

V2 Bodenprofil Bulle

V2.1 Themenbereich «Bodenbildungsfaktoren und Profilmorphologie»

V2.1.1 Zusammenfassende Angaben zum Profil und zu den Bodenbildungsfaktoren

Das Bodenprofil ist in [Abb.V2.1](#) dargestellt. Einen Eindruck vom Bestand vermittelt [Abb.V2.2](#). [Tab.V2.1](#) fasst wichtige Angaben zum Boden und Profilort Bulle zusammen, und [Tab.V2.2](#) orientiert über die Bodenbildungsfaktoren.

V2.1.2 Verbreitung gemäss Bodeneignungskarte der Schweiz

Das Profil gehört zur Kartierungseinheit H3 (tieferes Molassehügelland mit teilweiser Moränebedeckung; Steilhänge, vorwiegend Molasse, Hangneigung >25%). 578 Stichproben des Landesforstinventars gehören dieser Kartierungseinheit an. Das Profil repräsentiert damit 4.9% der mit dem LFI insgesamt erfassten 11'863 Stichproben.

V2.1.3 Besonderheiten am Profilort

Der Sturm Lothar hat den Bestand stark beeinträchtigt und aufgelockert. Die Aufräumarbeiten haben auf der Bodenoberfläche gut sichtbare Spuren hinterlassen. Der natürlich aufkommende Jungwuchs wurde in der Profilumgebung mit Pflanzungen ergänzt.

V2.1.4 Profilmorphologie und Klassierung

Die im Profil angesprochenen morphologischen Bodenmerkmale sind in [Tab.V2.3](#) zusammen mit einer Profilskizze dargestellt.

Die Streu setzt sich vor allem aus Buchenlaub und aus Tannennadeln zusammen, aber auch die krautigen Pflanzen liefern einen relativ grossen Streuanteil. Die Streu wird innerhalb eines Jahres weitgehend zersetzt, so dass nur eine 1 cm dünne Streuschicht auf dem Boden liegt. Mit der Horizontfolge L-Ah wird die Humusform als Mull klassiert.



Abb. V2.1 (links) Bodenprofil Bulle



Abb. V2.2 (rechts) Bestand am Profilort Bulle

Tab. V2.1 Zusammenfassende Angaben zum Profil Bulle	
Lokalname	Bulle (Kanton Freiburg, Gemeinde Bulle)
Lage	Landeskarte 1:25000 Blatt 1225, Gruyères Koordinaten 567960/161360
Waldgesellschaft (Ellenberg & Klötzli 1972)	Nr. 8: Waldhirschen-Buchenwald (<i>Milio-Fagetum</i>)
Horizontfolge	L-Ah-AEI-Bt-Bcn-C(S)
Humusform	Mull
Bodentyp	Parabraunerde, sehr schwach pseudovergleyt
Bodentyp (FAO 1988)	Luvisol

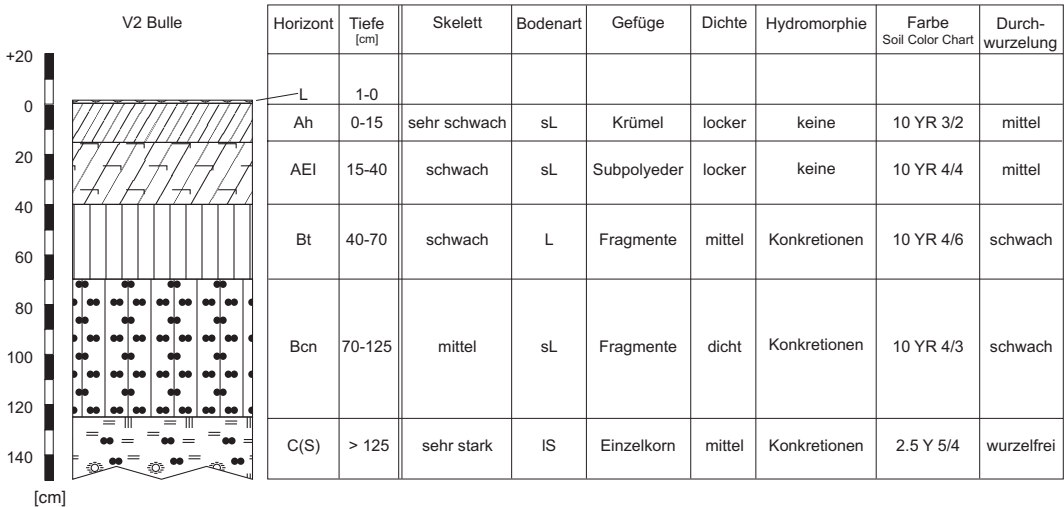
Tab. V2.2 Bodenbildungsfaktoren am Profilort Bulle			
Relief	Höhe ü. M.	910 m	
	Exposition	SSE	
	Neigung	55 %	
	Geländeform	Oberhang	
Ausgangsgestein	Tektonik/Geologie	Penninikum; Moräne der Würmvergletscherung	
	Lithofazies	Nr. 29: Moräneablagerungen (grobklastisch)	
	(nach Tuchschnid 1995)	physikalische Verwitterbarkeit Gestein: variabel	
		chemische Verwitterbarkeit Gestein: variabel	
		Tongehalt Gestein: sehr niedrig–mittel	
Klima	T/N Jahresmittel	7.3°C/1590 mm	
	T/N Januarmittel	–0.9°C/105 mm	
	T/N Julimittel	16.8°C/133 mm	
	Tage mit Schneedecke	95	
	Wärmegliederung	kühl	
	Länge der Vegetationsperiode	180–190 Tage	
Pflanzen	Schicht	Deckung	häufigste Arten
	Baumschicht (30 m Höhe)	90 %	40 % Rotbuche (<i>Fagus sylvatica</i>) 40 % Weiss-Tanne (<i>Abies alba</i>) 5 % Fichte (<i>Picea abies</i>)
	Strauchschicht	20 %	–
	Krautschicht	85 %	gemeiner Sauerklee (<i>Oxalis acetosella</i>) echter Waldmeister (<i>Galium odoratum</i>) Sanikel (<i>Sanicula europaea</i>) Berg-Goldnessel (<i>Lamium galeobdolon</i> subsp. <i>montanum</i>) Brombeere (<i>Rubus fruticosus</i>) Himbeere (<i>Rubus idaeus</i>)
	Moosschicht	0.5 %	–

Der 150 cm tief aufgeschlossene Mineralboden lässt sich aufgrund der morphologischen Merkmale in fünf Horizonte gliedern. Die einzelnen Horizonte können farblich allerdings nur mit Mühe unterschieden werden, weil die Horizontgrenzen diffus verlaufen. Eine Ausnahme bilden die durch den Humus bräunlich schwarz gefärbten obersten 15 cm des Mineralbodens, welche sich recht gut von der darunter folgenden, braunen Zone in 15–70 cm Tiefe abheben. Unterhalb von 70 cm Tiefe ist die Feinerde gelblich braun gefärbt. Der Skelettgehalt nimmt vom nahezu skelettfreien Oberboden bis zum sehr stark skeletthaltigen Ausgangsgestein markant zu. Die Feinerde ist lehmig, wobei in 40–70 cm Tiefe der grösste Tongehalt festgestellt wurde. In Bezug auf das Gefüge ist der Boden stark differenziert. Die humusreichen obersten 15 cm sind krümelig. Darunter überwiegt bis 40 cm Tiefe die Subpolyederstruktur. Zwischen 40 und 125 cm Tiefe ist die

Tab. V2.3

Profilskizze und Morphologie des Bodenprofils Bulle

Bodenart: sL sandiger Lehm, L Lehm, IS lehmiger Sand



Feinerde durch Fragmente strukturiert und im sandreichen untersten Profilbereich herrscht ein Einzelkorngefüge. Während der Oberboden locker gelagert ist, hat der Unterboden eine mittlere bis hohe Dichte. Ab 40 cm Tiefe sind Konkretionen ein Hinweis auf zeitweise ungenügende Durchlüftung. Wurzeln sind bis 125 cm Tiefe vorhanden.

Ein Vergleich der Bodenart in 15–40 cm und 40–70 cm Tiefe legt den Schluss nahe, dass eine Tonverlagerung stattgefunden hat. Aus dem Tiefenbereich 15–40 cm wurde Ton in den Tiefenbereich 40–70 cm verlagert. Aufgrund der Bodenmorphologie wird die Horizontfolge als L-Ah-AEI-Bt-Bcn-C(S) festgelegt und der Boden als sehr schwach pseudovergleyte Parabraunerde klassiert. Die zeitweilige Vernässung erfolgt durch Stauwasser.

Ergänzende Bodenmerkmale

Die Kalkgrenze verläuft in 125 cm Tiefe. Gemäss pH-Hellige ist die Feinerde im karbonatfreien, oberen Profilbereich sauer. Trotz stellenweise dichtem Unterboden sind keine unüberwindbaren Hindernisse für das Wurzelwachstum erkennbar.

Skelettgehalt

Der Boden ist bis 120 cm Tiefe schwach, weiter unten im Profil stark skeletthaltig (Abb. V2.3). Im C(S)-Horizont ist der Skelettgehalt mit rund 40 % maximal.

Bodenart

Die Sandfraktion hat in nahezu allen Horizonten den grössten Anteil in der Feinerde (Abb. V2.4). Da aber auch ein ansehnlicher Schluff- und Tonanteil vorhanden ist, wird die Feinerde als lehmig bezeichnet. Gemessen am Tongehalt handelt es sich in allen Horizonten um mittelschweren Boden. Die Tonverteilung im Profil weist auf eine Tonverlagerung hin. Der Tongehalt ist im Bt-Horizont mit rund 26% maximal und im Vergleich zum darüber liegenden AEI-Horizont um 3% grösser. Die im Bodenprofil aufgrund von morphologischen Merkmalen festgestellte Tonverlagerung kann durch die Analyse der Korngrössenfraktionen im Labor bestätigt werden. Hingegen zeigten die Labormesswerte, dass der Sandanteil im Feld in einzelnen Horizonten überschätzt wurde (Tab. V2.3).

Dichte der Feinerde

Die Dichte nimmt vom Oberboden bis zum Bt-Horizont zu und bleibt dann bis zur Profilssole ziemlich konstant (Abb. V2.5). Die Dichte wird selbst im Bt-Horizont, der mit 1.38 g/cm^3 am dichtesten ist, als bloss gering klassiert.

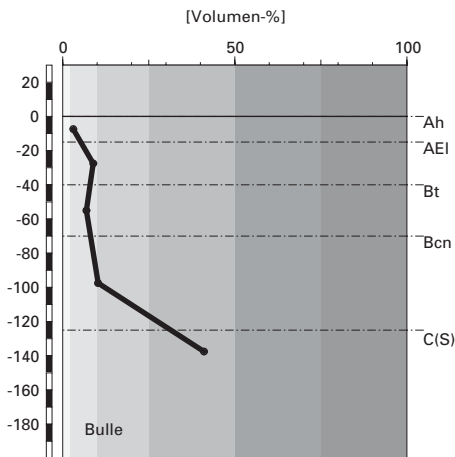
Wasserleitfähigkeit im gesättigten Boden

Im Bt-Horizont ist die Durchlässigkeit minimal, da die Dichte und der Tongehalt dort im Vergleich zu den anderen Horizonten erhöht sind (Abb. V2.6). Die Durchlässigkeit wird im Bt-Horizont als gering und im übrigen Teil des Bodenprofils als mittel bis hoch klassiert.

Pflanzenverfügbares Wasser

Die Wasserspeicherkapazität des Bodens bis 120 cm Tiefe wird mit 243 l/m^2 als äusserst hoch klassiert (Abb. V2.7). Der geringe Skelettgehalt und die lehmige Feinerde mit vielen Poren mittlerer Grösse sind für das grosse Speichervermögen von pflanzenverfügbarem Wasser verantwortlich.

Skelettgehalt



Klassierung Skelettgehalt

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

Bodenart

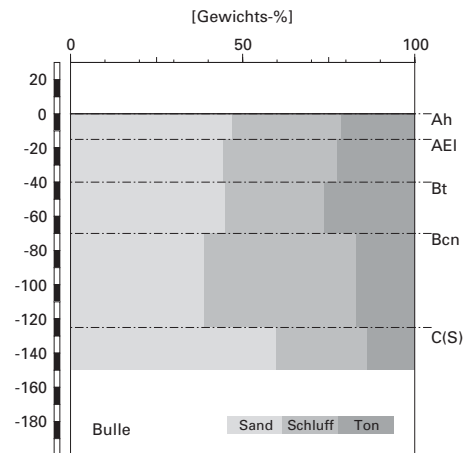


Abb. V2.3 (links) Skelettgehalt

Abb. V2.4 (rechts) Bodenart

V2.2.2

Bodenkundliche und ökologische Interpretationen

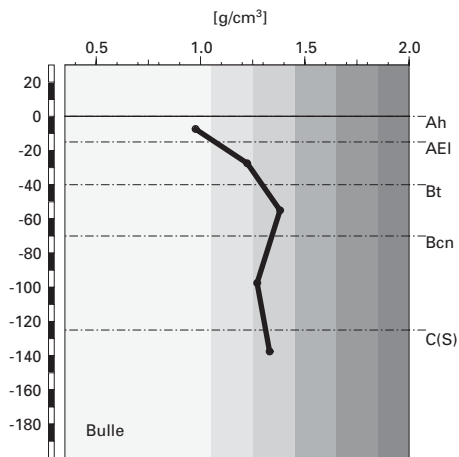
Wasser- und Lufthaushalt des Bodens

In dieser sehr schwach pseudovergleyten Parabraunerde kommen ab 40 cm Tiefe als Merkmal der Vernässung vereinzelte Mangankonkretionen vor. Sie zeigen, dass der Boden nur geringfügig durch Stauwasser beeinflusst wird, so dass nur selten mit ungenügender Durchlüftung und in der Folge mit Sauerstoffarmut zu rechnen ist. Diese Einschätzung steht recht gut in Übereinstimmung mit der Leitfähigkeitskurve, welche nur im Bt-Horizont eine geringe und in allen übrigen Horizonten eine mittlere bis hohe Wasserdurchlässigkeit erwarten lässt (Abb. V2.6).

Durchwurzelbarkeit des Bodens

Bezogen auf die Dichte und die Durchlüftung bewerten wir den Boden für alle Baumarten als uneingeschränkt und mindestens profilumfassend durchwurzelbar. Die Dichtewerte sind durchwegs kleiner als 1.4 g/cm^3 .

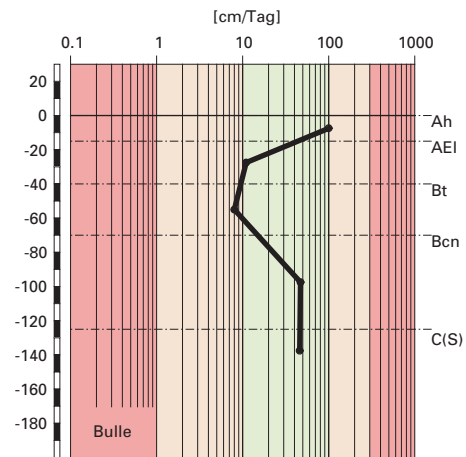
Feinerde-Dichte



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. V2.5 (links) Dichte der Feinerde

Abb. V2.6 (rechts) Wasserleitfähigkeit im gesättigten Boden

(unterer kritischer Wert) und die Durchlüftung ist in allen Horizonten ausreichend. Der Wurzelraum ist nicht begrenzt und wird mit > 120 cm Mächtigkeit als sehr tiefgründig klassiert. Der Boden wird vom aktuellen Mischbestand aus Buche, Tanne und Fichte tief greifend genutzt, denn Wurzeln wurden bis 125 cm Tiefe beobachtet.

Wasserversorgung des Baumbestandes

Für die Referenztiefe von 120 cm ergeben unsere Berechnungen, dass der Bestand in Trockenperioden ohne bedeutende Niederschläge nach rund 30 Tagen an Wassermangel zu leiden beginnt. Das beträchtliche Wasserspeichervermögen des Bodens und das günstige Klima bewegen uns dazu, das Trockenstress-Risiko an diesem Buchenstandort (E & K 8) als klein zu bewerten.

pflanzenverfügbares Wasser

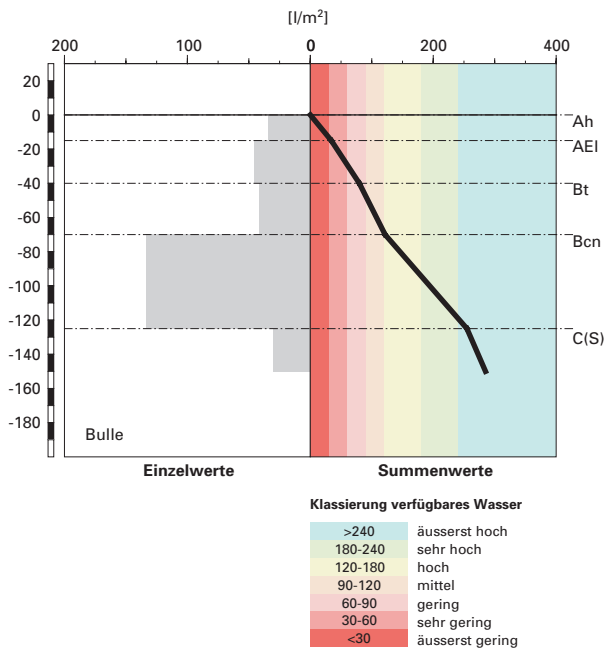


Abb. V2.7 Pflanzenverfügbares Wasser

Bodenbefahrbarkeit

Der Boden reagiert in nassem Zustand sehr empfindlich auf Befahren mit schweren Maschinen, weil er bis 120 cm Tiefe wenig Skelett enthält. Ein Befahren des Bestandes ist allerdings nicht möglich, weil die Hangneigung rund 55% beträgt.

V2.3 Themenbereich «Bodenhauptbestandteile»

V2.3.1 Charakterisierung der Bodenhauptbestandteile

Organische Substanz

Der Baumbestand am Profilort Bulle setzt sich zu gleichen Teilen aus Buche und Weiss-Tanne zusammen, denen einzelne Fichten beigemischt sind. Das Kronendach ist relativ stark geschlossen und deckt den Boden zu rund 90% ab. Trotzdem gedeiht eine Krautschicht mit einem Deckungsgrad von 85%.

Diese besteht vor allem aus gemeinem Sauerklee, echtem Waldmeister, Sanikel, Berg-Goldnessel, Brombeere und Himbeere. Die Streu stammt von den Buchen und Tannen und zusätzlich zu einem bedeutenden Anteil aus der Krautschicht. Sie gilt als mässig gut abbaubar, weshalb sich nur eine dünne Streuschicht gebildet hat.

Der bräunlich schwarze Ah-Horizont hebt sich deutlich von den tiefer gelegenen Horizonten ab. Sein Gehalt an organischem Kohlenstoff (C_{org}) beträgt 4.1% (Abb. V2.8). Der C_{org} -Gehalt nimmt im AEI-Horizont relativ stark auf 0.9% und im weiteren Tiefenverlauf nur noch geringfügig auf 0.4% im Bcn-Horizont ab. Im C(S)-Horizont ist kein organischer Kohlenstoff mehr nachweisbar. Aus diesen C_{org} -Gehalten resultiert ein Vorrat an organischem Kohlenstoff von 127 t/ha (Abb. V2.9).

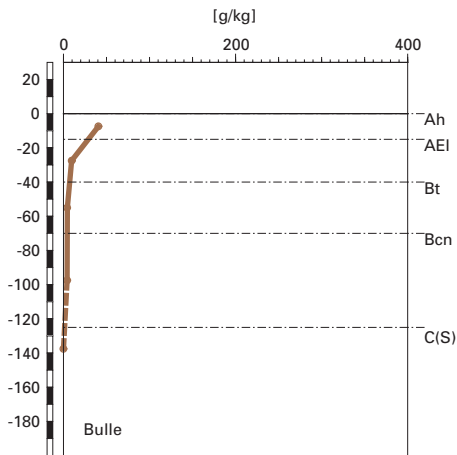
Tonverteilung sowie Verteilung von Aluminium- und Eisenoxiden

Der Tongehalt nimmt vom Ah-Horizont von 21% auf das Maximum von 26% im Bt-Horizont zu (Abb. V2.4). Unterhalb des Bt-Horizontes erfolgt zuerst eine deutliche Abnahme auf 17% im Bcn- und schliesslich auf 14% im C(S)-Horizont.

Die Gehalte des Dithionit- und des Oxalat-extrahierbaren Eisens (Fe_d und Fe_o) widerspiegeln die Tiefenverteilung des Tongehaltes (Abb. V2.4 und V2.10). Beide nehmen mit der Tiefe bis zum Maximum im Bt-Horizont zu und danach wieder ab. Beim Pyrophosphat-extrahierbaren Eisen (Fe_p) verändert sich der Gehalt mit der Tiefe nur wenig, nimmt tendenziell jedoch ab (Abb. V2.10). Im Detail ist eine leichte Verarmung im AEI-Horizont zu erkennen und im C(S)-Horizont ist Fe_p nicht mehr nachweisbar (Tab. A 165 in Zimmermann et al. 2006). Auch beim Gehalt des Oxalat- bzw. Pyrophosphat-extrahierbaren Aluminiums (Al_o bzw. Al_p) ist eine leichte Abnahme mit der Tiefe festzustellen (Abb. V2.11). Während Al_p praktisch linear abnimmt und unterhalb 70 cm Tiefe nicht mehr nachweisbar ist, zeigt sich bei Al_o im AEI-Horizont eine leichte Verarmung und im Bcn-Horizont eine leichte Anreicherung (Tab. A 165 in Zimmermann et al. 2006).

Die Verhältnisse der extrahierbaren Aluminium- und Eisenfraktionen nehmen mit der Tiefe ab (Abb. V2.12). Die Fe_o/Fe_d - und Fe_p/Fe_o -Verhältnisse sind praktisch deckungsgleich mit Ausnahme eines sekundären Maximums von Fe_p/Fe_o im Bt-Horizont. Diese Verhältnisse sind mit Werten von höchstens 0.3 sehr klein. Das Al_p/Al_o -Verhältnis erreicht grössere Werte. Es nimmt von 0.65 im Ah- auf rund 0.4 im Bt-Horizont ab.

organischer Kohlenstoff



Kohlenstoff-Vorrat

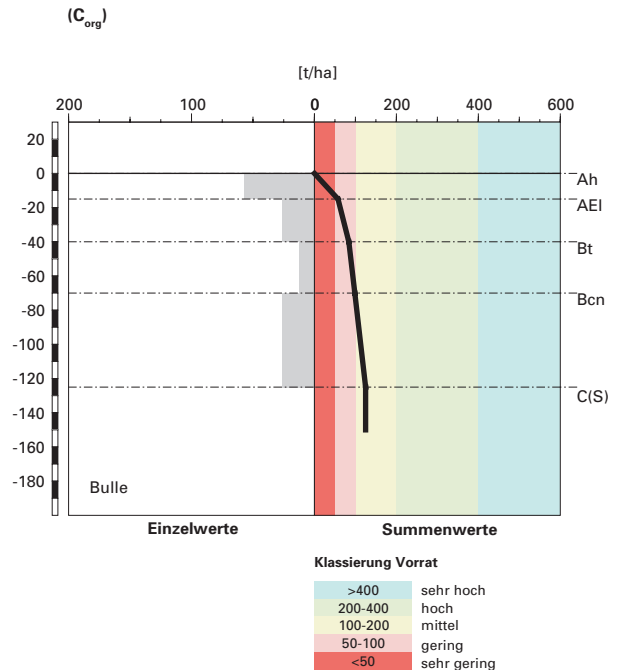


Abb. V2.8 (links) Gehalt an organischem Kohlenstoff

Abb. V2.9 (rechts) Vorrat an organischem Kohlenstoff

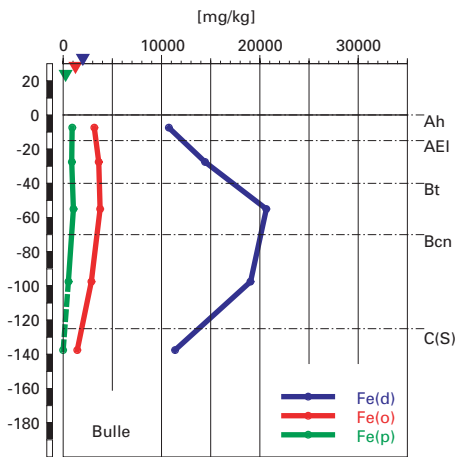
V2.3.2

Bodenkundliche Interpretation

Die mässig gut abbaubare Streumischung von Buche, Tanne, Fichte und den Pflanzen aus der Krautschicht wird innerhalb eines Jahres praktisch vollständig zersetzt. Es hat sich nur eine rund 1 cm dicke Streuschicht und als Humusform ein Mull gebildet. Die Gründe für den schnellen Abbau liegen im günstigen Klima mit ausreichender Wärme und Feuchtigkeit sowie in der grossen biologischen Aktivität. In der mässig sauren Feinerde mit einem minimalen pH-Wert von 4.7 im Ah-Horizont sind die Voraussetzungen für Bodenlebewesen günstig. An der Bodenoberfläche sind zahlreiche Wurmlosungen zu finden, welche auf eine grosse Regenwurmmaktivität schliessen lassen. Dies äussert sich im 15 cm mächtigen Ah-Horizont in einer intensiven Durchmischung von organischer Substanz und Mineralerde. Das C/N-Verhältnis beträgt in diesem Horizont 16 und ist damit mit einer hohen Mineralisierungsrate der organischen Substanz verbunden. Nicht mineralisierte organische Substanz wird über die Verbindung mit Aluminium- und Eisenoxiden sowie durch Ton-Humus-Komplexe stabilisiert

Eisen-Oxide

(Gehalte)



Aluminium-Oxide

(Gehalte)

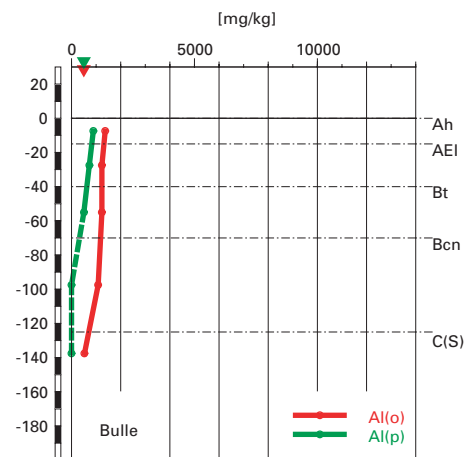


Abb. V2.10 (links) Gehalte an Dithionit- (Fe_d), Oxalat- (Fe_o) und Pyrophosphat- (Fe_p) extrahierbarem Eisen

Abb. V2.11 (rechts) Gehalte an Oxalat- (Al_o) und Pyrophosphat- (Al_p) extrahierbarem Aluminium

Eisen- und Aluminiumoxide

(Verhältnisse)

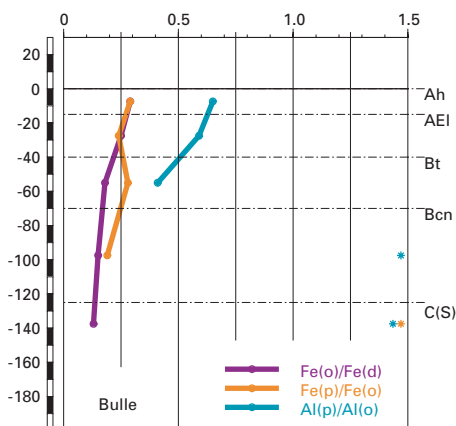


Abb. V2.12 Verhältnisse der Fe- und Al-Oxide

und vor weiterem Abbau geschützt. Der Boden enthält im regionalen Vergleich mittlere Gehalte an Al_o und Fe_o , und durch die grosse Bioturbation werden organische Substanzen intensiv mit der Mineralerde vermischt, was sich günstig auf die Humusstabilisierung auswirkt. So konnte sich ein im gesamtschweizerischen Vergleich mittlerer Vorrat an organischem Kohlenstoff von 127 t/ha bilden (Abb. V2.9).

Die leicht helleren Stellen im AEI-Horizont und das Tonmaximum im Bt-Horizont lassen vermuten, dass in diesem Boden eine Tonverlagerung stattgefunden hat. Im pH-Bereich von rund 5.5 bis 7 werden Teilchen der Tonfraktion dispergiert und mit dem Sickerwasser in die Tiefe verlagert. Neben Tonmineralen sind dies auch Eisenoxide. Deshalb fällt das Tonmaximum mit dem grössten Fe_d -Gehalt im Bt-Horizont zusammen. Allerdings ist das Fe_d /Ton-Verhältnis nicht konstant, wie dies in einer klassischen Parabraunerde erwartet werden kann. Es nimmt mit der Tiefe kontinuierlich bis zum grössten Wert im Bcn-Horizont zu und im C(S)-Horizont wieder leicht ab (Tab. A 165 in Zimmermann et al. 2006). Das heisst, dass Eisen tiefer verlagert wurde als Ton. Interessanterweise ist das Fe_o /Ton-Verhältnis im ganzen Boden konstant und die Tiefenverteilung von Fe_o zeichnet genau jene des Tongehaltes wieder. Dies bedeutet entweder, dass die Würmmoräne bereits vorverwitterte Mineralerde mit Oxalat-extrahierbarem Eisen enthielt, welches zusammen mit den Tonmineralen dispergiert und verlagert wurde. Oder die mit den Tonmineralen verlagerten, kristallinen Eisenoxide verwittern am Ort ihrer Ausflockung und bilden amorphe Eisenoxide. Da im Oberboden mehr amorphe Eisenoxide gebildet werden als im Unterboden, nimmt das Fe_o / Fe_d -Verhältnis mit der Tiefe ab. Dieses Verhältnis ist im ganzen Boden klein und deutet auf eine hohe Kristallinität der Eisenoxide und damit auf eine nicht stark verwitterte Feinerde hin. Der geringe Gehalt von Fe_o sowie der geringe Gehaltsunterschied zwischen Ober- und Unterboden deuten in dieselbe Richtung. Die Tiefenverteilung von Fe_o kann in Zusammenhang mit der Tonverlagerung und der Verlagerung zusammen mit gelöster organischer Substanz erklärt werden. Die chemischen Voraussetzungen für eine Lösung und Verlagerung von Eisen in anorganischer Form sind bei pH-Werten grösser als 4.7 nicht gegeben. Eisen kann höchstens zusammen mit gelöster organischer Substanz verlagert werden. Dies ist in der Tiefenverteilung von Fe_p angedeutet, indem im AEI-Horizont eine leichte Verarmung und im Bt-Horizont eine leichte Anreicherung festgestellt werden kann (Tab. A 165 in Zimmermann et al. 2006).

Der pH-Wert ist an der Grenze zur Al-Löslichkeit und Aluminium befindet sich im Oberboden bereits in Spuren am Kationenaustauscher (Abb. V2.14). Aufgrund der leichten Verarmung von Al_o im AEI-Horizont und der leichten Anreicherung im Bcn-Horizont kann auf eine schwache Al-

Verlagerung geschlossen werden. Insgesamt vermittelt die Tiefenverteilung von Al_0 mit den geringen Gehalten und Gehaltsunterschieden zwischen Ober- und Unterboden jedoch das Bild eines wenig entwickelten Bodens bzw. einer nur schwach verwitterten Feinerde.

Aufgrund der morphologischen Merkmale wurde dieser Boden als sehr schwach pseudovergleyte Parabraunerde klassiert. Die Interpretation der Bodenhauptbestandteile bestätigt diese Klassierung. Die Tonverlagerung kann nicht nur mit der Tiefenverteilung des Tongehaltes, sondern auch anhand der Tiefenverteilung der Eisenfraktionen nachvollzogen werden. Die Verteilung der Eisengehalte kann nur mit der Tonverlagerung und der Verlagerung zusammen mit gelöster organischer Substanz erklärt werden, da die chemischen Voraussetzungen für eine Lösung und Verlagerung von Eisen in anorganischer Form nicht gegeben sind. Allgemein ist der Verwitterungsgrad der mineralischen Feinerde gering und in der Tiefe wenig differenziert.

V2.4 Themenbereich «Säurezustand»

V2.4.1 Charakterisierung des Säurezustandes

pH-Wert

Der pH-Wert nimmt mit der Tiefe von 4.7 im Ah- auf 7.5 im C(S)-Horizont monoton zu (Abb. V2.13). Bis zum Übergang in den alkalischen C(S)-Horizont, der in der Säureklasse 1 liegt, ist der Boden schwach bis mässig sauer. Der Bcn-Horizont befindet sich in der Säureklasse 2, alle anderen Horizonte liegen in der Säureklasse 3.

Austauschbare Kationen und Basensättigung

Die Feinerde ist im ganzen Profil zum gössten Teil mit basischen Kationen, insbesondere mit Kalzium belegt (Abb. V2.14). Bis in den Bt-Horizont sind auch Aluminium, Protonen und Mangan in austauschbarer Form gebunden, allerdings nur in sehr geringen Mengen. Die Basensättigung ist im ganzen Profil mit über 90% sehr hoch (Abb. V2.15).

Stand der Bodenversauerung

Diese sehr schwach pseudovergleyte Parabraunerde ist mässig versauert, was aus dem Tiefenverlauf des pH-Wertes hervorgeht, der sich über drei Säureklassen erstreckt.

Bis in 70 cm Tiefe erfolgt die Säurepufferung durch Protonierung variabler Ladungen am Kationenaustauscher sowie durch Silikatverwitterung. Unter den sauren Kationen fällt der vergleichsweise grosse Mangananteil auf, der für diesen pH-Bereich typisch ist. Bei den pH-Werten in diesen Horizonten ist Aluminium nur sehr wenig löslich, weshalb die Verdrängung von basischen Kationen und von Mangan am Kationenaustauscher weitgehend unterbleibt. Im Bcn-Horizont werden die Säuren in Übereinstimmung mit der Säureklasse 2 vorwiegend durch Silikatverwitterung gepuffert und im alkalischen C(S)-Horizont erfolgt sie durch Verwitterung des karbonathaltigen Gesteins. Weil im pH-Bereich der Säureklassen 1 und 2 Aluminium unlöslich ist, unterbleibt die Verdrängung basischer Kationen von ihren Austauscherplätzen und die Basensättigung der Feinerde bleibt hoch.

Die Versauerungsfront, erkennbar am tiefst gelegenen Horizont der austauschbares Aluminium aufweist, befindet sich im Übergang vom Bt- in den Bcn-Horizont. Die Kalkgrenze befindet sich in 125 cm Tiefe im Übergang zum karbonathaltigen Ausgangsgestein. Die morphologischen Merkmale lassen erkennen, dass der Boden ab 40 cm Tiefe durch Staunässe beeinflusst ist. Das Stauwasser ist dafür verantwortlich, dass basische Kationen im Oberboden umverteilt und nur in geringem Ausmass aus dem Profil ausgewaschen werden.

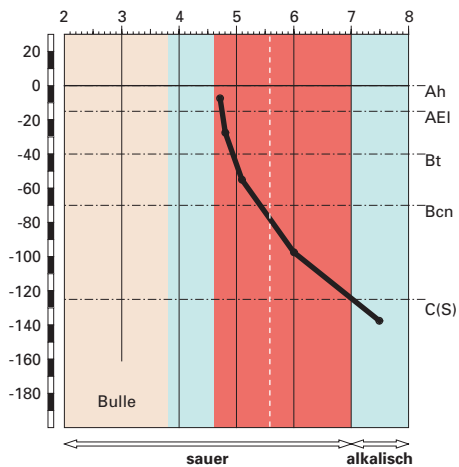
Risiko für Boden und Pflanzen

Rund 88% der Feinerde dieses Bodens befindet sich in den schwach puffernden Säureklassen 2 und 3, weshalb die Empfindlichkeit einer weiteren pH-Abnahme als gross eingeschätzt wird. Allerdings gelangt der Ah-Horizont bei einer nur geringen pH-Abnahme rasch in die Säureklasse 4 mit einer grossen Pufferwirkung, was die pH-Abnahme dort verlangsamen dürfte. Bedingt durch den Wasserhaushalt und das karbonathaltige Ausgangsgestein wird die Basensättigung allerdings auch bei einer weitergehenden pH-Abnahme im ganzen Profil hoch bleiben.

Das Gedeihen säureempfindlicher Pflanzen ist in diesem basenreichen Boden nicht durch Al-Toxizität eingeschränkt, denn das BC/Al-Verhältnis ist im ganzen Profil weit grösser als der kritische Grenzwert von 0.2.

pH-Wert

(CaCl₂)



Säureklassen 1-5

Empfindlichkeit für pH-Abnahme

1: >7.0	klein
2: 5.6-7.0	gross
3: 4.6-5.6	gross
4: 3.8-4.6	klein
5: <3.8	mässig

austauschbare Kationen

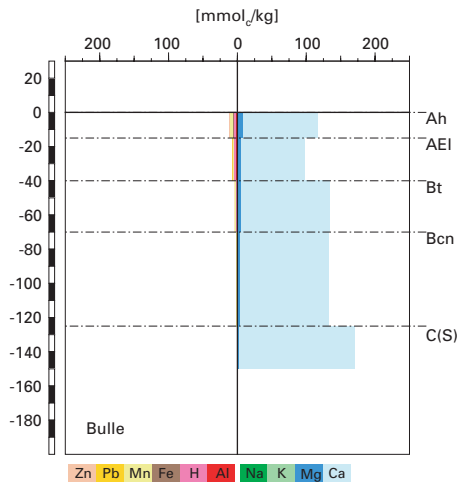
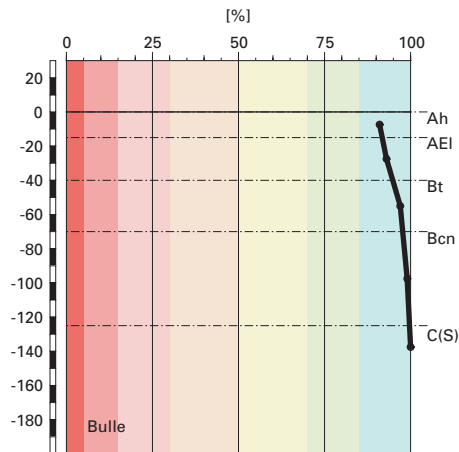


Abb. V2.13 (links) pH-Wert und Säureklassen

Abb. V2.14 (rechts) Belegung des Kationenaustauschers

Basensättigung



Klassierung Basensättigung

>85	sehr hoch
70-85	hoch
50-70	mässig hoch
30-50	mittel
15-30	mässig
5-15	gering
<5	sehr gering

Abb. V2.15 Basensättigung

V2.5.1

Tiefenverteilung der Schwermetalle

Chrom und Ni besitzen in diesem Boden eine parallele Tiefenverteilung (Abb. V2.16). Vom Ah-Horizont nehmen die Gehalte dieser beiden Schwermetalle linear bis zum Maximum im Bt-Horizont zu. Im Bcn- und C(S)-Horizont sind sie wieder deutlich niedriger. Der Cu-Gehalt nimmt ebenfalls linear vom Ah- bis zum Bt-Horizont zu, bleibt darunter aber konstant. Zink verhält sich ähnlich wie Cr und Ni. Allerdings wird der Zn-Gehalt vom Bt- zum Bcn-Horizont nochmals etwas grösser, bevor er zum C(S)-Horizont hin niedriger wird. Blei ist nur im Ah- und im Bt-Horizont nachweisbar.

V2.5.2

Wertung der Schwermetallgehalte im untersten Mineralerde-Horizont im geochemischen Vergleich

Bezogen auf das Ausgangsgestein aus Würmmoräne liegen der Ni- und Pb-Gehalt im C(S)-Horizont unterhalb, der Cr-Gehalt innerhalb und der Cu- und Zn-Gehalt oberhalb typischer Wertebereiche. Da für Moräne (Lithofazies 29)

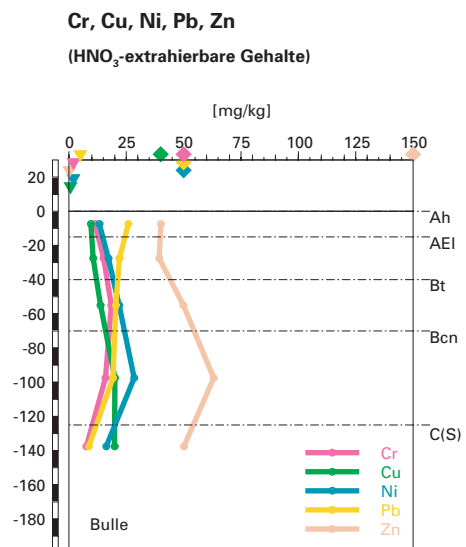
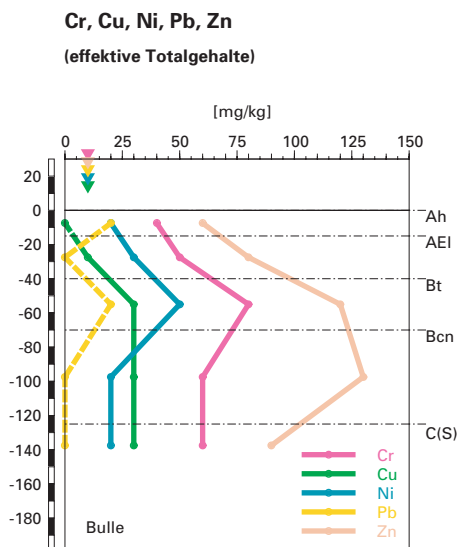


Abb. V2.16 (links) Schwermetalle: effektive Totalgehalte

Abb. V2.17 (rechts) Schwermetalle: Salpetersäure-extrahierbare Gehalte

keine geochemischen Angaben vorhanden sind, wurde die geologisch nächstverwandte Lithofazies mit geochemischen Angaben (Lithofazies 24, Glaziallehme und -tone) für die Beurteilung beigezogen.

V2.5.3 **Beurteilung der quellenunabhängigen Belastung nach VBBo**

Bezogen auf die VBBo sind die Cr- und Zn-Gehalte profilumfassend sehr niedrig bis niedrig (Abb.V2.17). Auch die Gehalte der übrigen Schwermetalle sind in den meisten Horizonten so zu beurteilen. Ausnahmen bilden der erhöhte Ni- und Cu-Gehalt im Bcn- und der erhöhte Pb-Gehalt im Ah-Horizont. Die Richtwerte der VBBo werden nicht überschritten.

V2.5.4 **Anreicherungs faktoren**

Der Oberboden ist deutlich an Cr, Cu und Zn verarmt (Tab.V2.4). Der Ah-Horizont ist zudem etwas an Ni verarmt. Der Bt-Horizont ist deutlich mit Ni und etwas mit Cr angereichert sowie etwas an Cu verarmt. Der darunter liegende Bcn-Horizont ist etwas an Cr, Ni und Cu verarmt und etwas mit Zn angereichert.

Das Anreicherungs-/Verarmungsmuster für Ni widerspiegelt die Tonverlagerung in diesem Profil (Abb.V2.4). Dieses Element wird offenbar mit Tonpartikeln aus dem Ah- und AEI-Horizont ausgeschwemmt und mit diesen vor allem im Bt-Horizont angereichert. Etwas weniger ausgeprägt zeigt sich dieses Verhalten bei Cr und Zn. Das Fehlen einer Anreicherung von Cu in diesen beiden Horizonten bei gleichzeitig starker Verarmung des nur mässig sauren Oberbodens an Cu lässt sich wie folgt interpretieren. Obwohl Cu sicher auch teilweise mit Ton verlagert wurde, spielt höchstwahrscheinlich aber der Transport gebunden an gelöste organische Substanz eine dominierende Rolle und führte schliesslich zur Auswaschung von Cu in den Untergrund.

Tab. V2.4

Anreicherungs faktoren

Horizont	Tiefe [cm]	Anreicherungs faktor				
		Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Ah	0– 15	0.49	<0.25	0.74	n.b.	0.49
AEI	15– 40	0.62	0.25	1.11	n.b.	0.66
Bt	40– 70	1.11	0.83	2.08	n.b.	1.11
Bcn	70–125	0.80	0.80	0.80	n.b.	1.16
C(S)	> 125	1.00	1.00	1.00	n.b.	1.00

Schwermetallmobilität

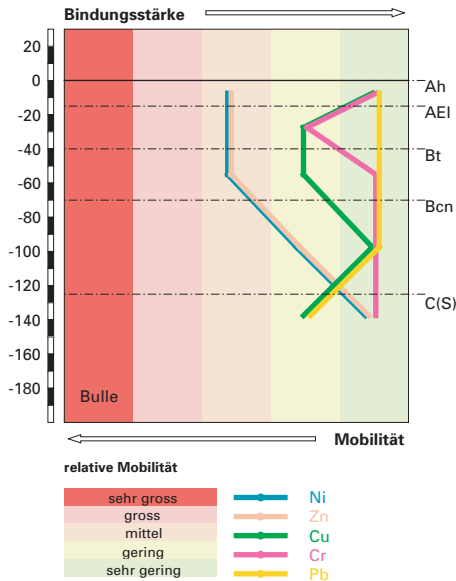


Abb. V2.18 Mobilität der Schwermetalle

Die Tiefenverteilung von Pb (Abb. V2.16) mit nachweisbaren Gehalten nur gerade im Ah- und Bt-Horizont deutet darauf hin, dass anthropogenes Pb aus der Atmosphäre eingetragen und ein Teil davon mit Ton in den Bt-Horizont verlagert wurde.

V2.5.5

Schätzung der Mobilität der Schwermetalle

Aufgrund der mässig sauren Verhältnisse (Abb. V2.13) wird die Mobilität von Ni und Zn vom Ah- bis zum Bt-Horizont als mittel beurteilt (Abb. V2.18). Im schwach sauren Bcn-Horizont ist die Mobilität dieser beiden Schwermetalle gering und im karbonathaltigen C(S)-Horizont sehr gering. Die Mobilität der übrigen Schwermetalle wird im ganzen Profil als sehr gering bis gering beurteilt. Dabei verringert im Ah-Horizont der hohe Gehalt an organischer Substanz (Abb. V2.8) die Mobilität von Cr, Cu und Pb, und im Bt-Horizont der hohe Gehalt an Ton (Abb. V2.4) jene von Cr und Pb.

Kupfer dürfte aufgrund der im vorhergehenden Kapitel beschriebenen Auswirkungen des Transportes mit gelöster organischer Substanz im ganzen Profil mobiler sein als aufgrund der Eigenschaften der Bodenfestphase (pH, Ton- und Humusgehalt) geschätzt und in Abb. V2.18 dargestellt ist.

Das Risiko einer Auswaschung von Schwermetallen in den Untergrund wird bei diesem Profil vor allem wegen der alkalischen Verhältnisse im C(S)-Horizont als klein eingestuft.

V2.5.6 **Schätzung der Gefährdung von Mikroorganismen**

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

V2.6 Themenbereich «Nährstoffe»

V2.6.1 **Nährstoffverfügbarkeit im Oberboden**

Die Nährstoffverfügbarkeit ist im Oberboden aufgrund der Humusform Mull und der Krümelstruktur gut. Die vor allem von der Buche und der Tanne, zu einem bedeutenden Anteil aber auch aus der Krautschicht stammende Streu wird innerhalb eines Jahres praktisch vollständig zersetzt. Neben der vielfältigen Streumischung begünstigen die bloss mässig sauren pH-Verhältnisse im Oberboden eine grosse biologische Aktivität.

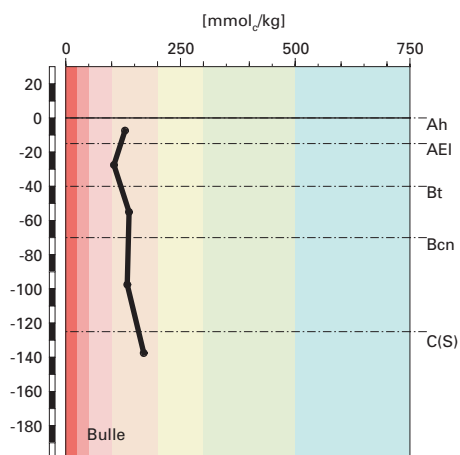
Das C/N-Verhältnis im Ah-Horizont beträgt 16 und ist gemäss Literaturangaben charakteristisch für die Humusform Mull. Es wird als mässig eng klassiert und ist mit einer hohen Mineralisierungsrate der organischen Substanz verbunden. Durch die grosse biologische Aktivität wird die Streu nicht nur schnell zersetzt, sondern auch zu einem grossen Teil innert kurzer Zeit mineralisiert. Dadurch werden die Nährstoffe für die Pflanzen schnell wieder verfügbar. Die anhand des C/N-Verhältnisses gemachten Aussagen stehen damit in Einklang mit den morphologischen Beobachtungen. Das als mässig eng klassierte C/P-Verhältnis von 159 im Ah-Horizont weist ebenfalls auf eine grosse biologische Aktivität hin.

V2.6.2 **Nährstoffgehalte**

Die Kationenaustauschkapazität (KAK) variiert im Boden nur wenig zwischen rund 105 mmol_c/kg Feinerde im AEI- und 170 mmol_c/kg Feinerde im C(S)-Horizont (Abb. V2.19). Sie wird im ganzen Boden als mittel klassiert. Im Oberboden ist die KAK mit dem Gehalt an organischem Kohlenstoff korreliert und im Unterboden folgt sie mit Ausnahme des C(S)-Horizontes dem Tongehalt (Abb. V2.4 und V2.8). Beim grössten Wert im C(S)-Horizont handelt es sich vermutlich um einen Artefakt der Messung, der durch die Kalkauflösung während der Extraktion zustande kommt.

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)

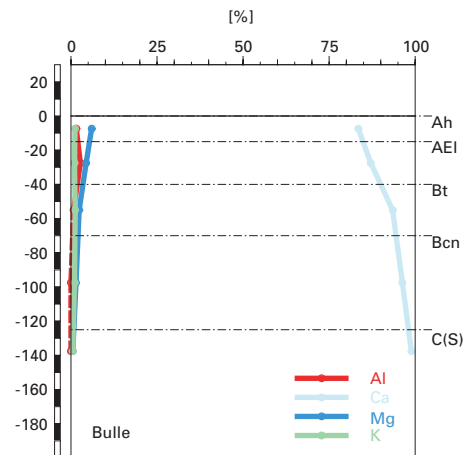


Abb. V2.19 (links) Kationenaustauschkapazität

Abb. V2.20 (rechts) Belegung des Kationenaustauschers

Der Kationenaustauscher wird im ganzen Boden durch Ca dominiert (Abb. V2.20), dessen Belegung sich zwischen 84% im Ah- und 99% im C(S)-Horizont bewegt. Die Mg-Belegung nimmt mit der Tiefe kontinuierlich von 6% im Ah- auf 0.5% im C(S)-Horizont ab und die K-Belegung ist im ganzen Boden mehr oder weniger konstant um 1%. Nur im mässig sauren Oberboden wurden die Nährstoffkationen in geringem Ausmass vom Austauscher verdrängt, wobei diese Verdrängung nicht allein auf Aluminium zurückgeht, sondern zu einem ebenso grossen Anteil durch Mangan verursacht wird (Tab. A 166 in Zimmermann et al. 2006).

In den Abb.V2.21 bis V2.23 sind die Vorräte an Ca, Mg und K dargestellt. Am stärksten ist die Vorratzzunahme mit der Tiefe beim Ca ausgeprägt. Bereits in 40 cm Tiefe erreicht der Ca-Vorrat einen sehr hohen Wert. Der Magnesium- und der Kaliumvorrat nehmen mit der Tiefe weniger stark zu als der Ca-Vorrat. Im Unterboden schwächt sich die Vorratzzunahme bei beiden Nährstoffen ab. Im Hauptwurzelraum (bis 60 cm Tiefe) wird das Angebot an Nährstoffkationen wie folgt beurteilt:

Ca sehr hoch

Mg mittel

K gering

Da der Boden mindestens bis 150 cm Tiefe durchwurzelbar ist, werden der Mg- und der K-Vorrat etwas besser bewertet. Bis 150 cm Tiefe ist der Ca-Vorrat unverändert sehr hoch und der Mg- sowie der K-Vorrat sind mässig hoch. Insgesamt werden die Vorräte als mässig hoch beurteilt.

Es ist zu bedenken, dass die Nährstoffversorgung vom Wasserhaushalt des Bodens abhängig ist. Diesbezüglich herrschen günstige Bedingungen, denn das Risiko für Trockenstress ist an diesem Standort klein. Damit können die Pflanzen die Nährstoffe praktisch uneingeschränkt nutzen.

Kalzium-Vorrat

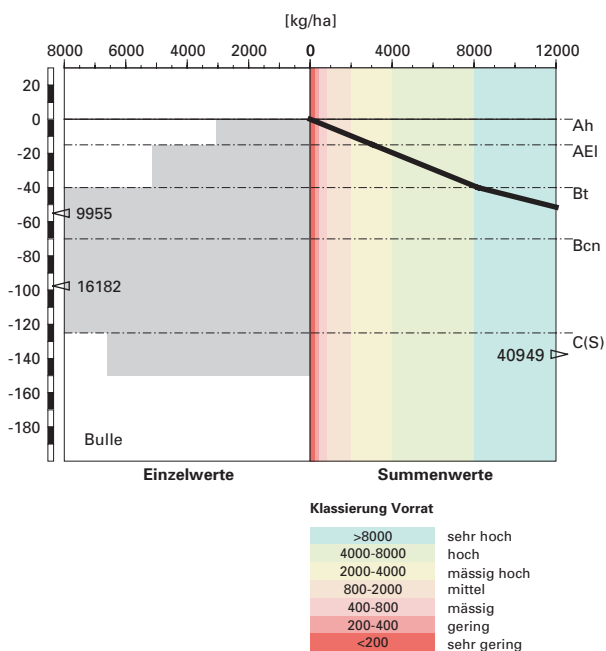


Abb.V2.21 Vorrat an Kalzium

Magnesium-Vorrat

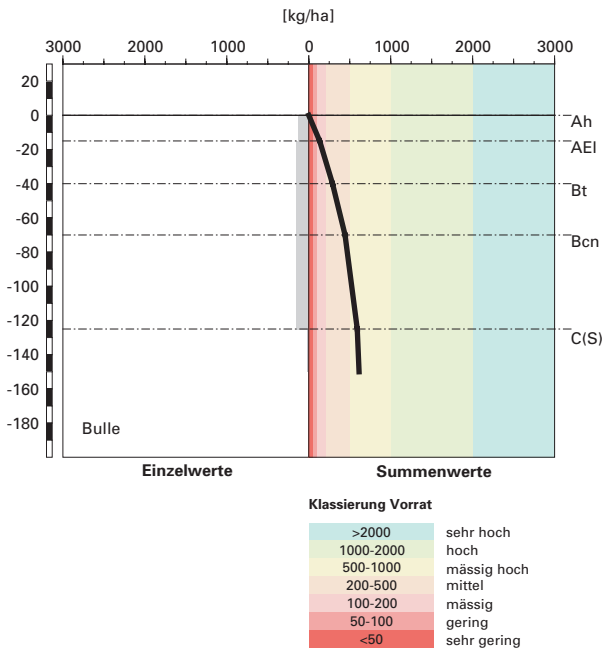


Abb. V2.22 Vorrat an Magnesium

Kalium-Vorrat

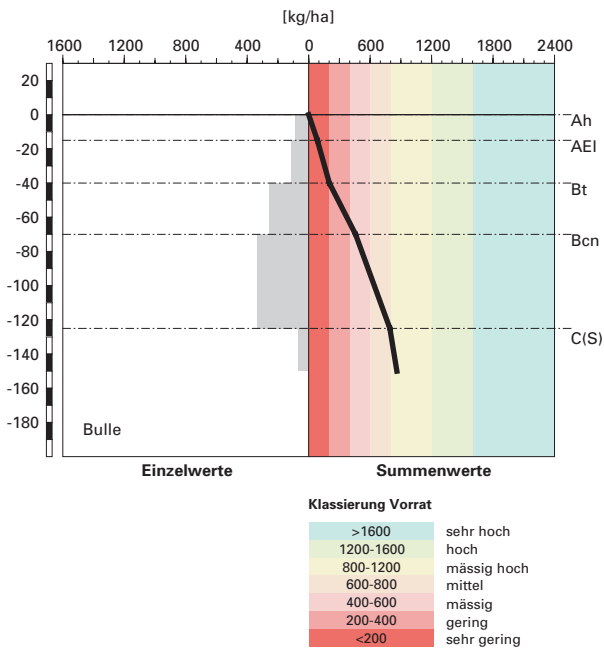


Abb. V2.23 Vorrat an Kalium

V2.7 Themenbereich «Waldbaulich relevante Bodenkennwerte und Baumartenwahl»

V2.7.1 Steckbrief für die Waldbehandlung

Der Steckbrief (Tab. V2.5) orientiert über waldbaulich relevante Standortfaktoren und Bodenkennwerte.

V2.7.2 Baumartenwahl

Naturnähe von Bestand und Oberboden

Dieser Mischbestand aus Buchen, Tannen und einzelnen Fichten enthält anthropogen bedingt zuviel Nadelholz. In einem naturnahen Bestand wäre der Buchenanteil etwas grösser. Nach Burger et al. (1996) trifft man an diesem Buchenstandort (Einheit 8a) häufig Mull an. Der vorhandene Mull ist demnach standorttypisch.

Baumartenwahl gemäss standortkundlichen Grundlagenwerken

Gemäss BUWAL (2005) sind an diesem Buchenstandort (Einheit 8a) folgende Baumarten für die Waldverjüngung geeignet: Buche, Tanne, Bergahorn und Esche. Es wird explizit darauf hingewiesen, von der Verjüngung des Kirschbaums abzusehen. Diese relativ kleine Auswahl ist unter anderem durch das kühle Klima bedingt. Ob und inwieweit zusätzlich zum Klima auch ungünstige Bodeneigenschaften die Baumartenauswahl einschränken, wird gleich anschliessend beschrieben.

Bodenkundliche Kriterien für die Baumartenwahl

■ Durchwurzelbarkeit des Bodens

Die nicht optimale Durchlüftung dieser sehr schwach pseudovergleyten Parabraunerde dürften ihre Durchwurzelbarkeit nur unwesentlich beeinträchtigen. Wir gehen also davon aus, dass der Boden von allen Baumarten weitgehend uneingeschränkt und tief durchwurzelt werden kann. Damit schränkt die Durchwurzelbarkeit des Bodens die Baumartenauswahl nicht ein.

■ Entwässerung des Bodens durch die Bäume

Die biologische Entwässerung spielt in diesem bloss schwach verässteten Boden für die Baumartenwahl eine marginale Rolle und wird vernachlässigt.

Tab. V2.5 Steckbrief für die Waldbehandlung (Bulle)		
Standortangaben		
Relief	Höhe	910 m ü. M.
	Exposition	SSE
	Neigung	55 %
Klima	Jahresniederschlag	1590 mm
	Jahrestemperatur	7.3°C
Ausgangsgestein	Moräne der Würmvergletscherung	
Baumbestand	Struktur	zweischichtig
	Schlussgrad	90 %
	Baumarten (Deckung)	40 % Rotbuche, 40 % Weiss-Tanne, 5 % Fichte
	Oberhöhe	30 m
Waldgesellschaft	nach E & K 1972	Nr. 8: Waldhirschen-Buchenwald
	nach BUWAL 2005	Einheit 8a: Typischer Waldhirschen-Buchenwald
Bodenkennwerte		
Bodensystematik	Humusform	Mull
	Bodentyp	Parabraunerde
	Vernässungsgrad	sehr schwach pseudovergleyt
Wasser- und Lufthaushalt	Durchlüftung	Die Durchlüftung ist in diesem schwach hydromorph gezeichneten Boden unterhalb von 40 cm Tiefe zeitweise ungenügend. Die Vernässung ist durch Stauwasser bedingt.
	Durchwurzelbarkeit	Der Boden ist für alle Baumarten uneingeschränkt und mindestens profilumfassend durchwurzelbar. Die stellenweise nicht optimale Durchlüftung des Bodens dürfte seine Durchwurzelbarkeit nur wenig beeinträchtigen. Der Wurzelraum wird mit mehr als 120 cm Mächtigkeit als sehr tiefgründig klassiert. Wurzeln wurden bis 125 cm Tiefe beobachtet.
	pflanzenverfügbares Wasser	Unter den gegebenen klimatischen Bedingungen besteht für alle Baumarten ein kleines Risiko für Trockenstress.
Säurezustand	pH-Wert/Kalkgrenze	Der Boden ist bis 70 cm Tiefe mässig sauer und in 70–125 cm Tiefe schwach sauer. Die Kalkgrenze verläuft in 125 cm Tiefe.
	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. Unterstützt wird diese Aussage durch das mässig enge C/P-Verhältnis im Ah-Horizont. Die biologische Aktivität wird gesamthaft als hoch beurteilt.
	Nährstoffvorräte (Ca, Mg, K)	Die Vorräte der Nährstoffkationen bis 120 cm Tiefe sind recht gross. Der Ca-Vorrat ist sehr hoch, der Mg-Vorrat mässig hoch und der K-Vorrat mittel.
Verankerung	Da der Boden sehr tiefgründig ist, wird die Verankerung des Baumbestandes als gut bewertet.	
Befahrbarkeit	Der Boden reagiert in nassem Zustand sehr empfindlich auf Befahren mit schweren Maschinen.	

■ Trockenstress-Risiko für die Bäume

Es besteht nur ein kleines Risiko für Trockenstress. Im Boden dürfte für alle Baumarten meist ein ausreichender Wasservorrat verfügbar sein. Dieses Kriterium schränkt die Baumartenauswahl nicht ein.

■ Säurezustand und Aluminium-Toxizität

Es besteht kein Risiko für Al-Toxizität. Da der Boden aber bis 125 cm Tiefe im sauren pH-Bereich liegt und eine grosse Empfindlichkeit für eine weitere pH-Abnahme besteht, ist eine Verbesserung des Säurezustandes erwünscht. Da die Humusform ein Mull ist, lässt sich der Säurezustand des Bodens jedoch nicht wesentlich verbessern. Durch den Ersatz des aktuell zu hohen Nadelholzanteils mit Laubholz kann die Streu verbessert und die natürliche Säureproduktion durch den rascheren und umfassenderen Streuabbau vermindert werden. Die Säureproduktion lässt sich durch diese waldbauliche Massnahme allerdings nur geringfügig reduzieren.

■ Nährstoffangebot im Boden

Die biologische Aktivität im Oberboden ist hoch. Eine Erhöhung der Mineralisierung durch Einbringen geeigneter Baumarten ist grundsätzlich nicht nötig. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass durch den Ersatz des aktuell zu hohen Nadelholzanteils mit Laubholz eine noch bessere Nährstoffumsetzung erzielt werden kann.

Die in allen Horizonten relativ ausgeglichenen Gehalte an Nährstoffkationen und deren bis 120 cm Tiefe insgesamt recht grosser Vorrat dürften allen Baumarten ein konkurrenzkräftiges Wachstum erlauben. Dies gilt selbst für die nährstoffbedürftigen Edellaubhölzer. Die Nährstoffvorräte für sich allein betrachtet schränken die Baumartenauswahl nicht ein.

V2.7.3

Baumartenempfehlung

Aufgrund des kühlen Klimas lassen sich an diesem Buchenstandort nicht alle Baumarten einbringen. Zudem schränken zwei der von uns betrachteten bodenkundlichen Kriterien die Baumartenauswahl ein, und zwar der Säurezustand des Bodens und die Mineralisierung im Oberboden. Die in [Tab.V2.6](#) enthaltene Baumartenempfehlung vom BUWAL (2005) ist hinsichtlich dieser einschränkenden Kriterien zu hinterfragen.

Aus bodenkundlicher Sicht sind an diesem Waldstandort grundsätzlich Laubbaumarten zu fördern. Der Boden erlaubt vielen Laubbaumarten ein konkurrenzstarkes Wachstum. Die Laubhölzer erhalten die Bodenqualität nachhaltig, indem ihre gut abbaubare Streu die biologische Aktivität im Oberboden fördert, was günstige Auswirkungen auf den Säurezustand des Bodens und die Verfügbarkeit der Nährstoffe hat.

Tab. V2.6 Baumartenempfehlung für den Hauptbestand	
Referenz	Baumarten
Grundlagenwerke (Einheit 8a; BUWAL 2005)	Buche, Tanne, Bergahorn, Esche (keine Kirsche)
Bodenkundliche Kriterien	Buche, Tanne, Bergahorn, Esche

Die Baumartenempfehlung in **Tab. V2.6** (BUWAL 2005) steht mit jener aus bodenökologischer Sicht in Einklang. Die Tanne wächst natürlicherweise auf diesem Standort. Wenn sie nicht einen zu hohen Anteil im Bestand einnimmt, beeinflusst sie den Boden nicht nachteilig.

V2.8 Literatur

Burger, T./Danner, E./Kaufmann, G./Lüscher, P./Stocker, R., 1996: Standortskundlicher Kartierungsschlüssel für die Wälder der Kantone Bern und Freiburg. Teil 1: Kommentare zu den Waldgesellschaften. Teil 2: Anwenderschlüssel. Teil 3: Anwenderschlüssel, Anhang. Solothurn/Lenzburg/Birmensdorf, ARGE Kaufmann + Partner / Burger + Stocker / Forstliche Bodenkunde WSL. Herausgeber: Amt für Wald und Natur, Kanton Bern und Kantonsforstamt, Kanton Freiburg.

BUWAL, 2005: Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion, Vollzug Umwelt. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 564 S.

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.

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

Zimmermann, S./Luster, J./Blaser, P./Walthert, L./Lüscher, P., 2006: Waldböden der Schweiz. Band 3. Regionen Mittelland und Voralpen. Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Bern, Hep Verlag. 848 S.