

A3 Bodenprofil St.Stephan

A3.1 Themenbereich «Bodenbildungsfaktoren und Profilmorphologie»

A3.1.1 Zusammenfassende Angaben zum Profil und zu den Bodenbildungsfaktoren

Das Bodenprofil ist in [Abb.A3.1](#) dargestellt. Einen Eindruck vom Bestand vermittelt [Abb.A3.2](#). [Tab.A3.1](#) fasst wichtige Angaben zum Boden und Profilort St.Stephan zusammen und [Tab.A3.2](#) orientiert über die Bodenbildungsfaktoren.

A3.1.2 Verbreitung gemäss Bodeneignungskarte der Schweiz

Das Profil gehört zur Kartierungseinheit S7 (alpine Flysch-Berglandschaft, Bündnerschiefer, steile Nordhänge, Hangneigung >35%). 571 Stichproben des Landesforstinventars gehören dieser Kartierungseinheit an. Das Profil repräsentiert damit 4.8% der mit dem LFI insgesamt erfassten 11'863 Stichproben.

A3.1.3 Besonderheiten am Profilort

Sedimente des Niesen-Flysch bilden das Ausgangsgestein am Standort St.Stephan. In [Tab.A3.2](#) wird für die entsprechende Lithofazies ein sehr niedriger Tongehalt des Gesteins angegeben. Aufgrund des grossen Tongehaltes der Feinerde vermuten wir jedoch, dass der Tongehalt des Ausgangsgesteins am Profilort St.Stephan höher als jener für Lithofazies 13 (Sandsteine: Flysch und Kreide) ist.

Die Farbe des Bodens ist bis zur Aufschlusstiefe relativ dunkel. Da der Niesen-Flysch dunkel ist, handelt es sich dabei um eine Eigenfärbung des Bodens, verursacht durch das Ausgangsgestein.

A3.1.4 Profilmorphologie und Klassierung

Die im Profil angesprochenen morphologischen Bodenmerkmale sind in [Tab.A3.3](#) zusammen mit einer Profilskizze dargestellt.

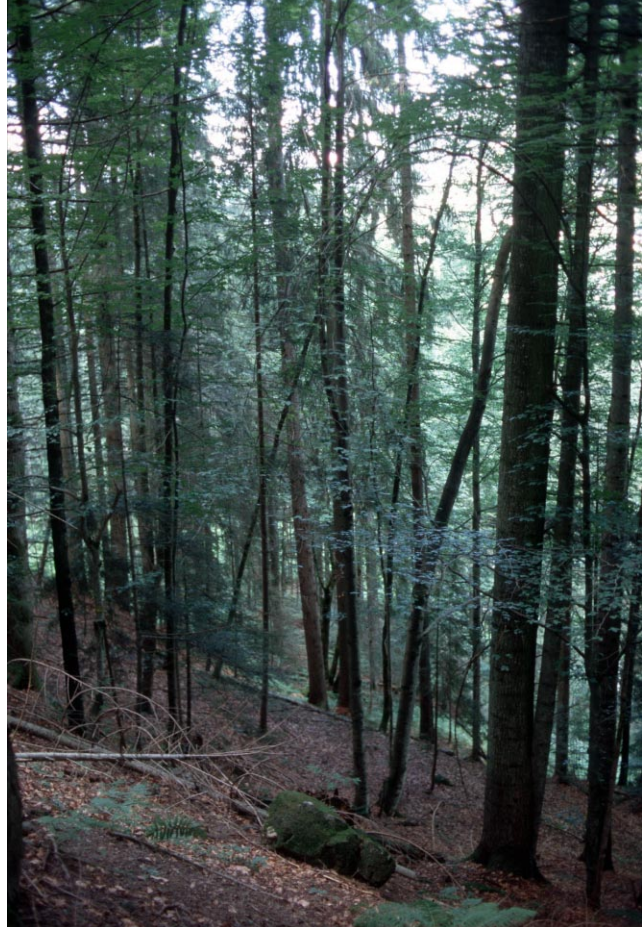


Abb. A3.1 (links) Bodenprofil St.Stephan

Abb. A3.2 (rechts) Bestand am Profilort St.Stephan

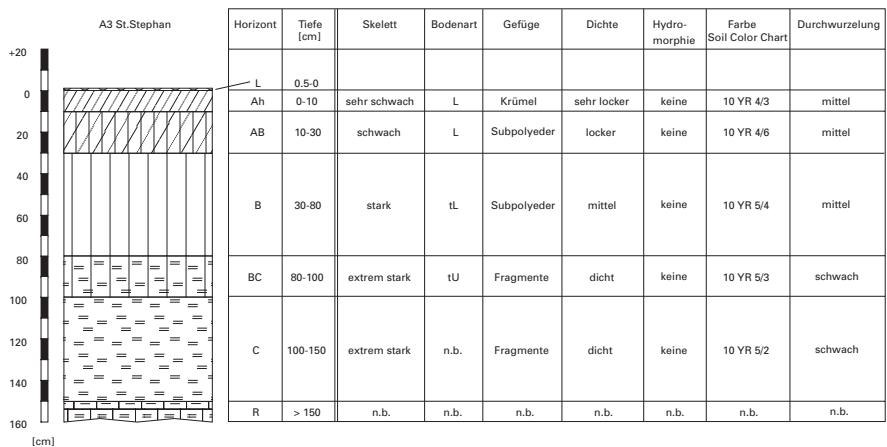
Tab. A3.1 Zusammenfassende Angaben zum Profil St.Stephan	
Lokalname	Dürri (Kanton Bern, Gemeinde St.Stephan)
Lage	Landeskarte 1:25 000 Blatt 1246, Zweisimmen Koordinaten 596710/149940
Waldgesellschaft (Ellenberg und Klötzli 1972)	Nr. 18: Typischer Tannen-Buchenwald (<i>Abieti-Fagetum typicum</i>)
Horizontfolge	L-Ah-AB-B-BC-C-R
Humusform	Mull
Bodentyp	Braunerde
Bodentyp nach FAO (1988)	Eutric Cambisol

Tab. A3.2 Bodenbildungsfaktoren am Profilort St.Stephan			
Relief	Höhe ü. M.	1130 m	
	Exposition	NE	
	Neigung	75 %	
	Geländeform	Mittelhang	
Ausgangsgestein	Tektonik/Geologie	Penninikum; Niesen-Decke; Mesozoische Sedimente (karbonathaltige Flyschsedimente)	
	Lithofazies (nach Tuchschnid 1995)	Nr. 13: Sandsteine (Flysch und Kreide) physikalische Verwitterbarkeit Gestein: gross–mittel chemische Verwitterbarkeit Gestein: klein–mittel Tongehalt Gestein: sehr niedrig	
Klima	T/N Jahresmittel	6.0°C/1581 mm	
	T/N Januarmittel	–1.8°C/120 mm	
	T/N Julimittel	14.9°C/136 mm	
	Tage mit Schneedecke	131	
	Wärmegliederung	ziemlich rauh	
	Länge der Vegetationsperiode	150–165 Tage	
Pflanzen	Schicht	Deckung	häufigste Arten
	Baumschicht (25–30 m Höhe)	90 %	75 % Weiss-Tanne (<i>Abies alba</i>) 15 % Rotbuche (<i>Fagus sylvatica</i>)
	Strauchschicht	1 %	–
	Krautschicht	15 %	Gemeiner Waldfarn (<i>Athyrium filix-femina</i>) Gemeiner Sauerklee (<i>Oxalis acetosella</i>) Hasenlattich (<i>Prenanthes purpurea</i>) Berg-Goldnessel (<i>Lamium galeobdolon subsp. montanum</i>) Ausdauerndes Bingelkraut (<i>Mercurialis perennis</i>) Fingerblättrige Zahnwurz (<i>Cardamine pentaphyllos</i>)
	Mooschicht	0.5 %	–

Tab. A3.3

Profilskizze und Morphologie des Bodenprofils St. Stephan

Bodenart: L Lehm, tL toniger Lehm, tU toniger Schluff-Lehm; n.b. nicht bestimmt



Der Boden ist durchwegs von einer Streuschicht (L) bedeckt, die überwiegend von der Weiss-Tanne, vereinzelt von der Rotbuche und stellenweise von krautigen Pflanzen stammt. Die Streu wird innerhalb eines Jahres weitgehend zersetzt, so dass die organische Auflage lediglich aus einer Streuschicht besteht. Mit der Horizontfolge L-Ah wird die Humusform als Mull klassiert.

Im Mineralboden können aufgrund der morphologischen Merkmale über dem felsigen Ausgangsgestein fünf Horizonte unterschieden werden. In diesem Boden ist der starke bis extrem starke Skelettgehalt des Unterbodens besonders auffällig, während der Oberboden nur sehr schwach bis schwach skeletthaltig ist. Farblich ist das Profil durch gelb-braune bis braune Töne gekennzeichnet. Der Oberboden ist von 0–10 cm Tiefe matt gelblich-braun, darunter bis 30 cm braun. Die Zone von 30 bis 100 cm Tiefe ist wieder matt gelblich-braun, allerdings etwas heller als die obersten 10 cm des Bodens. Unterhalb von 100 cm Tiefe zeigt die gräulich gelb-braune Farbe den geringen Verwitterungsgrad an.

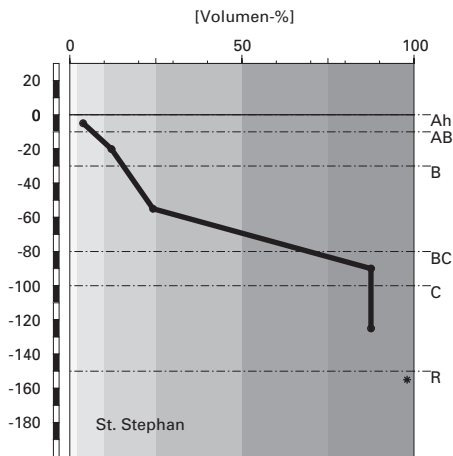
Mit der Fühlprobe wurde für den Oberboden ein Lehm als Bodenart bestimmt. Im Unterboden wurden etwas mehr Ton, bzw. Ton und Schluff festgestellt und als Bodenart ein toniger Lehm, bzw. ein toniger Schluff-Lehm bestimmt. Das Gefüge verändert sich von einer Krümelstruktur in den obersten 10 cm über eine Subpolyederstruktur in der Zone von 10 bis 80 cm Tiefe zu einer Fragmentstruktur in mehr als 80 cm Tiefe. Im Einklang mit Bodenart und Gefüge nimmt die Dichte mit der Tiefe von sehr locker bis dicht stark zu. Im ganzen Profil sind keine hydromorphen Merkmale vorhanden.

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

Ergänzende Bodenmerkmale

Die Kalkgrenze verläuft in 80 cm Tiefe. Gemäss pH-Hellige ist die Feinerde oberhalb der Kalkgrenze schwach sauer. Die Durchwurzelung des Bodens ist bis 80 cm Tiefe mittel und von 80–150 cm Tiefe bis zum wurzelfreien felsigen Ausgangsgestein schwach. Die Durchwurzelbarkeit des Bodens ist aufgrund des felsigen Untergrundes ab 150 cm Tiefe stark eingeschränkt.

Skelettgehalt



Klassierung Skelettgehalt

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

Bodenart

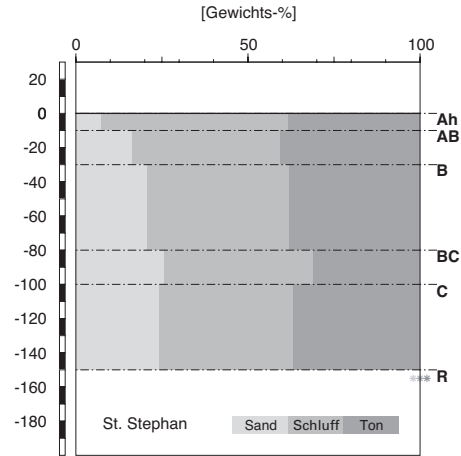


Abb. A3.3 (links) Skelettgehalt

Abb. A3.4 (rechts) Bodenart

A3.2 Themenbereich «Physikalische Bodenkennwerte»

A3.2.1 Beschrieb einiger physikalischer Bodenkennwerte

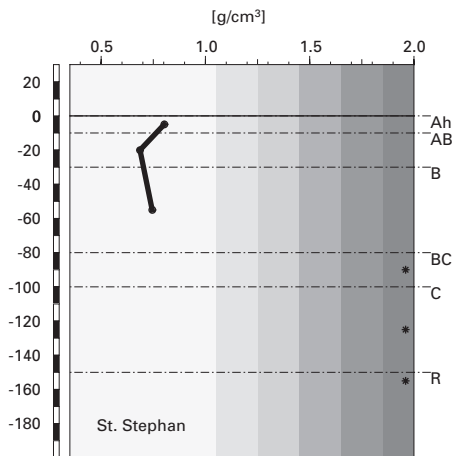
Skelettgehalt

Der Skelettgehalt nimmt mit der Tiefe stark zu (Abb. A3.3). Der Boden ist in den obersten 10 cm schwach, in 10 bis 80 cm Tiefe mittel und ab 80 cm Tiefe extrem stark skeletthaltig. In 150 cm Tiefe ist der Felsuntergrund anstehend.

Bodenart

Die Feinerde besteht im gesamten Profil mehrheitlich aus Schluff und Ton (Abb. A3.4). Der Sandanteil nimmt mit der Tiefe zu, was in Einklang steht mit dem Verwitterungszustand des Bodens. In Bezug auf den Tongehalt handelt es sich in allen Horizonten um schweren Boden. Der relativ hohe

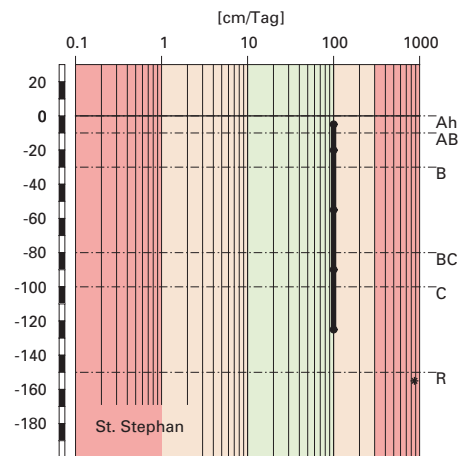
Feinerde-Dichte



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. A3.5 (links) Dichte der Feinerde

Abb. A3.6 (rechts) Wasserleitfähigkeit im gesättigten Boden

Tonanteil ist auf das geologische Ausgangsgestein Flysch zurückzuführen. Bei der Bestimmung der Bodenart im Feld wurde der Tongehalt unterschätzt (Tab. A3.3).

Dichte der Feinerde

Die Dichte der Feinerde ist bis 80 cm Tiefe äusserst gering (Abb. A3.5). Weiter unten im Profil ist der Skelettgehalt mit rund 90 % so gross, dass keine Dichteproben entnommen werden konnten. Aufgrund der Dichtebestimmung im Feld wissen wir, dass der Boden ab 80 cm Tiefe ziemlich dicht ist (Tab. A3.3).

Wasserleitfähigkeit im gesättigten Boden

Das Profil ist aufgrund seiner äusserst geringen Dichte bis 80 cm Tiefe hoch durchlässig (Abb. A3.6). Beim Übergang zum Felsuntergrund ist die Durchlässigkeit gehemmt, so dass das Wasser auf dem Fels abfließt.

pflanzenverfügbares Wasser

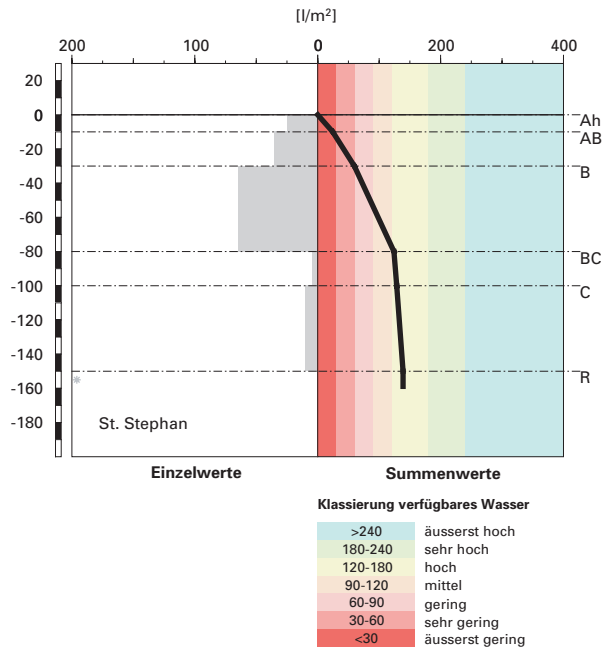


Abb. A3.7 Pflanzenverfügbares Wasser

Pflanzenverfügbares Wasser

Die Wasserspeicherkapazität des Bodens bis 120 cm Tiefe beträgt 133 l/m^2 , was als hoch klassiert wird (Abb. A3.7). Es ist zu beachten, dass ab 80 cm Tiefe aufgrund des extremen Skelettgehaltes nur wenig Wasser gespeichert wird.

A3.2.2

Bodenkundliche und ökologische Interpretationen

Wasser- und Lufthaushalt des Bodens

In dieser Braunerde kommen aufgrund der hohen Durchlässigkeit (Abb. A3.6) keine Vernässungsmerkmale vor. Der Fels im Untergrund leitet das Sickerwasser offenbar rasch talwärts ab, so dass es im Boden nicht zu einem länger andauernden Wasserstau kommt. Gesättigte Phasen sind somit höchstens von kurzer Dauer.

Durchwurzelbarkeit des Bodens

Da in 150 cm Tiefe Fels ansteht, ist der Wurzelraum für alle Baumarten begrenzt. Der Boden wird mit 150 cm Mächtigkeit aber dennoch als sehr tiefgründig klassiert.

Bis 150 cm Tiefe ist das Wurzelwachstum nicht eingeschränkt, da die Dichtewerte vermutlich auch im BC- und C-Horizont unter dem kritischen Wert von 1.4 g/cm^3 liegen und die Durchlüftung in allen Horizonten stets ausreichend ist. Der Boden wird vom Baumbestand gut genutzt, denn Tannen- und Buchenwurzeln sind bis zur Profilsohle (150 cm) vorhanden. Wie tief die Bäume ihre Wurzeln in Spalten und Ritzen des Felsuntergrundes vortreiben, wissen wir nicht.

Wasserversorgung des Baumbestandes

Nach unseren Berechnungen, welche sich auf einen Wurzelraum von 120 cm Mächtigkeit beziehen, beginnt der Bestand in Trockenperioden ohne nennenswerte Niederschläge nach rund 15 Tagen an Wassermangel zu leiden. Da die Bäume vermutlich auch das Wasser in den Klüften und Ritzen des Felsuntergrundes nutzen und ein günstiges Klima herrscht, ist an diesem Tannen-Buchenstandort trotz der nicht optimalen Speicherleistung des Bodens kaum je mit Trockenstress zu rechnen.

Bodenbefahrbarkeit

Dieser tonreiche Boden reagiert in nassem Zustand empfindlich auf Befahren mit schweren Maschinen, weil er bis 80 cm Tiefe relativ wenig Skelett enthält. Ein Befahren des Bestandes ist allerdings aufgrund der Steilheit des Geländes nicht möglich.

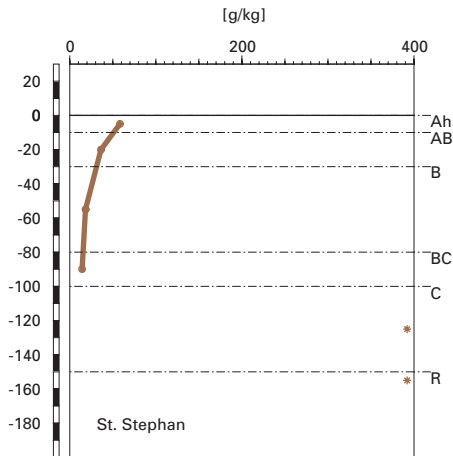
A3.3 Themenbereich «Bodenhauptbestandteile»

A3.3.1 Charakterisierung der Bodenhauptbestandteile

Organische Substanz

Das Bodenprofil befindet sich in einem Waldbestand, welcher sich hauptsächlich aus Weisstannen und Rotbuchen zusammensetzt, deren Baumkronen 90% der Fläche übersichern. Es ist eine spärliche Krautschicht mit einem Deckungsgrad von 15% vorhanden. Sie besteht aus gemeinem Waldfarn, gemeinem Sauerklee, Hasenlattich, Berg-Goldnessel, Bingelkraut und fingerblättriger Zahnwurz. Die Streu stammt vor allem von den Bäumen und ist nur mässig gut abbaubar.

organischer Kohlenstoff



Kohlenstoff-Vorrat

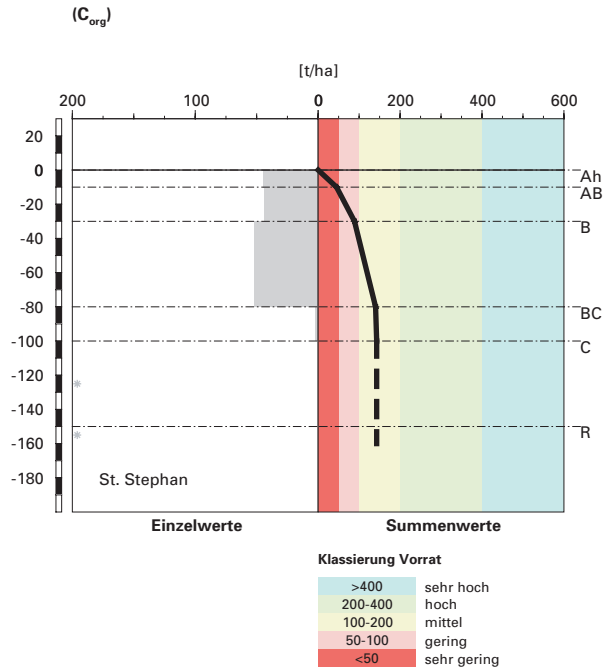


Abb. A3.8 (links) Gehalt an organischem Kohlenstoff

Abb. A3.9 (rechts) Vorrat an organischem Kohlenstoff

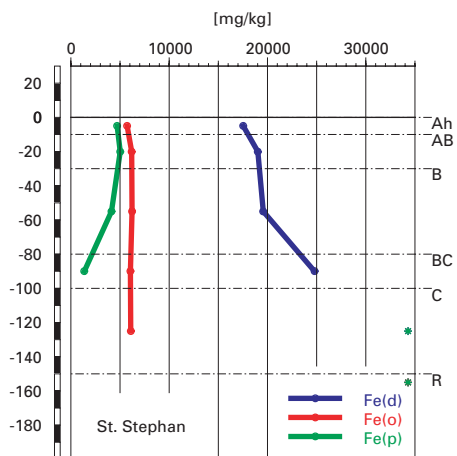
Der Ah- und der AB-Horizont sind dunkler gefärbt als die tiefer gelegenen Horizonte. Ihr Gehalt an organischem Kohlenstoff (C_{org}) ist mit 5.8 % bzw. 3.6% mindestens doppelt so gross wie jener im B- und im BC-Horizont (Abb. A3.8). Der C_{org} -Gehalt nimmt bis in den BC-Horizont auf rund 1.6% ab. Aus diesen Gehalten resultiert ein Vorrat an organischem Kohlenstoff von 143 t/ha (Abb. A3.9).

Tonverteilung sowie Verteilung von Aluminium- und Eisenoxiden

Der Tongehalt schwankt in diesem Boden nur in einem engen Bereich (Abb. A3.4). Der minimale Gehalt befindet sich mit 31% im BC-Horizont, in allen anderen Horizonten liegt er zwischen 37 und 41%.

Das Dithionit-extrahierbare Eisen (Fe_d) nimmt vom Ah- bis in den BC-Horizont praktisch linear von 17.5 auf 24.8 g/kg zu (Abb. A3.10). Auch unter Berücksichtigung der Verdünnung durch die organische Substanz sind die Gehalte linear zunehmend. Anders verhalten sich die Oxalat- und Pyro-

Eisen-Oxide (Gehalte)



Aluminium-Oxide (Gehalte)

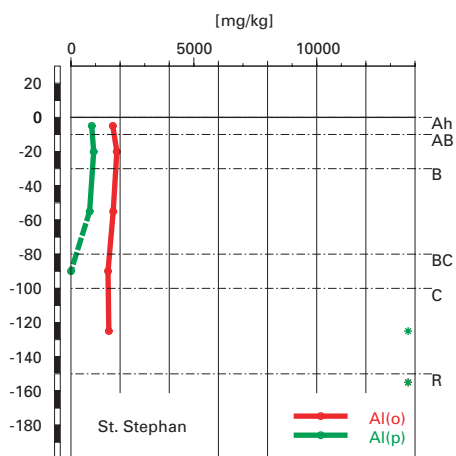


Abb. A3.10 (links) Gehalte an Dithionit- (Fe_d), Oxalat- (Fe_o) und Pyrophosphat- (Fe_p) extrahierbarem Eisen

Abb. A3.11 (rechts) Gehalte an Oxalat- (Al_o) und Pyrophosphat- (Al_p) extrahierbarem Aluminium

Eisen- und Aluminiumoxide (Verhältnisse)

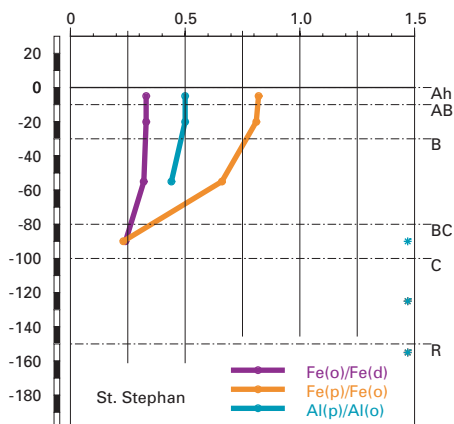


Abb. A3.12 Verhältnisse der Fe- und Al-Oxide

phosphat-extrahierbaren Verbindungen. Die Oxalat-extrahierbaren Aluminium- und Eisenverbindungen (Al_o bzw. Fe_o) sind vom Ah- bis in den C-Horizont praktisch konstant (Abb. A3.10 und A3.11). Berücksichtigt man allerdings die Verdünnung durch die organische Substanz, so nehmen die Gehalte mit der Tiefe leicht ab. Die Pyrophosphat-extrahierbaren Aluminium- und Eisenverbindungen (Al_p bzw. Fe_p) weisen eine konvexe Tiefenverteilung mit einem Maximum im AB- und einem Minimum im BC-Horizont auf (Abb. A3.10 und A3.11).

Das Fe_o/Fe_d -Verhältnis ist im ganzen Boden relativ klein (Abb. A3.12). In den obersten 80 cm hat es einen Wert um 0.3 und nimmt im BC-Horizont auf rund 0.2 ab. Die Al_p/Al_o - und Fe_p/Fe_o -Verhältnisse nehmen mit der Tiefe ab. Sie sind im Oberboden mit Werten um 0.5 bzw. 0.8 am grössten (Abb. A3.12). Das Fe_p/Fe_o -Verhältnis nimmt bis in den BC-Horizont sehr stark auf 0.2 ab, während das Al_p/Al_o -Verhältnis bis in den B-Horizont nur leicht auf 0.4 abnimmt und im BC-Horizont nicht bestimmt werden kann, da Al_p in diesem Horizont unterhalb der Bestimmungsgrenze liegt.

A3.3.2

Bodenkundliche Interpretation

An diesem in NE-Exposition auf 1130 m.ü.M. gelegenen Standort sind die Abbaubedingungen so gut, dass die nur mässig gut abbaubare Streu innerhalb eines Jahres vollständig zersetzt wird. Als Humusform hat sich ein Mull entwickelt. Das feuchte (durchschnittliche jährliche Niederschläge 1581 mm) und ziemlich rauhe Klima (Jahresdurchschnittstemperatur 6.0°C, durchschnittliche Julitemperatur 14.9°C) liefert genügend Wärme und Feuchtigkeit, um eine hohe biologische Aktivität zu gewährleisten. Zudem ist die Feinerde des Oberbodens nur mässig sauer und begünstigt damit das Vorkommen von Regenwürmern. Das C/N- bzw. C/P-Verhältnis ist im Ah-Horizont mit 17 bzw. 175 mittel bzw. mässig eng. Dieses C/N-Verhältnis lässt eine mittlere Mineralisierungsrate der organischen Substanz erwarten. Der Humusaufbau und die Humusstabilisierung sind in diesem Boden nicht sehr ausgeprägt, weshalb die Gehalte an organischem Kohlenstoff nur mittlere bis kleine Werte erreichen. Da die humusreichsten Oberbodenhorizonte einen relativ geringen Skelettgehalt aufweisen, konnte sich trotzdem ein im gesamtschweizerischen Vergleich mittlerer Vorrat an organischem Kohlenstoff von 143 t/ha aufbauen (Abb. A3.9).

Der über die gesamte Bodentiefe mehr oder weniger konstante und beträchtliche Tongehalt von 31 bis 41% zeigt, dass das aus karbonathaltigen Flyschsedimenten bestehende Ausgangsgestein feinkörnig verwittert. Dies ist bei den Sedimenten des Niesen-Flysch plausibel. Zusätzlich dürften im Oberboden in der Zone der intensivsten Verwitterung während der Boden-

bildung sekundäre Tonminerale gebildet worden sein. Das Ausmass dieser Neubildung ist aber nicht sehr ausgeprägt, da keine markante Zunahme des Tongehaltes gegen den Oberboden feststellbar ist.

Aufgrund der Fe_d -Gehalte muss geschlossen werden, dass die Feinerde mit der Tiefe eisenreicher wird. Dies kann nicht auf Verlagerungsprozesse zurückgeführt werden, da die Fe_o - und Fe_p -Gehalte keine Anzeichen einer Verlagerung zeigen. Offensichtlich wird das Ausgangsgestein mit der Tiefe ebenfalls eisenreicher, was sich in den Fe_d -Gehalten der Feinerde widerspiegelt.

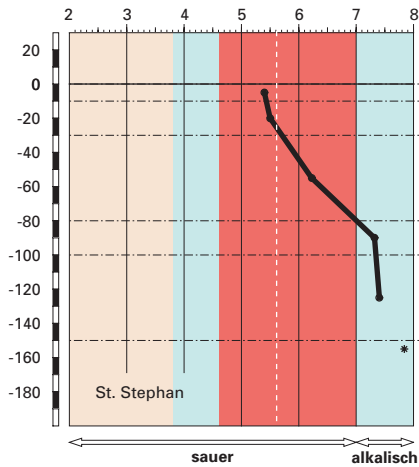
Sowohl die Al_o - als auch die Fe_o -Gehalte nehmen vom Ah-Horizont bis in den C-Horizont nur leicht ab. Ähnlich wie beim Tongehalt muss deshalb auch hier angenommen werden, dass die Verbraunungsprozesse mit sekundärer Aluminium- und Eisenoxiddbildung nicht sehr ausgeprägt sind. Dementsprechend würde es sich um einen eher schwach entwickelten Boden handeln.

Die Pyrophosphat-extrahierbaren Gehalte widerspiegeln den Tiefenverlauf des Gehaltes an organischem Kohlenstoff. Die Al_p - und Fe_p -Gehalte, welche Verbindungen mit der organischen Substanz repräsentieren, sind im Oberboden am grössten und nehmen mit der Tiefe ab. Dementsprechend verhalten sich auch die Verhältnisse von Pyrophosphat- zu Oxalat-extrahierbaren Gehalten. In den obersten 80 cm sind rund 45 bis 50% der amorphen Aluminiumoxide mit der organischen Substanz assoziiert. Im BC-Horizont ist Al_p nicht mehr bestimmbar. Von den amorphen Eisenverbindungen finden sich in den obersten 80 cm zwischen rund 65 und 80 % an der organischen Substanz des Bodens. Dieser Anteil nimmt im BC-Horizont auf rund 20 % ab.

Das im gesamten Boden relativ kleine Fe_o/Fe_d -Verhältnis zeigt einen hohen Kristallinitätsgrad der Eisenoxide an. Diese hohe Kristallinität ist vermutlich viel mehr auf einen hohen Anteil primärer, lithogener Eisenoxide zurückzuführen, als auf stark ausgeprägte Alterungsprozesse von sekundären Eisenoxiden, welche während der Bodenbildung entstanden sind. Dies steht im Einklang mit einer nur schwachen Tonmineralneubildung und einem geringen Gradienten zwischen den Oxalat-extrahierbaren Verbindungen in den A- und B-Horizonten im Vergleich zum C-Horizont.

Aufgrund der morphologischen Merkmale wurde dieser Boden als Braunerde klassiert. Diese Klassierung lässt sich durch die Interpretation der Bodenhauptbestandteile bestätigen. Allerdings ist die Verbraunung erst sehr schwach ausgeprägt und der Boden steht in seinem Entwicklungsstadium einem Rohboden sehr nahe.

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

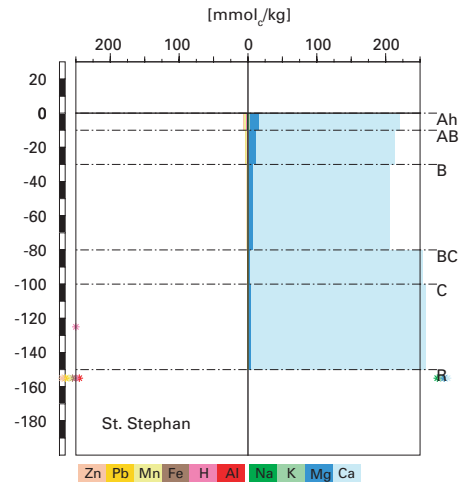


Abb. A3.13 (links) pH-Wert und Säureklassen

Abb. A3.14 (rechts) Belegung des Kationenaustauschers

A3.4 Themenbereich «Säurezustand»

A3.4.1 Charakterisierung des Säurezustandes

pH-Wert

Die Feinerde ist bis in 30 cm Tiefe mässig sauer und befindet sich in der Säureklasse 3 (**Abb. A3.13**). Mit zunehmender Tiefe nimmt der pH-Wert rasch zu. Der B-Horizont ist nur noch schwach sauer und befindet sich in der Säureklasse 2. In 80 cm Tiefe, im Übergang zum karbonathaltigen Ausgangsgestein, erfolgt ein pH-Sprung in den alkalischen Bereich. Dieser Teil des Bodenprofils liegt in der Säureklasse 1.

Basensättigung

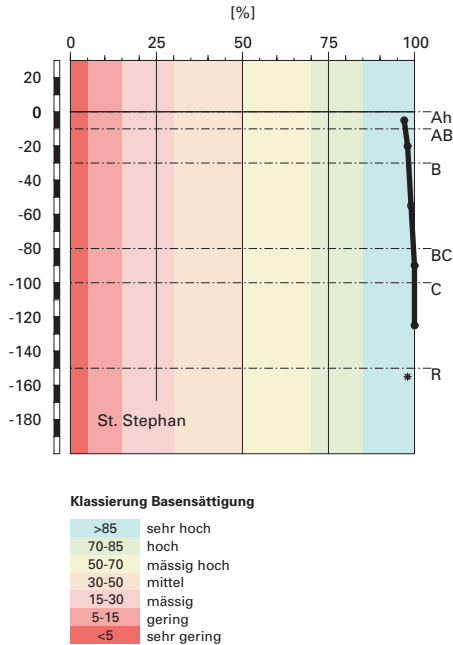


Abb. A3.15 Basensättigung

Austauschbare Kationen und Basensättigung

Der Kationenaustauscher ist im ganzen Profil beinahe vollständig mit Nährstoffkationen, insbesondere mit Kalzium belegt (Abb. A3.14). Austauschbares Kalium ist stark untervertreten, hingegen hat es im Vergleich zu anderen Profilen zumindest im Oberboden relativ viel austauschbares Magnesium. Unter den sauren Kationen, die insgesamt nur einen geringen Teil der Austauscherplätze belegen, sind austauschbare Protonen und Mangan zu etwa gleichen Teilen vertreten, wogegen der Anteil von austauschbarem Aluminium und Eisen unbedeutend ist (Tab. A21 in Blaser et al. 2005). Die Basensättigung ist im ganzen Boden sehr hoch. Ab 30 cm Tiefe ist der Kationenaustauscher praktisch vollständig basengesättigt (Abb. A3.15).

A3.4.2 Interpretationen zum Säurezustand

Stand der Bodenversauerung

Als Folge der an diesem Profilort wirksamen Bodenbildungsfaktoren hat sich aus dem karbonathaltigen Ausgangsgestein im Laufe der Zeit eine Braunerde entwickelt. Diese ist mässig versauert. Die pH-Differenz zwi-

schen dem Ah- und dem C-Horizont beträgt zwar rund 2 Einheiten, erstreckt sich aber nur über die Säureklassen 1 bis 3. Die Kalkgrenze befindet sich in 80 cm Tiefe, oberhalb der Kalkgrenze befindet sich jedoch noch praktisch kein Aluminium am Kationenaustauscher, womit eine Versauerungsfront nicht feststellbar ist. All dies führt zu der Beurteilung einer mässigen Versauerung.

Der Oberboden und der B-Horizont befinden sich in den Säureklassen 2 und 3, in denen Säure durch Auflösung von Silikaten und durch Protonierung variabler Ladungen erfolgt. Im Oberboden wird in der Säureklasse 3 bereits ein kleiner Teil des aus der Silikatauflösung stammenden Aluminiums am Kationenaustauscher eingetauscht. Allerdings sind Protonen und Mangan in grösseren Anteilen am Austauscher vorhanden, weshalb nicht von einer eigentlichen Versauerungsfront gesprochen werden kann. Die gegenüber Aluminium stärkere Belegung des Austauschers durch Protonen und Mangan ist ein Zeichen für die noch geringe Eintauschstärke von Aluminium bei den mässig sauren Bedingungen im Oberboden. Sobald sich die Feinerde durch eine weitere pH-Abnahme im stark sauren pH-Bereich der Säureklasse 4 befindet, wird das zweiwertige Mangan, wie die Nährstoffkationen, sehr rasch durch Aluminium vom Kationenaustauscher verdrängt.

Im Gegensatz zum Oberboden wird im B-Horizont, welcher sich in der Säureklasse 2 befindet, Aluminium als Oxid bzw. Hydroxid vollständig ausgefällt und führt nicht zu einer Belegungsänderung des Kationenaustauschers. Als Folge dieser Prozesse und der mässigen Versauerung ist die Basensättigung im ganzen Profil sehr hoch.

Risiko für Boden und Pflanzen

Die Empfindlichkeit für eine weitere pH-Abnahme wird in diesem Boden als gross bewertet, denn rund 88% der Feinerde befinden sich in den schlecht puffernden Säureklassen 2 und 3. Es ist damit zu rechnen, dass der pH-Wert besonders im Oberboden, der dem grössten Versauerungsdruck ausgesetzt ist, stetig abnehmen wird. Der pH-Wert der Feinerde wird sich der Säureklasse 4 nähern, in welcher die Säurepufferung durch Auflösung von Aluminiumverbindungen erfolgt. Dadurch werden vermehrt Aluminiumionen in Lösung kommen, welche die Nährstoffkationen am Austauscher zunehmend verdrängen und die Basensättigung erniedrigen werden. Wenn die Pflanzen den karbonathaltigen Unterboden durchwurzeln, werden jedoch genügend basische Kationen auf die Bodenoberfläche gebracht, so dass die Oberbodenhorizonte von der Abnahme der Basensättigung weniger betroffen sein werden.

Unterhalb der Kalkgrenze bildet das in der Feinerde vorhandene Karbonat einen wirksamen Puffer gegen die Versauerung. Solange Kalk im Gestein oder in der Feinerde vorhanden ist, wird die pH-Abnahme dieser Horizonte nicht erfassen und die Basensättigung wird hoch bleiben.

Für säureempfindliche Pflanzen besteht kein Risiko für eine Beeinträchtigung des Wachstums, denn die BC/Al-Verhältnisse sind im ganzen Profil weit über dem als kritisch erachteten Grenzwert von 0.2. So lange die basischen Kationen, welche bereits die Austauscherplätze belegen und die bei weiterer Säurepufferung durch Gesteinsauflösung in der Feinerde anfallen werden, im Nährstoffkreislauf gehalten werden können, besteht weiterhin kein Risiko, dass das BC/Al-Verhältnis unter den kritischen Wert von 0.2 absinkt.

A3.5 Themenbereich «Schwermetalle»

A3.5.1 Tiefenverteilung der Schwermetalle

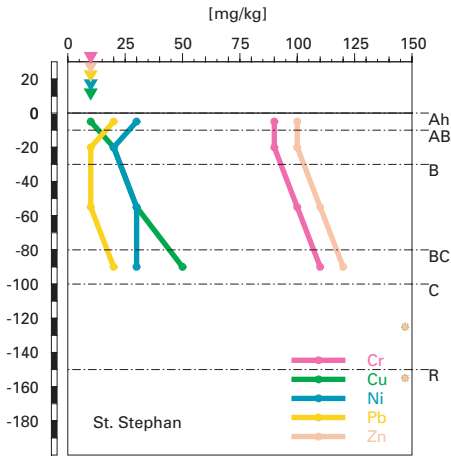
Chrom, Cu und Zn zeigen eine ähnliche Tiefenverteilung (Abb. A3.16). Dabei sind die Gehalte von Cr und Zn im ganzen Oberboden gleich und nehmen dann bis zum BC-Horizont leicht zu. Der Cu-Gehalt steigt im ganzen Profil kontinuierlich von 10 mg/kg im Ah- auf 50 mg/kg im BC-Horizont an. Die Gehalte an Ni und Pb variieren nur wenig. Der Ni-Gehalt ist nur gerade im AB-Horizont etwas tiefer als im Rest des Bodens. Der Pb-Gehalt ist im obersten und untersten Horizont höher als in den Horizonten dazwischen.

A3.5.2 Wertung der Schwermetallgehalte im untersten Mineralerde-Horizont im geochemischen Vergleich

Bezogen auf das Ausgangsgestein, karbonathaltigem Flysch (Lithofazies 13), liegt der Ni-Gehalt im BC-Horizont innerhalb, die Gehalte aller anderen Schwermetalle oberhalb typischer Wertebereiche.

Anmerkung: Weil für die Bestimmung der totalen Schwermetallgehalte im C-Horizont nicht mehr genügend Feinerde vorhanden war, werden für den geochemischen Vergleich die Schwermetallgehalte im BC-Horizont beigezogen. Da dieser Horizont weitgehend entkarbonatet ist, muss davon ausgegangen werden, dass Schwermetalle im Rückstand der Karbonatverwitterung angereichert wurden. Deshalb sind die auf diesem Horizont basierenden Bewertungen zu hoch.

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



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

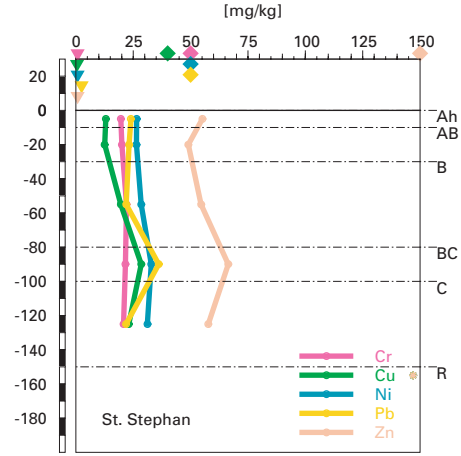


Abb. A3.16 (links) Schwermetalle: effektive Totalgehalte

Abb. A3.17 (rechts) Schwermetalle: Salpetersäure-extrahierbare Gehalte

A3.5.3 Beurteilung der quellenunabhängigen Belastung nach VBBo

Bezogen auf die VBBo sind die Gehalte an Cr und Zn im ganzen Profil niedrig, diejenigen von Ni erhöht (Abb. A3.17). Die Cu- und Pb-Gehalte sind in den meisten Horizonten niedrig. Im BC-Horizont sind allerdings sowohl der Cu- als auch der Pb-Gehalt hoch, und im C-Horizont ist Cu erhöht.

Die Richtwerte der VBBo werden nicht überschritten.

A3.5.4 Anreicherungs-faktoren

Weil für die Bestimmung der totalen Schwermetallgehalte im C-Horizont nicht mehr genügend Feinerde vorhanden war, wurden die Anreicherungs-faktoren relativ zum BC-Horizont berechnet. Weil dieser Horizont weitgehend entkarbonatet ist, muss davon ausgegangen werden, dass Schwermetalle im Rückstand der Karbonatverwitterung angereichert wurden. Somit erlauben die relativ zum BC-Horizont berechneten Anreicherungs-faktoren keine Aussage über Anreicherung oder Verarmung gegenüber dem Ausgangsgestein.

Tab. A3.4 Anreicherungsfaktoren						
Horizont	Tiefe [cm]	Anreicherungsfaktor				
		Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Ah	0– 10	0.73	0.18	0.89	0.84	0.74
AB	10– 30	0.73	0.36	0.59	0.62	0.74
B	30– 80	0.86	0.56	0.94	0.56	0.86
BC	80–100	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
C	100–150	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
R	>150	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.

Der Boden ist vom Ah- bis zum B-Horizont etwas an Cr und Zn verarmt (Tab. A3.4). Der AB-Horizont ist auch etwas an Ni verarmt. Eine stärkere Abreicherung finden wir für Cu im Ah- und AB-Horizont und für Pb im AB- und B-Horizont.

Die aufgrund von Eigenschaften der Bodenfestphase abgeschätzte Mobilität der Schwermetalle im Ah-Horizont ist höchstens mittel und in den darunterliegenden Horizonten höchstens gering (Abb. A3.18). Ausserdem betreffen die durch die Anreicherungsfaktoren angezeigten Verarmungen des Bodens vor allem Cu und Pb, welche sich durch eine besonders grosse Affinität zu gelösten organischen Verbindungen auszeichnen. Daraus kann geschlossen werden, dass in diesem Boden Verlagerung mit gelöster organischer Substanz in der Bodenlösung bis in den BC-Horizont, d. h. den obersten karbonathaltigen Horizont, eine wichtige Rolle spielt. Die Eisen-Oxide scheinen in diesem schwach bis mässig sauren Boden davon aber weniger betroffen zu sein (Abb. A3.10).

Der gegenüber dem AB- und B-Horizont höhere Pb-Gehalt im Ah-Horizont (Abb. A3.16) und der ebenfalls höhere Anreicherungsfaktor sind ein Hinweis auf Eintrag von anthropogenem Pb, welches im obersten Horizont angereichert wurde.

A3.5.5 **Schätzung der Mobilität der Schwermetalle**

Die Feinerde dieses Bodens ist vom Ah- bis zum B-Horizont schwach bis mässig sauer, darunter alkalisch (Abb. A3.13). Im Ah-Horizont verringert zudem der erhöhte Gehalt an organischer Substanz (Abb. A3.8) die Mobilität aller Schwermetalle mit Ausnahme von Zn. Vom AB- bis zum BC-Horizont wird ebenfalls die Mobilität von Cr, Cu und Pb aufgrund der Gehalte an organischer Substanz geringer geschätzt. Ausserdem verringert der im ganzen Profil hohe Tongehalt (Abb. A3.4) die Mobilität von Cr und Pb. Zusammenfassend wird die Mobilität der meisten Schwermetalle in diesem Boden aufgrund von Eigenschaften der Bodenfestphase (pH, Humus- und

Schwermetallmobilität

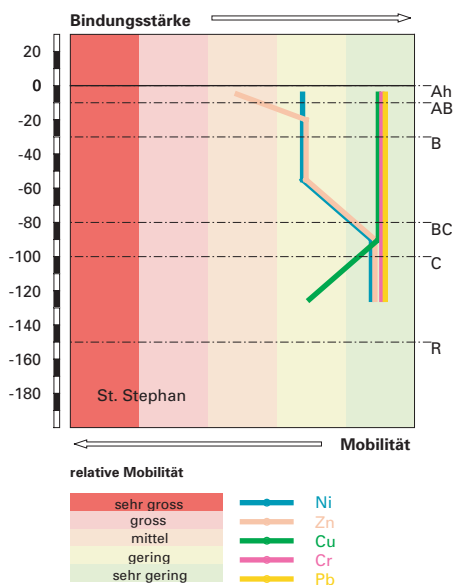


Abb. A3.18 Mobilität der Schwermetalle

Tongehalt) als sehr gering bis gering geschätzt (Abb. A3.18). Lediglich die Zn-Mobilität im Ah-Horizont wird als mittel eingestuft.

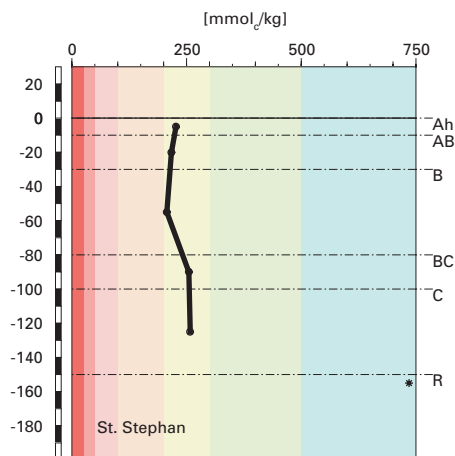
Aufgrund der Anreicherungsfaktoren (Tab. A3.4) muss aber davon ausgegangen werden, dass die effektive Mobilität zumindest von Cu und Pb, welche eine besonders starke Affinität zu gelösten organischen Verbindungen haben, durch Verlagerung mit gelöster organischer Substanz in der Bodenlösung grösser ist als geschätzt und in Abb. A3.18 dargestellt. Dies dürfte vor allem den stärker entwickelten oberen Teil des Profils bis zum B-Horizont betreffen. Darunter setzt das Vorhandensein von Karbonat die Mobilität aller Schwermetalle effizient herab. Deshalb erachten wir auch das Risiko einer Schwermetall-Belastung des Grundwassers an diesem Standort als gering.

A3.5.6

Schätzung der Gefährdung von Mikroorganismen

Die meisten Schwermetalle liegen im Ah-Horizont in Gehalten vor, welche für pflanzliche und tierische Mikroorganismen in Waldböden unkritisch sind. Der Cr-Gehalt hingegen befindet sich im Grenzbereich zur Toxizität für Mikroorganismen.

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)

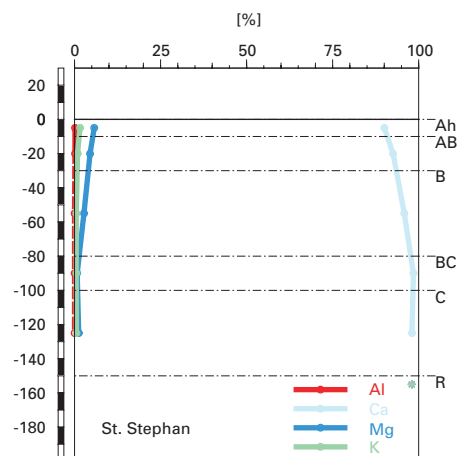


Abb. A3.19 (links) Kationenaustauschkapazität

Abb. A3.20 (rechts) Belegung des Kationenaustauschers

A3.6 Themenbereich «Nährstoffe»

A3.6.1 Nährstoffverfügbarkeit im Oberboden

Die Humusform Mull und die Krümelstruktur im Ah-Horizont sind Anzeichen einer hohen biologischen Aktivität und damit einer zügigen Nährstoffumsetzung. Da die vorwiegend von der Tanne stammende Streu nur als mässig abbaubar beurteilt wird, ist die hohe biologische Aktivität vor allem auf die nur mässig sauren pH-Verhältnisse im Oberboden und die günstigen mikroklimatischen Bedingungen zurückzuführen.

Das knapp mittlere C/N-Verhältnis von rund 17 im Ah-Horizont zeigt eine mittlere Mineralisierungsrate der organischen Substanz an. Das C/P-Verhältnis wird im Ah-Horizont mit einem Wert von 175 als mässig eng klassiert. Als Humusform würde man aufgrund des C/N-Verhältnisses im Ah-Horizont einen Mull im Übergang zum Moder erwarten.

Die Nährstoffverfügbarkeit wird also aufgrund des C/N- und C/P-Verhältnisses leicht pessimistischer beurteilt, als anhand der Humusform und des Gefüges. Diese Diskrepanz erklärt sich durch die günstigen klimatischen Bedingungen. Es steht genügend Wärme und Feuchtigkeit für eine hohe biologische Aktivität zur Verfügung und die nur mässig saure Feinerde im Oberboden unterstützt die biologische Aktivität zusätzlich.

A3.6.2 **Nährstoffgehalte**

Die Kationenaustauschkapazität ist im ganzen Profil hoch und variiert im Tiefenverlauf nur wenig (Abb. A3.19). Dies dürfte auf den gleichmässig hohen Tongehalt des Bodens zurückzuführen sein. In Übereinstimmung mit den pH-Werten und den Pufferbereichen ist der Kationenaustauscher im ganzen Boden zu über 97% mit Nährstoffkationen belegt. Der Anteil von austauschbarem Kalzium nimmt mit der Tiefe zu Lasten von austauschbarem Kalium und Magnesium leicht zu (Abb. A3.20).

A3.6.3 **Nährstoffvorräte**

Die Abb. A3.21 bis A3.23 zeigen die berechneten Vorräte an Kalzium, Magnesium und Kalium. Der Kalziumvorrat nimmt mit der Tiefe sehr stark zu. Der Magnesiumvorrat nimmt dagegen nur bis in 80 cm Tiefe leicht zu und erfährt in den tiefer gelegenen Horizonten keine Veränderung mehr. Im Unterschied zum Magnesiumvorrat steigt der Kaliumvorrat auch im BC- und C-Horizont noch leicht an. Der Grund für die geringe Vorratzzunahme im untersten Teil des Bodens ist im Skelettgehalt zu finden, denn dieser nimmt von rund 25% im B-Horizont sprunghaft auf beinahe 90% im BC-Horizont zu (Abb. A3.3). Bis zur Vergleichstiefe von 60 cm werden die Nährstoffvorräte wie folgt beurteilt:

Ca sehr hoch
Mg mittel
K gering

Potentiell ist der Boden mindestens bis zum anstehenden Fels in 150 cm Tiefe durchwurzelbar und Feinwurzeln sind auch bis in den C-Horizont zu finden. Unter Berücksichtigung der gesamten Aufschlusstiefe ändert sich an der Beurteilung der Nährstoffvorräte wegen des grossen Skelettgehaltes im BC- und C-Horizont nichts. Da kaum ein Risiko für Trockenstress besteht, können diese Nährstoffvorräte von der Vegetation uneingeschränkt genutzt werden.

Kalzium-Vorrat

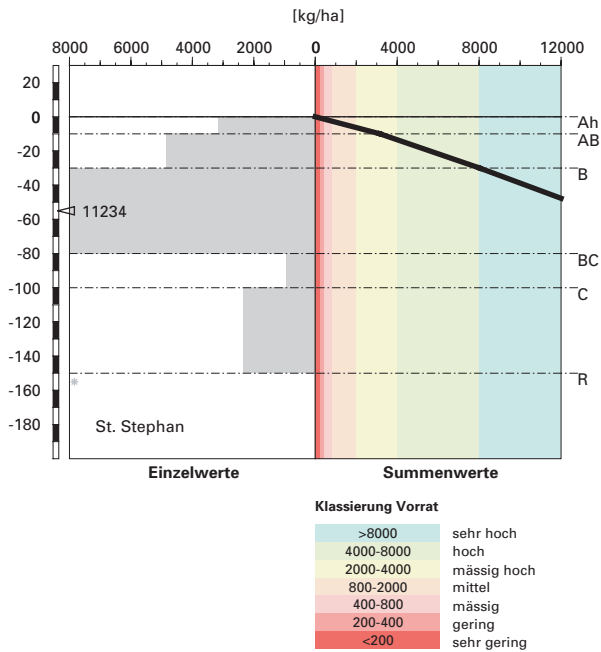


Abb. A3.21 Vorrat an Kalzium

Magnesium-Vorrat

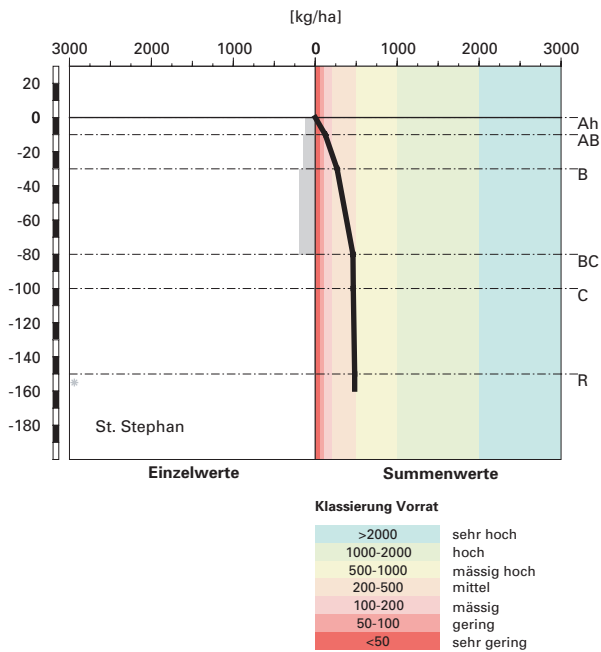


Abb. A3.22 Vorrat an Magnesium

Kalium-Vorrat

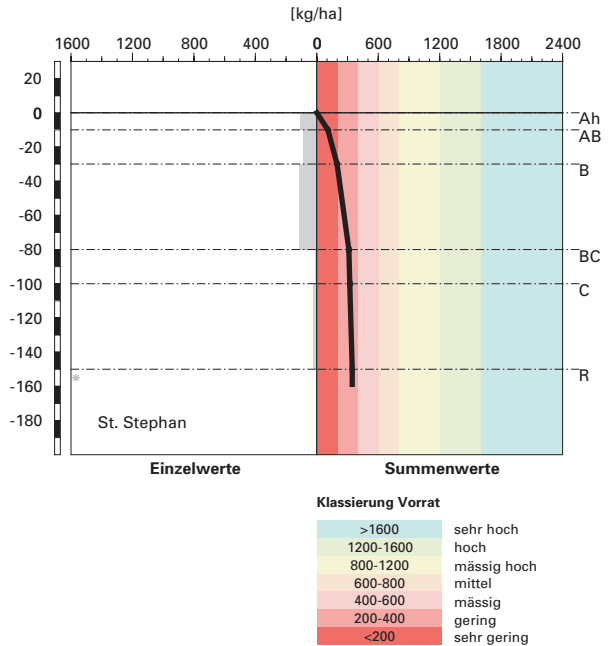


Abb. A3.23 Vorrat an Kalium

A3.7 Themenbereich «Waldbaulich relevante Bodenkennwerte und Baumartenwahl»

A3.7.1 Steckbrief für die Waldbehandlung

Der Steckbrief (Tab. A3.5) orientiert über waldbaulich relevante Standortfaktoren und Bodenkennwerte.

A3.7.2 Baumartenwahl

Naturnähe von Bestand und Oberboden

Im Bestand sind vor allem Weisstannen aber auch zahlreiche Buchen vertreten. Diese Baumartenmischung ist recht naturnah. Nach Ott et al. (1997) ist an diesem Waldstandort (EK Nr.18) die Humusform Mull häufig. Den vorhandenen Mull bewerten wir demnach als standorttypisch.

Tab. A3.5 Steckbrief für die Waldbehandlung (St. Stephan)**Standortangaben**

Relief	Höhe	1130 m
	Exposition	NE
	Neigung	75%
Klima	Jahresniederschlag	1581 mm
	Jahrestemperatur	6.0°C
Ausgangsgestein	karbonathaltiger Flysch	
Baumbestand	Struktur	zweischichtig
	Schlussgrad	90%
	Baumarten (Deckung)	75% Weisstanne, 15% Buche
	Oberhöhe	25–30 m
Waldgesellschaft	nach E&K 1972	Nr. 18: Typischer Tannen-Buchenwald
	nach BUWAL 2005	Nr. 18: Waldschwingel-Tannen-Buchenwald

Bodenkennwerte

Bodensystematik	Bodentyp	Braunerde
	Humusform	Mull
Wasser- und Lufthaushalt	Durchlüftung	Im Boden sind keine Vernässungsmerkmale erkennbar, was zeigt, dass der Boden stets gut durchlüftet ist.
	Durchwurzelbarkeit	Da in 150 cm Tiefe Fels ansteht, ist der Wurzelraum für alle Baumarten begrenzt. Er wird mit 150 cm Mächtigkeit aber dennoch als sehr tiefgründig klassiert. Wie tief die Bäume im Felsuntergrund vorhandene Spalten durchwurzeln, wissen wir nicht.
	pflanzenverfügbares Wasser	Das Risiko für Trockenstress bewerten wir unter den gegebenen klimatischen Verhältnissen als klein.
Säurezustand	pH-Wert/Kalkgrenze	Der Boden ist bis 30 cm Tiefe mässig sauer und ab 80 cm alkalisch. Die Kalkgrenze verläuft in 80 cm Tiefe
	Aluminium-Toxizität	Es besteht kein Risiko für Al-Toxizität.
Nährstoffe	Verfügbarkeit im Oberboden	Die Humusform Mull und das mässig enge C/P-Verhältnis im Ah-Horizont sind Ausdruck einer hohen biologischen Aktivität. Das mittlere C/N-Verhältnis im Ah-Horizont deutet dagegen auf eine bloss mittlere Mineralisierungsrate der organischen Substanz hin. Die biologische Aktivität wird gesamthaft als mittel bis hoch beurteilt.
	Nährstoffvorräte (Ca, Mg, K)	Die Vorräte der Nährstoffkationen sind unausgewogen. Der Ca-Vorrat ist sehr hoch, der Mg-Vorrat mittel und der K-Vorrat gering.
Verankerung		Da der Boden sehr tiefgründig ist, wird die Verankerung des Baumbestandes als gut bewertet.
Befahrbarkeit		Dieser tonreiche Boden reagiert in nassem Zustand empfindlich auf Befahren mit schweren Maschinen, weil er bis 80 cm Tiefe relativ wenig Skelett enthält. Ein Befahren des Bestandes ist allerdings aufgrund der Steilheit des Geländes nicht möglich.

Baumartenwahl gemäss standortkundlichen Grundlagenwerken

Gemäss BUWAL (2005) sind an diesem Tannen-Buchen-Standort (Nr.18) folgende Baumarten für die Waldverjüngung vorgesehen: Buche, Tanne, Fichte, Bergahorn und Vogelbeere. An diesem Standort kann also gemäss BUWAL vor allem aufgrund des ziemlich rauen Klimas nur eine begrenzte Anzahl 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**

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 zwar kein Risiko für Al-Toxizität und der Oberboden ist lediglich mässig sauer. Eine Verbesserung des Säurezustandes ist aber trotzdem erwünscht, da die Empfindlichkeit des Bodens für eine weitere pH-Abnahme gross ist. Die Baumartenmischung ist jedoch naturnah und die Humusform Mull standorttypisch, so dass der Säurezustand waldbaulich kaum beeinflusst werden kann. Waldbauliche Eingriffe können sich also auf den Erhalt der aktuellen Baumartenmischung beschränken.

■ **Nährstoffangebot im Boden**

Eine Erhöhung der Mineralisierungsrate ist theoretisch möglich, kann aber, wie bereits beim Säurezustand dargelegt, 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 ist daher an diesem Standort für die meisten Baumarten ausreichend. Obwohl der Boden mässig versauert ist, schätzen wir das Nährstoffangebot selbst für die nährstoffbedürftigen Edellaubhölzer als ausreichend ein, denn die Vorräte an Kalzium und Magnesium sind relativ gross.

Dem Waldbauer stehen vor allem wegen dem ziemlich rauen Klima nur wenige Baumarten für die Waldverjüngung zur Verfügung. Die zu einem grossen Teil durch das Klima gegebene Baumartenauswahl (Tab. A3.6, BUWAL 2005) muss aus bodenkundlicher Sicht vor allem aufgrund des Säurezustandes und des Nährstoffangebotes im Boden weitergehend beurteilt werden.

Bei diesem für eine weitere Versauerung labilen Boden sollte eine organische Auflage vermieden werden, so dass möglichst geringe Mengen an organischen Säuren freigesetzt werden. Im Rahmen der klimatischen Gegebenheiten ist eine artenreiche Baumartenmischung mit möglichst grossem Laubholzanteil anzustreben. Dadurch bleibt die Mineralisierungsrate der organischen Substanz im Oberboden stabil und die Humusform ein Mull. Da die Vorräte von Ca und Mg relativ gross sind, gehen wir trotz mässig saurem Oberboden davon aus, dass der Bergahorn ein ausreichendes Angebot an Nährstoffkationen vorfindet. Der Baumartenempfehlung des BUWAL (2005) wird aus bodenkundlicher Sicht nicht widersprochen.

Tab. A3.6 **Baumartenempfehlung für den Hauptbestand**

Referenz	Baumarten
Grundlagenwerke (Einheit 18; BUWAL 2005)	Buche, Tanne, Fichte, Bergahorn, Vogelbeere
Bodenkundliche Kriterien	Buche, Tanne, Fichte, Bergahorn, Vogelbeere

Blaser, P. / Zimmermann, S. / Luster, J. / Walthert, L. / Lüscher, P., 2005: Waldböden der Schweiz. Band 2. Regionen Alpen und Alpensüdseite. Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Bern, Hep Verlag.

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

Ellenberg, H. / Klötzli, F., 1972: Waldgesellschaften und Waldstandorte der Schweiz. Mitt. Eidgenöss. Forschungsanst. Wald Schnee Landsch. 48, 4: 587–930.

FAO, 1988: FAO/Unesco Soil Map of the World, Revised Legend, with corrections and updates. World Soil Resources Report 60, FAO, Rome. Reprinted with updates as Technical Paper 20, ISRIC, Wageningen, 1997. 140 S.

Ott, E. / Frehner, M. / Frey, H.-U. / Lüscher, P., 1997: Gebirgsnadelwälder. Ein praxisorientierter Leitfaden für die standortgerechte Waldbehandlung. Haupt, Bern. 287 S.

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