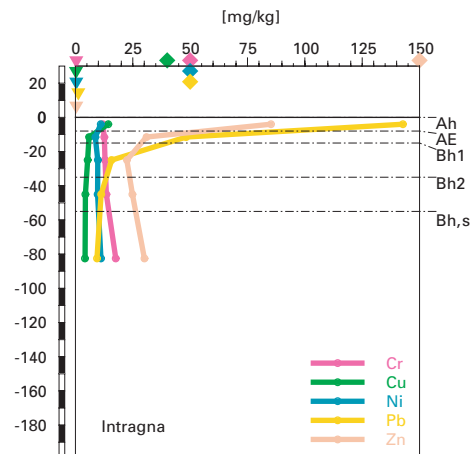


Abb. S3.16 (links) Schwermetalle: effektive Totalgehalte

Abb. S3.17 (rechts) Schwermetalle: Salpetersäure-extrahierbare Gehalte

Anmerkung: Weil das Ausgangsgestein, aus dem sich der Boden entwickelt hat, nicht aufgeschlossen werden konnte, werden für den geochemischen Vergleich die Schwermetallgehalte im Bh,s-Horizont beigezogen. Da dieser Boden durch schwache Verlagerung bis zur Profilssole gekennzeichnet ist, dürften die auf dem Bh,s-Horizont basierenden Bewertungen für mobile Schwermetalle (Zn, Ni) eher etwas zu hoch sein.

S3.5.3

Beurteilung der quellenunabhängigen Belastung nach VBBo

Mit Ausnahme des Bh,s-Horizontes hat dieser Boden einen so hohen Humusgehalt (Abb. S3.8), dass die volumenbezogenen Konzentrationen (mg/dm³; Tab. A244 in Blaser et al. 2005) beurteilt wurden. Diese sind niedriger als die massenbezogenen Gehalte (mg/kg; Abb. S3.17), da die Dichte kleiner ist als 1 g/cm³.

Bezogen auf die VBBo liegen die meisten Schwermetalle profilumfassend in sehr niedrigen bis niedrigen Gehalten vor (Abb. S3.17). Allerdings ist der Pb-Gehalt im Ah-Horizont sehr hoch und überschreitet damit den Richtwert der VBBo.

Weil das Ausgangsgestein, aus dem sich der Boden entwickelt hat, nicht aufgeschlossen werden konnte, wurden die Anreicherungs-faktoren relativ zum Bh,s-Horizont berechnet. Da dieser Boden durch schwache Ver-lagerung bis zur Profilsohle gekennzeichnet ist, können keine Aussagen bezüglich Anreicherung oder Verarmung relativ zum Ausgangsgestein gemacht werden.

Zink ist im Ah-Horizont gegenüber dem Bh,s-Horizont deutlich angereichert, während die Bh-Horizonte leicht an Zn verarmt sind (Tab. S3.4). Blei ist vom Ah- bis zum Bh1-Horizont signifikant angereichert. Der Bh1-Horizont ist zudem leicht an Cr verarmt. Die Anreicherungs-faktoren wider-spiegeln damit die Tiefenverteilungen der Schwermetalle in diesem Boden (Abb. S3.16), was im profilumfassend praktisch konstanten Zr-Gehalt (Tab. A245 in Blaser et al. 2005) begründet ist.

Die Anreicherungen von Zn und Pb in den oberen Horizonten haben un-terschiedliche Ursachen. Zink als Mikronährstoff wird im Nährstoffkreislauf mit dem Streufall wieder in den Boden zurückgebracht. Blei hingegen dürfte mehrheitlich anthropogener Herkunft sein. Es wurde atmogen in den Oberboden eingetragen und dort im Humus angereichert. Unter den profil-umfassend stark bis sehr stark sauren Verhältnissen wurde ein Teil des Pb in tiefere Horizonte verlagert und dort ebenfalls angereichert.

Die leichte Verarmung der Bh-Horizonte an Zn kann im wesentlichen auf säurebedingte Verlagerung des unter sauren Verhältnissen sehr mobilen Schwermetalls in den Bh,s-Horizont bzw. den Untergrund zurückgeführt werden. Auch die leichte Zunahme des Salpetersäure-extrahierbaren Ni-Gehaltes vom Bh2- in den Bh,s-Horizont (Abb. S3.17) kann am ehesten mit säurebedingter Verlagerung erklärt werden. Wie weit Verlagerung zusam-men mit gelöster organischer Substanz mitspielt, kann mit den vorhande-nen Daten nicht festgestellt werden. Für das Minimum von Cr im Bh1-Hori-zont gibt es keine befriedigende Erklärung.

Tab. S3.4 Anreicherungs-faktoren						
Horizont	Tiefe [cm]	Anreicherungs-faktor				
		Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Ah	0– 8	0.96	n.b.	n.b.	26.83	2.98
AE	8–15	1.05	n.b.	n.b.	7.32	1.05
Bh1	15–35	0.58	n.b.	n.b.	3.45	0.77
Bh2	35–55	1.05	n.b.	n.b.	< 1.05	0.70
Bh,s	>55	1.00	n.b.	n.b.	1.00	1.00

Schwermetallmobilität

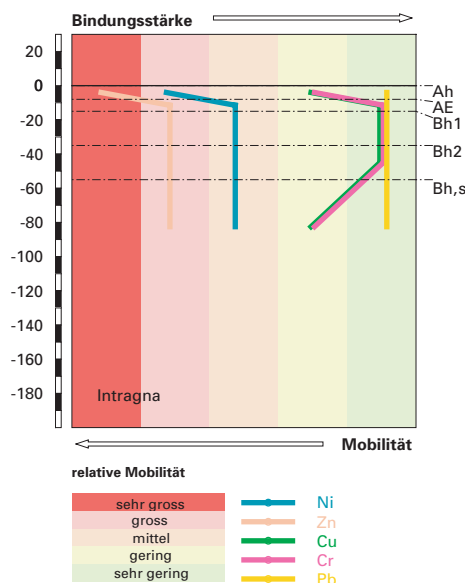


Abb. S3.18 Mobilität der Schwermetalle

S3.5.5 Schätzung der Mobilität der Schwermetalle

In diesem profilumfassend stark bis sehr stark sauren Boden wird die Mobilität von Zn als gross bis sehr gross eingeschätzt (Abb. S3.18). Nickel ist wegen der profilumfassend sehr hohen Humusgehalte etwas weniger mobil. Die Mobilität von Cr, Cu und Pb wird vor allem wegen der starken Affinität für die organische Substanz im ganzen Profil als sehr gering bis gering geschätzt. Die Tiefenverteilungen (Abb. S3.16 und S3.17) und Anreicherungsfaktoren (Tab. S3.4) legen nahe, dass höchstens eine geringfügige mobilitätserhöhende Verlagerung mit gelöster organischer Substanz stattfindet.

Trotz der profilumfassend tiefen pH-Werte dürfte das Grundwasser nur gerade mit Zn wesentlich belastet werden. Nickel könnte ebenfalls ausgewaschen werden, liegt aber in sehr niedrigen Gehalten vor.

S3.5.6 Schätzung der Gefährdung von Mikroorganismen

Im Ah- und AE-Horizont sind mit Ausnahme von Pb alle Schwermetalle in Gehalten vorhanden, welche für pflanzliche und tierische Mikroorganismen in Waldböden unkritisch sind. Hingegen liegt der Pb-Gehalt im Ah-Horizont im Grenzbereich zur Toxizität.

S3.6 Themenbereich «Nährstoffe»

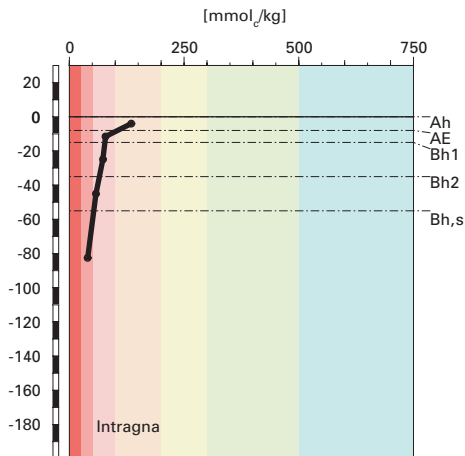
S3.6.1 Nährstoffverfügbarkeit im Oberboden

Dank dem ziemlich warmen Klima sowie der lichten Laubwaldvegetation konnte sich an diesem Standort trotz dem stark sauren Boden ein Mull bilden. Zusammen mit der Krümelstruktur, die bis in 35 cm Tiefe zu beobachten ist, lässt dies auf eine hohe biologische Aktivität und damit verbunden, auf eine gute Nährstoffverfügbarkeit schliessen. Das als mittel bewertete C/N-Verhältnis von 18 im Ah-Horizont ist für Humusformen im Übergang zwischen Mull und Moder typisch. Für ein solches C/N-Verhältnis wird angenommen, dass die Mineralisierung der organischen Substanz nicht ganz optimal und damit die Nährstoffnachlieferung schwach gehemmt ist. Das ebenfalls als mittel klassierte C/P-Verhältnis von 301 bestätigt diese Beurteilung.

S3.6.2 Nährstoffgehalte

Im regionalen Vergleich ist der Boden relativ ton- und humusreich. Trotzdem ist die Kationenaustauschkapazität bis in 55 cm Tiefe als lediglich gering bis mittel zu beurteilen ([Abb. S3.19](#)). Im Bh_s-Horizont ist die Kationenaustauschkapazität nur noch sehr gering. Ab 8 cm Tiefe nimmt die Kationenaustauschkapazität, trotz des deutlich erhöhten Ton- und Humusgehaltes im Bh₁-Horizont, stetig ab. Der Kationenaustauscher ist im ganzen Profil grösstenteils mit Aluminium belegt ([Abb. S3.20](#)). Bis in den Bh₁-Horizont nimmt die Al-Belegung zu und variiert im Tiefenverlauf danach nur noch wenig. Basische Nährstoffkationen kommen nur im Ah-Horizont in nennenswerten Anteilen vor, wobei Kalzium am stärksten vertreten ist. Magnesium sowie Kalium sind in allen Horizonten in ungefähr gleichen Anteilen vorhanden.

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)

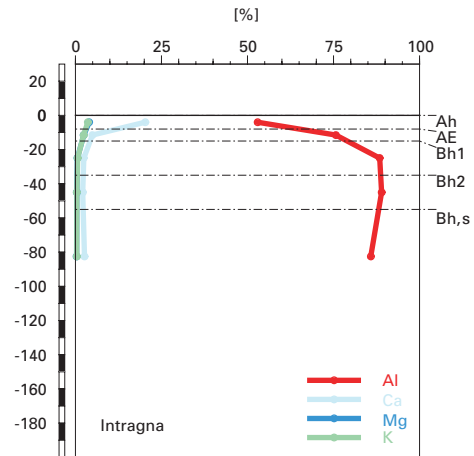


Abb. S3.19 (links) Kationenaustauschkapazität

Abb. S3.20 (rechts) Belegung des Kationenaustauschers

S3.6.3

Nährstoffvorräte

Die Vorräte an austauschbaren Nährstoffkationen sind im ganzen Boden klein (**Abb. S3.21–S3.23**). Bezogen auf die Referenztiefe von 60 cm lautet die Bewertung wie folgt:

Ca gering
Mg sehr gering
K sehr gering

Obwohl der Boden mindestens 110 cm mächtig und die Durchwurzelbarkeit im ganzen Profil nicht eingeschränkt ist, ändert sich die Beurteilung der Nährstoffvorräte für den gesamten Boden nicht. Das Risiko für Trockenstress ist an diesem Waldstandort klein. Die Nährstoffvorräte können deshalb von den Pflanzen uneingeschränkt genutzt werden.

Kalzium-Vorrat

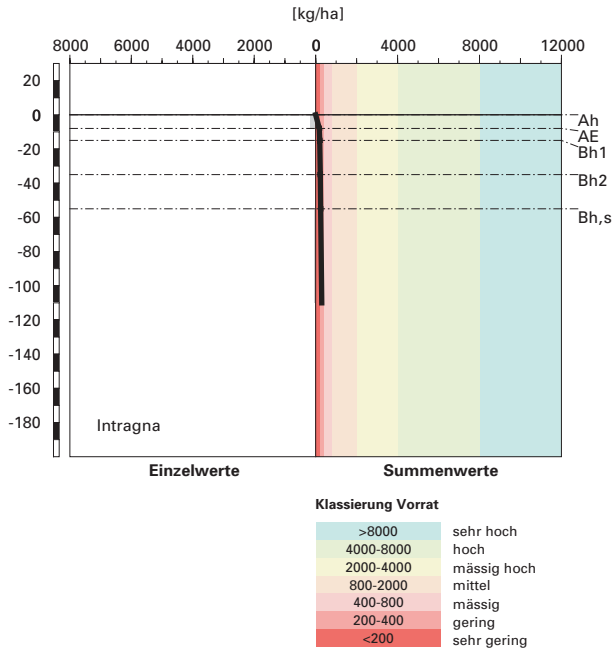


Abb. S3.21 Vorrat an Kalzium

Magnesium-Vorrat

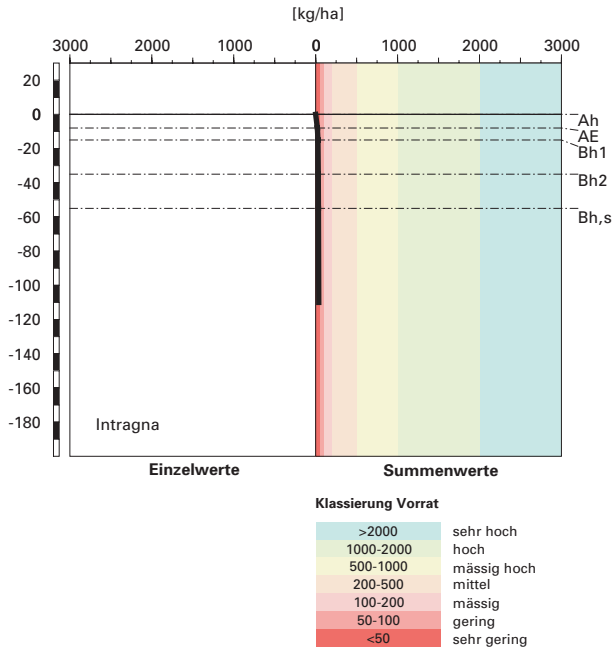


Abb. S3.22 Vorrat an Magnesium

Kalium-Vorrat

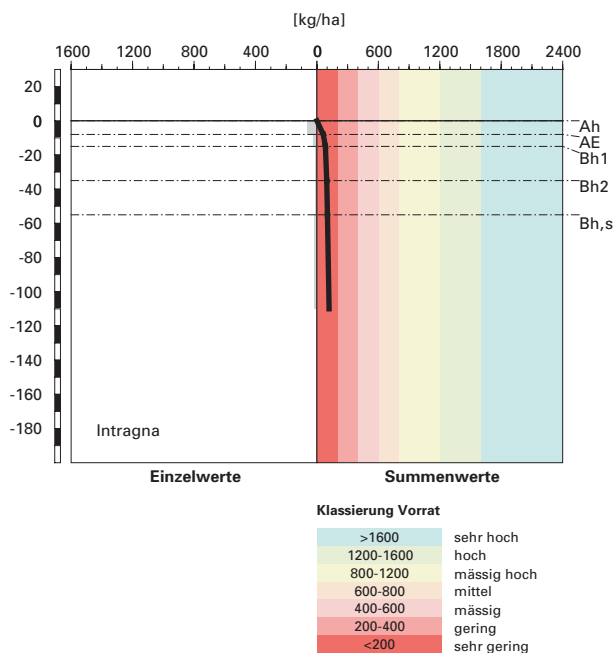


Abb. S3.23 Vorrat an Kalium

S3.7 Themenbereich «Waldbaulich relevante Bodenkennwerte und Baumartenwahl»

S3.7.1 Steckbrief für die Waldbehandlung

Der Steckbrief (Tab. S3.5) orientiert über waldbaulich relevante Standortfaktoren und Bodenkennwerte.

S3.7.2 Baumartenwahl

Naturnähe von Bestand und Oberboden

Im Bestand sind vor allem Birken und Kastanien vertreten. Im Naturwald würden einige zusätzliche Laubhölzer vorkommen. Nach Frey et al. (2000) trifft man an diesem Standort (EK Nr.33) häufig Mull an. Die aktuelle Humusform Mull ist demnach standorttypisch.

Tab. S3.5 Steckbrief für die Waldbehandlung (Intragna)		
Standortangaben		
Relief	Höhe	540 m
	Exposition	NW
	Neigung	45%
Klima	Jahresniederschlag	2101 mm
	Jahrestemperatur	9.2°C
Ausgangsgestein	Granitgneise	
Baumbestand	Struktur	stufig
	Schlussgrad	90%
	Baumarten (Deckung)	60% Hänge-Birke, 15% Edelkastanie
	Oberhöhe	21 m
Waldgesellschaft	nach E&K 1972	Nr. 33: Geissbart-Eschenmischwald mit Edelkastanie
	nach BUWAL 2005	Nr. 33A-33AV: Saure Kastanienwälder mit Farn
Bodenkennwerte		
Bodensystematik	Bodentyp	Kryptopodsol
	Humusform	Mull
Wasser- und Lufthaushalt	Durchlüftung	Im Boden sind keine Vernässungsmerkmale erkennbar, was zeigt, dass der Boden stets gut durchlüftet ist.
	Durchwurzelbarkeit	Der Boden kann von allen Baumarten mindestens profilumfassend durchwurzelt werden. Der Wurzelraum wird mit mehr als 120 cm Mächtigkeit als sehr tiefgründig klassiert. Wurzeln sind bis zur Profilssole vorhanden.
	pflanzenverfügbares Wasser	Das Risiko für Trockenstress ist unter den gegebenen klimatischen Verhältnissen klein.
Säurezustand	pH-Wert/Kalkgrenze	Die Feinerde ist bis 8 cm Tiefe sehr stark sauer, weiter unten im Profil stark sauer. Das Ausgangsgestein ist karbonatfrei.
	Aluminium-Toxizität	Ab 8 cm Tiefe besteht ein Risiko für Al-Toxizität.
Nährstoffe	Verfügbarkeit im Oberboden	Im Gegensatz zur Humusform Mull weist das mittlere C/N-Verhältnis auf eine gehemmte biologische Aktivität hin. Diese Einschätzung wird durch das ebenfalls bloss mittlere C/P-Verhältnis unterstützt. Die Mineralisierungsrate wird daher insgesamt als mittel klassiert.
	Nährstoffvorräte (Ca, Mg, K)	Die Vorräte der Nährstoffkationen sind bescheiden. Der Ca-Vorrat ist gering, der Mg- und der K-Vorrat sind 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 55 cm Tiefe relativ wenig Skelett enthält. Ein Befahren des Bestandes mit schweren Maschinen ist allerdings nicht möglich, denn das Gelände ist mit rund 45% Neigung zu steil.

Baumartenwahl gemäss standortkundlichen Grundlagenwerken

Gemäss BUWAL (2005) sind an diesem Laubmischwald-Standort (Nr. 33AV-33A) folgende Baumarten für die Waldverjüngung geeignet: Kastanie, Buche, Linde, Esche, Traubeneiche, Birke, Stieleiche, Bergahorn, Tanne, Eibe und Schwarzerle. An diesem Standort können also gemäss BUWAL viele Baumarten verjüngt werden.

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

■ **Säurezustand und Aluminium-Toxizität**

Die Feinerde ist derart sauer, dass nahezu im gesamten Profil ein Risiko für Al-Toxizität besteht. Eine Verbesserung des Säurezustandes ist in diesem Boden erwünscht. Da die aktuelle Baumartenmischung ziemlich naturnah und die Humusform ein Mull ist, besteht jedoch keine Möglichkeit, den Säurezustand mit der Baumartenwahl wesentlich zu verbessern.

■ **Nährstoffangebot im Boden**

Die Mineralisierung der Nährstoffe ist trotz der Humusform Mull etwas gehemmt. Eine Erhöhung der Mineralisierungsrate ist potentiell möglich, kann aber, wie bereits beim Säurezustand festgestellt, nicht mit der Baumartenwahl erreicht werden. Eine Förderung der biologischen Aktivität drängt sich angesichts der Humusform Mull ohnehin nicht auf.

Viele Baumarten haben bezüglich Nährstoffversorgung des Bodens eine weite ökologische Amplitude. Das Nährstoffangebot dürfte daher an diesem Standort für die meisten Baumarten ausreichend sein. Für Edellaubhölzer hingegen liegen die Vorräte von Kalzium, Magnesium und Kalium nach unserem Stand des Wissens an der unteren Grenze des nötigen.

Für den vorliegenden Waldstandort werden die in **Tab.S3.6** ersichtlichen Baumarten empfohlen. Aus bodenkundlicher Sicht muss die Baumartenempfehlung des BUWAL (2005) vor allem aufgrund des Säurezustandes und des Nährstoffangebotes hinterfragt werden.

Aus bodenkundlicher Sicht ist eine vielfältige Baumartenmischung mit möglichst vielen Laubhölzern anzustreben. Dadurch bleibt die Mineralisierungsrate der Nährstoffe im Oberboden stabil und die Humusform ein Mull, und auch die Produktion von organischen Säuren bei den Abbauprozessen verbleibt unverändert. Aufgrund der Nährstoffarmut des Bodens gehen wir davon aus, dass die Edellaubhölzer (Esche und Bergahorn) und die Schwarzerle Mühe haben, sich in einem Laubmischwald gegenüber der Buche, Eiche und Kastanie zu behaupten.

Aus standortkundlicher Sicht sei abschliessend erwähnt, dass das BUWAL (2005) für diesen Standort Baumarten mit recht unterschiedlicher ökologischer Verbreitung empfiehlt. Wer diese Baumarten in einem Mischwald aufwachsen lassen will, muss mit einem beträchtlichen Pflegeaufwand rechnen.

Tab. S3.6 Baumartenempfehlung für den Hauptbestand	
Referenz	Baumarten
Grundlagenwerke (Einheit 33A-33AV; BUWAL 2005)	Kastanie, Buche, Linde, Esche, Traubeneiche, Birke, Stieleiche, Bergahorn, Tanne, Eibe, Schwarzerle
Bodenkundliche Kriterien	Kastanie, Buche, Winterlinde, Traubeneiche, Stieleiche, Birke, Tanne, Eibe, (Esche, Bergahorn, Schwarzerle)

Blaser, P./Kernebeek, P./Tebbens, L./VanBreemen, N. and Luster, J., 1997: Cryptopodzolic Soils in Switzerland. *European Journal of Soil Science*, 48: 411–423

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.

Frey, H.-U./Bichsel, M./Preiswerk, Th., 2000: Waldgesellschaften und Waldstandorte Graubündens, 8. Teil Südtäler. Hrsg.: Amt für Wald Graubünden, Chur. Ringordner.

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