



Kanton Zürich
Baudirektion
Amt für Landschaft und Natur

Humus

Kantonale Bodenüberwachung KaBo
Aktuelle Gehalte und Entwicklung 1995–2019



Die Humusgehalte der Zürcher Böden blieben über die letzten 25 Jahre relativ stabil, insgesamt wurde gar eine leichte Zunahme beobachtet. Dies zeigen die langjährigen Messreihen der kantonalen Bodenüberwachung (KaBo) für mehr als 500 mineralische Böden. In der fünften Überwachungsperiode (2015-19) enthielten die untersuchten Böden durchschnittlich 5.0 Gewichtsprozent (Gew.%) Humus in den obersten 20 cm (Oberboden). Zur Veranschaulichung: Dies entspricht 10.3 kg Humus pro Quadratmeter Boden. Unter Dauergrünland und Wald sind die mittleren Gehalte höher als in Ackerböden. Seit der ersten Erhebung (1995 bis 1999) nahm der Humusgehalt im Oberboden durchschnittlich um 0.27 Gew.% zu, wobei die Zunahmen für Böden unter Dauergrünland tendenziell grösser sind als für Acker- und Waldböden. Bei allen Landnutzungen gibt es Standorte mit zunehmender, gleichbleibender und abnehmender Tendenz. Tiefere Bodenschichten haben wesentlich geringere Humusgehalte. In 40 bis 60 cm Tiefe enthielten die Böden der KaBo 1.2 Gew.% Humus, ein zeitlicher Trend ist hier nicht ersichtlich. Zu organischen Böden, welche besonders humusreich sind und zudem anfällig auf Humusverluste, kann die KaBo derzeit keine Aussagen machen. Im Rahmen der Optimierung des Messnetzes soll diese Lücke in den nächsten Jahren geschlossen werden, denn das Thema Humus wird im Kontext des Klimawandels zukünftig weiter an Bedeutung gewinnen.

1. Kontext

Humus, auch organische Bodensubstanz (OBS) genannt, entsteht durch Zersetzung und Umbau von biologischem Ausgangsmaterial. Dazu gehören beispielsweise abgestorbene, im oder auf dem Boden lebende Pflanzen(teile), Tiere und Pilze, aber auch deren Ausscheidungen. Deshalb enthalten die obersten Bodenschichten in der Regel mehr Humus als tiefere Schichten. Im Gegensatz zu organischen Böden, die aus mindestens 30 Gewichtsprozent (Gew.%) Humus bestehen, enthalten mineralische Böden nur einige Prozent Humus. Die effektiven Gehalte werden einerseits durch die Standorteigenschaften, andererseits durch die Landnutzung geprägt.

Die Menge und die Qualität des Humus prägen die Eigenschaften eines Bodens und sind zentral für die Erfüllung bestimmter Bodenfunktionen. Die OBS beeinflusst sowohl die Struktur und die Stabilität eines Bodens als auch dessen Wasserhaushalt und die Nährstoffkreisläufe. Dies wirkt sich wiederum auf die land- und forstwirtschaftliche Nutzung, aber auch die Qualität des Bodens als Lebensraum für Fauna und Flora aus. Auch die Bindung und Filterung von Schadstoffen und somit die Verfügbarkeit von sauberem Trinkwasser werden durch den Humus geprägt. Zwischen den verschiedenen Bodeneigenschaften und -funktionen sowie dem Humusgehalt bestehen vielfältige Wechselwirkungen. Neben seiner grossen Bedeutung für die Bodenqualität macht der Humus den Boden zu einem gewichtigen Faktor im globalen Kohlenstoff-Kreislauf. Wird er abgebaut, entweicht Kohlendioxid (CO₂) in die Atmosphäre. Umgekehrt gelangt CO₂ aus der Atmosphäre in den Boden und kann dort als Bestandteil der OBS gespeichert werden.

Im folgenden Bericht wird der aktuelle Humusgehalt auf den rund 500 Überwachungsstandorten mit überwiegend mineralischen Böden¹ beschrieben (Kap. 2.2) sowie dessen Entwicklung seit Überwachungsbeginn (Kap. 2.4). Die Übersichtskarte in Kap. 3 zeigt beide Grössen im geographischen Bezug. Wie der Gehalt sich mit der Tiefe verändert ist in Kap. 2.1 zu sehen und Kap. 2.3 gibt ein Bild davon, in welchen Grössenordnungen die Böden Humus zu speichern vermögen und welche Rolle Standorteigenschaften auch hier spielen.

Impressum

Kanton Zürich
Baudirektion
Amt für Landschaft und Natur
Fachstelle Bodenschutz
Kantonale Bodenüberwachung
Walcheplatz 2
8090 Zürich
+41 43 259 32 78
bodenschutz@bd.zh.ch
www.zh.ch/boden

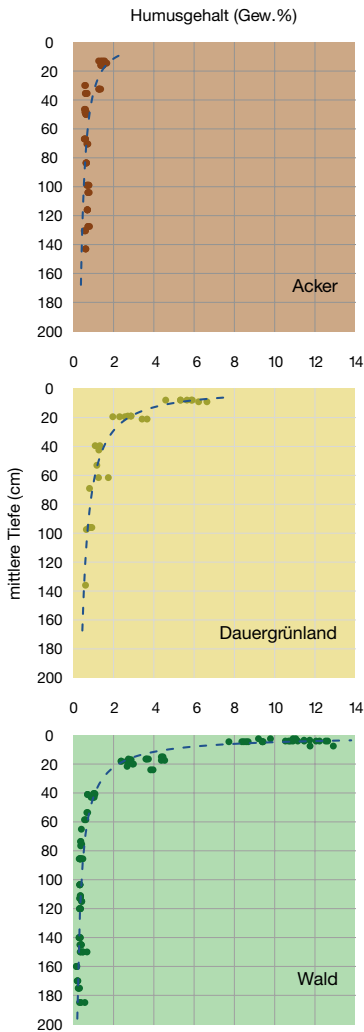
Dezember 2022

¹ Siehe Anhang für mehr Details zu den untersuchten Standorten, der Probenahme und den Laboranalysen.

2. Resultate der Kantonalen Bodenüberwachung

2.1. Humus-Verteilung und Bodentiefe

In mineralischen Böden sind die Humusgehalte im Oberboden in der Regel höher als in den darunterliegenden Bodenschichten. Je nach Landnutzung sieht das Verteilungsmuster im Boden jedoch sehr unterschiedlich aus. So erkennt man in Ackerböden oft einen deutlichen Einfluss der landwirtschaftlichen Bearbeitung, unter Dauergrünland (DGL) und Wald findet man hingegen kontinuierlichere Verläufe. Dies wird hier exemplarisch anhand von drei KaBo-Standorten illustriert (Abbildung 1).



In der Regel nimmt der Humusgehalt von oben nach unten ab, besonders rasch in den obersten Bodenschichten. Alle drei Beispiele zeigen dieses Muster (Abbildung 1), besonders ausgeprägt jedoch der Waldboden: Die obersten Zentimeter des Oberbodens weisen einen überdurchschnittlichen Humusgehalt von oftmals über 10 % auf. Bereits die darunterliegenden Horizonte noch deren 2 bis 5 %, unterhalb von rund 50 cm sinkt der Gehalt unter 1 % und nähert sich langsam Null an. Eine solch ausgeprägt humusreiche Schicht ist auf Dauergrünland nicht vorhanden, doch ist der Humusgehalt in den ersten rund 10 cm noch immer hoch und fällt danach rasch ab. Der Ackerstandort hat durch die regelmässige mechanische Bearbeitung und Durchmischung einen rund 25 cm mächtigen, ziemlich homogenen obersten Horizont («Pflughorizont»). Darin beträgt der Humusgehalt bereits weniger als 2 %, fällt unterhalb der Pflugscholle weiter ab und nähert sich ebenfalls Null an.

Die hier gezeigten Humusgehalte stammen von Proben aus Bodenprofilen, welche bei der ersten Erhebung gegraben wurden. Die Proben wurden horizontweise entnommen, jeder Punkt liegt auf der mittleren Tiefe der entsprechenden Bodenschicht. Solche Daten wurden bisher einmalig für 48 Hauptstandorte der KaBo erhoben. Die in den folgenden Kapiteln beschriebenen Gehalte stammen hingegen aus homogenisierten Mischproben von standardmässig 20 cm Mächtigkeit: Oberboden-Proben aus 0–20 cm Tiefe bzw. Unterboden-Proben aus 40–60 cm Tiefe.



Abbildung 1: Humusgehalte in unterschiedlichen Probenahmetiefen in Profilen dreier KaBo-Standorte mit unterschiedlicher Nutzung.

Waldboden mit hohen Humusgehalten im Oberboden und rascher Abnahme mit zunehmender Tiefe.

2.2. Aktuelle Humusgehalte

Der mittlere Humusgehalt (Median) über alle Böden der KaBo beträgt 5.0 Gew.% in den obersten 20 cm (Oberboden; Abbildung 2 oben). 80 % aller Werte liegen in der Spanne von 2.9 bis 7.6 Gew.% Humus. Dauergrünland und Wald liegen dabei häufig im oberen Bereich der Humusgehalte. Sie haben eine vergleichbare Werteverteilung mit durchschnittlich 5.7 Gew.% Humus in den obersten 20 cm. Deutlich von den übrigen Nutzungen unterscheiden sich die Ackerböden, in denen der mittlere Humusgehalt mit 3.8 Gew.% im unteren Bereich der Wertespanne liegt. Solch tiefe Werte weisen weniger als 10 % der nicht ackerbaulich genutzten Standorte auf. Die tiefsten Gehalte, mit einem organischen Anteil unter 2 Gew.%, sind auf ackerbaulich genutzten Flächen anzutreffen.

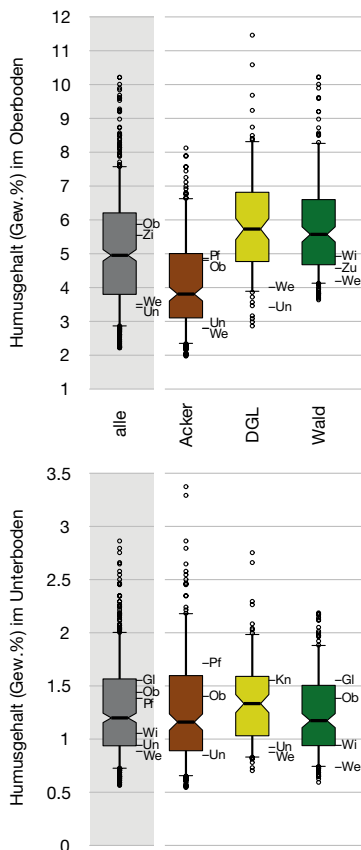


Abbildung 2: Humusgehalte im Ober- und Unterboden der KaBo-Standorte (insgesamt und nach Nutzung getrennt) bei der fünften Überwachungsperiode (2015–19). Die Kürzel markieren die mittleren Gehalte jener Raumplanungsregionen, die signifikant vom kantonalen Mittel abweichen.

Die Unterschiede zwischen den Nutzungstypen entsprechen den Erwartungen und wurden durch andere Schweizer Beobachtungsnetze bestätigt. Im Kanton Fribourg enthalten Acker- und Dauergrünlandstandorte 2.6 resp. 4.9 Gew.% Humus.² In der Nationalen Bodenbeobachtung weisen Ackerböden im Median 3.5 Gew.%, Grasland 8.1 Gew.%³ und Wälder 7.9 Gew.%⁴ Humus auf, der Unterschied von Acker- zu den übrigen Nutzungen ist somit noch deutlicher. Für die Ackerböden der Kantone Gené und Waadt werden Humusgehalte von 2.5 resp. 2.8 Gew.% ausgewiesen.⁵

Sowohl der mittlere Jahresniederschlag als auch die Höhe über Meer und die Jahresmitteltemperatur korrelieren über alle KaBo-Standorte betrachtet signifikant mit den Humusgehalten: Niederschlagsreiche, höher gelegene und kühlere Standorte sind in der Tendenz humusreicher. Diese Faktoren zeigen innerhalb des Kantons regionale Muster (vgl. Abbildung A1 im Anhang). In den Wald-Oberböden, die vom Menschen am wenigsten mechanisch beeinflusst sind, zeigt sich dieses Muster in einem geographischen Gefälle in den Humusgehalten: Im südlichen und südöstlichen Kantonsteil (Raumplanungsregionen Zimmerberg, Oberland und Pfannenstil) liegen die mittleren Gehalte höher als im Norden und Nordwesten (Regionen Unterland, Weinland). Dass das Gefälle im Dauergrünland weniger deutlich und in Ackerböden kaum erkennbar ist, zeigt: die Nutzung der Böden vermag den klimatischen Einfluss zu überdecken. Welchen Anteil am effektiven Gehalt die verschiedenen Einflussfaktoren haben, lässt sich nur schwer quantifizieren, da sie sich gegenseitig beeinflussen. Die vorherrschenden Nutzungen (Ackerbau im klimatisch günstigeren Norden des Kantons, Dauergrünland im Süden) sind gleichzeitig eine Ursache und eine Folge der Standortfaktoren.

Die Bodenschicht in 40–60 cm Tiefe (Unterboden) weist erwartungsgemäss deutlich tiefere Humusgehalte auf und diese schwanken auch zwischen den Standorten in einer engeren Spanne als im Oberboden. Der Median über alle Standorte liegt bei 1.2 Gew.% Humus. Für Acker- und Waldböden liegt der mittlere Gehalt knapp unter 1.2 Gew.%, unter Dauergrünland ist er mit gut 1.3 Gew.% leicht höher (Abbildung 2 unten).

Der im Oberboden deutliche Unterschied zwischen den Nutzungstypen verschwindet im Unterboden praktisch vollständig. Die grösste Streuung nach oben und die höchsten Einzelwerte sind auf Ackerflächen zu finden, wo durch die mechanische Bearbeitung des Oberbodens dieser auch immer etwas mit dem Unterboden vermischt wird. Auch in grösserer Tiefe weisen die Böden im Norden des Kantons tendenziell weniger Humus auf als in anderen Regionen, was die Situation im Oberboden abbildet, von wo das Material überwiegend eingetragen wird. Dennoch lässt sich dieser Zusammenhang nur beschränkt auf den einzelnen Standort übertragen: Ein hoher Gehalt im Oberboden geht oft, aber nicht notwendigerweise mit einem höheren Gehalt im Unterboden einher.

2 Lévasséur, Clément, Favrelière, Estelle & von Niederhäusern, Adrian 2019. FRIBO - Bodenbeobachtungsnetz des Kantons Freiburg 1987–2016. 1725 Posieux: Landwirtschaftliches Institut des Kantons Freiburg - Koordinationsgruppe für den Bodenschutz KGBBo
 3 Gubler, Andreas u. a. 2022. Die Nationale Bodenbeobachtung 2021. Agroscope Science 128
 4 Gubler, Andreas u. a. 2015. Nationale Bodenbeobachtung (NABO) 1985–2009. Zustand und Veränderungen der anorganischen Schadstoffe und Bodenbegleitparameter. 3003 Bern: Bundesamt für Umwelt
 5 Dupla, Xavier u. a. 2021. Changes in topsoil organic carbon content in the Swiss leman region cropland from 1993 to present. Insights from large scale on-farm study. Geoderma 400

2.3. Humusspeicherung

Wie viel Humus in einem bestimmten Boden gespeichert ist – häufig wird dafür der Begriff «Humusvorrat» verwendet – hängt nicht nur vom Humusgehalt ab. Die Feinerde von Dauergrünland- und Waldböden hat zwar (wie im vorhergehenden Kapitel gezeigt) vergleichbare Humusgehalte, dennoch enthält ein Quadratmeter eines durchschnittlichen Grünlandbodens in den obersten 20 cm insgesamt mehr Humus (11.8 kg/m²) als ein Quadratmeter Waldboden (im Mittel 10.6 kg/m²). Dies liegt daran, dass Grünlandböden dichter gelagert sind und weniger Steine enthalten (s. unten). In Ackerböden ist der Humusvorrat mit 8.7 kg/m² deutlich tiefer. Somit sind im Mittel aller KaBo-Standorte 10.3 kg/m² Humus im Boden gespeichert.

Um den Humusvorrat zu berechnen, muss der Humusgehalt mit dem Volumen und der Lagerungsdichte der Feinerde multipliziert werden (vgl. Anhang). Hierbei entspricht das Feinerde-Volumen dem Bodenvolumen abzüglich des Volumens des Bodenskeletts (Steine grösser als 2 mm). Der Skelettgehalt beträgt im Oberboden der KaBo-Standorte im Mittel 5 Volumenprozent (Vol.%), schwankt aber zwischen praktisch 0 und über 20 Vol.%. Dauergrünland weist mit im Mittel 3.7 Vol.% tendenziell etwas skelettärmere Böden auf als Wald (5.0 Vol.%) und Acker (5.6 Vol.%). Der zweite wichtige Faktor ist die Lagerungsdichte der Feinerde, denn je höher die Lagerungsdichte, desto mehr Feinerde enthält der Boden. Ackerböden sind mit im Mittel 1.21 kg/dm³ dichter gelagert als Dauergrünland- (1.09 kg/dm³) und Waldböden (1.01 kg/dm³). Diese Unterschiede dürften hauptsächlich auf die Bewirtschaftung und die damit verbundene Bodenbearbeitung zurückzuführen sein.

Im Kontext des Klimawandels interessiert vor allem, ob die Humusmenge im Boden gesamthaft zu- oder abnimmt. Oder mit anderen Worten: ob Böden eine Kohlenstoff-Quelle oder Senke sind. Um diese komplexe Frage zu beantworten reichen die von der KaBo erhobenen Daten alleine allerdings nicht aus. Um die gesamte Humusmenge zu bestimmen, die ein Boden über seine ganze Tiefe enthält, müssen die Grössen Humusgehalt, Skelettgehalt und Lagerungsdichte der Feinerde in horizontgenauer Auflösung bekannt sein. Diese Angaben liegen jedoch nur für 48 KaBo-Hauptstandorte einmalig aus der ersten Überwachungsperiode vor.

Organische Böden im KaBo-Programm und ihr Beitrag zum Humusspeicher

Aus alten Karten (Gyger-Karte von 1667; Wildkarte von 1850; Dufourkarten ab 1860) und weiteren Quellen,^{6,7} ist bekannt, dass im Kanton Zürich früher viel mehr vernässte Böden existierten, deren Fläche durch Entwässerung im Verlaufe der Zeit stark abgenommen hat. Solche Böden haben oft hohe Humusgehalte, bei vielen davon handelt es sich gar um aktuelle oder ehemalige Torfböden. Von Torf sprechen Fachleute, wenn der Humusgehalt über 30 Gew.% beträgt, bereits ab 15 Gew.% werden die Böden als anmoorig bezeichnet (zum Vergleich: Der Durchschnittsgehalt in den mineralischen Böden liegt unter 5 %, nur vereinzelt über 10 %). Bei genügender Durchlüftung, beispielsweise nach Entwässerungsmassnahmen und durch regelmässige Bearbeitung, erfahren diese oft einen Humusschwund, wobei viel CO₂ in die Atmosphäre entweicht.

Die KaBo-Standorte bilden die im Kanton vorkommenden Bodentypen nicht flächenrepräsentativ ab. Nur ganz wenige Standorte weisen organische Böden auf, diese sind nicht Teil dieses Berichts. Der Humusschwund auf organischen Böden ist mit den aktuell angewendeten Methoden der KaBo nicht zu beschreiben. Mit ihren hohen Gehalten, ein Vielfaches der mineralischen Böden, haben sie auch das Potential zu mengenmässig grossen Humusverlusten. Sie werden darum künftig stärker in den Fokus der Bodenüberwachung rücken.

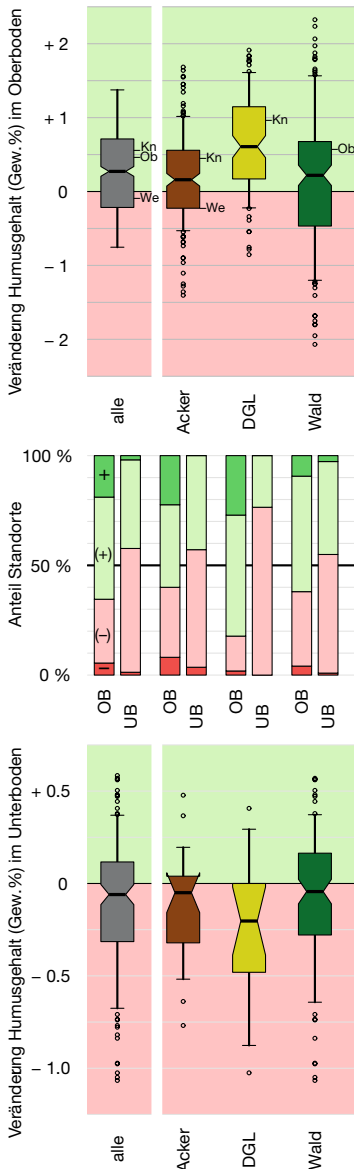
KaBo-Standort 7957 in Oberglatt ist ein Beispiel für einen organischen Boden. Er wird seit über 40 Jahren ackerbaulich genutzt und seit 2001 durch die KaBo beprobt und. Wo noch Torf vorhanden ist, ist dieser im Schnitt rund 30 cm mächtig und enthält zu über 40 Gew.% organische Substanz. Darunter folgt als Untergrund in einem ehemaligen See abgelagerte Kreide. Dieser Boden speichert damit pro Quadratmeter Oberboden (0–20 cm Tiefe) rund 55 kg Humus. Dies ist mehr als das Fünffache eines durchschnittlichen mineralischen Bodens im KaBo-Messnetz (vgl. Kap. 2.3).

⁶ Früh, Jacob & Schröter, Carl 1904. Die Moore der Schweiz: mit Berücksichtigung der gesamten Moorfrage.

⁷ Seitz, Nicole J. 2013. Drainagen in der Schweiz: Zeitlicher Verlauf, aktuelle Datenlage und Einfluss auf die Landschaftsentwicklung (Betreuung: Urs Gimmi, Peter Moser). Master. WSL, Birmensdorf

2.4. Entwicklung der Humusgehalte 1995–2019

Im Oberboden ist über alle Standorte der KaBo hinweg eine leichte Zunahme des Humusgehalts seit Überwachungsbeginn zu beobachten. Zwei von drei Standorten sind tendenziell zunehmend, jeder Fünfte in signifikantem Mass. Nur jeder zwanzigste Standort zeigt eine signifikante Abnahme (Abbildung 3 Mitte). Die mittlere Zunahme betrug über 20 Jahre hinweg 0.27 Gew.%. Unter Dauergrünland ist der Anteil zunehmender Standorte mit fünf von sechs am höchsten, jeder dritte signifikant. Die mittlere Zunahme innert 20 Jahren beträgt hier 0.61 Gew.%, in Waldböden 0.22 Gew.% und in den ohnehin schon humusärmeren Ackerböden nur 0.16 Gew.% (Abbildung 3 oben).



Die Entwicklung des Humusgehaltes ist nicht einheitlich. Die hohe Anzahl beobachteter Standorte lässt Tendenzen erkennen, der Blick auf die Einzelstandorte relativiert diese aber: Es gibt in allen Nutzungstypen ab- und zunehmende und viele nicht signifikante Entwicklungen. Dies bestätigen sowohl Studien auf nationaler Ebene als auch Daten für den Kanton Fribourg. Beide vermelden keine signifikanten globalen oder nutzungsspezifischen Trends, geben aber Indizien, dass diese eher auf Seite der Zunahme liegen. In den Kantonen Gené und Waadt sind die Gehalte der Ackerböden im Zeitraum 1995-2015 im Mittel gleich geblieben, seit 2007 ist jedoch ein Zuwachs erkennbar. Dieser liegt auf einem vergleichbaren Niveau wie dies bei den Zürcher Ackerböden zu beobachten ist, bei allerdings tendenziell tieferen Anfangsgehalten.

Keine signifikante Korrelation besteht zwischen der Veränderung des Humusgehaltes und dem aktuellen Gehalt oder dem Anfangsgehalt. So weisen beispielsweise humusreiche Standorte nicht generell höhere Verluste auf. Vielmehr fällt auf, dass die Region Weinland mit ihren ohnehin schon vergleichsweise tiefen Gehalten als einzige Region im Mittel knapp einen Verlust aufweist. Das beim Gehalt im Mittelfeld liegende Knonaueramt weist in allen Nutzungsarten hohe Zunahmen an organischer Substanz auf. Ein regionales Gefälle, wie es beim aktuellen Gehalt (Kap. 2.2) auffällt, ist bei der Entwicklung nicht nachweisbar.

Es besteht kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Entwicklung des Humusgehaltes und den Faktoren Höhe über Meer, mittlerer Jahresniederschlag, Jahresmitteltemperatur, oder auch mit Bodeneigenschaften wie Tongehalt, Lagerungsdichte oder Humus-Ton-Quotient. Entscheidender ist offenbar auch hier die Nutzungsart der Böden. Die am wenigsten vom Menschen bearbeiteten Waldböden haben am wenigsten signifikante Veränderungen.

Im Unterboden verändern sich die Humusgehalte über alle Standorte betrachtet in keine einheitliche Richtung. Veränderungen sind kaum signifikant, leicht steigende und sinkende Werte halten sich die Waage, nur einzelne Standorte zeigen Veränderungen von mehr als 1 Gew.% Humus (Abbildung 3 unten).

Die Anpassung des Probenahmeprozesses im Jahr 2013 (vgl. Anhang) verhindert, dass Reste humusreichen Oberbodens in die Unterbodenprobe gelangen. Es muss daher angenommen werden, dass der tatsächliche Gehalt im Unterboden bis zur 3., teilweise 4. Überwachungsperiode potentiell überschätzt wurde und im Übergang zu den neueren Erhebungen eine Abnahme vorgetäuscht wird, die in Wirklichkeit methodisch zu erklären ist.

Abbildung 3 oben und unten: Absolute Veränderung des Humusgehalts im Ober- bzw. Unterboden zwischen der ersten und fünften Überwachungsperiode. Die Kürzel markieren die mittleren Gehalte jener Raumplanungsregionen, die signifikant vom kantonalen Mittel abweichen.

Mitte: Anteile der Standorte mit Zunahmen (+) bzw. Abnahmen (-) im Oberboden (OB) und Unterboden (UB). Ohne Klammern: signifikante Veränderungen; mit Klammern: nicht-signifikante Veränderungen.

3. Fazit und Ausblick

Die Übersichtskarte (Abbildung 4) zeigt die Resultate der KaBo-Standorte auf einen Blick. Bei den aktuellen Humusgehalten (Grösse der Symbole) fallen die höheren Gehalte in den südlichen und südöstlichen Regionen des Kantons auf (vgl. Kap. 2.2). Diese sind höher gelegen und weisen kühlere und feuchtere Klimabedingungen auf als die übrigen Gebiete. Man findet daher eine Korrelation des Humusgehaltes sowohl mit der Höhe über Meer als auch dem mittleren Jahresniederschlag. Bezüglich der zeitlichen Entwicklung (Einfärbung der Symbole, vgl. Kap. 2.4) zeigt sich ein mosaikartiges Muster, Zunahmen scheinen jedoch in den südlichen Regionen häufiger zu sein als im Norden. Sowohl die aktuellen Humusgehalte der Zürcher Böden als auch deren zeitliche Entwicklung sind mit weiteren Studien zur Thematik, beispielsweise der Nationalen Bodenbeobachtung, vergleichbar.

Für die Bodenfruchtbarkeit und somit auch für die Bewirtschaftenden ist der Humusgehalt eine zentrale Grösse. Die Resultate der KaBo zeigen, dass gewisse Ackerböden sehr tiefe Humusgehalte, teilweise mit weiter abnehmender Tendenz, aufweisen. Um die Höhe der gemessenen Gehalte zu beurteilen und einen optimalen Gehalt zu definieren, muss dieser in Zusammenhang mit weiteren Standorteigenschaften und der gewünschten Nutzung gesetzt werden. Bislang gibt es keine anerkannten Referenz- oder Beurteilungswerte für die Schweiz. Für die Kommunikation wie auch die landwirtschaftliche Beratung wäre ein solches Beurteilungsinstrument sehr wichtig.

Da der Boden ein wichtiger Kohlenstoffspeicher ist, ist neben dem Humusgehalt auch dessen Gesamtmenge im Boden (Vorrat) von Interesse – idealerweise nicht nur für einzelne Bodenschichten, sondern für den gesamten Boden. Die Daten der KaBo lassen gegenwärtig nur eine Aussage zu den Grössenordnungen des Humusspeichers zu, jedoch nicht zu deren Veränderungen über die Zeit. Als potentielle Kohlenstoff-Senke oder Quelle können Böden den Klimawandel bremsen oder beschleunigen. Infolge des Klimawandels verändern sich die Temperaturen und Niederschlagsmengen, was die Standortbedingungen verändert und zudem Anpassungen in der land- und forstwirtschaftlichen Praxis nach sich zieht. Die vielen Wechselwirkungen und Rückkopplungen machen die Auswirkungen auf die Humusgehalte im Boden schwer vorhersehbar. Ein naheliegendes Szenario ist, dass wärmere Temperaturen und trockenere Sommer zu tieferen Humusgehalten führen.

Dem Humus wird künftig eine noch grössere Aufmerksamkeit zukommen – sowohl generell in der Gesellschaft als auch innerhalb der KaBo. Die Entwicklung der Humusgehalte ist von grossem Interesse, sowohl im Kontext der Bodenfruchtbarkeit und Bodennutzung als auch des Klimawandels. Die Erfassung des organischen Kohlenstoffs bzw. des Humusgehaltes wird daher auch zukünftig ein Schwerpunkt der KaBo bleiben. Im Rahmen deren Neuausrichtung wird gegenwärtig auch geprüft, wie Probenahme und Analytik weiter optimiert und erweitert werden können. So wird auch nach Möglichkeiten gesucht, wie künftig Zustand und Entwicklung von organischen Böden besser erfasst werden können. Dies ist ein wichtiges Puzzle-Teil, um die Entwicklung der Zürcher Böden bezüglich Humus gesamthaft zu beurteilen.



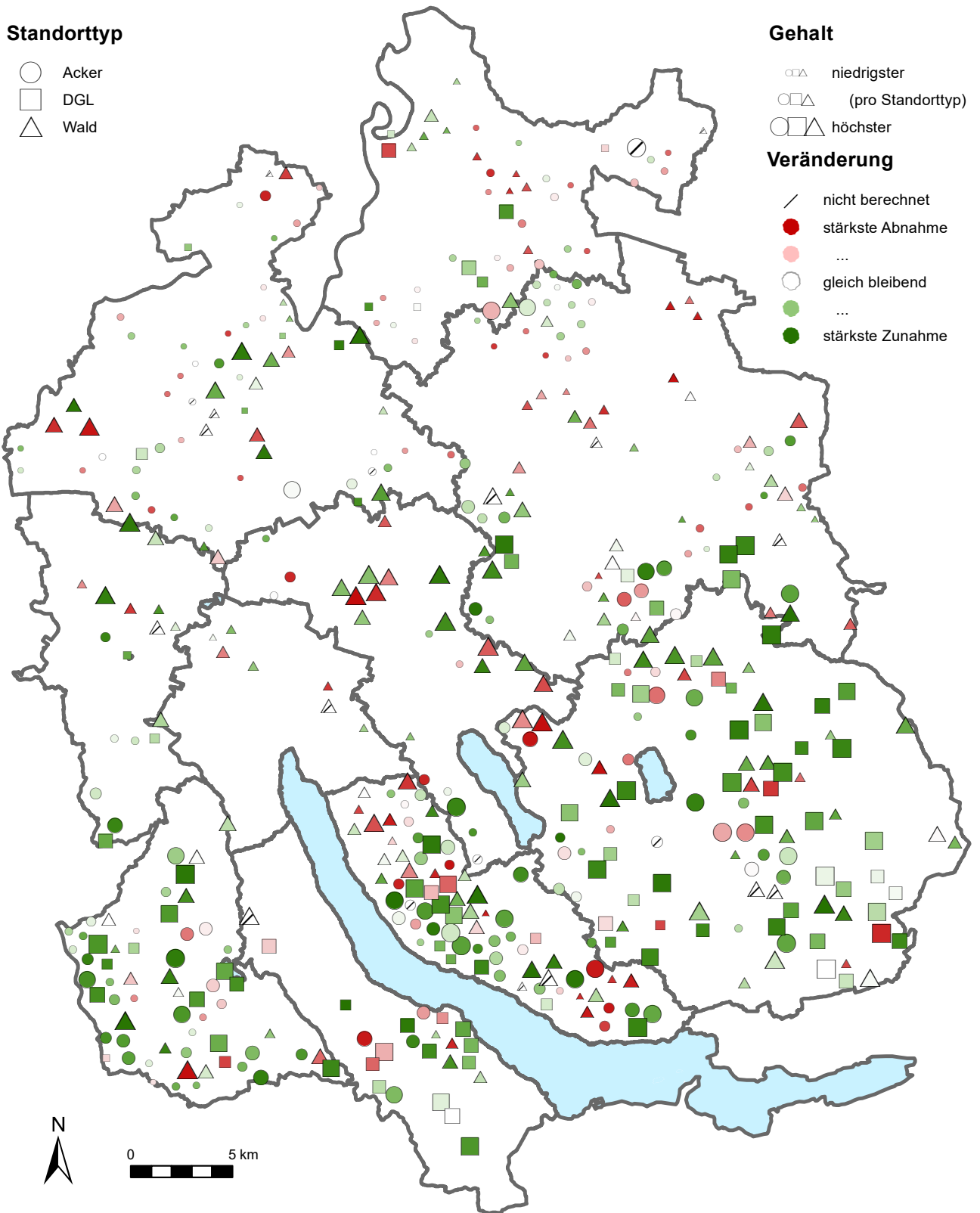


Abbildung 4: Übersicht aller 505 KaBo-Standorte (216 mit Nutzung Acker, 105 Dauergrünland, 184 Wald) mit verfügbarem Messwert aus der 5. Überwachungsperiode (Probenahmezeitpunkt zwischen 2015 und 2019) für den Humusgehalt (Gew.%) im Oberboden. Geographische Verteilung mit Grenzen der Raumplanungsregionen. Die Form des Symbols steht für die Nutzungsart, die Grösse für die Höhe des aktuellen Gehalts (gross = hoher Humusgehalt, klein = niedriger Gehalt) und die Farbe für die Veränderung zwischen 1. und 5. Überwachungsperiode (grün = Gehalt steigend, rot = sinkend, je dunkler der Farbton desto stärker die Veränderung). Aus Darstellungsgründen kann die Standortgenauigkeit bis 1500 m betragen.

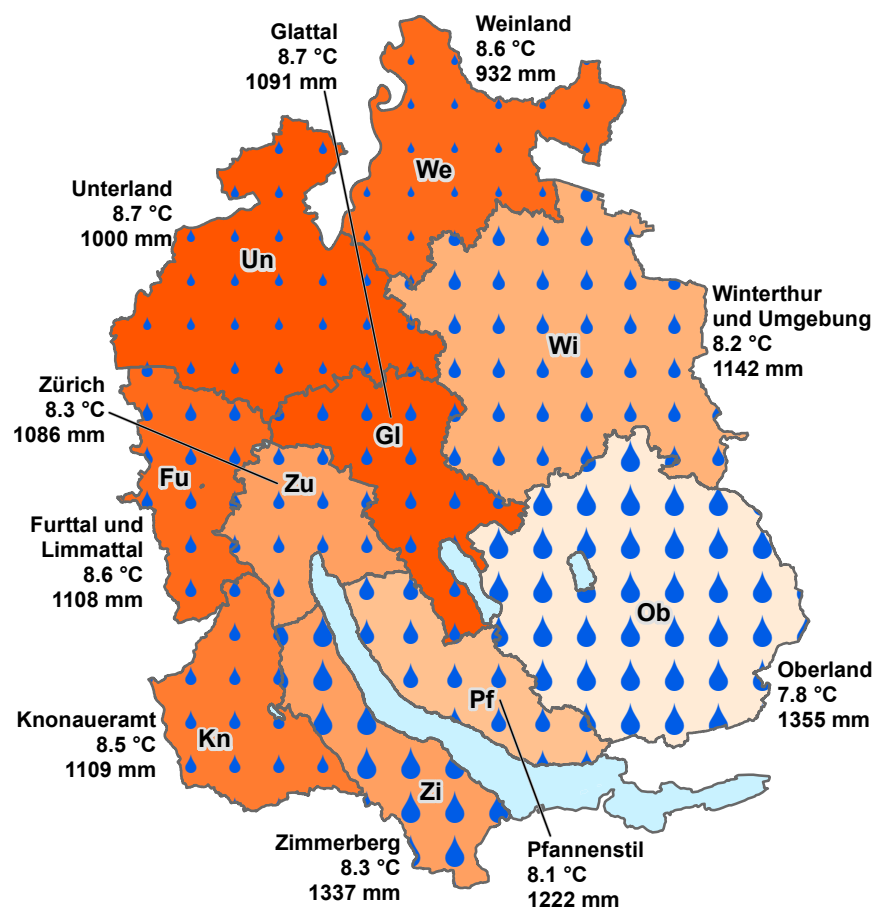
A. Details zu den Methoden

A.1. Standorte und Gruppierung

Für diesen Bericht wurden alle KaBo-Standorte mit mineralischen Böden und ohne konkrete Belastungsquelle berücksichtigt. Diese 508 Standorte wurden den Nutzungstypen Acker (inkl. Kunstwiese; 216 Standorte), Dauergrünland (DGL; 107 Standorte) und Wald (185 Standorte) zugeordnet. Diese Einteilung entspricht auf vielen der landwirtschaftlich genutzten Standorte nicht ohne Unterbruch der tatsächlichen Nutzung: Von den Dauergrünland-Standorten wurde fast die Hälfte mindestens einmal umgebrochen.

Zur geographischen Gruppierung der KaBo-Standorte wurden die Raumplanungsregionen herangezogen (vgl. Abb. A1). Die Regionen Furttal und Limmattal wurden zusammengefasst, da sie örtlich aneinandergrenzen und beide nur wenige KaBo-Standorte umfassen. Für jeden Standort liegen Informationen zur Jahresmitteltemperatur und dem mittleren Jahresniederschlag vor. In Abbildung A1 ist jeweils der Mittelwert der KaBo-Standorte pro Region dargestellt.

Abbildung A1: Raumplanungsregionen mit Kürzel, Jahres-Temperaturmittel (Hintergrundfarbe, je intensiver rot desto wärmer) und Jahresniederschlagsmenge (Tropfen-Signatur) der KaBo-Standorte.



A.2. Probenahme

Die erste Beprobung der KaBo-Standorte erfolgte von 1995 bis 1999, danach wurde die Beprobung alle 5 Jahre wiederholt. Dabei wurden Flächenmischproben (25 Einstiche mit einem Hohlmeisselbohrer mit 2 cm \varnothing) von stets derselben Fläche von 10 m \times 10 m (Acker, Dauergrünland) bzw. 20 m \times 20 m (Wald) entnommen. Beprobt wurde der Oberboden (0–20 cm Tiefe, zwei bis drei Replikate pro Erhebung) und der Unterboden (40–60 cm Tiefe, ein Replikat). Die Entnahme der Unterbodenproben wurde 2013 leicht modifiziert, um die Verschleppung von Bodenmaterial aus oberen Bodenschichten in die Unterbodenproben zu minimieren. Zur Bestimmung der Lagerungsdichte des Oberbodens werden Zylinderproben (Burgerzylinder 1000 cm³) entnommen (4–15 cm Tiefe, ein bis drei Replikate).

Für die 48 KaBo-Hauptstandorte wurden bei der ersten Beprobung je drei Profilgruben geöffnet und beprobt. Pro Bodenhorizont wurden jeweils drei Sackproben entnommen, die Beprobungstiefen sind daher für jedes Bodenprofil unterschiedlich. Die in Kap. 2.1 gezeigten Daten stammen von solchen Proben.

A.3. Bestimmung des Humusgehaltes

Die Kohlenstoffgehalte der Feinerde (<2 mm) wurden mittels Trockenveraschung in einem C-Analysator mit Temperaturrempe (LECO RC-612) analysiert. Die Bestimmung des organischen Kohlenstoffgehalts (C_{org}) erfolgte durch Oxidation im Sauerstoffstrom bei 550°C. Die Anteile an anorganischem Kohlenstoff wurden anschliessend bei Temperaturen von 550 bis 1000°C erfasst. Der Humusgehalt wurde mit $1.724 \cdot C_{org}$ berechnet. Die Humusgehalte in diesem Bericht beziehen sich auf die Trockensubstanz (105°C) der Feinerde.

Von 1997 bis 2008 nahm das Bodenlabor der FaBo regelmässig am ÖLN-Ringversuch teil. Der Vergleich der FaBo-Resultate mit dem Konsenswert des Ringversuchs zeigt, dass die Analysemethode der FaBo leicht höhere Gehalte liefert als die Schweizer Referenzmethode (nasschemische Oxidation mit einem Kaliumdichromat-Schwefelsäure-Gemisch). Aus 300 Datenpaaren des Ringversuchs wurde folgende Regressionsgleichung abgeleitet

$$C_{org, \text{Referenzmethode}} = 0.920(\pm 0.013) \cdot C_{org, \text{FaBo}} - 0.081(\pm 0.039)$$

A.4. Datenanalyse

Schwankungen bezüglich Messniveau der Kohlenstoffanalytik über die Zeit wurden durch eine so genannte Batch-Korrektur eliminiert. Hierbei werden die Analysenresultate jeder Messserie (= Batch) aufgrund der regelmässigen Messungen von Referenzproben mit einem robusten statistischen Verfahren korrigiert.

Bei Mehrfachbestimmungen einzelner Bodenproben wurde der Median für die Analyse verwendet, ebenso falls mehrere Replikate pro Beprobung analysiert wurden. Zur Beschreibung des aktuellen Gehaltes (Kap. 2.2 und 2.3) wurden die Werte der fünften Überwachungsperiode (2015–19) verwendet.

Die zeitliche Veränderung der Humusgehalte wurde bei allen Standorten ausgewertet, für die aus mindestens vier der fünf Überwachungsperioden Resultate vorlagen. Pro Standort wurde eine robuste lineare Regression für die log-transformierten Gehalte berechnet und basierend darauf beurteilt, ob eine signifikante Veränderung vorliegt. Mit Hilfe der Steigung der Regressionsgeraden wurde die im Bericht ausgewiesene Veränderung des Humusgehalts über 20 Jahre berechnet (und entspricht somit der Differenz zwischen den modellierten Werten für die fünfte und erste Überwachungsperiode).

Der Humusvorrat (= Masse Humus pro Bodenvolumen) wurde berechnet mit:

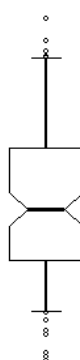
$$\text{Humusvorrat} = \text{Humusgehalt}_{\text{Feinerde}} \cdot \text{Volumen}_{\text{Feinerde}} \cdot \text{Lagerungsdichte}_{\text{Feinerde}}$$

$$\text{wobei } \text{Volumen}_{\text{Feinerde}} = \text{Volumen}_{\text{Gesamtboden}} - \text{Volumen}_{\text{Skelett}}$$

Die im Bericht gezeigten Vorräte beziehen sich auf den Oberboden (0-20 cm) und werden in kg pro Quadratmeter Boden gezeigt.

A.5. Darstellung

Im Bericht zeigen Boxplots die Verteilung der Daten, dabei gilt:

- 
- Waagrechtlicher Strich in der Box = Median (mittlerer Wert)
 - Box = Werte von 25 % bis 75 % Quantil (bzw. 1. bis 3. Quartil, umfasst 50 % der Werte)
 - Senkrechte Striche = Werte von 10 % bis 90 % Quantil (umfasst 80 % der Werte, «häufiger Bereich»)
 - Punkte = Einzelwerte bis zum 2.5 % resp. 97.5 % Quantil, Werte ausserhalb dieser Grenzen sind nicht abgebildet
 - Wenn sich die seitlichen Kerben zweier Boxen nicht überlappen, sind deren Mediane wahrscheinlich ($p < 0.05$) verschieden
 - Der Median der einzelnen Raumplanungsregionen ist mit einem Strich und dem entsprechenden Kürzel eingezeichnet, sofern er vom Kantonsmedian signifikant verschieden ist.