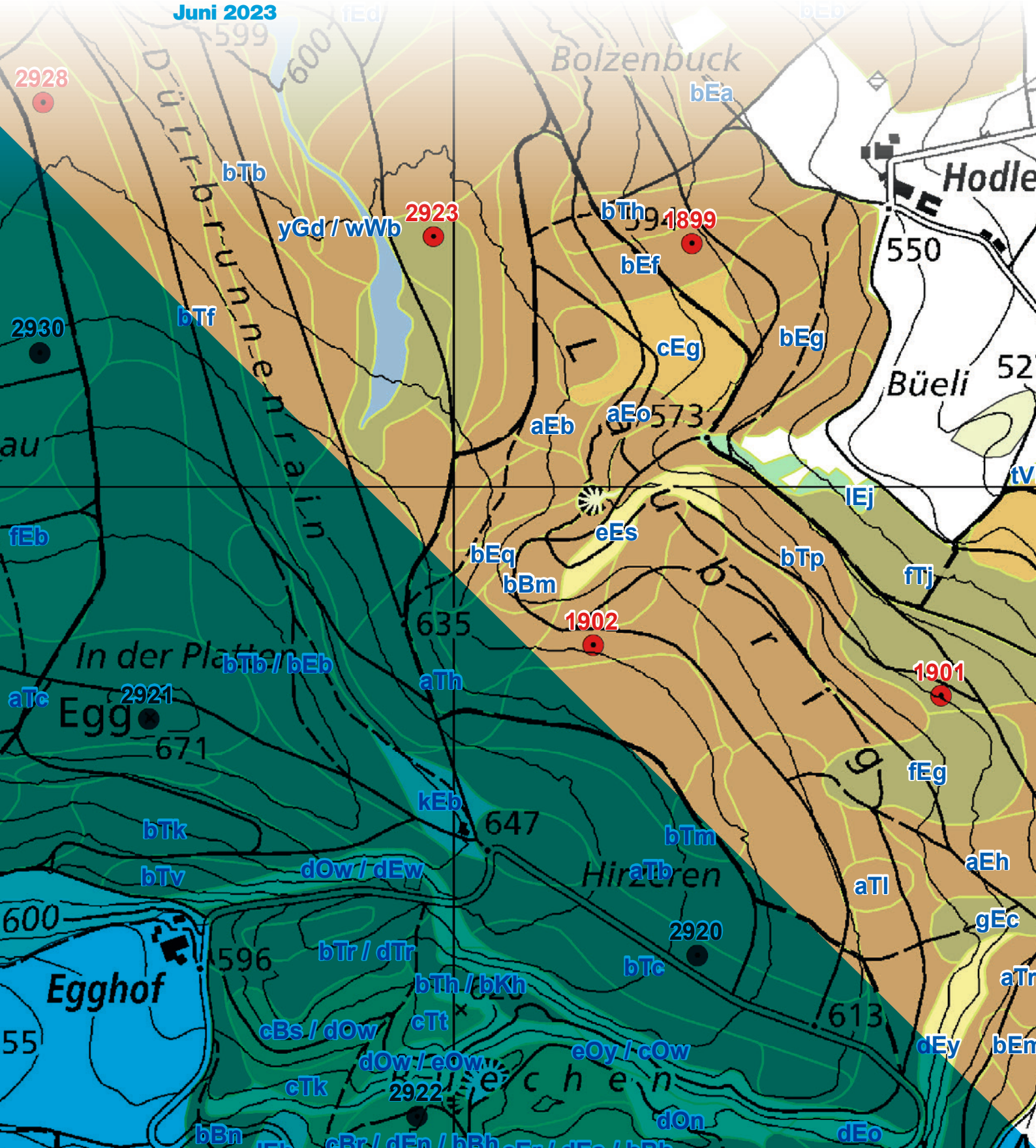




Kanton Zürich  
Baudirektion  
Amt für Landschaft und Natur

# Waldbodenkartierung des Kantons Zürich 2013–2022 Abschlussbericht

Juni 2023





## Impressum

### **Herausgeberin**

Kanton Zürich  
Baudirektion  
Amt für Landschaft und Natur

### **Projektkoordination**

Fachstelle Bodenschutz  
in Zusammenarbeit mit der Abteilung Wald  
Walcheplatz 2  
8090 Zürich  
+41 43 259 32 78  
bodenschutz@bd.zh.ch  
www.zh.ch/boden

### **Bilder/Grafiken**

Cover: Ausschnitt Waldbodenkarte des Kantons Zürich  
Profilfotos: Gabriela Brändle, François Schnider  
Inhaltsseiten: Fachstelle Bodenschutz (sofern nicht anders vermerkt)

### **Grundgestaltung und Druck**

kdmz

### **Ausgabe**

Juni 2023



# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b>	<b>5</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>7</b>
<b>2. Waldbodenkartierung des Kantons Zürich</b>	<b>9</b>
2.1. So wurde kartiert	11
2.2. Basiskarte	15
2.3. Verfügbarkeit/Publication der Daten	16
Box: Stand der Bodenkartierung schweizweit	17
<b>3. Bodenversauerung</b>	<b>19</b>
3.1. Natürlicher Prozess und menschengemachtes Problem zugleich	19
3.2. Wie wird die Versauerung beurteilt?	20
Box: Profilumfassende Erhebungen	23
3.3. Azidität	26
3.4. Kalkgrenze	27
3.5. Basensättigung	28
3.6. Fazit: Versauerungszustand der kartierten Flächen	31
<b>4. Weitere Produkte</b>	<b>33</b>
4.1. Bodenverdichtung – Empfindlichkeit der Böden ist variabel	33
4.2. Nutzbare Feldkapazität	34
4.3. Bodengestützte Baumartenwahl	35
<b>5. Fazit &amp; Ausblick</b>	<b>38</b>
5.1. Eindrücke des externen Qualitätsmanagements	38
5.2. Weitere Kartierungen und Auswertungen	39
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>40</b>
<b>Anhang</b>	<b>43</b>
A1. Attributtabelle Waldbodenkartierung	43
A2. Analysen pH feldfrisch	44
A3. Bestimmung der Basensättigungstypen	46
A4. Schätzung Verdichtungsempfindlichkeit	47
A5. Schätzung der nutzbaren Feldkapazität (nFK)	48







# Zusammenfassung

Im Projekt «Bodenkundliche Kartierung der Wälder mit sauren Böden» liess der Kanton Zürich von 2013 bis 2021 für **4800 Hektaren – d.h. rund 10% seiner gesamten Waldfläche** – Bodenkarten erstellen. Auslöser und thematischer Schwerpunkt war die Bodenversauerung. Wie viele andere Gebiete der Schweiz und Mitteleuropas sind die Zürcher Wälder von Bodenversauerung betroffen. Saure Böden verarmen an Nährstoffen, was Pflanzenwachstum und Bodenbiologie hemmt. Kartiert wurden prioritär jene Waldböden, für die aufgrund von Geologie, Topografie, Vegetation und anderen Indikatoren mit einer starken Versauerung gerechnet wurde. Neben Aussagen zum Versauerungszustand dieser Böden liefert die Bodenkartierung auch wertvolle Informationen zu anderen Fragestellungen, beispielsweise für die forstliche Bewirtschaftung und die Anpassung an den Klimawandel.

Die Kartiermethode basiert auf der Solothurner Kartieranleitung von 2008, wurde jedoch gemäss den Zielen der Zürcher Waldbodenkartierung angepasst und weiterentwickelt. Entsprechende Modifikationen wurden in Vorprojekten erarbeitet und in technischen Merkblättern festgehalten. Es wurde eine **attributbasierte Kartierung** durchgeführt, das bedeutet: Für jede kartierte Bodeneinheit wurde ein vollständiger und standardisierter Datensatz an Bodenattributen erhoben, der die jeweilige Fläche repräsentiert. Bedeutende Unterschiede zu anderen Bodenkartierungen sind die Verwendung eines Drei-Schichten-Modells anstelle des üblicheren Zwei-Schichten-Modells, die Erfassung der tieferen Bodenschichten (bis 180cm anstatt nur bis rund 100cm) sowie die gute laborgestützte Datengrundlage (Laboranalysen an Proben aus Handbohrungen).

Die Bodenversauerung, der Auslöser für die Kartierung, wurde anhand dreier Zielgrössen beurteilt: Basensättigung des Bodens, Tiefe der Kalkgrenze und pH-Wert des Bodens. Alle drei Indikatoren **zeigen für 75 bis 80% der kartierten Fläche eine starke bis sehr starke Versauerung**. Für diese Waldböden sind tiefe pH-Werte und eine geringe Basensättigung bis in tiefe Bodenschichten charakteristisch. Die Hauptursache dafür ist oft der lange Zeitraum der Bodenentwicklung, denn viele der betroffenen Böden wurden während der letzten Eiszeit weder mit Moräne noch mit Schotter überdeckt. In jüngerer Vergangenheit wurde die Versauerung durch anthropogene Säureeinträge aus Stickstoff- und Schwefelemissionen verstärkt – allerdings lässt sich die zusätzliche menschengemachte Beschleunigung der Versauerung nicht von der natürlichen unterscheiden. Der hohe Flächenanteil saurer Waldböden lässt sich nicht auf die gesamte Zürcher Waldfläche hochskalieren, denn für die Waldbodenkartierung wurden gezielt jene Waldgebiete ausgewählt, wo stark versauerte Böden zu erwarten waren.

Die Daten der Waldbodenkartierung ermöglichen weitere Auswertungen und abgeleitete Produkte für die forstliche Planung. Karten zur **Verdichtungsempfindlichkeit** des Unterbodens helfen, Beeinträchtigungen des Bodens bei der Waldbewirtschaftung zu vermindern. Informationen zum **Wasserhaushalt des Bodens** (beispielsweise die nutzbare Feldkapazität) sind wichtig bei der Baumartenwahl, insbesondere im Kontext des Klimawandels. In einem Pilotprojekt zur **bodengestützten Baumartenwahl** wurde für ausgewählte Teilgebiete der kartierten Wälder aufgrund der erhobenen Bodendaten Empfehlungen abgeleitet, welche Baumarten sich für welche Flächen eignen. Erstellt wurde dies sowohl für das gegenwärtige Klima sowie für die Bedingungen, welche gemäss verschiedenen Szenarien Ende des 21. Jahrhunderts erwartet werden.

Die Resultate der Waldbodenkartierung stellen eine **vielseitig verwendbare Grundlage** für Auswertungen zur forstlichen Bewirtschaftung und für umweltrelevante Fragestellungen dar. Die Kartierung der Zürcher Waldböden setzt einen neuen und sehr hohen Massstab. Nennenswert sind insbesondere die hohe Qualität der bodenkundlichen Profildaten, die gute Nachvollziehbarkeit der Polygondaten und die sehr gute, laborgestützte Datenlage. Im Rahmen der geplanten schweizweiten Bodenkartierung sollen ab 2029 alle Böden kartiert werden, einschliesslich der Waldböden. Aufgrund des langen Zeithorizonts dieses Generationenprojekts ist allerdings zu prüfen, welche Daten und Flächen prioritär zu erheben sind. Für die forstliche Planung sind Bodendaten besonders bei grösseren Bestandesverjüngungen von Interesse.

**Alle drei Indikatoren zeigen für 75 bis 80% der kartierten Fläche eine starke bis sehr starke Versauerung.**







# 1. Einleitung

Nur was man kennt, kann man schützen. Dies gilt auch für den Boden als eine unserer Lebensgrundlagen. Mit der Bodenkarte für Landwirtschaftsflächen verfügt der Kanton Zürich seit den 1990er-Jahren über Bodeninformationen im Massstab 1:5000 (FAL und VD-ZH 1998), welche unter anderem zur Beurteilung der landwirtschaftlichen Nutzungseignung dienen. Auf die Kartierung der 50000 ha Wald wurde damals verzichtet, erst mit der Kartierung der am stärksten versauerten Waldböden ab 2013 wurde diese Lücke teilweise geschlossen. Dieses Projekt findet nun 10 Jahre später seinen vorläufigen Abschluss.

## **Der vorliegende Bericht gibt einen Überblick zur Zürcher Waldbodenkartierung:**

- Ablauf und Umfang der Kartierung → **Kapitel 2**
- Problematik der Bodenversauerung und deren Erfassung und Visualisierung bei der Kartierung → **Kapitel 3**
- Schätzung und Visualisierung weiterer Bodeneigenschaften → **Kapitel 4**
- Fazit und Ausblick → **Kapitel 5**
- Methodische Details und ergänzende Informationen → **Anhang**



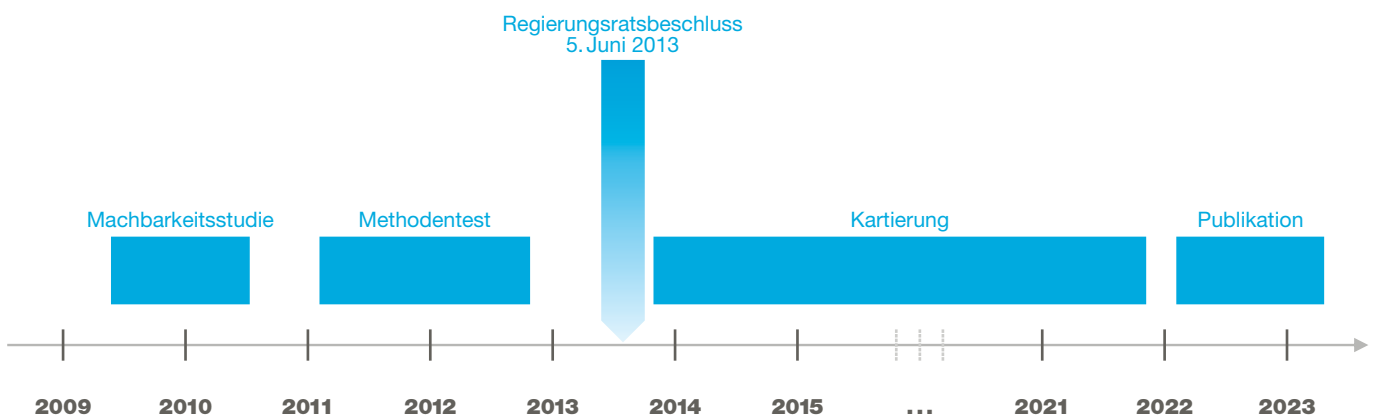




## 2. Waldbodenkartierung des Kantons Zürich

Auslöser für die Waldbodenkartierung war die Bodenversauerung. Resultate der Kantonalen Bodenüberwachung (KaBo) zeigten, dass ein beträchtlicher Teil der Zürcher Waldböden von einer starken Versauerung betroffen sein dürfte (siehe Kapitel 3 für Details zur Bodenversauerung und deren Problematik). Aufgerüttelt durch diesen Befund beschloss der Regierungsrat 2013, die Böden der am stärksten betroffenen Gebiete zu kartieren. Dem Beschluss gingen umfangreiche Abklärungen in Form einer Machbarkeitsstudie (Presler 2010) und einem anschliessenden Methodentest (Presler und Carizzoni 2012) voraus. Geklärt wurde dabei, wie die Kartierung durchzuführen ist, um die Bodenversauerung adäquat zu erfassen und räumlich einzugrenzen. Das folgende Kapitel 2.1 gibt eine Übersicht zur Kartiermethodik und den Erkenntnissen, welche dazu aus den beiden Vorprojekten eingeflossen sind.

Ein weiterer wichtiger Aspekt der Machbarkeitsstudie war die Priorisierung der Waldflächen für die Kartierung, d. h. für welche Wälder die Erfassung der Bodenversauerung am dringendsten ist. Mit einer GIS-Auswertung wurden dazu für sämtliche Waldflächen >50 ha verschiedene Indikatoren, welche auf eine Versauerung hindeuten, kombiniert. Berücksichtigt wurden beispielsweise das Ausgangsgestein, die vegetationskundliche Karte sowie Informationen zu Bodentyp und Säuregrad aus älteren Erhebungen. Es zeigte sich, dass bei rund einem Drittel der Waldflächen die Abgrenzung der stark sauren Böden eine hohe und bei zwei Dritteln eine mittlere Priorität hat. Der Anteil der Wälder mit einer geringen Priorität kann vernachlässigt werden.

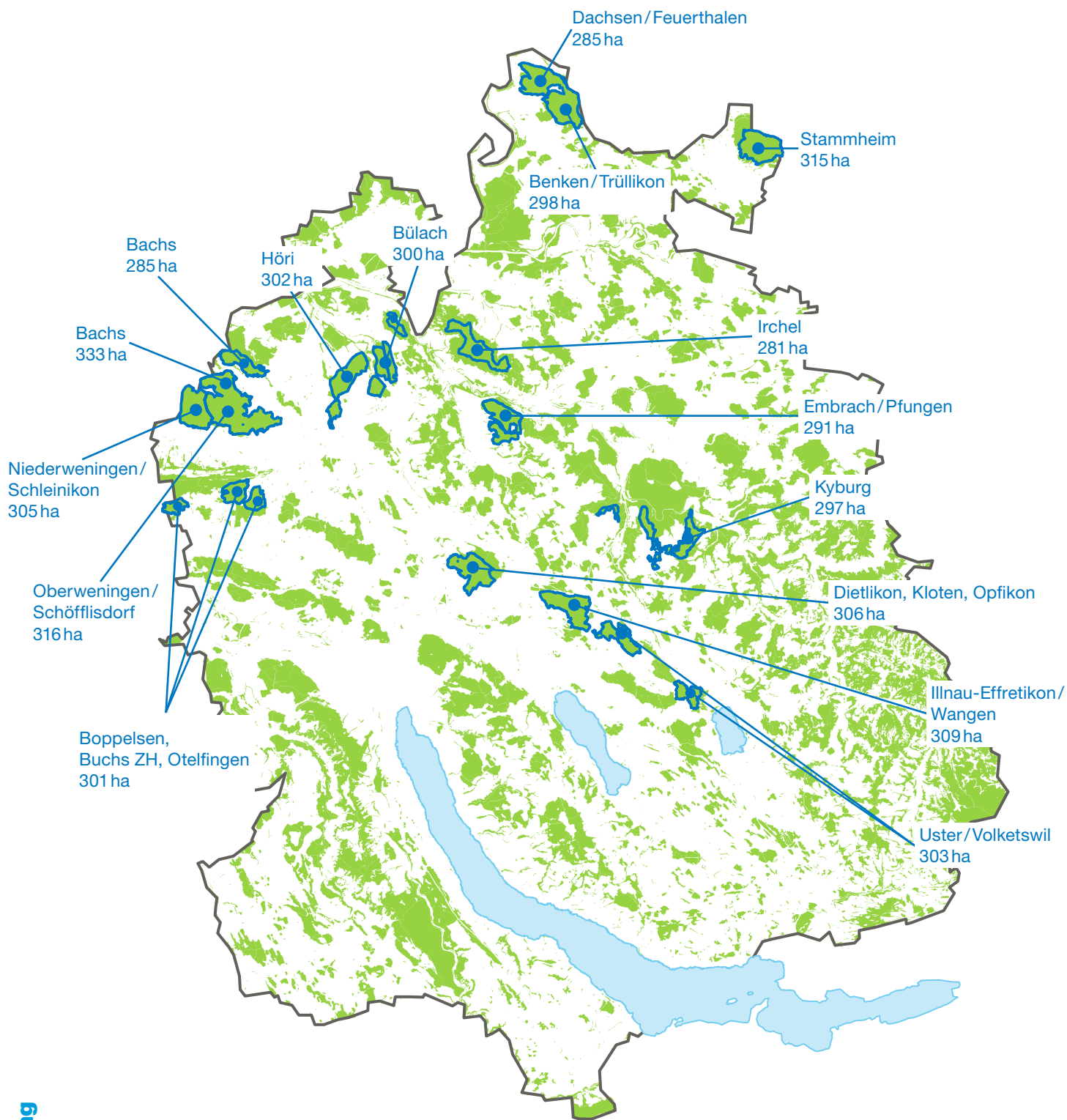


**Abbildung 1:**  
Ablauf der Zürcher  
Waldbodenkartierung  
in der Übersicht

Der Regierungsrat sprach ein Budget von 2.8 Millionen Franken zur Kartierung von rund 6000 ha Wald. Effektiv erfasst wurden letztendlich 20 % weniger, weil die tatsächlichen Kosten pro kartierte Hektare höher ausfielen als erwartet. Ab 2013 wurden gestaffelt für 16 Gebiete à je ca. 300 ha (so genannte Kartierlose) die Böden kartiert, insgesamt 4830 ha Wald (Abbildung 2). Mit der Umsetzung wurde das Amt für Landschaft und Natur (ALN) betraut, verantwortlich war die Fachstelle Bodenschutz (FaBo) in Zusammenarbeit mit der Abteilung Wald. Mit der eigentlichen Kartierung wurden private Kartierbüros beauftragt. Die Verantwortung der einzelnen Lose oblag fünf Personen, effektiv kartiert haben rund 20 Personen.

### Die wichtigsten Ziele der Waldbodenkartierung waren:

- Räumliche Abgrenzung der stark versauerten Waldböden
- Erfassung des Risikos bzw. Potentials für eine weitere Versauerung
- Bereitstellung von Grundlagen zur Planung und Optimierung von Massnahmen zur Bekämpfung der Versauerung
- Erarbeitung von Daten und Grundlagen für die Waldpflege, -nutzung und -planung, beispielsweise zu Verdichtungsempfindlichkeit, Wasserhaushalt und Baumartenwahl (insbesondere im Kontext des Klimawandels)



**Abbildung 2:**  
 Rund 10% der Zürcher Waldfläche wurden bisher erfasst.  
 Kartiert wurden prioritär die am stärksten versauerten Waldböden  
 (in der Abbildung beschriftet).



## 2.1. So wurde kartiert

Als methodische Grundlage für die Kartierung der Zürcher Waldböden diente die Solothurner Kartieranleitung von 2008 (AfU-SO 2008). Weiter flossen die Kartieranleitung FAL24 (Brunner et al. 1997), das Handbuch Waldbodenkartierung (Ruef und Peyer 1996) sowie die Klassifikation der Böden der Schweiz (KLABS; BGS 2010) mit ein. Aufgrund der Fragestellungen bezüglich Bodenversauerung waren verschiedene Anpassungen an der Kartiermethodik nötig. Diese Modifikationen wurden in Vorprojekten erarbeitet (Presler 2010, Presler und Carizzoni 2012) und in technischen Merkblättern festgehalten.

Eine Erkenntnis aus den beiden Vorprojekten war, dass sich der Versauerungszustand saurer Waldböden mit dem pH-Wert allein – der gängigsten Messgrösse für den Säuregrad des Bodens – nicht angemessen beschreiben lässt. Als weitere Indikatoren wurden daher die Basensättigung und die Tiefe der Kalkgrenze im Boden erhoben (vgl. Kapitel 3 für Details). Ebenso wurden die Limitierungen für pH-Messungen mit dem Hellige-Indikator direkt im Feld aufgezeigt. Bei Böden oberhalb eines pH-Wertes von 4 beträgt die Genauigkeit  $\pm 0.5$  pH-Einheiten. Für die Erfassung stark saurer Böden mit tieferen pH-Werten ist keine verlässliche Messung möglich. Daher wurden die Proben der Waldbodenkartierung, wenn immer möglich, im Labor untersucht – auch jene aus den Kartierbohrungen. Für Proben mit wenig Material kam eine adaptierte Methode zum Einsatz, bei welcher der pH direkt an feldfrischen (d. h. nicht aufbereiteten) Proben gemessen wurde (Presler und Carizzoni 2012).

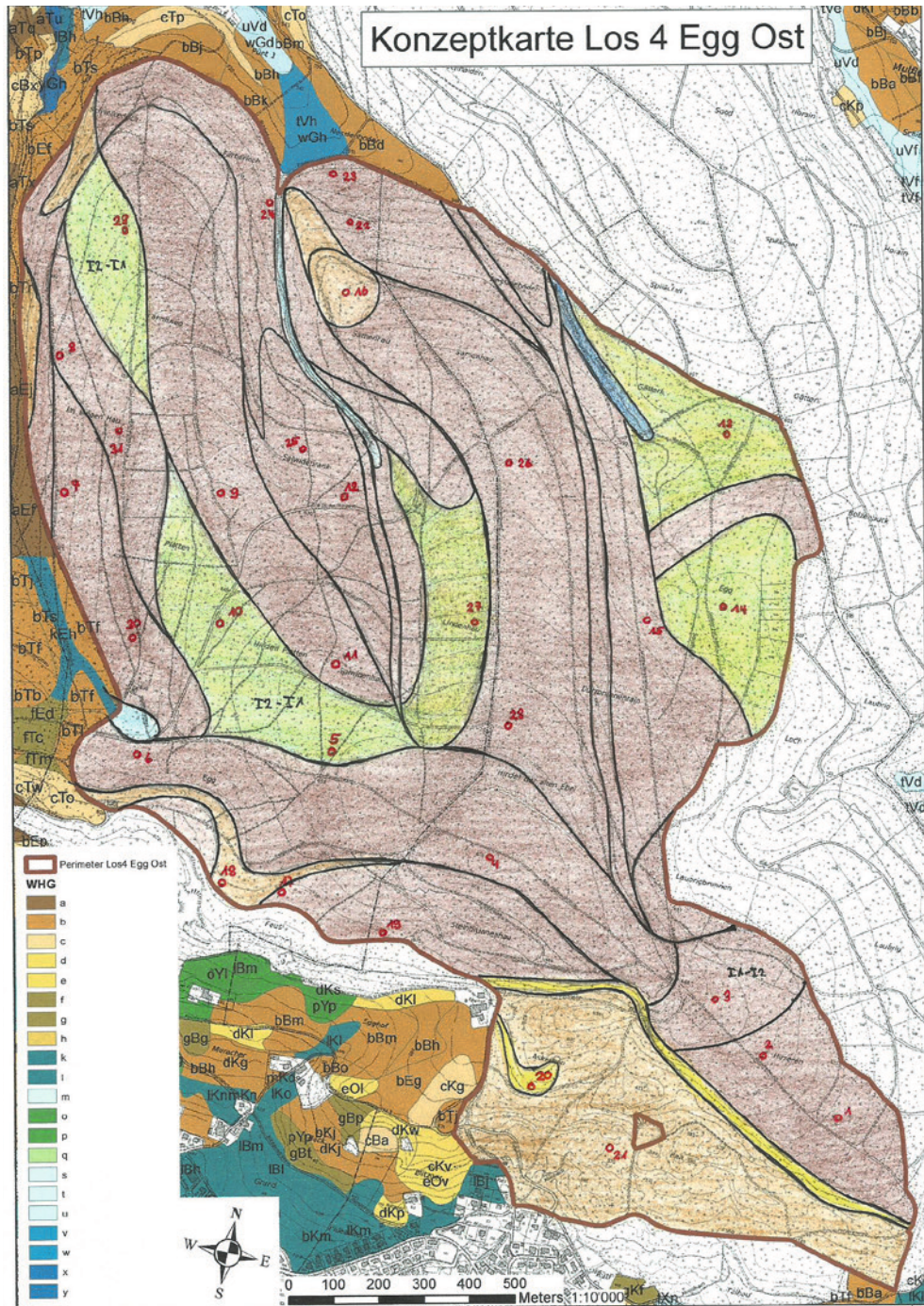
**Als weitere Indikatoren wurden daher die Basensättigung und die Tiefe der Kalkgrenze im Boden erhoben.**

Weitere wesentliche Anpassungen dienten der besseren Erfassung der tiefen Bodenschichten. Bodenkarten für landwirtschaftliche Flächen erfassen in der Regel nur den obersten Meter des Bodens. Bäume wurzeln jedoch häufig deutlich tiefer als landwirtschaftliche Kulturen. Zudem liegt die oben erwähnte Kalkgrenze in stark versauerten Böden oft tiefer als ein Meter. Deshalb wurde bei einem Teil der Bodenprofile und Kartierbohrungen mit verlängerten Hohlmeisseln bis maximal 180 cm Tiefe sondiert, insbesondere wenn die Kalkgrenze zuvor nicht erreicht wurde. Eine gewichtige Modifikation war die Verwendung eines **Drei-Schichten-Modells** für die Kartierung. Das bedeutet, dass in den Profilen und Bohrungen sowie der Beschreibung der kartierten Bodeneinheiten drei Bodenschichten unterschieden werden, bezeichnet als Oberboden, Unterboden 1 und Unterboden 2. Im Gegensatz zum häufiger verwendeten Zwei-Schichten-Modell können so Unterschiede im Unterboden, beispielsweise verursacht durch die fortschreitende Versauerung oder der Übergang von kalkfreiem zu kalkhaltigem Material, besser erfasst werden.

Es wurde eine **attributbasierte Kartierung** durchgeführt, das bedeutet: Für jede kartierte Bodeneinheit wurde ein vollständiger und standardisierter Datensatz an Bodenattributen erhoben, der die jeweilige Fläche repräsentiert. Aufgrund der zusätzlich erhobenen Parameter und dem Drei-Schichten-Modell ist die Attributliste umfangreich (Tabelle A1 in Anhang A1). So wurden projektspezifische Boden-Untertypen erfasst, beispielsweise zum Säuregrad und zur Azidität (vgl. techn. Merkblätter). Bestimmte Attribute wurden im Vergleich zu anderen Kartierungen unterschiedlich erfasst, z. B. die Humusformen.

Für die Kartierung können grob die folgenden Arbeitsschritte unterschieden werden:

**Konzeptphase** In einem ersten Schritt verschafften sich die Kartierfachleute eine Übersicht über das Gebiet. Dazu wurden die vorhandenen Grundlagendaten (z. B. Topographie, Geologie, Vegetation) gesichtet, das Gelände erkundet und einzelne Bohrungen vorgenommen. Basierend darauf wurde ein Kartierungskonzept erstellt (Abbildung 3). Darin wurden Flächen abgegrenzt, für die aufgrund der äusseren Faktoren ähnliche Böden erwartet wurden. Zusätzlich wurden die Standorte für die Profilaufnahmen festgelegt. Das Kartierungskonzept wurde anschliessend mit der externen Qualitätssicherung und dem Auftraggeber bereinigt.


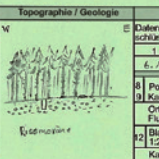



**Abbildung 3:**  
Kartierungskonzept für das  
Gebiet Wehtaler Egg.

Bohr Nr.	Priorität	Wasserhaushalt	Bodencode (whh, Typ, U-Typ, Skelett, Körnung, Gründigkeit)	Geologie	Pflanzen-gesellschaft
1	3	b	bT E4 2/2/4 5/5/6 2-1	MO3	7*(6)
2	1	b	bT E4 2/2/4 5/5/6 2-1	MO3	7*(6)
3	2	b	bE/T I1 E4 1/1/2 5/5/5-6 2	MO3	7*(6)
4	1	a(b)	aT E4 1/1/4 5/5/6 1-2	MO3	7*(1)
5	1	f	fE I2-I1 E4 0/1/1 12/12/12 2	MO3	7*
6	3	b	bT (I1) E4 1/1/2 5/5/6	MO3	7*(6)
7	2	a	aT E4 1/2/2 5/5/6 1	MO3	1
8	1	b	bT E4 1/2/4 5/5/6 2	MO3	2
9	1	a	aT E4 1/1/2 5/5/6 1	MO3	7*
10	2	b	bT I1-I2 E4 1/2/2 5/5/6 2	MO3	7*
11	2	b	bT (I1) E4 1/2/4 5/5/6	MO3	7*
12	3	b	bT I1 E4 1/1/2 5/5/6 2	HL(MO3)	7*
13	1	f	fE I2-I1 E4 1/1/1 5/5/6	KO(MO3)	7*(1)
14	1	f	fE I2-I1 E4 0/0/0-1 12/12/12 2	MO3	7*(6)
15	3	b	bT I1 E4 1/1/1 5/5/5 2	MO3	7*(6)
16	1	c	cT E4 4/4/6 5/5/6 3	MO3	1



**Aufnahme der Bodenprofile** An den festgelegten Punkten wurden Bodenprofile geöffnet, wo möglich mit einem kleinen Bagger. Diese erlauben einen Einblick in den Aufbau des Bodens und seine Beschaffenheit. Die Bodenprofile wurden präpariert, fotografiert und pedologisch beschrieben und klassifiziert (Profilblatt Datenschlüssel 6.1, Abbildung 4). Für die einzelnen Bodenschichten wurden aus der Profilwand Sackproben entnommen und anschließend im Labor chemisch analysiert (vgl. unten «Analytik»). Daneben wurden mit so genannten Burgerzylindern (Durchmesser 5 bis 10 cm) ungestörte Bodenproben entnommen, um die Lagerungsdichte und den Skelettgehalt zu bestimmen. Die Beschreibung der Bodenprofile wurde wiederum mit der externen Qualitätssicherung und dem Auftraggeber abgeglichen.

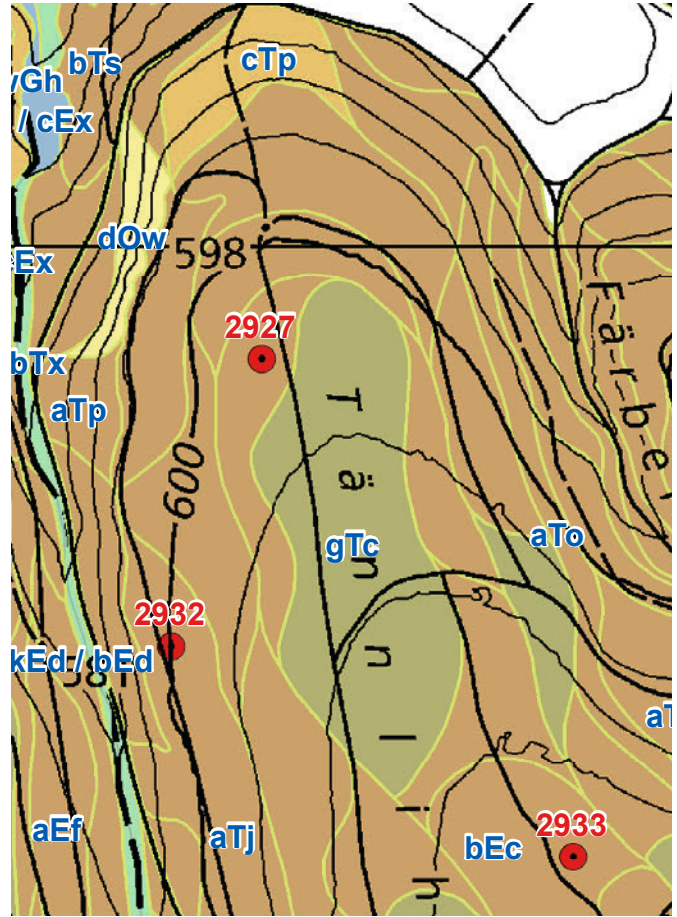
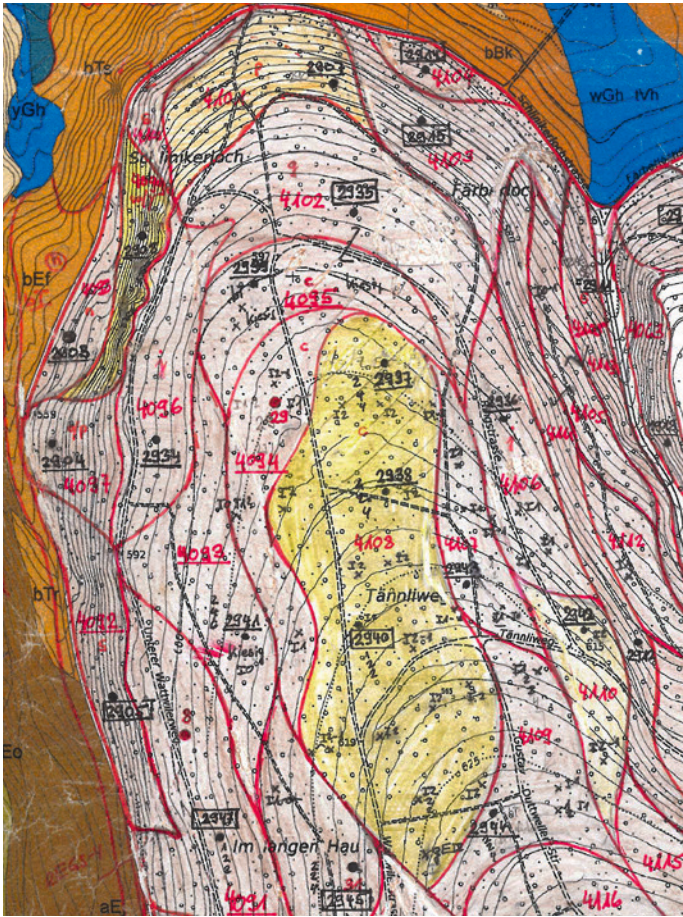
Situation		Topographie / Geologie			Titelangaben					
					Datenschlüssel	Projektnr.	Profilnr.			
					1	2	3			
					6.1	Les. 4	P			
					2	11	2027			
					5					
					6					
					7					
					8					
					9					
					10					
					11					
					12					
					13					
					14					
					15					
Bemerkungen		Bodenbezeichnung			Boden					
Wälder Fläche in % 44: 61 = 2, 8 2: 41 = 10,4 = 10,4 1: 82 = 10,4 = 10,4 3: 10 = 10,4 = 10,4 7: 7 = 7,7 = 7,7		<b>PARABRAUNERDE</b> (schwach pseudoglebeig, stark orange, quadratisch, mäßig humusreich, grobkörnig)			Bodentyp 16 T A355 17 Unterart IA, EA, TA, TS, VA + 10					
		Skelettgehalt 19 0 0 20 Feinerdeklüftung 21 5 4 22 Wasserhaltungsgruppe / Pflanzennutzbarer Grundtiefe 23 cm 2 24 Neigung 25 2 % Geländekorm C 26								
Profilkizze										
										
Nr. Tiefe Bezeichnung 1 0-10 Sp1 2 10-20 Sp2 3 20-40 Sp3 4 40-60 Sp4 5 60-70 Sp5 6 70-90 Sp6 7 90-100 Sp7 8 100-120 Sp8 9 120-140 Sp9 10 140-160 Sp10 11 160-180 Sp11		31/22 33/24 35/26 37/28 39/30 41 (43) 42 44/45 46/47 48-55 56 organ. Sub. % Ton % Sand % Kies (0,2-5) Vol. % Kalk CaCO <sub>3</sub> % pH CaCl <sub>2</sub> Farbe (Munsell) Proben Bemerkungen								
		29.4 29.1 29.3 29.2 29.1 29.2 29.1 29.2 29.1 29.2 29.1 4.6 2.3 4.4 3.2 4.1 3.1 4.0 3.0 3.8 3.0 3.8 61.6 48.3 61.8 61.9 61.8 61.9 61.8 61.9 61.8 61.9 61.8 24.4 21.0 24.6 24.5 24.4 24.5 24.4 24.5 24.4 24.5 24.4 22.8 21.4 22.9 22.8 22.9 22.8 22.9 22.8 22.9 22.8 22.9								
Standort		Bewertung / Eignung								
Höhe 3. M. 68 69 60 61 62/63 64 65 Exposition NNW C A-4 WA Klimaregion WA Vegetationszone Ausgangsmaterial La/Ho3 Landselement PF A Nutzungsgebiet		Stufe 73 74 75 76 Bodenpunktzahl Eignung Eignungsart								
Nutzungszustand		Nutzungseinschränkung			Düngersatz					
66 67 68 69 67 68 69 70 71 72		festgestellte empfohlene 69 70 71 72			fest flüssig 71 72					
Humusform		Wald			Produktivität					
Bestand Baumhöhe, m gem. 100 101 Vorrat, m <sup>3</sup> /ha gem. 102 103 Alter, J gem. 104 105 Alter, J gesch. 106 107 Gesamtschicht 108 Geeignete Baumarten 109 Produktivität (Stufe) Punkte 110 111		100 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111			110 111 112					



**Abbildung 4:** Erhebung eines Bodenprofils: Profilblatt und Profildokumentation (Prof. 2927)

**Feldaufnahme der Böden (Kartierung)** Die Kartierenden grenzten im Feld möglichst homogene Teilflächen (Polygone) ab und hielten diese in der sogenannten Feldkarte fest (Abbildung 5a). Dies geschah aufgrund der Topografie, der Vegetation und weiterer im Gelände erkennbarer Merkmale in Kombination mit dem Vorwissen aus den vorangegangenen Schritten. Die zuvor erhobenen Bodenprofile dienten dabei als Referenz und Eichung. Handbohrungen (Kartierbohrungen) während der Felderhebung erlaubten weitere Einblicke in den Aufbau des Bodens und dienten der Charakterisierung der Polygone. Bei der Waldbodenkartierung wurden durchschnittlich fünf Bohrungen pro Hektar angestrebt. Normalerweise wurde bis in eine Tiefe von knapp einem Meter gebohrt. Wurde dabei die Kalkgrenze nicht erreicht, erfolgte wenn möglich eine zusätzliche Sondierung mit einem verlängerten Hohlmeißel bis maximal 180 cm Tiefe (so genannte Ergänzungsbohrung, vgl. techn. Merkblätter). Allerdings waren aus Ressourcengründen nur etwa 60 solcher Ergänzungsbohrungen pro 300 ha machbar, d. h. rund eine Ergänzungsbohrung pro drei Kartierbohrungen. Bei den Bohrungen wurden auch Bodenproben für Laboranalysen entnommen, jeweils für Oberboden, Unterboden 1 und fallweise Unterboden 2 (vgl. Drei-Schichten-Modell). Das wenige Bodenmaterial, das dabei anfällt, reicht für die Bestimmung grundlegender Parameter (vgl. nächster Absatz). Für jedes Polygon wurde ein umfassendes Set an Eigenschaften bestimmt bzw. geschätzt und in der Attributtabelle festgehalten (Abbildung 5b, Tabelle A1).





a und c

**Abbildung 5:**  
**Feldkarte (a), Attributtabelle (b)**  
**und digitalisierte Bodenkarte**  
**(Basiskarte, c) für einen**  
**Ausschnitt im Gebiet Wehtaler**  
**Egg. Erkennbar ist unter**  
**anderem das oben gezeigte**  
**Profil (Abbildung 4) mit der**  
**ID 2927 (in der Feldkarte mit**  
**«29» bezeichnet).**

PolygonNr	ProfilID	KoordX	KoordY	Höhe_ü_M	Aufnahmedatum	Geländeform	Ausgangsgestein	Humusform	Kalkgrenze_cm	UT_E	UT_A	UT_KG	UT_J	UT_G	UT_R
4001	3000	672902	262610	617	21.03.16	o	SC	Mt	>100	E4	A4	KG4+			
4002	3001	672996	262658	638	21.03.16	m	KO:MO	Mf	>100	E4	A3	KG4+	I1		
4003	2919	673006	262505	624	20.10.15	p	SC	Mt	60	E3	A3	KG2			
4003	2919				20.10.15	p	SC	Mt	70	E3	A3	KG3			
4004	3002	673127	262535	631	21.03.16	s	SC	Mt	>100	E4	A3	KG4+			
4005	3003	673315	262525	638	21.03.16	j	HS:SC	Mt	>100	E4	A3	KG4+			
4006	3003				21.03.16	f	HS:SC	Mt	>100	E4	A3	KG4+			
4007	3004				21.03.16	o	HS:SC	Mt	>100	E4	A3	KG4+			
4007	3004	673396	262519	635	21.03.16	o	HS:SC	Mt	>100	E4	A3	KG4+			
4008	3006	673482	262616	659	24.03.16	s	SC	Mf	90	E4	A3	KG3			
4009	3005	673685	262511	642	24.03.16	k	HS:SC	Mf	180	E4	A3	KG6	I1	G2	
4009	3087	673538	262508	634	23.06.16	k	HS:SC	Mt	>100	E4	A3	KG4+			
4009	3005				06.07.16	k	HS:SC	Mf	130	E4	A3	KG5		G2	
4010	3005				24.03.16	v	HS:SC	Mt	>100	E4	A3	KG4+			
4011	3007	673790	262522	653	24.03.16	o	SC	Fa	>100	E4	A3	KG4+			
4012	3008				24.03.16	w	SC	Mt	10	E0	A0	KG1			
4012	3008	673765	262454	635	24.03.16	w	SC	Mt	0	E0	A0	KG0			
4012	3008				24.03.16	w	SC	Mt	50	E3	A2	KG2			
4013	3011	673779	262276	626	24.03.16	r	HS:SC	Mt	60	E4	A3	KG2			
4013	3010	673772	262324	623	24.03.16	r	HS:SC	Mt	>100	E4	A3	KG4+			
4014	3012				24.03.16	w	SC	Mt	0	E1	A1	KG0			
4014	3012	673791	262224	605	24.03.16	w	SC	Mt	41	E1	A1	KG2			
4014	3012				24.03.16	s	SC	Mt	65	E1	A1	KG3			
4015	3019	673689	262191	584	05.04.16	f	HS:SC	Fa	120	E4	A3	KG4			
4016	3015				04.04.16	k	HS:SC	Mt	70	E2	A3	KG3			
4017	3015	673987	262261	618	04.04.16	l	SC	Mf	55	E4	A3	KG2			
4017	3015				04.04.16	t	SC	Fm	85	E4	A3	KG3			



**Analytik** Die Bodenproben aus den Profilen und den Bohrungen wurden durch das Bodencenter der Fachstelle Bodenschutz gemäss Standardarbeitsanweisungen aufbereitet (d.h. getrocknet und gesiebt <2 mm), analysiert und archiviert. Bestimmt wurden in der Regel die Bodenkennwerte pH-Wert der Feinerde, organischer und anorganischer Kohlenstoffgehalt, Körnung und Farbe. Die zur Beurteilung der Versauerung wichtigen Austauschereigenschaften umfassen die Messgrössen effektive und potentielle Kationenaustauschkapazität (KAK), die Anteile der austauschbaren Kationen<sup>1</sup> Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Al<sup>3+</sup>, H<sup>+</sup> sowie daraus abgeleitet die Basensättigung. Diese Parameter wurden durch externe Labors bestimmt. Für ausgewählte Profilproben wurde dazu die Methode der ehemaligen Forschungsanstalt FAC (A.14.1/2; Austauschreaktion mit Bariumchlorid) verwendet. Für das Gros der Analysen wurden die Austauschereigenschaften hingegen aus wesentlich günstigeren Nährstoffuntersuchungen mit der AAE10-Methode (Reservenährstoffe) abgeschätzt durch die Herleitung entsprechender Regressionen (Nussbaum und Papritz 2015, Nussbaum und Burgos 2017). Für einen Teil der Proben, insbesondere Unterbodenproben aus Kartier- und Ergänzungsbohrungen, lag nur wenig Material vor. Bei diesen wurde die pH-Messung direkt am feldfrischen (d.h. ungetrockneten und ungesiebeten) Material durchgeführt (vgl. «Analysen pH feldfrisch» in Anhang 9.2).

**Digitalisierung und Aufbereitung** Die kartierten Polygone wurden im GIS-System der Fachstelle Bodenschutz erfasst und die erhobenen Informationen hinterlegt. Für alle Daten wurden umfangreiche Qualitätsprüfungen durchgeführt – sowohl durch die externe Qualitätssicherung als auch durch interne Überprüfungen. Wo nötig wurde die Attributtabelle aufgrund der Laboranalysen aktualisiert. Aus den bereinigten Daten entstand schliesslich die definitive Bodenkarte (Abbildung 5c) und die daraus abgeleiteten Produkte.

**Qualitätsmanagement** Der Qualitätssicherung wurde grosses Gewicht beigemessen – nicht nur im Sinne einer Kontrolle der erfassten Daten, sondern als Begleitung des gesamten Prozesses. Interne Qualitätsprüfungen sollten die Vollständigkeit, Plausibilität und Konsistenz der erhobenen Daten sicherstellen, beispielsweise durch den Vergleich der im Feld bestimmten Eigenschaften mit später im Labor gemessenen Daten. Zusätzlich wurden erfahrene Experten mit der externen Qualitätssicherung betraut. Deren Hauptaufgabe war es, die Qualität wichtiger Schritte der Kartierung zu prüfen und insbesondere für konsistente und vergleichbare Resultate der beteiligten Kartierbüros zu sorgen. Dazu fanden regelmässig so genannte Abgleichs- oder Eichtage statt. Die externe Qualitätssicherung besprach die Konzeptkarten und die bodenkundlichen Aufnahmen der Profilgruben mit den Kartier-teams, in gewissem Umfang wurde auch gemeinsam kartiert. Ziel dieser Bemühungen war es, trotz verschiedener Herangehensweisen und Philosophien der verschiedenen Kartier-teams eine möglichst einheitliche Kartierung zu erreichen (vgl. Fazit in Kapitel 5.1).

## 2.2. Basiskarte

Die Basiskarte ist die eigentliche Bodenkarte (Abbildung 6). Sie stellt die kartierten Bodeneinheiten (Polygone) und die entsprechenden pedologischen Eigenschaften dar. Codes aus Buchstaben widerspiegeln Wasserhaushalt und Gründigkeit, Bodentyp sowie Geländeform. Die Einfärbung der Polygone zeigt mit der Wasserhaushaltsgruppe die Informationen zu Wasserhaushalt und Gründigkeit. Polygone können auch zwei oder mehr Buchstabenkombinationen enthalten, in solchen Fällen sprechen Bodenkartierer/innen von so genannten Komplexen, dies sind kleinräumige Muster verschiedener Böden.<sup>2</sup> Die Attributtabelle enthält alle weiteren erfassten Eigenschaften der einzelnen Polygone (vgl. oben, attributbasierte Kartierung), welche für weitere Darstellungen oder abgeleitete Aussagen verwendet werden können. Die pedologischen Eigenschaften, welche in der Waldbodenkarte dargestellt sind, entsprechen jenen der Bodenkarte der Landwirtschaftsfläche. Bei den zusätzlichen Attributen bestehen Unterschiede, da bei der Waldbodenkartierung mehr Eigenschaften sowie drei anstatt zwei Schichten erfasst wurden.

<sup>1</sup> Natrium zählt ebenfalls zu den austauschbaren Kationen, kann für die untersuchten Böden jedoch vernachlässigt werden.

<sup>2</sup> Der Einfachheit halber wurde für Tabelle 1 und alle analogen Auswertungen im Verlaufe dieses Berichts für Polygone, welche als Komplex beschrieben wurden, jeweils die gesamte Fläche der dominanten Klasse des Polygons zugewiesen.



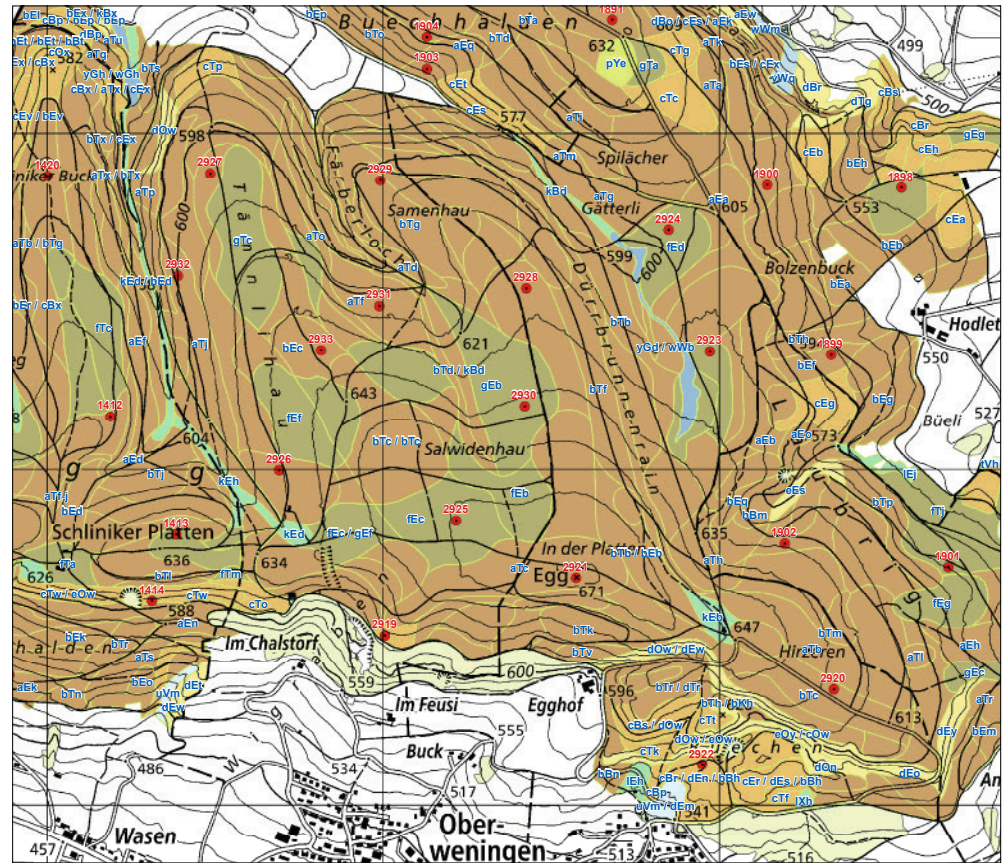
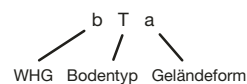
**In diesem Bericht werden Bodenkarten zu verschiedenen Themen präsentiert. Wir verwenden dazu jeweils den Kartenausschnitt im Gebiet Wehntaler Egg. Die vollständigen Karten sind online im GIS-Portal des Kantons Zürich verfügbar.**

Abbildung 6 zeigt einen Ausschnitt der Waldbodenkarte im Gebiet der Wehntaler Egg. Über die gesamten 4830 ha der Waldbodenkarte betrachtet machen Parabraunerden 65 % der Fläche aus, weitere 20 % entfallen auf saure Braunerden (Tabelle 1). Beide Bodentypen sind typisch für versauerte Böden mit langer Bodenentwicklung. Das Gros der kartierten Fläche (86 %) wird bezüglich ihres Wasserhaushalts als normal durchlässig eingeschätzt (Tabelle 2). Auffällig ist der hohe Anteil tiefgründiger bis sehr tiefgründiger Böden (64 %). Rund 9 % der Fläche zeigen einen Stauwassereinfluss, nur kleine Anteile der kartierten Fläche sind stärker durch Stau-, Grund- oder Hangwasser geprägt.

**Wasserhaushaltsgruppe**

- a, b
- c
- d, e
- f, g
- h, i
- k, l
- m, n
- o, p
- q, r
- s, t, u
- v, w
- x, y
- z
- so, to, uo, vo, wo
- xo, yo, zo
- Wald (nicht kartiert)
- Profil

Kodierung der Polygonlabel:



**Abbildung 6:** Waldbodenkarte im Gebiet Wehntaler Egg. Sichtbar sind die abgegrenzten Bodeneinheiten (Polygone) mit den entsprechenden Codes. Diese bestehen aus der Wasserhaushaltsgruppe (erster Buchstabe), dem Bodentyp (zweiter Buchstabe) sowie der Geländeform (dritter Buchstabe). Die Einfärbung zeigt die Wasserhaushaltsgruppe (vgl. Legende).

**2.3. Verfügbarkeit/Publikation der Daten**

Die in diesem Projekt erarbeitete Bodenkarte ist – wie auch die landwirtschaftliche Bodenkarte – auf dem WebGIS-Portal des Kantons Zürich verfügbar. Einsehbar sind die Basis-karte mit den pedologischen Informationen sowie ausgewählte Attribute zu den Polygonen und den Horizonten des Drei-Schichten-Modells. Des Weiteren werden ausgewählte abgeleitete Karten und Visualisierungen verfügbar gemacht. Für die Bodenprofile werden Fotos, Profilbeschreibung und Messwerte im WebGIS publiziert, die Standorte der Profile sind in der Bodenkarte ersichtlich. Weitere Daten aus der Waldbodenkartierung sind auf Anfrage bei der Fachstelle Bodenschutz verfügbar.

**Tabelle 1:** Anteile der Bodentypen nach KLABS 2010 für die kartierten Waldflächen.

Bodentyp	Symbol	Fläche (ha)	Anteil (%)
Parabraunerde	T	3128	65
Saure Braunerde	E	959	20
Braunerde	B	338	7
Regosol	O	262	5
Braunerde-Pseudogley	Y	48	1
andere		97	2
<b>Total kartiert</b>		<b>4830</b>	<b>100</b>



Vernässungsart (Wasserhaushaltsklasse)	Vernässungsgrad (Wasserhaushaltsgruppe)	Code(s)	Fläche (ha)	Anteil (%)
senkrecht durchwaschen	normal durchlässig, tiefgründig (> 70 cm)	a, b	3095	64
	normal durchlässig, mässig tiefgründig (50–70 cm)	c	688	14
	normal durchlässig, flachgründig (< 50 cm)	d, e	371	8
	stauwasserbeeinflusst	f, g, h, i	424	9
	grund-/hangwasserbeeinflusst	k, l, m, n	123	3
stauwasser- geprägt	selten bis zur Oberfläche porengesättigt	o, p	53	1
	häufig bis zur Oberfläche porengesättigt	q, r	5	<1
grund-/hangwasser- geprägt	selten bis häufig bis zur Oberfläche porengesättigt	s, t, u, v, w	59	1
	meist bis dauernd bis zur Oberfläche porengesättigt	x, y, z	13	<1
<b>Total kartiert</b>			<b>4830</b>	<b>100</b>

**Tabelle 2:**  
Beurteilung des  
Wasserhaushalts:  
Flächenanteile der  
Wasserhaushaltsgruppen  
(teilweise zusätzlich nach  
Gründigkeit aufgeschlüsselt)  
nach KLABS 2010 für die  
kartierten Waldflächen.

## Stand der Bodenkartierung schweizweit

Detaillierte und zuverlässige Bodeninformationen sind für den Schutz und die nachhaltige Nutzung der Böden elementar. Basierend auf systematisch erhobenen Bodendaten können zielgruppengerechte kartographische Produkte erstellt und zur Verfügung gestellt werden. Häufig stehen Aspekte der land- und forstwirtschaftlichen Bewirtschaftung im Vordergrund: Nutzungseignung, Verdichtungsempfindlichkeit und Wasserhaushalt sind Beispiele dafür, ebenso die Festlegung von Fruchtfolgeflächen in der Landwirtschaft. Zukünftig dürften vermehrt auch Fragen bezüglich Ökologie, Biodiversität und Anpassung an den Klimawandel von Interesse sein. Darüber hinaus sollten Bodenkarten in der Raumplanung angemessen berücksichtigt werden.

Im nationalen Vergleich verfügt der Kanton Zürich über eine gute Datenlage: Bei der Kartierung der landwirtschaftlichen Böden von 1988 bis 1997 wurden rund 76 000 ha im Massstab 1:5000 kartiert, dazu kommen die 4800 ha der Waldbodenkartierung. Somit existieren Bodenkarten für das gesamte Landwirtschaftsgebiet sowie für 10 % der Waldfläche des Kantons. Schweizweit wurden rund 37 % oder 360 000 ha der Landwirtschaftsfläche kartiert, es bestehen jedoch grosse Unterschiede bezüglich Qualität und Massstab (Rehbein et al. 2019). Für ca. 127 000 ha oder 13 % der Landwirtschaftsfläche sind qualitativ hochwertige Bodenkarten verfügbar, d. h. sie liegen im Datenschlüssel 5 oder 6 sowie im Massstab 1:5000 oder grösser vor. Diese Flächen entfallen grösstenteils auf die Kantone Basel-Landschaft, Luzern, Solothurn, Zug und Zürich. Die Mehrheit der Kartierprojekte in der Schweiz hat einen klar ackerbaulichen Fokus, entsprechend dünn ist die Datenlage für Waldböden. Nennenswerte Flächen wurden bislang einzig in den Kantonen Solothurn und Zürich kartiert (Rehbein et al. 2019).

Mit dem Beschluss vom Mai 2020 zur Bodenstrategie Schweiz beauftragte der Bundesrat die Bundesämter BAFU, ARE und BLW, ein «Konzept für eine schweizweite Bodenkartierung» zu erstellen. Das Konzept beschreibt den Bedarf, das Vorgehen und die Organisation der schweizweiten Kartierung mithilfe einer einheitlichen Kartiermethode und wurde im März 2023 vom Bundesrat gutgeheissen. Das Konzept sieht eine gemeinsame Umsetzung durch Bund und Kantone vor. Die Kartierung startet nach einer fünfjährigen Vorbereitungsphase ab ca. 2029. Der vorgeschlagene Kartieransatz zielt auf eine einheitliche Erhebung von Bodeneigenschaften für fast alle Böden der Schweiz ab. Diese Böden entsprechen einer Gesamtfläche von 30 600 km<sup>2</sup> und umfassen alle Landwirtschafts- und Waldböden, Böden von Naturschutzgebieten sowie ungenutzte Böden (ausgenommen Permafrost- und Felsböden).





1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60  
61  
62  
63  
64  
65  
66  
67  
68  
69  
70  
71  
72  
73  
74  
75  
76  
77  
78  
79  
80  
81  
82  
83  
84  
85  
86  
87  
88  
89  
90  
91  
92  
93  
94  
95  
96  
97  
98  
99  
100  
101  
102  
103  
104  
105  
106  
107  
108  
109  
110  
111  
112  
113  
114  
115  
116  
117



# 3. Bodenversauerung

## 3.1. Natürlicher Prozess und menschengemachtes Problem zugleich

Über die Jahrtausende sorgen Säureeinträge durch Niederschläge und Ausscheidungen von Pflanzen, Mikroorganismen und Tieren zu einer langsamen, aber stetigen Versauerung des Bodens – eigentlich ein natürlicher Prozess. Seit der industriellen Revolution führen zusätzliche, vom Menschen verursachte Säureeinträge zu einer deutlichen Beschleunigung der Versauerung. Stickstoff- und Schwefelverbindungen aus Industrie, Verkehr, Landwirtschaft und privaten Feuerungen sind dabei die Hauptverursacher. Diese unerwünschten Emissionen gelangen über die Luft flächendeckend in den Boden. Das Problem des sauren Regens wurde der breiten Öffentlichkeit in den 1980er-Jahren erstmals bewusst. Dank diverser Massnahmen, vor allem zur Luftreinhaltung, nahm die Belastung mit Schwefeloxiden inzwischen deutlich ab. Die Immissionen von Stickoxiden und Ammoniak sind ebenfalls rückläufig, aber nach wie vor (zu) hoch (Rigling und Schaffer 2015).

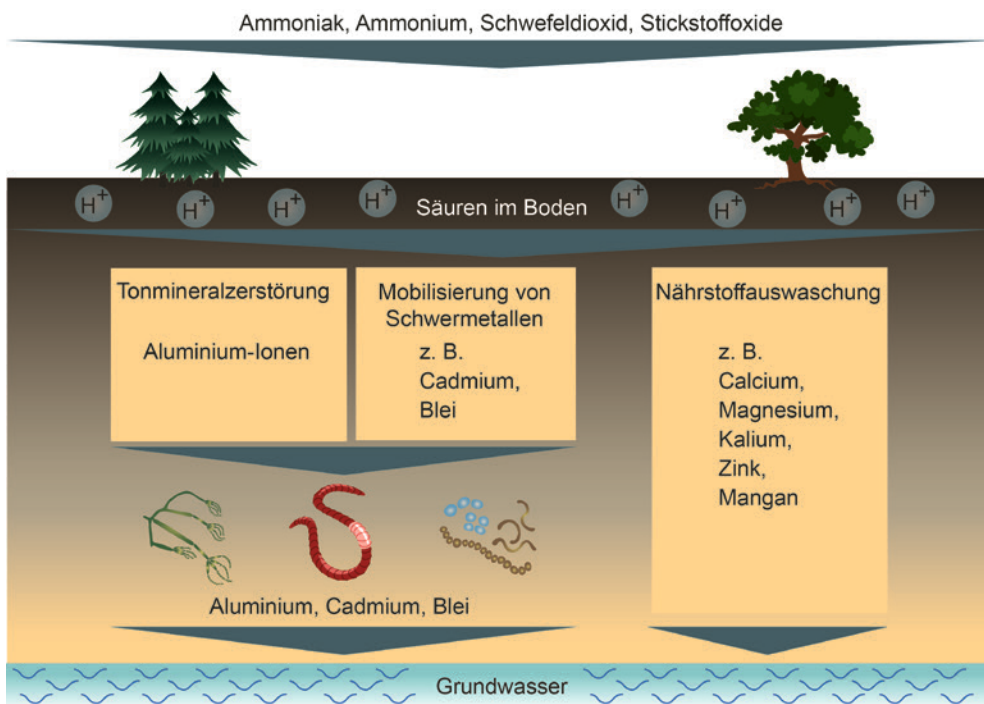


Abbildung 7: Wirkungspfade der Bodenversauerung

Quelle: Bayerisches Landesamt für Umwelt, Nadeeka Pinto.

Im Boden werden die eingetragenen Säuren durch so genannte Pufferreaktionen neutralisiert. In kalkhaltigen Böden geschieht dies hauptsächlich durch die Auflösung von Karbonat (Kalk), in kalkfreien Böden zunächst durch die Protonierung variabler Ladungen und die Verwitterung von Silikaten, danach durch die Auflösung von Aluminium- und Eisen-Verbindungen (Tabelle 3). Aus diesem Grund verliert der Boden parallel zur Versauerung Nährstoffe wie Kalzium, Kalium und Magnesium, und setzt vermehrt toxische Aluminium-Kationen frei (vgl. Abbildung 7). Zudem reduziert sich die Kationenaustauschkapazität und damit die Nährstoffverfügbarkeit insgesamt. Durch das unausgeglichene Nährstoffangebot und das saurere Milieu gedeihen Bodenlebewesen und Pflanzen schlechter, was sich wiederum auf die Nährstoffverfügbarkeit, die Bodenstruktur und den Wasserhaushalt auswirkt. Die Versauerung wirkt sich allerdings nicht nur im Boden selbst aus, auch Grund- und Trinkwasser können durch die Mobilisierung und Auswaschung von Nähr- und Schadstoffen betroffen sein.



Wie viele andere Gebiete der Schweiz und Mitteleuropas sind die Zürcher Wälder von Bodenversauerung betroffen. Daten der kantonalen Bodenüberwachung (KaBo) weisen schon länger auf die Problematik hin: Über ein Drittel der rund 180 Waldstandorte im KaBo-Messnetz fallen mit pH-Werten  $\leq 4.3$  bis mindestens 60 cm Tiefe in die Kategorie «stark sauer». Der Anteil der sehr sauren Standorte ( $\text{pH} \leq 3.8$ ) betrug zu Beginn des neuen Jahrtausends rund 15 %, mit steigender Tendenz (Gasser et al. 2009). Häufig findet man solche Böden auf altem (Rissmoräne) oder gut durchlässigem Ausgangsgestein (z.B. Schotter). Die KaBo-Standorte wurden seit der ersten Erhebung 1995–99 alle fünf Jahre erneut beprobt, sodass inzwischen langjährige Zeitreihen vorliegen. Die Analyse der pH-Werte über die 20 Jahre bis zur fünften Erhebung in 2015–19 zeigt vor allem für einen Teil der Unterböden eine Abnahme (Abbildung 8).

### 3.2. Wie wird die Versauerung beurteilt?

Die naheliegendste Messgrösse zur Beschreibung des Versauerungszustands des Bodens ist dessen Säuregrad ausgedrückt als pH-Wert. Basierend darauf kann der Boden (bzw. können die einzelnen Bodenschichten) den Säureklassen gemäss Tabelle 3 zugeordnet werden. Diese wurden aufgrund der Analyse einer grossen Anzahl Schweizer Waldböden hergeleitet (Walthert et al. 2004). Ergänzend dazu liefern Analysen der Kationenaustauschkapazität (KAK) und der austauschbaren Kationen ein detaillierteres Bild. Dabei sind insbesondere die **Basensättigung** sowie der **Anteil der Aluminium-Kationen** von Interesse. Die Basensättigung beschreibt den Anteil der Nährstoffkationen Kalzium, Magnesium, Kalium und Natrium an der gesamten Austauschkapazität und nimmt im Verlaufe der Versauerung ab. Der Anteil der Aluminium-Kationen nimmt während der Versauerung hingegen zu. Zur Beurteilung der Pflanzenernährung (und somit auch der Standorteignung) sind diese beiden Indikatoren aussagekräftiger als der pH-Wert, weil der Zusammenhang zwischen pH-Wert und Basensättigung unterhalb pH 4 nicht mehr sehr stark ist (grosse Streuung in Abbildung 9).

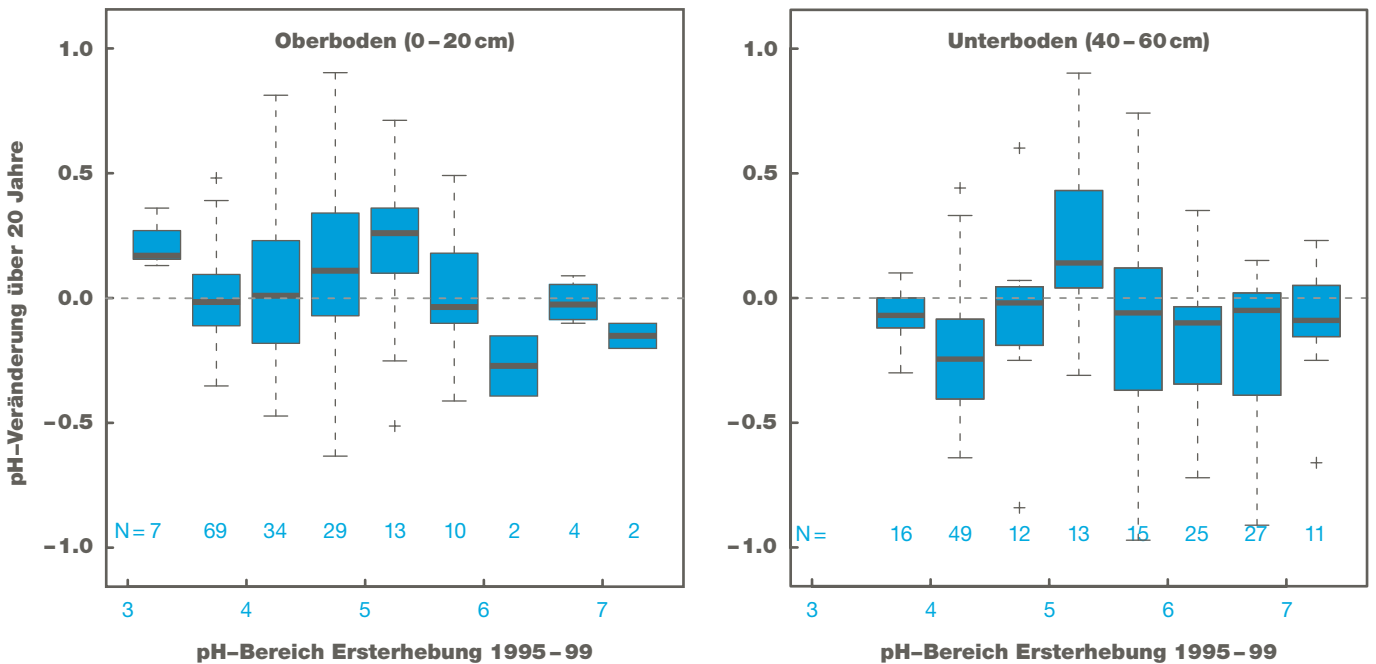
Säureklasse Säurezustand	pH-Bereich (pH $\text{CaCl}_2$ )	Dominierende Pufferreaktionen	Puffereffizienz	Basensättigung	Veränderungen im Boden durch Versauerung
1 alkalisch	>7.0	Karbonat- verwitterung	gross	sehr hoch (~ 100 %)	sehr langsame pH-Abnahme
2 schwach sauer	5.6–7.0	Protonierung variabler Ladungen; Silikatverwitterung	gering	sehr hoch (> 95 %)	rasche pH-Abnahme, noch keine Verdrängung von Nährstoffkationen
3 mässig sauer	4.6–5.6	Wie Klasse 2 mit beginnender Auflösung von Al-Verbindungen	gering	abnehmend, meist mittel bis hoch (> 50 %)*	rasche pH-Abnahme, Verdrängung von Nährstoffkationen durch Al
4 stark sauer	3.8–4.6	Auflösung von Al- Verbindungen	gross	abnehmend, meist tief bis mittel*	langsame pH-Abnahme, Verdrängung von Nährstoffkationen durch Al
5 sehr stark sauer	<3.8	Protonierung org. Substanz; Auflösung von Al- und Fe-Verbindungen	mässig	nur noch leicht abnehmend, meist sehr tief*	mässige pH-Abnahme, nur noch geringe Verdrängung von Nährstoffkationen durch Al und Fe

\*sehr grosse Streuung zwischen Böden beobachtet

**Tabelle 3:**  
Säureklassen und die für den  
entsprechende pH-Bereich  
dominanten Pufferreaktionen  
und die typischen  
Veränderungen im Boden  
(verändert aus  
Walthert et al. 2004  
und Zimmermann et al. 2013).  
Al = Aluminium,  
Fe = Eisen.



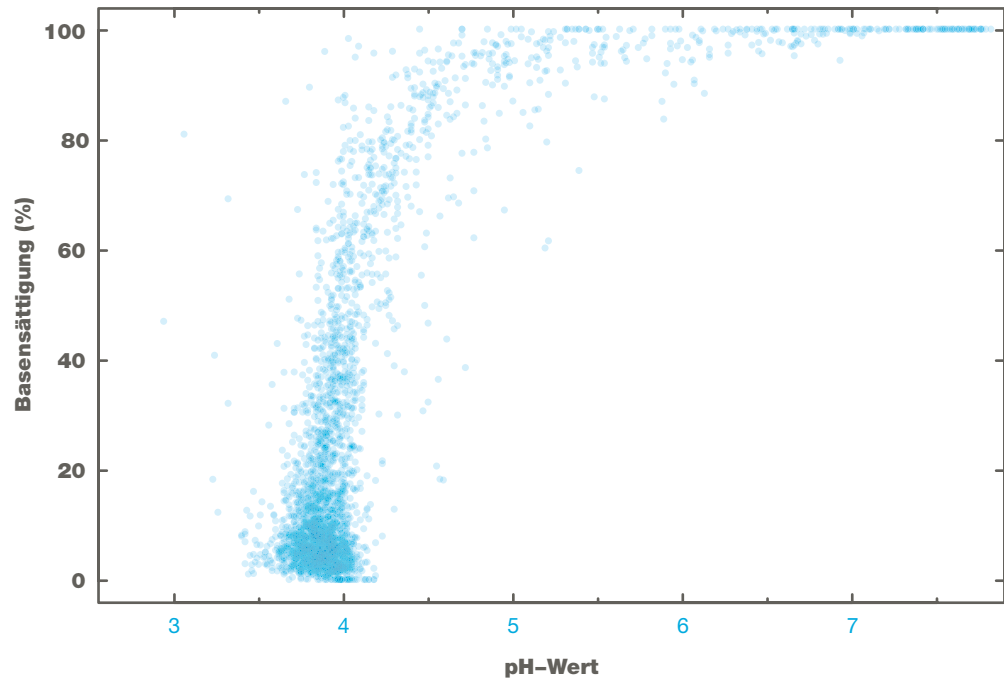
In alkalischen bis schwach sauren Böden (Säureklassen 1 bis 2) ist die Basensättigung sehr hoch (>95 %), unterhalb dieses Bereichs nimmt sie rasch ab. Eine Basensättigung unterhalb 15 % wird als kritisch erachtet, da aufgrund der dabei herrschenden Nährstoffverhältnisse in der Bodenlösung potentiell eine Gefährdung des Pflanzenwachstums besteht (Walther et al. 2004). Der Anteil von Aluminium an der Austauschkapazität ist für Böden der Säureklassen 1 und 2 vernachlässigbar klein. Unterhalb pH 5 nimmt der Anteil deutlich zu und liegt für Böden der Säureklassen 4 und 5 typischerweise im Bereich von 50 bis 70 %. Dabei ist mit einer Beeinträchtigung des Pflanzenwachstum durch Aluminium-Toxizität zu rechnen, insbesondere säureempfindliche Pflanzen gedeihen auf solchen Böden nicht mehr.



**Abbildung 8:** Entwicklung des pH-Werts in den Böden von Waldstandorten der Kantonalen Bodenüberwachung (KaBo). Veränderung (in pH-Einheiten) pro KaBo-Standort über 20 Jahre von der ersten (1995-99) bis zur fünften Erhebung (2015-19) gruppiert nach Säuregrad zu Beginn der Zeitreihe.



**Abbildung 9:** Basensättigung in Abhängigkeit des pH-Werts für knapp 3000 Unterbodenproben, welche im Rahmen der Waldbodenkartierung analysiert wurden. Auffällig ist die grosse Streuung der Basensättigung im pH-Bereich von 3.5 bis 4.5.



Die Säurepufferung durch Karbonat sowie durch Aluminium-Verbindungen ist sehr effizient, daher sind Böden in den pH-Bereichen dieser beiden Puffersysteme (Säureklassen 1 bzw. 4 und 5) vergleichsweise gut vor einer weiteren pH-Abnahme geschützt. Je grösser hingegen der Anteil der Feinerde im schlechter gepufferten pH-Bereich von 4.6 bis 7, desto grösser die Empfindlichkeit des Bodens für eine weitere pH-Abnahme. Das Risiko für eine Abnahme der Basensättigung ist bei Böden im Bereich der Säureklassen 3 und 4 hoch. Wie schnell sich weitere Säureinträge auf die Basensättigung auswirken hängt zudem davon ab, wie hoch die KAK insgesamt ist (je kleiner die KAK, desto schneller die Abnahme). Auf der Basis dieser Kenntnisse in Kombination mit profilumfassenden Analysen können der Versauerungszustand des Bodens und die erwartete zukünftige Entwicklung beurteilt werden (vgl. Box Seite 23).

Solch detaillierte Analysen ganzer Bodenprofile sind aufwendig und lassen sich nicht ohne weiteres auf grössere Flächen übertragen. Im Rahmen von Bodenkartierungen muss daher auf einfachere Ansätze zurückgegriffen werden. Interessant sind insbesondere einfach zu erhebende und möglichst robuste Grössen, die mit dem Versauerungszustand korrelieren.

**Bei der Zürcher Waldbodenkartierung wurde der Versauerungszustand anhand dreier Indikatoren beurteilt:**

- **pH-Wert bzw. Azidität** Der Säuregrad des Bodens erlaubt eine grobe Abschätzung des Versauerungszustands. → Kapitel 3.3
- **Kalkgrenze** Die Mächtigkeit der entkarbonateten Schicht ist ein guter Versauerungs-Indikator bei ursprünglich kalkhaltigen Böden (Zimmermann und Luster 2013). Je tiefer die Kalkgrenze, desto grösser das Risiko für eine Abnahme der Basensättigung. → Kapitel 3.4
- **Basensättigung** Die Basensättigung des Bodens, insbesondere deren Verlauf über die Tiefe, erlaubt eine differenzierte Beurteilung des Versauerungszustandes. Die Basensättigungstypen nach Kölling (2010) repräsentieren typische Stadien der fortschreitenden Versauerung → Kapitel 3.5

## Profilumfassende Erhebungen

(basierend auf einem Beitrag von Stephan Zimmermann, WSL)

Die WSL nutzte die Gelegenheit und untersuchte viele der Bodenprofile, die für die Zürcher Waldbodenkartierung ausgehoben wurden, mit ihren eigenen Erhebungsmethoden. Wichtige Unterschiede im Vergleich zu den Profilaufnahmen der Kartierung sind die feiner aufgelöste Beprobung über die Tiefe (andere Horizontierung, mehr Proben) sowie das umfangreichere Messprogramm. Diese aufwendigen profilumfassenden Analysen erlauben Aussagen zum Versauerungszustand der Böden sowie eine Abschätzung des Risikos für eine weitere Abnahme des pH-Werts und der Basensättigung. Auch das Risiko für Aluminium-Toxizität und die potentielle Beeinträchtigung des Pflanzenwachstums dadurch lässt sich einordnen. Dazu wurden die Verläufe des pH-Werts, der Basensättigung und der Kationenaustauschkapazität über die Tiefe betrachtet, zudem die Feinerde-Anteile der einzelnen Säure- und Basensättigungsklassen aufsummiert für den gesamten Boden (vgl. Zimmermann und Luster 2013). Solche umfassenden, detaillierten Beurteilungen lassen sich nicht direkt auf die gesamte kartierte Fläche übertragen, sie sind jedoch eine wertvolle Ergänzung zu den Flächendaten der Waldbodenkartierung.

Abbildung 10 zeigt beispielhaft zwei Böden im Gebiet der Wehntaler Egg. Das Profil «Tännlihu» unterliegt, wie die Mehrheit der Böden in diesem Gebiet, einer fortgeschrittenen Versauerung. Die Daten zeigen eine sehr starke Versauerung und eine mittlere Basensättigung, der Boden ist über die gesamte betrachtete Tiefe von 160 cm karbonatfrei. Beim Profil «Buechen» wurde die Kalkgrenze hingegen bereits nach 60 cm erreicht, unterhalb dieser Tiefe ist der Boden kalkhaltig. Entsprechend ist dieser Boden nur wenig versauert und hat eine hohe Basensättigung.

Im Gebiet Tännlihu besteht kein unmittelbares Risiko einer weiteren pH-Abnahme, da der pH-Wert über weite Tiefenbereiche des Profils bereits im sehr gut puffernden Aluminium-Pufferbereich liegt. Das Risiko für eine weitere Abnahme der Basensättigung wird hingegen als gross erachtet, jenes für Aluminium-Toxizität als mässig. Ganz anders die Prognose für das Gebiet Buechen: Der gesamte obere Bereich des Bodens (bis zur Kalkgrenze) befindet sich im schlecht gepufferten pH-Bereich (Säureklassen 2 und 3). Das Risiko für eine pH-Abnahme ist folglich gross, jenes für eine Abnahme der Basensättigung hingegen gering. Ein Risiko für Aluminium-Toxizität besteht nicht, der Säuregrad des Bodens ist noch weit vom dafür kritischen Bereich entfernt.

Der Blick zurück in die Vergangenheit liefert eine Erklärung für die ausgeprägten Unterschiede zwischen den beiden Böden. Auf der Egg dominieren Moränen und Schotter, hauptsächlich des frühen bis mittleren Pleistozäns, welche im späten Pleistozän (Würmeiszeit) kaum mehr von Gletschern überfahren wurden. Die Bodenbildung verlief hier über bedeutend längere Zeiträume im Vergleich zu Standorten mit würmeiszeitlichen Sedimenten. Daher ist die natürliche Versauerung weiter fortgeschritten, das gezeigte Bodenprofil «Tännlihu» ist ein typisches Beispiel für diese Böden. Das Profil «Buechen» hingegen liegt in einem Sackungsgebiet, wo die alte Moräne allenfalls mit der oberen Süsswassermolasse (Süsswasserkalke, Mergelstein, Sandstein) vermischt ist. Daher sind die Böden in diesem Gebiet nur mässig bis schwach versauert und die Kalkgrenze liegt nicht sehr tief.



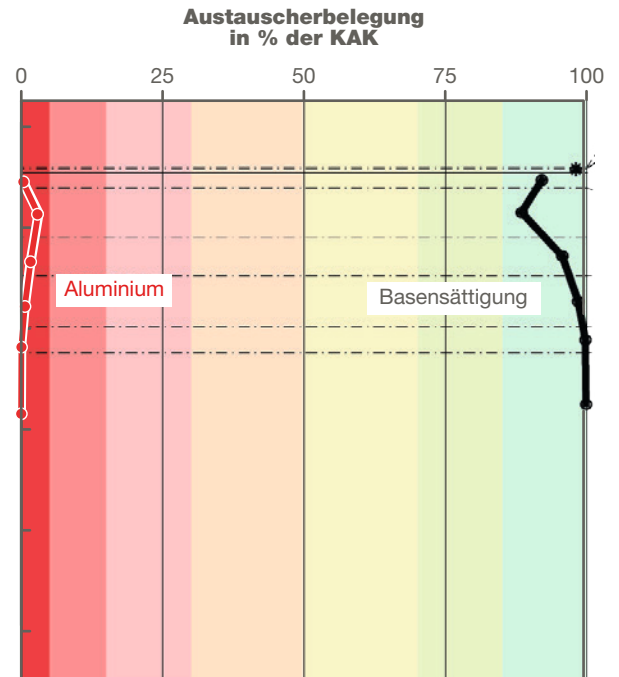
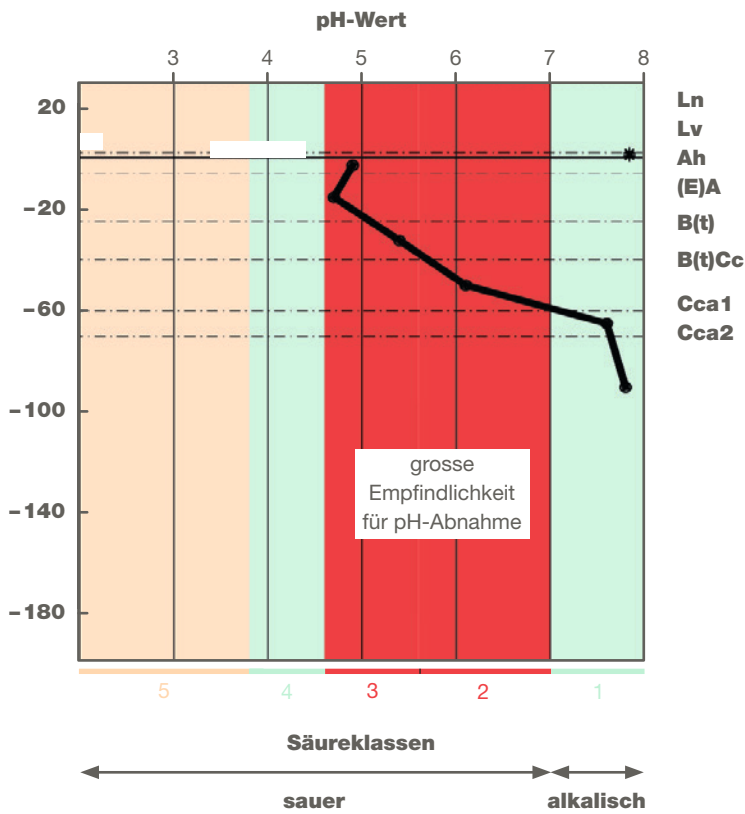


# Profil Buechen

## Beurteilung

Säurestatus  
 Basensättigung  
 Kationenaustauschkapazität  
 Bodenversauerung  
 Risiko pH-Abnahme  
 Risiko Abnahme Basensättigung  
 Risiko für Al-Toxizität

schwach sauer  
 sehr gross  
 sehr klein  
 sehr schwach  
 sehr gross  
 sehr gering  
 kein Risiko



# Profil Tännlihau

## Beurteilung

Säurestatus	stark sauer
Basensättigung	mittel
Kationenaustauschkapazität	mittel
Bodenversauerung	sehr stark
Risiko pH-Abnahme	kein Risiko
Risiko Abnahme Basensättigung	gross
Risiko für Al-Toxizität	mässig

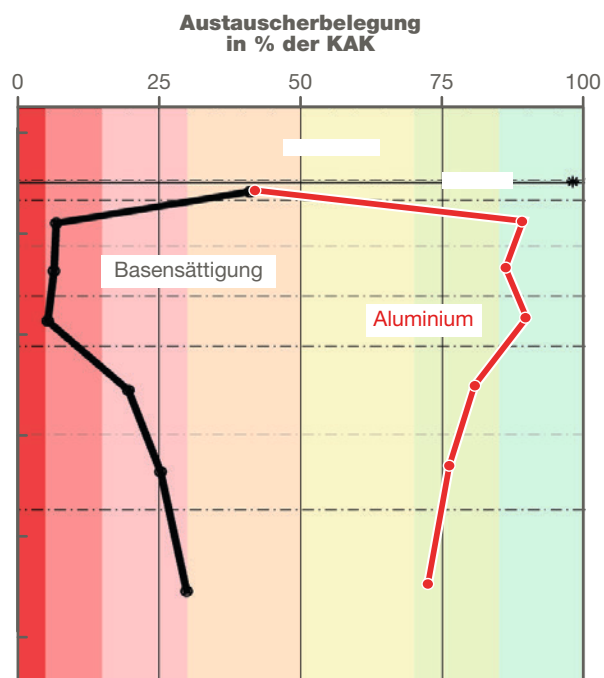
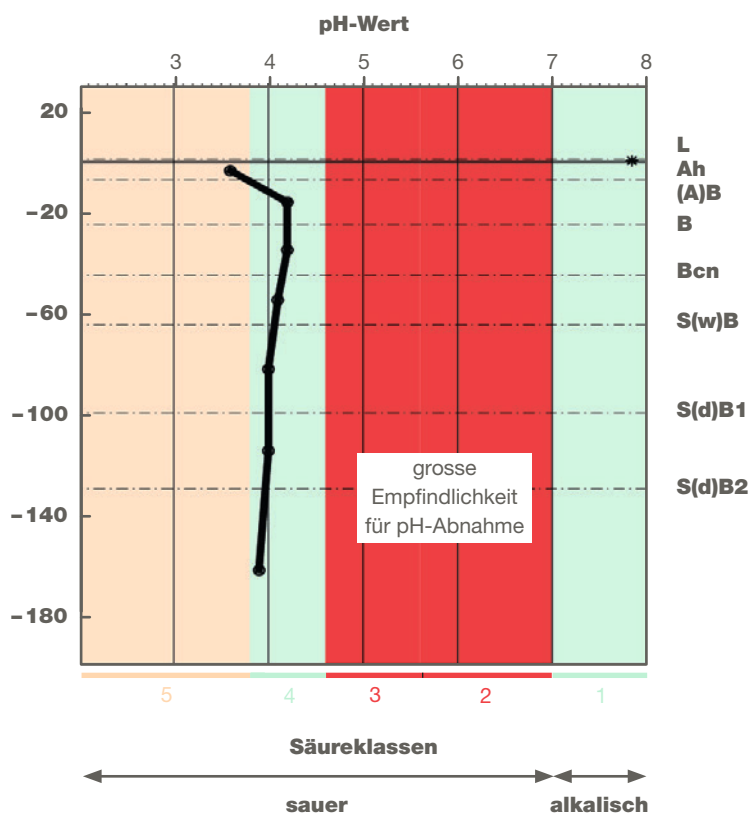
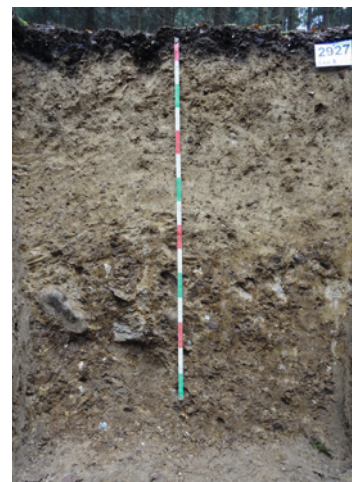


Abbildung 10: Darstellung und Beurteilung des Versauerungszustands für zwei Waldbodenprofile im Gebiet Wehntaler Egg.



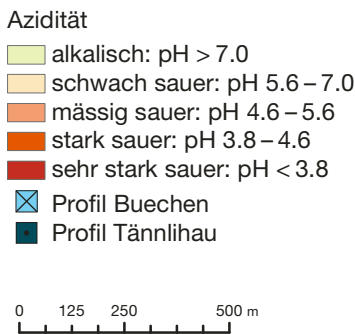
### 3.3. Azidität

Der eigens für dieses Projekt definierte Untertyp A «Azidität» beschreibt den Säuregrad der kartierten Böden. In Analogie zum Untertyp E «Säuregrad» der Kartieranleitung (BGS 2010) wurde dafür der tiefste für einen Horizont repräsentative pH-Wert herangezogen. Nicht berücksichtigt wurden dabei Auflagehorizonte sowie organo-mineralische Horizonte. In die Praxis umgesetzt wurde dies bei der Zürcher Waldbodenkartierung, indem der tiefste im Profil gemessene pH-Wert eines Horizontes mit weniger als 1.2 % organische Substanz betrachtet wurde. De facto entspricht das in den meisten Fällen dem Unterboden 1 des Drei-Schichten-Modells. Die Aziditätsklassen des Untertyps A (Tabelle 4) basieren auf den fünf Säureklassen gemäss der Einteilung der WSL für Waldböden (Tabelle 1; Walthert et al. 2004).

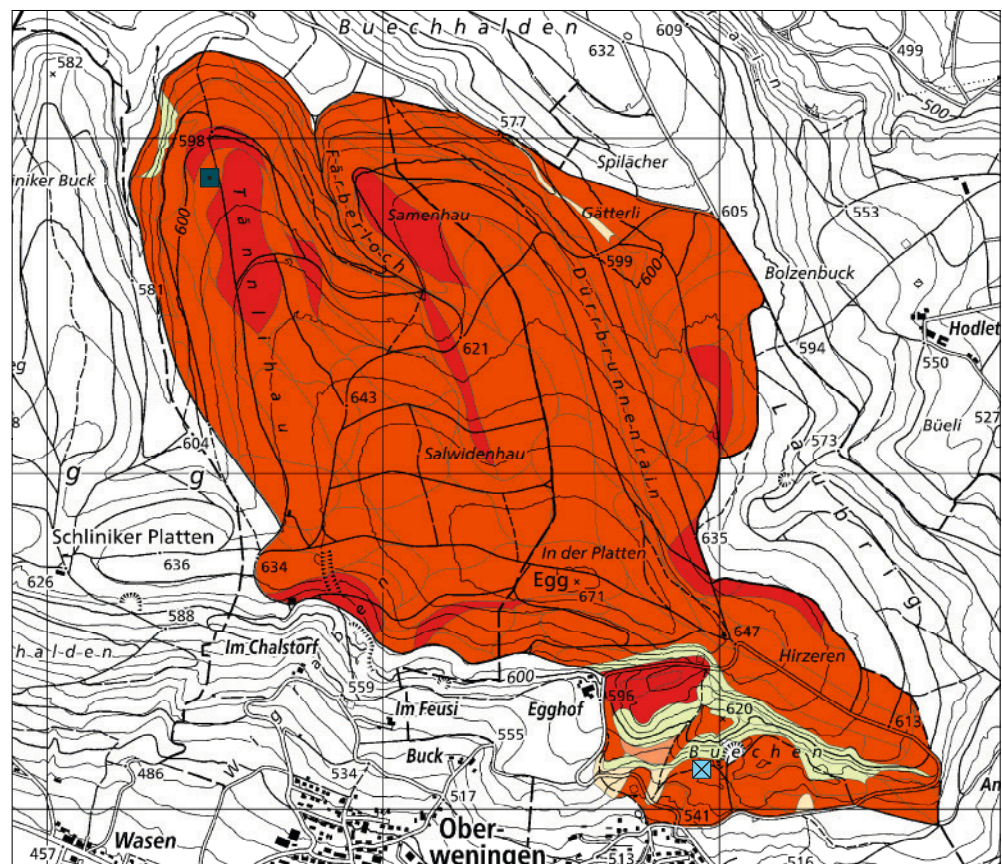
Die grosse Mehrheit der kartierten Waldböden, rund 75 % der Fläche, fällt in die Aziditätsklasse A3 «stark sauer» (Tabelle 4). Nur wenige Böden sind noch stärker versauert (Klasse A4, 3 % der Fläche). Die Flächenanteile der Klassen A0 bis A2, welche den alkalischen bis mässig sauren Bereich abdecken, sind alle ähnlich gross und betragen je 6 bis 9 %. Auch im Teilgebiet der Wehntaler Egg, kartographisch dargestellt in Abbildung 11, dominiert die Aziditätsklasse A3. Nennenswerte Flächen an alkalischen und schwach sauren Böden finden sich hauptsächlich im südwestlichen Teil des dargestellten Ausschnitts. Die Ursache dieser räumlichen Verteilung wird in der Box auf Seite 23 erläutert.

**Tabelle 4:**  
Beurteilung der Bodenversauerung aufgrund des Untertyps A «Azidität». Flächenanteile pro Aziditätsklasse für die kartierten Waldflächen.

Aziditätsklasse	Beschreibung	pH (CaCl <sub>2</sub> )	Fläche (ha)	Anteil (%)
A0	alkalisch	> 7.00	289	6
A1	schwach sauer	5.61–7.00	307	6
A2	mässig sauer	4.61–5.60	427	9
A3	stark sauer	3.80–4.60	3645	75
A4	sehr stark sauer	< 3.80	164	3
<b>Total kartiert</b>			<b>4830</b>	<b>100</b>



**Abbildung 11:**  
Azidität der Böden im Gebiet Wehntaler Egg



### 3.4. Kalkgrenze

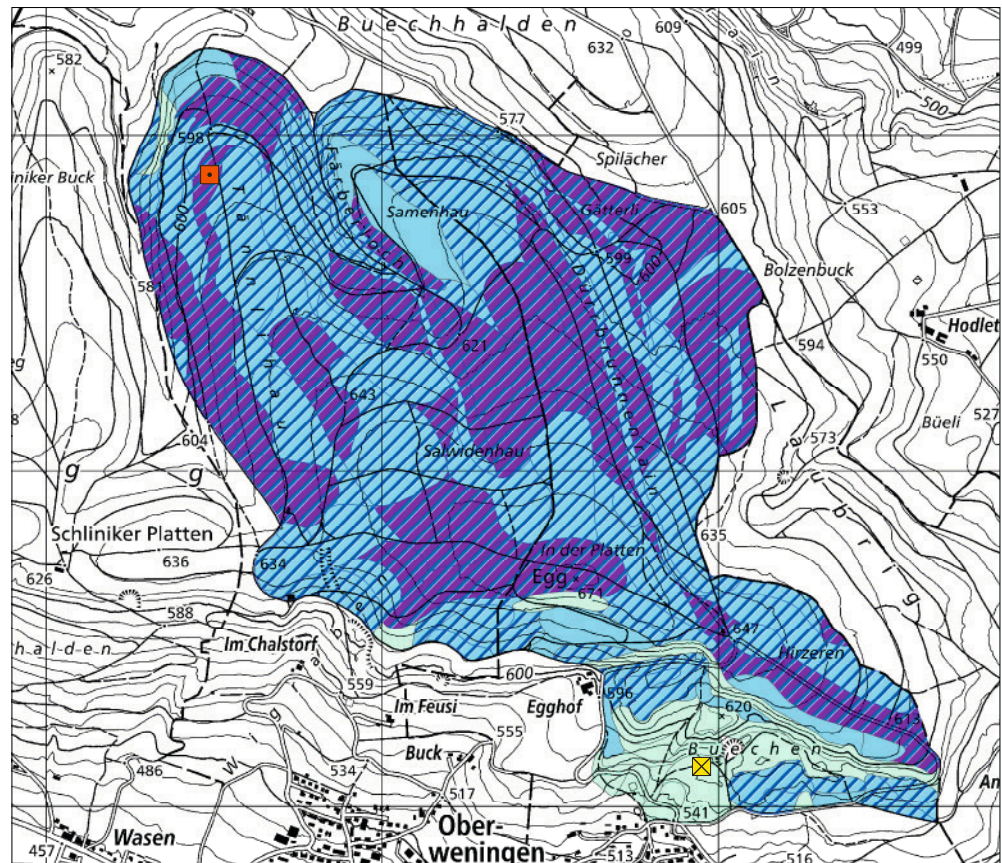
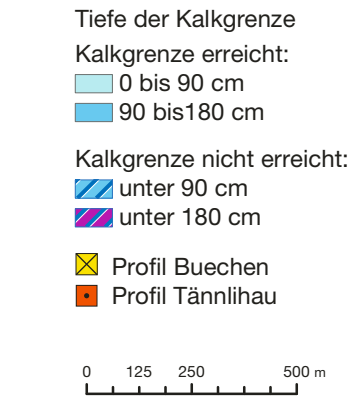
Die Kalkgrenze beschreibt, bis in welche Tiefe der Boden karbonatfrei ist. Sie ist ein guter Indikator, wie weit die Versauerung fortgeschritten ist, zumindest für ursprünglich karbonathaltige Böden. Durch die Säureinträge schreitet die Entkalkung dieser Böden von oben nach unten fort, daher nimmt die Mächtigkeit des kalkfreien Bereichs im Verlaufe der Versauerung zu. Gleichzeitig sinken pH-Wert und Basensättigung in diesem Bereich, während sie im darunterliegenden karbonathaltigen Teil des Bodens hoch bleiben. Daher ist das Risiko für eine Abnahme der Basensättigung grösser, je mächtiger der kalkfreie Bereich ist – oder anders ausgedrückt: je tiefer die Kalkgrenze liegt. Dies bestätigten beispielsweise Analysen für Zentralschweizer Waldböden (Zimmermann und Luster 2013).

Im Rahmen der Waldbodenkartierung wurde für alle kartierten Flächen die Lage der Kalkgrenze dokumentiert. Die Kalkgrenze variiert innerhalb der kartierten Polygone und die Genauigkeit der Tiefenangabe sollte nicht überschätzt werden, daher wurden die Tiefenangaben in Klassen à je 30 cm zusammengefasst (Untertyp KG, vgl. techn. Merkblätter). Aus Tabelle 5 geht hervor, dass für rund die Hälfte der kartierten Fläche bei den Sondierungen oder Profilerhebungen keine karbonathaltige Schicht erreicht wurde. Folglich muss die Kalkgrenze unterhalb der erschlossenen Tiefe liegen, lässt sich aber nicht exakt eingrenzen. Für rund 12 % der kartierten Fläche liegt die Kalkgrenze in den obersten 60 cm des Bodens, für weitere 12 % zwischen 60 und 90 cm Tiefe. Für rund 75 % der kartierten Fläche liegt die Kalkgrenze unterhalb 90 cm. Darin inbegriffen sind jene 20 % der Fläche, bei denen die Kalkgrenze nachweislich unterhalb 180 cm Tiefe liegt. Effektiv dürfte die Fläche mit einer solch tiefen Kalkgrenze deutlich höher sein, denn für 29 % der Fläche wurde die Kalkgrenze in den ersten 90 cm nicht erreicht, danach aber nicht tiefer sondiert. Aus Ressourcengründen war die Anzahl tiefergehender Bohrungen limitiert. Die kartographische Darstellung der Kalkgrenze im Gebiet der Wehntaler Egg illustriert diesen Sachverhalt sehr anschaulich (Abbildung 12): Die meisten Polygone mit der Angabe «Kalkgrenze unterhalb 90 cm» befinden sich zwischen Flächen, bei denen die Kalkgrenze nachweislich unterhalb 180 cm liegt. Daher ist davon auszugehen, dass die obersten 180 cm des Bodens für einen grossen Teil des kartierten Gebiets karbonatfrei sind. Böden mit Karbonat in den obersten 90 cm, teilweise gar bis zur Oberfläche, findet man fast ausschliesslich in einem Sackungsgebiet im südöstlichen Teil des Kartenausschnitts, wo die alte Moräne wahrscheinlich mit der oberen Süsswassermolasse vermischt wurde (vgl. Box auf Seite 23).

Tiefe der Kalkgrenze	Untertyp(en) KG	Fläche (ha)	Anteil (%)
<b>Kalkgrenze erreicht</b>			
0 bis 30 cm	0, 1	293	6
30 bis 60 cm	2	283	6
60 bis 90 cm	3	556	12
90 bis 120 cm	4	699	14
120 bis 150 cm	5	368	8
150 bis 180 cm	6	180	4
<b>Kalkgrenze nicht erreicht</b>			
unterhalb 90 cm	4+, 5+, 6+	1414	29
unterhalb 180 cm	7	976	20
<b>Total kartiert</b>		<b>4830</b>	<b>100</b>

**Tabelle 5:**  
Lage der Kalkgrenze für die kartierten Waldflächen.





**Abbildung 12:**  
 Lage der Kalkgrenze im Gebiet  
 Wehntaler Egg

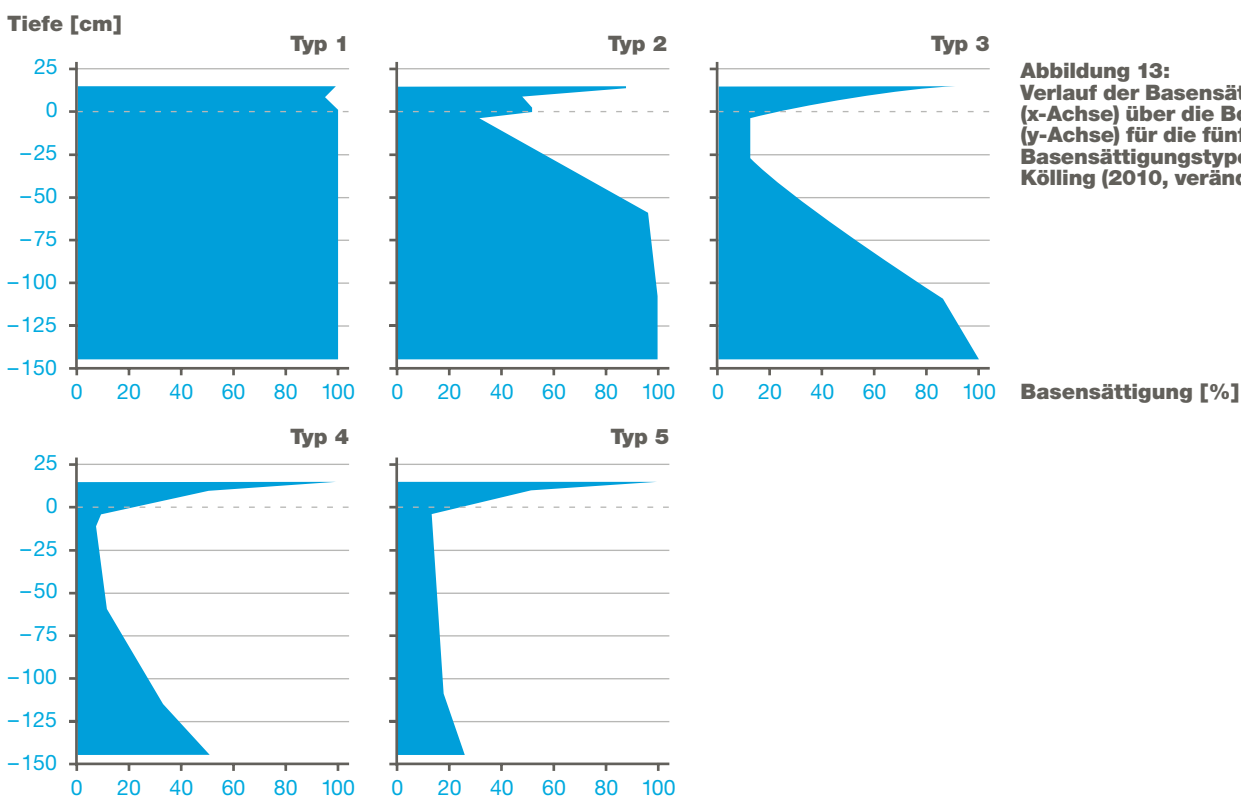
### 3.5. Basensättigung

Die Basensättigung beschreibt den Anteil der Nährstoffkationen Kalzium, Magnesium, Kalium und Natrium an der gesamten Austauschkapazität. Im Laufe der Bodenentwicklung nimmt die Basensättigung typischerweise zunächst in den oberen Schichten des Bodens ab, bevor sich die Versauerung auch auf die tieferen Schichten auswirkt und schliesslich über die gesamte Bodentiefe nur noch eine geringe Basensättigung vorherrscht. Die Basensättigungstypen nach Kölling (2010) repräsentieren verschiedene Tiefengradienten der Basensättigung, welche verschiedene Stadien zunehmender Versauerung von Typ 1 (nicht versauert) bis Typ 5 (sehr stark versauert) widerspiegeln (Tabelle 6 und Abbildung 13). Durch die profilumfassende Betrachtung erlauben die Basensättigungstypen eine detailliertere Beurteilung des Versauerungszustands im Vergleich zu den beiden vorangehenden Indikatoren, sind jedoch im Gegenzug auch aufwendiger zu erheben. Im Rahmen der Waldbodenkartierung wurde der Basensättigungstyp der kartierten Flächen aufgrund der Messwerte für Oberboden, Unterboden 1 und 2 abgeschätzt (vgl. Methodenbeschreibung in Anhang 9.3).

Für die kartierten Gebiete dominieren erwartungsgemäss die Basensättigungstypen 3 bis 5, welche für versauerte Böden typisch sind (Tabelle 6). Zwei Drittel der kartierten Fläche entfallen auf diese drei Basensättigungstypen. Darin inbegriffen sind auch jene 15 % der Fläche, wo eine exakte Zuordnung aufgrund der erhobenen Daten nicht möglich war, zumindest aber eine Eingrenzung auf zwei bzw. drei Basensättigungstypen (Kategorien «4/5» und «3/4/5») Böden des Typs 1, welche bis zur Oberfläche eine hohe Basensättigung aufweisen, findet man auf etwas mehr als 20 % der Fläche. Im Gebiet der Wehntaler Egg (Abbildung 14) beträgt der Anteil des Basensättigungstyps 1 hingegen nur 8 %, diese Flächen findet man im südlichsten Teil. Ansonsten dominieren Böden mit geringer Basensättigung, 87 % der Fläche entfallen auf die Typen 3, 4 und 5. Hiermit bestätigt sich das räumliche Muster, das bereits die beiden Indikatoren Azidität und Kalkgrenze aufgezeigt haben. Bei genauerer Betrachtung des südöstlichen Teils zeigt die Karte der Basensättigungstypen allerdings eine detailliertere räumliche Gliederung und feinere Abstufungen im Vergleich zur Azidität. Die Karten der Basensättigung und der Kalkgrenze zeigen einen sehr ähnlichen Detaillierungsgrad, teilweise jedoch abweichende kleinräumliche Muster.

Basensättigungstyp	Fläche (ha)	Anteil (%)
1 Über die gesamte Tiefe gleichmässig hohe Basensättigung >80 %, in der Regel >95 %	1007	21 %
2 Leichte Versauerung im Oberboden; die Basensättigung beträgt minimal ca. 30 % und liegt meist über 50 %; in den tieferen Lagen des Unterbodens liegt die Basensättigung über 95 %.	503	10 %
3 In den oberen Lagen des Unterbodens liegt die Basensättigung unter 30 % und steigt auch in seinen tieferen Lagen nicht über 80 %.	1614	33 %
4 Tiefreichende Bodenversauerung bei geringer Basensättigung; erst unterhalb einem Meter Tiefe steigt die Basensättigung über 20 %.	385	8 %
5 Wie Typ 4, die Basensättigung steigt jedoch auch in den tieferen Lagen des Unterbodens nicht über 20 %.	442	9 %
4/5 Typ 4 oder 5, aufgrund der Daten nicht eindeutig zuordenbar	194	4 %
3/4/5 Typ 3, 4 oder 5. Genauere Beurteilung nicht möglich, da keine Laboranalysen vorhanden	550	11 %
? Aufgrund fehlender Daten oder atypischer Verläufe nicht zuordenbar	137	3 %
<b>Total kartiert</b>	<b>4830</b>	<b>100</b>

**Tabelle 6: Beurteilung der Bodenversauerung aufgrund der Basensättigung und deren Verlauf über die Bodentiefe für die kartierten Waldflächen. Flächenanteile pro Basensättigungstyp nach Kölling (2010).**



**Abbildung 13: Verlauf der Basensättigung (x-Achse) über die Bodentiefe (y-Achse) für die fünf Basensättigungstypen gemäss Kölling (2010, verändert).**



Basensättigung

- Typ 1
- Typ 2
- Typ 3
- Typ 4
- Typ 5
- Profil Buechen
- Profil Tännlihu

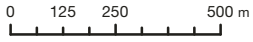
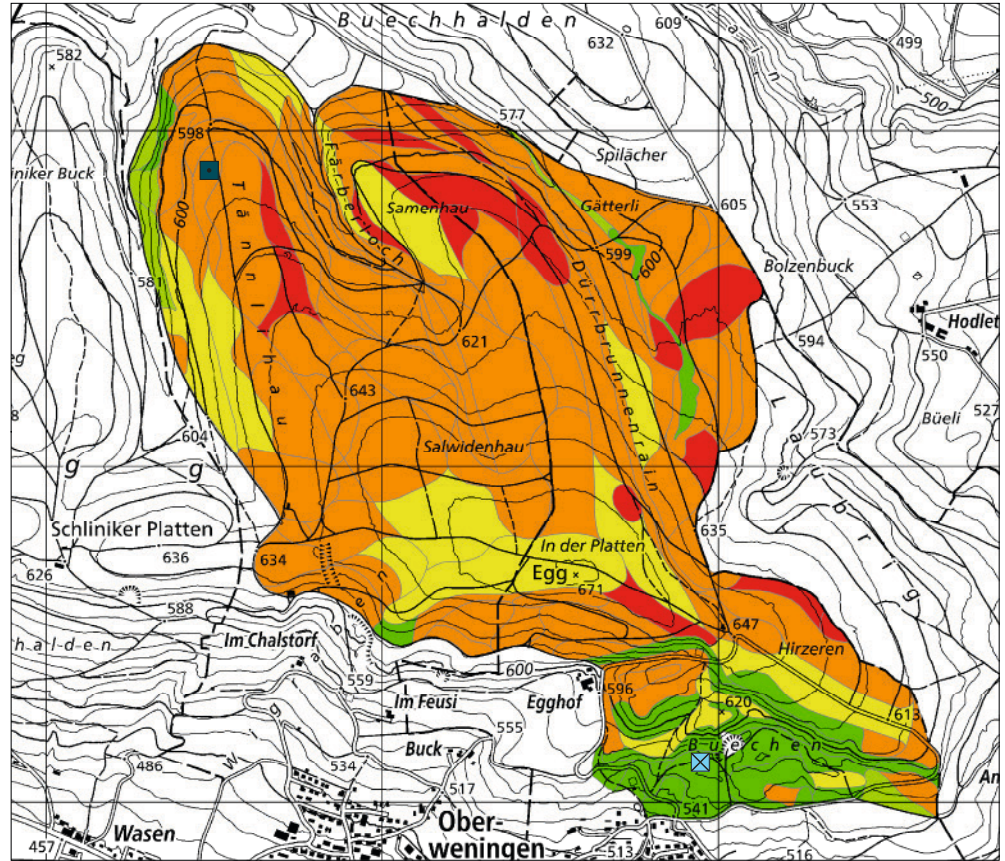


Abbildung 14:  
Basensättigung der Böden im  
Gebiet Wehntaler Egg



### 3.6. Fazit: Versauerungszustand der kartierten Flächen

Die drei betrachteten Versauerungsindikatoren (Kapitel 3.3 bis 3.5) zeichnen alle ein sehr ähnliches Bild: für rund 75 bis 80 % der kartierten Waldfläche findet man stark bis sehr stark versauerte Böden. Der hohe Flächenanteil lässt sich allerdings nicht 1:1 auf die gesamte Zürcher Waldfläche hochskalieren, denn für die Waldbodenkartierung wurden gezielt jene Waldgebiete ausgewählt, wo stark versauerte Böden zu erwarten waren. Die Relevanz der Bodenversauerung wurde in früheren Untersuchungen bereits für andere Regionen der Schweiz gezeigt, beispielsweise für den Kanton Bern (Zimmermann et al. 2010) und die Zentralschweiz (Zimmermann und Luster 2013). Für diese Gebiete wurden – wie nun auch im Kanton Zürich – stark bis sehr stark versauerte Böden dokumentiert, deren Anteil betrug gut 60 % für Bern bzw. rund 50 % für die Zentralschweiz.<sup>3</sup> Die tieferen Anteile kommen hauptsächlich durch das grössere Spektrum des geologischen Ausgangsmaterials zustande und dadurch, dass für diese Projekte nicht gezielt nach potentiell versauerten Böden gesucht wurde.

Für stark bis sehr stark versauerten Waldböden sind tiefe pH-Werte und eine geringe Basensättigung bis in tiefe Bodenschichten charakteristisch. Die Kalkgrenze liegt meist unterhalb eines Meters, sehr oft noch deutlich tiefer. Insbesondere in den Gebieten Wehntaler Egg und Irchel liegt die Kalkgrenze sehr tief und für grosse Flächen unterhalb 180 cm Tiefe. Aufgrund der pH-Werte und deren Verlauf über die Tiefe besteht für diese Böden kein grosses Risiko für eine weitere pH-Abnahme. Die Feinerde befindet sich bereits im Aluminium-Pufferbereich, wo die Säure-Pufferung sehr effizient ist. Weitere Säureeinträge wirken sich dennoch negativ aus, es besteht das Risiko einer weiteren Abnahme der Basensättigung sowie zunehmender Aluminium-Toxizität. Diese Flächen sind allerdings bereits heute ungeeignete Standorte für säureempfindliche Pflanzen.

Hauptursache für die weit fortgeschrittene Versauerung der kartierten Flächen sind die geologischen Bedingungen und der lange Zeitraum der Bodenentwicklung. Viele der betroffenen Böden wurden aufgrund ihrer topografischen Lage während der letzten Kaltphase (Würmeiszeit bzw. Birrfeldeiszeit nach der neueren Benennung) weder mit Moräne noch mit Schotter überdeckt. Entsprechend verlief die Bodenentwicklung über einen deutlich längeren Zeitraum (mindestens 130 000 Jahre, oft noch deutlich länger, vgl. Preusser et al. 2011) im Vergleich zu Böden, die aus Material der letzten Vergletscherung entstanden sind (Bodenbildung über maximal 17 000 bis 20 000 Jahre). Ebenfalls versauerungsbegünstigend wirkt sich gut durchlässiges Ausgangsgestein aus, z. B. Schotter. Die Versauerungsprozesse wurden in jüngerer Vergangenheit durch anthropogene Säureeinträge aus Stickstoff- und Schwefelemissionen verstärkt. Die natürliche Versauerung und die zusätzlich menschengemachte Beschleunigung dieses Prozesses lassen sich in einer Kartierung allerdings nicht unterscheiden, da nur das Endergebnis erkennbar ist. Dennoch ist die Waldbodenkarte ein wichtiges Hilfsmittel, um besonders vulnerable Zonen und ggf. notwendige Massnahmen abzuleiten. Die Reduktion der Einträge von Ammoniak und anderen Stickstoffverbindungen ist und bleibt ein wichtiges umweltpolitisches Ziel, insbesondere in der Umgebung säureempfindlicher Waldböden.

Wie oben in Kapitel 3.1 erwähnt, liegen rund 60 Messstandorte der Kantonalen Bodenüberwachung auf stark sauren Waldböden. Ein Teil der nun kartierten Waldböden ist deutlich stärker versauert als jene des KaBo-Messnetzes. Die Fachstelle Bodenschutz prüft daher, einige besonders stark versauerte Standorte neu in das langfristige Monitoring im Rahmen der KaBo aufzunehmen, um die zeitliche Entwicklung der Versauerung besser erfassen zu können.

**Die Reduktion der Einträge von Ammoniak und anderen Stickstoffverbindungen ist und bleibt ein wichtiges umweltpolitisches Ziel.**

<sup>3</sup> Die Anteile (%) beziehen sich auf die Anzahl der untersuchten Böden, nicht auf Flächenanteile. Die genannten Projekte waren keine Kartierungen, sondern Untersuchungen an Profilen, ein direkter Flächenbezug ist daher nicht möglich.







# 4. Weitere Produkte

Die Bodenversauerung war Auslöser und thematischer Schwerpunkt der Waldbodenkartierung, im Rahmen des Projektes wurden jedoch weitere Fragestellungen aufgegriffen. Die in der Kartierung erhobenen Attribute erlauben insbesondere auch Aussagen zu physikalischen Bodeneigenschaften. Daher können Schätzungen zur Verdichtungsempfindlichkeit sowie zum Wasserhaushalt abgeleitet werden. Solche Informationen sind für den physikalischen Bodenschutz bei der Bewirtschaftung wichtig, aber auch für die Baumartenwahl im Kontext des Klimawandels.

## 4.1. Bodenverdichtung – Empfindlichkeit der Böden ist variabel

Der Boden ähnelt vielmehr einem Schwamm als einem massiven Block; er enthält viele kleinere und grössere Hohlräume, so genannte Bodenporen. Je nach Bodenbeschaffenheit sind der Anteil, die Form und die Vernetzung dieser Poren sehr unterschiedlich mit weitreichenden Auswirkungen auf den Wasser- und Lufthaushalt des Bodens. Übermässige physikalische Belastungen können die Bodenstruktur nachhaltig beeinträchtigen, der Boden wird verdichtet und die Wasser- und Luftleitfähigkeit verringert. Als Folge davon werden verschiedene Bodenfunktionen schlechter erfüllt. Wasser versickert weniger schnell und fliesst bei Niederschlägen häufiger oberflächlich ab. Die schlechtere Durchlüftung wirkt sich nachteilig auf Bodenlebewesen und Pflanzenwachstum aus. Zudem speichert ein verdichteter Boden in der Regel weniger Wasser.

Um Schäden zu vermeiden, muss im Rahmen der land- und forstwirtschaftlichen Bewirtschaftung, aber auch bei Bauprojekten und Freizeitveranstaltungen, auf die Belastbarkeit des Bodens Rücksicht genommen werden. Eine bodenschonende Bewirtschaftung ist ein wichtiger Aspekt für eine nachhaltige Forstwirtschaft. Entsprechende Massnahmen sind: das nicht flächige Befahren der Waldfläche durch die Ausscheidung von Rückegassen, der Einsatz von Maschinen mit vielen und breiten Rädern zur Verminderung der punktuellen Belastung, das Fahren auf Astteppichen auf den Rückegassen sowie die Priorisierung der Holzschläge anhand der aktuellen Niederschlagssituation. Die unsachgemässe Befahrung mit schweren Forstmaschinen (und entsprechend hohen Radlasten) verursacht im Bereich der Fahrspuren tiefgreifende und langfristig wirksame Veränderungen. Je nach Beschaffenheit sind Böden unterschiedlich anfällig für Verdichtung, tonreiche sowie organische Böden sind beispielsweise besonders empfindlich. Von grosser Bedeutung ist zudem der aktuelle Bodenzustand, trockene oder bis in die Tiefe gefrorene Böden sind tragfähiger als nasse. Mit wissenschaftlichen Grundlagen sowie Informationen und Ausbildung für die Forstleute wurden in den letzten Jahrzehnten deutliche Verbesserungen erreicht (vgl. Lüscher et al. 2016, 2019). Flächenhafte Informationen zur Verdichtungsempfindlichkeit können hier einen wichtigen Beitrag leisten. Die räumlichen Informationen sind insbesondere bei der Planung auf verschiedenen Ebenen hilfreich, beispielsweise: Mit welchen Maschinen und Techniken soll geerntet werden? Wann wird die Bewirtschaftung geplant? Wo und in welcher Dichte werden Rückegassen geplant?

Mithilfe eines Modells, welches bereits in anderen Kantonen angewendet wurde (AUE-BL, 1998, adaptiert von Hauert et al. 2017), wurde die potentielle Verdichtungsempfindlichkeit des Unterbodens für die kartierten Zürcher Wälder abgeschätzt und dargestellt (Abbildung 15). Mit einem Entscheidungsbaum (vgl. Anhang, Abbildung A2) wurden die Böden in fünf Empfindlichkeitsstufen von 1 (wenig empfindlich) bis 5 (extrem empfindlich) eingestuft.

### In die Beurteilung flossen folgende Bodeneigenschaften ein:

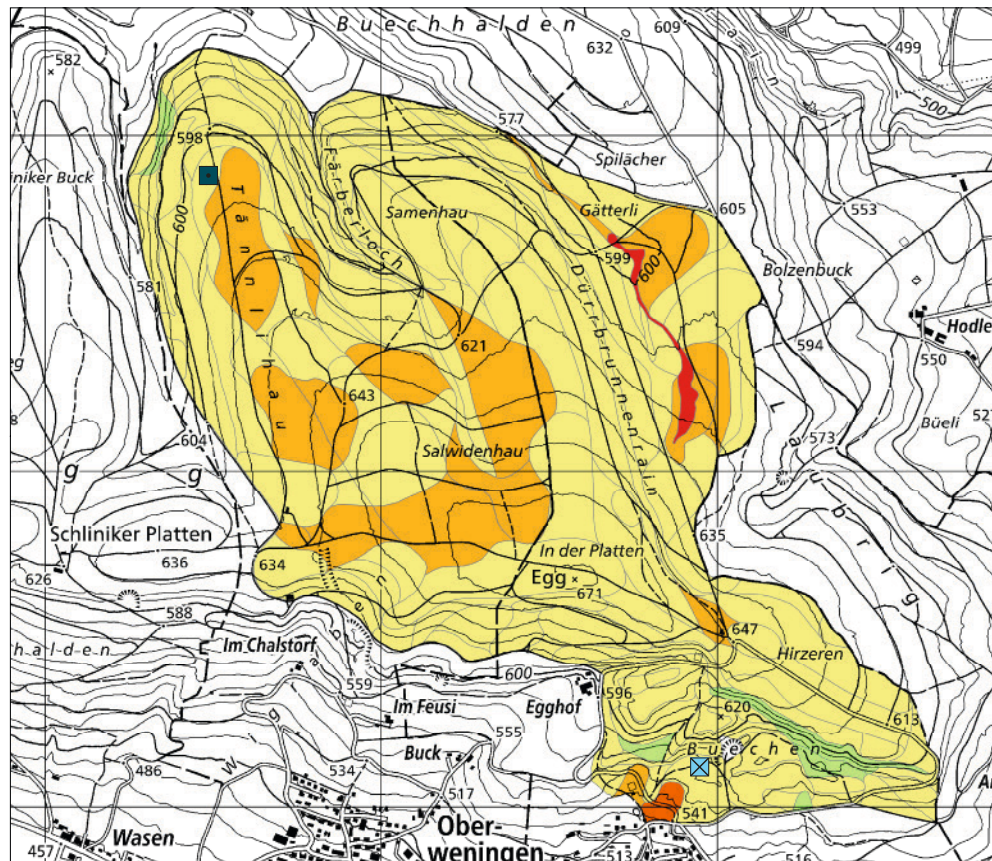
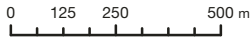
- Wasserhaushaltsgruppe: Böden mit stärkerem Einfluss von Grund-, Hang- oder Stauwasser sind verdichtungsempfindlicher
- Bodentyp: Organische Böden (Moore und Halbmoore) sind sehr verdichtungsempfindlich, trockene Böden (Rendzina, Regosol und Fluvisol) sind wenig verdichtungsempfindlich oder weisen keinen Unterboden auf
- Körnung und Skelettgehalt: hohe Sand- und Skelettanteile verringern die Verdichtungsempfindlichkeit, schluff- und tonreiche Böden sind dagegen sehr empfindlich

Im Gebiet der Wehntaler Egg (Abbildung 15) dominieren Böden, welche mässig verdichtungsempfindlich sind (Stufe 2). Für diese besteht bei einer Befahrung mit der üblichen Sorgfalt keine Gefährdung. Daneben gibt es einige Flächen, welche als empfindlich (Stufe 3) gelten, hier sollte auf die aktuelle Bodenfeuchte Rücksicht genommen werden. Und schliesslich findet man einige wenige Böden, welche aufgrund ihrer häufigen und starken Vernässung als extrem verdichtungsempfindlich gelten (Stufe 5), diese sind nur sehr eingeschränkt mechanisch belastbar.

**Eine bodenschonende Bewirtschaftung ist ein wichtiger Aspekt für eine nachhaltige Forstwirtschaft.**



- Verdichtungsempfindlichkeit
- wenig empfindlicher Boden
  - mässig empfindlicher Boden
  - empfindlicher Boden
  - stark empfindlicher Boden
  - extrem empfindlicher Boden
- ⊠ Profil Buechen  
■ Profil Tännlihu



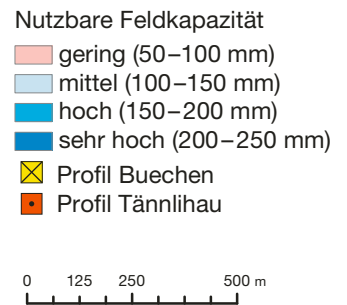
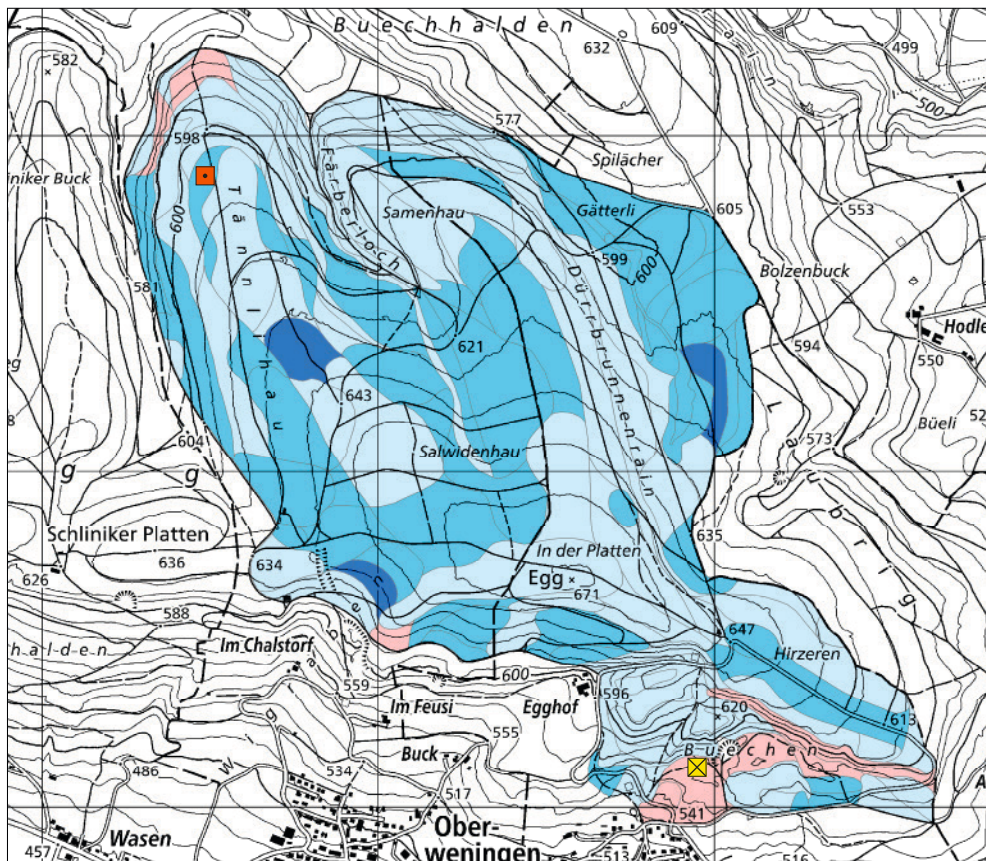
**Abbildung 15:**  
 Schätzung der potentiellen  
 Verdichtungsempfindlichkeit  
 des Unterbodens im Gebiet  
 des Wehntaler Egg.

## 4.2. Nutzbare Feldkapazität

Die nutzbare Feldkapazität (nFK) beschreibt, wie viel pflanzenverfügbares Wasser ein bestimmter Boden speichern kann. Die nFK macht also eine Aussage zum Bodenwasserhaushalt und erlaubt eine Abschätzung, wie schnell die Wasserverfügbarkeit für Pflanzen bei Trockenphasen zum Problem werden kann. Angegeben wird die nFK in mm, dabei gilt: je grösser die nFK, desto mehr pflanzenverfügbares Wasser kann der Boden speichern. Die nFK hängt einerseits von der Mächtigkeit des Bodens und den vorhandenen Bodenschichten, andererseits von den physikalischen und chemischen Eigenschaften dieser Schichten ab (insbesondere deren Korngrössenverteilung, Humusgehalt und Lagerungsdichte). Bereits in den letzten Jahren gab es eine Häufung von heissen Sommern mit längeren Trockenphasen. Aufgrund des Klimawandels gehen Fachleute für die kommenden Jahrzehnte von häufigerer und extremerer Sommertrockenheit aus. Je geringer die nFK des Waldbodens, desto trockenresistenter sollten die vorhandenen Baumgesellschaften sein, um langfristig zu bestehen. Bei der forstwirtschaftlichen Planung, insbesondere bei der Bestandesverjüngung, sollten diese Informationen zum Bodenwasserhaushalt daher berücksichtigt werden durch die Wahl geeigneter Baumarten und Herkünfte (Provenienzen).

Für die einzelnen Polygone der kartierten Waldböden lässt sich die nFK aufgrund der erhobenen Attribute grob abschätzen. Basierend auf Erfahrungswerten (Tabellen 3 und 5 in Wessolek et al. 2009) wurde die nFK der einzelnen Schichten (Oberboden inkl. Auflagehorizonte sowie Unterboden 1 und 2) anhand der Körnung und dem Humusgehalt geschätzt. Mithilfe der jeweiligen Schichtmächtigkeiten und des Skelettgehaltes wurde die nFK über die gesamte erfasste Bodentiefe aufaddiert. Die Details zur Methodik sind in Anhang A5 dokumentiert.

Abbildung 16 zeigt exemplarisch die nFK im Gebiet der Wehntaler Egg. Dabei ist erkennbar, dass auf dem Plateau (obere zwei Drittel der Abbildung) Böden mit mittlerer bis grosser nFK vorherrschen, punktuell erreichen die Böden gar die höchste Klasse. Im südlichen Teil des Gebietes kommen hingegen teilweise flachgründigere Böden mit deutlich kleinerer nFK vor.



**Abbildung 16:** Nutzbare Feldkapazität (nFK) im Gebiet der Wehntaler Egg.

### 4.3. Bodengestützte Baumartenwahl

Die Baumartenwahl in Zeiten des Klimawandels stellt hohe Anforderungen an den Forstdienst und die Waldeigentümerschaft. Weiter zunehmende Temperaturen, Veränderungen der Niederschlagsmengen und deren Verteilung sowie häufigere Extremereignisse machen es schwierig, die Auswirkungen auf die Wachstumsbedingungen für Bäume vollständig abzuschätzen. Waldbauliche Entscheidungen sollten daher mit Weitsicht in die sich wandelnde und noch ungewisse Zukunft gefällt werden. Herausfordernd ist dies im speziellen für Fragen der Verjüngungsplanung und Bestandesbegründung.

Im Rahmen eines Pilotprojekts wurde ein praxistauglicher Ansatz zur standortgerechten Baumartenwahl basierend auf Bodenkarten erarbeitet (Borer et al. 2022). Diese so genannte bodengestützte Baumartenwahl wurde für 900 ha der kartierten Waldfläche in den Gebieten Wehntaler Egg und Kyburg angewandt. Dabei wurden die Standort- und Bodeneigenschaften («Angebot») den Bedürfnissen der Baumarten («Nachfrage») gegenübergestellt. Das Resultat ist eine Empfehlung, welche Baumarten sich für welche Flächen eignen. Erstellt wurde dies sowohl für das gegenwärtige Klima sowie für die Bedingungen, welche gemäss verschiedenen Szenarien Ende des 21. Jahrhunderts erwartet werden. Abbildung 17 zeigt beispielhaft, auf welchen Flächen dereinst Weisstannen gedeihen können, sofern das Klimaszenario RCP 4.5 zutrifft.

Neben Standorteigenschaften (Höhe über Meer, Exposition und Neigung) flossen verschiedene Attribute, welche bei der Bodenkartierung aufgenommen wurden, in die Beurteilung ein. Berücksichtigt wurden die Wasserhaushaltsgruppen und -klassen als qualitative und halbquantitative Aussagen zum Bodenwasserhaushalt, die pflanzennutzbare Gründigkeit, der Bodentyp sowie prägende Bodeneigenschaften (Körnung der Feinerde, Skelettgehalt, Kalkgehalt und Säuregrad). Die Auswirkungen des Klimawandels wurden mit Hilfe spezifischer Wasserhaushalts- und Trockenheits-Indikatoren berücksichtigt. Die Standortansprüche der einzelnen Baumarten wurden basierend auf einer umfangreichen Literatur-Datenbank beurteilt. Berücksichtigt wurden 33 Baumarten, 24 einheimische sowie 9 nicht-einheimische.



**Abbildung 17:**  
Für Weisstannen  
geeignete Standorte im  
Gebiet Wehntaler Egg  
um das Jahr 2085 unter  
dem Klimaszenario RCP  
4.5 (Abbildung aus  
Borer et al. 2022).

## Bodengestützte Baumartenwahl

Los 4 - Egg

### Weisstanne (Ta)

Physiologische Amplitude PA

Klimaszenario RCP 4.5 im Jahre 2085, mit WVI [PA 2.3\*]



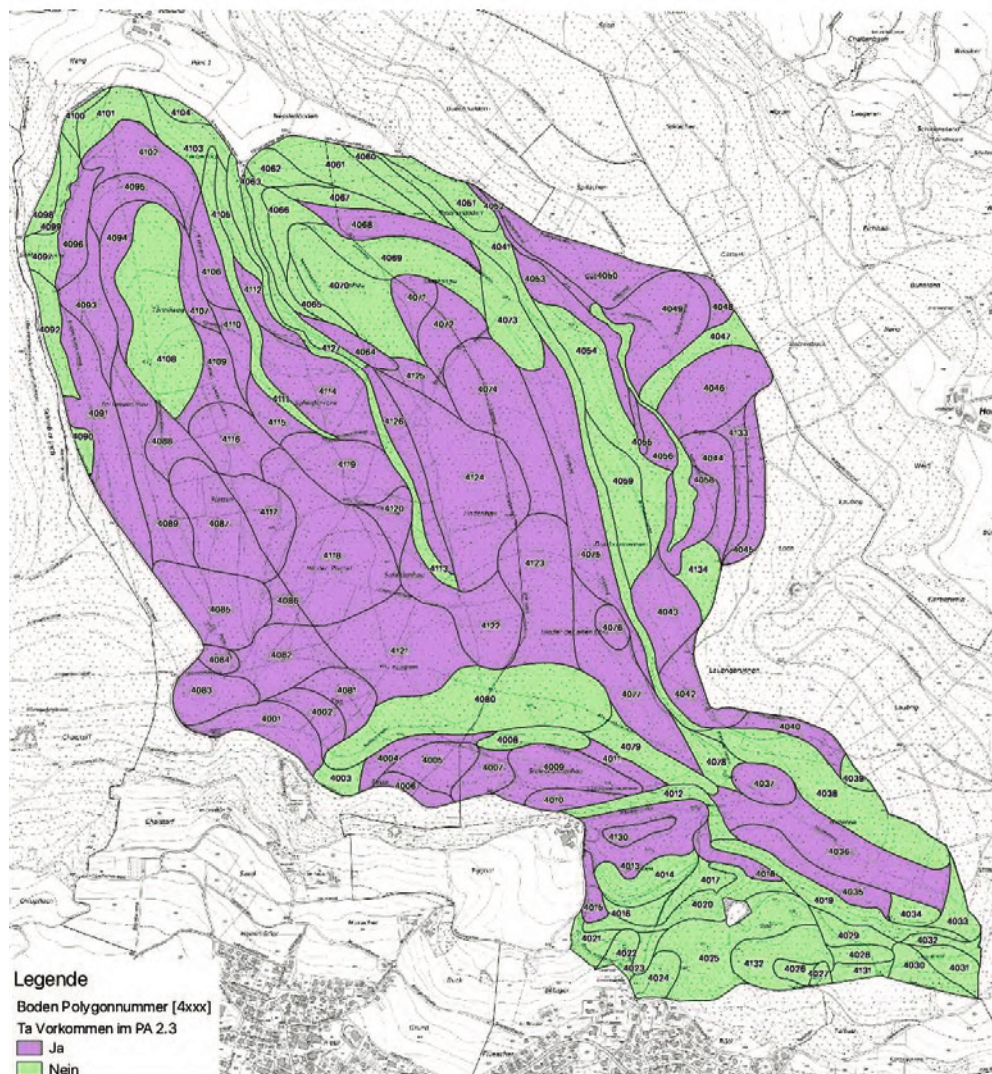
Kanton Zürich  
Baudirektion  
Amt für Landschaft  
und Natur



Format: A3  
Massstab: 1:9'000  
Zentrum: 2'673'453, 1'263'089  
Bearbeitung: Ambio GmbH  
Datum: 05/2022

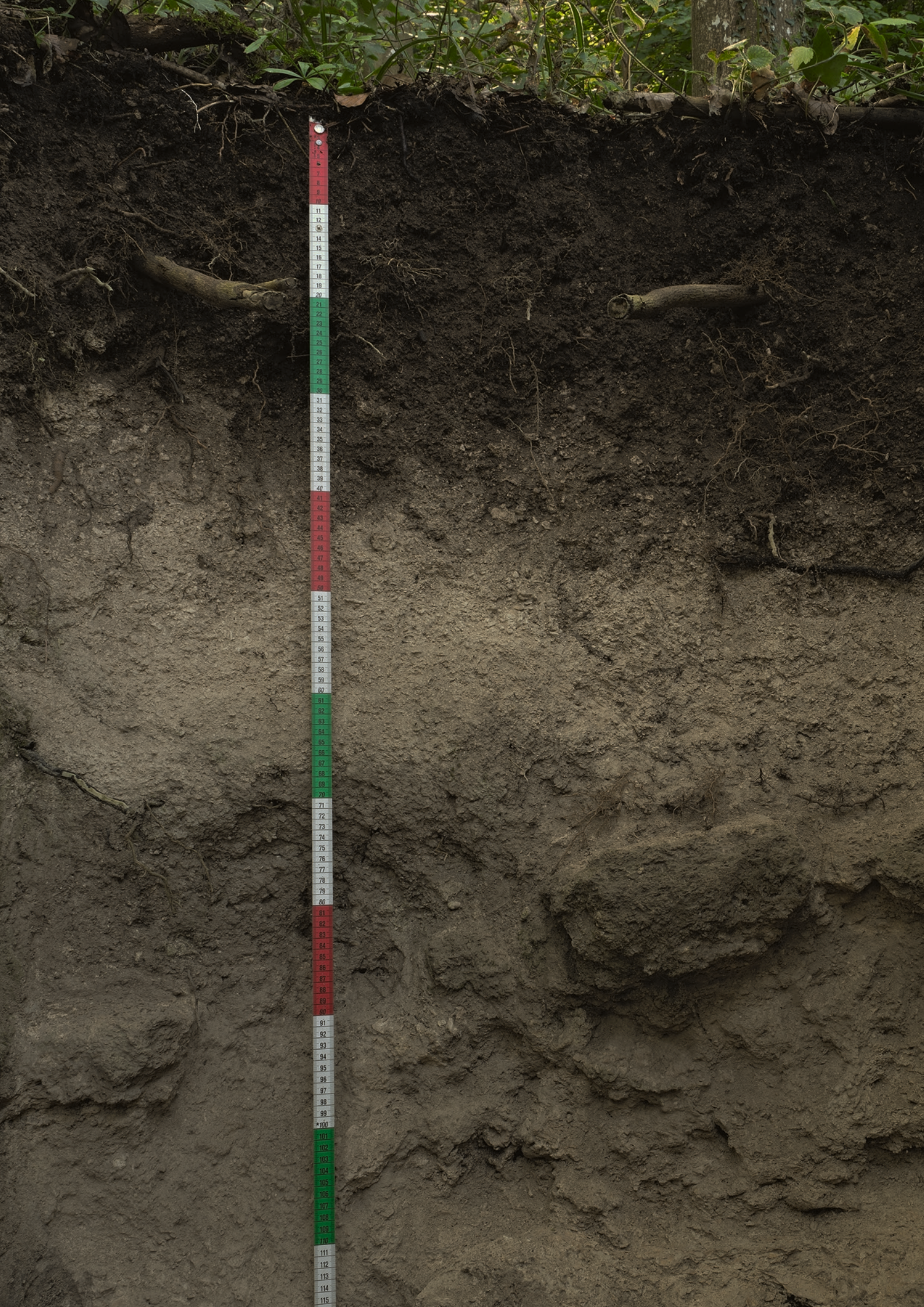
\* Erläuterung: im Anhang 11.1 des Schlussberichts

0 250 500 750 1000 m



Die erarbeitete Methodik in Kombination mit den Informationen aus der Waldbodenkartierung schafft eine kausal nachvollziehbare Grundlage für die Baumartenwahl. Der Einbezug originärer Bodendaten (ergo von Daten, die an Böden erhoben wurden und nicht von anderen Grössen abgeleitet oder modelliert wurden) ist ein wichtiger Fortschritt im Vergleich zu Baumartenempfehlungen basierend auf vegetationskundlichen Kartierungen, insbesondere bezüglich der wichtigen quantitativen Grössen Gründigkeit und Wasservorrat. Eine weitere Stärke ist die Flexibilität des Modells, wodurch es jederzeit den Prognosen des Klimawandels angepasst werden kann. Die Methodik soll als praxistaugliches Werkzeug für die waldbauliche Planung weiterentwickelt und eingesetzt werden können.





0  
1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60  
61  
62  
63  
64  
65  
66  
67  
68  
69  
70  
71  
72  
73  
74  
75  
76  
77  
78  
79  
80  
81  
82  
83  
84  
85  
86  
87  
88  
89  
90  
91  
92  
93  
94  
95  
96  
97  
98  
99  
\*100  
101  
102  
103  
104  
105  
106  
107  
108  
109  
110  
111  
112  
113  
114  
115



# 5. Fazit & Ausblick

Die Resultate der Waldbodenkartierung stellen eine vielseitig verwendbare Grundlage für Auswertungen zur forstlichen Bewirtschaftung und für umweltrelevante Fragestellungen dar. Die intensive Auseinandersetzung mit den Böden des Kantons Zürich, ihrer Entstehung und ihren Eigenschaften trägt zum besseren Verständnis der Waldböden bei, hat jedoch gleichzeitig weitere Fragen aufgeworfen. Was die Hauptfragestellung des Projekts betrifft, so bestätigte die Kartierung, dass ein Teil der Zürcher Wälder von starker bis sehr starker Versauerung betroffen ist. Für diese Böden stellen die anthropogenen Stickstoff-Immissionen und die damit verbundene Beschleunigung der Versauerung eine besondere Gefahr dar. Die Baumartenvielfalt – bereits durch die prekärer werdenden Wasserverhältnisse infolge des Klimawandels reduziert – wird dadurch weiter eingeschränkt. Die Reduktion der anthropogenen Einträge von Ammoniak und anderen Stickstoff-Verbindungen muss daher weiterhin ein prioritäres umweltpolitisches Ziel bleiben, um die negativen Auswirkungen auf die Wälder zu minimieren. In diesem abschliessenden Kapitel werfen wir einerseits einen Blick zurück aus der Perspektive des externen Qualitätsmanagements. Andererseits richten wir den Fokus auf die Zukunft mit Gedanken zu weiterführenden Auswertungen für die kartierten Gebiete sowie Datenerhebungen für weitere, noch nicht kartierte Flächen.

## 5.1. Eindrücke des externen Qualitätsmanagements

Das externe Qualitätsmanagement war ein wichtiges Element im Prozess der Bodenkartierung, um von den Kartierenden ein möglichst homogenes und konsistentes Produkt zu erhalten. Nachfolgend werden die wichtigsten Eindrücke zur Kartierung festgehalten.

Die Kartierung der Zürcher Waldböden setzt einen neuen und sehr hohen Massstab. Nennenswert sind insbesondere die hohe Qualität der bodenkundlichen Profildaten, unter anderem aufgrund projektspezifischer Regelungen zur Datenerhebung und der intensiven Konsistenz- und Plausibilitätsprüfungen der protokollierten Bodeninformationen. Weiter ist aufgrund der georeferenzierten Bohrungen und der Laboranalysen aus den Bohrkernen eine gute Nachvollziehbarkeit der Polygondaten gewährleistet, allerdings bei einer geringeren Bohrdichte als üblich. Schliesslich ist die sehr gute, laborgestützte Datenlage dank umfangreicher Analysen hervorzuheben. Besondere Erwähnung verdient der im Projektverlauf etablierte stark verbesserte Standard für die Profildaten. Daneben gibt es untenstehend einzelne Aspekte, welche von Seiten Qualitätsmanagement kritisch beleuchtet werden.

Für die Waldbodenkartierung wurde – entgegen den Empfehlungen aus dem Methodentest (Presler und Carizzoni 2012) – auf die Erstellung eines Handbuchs und den Test der bereinigten Methode verzichtet. Aus Sicht von Martin Zürrer, als externer Experte mit dem Qualitätsmanagement betraut, war dies eine grosse Herausforderung, denn es erschwerte die Qualitätssicherung auf verschiedenen Stufen. Umso wichtiger waren daher die vielfältigen Anstrengungen zur Standardisierung und zum Abgleich zwischen den Kartierteams. Die so erarbeiteten Standards wurden in technischen Merkblättern festgehalten und können allenfalls für ein künftiges Handbuch übernommen werden. Allerdings ist für grossflächige Bodenkartierungen ein gewisser methodischer Drift im Laufe des Projektes normal. Es ergeben sich immer wieder neue (oft auch gebietsspezifische) Fragestellungen, die geregelt werden müssen und gegebenenfalls auch die Nachbearbeitung früher erhobener Daten nach sich ziehen.

Die Erstellung der Konzeptkarten für die Kartierung erwies sich aus Sicht der Qualitätssicherung als kritischer Schritt. Die verschiedenen Kartierteams gingen dabei sehr unterschiedlich vor (auch innerhalb der Bietergemeinschaft, welche einen Grossteil der Lose ausführte). Zurzeit gibt es keinen allgemein verwendeten Standard für die Erstellung einer Konzeptkarte, die Kartieranleitung FAL24 genügt den heutigen Ansprüchen nicht mehr. Hinzu kommt, dass die Verfügbarkeit von Geoinformationen in den vergangenen zwei Jahrzehnten massiv zugenommen hat. Die Erarbeitung aussagekräftigerer Konzeptkarten wäre damit möglich, der dazu erforderliche Aufwand steht jedoch in einem schlechten Verhältnis zum aktuellen Stellenwert der Konzeptkarte. Bei der Waldbodenkartierung wurde bereits früh versucht, zu einer Vereinheitlichung beizutragen und dem Kartierungskonzept mehr Gewicht zu geben als der eigentlichen Konzeptkarte (vgl. technisches Merkblatt Nr. 1 von 2015). Mit der aktuell laufenden Revision der Kartieranleitung und dem inzwischen geschaffenen Kompetenzzentrum Boden sollen dereinst bessere und einheitlichere Standards bezüglich Konzeptkarten und Kartierungskonzept verfügbar sein.

## 5.2. Weitere Kartierungen und Auswertungen

Mit den 4800 ha der Waldbodenkartierung sind rund 10 % der Zürcher Waldfläche bodenkundlich kartiert. Die Frage liegt daher auf der Hand, wann und mit welchen Prioritäten weitere Waldflächen kartiert werden sollen. Dies könnte im Rahmen der geplanten landesweiten Bodenkartierung geschehen (vgl. Box Seite 17), entsprechende Erhebungen sind allerdings frühestens ab 2029 vorgesehen. Die schweizweite Bodenkartierung ist ein Generationenprojekt mit einem sehr langen Zeithorizont. Für viele Entscheidungen werden Bodendaten bereits früher benötigt, beispielsweise für die langfristige Waldplanung im Kontext des Klimawandels. Denkbar ist daher, dass der Kanton die Kartierung einiger Gebiete bereits früher angeht. In diesem Fall sollte die Kartiermethode möglichst auf die künftige landesweite Kartierung abgestimmt sein oder als Fallstudie in deren Vorprojekt integriert werden. Eine Möglichkeit für die Weiterführung der Kartierung sind die rund 1200 ha Waldfläche, welche ursprünglich ebenfalls für die in diesem Bericht vorgestellte Kartierung der sauren Waldböden vorgesehen waren, aus Kostengründen aber weggelassen wurden. Aus Sicht der forstlichen Planung und Bewirtschaftung sind Informationen zu Wasserverfügbarkeit und Baumartenwahl ein prioritäres Bedürfnis. Dabei stehen zumeist andere Waldflächen im Vordergrund als die potentiell von Versauerung betroffenen Flächen. Hinzu kommt, dass Bodendaten vor allem bei grösseren Bestandesverjüngungen relevant und hilfreich sein können. Idealerweise sollten Bodendaten für solche Fälle kleinräumig und relativ kurzfristig erhoben werden können – gegebenenfalls auch nur ein reduziertes Set an ausgewählten, forstwirtschaftlich relevanten Daten, sozusagen eine Kartierung light.

Zusätzlich zu den ab 2013 kartierten Flächen existieren für weitere 4000 ha alte Waldbodenkarten im Massstab 1:5000 aus den 1980er-Jahren sowie vereinzelte noch ältere, wenig dokumentierte Kartierungsprojekte. Diese sind nicht direkt mit den neuen Bodenkarten kompatibel, da sich der Standard der Kartierung seither stark verändert hat. Grosse Unterschiede bestehen beispielsweise bezüglich Erhebungstiefe, Gliederung des Bodenkörpers (Drei- vs. Zwei-Schichten-Modell) und dem Umfang der erhobenen Messdaten und Attribute. Für kleine Teilgebiete der aktuellen Kartierung (Raum Otelfingen und Bachs) lagen alte Bodenkarten vor. Die Erfahrungen aus diesen Gebieten zeigen, dass die alten Karten an sich wertvolle Grundlagen und zumindest in der Konzeptphase dienlich sind. Dennoch bleibt offen, auf welche Weise und mit welchem Zeitaufwand die übrigen alten Erhebungen in die Bodenkarte integriert werden können. Eine direkte Übersetzung zu Karten, die heutigen Ansprüchen genügen, erweist sich als schwierig. Neue Feldaufnahmen und entsprechend grosser Aufwand scheinen unerlässlich zu sein.

Für die im Rahmen dieses Projekts kartierten Flächen liegt eine Fülle qualitativ hochwertiger Feld- und Labordaten vor. Das Potential dieses Datenschatzes ist noch lange nicht ausgeschöpft. Einerseits können diverse wissenschaftliche Fragestellungen weiterverfolgt werden, beispielsweise der Einfluss des Klimas, der Exposition sowie des Ausgangsmaterials auf den Versauerungsstatus der Zürcher Böden. Bodenkundlich von Interesse wäre auch eine vertiefte Auseinandersetzung mit den so genannten degradierten Parabraunerden, welche in verschiedenen kartierten Gebieten gefunden wurden. Diese Böden weisen einen extrem dichten Unterboden auf, dessen Gefüge sich deutlich vom Unterboden üblicher Parabraunerden unterscheidet. Andererseits sind auf Basis der verschiedenen Bedürfnisse der Nutzer/innen weitere Auswertungen und abgeleitete Produkte möglich. Die im Kapitel 4 vorgestellten Karten können weiter verfeinert und optimiert sowie bei Bedarf um weitere Hilfsmittel für die Forstwirtschaft ergänzt werden. Naheliegend ist zudem der Vergleich der Waldbodenkarte mit der vegetationskundlichen Karte. Diese liegt für die gesamte Zürcher Waldfläche vor und wird seit längerem für die forstliche Planung genutzt. Welchen Mehrwert Bodenkarten im Vergleich dazu liefern und wie sie möglichst gewinnbringend eingesetzt werden können, muss im Detail noch geklärt werden. Und schliesslich soll der Fokus geweitet und mögliche Anwendungen der Waldbodenkarte in weiteren Fachgebieten evaluiert werden, wie beispielsweise Fragestellungen im Kontext von Naturschutz und Ökologie.



# Literaturverzeichnis

AfU-SO (Hrsg.) 2008. Projekthandbuch – Bodenkartierung Kanton Solothurn (5. Ausgabe). Amt für Umwelt, Kanton Solothurn, Solothurn.

AUE-BL (Hrsg.) 1998. Empfindlichkeit der Baselbieter Böden gegenüber mechanischen Belastungen. Amt für Umweltschutz und Energie (AUE), Kanton Basel Landschaft, Liestal.

BGS (Hrsg.) 2010. Klassifikation der Böden der Schweiz. Dritte Auflage. Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz (BGS).

Brunner, J.; Jäggli, F.; Nievergelt, J.; Peyer, K. 1997. Kartieranleitung – Kartieren und Beurteilen von Landwirtschaftsböden. Eidg. Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau (FAL), Zürich-Reckenholz.

Blaser, P.; Walthert, L.; Zimmermann, S.; Graf Pannatier, E.; Luster, J. 2008. Classification Schemes for the Acidity, Base Saturation, and Acidification Status of Forest Soils in Switzerland. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 171, 2: 163–70. <https://doi.org/10.1002/jpln.200700008>.

Borer, F.; Knecht, M.; Steinert, T. 2022. Pilotprojekt Bodengestützte Baumartenwahl. Schlussbericht. Arbeitsgemeinschaft Ambio Angewandte Umweltwissenschaften GmbH und Borer Bodenexpertisen. Im Auftrag des Kantons Zürich, Amt für Landschaft und Natur, Abteilung Wald.

FAL und VD-ZH. (Hrsg.) 1998. Grundlagenbericht zur Bodenkartierung des Kantons Zürich – Landwirtschaftsareal. Eidg. Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau (FAL), Volkswirtschaftsdirektion des Kantons Zürich (VD-ZH), Zürich.

Gasser, U.; Stutz, H.-P.; Bouquet, F. 2009. Bodenversauerung und Bodenfruchtbarkeit im Zürcher Wald. *Zürcher Wald* 1/2009: 4–9.

Huert, C.; von Rohr, G.; Margreth, S.; Schmidhauser, A.; Gasche, T. 2017. Böden im Kanton Solothurn. *Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft des Kantons Solothurn* 43: 49–175.

Kölling, C. 2010. Macht sauer wirklich lustig? Bodenzustandserhebung Bayern. *LWF aktuell*, Nr. 78: 21–24.

Lüscher, P.; Frutig, F.; Sciacca, S.; Spjevak, S.; Thees, O. 2019. Physikalischer Bodenschutz im Wald. *Merkblatt für die Praxis*. Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf.

Lüscher, P.; Frutig, F.; Thees, O. 2016. Physikalischer Bodenschutz im Wald. Waldbewirtschaftung im Spannungsfeld zwischen Wirtschaftlichkeit und Erhaltung der physikalischen Bodeneigenschaften. *Umwelt-Wissen* Nr. 1607. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern.

Nussbaum, M.; Papritz, A. 2015. Transferfunktionen Nährstoffmesswerte – Labormethoden FAC und AAE. ETH Zürich (interner Bericht).

Nussbaum, M.; Burgos, S., 2017. Transferfunktionen potentielle Kationenaustauschkapazität, Labormethoden FAC versus AAE. Berner Fachhochschule, Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL, Zollikofen (interner Bericht).

Presler, J. 2010. Erhebung von stark sauren Waldböden im Kanton Zürich. Fachstelle Bodenschutz des Kantons Zürich und BABU GmbH, Zürich.

Presler, J.; Carizzoni, M. 2012. Erhebung von stark sauren Waldböden im Kanton Zürich – Methodentest und Erhebung von Validierungsdaten. Fachstelle Bodenschutz des Kantons Zürich und BABU GmbH, Zürich.

Preusser, F.; Graf, H.R.; Keller, O.; Krayss, E.; Schlüchter, C. 2019. Quaternary glaciation history of northern Switzerland. *E&G Quaternary Science Journal*, 60 (2–3): 292–305. <https://doi.org/10.3285/eg.60.2-3.06>

Rehbein, K.; Sprecher, C.; Keller, A. 2019. Übersicht Stand Bodenkartierung in der Schweiz – Ergänzung des Bodenkartierungskataloges Schweiz um Bodeninformationen aus Meliorationsprojekten. Agroscope, Servicestelle NABODAT, Zürich. <https://nabodat.ch/index.php/de/service/bodenkartierungskatalog>

Rigling, A.; Schaffer, H.P. (Hrsg.) 2015. Waldbericht 2015. Zustand und Nutzung des Schweizer Waldes. Bundesamt für Umwelt, Bern, Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf.

Ruef, A.; Peyer, K. 1996. Handbuch Waldbodenkartierung. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern.

Walthert, L.; Zimmermann, S.; Blaser, P.; Luster, J.; Lüscher, P. Waldböden der Schweiz. Bd.1: Grundlagen und Region Jura. hep-Verlag, Bern.

Wessolek, G.; Kaupenjohann, M.; Renger, M. (Hrsg.) 2009. Bodenökologie und Bodenge-nese – Bodenphysikalische Kennwerte und Berechnungsverfahren für die Praxis. Rote Reihe, Heft 40. Techn. Universität Berlin, Selbstverlag, Berlin.

Zimmermann, S.; Chervet, A.; Maurer, C.; Sturny, W.G. 2010. Säurestatus und Versauerungs-zustand von Waldböden im Kanton Bern. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 161, 12: 524–29. <https://doi.org/10.3188/szf.2010.0524>.

Zimmermann, S.; Luster, J. 2013. Sind Waldbodenfunktionen nachhaltig gewährleistet? Bei-spiel Säurepufferung. Forum für Wissen 2013: 47–53, Eidg. Forschungsanstalt WSL, Bir-mensdorf.





11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60  
61  
62  
63  
64  
65  
66  
67  
68  
69  
70  
71  
72  
73  
74  
75  
76  
77  
78  
79  
80  
81  
82  
83  
84  
85  
86  
87  
88  
89  
90  
91  
92  
93  
94  
95  
96  
97  
98  
99  
\*100  
101  
102  
103  
104  
105  
106  
107  
108  
109  
110  
111  
112  
113  
114  
115  
116  
117  
118  
119  
120  
121  
122  
123  
124  
125  
126  
127  
128  
129  
130



# Anhang

## A1. Attributtabelle Waldbodenkartierung

Für jede kartierte Bodeneinheit wurde ein vollständiger und standardisierter Datensatz an Bodenattributen erhoben, der die jeweilige Fläche repräsentiert (attributbasierte Kartierung, vgl. Kap. 2.1). Tabelle A1 gibt eine Übersicht zu den erhobenen Attributen. Die Erfassung einzelner Attribute war fakultativ, die ist jeweils vermerkt.

Nr.	Attribut	Beschreibung
1	PolygonNr	Nummer Kartiereinheit (PolygonNr)
2	KomplexNr	Hierarchische Stellung in der Kartiereinheit
3	StandortID	StandortID (gem. Bodendatenbank FaBo)
4	ProfilID	Bohrungs- bzw. Profil-Nr (gem. Bodendatenbank FaBo)
4.1	Abgel_Datensatz	abgeleiteter Datensatz (1=j; fakultativ: 0=n)
5	KoordX	X-Koordinate der Referenz; LV95
6	KoordY	Y-Koordinate der Referenz; LV95
7	Höhe_ü_M	Höhe über Meer
8	Aufnahmedatum	Aufnahmedatum der Bohrung
9	Geländeform	Form und Neigung des Geländes
10	Ausgangsgestein	Ausgangsgestein für die Bodenbildung
11	Ausgangsgestein_Zusatz	Ausgangsgestein Zusatz (Eiszeit)
12	Humusform	Humusform
13	Kalkgrenze_cm	Beginn des eindeutig kalkhaltigen Bodens, Kalkgehaltklasse 3
14	UT_E	Untertyp: Säuregrad (Kategorie gemäss pH-Wert des UB1)
15	UT_A	Untertyp: Azidität: (Kategorie gemäss pH-Wert des UB1, Einteilung entsprechend den Säureklassen gemäss WSL)
16	UT_KG	Untertyp: Kalkgrenze, beschreibt Lage der Kalkgrenze im Profil (nur für das vorliegende Projekt definiert)
17	UT_I	Untertyp: Staunässe
18	UT_G	Untertyp: Fremdnässe wechselnd
19	UT_R	Untertyp: Fremdnässe dauernd
20	UT_weitere	Weitere Untertypen
21	PNG_cm	Pflanzennutzbare Gründigkeit
22	PFP	Produktionsfähigkeitspunkte
23	WHG	Wasserhaushaltsgruppe
24	Bodentyp	Bodentyp
25	F_H_Mächtigkeit_cm	Mächtigkeit des Of plus Oh-Auflagehorizontes (fakultative Angabe)
25.1	F_Mächtigkeit_cm	Mächtigkeit des Of-Auflagehorizontes (falls vorhanden)
25.2	H_Mächtigkeit_cm	Mächtigkeit des Oh-Auflagehorizontes (falls vorhanden)
26	Ahh_Mächtigkeit_cm	Mächtigkeit des Ahh-Horizontes (falls vorhanden)
27	Ah_Mächtigkeit_cm	Mächtigkeit der Ahh- und Ah-Horizonte (Oberboden)
28	Ah_Gefügeform	Ah-Horizonte: dominierende Form des Bodengefüges
29	Ah_Gefügegrösse_Kl	Ah-Horizonte: dominierende Grössenklasse des Bodengefüges
30	Ah_Skelett_Kl	Ah-Horizonte: dominierende Klasse des Skelettgehalts
31	Ahh_OS_Gehalt	Ah-Horizonte: dominierend. Gehalt an organischer Substanz (falls vorhanden)
32	Ah_OS_Gehalt	Ah-Horizonte: dominierend. Gehalt an organischer Substanz
33	Ah_Ton	Ah-Horizonte: dominierender Tongehalt
34	Ah_Schluff	Schluffgehalt im Ah-Horizont
35	Ah_Körnung_Kl	Klasse der Körnung der Feinerde im Ah-Horizont
36	Ah_Kalkgehalt_Kl	Klasse des Gehaltes an Kalziumkarbonat (Kalk) im Ah-Horizont
37	Ah_pH_Hellige	pH-Wert des Bodens im Ah-Horizont gemessen mit Hellige-Indikator
38	UB1_Mächtigkeit_cm	Oberer Teil Unterboden (UB1): Mächtigkeit (gutachterisch)
39	UB1_Horizonttyp	dominierender Horizonttyp
40	UB1_Gefügeform	dominierende Gefügeform
41	UB1_Gefügegrösse_Kl	oberer Unterboden: dominierende Gefügegrösse-Klasse
42	UB1_Skelett_Kl	oberer Unterboden: dominierende Skelettgehalt-Klasse
43	UB1_OS_Gehalt	oberer Unterboden: dominierender Gehalt an organischer Substanz

**Tabelle A1:**  
Attributtabelle inkl.  
Beschreibung der Attribute



Nr.	Attribut	Beschreibung
44	UB1_Ton	oberer Unterboden: dominierender Tongehalt
45	UB1_Schluff	oberer Unterboden: dominierender Schluffgehalt
46	UB1_Körnung_Kl	oberer Unterboden: dominierende Körnungsklasse
47	UB1_Kalkgehalt_Kl	oberer Unterboden: dominierende Kalkgehaltsklasse
48	UB1_pH_Hellige	oberer Unterboden: pH-Wert des Bodens gemessen mit Hellige-Indikator
49	UB2_Mächtigkeit_cm	Mächtigkeit des unterer Teils des Unterboden
50	UB2_Horizonttyp	unterer Unterboden: dominierender Horizonttyp
51	UB2_Gefügeform	unterer Unterboden: dominierende Gefügeform
52	UB2_Gefügegrösse_Kl	unterer Unterboden: dominierende Gefügegrößen-Klasse
53	UB2_Skelett_Kl	unterer Unterboden: dominierende Skelettgehalt-Klasse
54	UB2_OS_Gehalt	unterer Unterboden: dominierender Gehalt an Humus
55	UB2_Ton	unterer Unterboden: dominierender Tongehalt
56	UB2_Schluff	unterer Unterboden: dominierender Schluffgehalt
57	UB2_Körnung_Kl	unterer Unterboden: dominierende Körnungsklasse
58	UB2_Kalkgehalt_Kl	unterer Unterboden: dominierende Kalkgehaltsklasse
59	UB2_pH_Hellige	unterer Unterboden: pH-Wert des Bodens gemessen mit Hellige-Indikator
60	Kartierer	Kürzel des/der Kartierers/Kartiererin
61	Begleitperson	Kürzel der Begleitperson der/des Kartiererin/Kartierers
62	Bohrtyp	Profil, Kartier- oder Zusatzbohrung (Originaleinträge der Kartierenden)
63	Ergänzungsbohrung	Wurde eine Ergänzungsbohrung gemacht? (j/n)
64	Bemerkungen	Bemerkungen
65	UB1_pH_Labor	pH-Messung Labor (in 0.01 molarer CaCl <sub>2</sub> )
66	SummeSchichtmächtigkeit	Summe der Schichtmächtigkeit (=Bodenmächtigkeit)
67	Erfassung	Erfasser/in der Daten
68	Erfassungsdatum	Datum der Erfassung
69	Bodenmächtigkeit	Aufnahme der erwarteten Bodenmächtigkeit (interner Wert)
70	Bestand	Bestand: LaubWald, LaubMischwald, MischWald, NadelMischwald, NadelWald

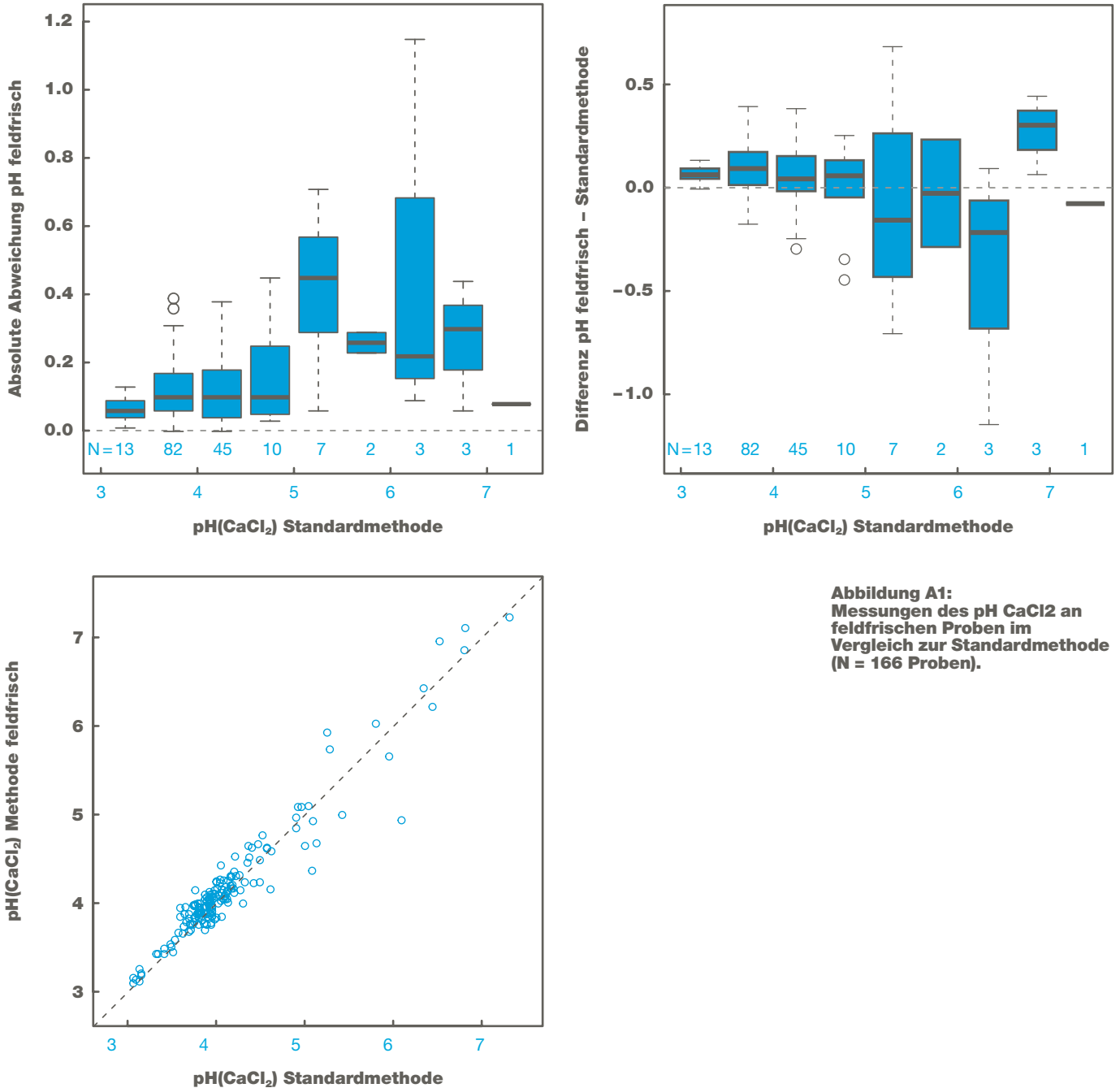
## A2. Analysen pH feldfrisch

Die Messung des pH-Werts an feldfrischen Bodenproben ermöglicht Analysen an Proben mit wenig Material. Wie bei der Standardanalyse wird der pH in CaCl<sub>2</sub>-Lösung gemessen, allerdings ohne die Probe vorher aufzubereiten.

### Dafür wurde wie folgt vorgegangen:

- Nach der Probenahme werden die Proben bis zur Messung in verschlossenen Plastikbeuteln aufbewahrt. Wenn die Messung nicht unmittelbar nach der Probenahme erfolgt, werden die Proben im Kühlschrank gelagert und möglichst rasch gemessen. Die Proben werden nicht weiter vorbehandelt (d. h. kein Entfernen von Steinen oder organischem Material).
- **Suspension:** 10 g Boden (Vermeiden von Skelettanteilen) mit 25 ml 0.01M Calciumchlorid-Lösung versetzen und gut schütteln. Die Suspensionen mindestens 1 h auf dem Probenschüttler bei 250 min<sup>-1</sup> schütteln.
- **Kalibration** pH-Meter/-Elektrode gemäss Geräteanleitung
- **Messung** mit pH-Meter: Vor der Messung die Suspensionen gut aufschütteln und die mit deionisiertem Wasser abgespritzte Elektrode darin eintauchen. Warten, bis sich das Gleichgewicht eingestellt hat. Resultat ablesen.

Vergleichsmessungen im Rahmen der Waldbodenkartierung zeigen, dass die Ergebnisse der Methode «Feldfrisch» für den Bereich unterhalb pH 5 sehr gut mit den Resultaten der Standardmethode übereinstimmen (Abbildung A1). Sowohl die Differenz als auch die absolute Abweichung beträgt für die meisten Proben 0.2 pH-Einheiten oder weniger, der Median der absoluten Abweichungen entspricht ca. 0.1 pH-Einheiten. Oberhalb pH 5 bestehen teilweise grosse Abweichungen zwischen den beiden Methoden. Dies dürfte durch kalkhaltige Skelettanteile (Steine usw. >2 mm) verursacht werden, welche die Messungen an feldfrischen Proben beeinflussen.



**Abbildung A1:** Messungen des pH CaCl<sub>2</sub> an feldfrischen Proben im Vergleich zur Standardmethode (N = 166 Proben).



### A3. Bestimmung der Basensättigungstypen

Zur Bestimmung des Basensättigungstypen wurden drei Bodentiefen betrachtet:

- H1: 5–60 cm Tiefe
- H2: 60–90 cm Tiefe
- H3: unterhalb 90 cm Tiefe

Wir verwenden hier bewusst nicht die Bezeichnungen Ober- bzw. Unterboden, um Verwechslungen mit den entsprechenden Horizonten des Drei-Schichten-Modells zu vermeiden. Die Messwerte aus den Profilen oder Bohrungen wurden den drei Schichten H1 bis H3 zugewiesen und bei mehreren Werten pro Schicht jeweils die minimale und maximale Basensättigung bestimmt.

Dafür wurden die Messwerte in folgender Priorität berücksichtigt:

1. Bestimmung der Basensättigung gem. Methode der FAC
2. Schätzung der Basensättigung basierend auf Messung der Reservenährstoffe mit der AAE10-Methode (Regression FAC vs. AAE10-Resultate)
3. Grobe Schätzung der Basensättigung basierend auf dem pH-Wert mit folgenden Klassen (wobei die Schätzungen zwischen pH 4.0 und 4.4 mit einer grossen Unsicherheit behaftet sind).

Bereich pH-Wert	angenommene Basensättigung
pH > 4.4	≥ 80 %
4.2 < pH ≤ 4.4	60–80 %
4.0 < pH ≤ 4.2	20–60 %
pH ≤ 4.0	< 20 %

Lagen für die obersten 30 cm des Bodens keine Labormessewerte für die Basensättigung oder den pH-Wert vor, wurde zusätzlich der pH-Wert des Ah-Horizonts des entsprechenden Polygons gemäss Attributtabelle berücksichtigt.

Die Zuordnung der Basensättigungstypen erfolgte grob nach folgendem Schema:

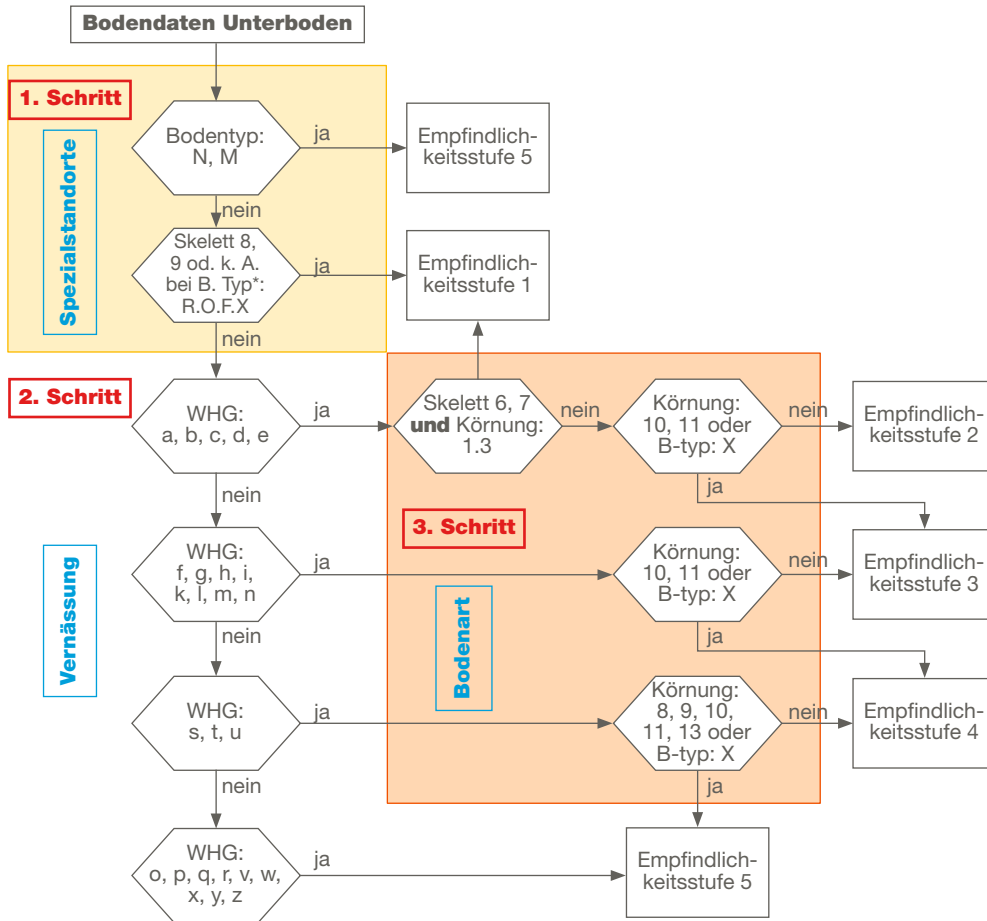
Kriterium	(BS = Basensättigung)	Beurteilung
a) minimale BS in H1	> 80 %	Typ 1
	30–80 %	→ b
	≤ 30 %	→ c
b) maximale BS in H2	> 75 %	Typ 2
	20–75 %	Typ 3
	≤ 20 %	→ d
c) maximale BS in H2	> 20 %	Typ 3
	≤ 20 %	→ d
d) maximale BS in H3	> 20 %	Typ 4
	≤ 20 %	Typ 5
	unbekannt	Typ 4/5

(nicht ausgeführt sind hier die diversen Sonderfälle, die sich bei unerwarteten Gradienten oder unvollständigen Daten ergeben können)

Bei Polygonen, für die keine Messdaten aus Profilen oder Bohrungen vorhanden sind, wurde der Basensättigungstyp aus den Angaben zum pH für Oberboden, Unterboden 1 und 2 abgeschätzt. Das Vorgehen war hierbei analog zu jenem bei den Profildaten, allerdings liessen sich die Typen 3, 4 und 5 in vielen Fällen aufgrund der vorhandenen Informationen nicht unterscheiden.

## A4. Schätzung Verdichtungsempfindlichkeit

Die Verdichtungsempfindlichkeit des Bodens wurde anhand eines Modells abgeschätzt, welches bereits in anderen Kantonen angewendet wurde (AUE-BL, 1998, adaptiert von Hauert et al. 2017). Mit einem Entscheidungsbaum (Abbildung A2) wurden die Böden gemäss den erhobenen Attributen in fünf Empfindlichkeitsstufen von 1 (wenig empfindlich) bis 5 (extrem empfindlich) eingeteilt. Hierbei handelt es sich um die potentielle Verdichtungsempfindlichkeit, die effektive Empfindlichkeit hängt auch vom aktuellen Wassergehalt des Bodens ab.



**Abbildung A2:** Entscheidungsbaum zur Abschätzung der potentiellen Verdichtungsempfindlichkeit des Unterbodens

Grafik: Hauert et al. 2017



## A5. Schätzung der nutzbaren Feldkapazität (nFK)

Abschätzung der nutzbaren Feldkapazität aufgrund der erhobenen Attribute für den Oberboden (Ah) inkl. Auflagehorizonte (F, H) sowie Unterboden 1 und 2 (UB1 bzw. UB2).

Anhand der Körnung und der Trockenrohdichte (TRD) wird für Ah, UB1 und UB2 je die nFK (in Vol.-%) geschätzt. Dafür werden die Werte aus Tabelle 3 von Wessolek et al. (2009) verwendet (s. unten). Für den Ah werden in Abhängigkeit des Humusgehaltes Zuschläge gemäss Tabelle 5 (ebenda) berücksichtigt.

Mithilfe der Schichtmächtigkeiten und des Skelettgehaltes wird die nFK über die gesamte erfasste Bodentiefe aufaddiert.

### Vorgehen im Detail

Folgende Schritte jeweils pro Schicht

- Umrechnung gemessene Schluff- und Tongehalte in Werte gem. deutscher Definition  
 $\text{Ton D} = \text{Ton CH} / (1 - \text{OS}/100)$   
 $\text{Schluff D} = 1.08 * \text{Schluff CH} / (1 - \text{OS}/100)$   
 wobei OS = org. Substanz (%). Für UB wurde die OS vernachlässigt, d. h. OS=0.  
 Der Faktor 1.08 beruht auf der unterschiedlichen Abgrenzung zwischen Schluff und Sand (CH bei 0.5 µm, D bei 0.63 µm).
- Zuweisung der Bodenart aufgrund Ton D und Schluff D
- Schätzung Trockenrohdichte (TRD; g/cm<sup>3</sup>) anhand der Schichttiefe sowie der Gefügegenösse-Klasse
  - Für **Ah**: TRD = 1.1 (fixer Wert)
  - Für UB: TRD = Basiswert + Zuschlag gemäss Tabelle

Schicht	Untergrenze der Schicht	Basiswert TRD	Gefügegenösseklasse	Zuschlag TRD
<b>UB1</b>	<40cm	1.1	>4	+0.2
	≥40cm	1.3		
<b>UB2</b>	<80cm	1.3	>5	+0.2
	≥80cm	1.5		

- Zuweisung nFK-Schätzung (in Vol.-%) aus Tab. 3 anhand Bodenart und TRD  
 (Für einige Bodenarten ist für TRD=1.1 keine Schätzung angegeben, in diesen Fällen wurde stattdessen die Schätzung für TRD=1.3 verwendet.)
- Für Ah:  
 Zuweisung nFK-Zuschlag in Abhängigkeit des OS-Gehalts (Tabelle 5)
- Berechnung nFK für gesamte Schicht:  
 $\text{nFK (in mm)} = 0.1 * \text{Schätzung nFK (in Vol.-% bzw. mm/dm)} * \text{Schichtmächtigkeit (in cm)} * \text{Korrekturfaktor Skelett}$

mit

Skelettklasse	Volumenanteil Skelett	Korrekturfaktor
0	0.025	0.975
1	0.075	0.925
2	0.150	0.850
4	0.250	0.750
6	0.400	0.600
8	0.600	0.400

**Für Ah: Addition Schichtmächtigkeiten F-, H- und Ahh-Horizonte:**

nFK Oberboden = nFK Ah + Summe Mächtigkeiten F, H, Ahh (in cm) (d. h. für die Auflage wird nFK = 10 Vol.-% angenommen)

**Berechnung nFK profilumfassend:**

Addition der nFK von Ah, UB1 und UB2 (d. h. nFK wurde nicht auf PNG oder fixe Tiefe beschränkt).

Zuweisung zur nFK-Klasse

nFK	Klasse
0–50	1
50–100	2
100–150	3
150–200	4
200–250	5
>250	6



8122









