

## Bodenge- stützte Baum- artenwahl im Klimawandel

**Welche Bäume sollen in den kommenden Jahrzehnten in den Zürcher Wäldern gedeihen? Gefragt sind Baumarten, die zu den Bodeneigenschaften passen und der Dynamik der Klimaänderung gewachsen sind. Neue, detaillierte Bodenkartierungen helfen bei der entsprechenden waldbaulichen Planung.**

Autoren:  
Franz Borer, Borer Bodenexpertisen,  
Derendingen, francobo@solnet.ch

Marianne Knecht, Teresa Steinert, Ambio,  
Angewandte Umweltwissenschaften,  
Zürich

Kontakt:  
Nathalie Barengo, Kreisforstmeisterin  
Abteilung Wald  
ALN  
Telefon 043 257 98 35  
nathalie.barengo@bd.zh.ch  
www.zh.ch/wald

→ Artikel «Bodenkarten für Wald der Zukunft», Seite 5

→ Artikel «Heute schon das rechte Holz für morgen bereitstellen», ZUP99, 2021

Für ein gutes Gedeihen müssen die Bodeneigenschaften zu den Bedürfnissen eines Baums passen. Während Eichen (links) ziemlich trockenheitsresistent sind, benötigen Buchenmischwälder (Mitte) Böden, die viel Wasser speichern, und könnten daher in kommenden Jahrzehnten vielerorts der Vergangenheit angehören.

Quelle: I. Flynn (links, Mitte), Marianne Knecht (rechts)

Die Baumartenwahl in Zeiten des Klimawandels ist eine grosse Herausforderung für die waldbaulichen Planerinnen und Planer. Das gilt besonders bei der Verjüngungsplanung und der Bestandsbegründung. Steigende Temperaturen und der sich abzeichnende Wassermangel führen bei den Bäumen zu Stress. Die Quantifizierung des Wasserangebots während der Vegetationsperiode wird so zu einer entscheidenden Grösse, um bei sich ändernden Klimabedingungen die am besten geeigneten Baumarten auszuwählen.

### Standorttaugliche Baumarten finden

Diese schwierige Aufgabe kann gelöst werden, wenn das Zusammenspiel von Bäumen und Umwelt ähnlich dem bekannten Konzept von «Angebot und Nachfrage» betrachtet wird: Die beschreibenden Attribute zu Boden und Klima werden als Angebotsgrössen den Ansprüchen der verschiedenen Baumarten – ausgedrückt in Form einer Nachfrage – gegenübergestellt. Bei Übereinstimmung von Angebot und Nachfrage gelten die jeweiligen Baumarten als standorttauglich. Dieser Lösungsansatz wurde im Rahmen eines Pilotprojekts 2022 im Auftrag der Abteilung Wald des Kantons Zürich untersucht. Anschliessend wurden operative Instrumente zur bodengestützten Baumartenwahl erarbeitet.

### Das Angebot des Bodens ...

Der Boden, der den ganzen potenziellen Wurzelraum umfasst, entspricht zu einem grossen Teil dem, was als Standort bezeichnet wird. Viele Ausprägungen und Eigenschaften des Bodens sind weitgehend konstant. Der Bodenwasserhaushalt eines Standorts unterliegt jedoch den unterschiedlichsten Einflüssen von Niederschlag und Verdunstung, ist sehr variabel und ein äusserst wichtiger, steuernder Faktor des Baumwachstums.

Mit der nun fertiggestellten Waldbodenkartierung (Artikel «Bodenkarten für den Wald der Zukunft», Seite 5) wird der Boden vollumfänglich und detailliert in seiner Funktion als Wurzelraum und als Ort der Verankerung des Wurzelwerks, der Nährstoffaufbereitung und -erschliessung sowie als Wasserreservoir beschrieben. Dies erlaubt nicht nur qualitative, sondern auch wichtige quantitative Aussagen und Berechnungen.

Ein Kernpunkt dieses methodischen Ansatzes ist die Diskretisierung der Fläche beziehungsweise des Raums, also die Aufteilung in eine bestimmte Zahl kleiner Einheiten (Polygone) und der zugehörigen Daten. Detaillierte Bodeninformationen bilden im übertragenen Sinn das Standortangebot bezüglich der Baumartenansprüche.

Weitere, nicht direkt mit den eigentlichen Bodenattributen, aber mit dem Standort verbundene Parameter sind die mittlere Höhe jeder Polygonfläche, die Exposition und die Neigung.



### ... allem voran der Bodenwasserhaushalt

Die wichtigste Rolle für ein optimales Wachstum der Bäume spielt der Bodenwasserhaushalt. Dies betrifft vor allem das Wasserangebot aus dem Boden während des gesamten Vegetationsjahrs. Hierfür kommt ein Wasservorratsindikator (WVI) zur Anwendung. Dieser klassiert das errechnete, physiologisch verwertbare maximale Wasserangebot im Wurzelraum unter Einbezug der nutzbaren Gründigkeit und der Bodenart. Dieses Wasserangebot steht dem Waldbestand nach erfolgter Wassersättigung des Bodens im Winter zu Beginn der Vegetationsperiode zur Verfügung.

### Standortansprüche der Baumarten als Nachfrageparameter

Dem oben definierten Angebot des Bodens für eine künftige Bestockung steht die Nachfrage der Baumarten an den

### Klimaszenarien

Der Schweizer Bericht «Klima CH2018» skizziert folgende Klimaszenarien:

**Optimistisches Szenario:** Konsequenter Klimaschutz, Ziele des Pariser Klimaabkommens von 2015 werden erreicht (Bezeichnung RCP 2.6\*). Temperaturänderung bis 2100 (bezogen auf 1981–2010): **+1.2 °C**

**Mittleres Szenario:** Klimaschutz nur in begrenztem Rahmen. Ziele des Pariser Klimaabkommens von 2015 werden

nicht erreicht (Bezeichnung RCP 4.5\*). Temperaturänderung bis 2100 (bezogen auf 1981–2010): **+2.2 °C**

**Worst-Case-Szenario:** Keine Klimaschutzmassnahmen. Klimawirksame Emissionen nehmen stetig zu und mit ihnen die Erwärmung (Bezeichnung RCP 8.5\*). Temperaturänderung bis 2100 (bezogen auf 1981–2010): **+4.5 °C**

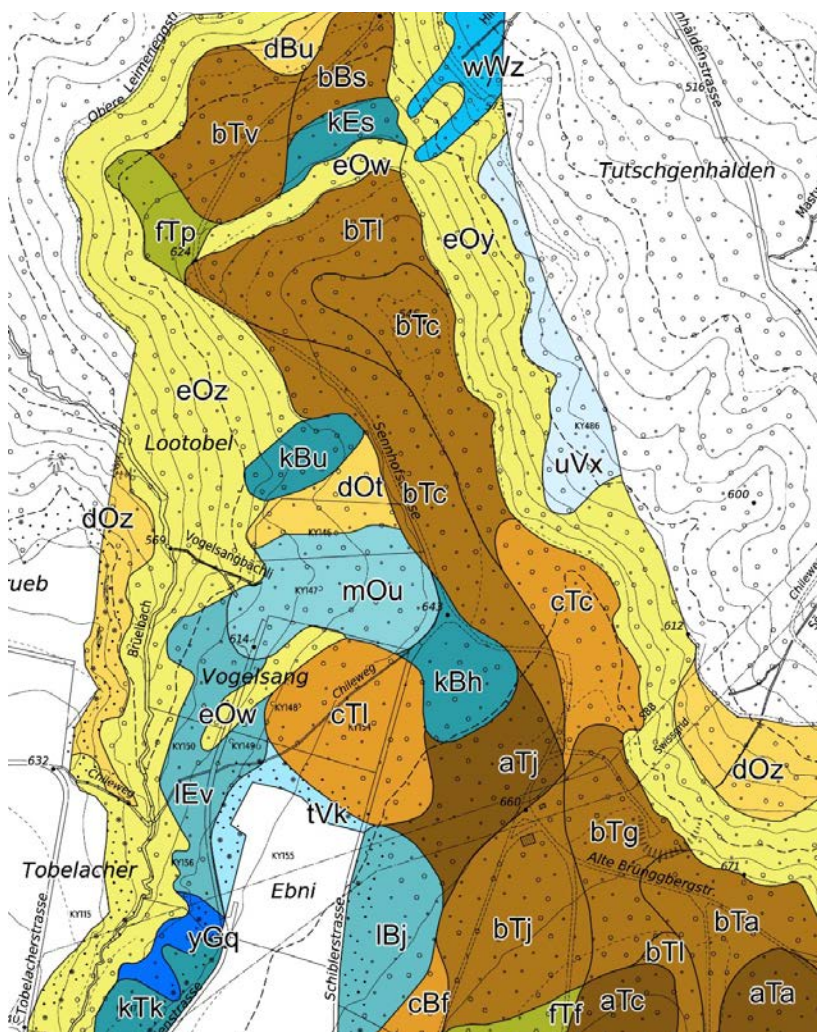
\* Einwirkende Strahlung als Leistung/Fläche in W/m<sup>2</sup>.

Standort gegenüber. Diese Ansprüche wurden in einer breit angelegten Literaturrecherche für 33 Baumarten eruiert, standardisiert und gemäss den oben genannten Angebotsparametern attribuiert. Die Informationen reichen vom Boden im Wurzelraum über Wurzelcharakteristiken, ökophysiologische Ansprüche, waldbauliche Aspekte bis hin zu Klima- und Ver-

breitungsmustern. Die Attributierung der Baumartenansprüche erfolgte primär für den maximalen Toleranzbereich von 33 Baumarten.

Als wichtige baumartenspezifische Eigenschaft wurde im Rahmen dieses Projekts zudem die Trockenheitsempfindlichkeitsstufe (TES) eingeführt, die als Mass für den spezifischen Wasserbedarf dient und den Grad der Wassernachfrage bestimmt. Je grösser die Trockenheitsempfindlichkeit, desto höher der Wasserbedarf und desto höher auch der nachgefragte Wasservorratsindikator des Bodens.

### Wasserhaushaltsgruppen (WHG) in einem Ausschnitt vom Los Kyburg



Eine differenzierte Beschreibung und Benennung der Bodentypen (Bodenansprache) ermöglicht auch eine differenzierte Wahl der geeigneten Baumarten (Kartenausschnitt Kyburg).  
Quelle: [www.maps.zh.ch/FaBo](http://www.maps.zh.ch/FaBo)

### Böden verschiedener Wasserhaushaltsgruppen (WHG)

Der Code für die WHG ist der erste kleine Buchstabe der dreistelligen Buchstabenkombination, die einen Bodentyp in einer Bodenkarte beschreibt. Zum Beispiel:

- **aXX**: normal durchlässig, sehr tiefgründig
- **eXX**: normal durchlässig, flachgründig und sehr flachgründig
- **fXX**: stauwasserbeeinflusst, tiefgründig
- **mXX**: grund- oder hangwasserbeeinflusst, ziemlich flachgründig
- **yXX**: meist bis zur Oberfläche poren gesättigt, flachgründig und sehr flachgründig.



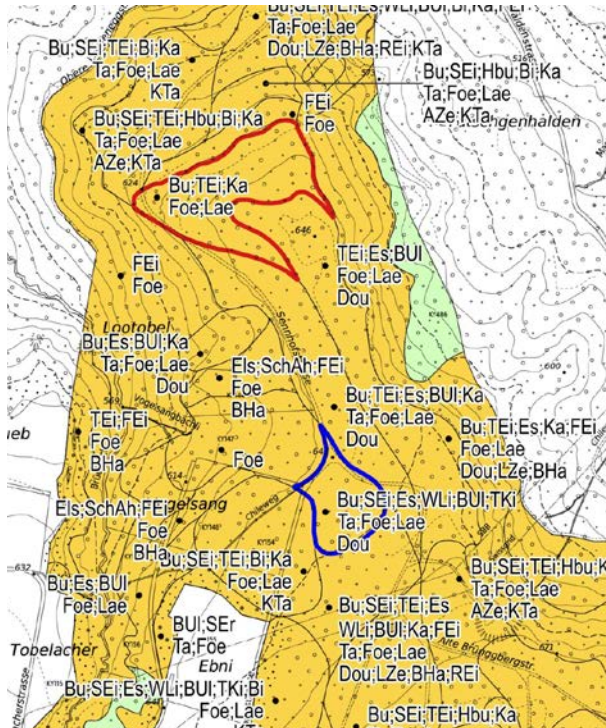
**Klimawandel als dynamische Einflussgrösse**

Der Klimawandel unterwirft die Baumartenwahl einer dynamisierten Betrachtungsweise. Entscheide, die auf eine Beständigkeit von einem Jahrhundert oder mehr ausgerichtet sind, müssen sich neu

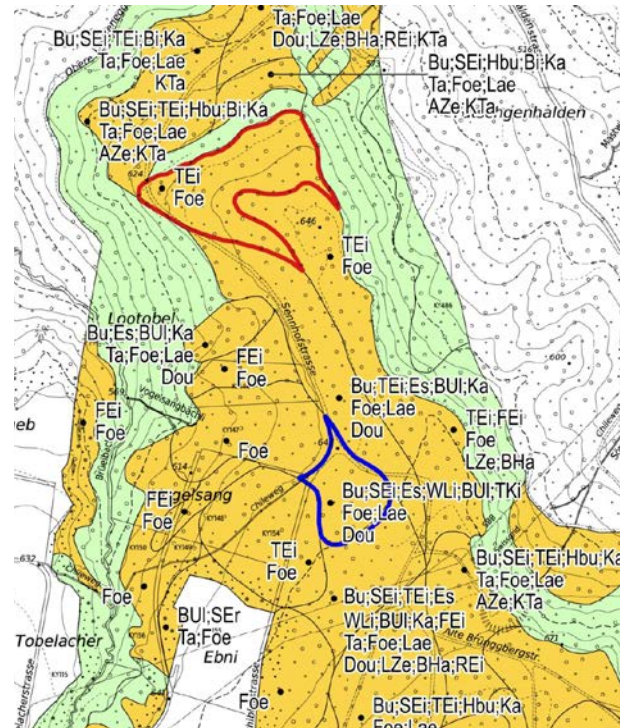
an den drastischen Veränderungen des Klimas orientieren. Für die Abschätzung zukünftiger Wuchsbedingungen gelten die vom Netzwerk des Bundes für Klimadienleistungen (National Centre for Climate Services, NCCS) errechneten Klimaszenarien CH2018 mit den zugehörigen

gen Daten (Zusatzinfo Seite 10). Am Beispiel Kyburg (ZH) wird gezeigt, was die obigen Überlegungen konkret für die Baumartenwahl bedeutet (Karte unten). Die verwendeten Klimadaten beziehen sich auf die Klimagrossregion Ostschweiz (CH-NE).

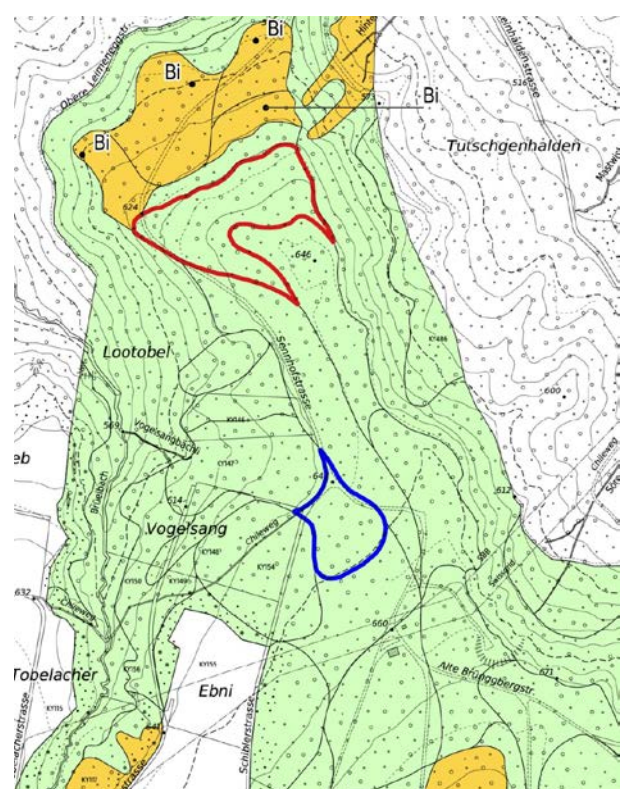
**(A) Baumartenauswahl für das optimistische Klimaszenario im Jahr 2085**



**(B) Baumartenauswahl für das mittlere Klimaszenario im Jahr 2085**



**(C) Baumartenauswahl für das Worst-Case-Szenario im Jahr 2085**



Gelb: Fläche mit standortgerechtem Baumartenset  
Grün: Fläche ohne standortgerechtes Baumartenset  
Positionierungshilfe: Schwarzer Punkt (•) am Rand des Textfeldes mit den aufgeführten Baumarten zeigt jeweils auf das dazugehörige Polygon.

**Baumarten**

AZe Atlas-Zeder*	FEi Flaum-Eiche	REi Roteiche*
BHa Baum-Hasel*	Foe Föhre	SEi Stiel-Eiche
Bu Buche	Hbu Hainbuche	Ta Tanne
Bi Birke	Ka Kastanie	TEi Trauben-Eiche
BUI Berg-Ulme	KTa Küstentanne*	TKi Traubenkirsche
Dou Douglasie*	Lae Lärche	WLi Winter-Linde
Es Esche	LZe Libanon-Zeder*	

\* Nicht-einheimische Baumarten

Die Karten (A) bis (C) illustrieren am Beispiel Kyburg: Je nach Klimaszenarien und Bodentyp werden einheimische Bäume an bestimmten Standorten nicht mehr gedeihen können.

Quelle: Bericht zum Pilotprojekt Abteilung Wald, Autorenschaft: Borer, Knecht und Steinert



### Praktische Umsetzung der Baumartenwahl

Die bodengestützte Baumartenwahl basiert auf den folgenden Schritten:

- 1) Abgleich der Boden- und Standortattribute mit den Baumartenansprüchen: Wo stimmen die Standorteigenschaften mit den Bedürfnissen der infrage kommenden Baumarten überein?
- 2) Berücksichtigung des Klimawandels: Die Temperaturveränderung [°C] führt zu einer Veränderung der Höhenstufengrenze der Vegetation. Die Niederschlagsveränderung [mm] führt zu einer Verschiebung der berechneten WVI-Klassen (Wasservorratsindikator).
- 3) Umfang der Berechnungen: Die Berechnung erfolgt jeweils für alle Baumarten an allen Standorten in allen Polygonen und für alle Klimaszenarien. Auf diese Weise kann eine breite Auswahl an Karten erstellt werden – für einzelne Baumarten, Baumartenkombinationen, unterschiedliche ökophysiologische Ansprüche, Klimaszenarien und Betrachtungszeiträume. Für die aktuelle waldbauliche Planung sind die Daten Ende des 21. Jahrhunderts (Bezugspunkt 2085) von Bedeutung.

### Entwicklung der Baumartenwahl im Klimawandel: Beispiel Kyburg

Auf Basis der mit dem Klimawandel einhergehenden Veränderungen von Temperatur und Niederschlag wird im folgenden Beispiel die Entwicklung der Baumartenauswahl gezeigt.

Der gewählte Ausschnitt aus dem Bodenkartierungslos von Kyburg (ZH) zeigt eine relativ grosse Diversität der Bodeneigenschaften. Gut ersichtlich ist das an der Attributkarte für die Wasserhaushaltsgruppen (WHG), die als kombinierte Parameter für die Wasserhaushaltscharakteristik und für die Gründigkeit stehen (Karte Seite 10). Der Code für die WHG ist der erste kleine Buchstabe der dreistelligen Buchstabenkombination.

Gerade auf den glazial geprägten Böden sind beispielsweise die Gründigkeiten erst durch die Bodenkartierung genauer sichtbar zu machen. Die konkrete Berechnung der möglichen Baumartenauswahl in diesem Landschaftsausschnitt erfolgte für die drei zuvor definierten Klimaszenarien unter Einbezug des Wasservorratsindikators. Bezugsjahr ist das Jahr 2085.

### Optimistisches, mittleres und Worst-Case-Szenario ...

Für die Darstellung der Entwicklung wurden zwei Polygone ausgewählt und rot beziehungsweise blau umrandet (Karte Seite 11). Die Tabelle oben gibt die bodenkundlichen Kennwerte an. Die Auswahl an

### Attributeigenschaften von zwei unterschiedlichen Polygonen

Polygon	WHG	Skelett	Körnung	Kalk	Säuregrad	Bodentyp
Rot	b	4	5	0	E4	T
Normal durchlässig, tiefgründig/stark skeletthaltig 20–30 % / sandiger Lehm (sL) / kein CaCO <sub>3</sub> / stark sauer 3.3–4.2 / Parabraunerde						
Polygon	WHG	Skelett	Körnung	Kalk	Säuregrad	Bodentyp
Blau	k	2	6	0	E0	B
Grund- oder hangwasserbeeinflusst, tiefgründig/skeletthaltig 10–20 % / Lehm (L) / kein CaCO <sub>3</sub> / alkalisch >6.7 / Braunerde						

Mit den Karten auf Seite 11 können für jede einzelne Fläche (im Beispiel rot und blau) die Bodeneigenschaften genau beschrieben werden. So können die Baumarten eruiert werden, die dort auch in Zukunft noch gut wachsen können.

Quelle: Bericht Pilotprojekt Abteilung Wald, Autorenschaft: Borer, Knecht und Steinert

Baumarten der aktuellen Ausgangssituation (1981–2010, nicht gezeigt) entspricht etwa der Karte (A) im Rahmen des optimistischen Klimaszenarios (Seite 11). Im Vergleich des optimistischen Klimaszenarios (A) mit dem mittleren Szenario (B) und dem Worst-Case-Szenario (C) reduziert sich die Baumartenauswahl drastisch. Das gilt besonders für Szenario (C). Durch die Temperaturzunahme verschiebt sich die untere Grenze der Höhenstufen. Dieser Umstand begrenzt das zur Verfügung stehende Baumartenset. Die Verschlechterung der Wasserversorgung spielt dabei auch eine wichtige Rolle.

### ... mancherorts nur noch Restbaumbestände im Kümmerwuchs

In den westlichen und östlichen Hanglagen mit flachgründigen und sehr flachgründigen Wasserhaushaltsgruppen fallen bereits im mittleren Klimaszenario die meisten Baumarten schon aus. Es handelt sich dabei um Standortverhältnisse, die in Zukunft wohl nur noch Restbaumbestände – zum Teil mit einem Habitus als Kümmer- oder Krüppelwuchs –, aber kaum mehr Wuchsformen eines Wirtschaftswaldes zulassen werden. Dieser Zustand wird im Worst-Case-Szenario (C) nun fast für die gesamte Fläche Tatsache: Es verbleiben ein Restbestand an Birken (Bi) und auf tiefgründigeren Parabraunerden (hier nicht abgebildet) zusätzlich nur noch einzeln die säure- und trockenheitsbeständigeren Eichen (Ei), Kastanien (Ka), Föhren (Foe) und Küstentannen (KTa).

### Wo im Worst Case Forstwirtschaft unmöglich wird

Die erarbeiteten operativen Instrumente zur bodengestützten Baumartenwahl bilden für die forstliche Praxis eine wichtige Grundlage für die langfristige, grossmasstäbliche waldbauliche Planung. Der praktische Lösungsansatz berücksichtigt sowohl den prägenden Einfluss aller Bodeneigenschaften an einem

Standort als auch die Wasserhaushaltsgrössen qualitativer wie quantitativer Art – und dies mit Bezug zur spezifischen Trockenheitsempfindlichkeit der verschiedenen Baumarten.

Dabei wird deutlich, dass die Erhaltung einigermaßen vielgestaltiger und resilienterer Waldformationen im schweizerischen Mittelland in Zukunft realistischerweise nur möglich ist, wenn die Entwicklung des Klimawandels mindestens auf dem Niveau des mittleren Klimaszenarios stabilisiert werden kann. Das klimatische Worst-Case-Szenario wird aller Voraussicht nach eine geregelte Forstwirtschaft im heutigen Sinne nicht mehr erlauben.

### Baumartenwahl braucht ausreichende Datendichte

Der gewählte Lösungsansatz zur Baumartenwahl ist angesichts des herrschenden Klimawandels erfolgversprechend, weil sich die wichtigsten variablen Parameter (Niederschlag, Temperatur) in den Prozess der Baumartenwahl als steuernde Attribute für jede einzelne Teilfläche (Polygon) in den Algorithmus integrieren lassen. Mit einer grossmasstäblichen Bodenkartierung können die bei Modellierungen auftretenden Schwierigkeiten deutlich reduziert werden.

Der kritische Vorbehalt zur Modellierung gilt auch für den auf Standorttypen aufgebauten Lösungsansatz mit einer nicht ausreichenden Datendichte der relevanten Bodenparameter. Bei der geplanten schweizweiten Bodenkartierung der Wald- und Landwirtschaftsböden sollte die Datenerhebung deshalb auf Basis detaillierter Felderhebungsmethoden durchgeführt werden, wie dies im Kanton Zürich bereits der Fall ist.