



# Verwitterungskarte für Waldböden

Modellierung der Verwitterung basischer Kationen für  
den Schweizer Wald.

Beat Rihm, Meteotest AG, Bern

Sabine Braun, Institut für Angewandte Pflanzenbiologie AG (IAP), Witterswil

Daniel Kurz, EKG Geo-Science, Bern

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

# **Impressum**

## **Auftraggeber**

Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abteilung Wald, 3003 Bern

## **Auftragnehmer**

Meteotest AG  
Fabrikstrasse 14  
CH-3012 Bern  
+41 31 307 26 26  
[www.meteotest.ch](http://www.meteotest.ch)

In Zusammenarbeit mit:

Institut für Angewandte Pflanzenbiologie AG (IAP), Witterswil, und  
EKG Geo-Science, Bern

## **Autoren**

Beat Rihm, Sabine Braun, Daniel Kurz

## **Begleitung BAFU**

Sabine Augustin, Abteilung Wald

## **Hinweis**

Dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst.  
Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Input-Daten</b> .....	<b>6</b>
2.1	Verwitterungsraten für Bodenprofile .....	6
2.2	Prädiktoren für das statistische Modell.....	7
2.2.1	Übersicht der Variablen .....	7
2.2.2	Geotechnische Karte der Schweiz (GT_CH_CLASS, WEIGHTGT) .....	8
2.2.3	Geologische Karte GK500 (VERWGEO13) .....	9
2.2.4	Geologische Karte 1:25'000 (CHLI_PH) .....	10
2.2.5	Identifizierung von kalkhaltigen Böden (KALK4) .....	12
2.2.6	Geländeparameter Mulde (SUMSECTPLUS) .....	14
<b>3</b>	<b>Das Regressionsmodell</b> .....	<b>15</b>
<b>4</b>	<b>Ergebnisse, Karten</b> .....	<b>19</b>
<b>5</b>	<b>Diskussion</b> .....	<b>21</b>
<b>6</b>	<b>Dank</b> .....	<b>23</b>
<b>7</b>	<b>Referenzen</b> .....	<b>24</b>
<b>8</b>	<b>Abkürzungen, Glossar</b> .....	<b>25</b>
<b>A</b>	<b>Legende GT_CH mit Verwitterungsklassen</b> .....	<b>26</b>
<b>B</b>	<b>Legende GK500 (GEOL_F) mit Verwitterungsklassen</b> .....	<b>28</b>
<b>C</b>	<b>Legende Lithologie</b> .....	<b>32</b>

# Tabellen

Tabelle 1:	Übersicht der erklärenden Variablen für das Modell mod12.....	7
Tabelle 2:	Definition der Verwitterungsklassen (GT_CH_CLASS) und Zuordnung eines ungefähren Wertebereichs. ....	9
Tabelle 3:	Definition der "Boden-pH"-Klassen (CHLI_PH) für GeoCover (V2) von Zischg und Frehner, 2020. ....	11
Tabelle 4:	Bewertung des Attributs TECTO_F aus der Geologischen Karte GK500 bezüglich Karbonatgehalt. 1: gemischt silikatisch und karbonatisch. 2: überwiegend karbonatisch. Die restlichen, hier nicht aufgeführten Codes von TECTO_F wurden als überwiegend silikatisch beurteilt. ....	13
Tabelle 5:	Regressionsoutput für das R-Modell Nummer 12 (mod12). Das adjustierte R <sup>2</sup> beträgt 0.42. ....	15

## Abbildungen

Abbildung 1: Modellierter Verwitterung von basischen Kationen in 0–60 cm Tiefe (BCw) auf 319 Waldbodenprofilen. ....	6
Abbildung 2: Einteilung der Geotechnischen Karte 1:200'000 in fünf Verwitterungsklassen. ....	9
Abbildung 3: Verwitterungsklassen (VERWGEO13), basierend auf GK500....	10
Abbildung 4: Klassierung von GeoCover (Version V2) nach "Boden-pH" (CHLI_PH) von Zischg und Frehner (2020). ....	11
Abbildung 5: Lithologie-Karte mit 53 Kategorien aus dem Atlas der Schweiz (IKG/ETH 2010).....	14
Abbildung 6: Streudiagramm der Schätzwerte für BCw aus Modell 12. Kalkstandorte sind blau markiert. Die "gemessene Verwitterung" bezieht sich auf die mit SAFE berechneten Referenzwerte. ....	16
Abbildung 7: Scatterplot der Residuen von Modell 12 gegen die Lithologiegruppen. ....	17
Abbildung 8 Visualisierung der Regressionen in Modell 12. Die Effekt-Plots zeigen die Beziehungen mit den einzelnen Prädiktoren unter Mittelung aller anderen Parameter. Obere Reihe: Interaktionen von TT_CELSIUS, SUMSECTPLUS und LAT_CH mit Kalk. Untere Reihe: VERWGEO13, GT_CH_CLASS und CHLI_PH. Schattierte Fläche: 95%-Vertrauensbereich. ....	18
Abbildung 9: Modellierter Verwitterung (BCw, Modell 12) für Schweizer Wälder auf dem LFI-Stichprobennetz 1km x 1 km (WSL 1990/92). Einheiten: $\text{kmol}_c \text{ha}^{-1} \text{Jahr}^{-1}$ ( $\text{keq} = \text{kmol}_c$ ).....	19
Abbildung 10: Modellierter Verwitterung (BCw, Modell 12) für Schweizer Wälder auf dem 100m-Stichprobennetz; Übersicht Schweiz (oben) und Detailausschnitt Brienzensee (unten). Einheiten: $\text{kmol}_c \text{ha}^{-1} \text{Jahr}^{-1}$ ( $\text{keq} = \text{kmol}_c$ ). ....	20

# 1 Einleitung

Im Rahmen der Arbeiten für die LRTAP-Konvention wurden in der Schweiz für ausgewählte gut untersuchte Waldstandorte kritische Eintragungsmengen (Critical Loads) für versauernde Luftschadstoffe modelliert (Kurz & Posch, 2015). Als integraler Bestandteil der Modellierung wurden auch die zwingend erforderlichen Verwitterungsraten (BCw) von basischen Kationen (BC = Ca, Mg, K, Na) nach der Methode von Sverdrup & Warfvinge (1995) berechnet. Die Bereitstellung der dafür benötigten Inputgrössen, namentlich der Bodenhorizont-spezifischen physikalisch-chemischen und mineralogischen Kennwerte, war mit erheblichem Aufwand verbunden.

Mit einer Machbarkeitsstudie sollte aufgezeigt werden, ob es möglich ist, mithilfe von Modellergebnissen für gut untersuchte Bodenprofile und unter Verwendung von flächenhaft vorhandenen Informationen zu Geologie, Topographie und Klima (Prädiktoren), eine Verwitterungskarte für Waldböden mittels statistischer Modelle zu berechnen. Damit wäre es möglich, Areale mit hoher Empfindlichkeit gegenüber Versauerung zu kartieren. Dies wäre ein wichtiger Schritt für eine flächenhafte Modellierung der Critical Loads für Säureeinträge, für Berechnungen der Nachhaltigkeit von Holzerntemassnahmen sowie künftig für die allfällige Berechnung des Kalkungsbedarfes für tiefgründig versauerte Waldböden. Hierfür lagen nun verbesserte Grundlagen zum Klima aus dem Forschungsprogramm Wald und Klimawandel vor, sowie verbesserte geologische Grundlagen aus den Geocover-Karten von Swisstopo.

Ab Herbst 2019 konnten weitere geostatistische Analysen mit einem erweiterten Datensatz durchgeführt werden. Die direkte Verwendung der harmonisierten geologischen Karten 1:25'000 (GeoCover von swisstopo) wurde geprüft, erwies sich allerdings als aufwändig und es waren anfänglich nicht alle Kartenblätter vorhanden. Es konnten jedoch aggregierte Informationen von GeoCover aus dem Projekt "Adaptierte Ökogramme – Update" (Huber et al. 2020) übernommen und verwendet werden.

Als Resultat liegt erstmalig eine Verwitterungskarte für Schweizer Waldböden vor. Es sind zwei Rasterdatensätze mit 1 km bzw. 100 m Auflösung verfügbar. Sie beziehen sich auf eine Bodentiefe von 0 bis 60 cm, welche für die Aufnahme von Nährstoffen durch die Baumwurzeln relevant ist.

## 2 Input-Daten

### 2.1 Verwitterungsraten für Bodenprofile

Verwitterungsraten für 319 gut untersuchte Bodenprofile wurden aus einer Modellierung mit dem dynamischen Bodenchemiemodell SAFE (Alveteg, 1998; SAEFL, 1998) extrahiert. SAFE berechnet die Verwitterungsraten für die Elemente Ca, Mg, K, Na, Al, Si und P für jede einzelne Bodenschicht des Bodenprofils mit einer zeitlichen Auflösung von einem Jahr. Klima- und Hydrologieinput (basierend auf Daten von Meteotest) wurden mit MetHyd (Bonten et al., 2016) modelliert. Depositions- und Nährstoffkreislaufinput wurden mit MakeDep (Alveteg et al., 2002) modelliert. Die benötigten Informationen zum Stoffkreislauf umfassen die Elementaufnahme durch die Bäume, den Streufall, die Ernte und die Mineralisierung, sie basieren auf Daten der WSL (WSL 2013), von Meteotest und von IAP (Kurz und Posch 2015). Die erforderlichen physikalisch-chemischen Bodendaten stammen von der WSL und vom IAP und die Bodenmineralogie wurde im Rahmen der Arbeiten für die LRTAP Konvention quantifiziert. Die Verwitterungsraten sind korrigiert für den Skelettgehalt (Kurz und Posch 2015).

Für die Kartierung wurde die Verwitterung der basischen Kationen (Ca, Mg, K, Na) in den obersten 60 cm des Bodens aufsummiert (BCw) und für den Zeitraum 1981 – 2010 gemittelt; das Ergebnis ist in Abbildung 1 dargestellt. Eine Bodentiefe von 60 cm wurde aufgrund der Studie von Braun et al. (2015) gewählt, welche zeigte, dass die Nährstoffaufnahme der Bäume überwiegend in diesem Tiefenbereich stattfindet.

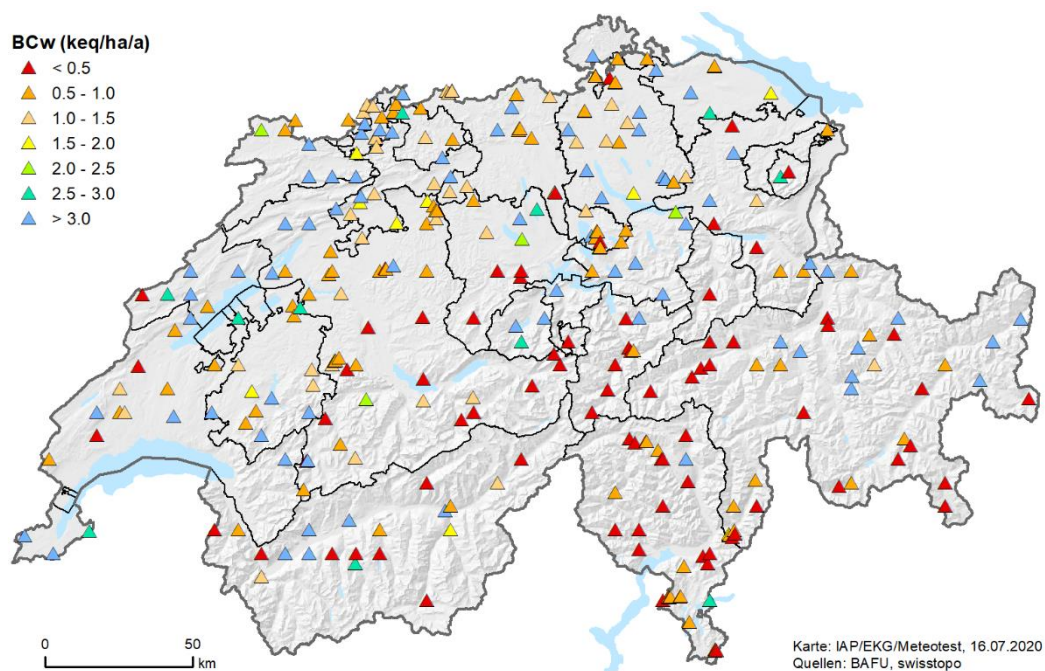


Abbildung 1: Modellierte Verwitterung von basischen Kationen in 0–60 cm Tiefe (BCw) auf 319 Waldbodenprofilen.

## 2.2 Prädiktoren für das statistische Modell

### 2.2.1 Übersicht der Variablen

Die Daten gemäss Tabelle 1 wurden als erklärende Variablen im statistischen Modell (Version mod12) zur Schätzung von BCw verwendet. Die Daten haben einen Bezug zur Mineralverwitterung, sie sind flächendeckend vorhanden und können daher für die Kartierung eingesetzt werden.

Die Variable LAT\_CH ist die Y-Koordinate, der Breitengrad, des jeweiligen Standortes. TT\_CELSIUS stammt aus einer Temperaturkarte, welche im Rahmen des Forschungsprogrammes Wald und Klimawandel unter Verwendung von Messungen der MeteoSchweiz erstellt wurde (Remund und Rihm 2016). Die übrigen Variablen werden in den folgenden Kapiteln erläutert.

Tabelle 1: Übersicht der erklärenden Variablen für das Modell mod12.

Name	Inhalt	
GT_CH_CLASS	Verwitterungsklassierung der Geotechnischen Karte der Schweiz (GT_CH)	
WEIGHTGT	Gewichtungsfaktor, der die Unsicherheit bei der Zuordnung der Verwitterungsklassen bewertet; je höher die Unsicherheit desto kleiner das Gewicht	
VERWGEOL13	Verwitterungsklassierung der Geologischen Karte GK500	
CHLI_PH	Klassierung "Boden-pH" der geologischen Vektordaten Geo-Cover, von Zischg und Frehner (2020)	
KALK4	Binäre Variable, 0=kein Kalk, 1=mit Kalk; hergeleitet aus zwei verschiedenen Datensätzen (Informationen zu Lithologie und Tektonik)	
TT_CELSIUS	Jahresmittel Temperatur 1981-2010, °C	
SUMSECTPLUS	Geländeparameter, Indikator für Muldenlage, m	
LAT_CH	Y-Koordinate in Projektionssystem LV03 (70'000 – 300'000 m)	

Es wurden zahlreiche weitere mögliche erklärende Variablen getestet, welche jedoch schliesslich nicht ins Modell aufgenommen wurden. Es waren dies: Lithologische Karte (Atlas der Schweiz), nutzbare Feldkapazität, Bodeneignungskarte (BEK), Niederschlag, Höhe, Orientierung, Hangneigung. Diese erwiesen sich bei der statistischen Analyse als nicht signifikant.

### 2.2.2 Geotechnische Karte der Schweiz (GT\_CH\_CLASS, WEIGHTGT)

Die Geotechnische Karte 1:200'000 wurde 1963–1967 von der Geotechnischen Kommission der Schweiz erstellt. 1990 wurde sie als Vektordatensatz digitalisiert und durch das Bundesamt für Statistik (BFS/GEOSTAT) unter dem Namen "Vereinfachte Geotechnische Karte der Schweiz" (GT\_CH) vertrieben. Heute ist der Vektordatensatz beim BFS nicht mehr erhältlich. Swisstopo vertreibt nur eine eingescannte Version<sup>1</sup> ohne Attribute, welche man on-line betrachten kann<sup>2</sup>. Für die vorliegende Auswertung wurde eine durch Meteotest archivierte Version von GT\_CH benutzt.

Die Legende von GT\_CH umfasst 28 Einheiten zum geologischen Untergrund. Diese wurden hinsichtlich ihrer Verwitterungseigenschaften gutachterlich in fünf Klassen (GT\_CH\_CLASS) eingeteilt, siehe Abbildung 2 und Anhang A. Da die geotechnischen Kartierungseinheiten hinsichtlich Verwitterungseigenschaften teilweise unterschiedliche Lithologien umfassen, wurde zudem der Bereich der zu erwartenden Verwitterungsraten mittels unterer und oberer Klassengrenze definiert. Die Klassen stellen eine ordinale Skala dar, wobei 1 die tiefste Verwitterungsrate und 5 die höchste Verwitterungsrate (kalkhaltiger Boden) bedeutet (Tabelle 2).

Die Gewichtungvariable WEIGHTGT wurde für das Modell mod12 wie folgt definiert:

$$\text{WEIGHTGT} = 1 / (\text{Breite} + 1)$$

wobei die Breite die Differenz zwischen der obersten und untersten wahrscheinlichen Verwitterungsklasse einer GT\_CH-Kategorie ist, siehe Anhang A. Mit der Gewichtungvariable kann man berücksichtigen, dass manche Substrate eine grosse mögliche Bandbreite der möglichen Verwitterung aufweisen, andere dagegen nicht. Dies verbessert die Aussagekraft des Modells.

---

<sup>1</sup> <https://opendata.swiss/de/dataset/geotechnische-karte-der-schweiz-1-200000>

<sup>2</sup> <https://map.geo.admin.ch>



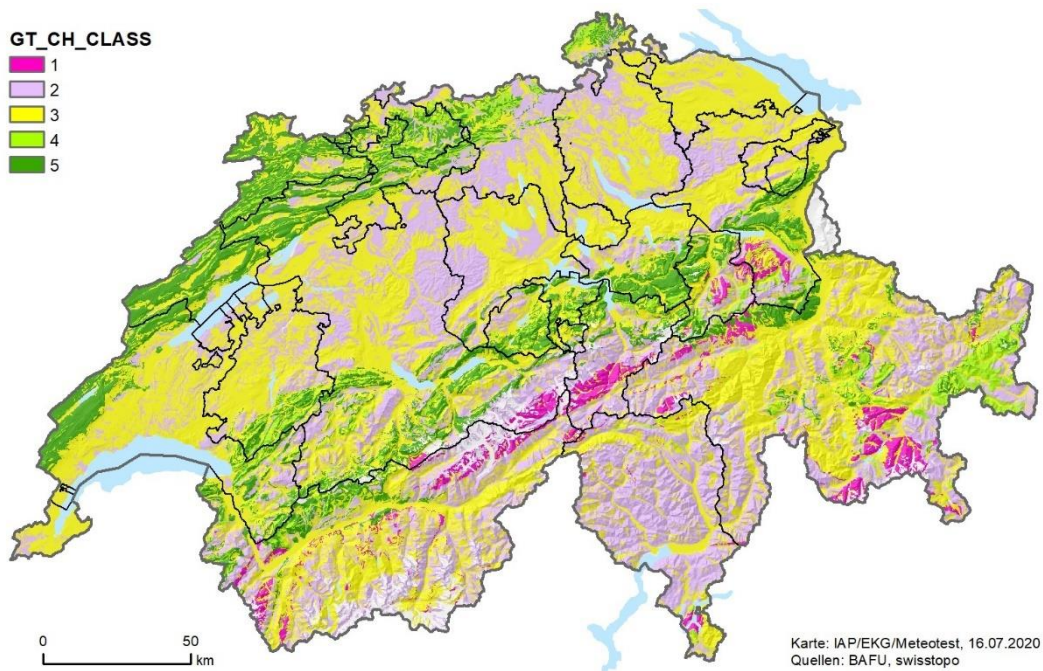


Abbildung 2: Einteilung der Geotechnischen Karte 1:200'000 in fünf Verwitterungsklassen.

Tabelle 2: Definition der Verwitterungsklassen (GT\_CH\_CLASS) und Zuordnung eines ungefähren Wertebereichs.

Klasse	Beschreibung	Bereich ( $\text{kmol}_c \text{ ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ )
1	sehr tiefe Verwitterungsrate	<0.3
2	tiefe Verwitterungsrate	0.3–1
3	mittlere Verwitterungsrate	1–3
4	hohe Verwitterungsrate	3–8
5	sehr hohe Verwitterungsrate (Kalk)	>8

### 2.2.3 Geologische Karte GK500 (VERWGEO13)

Die Geologische Karte 1:500'000 (GK500) ist in Vektorform bei swisstopo frei verfügbar<sup>3</sup>. Die 166 Codes (Attribut GEOL\_F) der GK500 wurden betreffend Verwitterungsrate gutachterlich in fünf Klassen eingeteilt (VERWGEO13, siehe Anhang B). Die fünf Klassen entsprechen der Definition gemäss Tabelle 2. VERWGEO13 ist in Abbildung 3 als Karte dargestellt. Ein Vergleich mit Abbildung 2 zeigt, dass VERWGEO13 v.a. in der Südschweiz mehr Flächen mit sehr tiefen BCw aufweist als GT\_CH\_CLASS.

<sup>3</sup> [https://shop.swisstopo.admin.ch/de/products/maps/geology/GK500/GK500\\_VECTOR](https://shop.swisstopo.admin.ch/de/products/maps/geology/GK500/GK500_VECTOR)

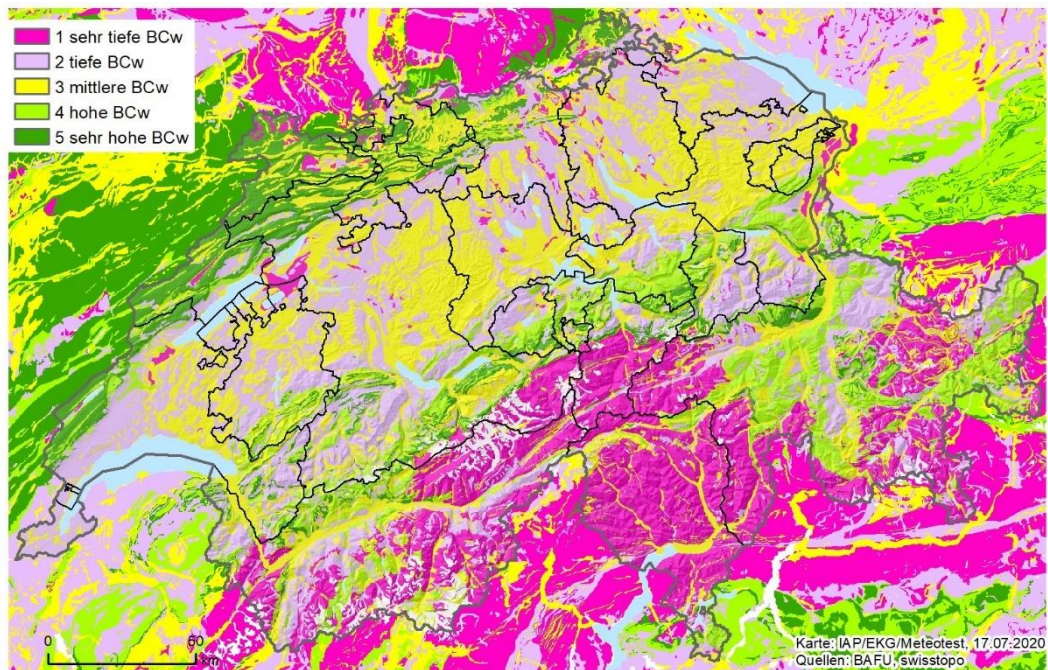


Abbildung 3: Verwitterungsklassen (VERWGEOL13), basierend auf GK500.

#### 2.2.4 Geologische Karte 1:25'000 (CHLI\_PH)

Unter dem Namen GeoCover vertreibt swisstopo<sup>4</sup> geologische Karten 1:25'000 im Vektorformat. Die Daten liegen als einzelne Datensätze pro Kartenblatt vor. Im Rahmen des Projektes "Adaptierte Ökogramme" haben Zischg und Frehner (2020) einen aggregierten Datensatz mit einer Klassierung hinsichtlich "Boden-pH" und "Tongehalt" erstellt. Die Klassierung erfolgte in einer halb-quantitativen Skala aufgrund von Expertenwissen und Literaturangaben (z.B. Meyer 2017).

Die beiden Datensätze wurden im statistischen Modell getestet, wobei die Boden-pH-Klassierung (CHLI\_PH, siehe Abbildung 4 und Tabelle 3) zur Verbesserung des Modells mod12 beitrug.

<sup>4</sup> [https://shop.swisstopo.admin.ch/de/products/maps/geology/GC\\_VECTOR](https://shop.swisstopo.admin.ch/de/products/maps/geology/GC_VECTOR)

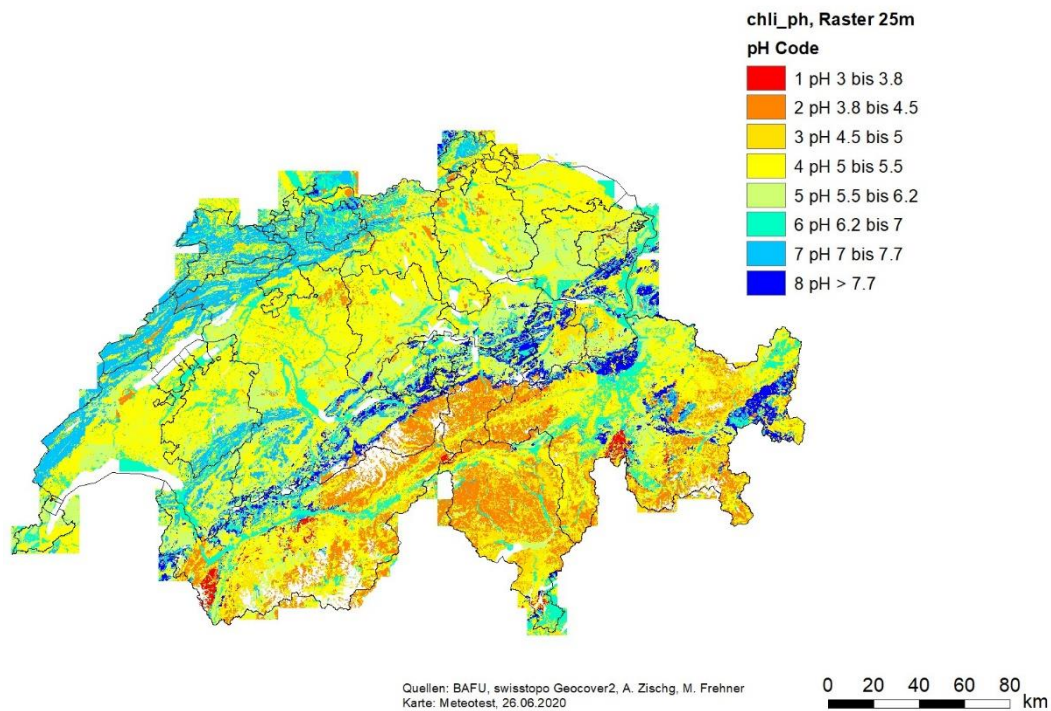


Abbildung 4: Klassierung von GeoCover (Version V2) nach "Boden-pH" (CHLI\_PH) von Zischg und Frehner (2020).

Tabelle 3: Definition der "Boden-pH"-Klassen (CHLI\_PH) für GeoCover (V2) von Zischg und Frehner, 2020.

CHLI_PH	Beschreibung	pH von	pH bis
1	Sehr sauer	3	3.8
2	Sehr sauer - sauer	3.8	4.5
3	Sauer	4.5	5
4	Sauer bis neutral	5	5.5
5	Neutral	5.5	6.2
6	Neutral bis leicht basisch	6.2	7
7	Leicht basisch	7	7.7
8	Basisch	7.7	14
9	Indifferent (kommt im Datensatz nicht vor)	3	8.6

### 2.2.5 Identifizierung von kalkhaltigen Böden (KALK4)

Die im Modell mod12 verwendete binäre Variable KALK4 unterscheidet Böden mit Kalk (1) und ohne Kalk (0). Kalkhaltige Böden wurden aufgrund von zwei Datensätzen definiert:

- Lithologie in 53 Klassen (siehe Abbildung 5 und Anhang C): Dieser Datensatz stammt aus dem Atlas der Schweiz (IKG/ETH 2010). Die Daten wurden durch Remund und Rihm (2016) als Rasterdatensatz aufbereitet.
- Die Geologische Karte 1:500'000 (GK500) ist in Vektorform bei swisstopo erhältlich<sup>5</sup>. Die 67 Codes des Attributs TECTO\_F wurden hinsichtlich ihrer Wahrscheinlichkeit für kalkhaltiges Ausgangsmaterial bewertet (siehe Tabelle 4).

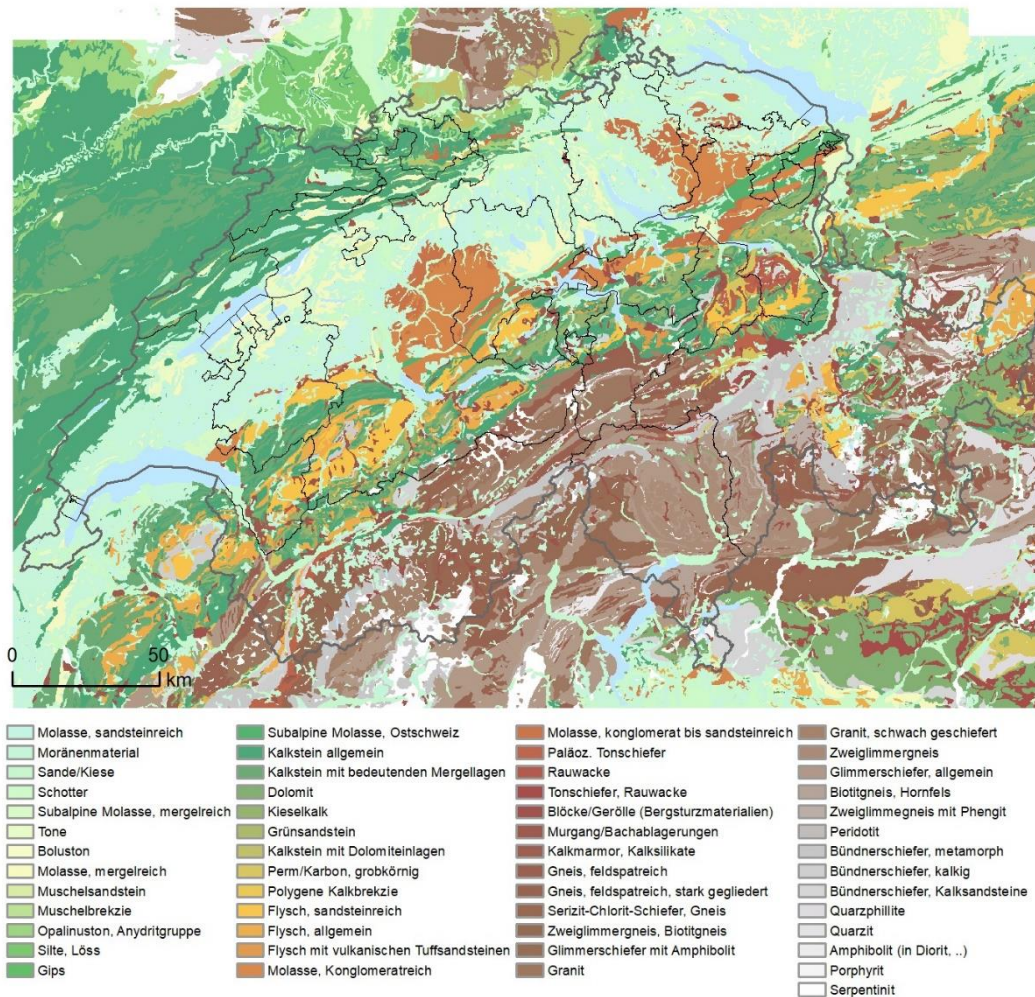
Die Variable KALK4 erhielt den Wert 1 bei folgenden Lithologien (Anhang C): 13 Gips, 15 Kalkstein allgemein, 16 Kalk mit bedeutenden Mergellagen, 17 Dolomit, 18 Kieselkalk, 20 Kalk mit Dolomiteinlagen, 55 Serpentin. Zusätzlich wurde KALK4 auch bei der Lithologie 31 (Blöcke/Gerölle) auf 1 gesetzt, sofern die Tektonik (TECTO\_F) auf kalkhaltiges Gestein schliessen lässt (Tabelle 4).

---

<sup>5</sup> [https://shop.swisstopo.admin.ch/de/products/maps/geology/GK500/GK500\\_VECTOR](https://shop.swisstopo.admin.ch/de/products/maps/geology/GK500/GK500_VECTOR)

Tabelle 4: Bewertung des Attributs TECTO\_F aus der Geologischen Karte GK500 bezüglich Karbonatgehalt. 1: gemischt silikatisch und karbonatisch. 2: überwiegend karbonatisch. Die restlichen, hier nicht aufgeführten Codes von TECTO\_F wurden als überwiegend silikatisch beurteilt.

<b>TECTO_F</b>	<b>Legende (LEG_TEK_2)</b>	<b>Karbonat</b>
ma	Tertiaere Graeben	1
mb	Interner Jura	1
mc	Mesozoische epivariszische Plattform	2
mk	Interner Jura	2
ml	Mittellaendische Molasse	1
mm	Mittellaendische Molasse	1
mn	Subalpine Molasse	1
nb	Tertiaere Sedimente und nordhelvetisches Tertiaer	1
nc	Autochthones und Parautochthones Mesozoikum	2
ni	Wildhorn-Decke	2
nj	Diablerets-Decke (inkl. Prapio-Audon-Schuppe)	2
nk	Axen-Decke	2
nk	Axen-Decke	1
no	Muertschen-Decke	2
nr	Einheiten in infrahelvetischer Stellung	2
ns	Allochthone Schuppenzone	1
nt	Subalpine Flysch-Zone	1
ob	Sedimentbedeckung	1
od	Lebendun-Decke	1
of	Zone von Sion-Courmayeur	1
oh	Niesen-Decke	1
oi	Nordpenninische Flysch-Decken	1
oj	Buendnerschiefer-Decken	1
pa	Breccien-Decke	2
pb	Klippen-Decke	2
qa	Flysch-Decken	1
qc	Gets-Decke	1
qg	Aroser Zone	1
re	Silvretta-Decke	1
ro	S-charl-Decke	2
se	Obere Orobische Decke	1
sf	Untere Orobische Decke	1



Karte: Meteotest, 05.08.2020

Abbildung 5: Lithologie-Karte mit 53 Kategorien aus dem Atlas der Schweiz (IKG/ETH 2010).

## 2.2.6 Geländeparameter Mulde (SUMSECTPLUS)

SUMSECTPLUS wird auf dem digitalen Höhenmodell mit 25 m Auflösung (DHM25) gerechnet. Es ist die Summe der positiven Höhendifferenzen zwischen dem umgebenden Gelände und dem Standort, wobei 8 Richtungssektoren (30°) bis zu einem Radius von 50 m ausgewertet werden. Der Parameter ist also ein Mass für Muldenlage.

Entsprechend ist SUMSECTMINUS die Summe der negativen Höhendifferenzen zwischen dem umgebenden Gelände und dem Standort. Es ist also ein Mass für Kuppenlage.

### 3 Das Regressionsmodell

Die statistischen Analysen wurden durch das IAP mit der Software R ausgeführt. Es wurden verschiedene Modelle getestet und iterativ auch weitere erklärende Variablen erfasst und verbessert. Schliesslich wurde das Modell Nummer 12 (mod12) als Karte umgesetzt, da es die Verwitterungsrate am besten berechnete.

In Tabelle 5 wird das Modell 12 vorgestellt. Es basiert auf einem linearen Modellsansatz (Funktion lm()). Wegen der beobachteten Nichtlinearität wurde die abhängige Variable BCw doppelt logarithmiert. Die entsprechende Variable LLBCVERW wurde wie folgt berechnet:

$$LLBCVERW = \ln(\ln(BCw)+10)$$

Für die grafische Darstellung (Abbildung 6) wurden die Werte dann auf einfache Logarithmierung rücktransformiert, um einen direkten Vergleich zu ermöglichen. Für die Darstellung auf den Karten in Kapitel 4 wurde wieder das untransformierte BCw genommen.

In der Notation von R (Modellgleichung im ersten Block von Tabelle 5) enthalten die Terme mit dem Multiplikationszeichen die einfachen Prädiktoren und deren Interaktionen; im zweiten Block der Tabelle sind die Interaktionen mit einem Doppelpunkt dargestellt. Die Funktion ns() ist ein Spline, welcher nicht-lineare Beziehungen berücksichtigt.

Tabelle 5: Regressionsoutput für das R-Modell Nummer 12 (mod12). Das adjustierte R<sup>2</sup> beträgt 0.42.

```
mod12 <- lm(LLBCVERW~GT_CH_CLASS+VERWGEOL13+ns(TT_CELSIUS,2)*KALK4
+LAT_CH*KALK4+KALK4*SUMSECTPLUS+CHLI_PH,verwitterungsraten60,
weights=WEIGHTGT)

Coefficients:
                Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)      1.827e+00  5.227e-02  34.960 < 2e-16 ***
GT_CH_CLASS      1.925e-02  9.199e-03   2.093 0.037166 *
VERWGEOL13      1.166e-02  7.526e-03   1.549 0.122380
ns(TT_CELSIUS, 2)1  4.131e-01  6.564e-02   6.294 1.07e-09 ***
ns(TT_CELSIUS, 2)2  1.017e-01  5.611e-02   1.813 0.070804 .
KALK4            5.633e-02  1.227e-01   0.459 0.646424
LAT_CH          3.721e-07  1.571e-07   2.368 0.018487 *
SUMSECTPLUS     1.060e-03  4.655e-04   2.277 0.023483 *
CHLI_PH         2.355e-02  6.184e-03   3.808 0.000169 ***
ns(TT_CELSIUS, 2)1:KALK4 -5.323e-01  1.478e-01  -3.601 0.000370 ***
ns(TT_CELSIUS, 2)2:KALK4 -2.298e-01  1.817e-01  -1.264 0.207068
KALK4:LAT_CH     8.263e-07  5.711e-07   1.447 0.148924
KALK4:SUMSECTPLUS 2.069e-03  9.113e-04   2.270 0.023880 *

Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.06135 on 307 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.4379, Adjusted R-squared:  0.4159
F-statistic: 19.93 on 12 and 307 DF, p-value: < 2.2e-16
```

Betreffend Topografie war SUMSECTMINUS (Mass für Kuppenlage) nicht signifikant, jedoch SUMSECTPLUS recht deutlich; die Verwitterung ist also in Muldenlagen erhöht. Die binäre Variable KALK4 weist mehrere Interaktionen auf. Durch die Anwendung von Splines (Funktion ns) auf TT\_CELSIUS werden nichtlineare Beziehungen mit der Temperatur berücksichtigt; damit konnte das Modell verbessert werden.

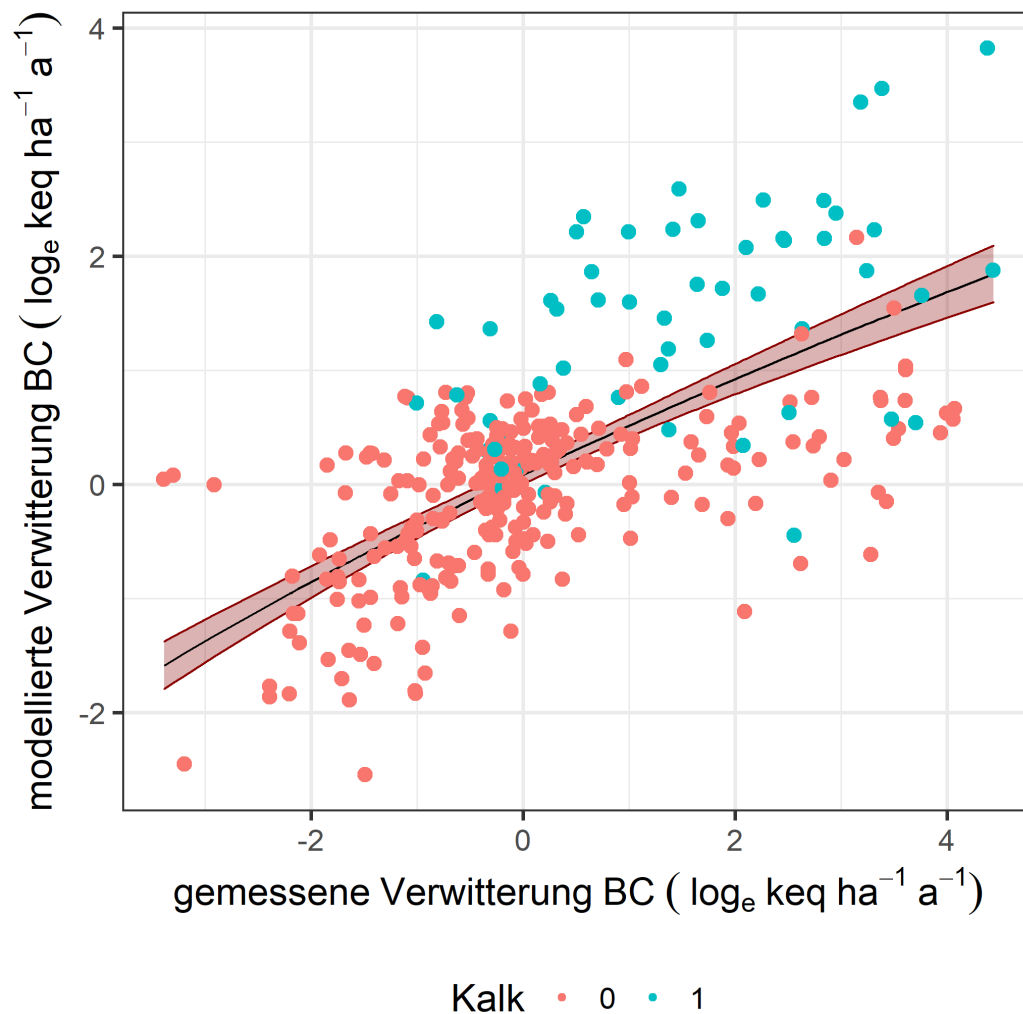


Abbildung 6: Streudiagramm der Schätzwerte für BCw aus Modell 12. Kalkstandorte sind blau markiert. Die "gemessene Verwitterung" bezieht sich auf die mit SAFE berechneten Referenzwerte.

Es wurden verschiedene Residuen-Analysen durchgeführt (siehe Beispiel in Abbildung 7) und damit die Definition von KALK4 optimiert, insbesondere für die Kategorie Lithologie-Gruppe Blöcke/Gerölle.



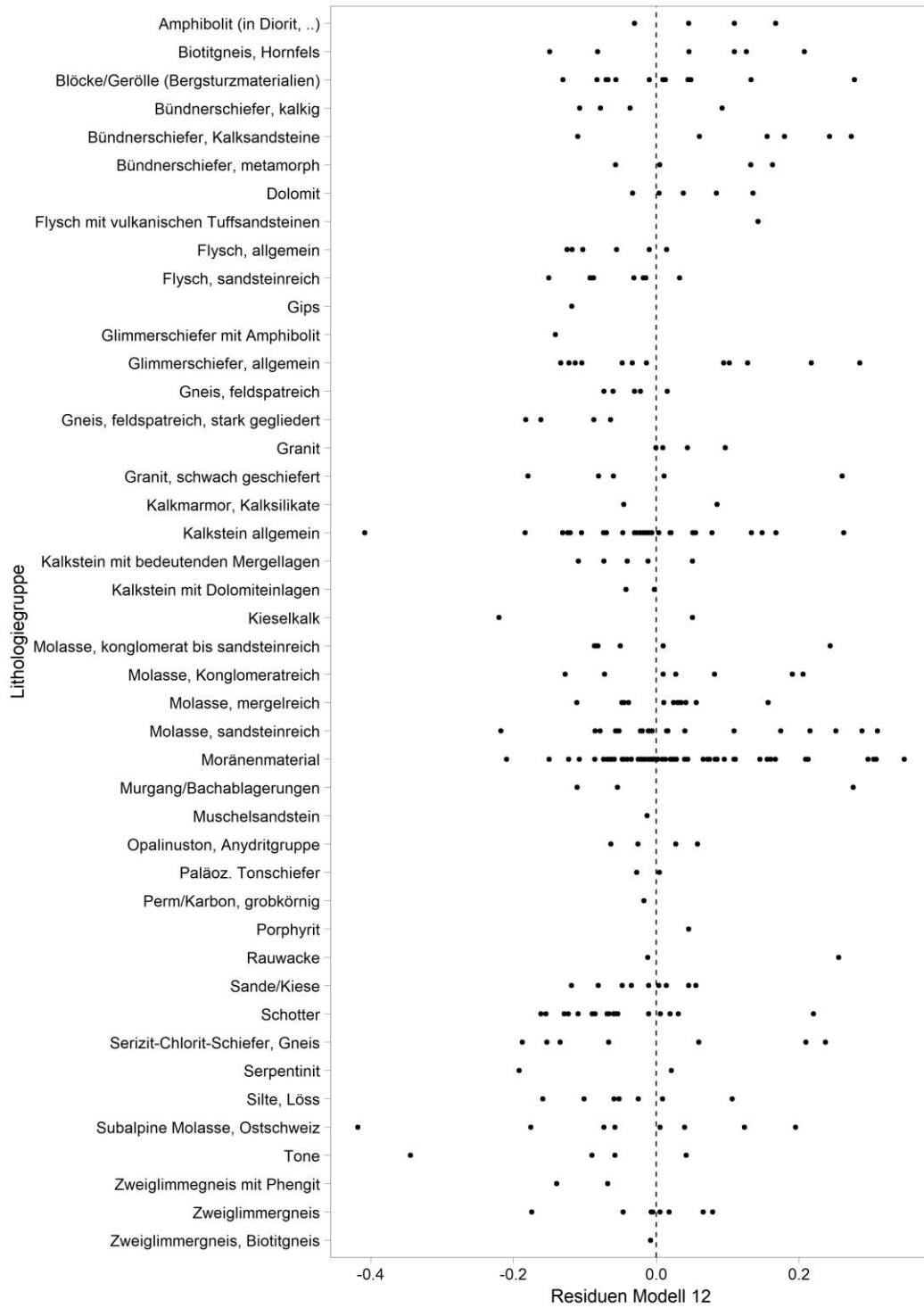


Abbildung 7: Scatterplot der Residuen von Modell 12 gegen die Lithologiegruppen.

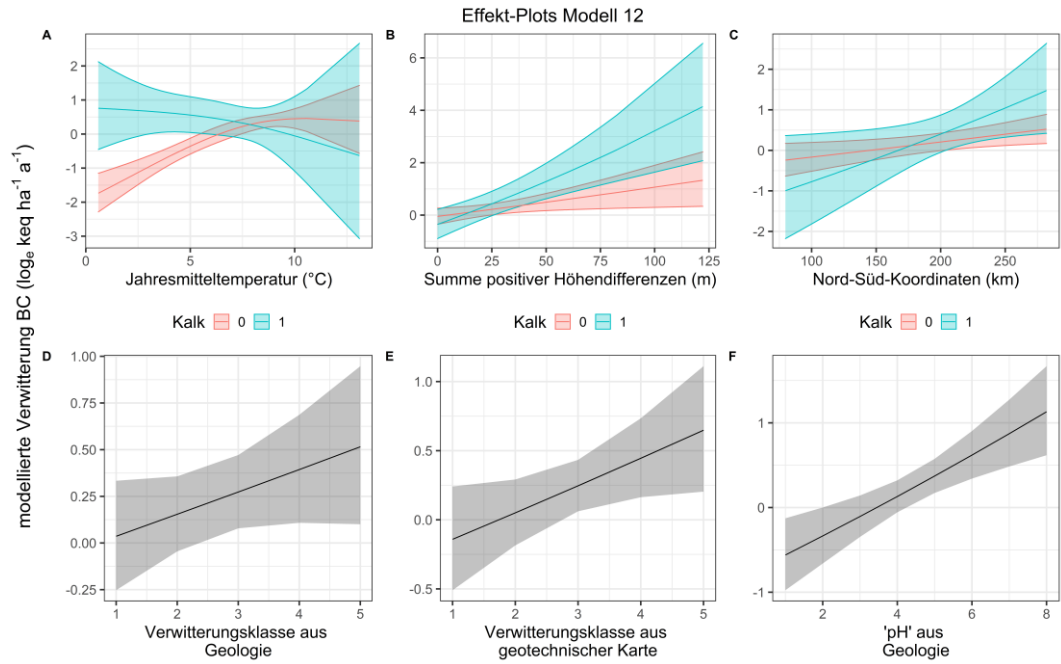


Abbildung 8 Visualisierung der Regressionen in Modell 12. Die Effekt-Plots zeigen die Beziehungen mit den einzelnen Prädiktoren unter Mittelung aller anderen Parameter. Obere Reihe: Interaktionen von TT\_CELSIUS, SUMSECTPLUS und LAT\_CH mit Kalk. Untere Reihe: VERWGEOL13, GT\_CH\_CLASS und CHLI\_PH. Schattierte Fläche: 95%-Vertrauensbereich.

## 4 Ergebnisse, Karten

Mit dem in R definierten Modell mod12 kann die Verwitterung für beliebige Stichprobenpunkte (LFI) geschätzt werden, sofern alle erforderlichen erklärenden Variablen vorhanden sind oder für die Punkte berechnet werden können. Es wurden zwei Varianten umgesetzt: Die 1 km x 1 km Stichprobenpunkte des Landesforstinventars (LFI) (Abbildung 9) und ein 100m-Gitter, welches die Waldfläche gemäss Arealstatistik (BFS 2013) ohne Gebüschwald und offenen Wald abdeckt (Abbildung 10).

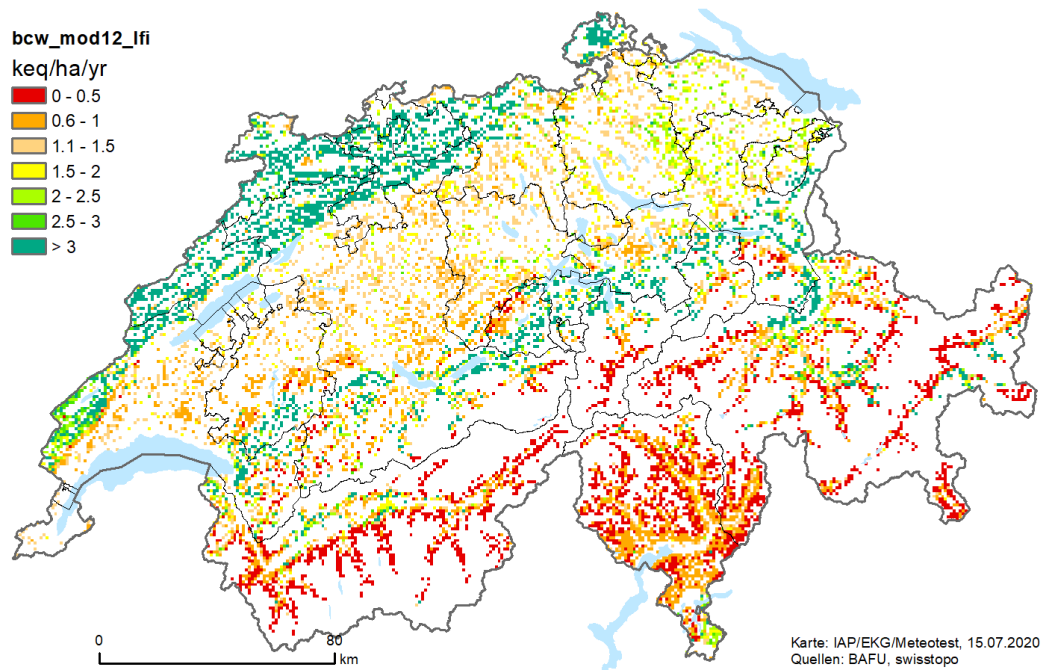


Abbildung 9: Modellierte Verwitterung (BCw, Modell 12) für Schweizer Wälder auf dem LFI-Stichprobennetz 1 km x 1 km (WSL 1990/92). Einheiten:  $\text{kmol}_c \text{ ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$  ( $\text{keq} = \text{kmol}_c$ ).

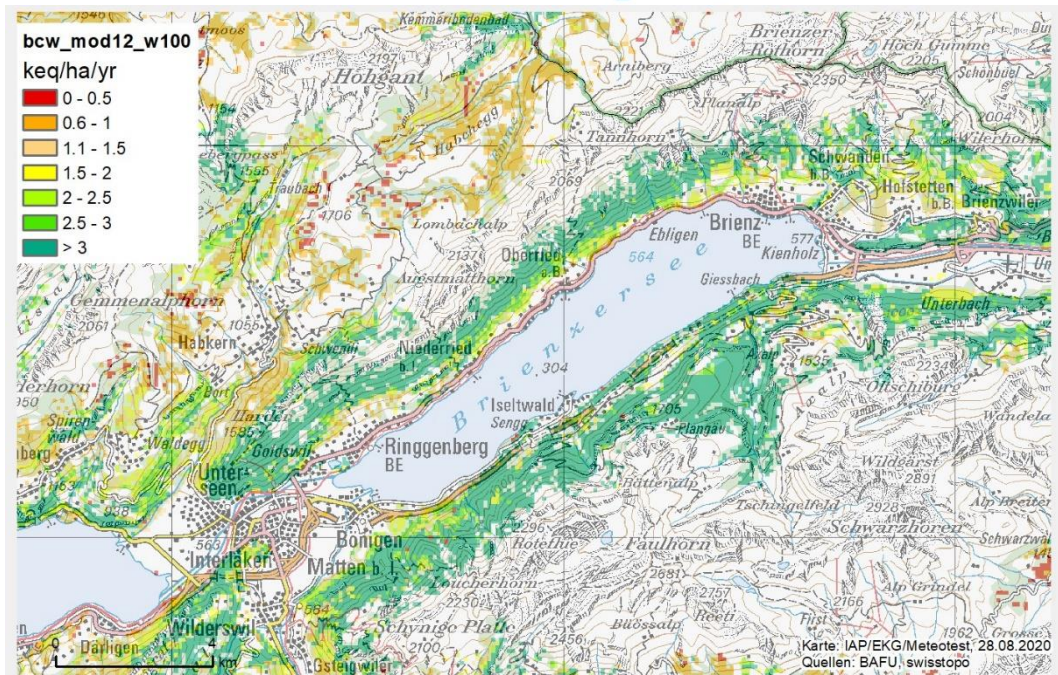
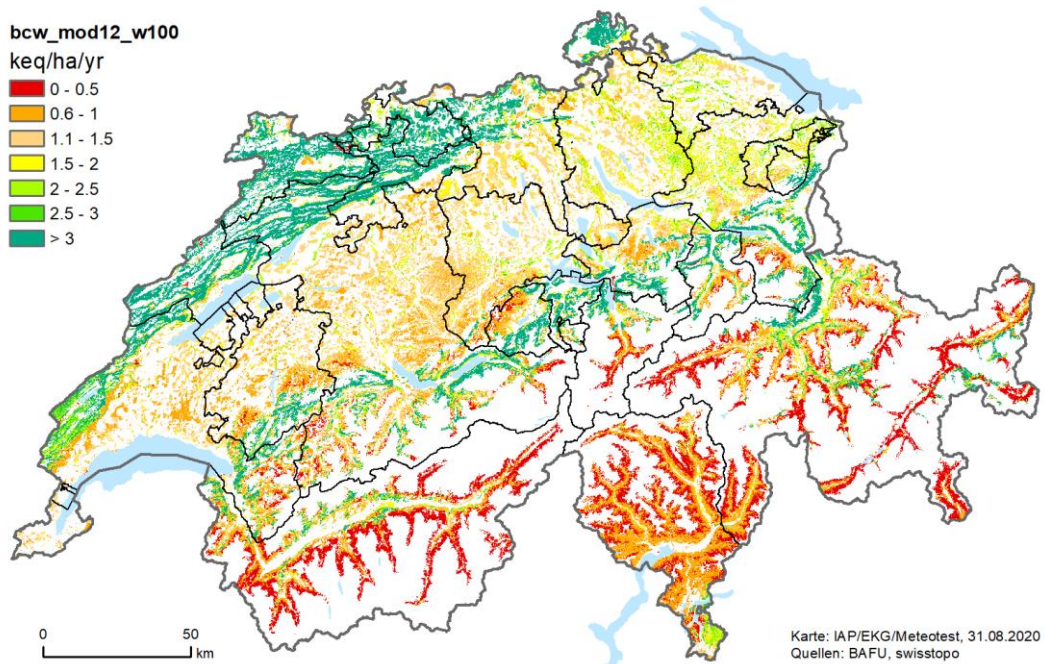


Abbildung 10: Modellierte Verwitterung (BCw, Modell 12) für Schweizer Wälder auf dem 100m-Stichprobenetz; Übersicht Schweiz (oben) und Detailausschnitt Brienzsee (unten). Einheiten:  $\text{kmol}_c \text{ ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$  (keq =  $\text{kmol}_c$ ).

## 5 Diskussion

Ein zentrales Element bei der Entwicklung des Regressionsmodelles zur Erklärung der Verwitterungsraten war die Unterscheidung von kalkhaltigen und kalkfreien Böden. Die Auflösung von Kalken und Silikaten unterliegen gegensätzlichen Temperatureinflüssen: Kalke lösen sich bei niedrigen Temperaturen besser, da das wichtigste Lösungsmittel für Kalke, die Kohlensäure  $H_2CO_3$ , bei niedrigen Temperaturen verstärkt gebildet wird (das Gas  $CO_2$  löst sich in kalten Wässern besser). Die gefundene Interaktion von Temperatur mit dem Kalk bestätigt dies: Kalkhaltige Substrate verwittern bei höheren Temperaturen langsamer, nicht-kalkhaltige geologische Materialien verwittern dagegen rascher bei höheren Temperaturen (Abbildung 8 A, siehe auch Prenzel 1985). Dass sich diese erwartete Interaktion zwischen Temperatur und Kalk in der Regression zeigte, bestätigt den statistischen Ansatz und die Qualität der Eingangsdaten.

Die Präsenz von Kalk verstärkt zudem den Effekt von Muldenlagen (Abbildung 8 B) und der geographischen Breite (Abbildung 8 C). Beide Interaktionen sind evtl. durch einen mit `TT_CELSIUS` nicht ausreichend quantifizierten Temperatureffekt beeinflusst, da der Effekt der beiden Interaktionen dem Temperatureffekt gleichgerichtet ist. Im Norden der Schweiz ist die Verwitterungsrate der kalkhaltigen Böden höher, im Süden tiefer als diejenige der kalkfreien Böden. Auch in Mulden, wo die Temperatur tiefer ist, ist die Verwitterung kalkhaltiger Böden höher. Die höhere Feuchtigkeit in Muldenlagen beeinflusst die Verwitterungsrate unabhängig von der Präsenz von Kalk (generelle positive Korrelation mit `SUMSECT-PLUS`).

Die unterschiedliche Löslichkeitskinetik von Kalken und Silikaten wurde durch eine Auswahl von Lithologie-Einheiten, die mit grosser Wahrscheinlichkeit Kalk enthalten, berücksichtigt, wobei die unspezifische Kategorie "Blöcke/Gerölle" durch tektonische Information aus der Geologischen Karte GK500 weiter differenziert wurde (Kapitel 2.2.5).

Ein wichtiger Datensatz für die räumliche Differenzierung von BCw war die Geotechnische Karte 1:200'000 (Kapitel 2.2.2), deren 28 Kategorien gutachterlich in fünf Verwitterungsklassen eingeteilt wurde (`GT_CH_CLASS`). Analog dazu wurde auch die geologische Information aus der GK500 klassiert (`VERWGEO13`). `VERWGEO13` ist zwar ein schlechterer Prädiktor als `GT_CH_CLASS`, trug aber dennoch zur Verbesserung des Modells bei. Folgende Eigenschaften der verwendeten geologischen und geotechnischen Karte erschwerten die Modellierung der Verwitterungsrate:

- Die Verwitterungsrate ist u.a. abhängig von der mineralogischen Zusammensetzung der Bodenmatrix, welche sich aus dem Bodenausgangsgestein gebildet hat. Auf der verwendeten geologischen Karte sind die Sedimentgesteine nach stratigraphisch-genetischen Gesichtspunkten und nicht nach Gesteinstyp (Lithologie) kartiert. Zwar hat eine geologische Einheit einen impliziten lithologischen Inhalt, aber der kann hinsichtlich Verwitterungseigenschaften variieren. Auch die Kartierungseinheiten der geotechnischen Karte umfassen oft

eine grosse Spannweite von Lithologien mit unterschiedlichen Verwitterungseigenschaften. Zudem sind Quartärablagerungen, auf denen ein beachtlicher Teil des Schweizer Waldes steht, auf beiden Karten hinsichtlich Lithologie nicht weiter spezifiziert.

- Im Vergleich zum Ausgangsgestein haben zudem Bodenbildungsprozesse, wie physikalische und chemische Verwitterung, Auswaschung gelöster Stoffe, Verlagerung von Ton und Sesquioxiden, Lösseintrag und Bodenumlagerungen die mineralogische Zusammensetzung und physikalisch-chemischen Eigenschaften der oberen Bodenschichten, welche für die Modellierung der Verwitterungsraten verwendet werden, verändert.

Die Variable CHLI\_PH (gutachterliche Einteilung der geologischen Karte 1:25'000 in acht Klassen des Boden-pH) trägt deutlich mehr zur Vorhersagekraft des Modells bei als die aus der geologischen Karte 1:500'000 (VERWGEO13) direkt geschätzten Verwitterungsklassen (Abbildung 8 F vs. D). CHLI\_PH ist zwar ein abgeleiteter Prädiktor, aber der Datensatz hat mit Abstand die höchste räumliche Auflösung.

Der Residuenplot gegen die Lithologiegruppen (Abbildung 7) zeigt, wo das Modell gut und wo es weniger gut funktioniert hat. Die Gruppe "Blöcke/Geröll" weist eine grosse Streuung auf, ebenso die Gruppe "Moränenmaterial". Dies sind beides Gruppen für Substrate mit recht heterogener Herkunft. Im Zuge der Auswertung wurde bei "Blöcke/Geröll" deshalb noch eine Differenzierung nach möglicher Substratherkunft vorgenommen. Einzelne Ausreisser, wie z.B. in den Gruppen "Flysch sandsteinreich", "Subalpine Molasse" oder "Moränenmaterial" sind möglicherweise Fehl-Allokationen der Profilstandorte auf Flächeninformationen. Solche Fehl-Allokationen sind durch die Verwendung von Karten mit verschiedenen (und auch kleinen) Massstäben unvermeidlich.

Die Ergebnisse dieser Machbarkeitsstudie zeigen demgemäss, dass die Informationen aus der geologischen und der geotechnischen Karte nur einen beschränkten Beitrag zur Reproduktion der Referenzverwitterungsraten liefern. Die Informationen, die das physikalisch-chemische Milieu der Mineralverwitterung des aktuellen Bodens beschreiben, wie der Kalkgehalt (der Lithologie entnommen), die Topographie sowie die Temperatur, hatten dagegen einen grossen Einfluss auf die Konvergenz von modellierten und Referenz-Verwitterungsraten. Der auf Basis der neuen geologischen Karte 1:25'000 (GeoCover) gutachterlich abgeleitete "Boden-pH" (Zischg und Frehner 2020) trug ebenfalls zur Verbesserung des Resultats bei.

In der Machbarkeitsstudie wurde eine erste flächendeckende Verwitterungskarte für Waldböden auf der Grundlage von kartierten Informationen erstellt. Die Karte basiert auf 319 gut untersuchten Bodenprofilen und einem statistischen Modell mit einem adjustierten  $R^2$  von 0.42. Die Ergebnisse des Modells stimmen auch mit dem Wissen über die Verwitterung und die sie bestimmenden Einflüsse überein – sie sind also plausibel. Die Karte gibt somit einen guten Überblick über die Verwitterung der Waldböden der Schweiz. Als Raster mit 100 m Auflösung ist sie

räumlich soweit differenziert, dass sie sich auch für die Planung waldbaulicher Massnahmen oder für die Modellierung von grösseren Naturräumen, wie zum Beispiel den Vegetationshöhenstufen (Huber et al. 2019), anbietet.

## **6 Dank**

Die Autoren bedanken sich bei Dr. M. Alveteg (Lund University, Schweden) und Prof Dr. H. Sverdrup (University of Iceland) für die Unterstützung bei der Modellierung und bei Drs. U-B. Brändli, M. Huber, S. Zimmermann and L. Walthert (WSL, Birmensdorf) für die Bereitstellung von benötigten Daten.

## 7 Referenzen

Alveteg M., 1998: *Dynamics of Forest Soil Chemistry*. PhD thesis, Department of Chemical Engineering II, Lund University, Lund, Sweden.

Alveteg M., Kurz D., Becker R., 2002: Incorporating nutrient content elasticity in the MakeDep model. Sustainable Forestry in Temperate Regions – Proceedings from a SUFOR International Workshop, April 7–9, 2002, Lund, Sweden. *Reports in Ecology and Environmental Engineering* 1:2002: 52–67.

BFS 2013: Swiss Land-Use Statistics (Arealstatistik), hectare raster with 72 basic categories. Swiss Federal Statistical Office (SFSO), Neuchâtel. <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/dienstleistungen/geostat/geodaten-bundesstatistik/boden-nutzung-bedeckung-eignung/arealstatistik-schweiz.html>

Bonten L.T.C., Reinds G.J., Posch M., 2016: A model to calculate effects of atmospheric deposition on soil acidification, eutrophication and carbon sequestration. *Environmental Modelling & Software* 79: 75-84.

Braun S., Belyazid S., Burger T., Stocker R., Kurz D., Remund J. und Rihm B. 2015. Erfassung und Behandlung gefährdeter Waldstandorte. Bericht 2006-2014. Bundesamt für Umwelt BAFU, 167 pp. [http://iap.ch/publikationen/braun\\_etal\\_2015\\_gefaehrdete\\_waldstandorte\\_iapbericht.pdf](http://iap.ch/publikationen/braun_etal_2015_gefaehrdete_waldstandorte_iapbericht.pdf)

Huber B, Gubelmann P, Zischg A, Augustin S, Frehner M. 2019. Modellierung der Vegetationshöhenstufen und der Areale von Buche und Tanne für die Schweiz. *Schweiz Z Forstwes* 170: 326–337.

Huber B., Zischg A., Frehner M. 2020 (in Bearb.): Berechnung der Vegetationshöhenstufen auf der Grundlage der CH2018 Szenarien für die Schweiz.

IKG/ETH, 2010: Atlas der Schweiz, Stand 2010. Institut für Kartografie und Geoinformation (IKG) der ETH Zürich. <https://karto.ethz.ch/forschung/atlas-der-schweiz.html>

Kurz D., Posch M. 2015: Revising critical loads of acidity for forests in Switzerland for the Call for Data 2014/15. Status Report, EKG Geo-Science, Bern. <https://www.aramis.admin.ch/Default.aspx?DocumentID=49550>

Meyer J., 2017: *Gesteine der Schweiz. Der Feldführer*. Haupt Verlag, Bern.

Prenzel J. 1985: Die maximale Löslichkeit von oberflächlich ausgebrachtem Kalk. *Allg. Forstzeitschrift* 41/1142.

Remund J. und Rihm B., 2016: Forschungsprogramm Wald und Klimawandel. Ergänzungen zum Projekt Trockenstress im Schweizer Wald. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL; Bundesamt für Umwelt. 22 p. <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/155803?show=full>



SAEFL (ed), 1998. Acidification of Swiss forest soils – Development of a regional dynamic assessment. Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL), Bern, Environmental Documentation Air/Forest 89.

Sverdrup H., Warfvinge P., 1995: Estimating field weathering rates using laboratory kinetics. In: AF White, SL Brantley (eds), Chemical Weathering of Silicate Minerals. Mineralogical Society of America, Reviews in Mineralogy 31: 485-541.

WSL 1990/92: Swiss National Forest Inventory (NFI), data extracts 30 May 1990 and 8 December 1992. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, Birmensdorf. <http://www.lfi.ch/index-en.php>

WSL, 2013. Schweizerisches Landesforstinventar LFI. Datenbankauszug vom 30.8.2013. Markus Huber. Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf.

Zischg A., Frehner M. 2020: Klassierung der geologischen Vektorkarten GeoCover V2 (swisstopo) nach Boden-pH und -Tongehalt im Rahmen des Projektes "Adaptierte Ökogramme". Lieferung als 25-m-Raster für die ganze Schweiz und Liechtenstein. Datenlieferung 24.6.2020 von Andreas Zischg, Universität Bern.

## 8 Abkürzungen, Glossar

BC	basische Kationen (Ca, Mg, K, Na)
BCw	Verwitterungsrate basischer Kationen, hier berechnet für 0–60 cm Bodentiefe
EKG	Firma EKG Geo-Science, Bern
GeoCover	Geologische Karten 1:25'000 in Vektorformat
GK500	Geologische Karte 1:500'000
GT_CH	Vereinfachte Geotechnische Karte der Schweiz 1:200'000
IAP	Institut für Angewandte Pflanzenbiologie AG, Witterswil
keq	kilo-Säureäquivalente, entspricht kmol <sub>c</sub>
kmol <sub>c</sub>	kilo-mol of charges
mod12	Bezeichnung für das aktuell verwendete Regressionsmodell für BCw
swisstopo	Bundesamt für Landestopografie
WSL	Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft

## A Legende GT\_CH mit Verwitterungsklassen

Die 28 Einheiten von GT\_CH wurden hinsichtlich ihrer Verwitterungseigenschaften in 5 Klassen eingeteilt (Spalte GT\_CH\_CLASS) inklusive obere und untere Grenze des wahrscheinlichen Bereiches (Lower class, Upper class und Breite).

ID	Beschreibung	GT_CH_CLASS	Lower class	Upper class	Breite
3	Sande bis Silte, meist tonig (Lehme), z.T. kalkhaltig (Löss), oft mit Geschieben (Grundmoränen) oder Schutt, fein bis grob, gemischt mit Sand, Silt und Ton (Obermoränen)	3	2	5	3
4	Tonige Silte bis Tone, bisweilen mit Einlagerungen von Sanden bis Kiesen (Seebodenlehme, Schwemmlerme, Gehängelehme)	3	2	3	1
5	Kiese und Sande, sauber oder siltig, bisweilen etwas verkittet (Schotter der Eiszeit)	2	2	3	1
6	Kiese und Sande, meist sauber, bisweilen mit tonig-siltigen Überdeckungen oder Einlagerungen, sowie ausgedehnte Geröllablagerungen (heutige Bachablagerungen)	3	1	5	4
7	Grössere Areale mit eckigem Schutt, oft von Blockgrösse (Bergsturzmaterial, Gehängeschutt)	3	1	5	4
8	Mergel, mit Einschaltungen von schwach verfestigten Sandsteinen, z.T. überwiegend, und vereinzelt von Konglomeraten oder Muschelsandsteinen	2	2	5	3
9	Mergel und Schiefertone bis Tonschiefer, mit Kalk-, Dolomit- und Sandsteinbänken, stellenweise mit Lagen von Gips- und Anhydritgesteinen	4	3	4	1
10	Rote, kalkfreie Sandsteine bis sandige Tonschiefer	2	1	2	1
11	Eisenschüssige, meist kalkfreie, magere bis fette Tone, oft mit Bohnerzen, Quarzsanden, Huppererden	2	1	3	2
12	Mergel, mit Einschaltungen von mittelstark verfestigten Sandsteinen, z.T. überwiegend, und vereinzelt von Konglomeraten Fels	3	1	4	3
13	Konglomerate, schwach bis mittelstark verfestigt, mit reichlich bis vorwiegend Sandstein- und Mergellagen	3	2	5	3
14	Konglomerate, schwach bis mittelstark verfestigt, stets begleitet von Sandstein- und Mergellagen	2	1	4	3
15	Konglomerate bis Brekzien, stark verfestigt, mit unterschiedlichen Anteilen an Arkosen und Sandsteinen, z.T. mit sandigen Phylliten und vulkanischen Gesteinen	2	1	4	3
16	Tonschiefer bis Phyllite, oft sandig, mit Einlagerungen von Sandsteinen und Brekzien bis Konglomeraten	1	1	3	2
17	Mergelschiefer bis Kalkphyllite, mit Einlagerungen von Sandsteinen, z.T. überwiegend	2	1	4	3
18	Kalkphyllite bis Kalkglimmerschiefer, häufig mit Einlagerungen von sandigen Kalkmarmoren, Dolomiten, Quarziten, kalkarmen Phylliten und Grünschiefern	3	1	4	3

19	Kalke allgemein, massige Ausbildung, häufig mit mergeligen Zwischenlagen, z.T. mit kieseligen Kalken und mit Grünsandsteinen	5	3	5	2
20	Kalke, Sandkalke bis Kieselkalke, verschiefert, mit Lagen von Mergelschiefern und Kalkphylliten, z.T. mit Hornsteinen und Dolomiten, selten mit Brekzien- bis Konglomeratstruktur	3	2	4	2
21	Bedeutende Lagen von Mergelschiefern und Mergelkalken	4	4	5	1
22	Dolomite und Rauwacken, z.T. mit Gipslagen	4	4	5	1
23	Granite, Quarzdiorite, Quarzsyenite und Diorite, vorwiegend homogen	1	1	2	1
24	Quarzporphyre, Porphyrite und Porphyrtuffe, massig bis leicht geschiefert	1	1	2	1
25	Quarzite, massig oder plattig bis schiefzig	1	1	1	0
26	Zweiglimmer- bis Biotitgneise, häufig mit reichlich Feldspat, z.T. mit Amphiboliten und hornblendeführenden Gneisen	2	1	3	2
27	Geschieferte, oft serizitreiche Konglomerate und Brekzien	2	1	3	2
28	Serizit-Chloritgneise bis -schiefer, homogen oder heterogen	2	1	3	2
29	Grünschiefer, mit Übergängen zu basischen Gesteinen	3	1	3	2
30	Serpentinite, selten mit Übergängen zu Peridotiten oder Olivinfelsen	3	2	3	1

## B Legende GK500 (GEOL\_F) mit Verwitterungsklassen

Die 166 Codes (GEOL\_F) der Geologischen Karte 1:500'000 (GK500) wurden betreffend Verwitterungsrate in 5 Klassen eingeteilt, siehe Spalte VERWGEOL13.

GEOL_F	LEG_GEOL	Geol-Gruppe	VERWGEOL13
aa	Alluvionen	Alluvionen	3
ab	Torf	Torf	1
ac	Schuttkegel	Schutt	3
ad	Hangschutt	Schutt	3
ae	Postglaziale Bergsturzmasse	Schutt	3
af	Sackungsmasse	Schutt	3
ag	Rutschmasse	Schutt	3
ah	Spaet- bis postglaziale Schotter in den Alpen	Schotter	3
ai	Jungpleistoaene Bergstuzmasse	Schutt	3
aj	Loess, Loesslehm, Verwitterungslehm	Löss	1
ak	Fluvioglaziale und glaziolakustrische Schotter (Hoch- und Niederterrassen)	Fluvioglazial	2
al	Moraene, mit Wall; inkl. rezente Moraene	Moräne	2
an	Aeltere fluvioglaziale Schotter (Deckenschotter)	Deckenschotter	1
ao	Oberflaechengewaesser		0
ap	Gletscher, Firn		0
ba	Sundgau-Schotter	Schotter	2
bb	Alte Verwitterungslehme, Hoehenlehme	Verwitterungslehm	1
bc	Fluvioglakustrische Ablagerungen im Bresse-Graben	Fluvioglazial	2
bd	Vogesen-Sande und -Schotter	Schotter	1
be	Langhien - Serravallien (Tortonien) (OSM)	Molasse	3
bf	Burdigalien (im Allgaeu inkl. Helvetien) (OMM)	Molasse	3
bg	Helvetien (OMM)	Molasse	3
bh	Aquitaniens (USM)	Molasse	3
bi	Chattien (USM)	Molasse	3
bj	Rupelien (UMM)	Molasse	3
bk	Rupelien (Fluviolakustrische bis saline Ablagerungen: Sannoisien)	Fluvioglazial	3
bl	Bohnerzformation		1
bo	Pontegana-Konglomerat (Messien) und marine Tone (Pliozaen)		1
ca	Albien und Oberkreide	Kreide	4
cb	Unterkreide	Kreide	4
cc	Malm	Malm	5
cd	Dogger	Dogger	3
ce	Lias	Lias	4
cf	Keuper	Trias	4
cg	Rhaet	Trias	1
ch	Muschelkalk	Trias	5
ci	Buntsandstein	Sandstein	1
cj	Perm (Rotliegendes)	Perm	2
ck	Oberkarbon	Karbon	2
cl	Altpalaeozoikum - Unterkarbon, ungegliedert	Karbon	2
cm	Unterkarbon	Karbon	2
da	Phonolithe	Ultrabazit	3
db	Olivin-Nephelinite	Ultrabazit	3
dc	Pyroklastika (Deckentuffe)	Ultrabazit	3
dd	Rhyolithe, Trachandesite, Andesite	Vulkanisch	2
de	Granite, Granodiorite	Granit	1
dg	Tonalite, Diorite, Gabbros	Gabbro	2
di	Basische Ganggesteine	Basalt	3

dj	Basaltische und metabasaltische Gesteine	Basalt	3
dk	Metagabbroide und eklogitische Gesteine	Metamorph	2
dl	Meta-Ultrabasite (Serpentinite, Talkschiefer; z.T. subkontinentaler Mantel)	Ultrabasit	3
dm	Rhyolithe, Dazite (inkl. Ignimbrite, Granophyre)	Vulkanisch	1
dn	Andesite, Basalte	Vulkanisch	2
ea	Granitporphyre, Granophyre	Granit	1
eb	Granite, Granodiorite, Quarzdiorite	Granit	1
ec	Granite, Granodiorite, Quarzdiorite	Granit	1
ed	Syenite, Monzonite	Feldspat	2
ee	Diorite, Gabbros	Gabbro	2
ef	Ultrabasite	Ultrabasisch	3
eg	Granite (spaet- bis postkinematisch) (Schwarzwald)	Granit	1
eh	Granite, migmatitische Granitoide (frueh- bis synkinematisch) (Schwarzwald)	Granit	1
ei	Granodiorite, Tonalite (z.t. anatektisch) (Schwarzwald)	Granit	1
ej	Quarzmonzonite (inkl. basischere Randfazies) (Vogesen)	Quarz	1
ek	Metagranitoide (Intrusionsalter nicht gesichert)	Granit	1
el	Metagranitoide, jungpalaeozoisches (variszisches) Intrusionsalter	Granit	1
em	Diatexite, Syntexite (Schwarzwald)	Granit	1
en	Metagranitoide, altpalaeozoisches (kaledonisches) Intrusionsalter	Granit	1
eo	Metagabbros, metabasalte (z.T. eklogitfaziell); Meta-Ultrabasite	Ultrabasisch	3
ep	Metaperidotite	Ultrabasisch	3
eq	Amphibolithe	Gneis	3
er	Gneise und Glimmerschiefer (inkl. Migmatite und Phyllite; vorw. Metasedimente)	Gneis	1
es	Quarzphyllit-Serien	Quarz	1
et	Glimmerschiefer und Paragneis mit Marmoren, Kalksilikatgesteinen, Amphiboliten und Pegmatiten der Tonale-Serie und der Scisti di Fobello e Rimella	Paragneis	2
eu	Kinzigitgneise	Gneis	1
ev	Einlagerungen von Marmoren und Kalksilikatfelsen		3
ew	Mylonite der Ivrea-Zone	Granit	1
fa	Gonfolite Lombarda (grobklastische Resedimente), inkl. Chiasso-Formation		3
fb	Palaeozoen und Eozoen		2
fc	Oberkreide	Kreide	4
fd	Oberkretazischer Flysch	Flysch	2
fe	Unterkreide	Kreide	4
ff	Dogger - Malm (z.T. inkl. Unterkreide)	Malm	5
fg	Malm	Malm	5
fh	Dogger	Dogger	3
fi	Unterlias bzw. Lias im Allgemeinen	Lias	4
fj	Mittel- und Oberlias	Lias	4
fk	Hauptdolomit (Norien) bzw. Trias im Allgemeinen	Dolomit	4
fl	Rhaet	Trias	5
fm	Raibler Schichten (Carnien)	Trias	4
fn	Ladinien und unteres Carnien (z.T. inkl. Anisien)	Trias	5
fo	Anisien	Trias	4
fp	Untertrias (z.T. inkl. Anisien) (Servino-Verrucano-Serien)	Trias	2
fq	Perm (Servino-Verrucano-Serien)	Perm	2

fr	Oberkarbon	Karbon	2
fs	Ordovizium - Perm (Grauwackenzone)	Perm	2
ft	Trias - Kreide (Walsertal-Zone)	Kreide	4
fu	Perm - Kreide (Canavese-Zone)	Kreide	4
ga	Jura - Kreide (z.T. inkl. Trias)	Kreide	4
gb	Dogger	Dogger	3
gc	Lias	Lias	4
gd	Hauptdolomit (Norien) bzw. Trias im Allgemeinen	Dolomit	4
ge	Rhaet	Trias	5
gf	Raibler Schichten (Carnien)	Trias	4
gg	Ladinien und unteres Carnien (z.T. inkl. Anisien)	Trias	5
gh	Anisien	Trias	4
gi	Perm	Perm	2
gj	Palaeozoikum - Kreide (Zone von Roisan)	Kreide	4
gk	Oberkarbon	Karbon	2
ha	Unterkreide und Flysch des Perrieres, Hundsrueck-Flysch (mit Ophiolithen und Graniten)	Kreide	3
hb	Flysch der Simmen-Decke	Flysch	2
hc	Flysch a Heminthoides, Plattenflysch	Flysch	2
hd	Gurnigel-, Schlieren- und Waegentaler Flysch, Flysch des Voirons	Flysch	2
he	Jura - Kreide (Buendnerschiefer)	Kreide	4
hf	Jura - Unterkreide der Simmen-Decke	Kreide	5
hg	Flysch der Aroser Zone	Flysch	2
hh	Perm - Kreide der Aroser Zone und der Platta-Decke (z.T. ostalpine Affinitaeten), mit Ophiolithen	Kreide	4
hi	Flysch im Allgemeinen	Flysch	2
hj	Flysch der Breccien-Decke (Palaeozoen - Eozoen)	Flysch	2
hk	Flysch der Tasna- und Klippen-Decke (Eozoen)	Flysch	2
hl	Aptien - Untereozoen (Couches rouges)	Kreide	2
hm	Unterkreide	Kreide	4
hn	Malm bzw. Jura im Allgemeinen	Malm	5
ho	Dogger	Dogger	3
hp	Lias	Lias	4
hq	Trias	Trias	4
hr	Permo-Trias	Trias	3
hs	Perm	Perm	2
ht	Permo-Karbon	Perm	2
hu	Oberkarbon	Karbon	2
hv	Jura - Unterkreide der Breccien-Decke	Kreide	4
hw	Trias - Kreide (z.T. bis Eozoen) der Siviez-Mischabel-, Tambo-, Suretta- und Mont-Rosa-Decke	Kreide	4
hy	Perm - Kreide (Frilihorn- und Cimes-Blanches-Decke)	Kreide	4
hz	Jura - Kreide der Schamser Decken	Kreide	4
ia	Flysch im Allgemeinen	Flysch	2
ib	Niesen-Flysch	Flysch	2
ic	Wildflysch der Zone Submediane	Flysch	2
id	Tomuel- und Praetigau-Flysch, Flysch der Zone von Roz-Champatsch	Flysch	2
ie	Lichtensteiner und Vorarlberger Flysch	Flysch	2
if	Roignais-Versoyen-Flysch	Flysch	2
ig	Complexe anteflysch et formation basale	Flysch	2
ih	Tertiaer (Unites de la Pierre Avoi et des Cols)		3
ii	Schiefer der Unites de Ferret (Oberkreide und oder Tertiaer)	Kreide	3

ij	Malm - Kreide (Buendnerschiefer, Grava- und Tomuel-Decke)	Kreide	4
ik	Jura der Zone Submediane, Niesen- und Aul-Decke	Malm	5
il	Mesozoikum des externen Nordpenninikums		3
im	Karbonatarme Metakonglomerate der Le-bendun-Decke	Karbon	2
in	Trias	Trias	3
io	Perm	Perm	2
ip	Karbon	Karbon	2
ja	Ultrahevetische Flysche im Allgemeinen, Wild-flysch (Gros-Plane, Habkern, Liebenstein u.a.)	Flysch	2
jb	Flysch du Meilleret, Sardona-Fysch, Feu-erstaetter Decke	Flysch	2
jc	Abgeschertes und eingewickeltes Suedhelveti-kum (Schuppenzone von Einsiedeln und Wild-haus, Blattengrat-Komplex, Ragazer Flysch, Unterlage des Faehnernspitz, Schuppenzone von Liebenstein)	Flysch	2
jd	Subalpiner Flysch (z.T. nordhelvetisch)	Flysch	2
je	Nordhelvetischer Flysch (Matter Formation, Engi-Dachschiefer, Altdorfer Sandstein, Gres du Val d'Illicz, Gres de Taveyenne)	Flysch	2
jf	Globigerinenschiefer, neritische Sandsteine und Kalke (Nummuliten-, Lithothamnienkalke)	Sandstein	2
jg	Oberkreide	Kreide	4
jh	Unterkreide	Kreide	4
ji	Malm	Malm	5
jj	Bathonien - Oxfordien	Dogger	3
jk	Trias - Dogger	Dogger	3
jl	Dogger	Dogger	3
jm	Lias	Lias	4
jn	Trias	Trias	3
jo	Perm (Verrucano)	Perm	2
jp	Oberkarbon (- Unterperm)	Karbon	2
jq	Devon - Unterkarbon	Karbon	2

## C Legende Lithologie

Der Datensatz der Lithologie umfasst 53 Codes (Spalte LitMapVal); Code 45 und 46 kommen nicht vor. Quelle: Atlas der Schweiz (IKG/ETH 2010), Remund und Rihm (2016). Die gutachterlich bestimmten Verwitterungsklassen (wealit) wurden im Modell mod12 nicht benutzt.

LitMapVal	LitGrpVal	Substratgr uppe	Lithologien	wea_class	wealit_min	wealit_max	wealit_mitte	wealit_breit
1	3	Glaziale Lehmsande	Molasse, sandsteinreich	2-3	2	3	2.5	1
2	3	Glaziale Lehmsande	Moränenmaterial	2-4	2	4	3.0	2
3	1	Sandsubstrate	Sande/Kiese	2-4	2	4	3.0	2
4	7	Grobklastische Materialien	Schotter	2-4	2	4	3.0	2
5	5	Festgestein, tonig verw.	Subalpine Molasse, mergelreich	3-4	3	4	3.5	1
6	5	Festgestein, tonig verw.	Tone	2-4	2	4	3.0	2
7	5	Festgestein, tonig verw.	Boluston	1-2	1	2	1.5	1
8	5	Festgestein, tonig verw.	Molasse, mergelreich	3-4	3	4	3.5	1
9	1	Sandsubstrate	Muschelsandstein	2-4	2	4	3.0	2
10	7	Grobklastische Materialien	Muschelbrekzie	2-4	2	4	3.0	2
11	5	Festgestein, tonig verw.	Opalinuston, Anhydritgruppe	2-3	2	3	2.5	1
12	2	Löss	Silte, Löss	1-3	1	3	2.0	2
13	5	Festgestein, tonig verw.	Gips	3-4	3	4	3.5	1
14	5	Festgestein, tonig verw.	Subalpine Molasse, Ostschweiz	2-4	2	4	3.0	2
15	5	Festgestein, tonig verw.	Kalkstein allgemein	4-5	4	5	4.5	1
16	5	Festgestein, tonig verw.	Kalkstein mit bedeutenden Mergellagen	3-5	3	5	4.0	2
17	5	Festgestein, tonig verw.	Dolomit	3-5	3	5	4.0	2
18	7	Grobklastische Materialien	Kieselkalk	1-3	1	3	2.0	2
19	1	Sandsubstrate	Grünsandstein	1-3	1	3	2.0	2
20	5	Festgestein, tonig verw.	Kalkstein mit Dolomiteinlagen	3-5	3	5	4.0	2
21	1	Sandsubstrate	Perm/Karbon, grobkörnig	1-2	1	2	1.5	1
22	7	Grobklastische Materialien	Polygene Kalkbrekzie	3-4	3	4	3.5	1
23	4	Brackisch/marine Ablagerungen	Flysch, sandsteinreich	1-3	1	3	2.0	2
24	4	Brackisch/marine Ablagerungen	Flysch, allgemein	1-3	1	3	2.0	2
25	4	Brackisch/marine Ablagerungen	Flysch mit vulkanischen Tuffsandsteinen	2-3	2	3	2.5	1
26	7	Grobklastische Materialien	Molasse, Konglomeratreich	2-4	2	4	3.0	2
27	7	Grobklastische Materialien	Molasse, konglomerat bis sandsteinreich	2-3	2	3	2.5	1
28	5	Festgestein, tonig verw.	Paläoz. Tonschiefer	1-3	1	3	2.0	2
29	7	Grobklastische Materialien	Rauwacke	2-3	2	3	2.5	1
30	7	Grobklastische Materialien	Tonschiefer, Rauwacke	1-3	1	3	2.0	2
31	7	Grobklastische Materialien	Blöcke/Gerölle (Bergsturzmaterialien)	1-4	1	4	2.5	3
32	7	Grobklastische Materialien	Murgang/Bachablagerungen	2-4	2	4	3.0	2
33	6	Festgestein, sandig verw.	Kalkmarmor, Kalksilikate	3-5	3	5	4.0	2
34	6	Festgestein, sandig verw.	Gneis, feldspatreich	1-3	1	3	2.0	2
35	6	Festgestein, sandig verw.	Gneis, feldspatreich, stark gegliedert	1-3	1	3	2.0	2
36	6	Festgestein, sandig verw.	Serizit-Chlorit-Schiefer, Gneis	2-3	2	3	2.5	1
37	6	Festgestein, sandig verw.	Zweiglimmergneis, Biotitgneis	1-3	1	3	2.0	2
38	6	Festgestein, sandig verw.	Glimmerschiefer mit Amphibolit	2-3	2	3	2.5	1
39	6	Festgestein, sandig verw.	Granit	1-2	1	2	1.5	1
40	6	Festgestein, sandig verw.	Granit, schwach geschiefert	1-2	1	2	1.5	1
41	6	Festgestein, sandig verw.	Zweiglimmergneis	1-2	1	2	1.5	1
42	6	Festgestein, sandig verw.	Glimmerschiefer, allgemein	1-3	1	3	2.0	2
43	6	Festgestein, sandig verw.	Biotitgneis, Hornfels	1-3	1	3	2.0	2
44	6	Festgestein, sandig verw.	Zweiglimmergneis mit Phengit	1-2	1	2	1.5	1
45	5	Festgestein, tonig verw.	Basische Gesteine (Gabbro)	2-3	2	3	2.5	1
46	5	Festgestein, tonig verw.	Metabasische Gesteine	2-3	2	3	2.5	1
47	5	Festgestein, tonig verw.	Peridotit	3-4	3	4	3.5	1
48	5	Festgestein, tonig verw.	Bündnerschiefer, metamorph	2-3	2	3	2.5	1
49	5	Festgestein, tonig verw.	Bündnerschiefer, kalkig	2-5	2	5	3.5	3
50	5	Festgestein, tonig verw.	Bündnerschiefer, Kalksandsteine	2-4	2	4	3.0	2
51	6	Festgestein, sandig verw.	Quarzphillite	1-2	1	2	1.5	1
52	6	Festgestein, sandig verw.	Quarzit	1	1	1	1.0	0
53	6	Festgestein, sandig verw.	Amphibolit (in Diorit, ..)	2-3	2	3	2.5	1
54	6	Festgestein, sandig verw.	Porphyrit	1-2	1	2	1.5	1
55	5	Festgestein, tonig verw.	Serpentinit	3-4	3	4	3.5	1