

Zeitschrift: Schweizerische mineralogische und petrographische Mitteilungen =
Bulletin suisse de minéralogie et pétrographie

Band: 5 (1925)

Heft: 2

Artikel: Die chemische Gesteinsverwitterung in der Schweiz

Autor: Niggli, Paul

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-7347>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 13.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Die chemische Gesteinsverwitterung in der Schweiz.

Von *Paul Niggli*.

Die Frage nach der Art und dem Umfang der chemischen Verwitterung von Gesteinen in der Schweiz ist eine völlig ungelöste. So enthält beispielsweise der I. Teil des Werkes „Die Vegetation der Schweiz“ von *H. Brockmann-Jerosch* (Beiträge zur geobotanischen Landesaufnahme 12. 1925), betitelt „Der Boden“, keine einzige Analyse, welche über die Verwitterungsvorgänge Aufschluß geben würde. Es ist selbstverständlich, daß unter derartigen Umständen auch über die für die Vegetation so wichtigen, speziellen Bodenverhältnisse nur allgemeine Mutmaßungen möglich sind. Das ist für ein Land wie die Schweiz, in dem Land- und Forstwirtschaft eine so große Rolle spielen, ein unhaltbarer Zustand. Aber auch der Petrograph, der seine Untersuchungen nicht in allen Fällen an absolut frischem Gesteinsmaterial ausführen kann, wird wissen wollen, wie sich bei beginnender Verwitterung die chemischen Verhältnisse verschieben. Und schließlich ist für die Untersuchung der Frage, ob unser Land natürliche Düng- und Bodenverbesserungsmittel besitze, die Kenntnis der normalen Gesteinszersetzung eine absolute Notwendigkeit. Der Umstand, daß als Folge der tertiären Gebirgsbildung und der diluvialen Vergletscherung unsere Böden jung und unfertig sind, und daß infolge der glacialen und fluvioglacialen Ablagerungen nur stellenweise der „gewachsene Fels“ die Ackerkrume liefert, hat wohl am meisten dazu beigetragen, daß petrographische und bodenkundliche Untersuchungen nicht Hand in Hand gingen. Sicherlich mit Unrecht. Sind auch dadurch die Verhältnisse außerordentlich komplizierte geworden, so bieten sie doch erhebliches theoretisches und praktisches Interesse dar. Und gerade weil die Großzahl unserer Böden in ganz ausgesprochenem Maße endodynamomorph (das heißt als unfertige, noch vom Muttergestein abhängig) ist, dürfen petrographische Gesichtspunkte nicht vernachlässigt werden.

Größere Untersuchungen über die Beziehungen zwischen Muttergestein und daraus gebildetem Boden sind geplant, sie sollen mit mineralogisch-petrographischen und bodenkundlichen Methoden ausgeführt werden. Gewissermaßen als Einleitung zu diesen umfangreichereren Arbeiten seien die nachstehenden Mitteilungen aufgefaßt. Es handelt sich um die Publikation einer Reihe von Pauschalanalysen frischer und zersetzer (beziehungsweise in Erde verwitterter) Gesteine. Mit allergrößter Sorgfalt ist wirkliche Zusammengehörigkeit von frischem Gestein und Verwitterungsprodukt studiert worden. Es darf wohl gesagt werden, daß lediglich Schwankungen der chemischen Verhältnisse, wie sie in jeder an sich homogen erscheinenden Gesteinsmasse vorkommen, zwischen analysiertem, frischem Gesteinsstück und Ursprungsmaterial des analysierten Verwitterungsproduktes in Frage kommen. Genaue Pauschalanalysen zersetzer Gesteine oder Böden werden leider selten ausgeführt, noch seltener sind derartige Untersuchungen in Verbindung mit chemisch-analytischer Erforschung des Ursprungsmaterials. Und doch müssen sie die Grundlage für weitere Untersuchungen darstellen. Es ist beispielsweise kaum angängig, eine Theorie der Verwitterung aufzustellen unter fast ausschließlicher Benützung von Untersuchungen über die Salzsäure- und Schwefelsäureauszüge fertiger Böden, wie das *Ganssen*¹⁾ getan hat. In der Tat scheint es, als ob die nachfolgenden Darlegungen den Anstoß zu einer teilweisen Revision unserer Begriffe über die verschiedenen Bodenbildungsprozesse geben sollten. Naturgemäß gestatten diese ersten orientierenden Versuche kein abschließendes Urteil. Sie können nur Anregungen geben. Weitere Prüfungen, unter Erweiterung der Methodik nach der mineralogischen und bodenkundlichen Seite hin, sind notwendig.

Zunächst seien die gewichtsprozentischen Analysenzahlen zusammengestellt. Die schweizerischen Gesteine sind teils von *Frl. Dr. L. Hezner* (Nr. 3, 4, 8, 9, 10), teils von *Prof. Dr. J. Jakob* (Nr. 1, 2, 5, 6, 7) analysiert worden. Die erstenen Analysen wurden im Jahre 1910 für Herrn Prof. *Engler* ausgeführt, sie sind bereits ohne Kommentar publiziert²⁾ worden. Die Analysen von *J. Jakob* stammen aus dem Jahre 1925, sie wurden auf meine Veranlassung

¹⁾ *R. Ganssen* (Gans). Die klimatischen Bodenbildungen der Tonerdesilikatgesteine. Mitteilungen aus den Laboratorien der Preussischen Geologischen Landesanstalt, Heft 4, 1922.

²⁾ *U. Grubenmann* und *L. Hezner*. Vierteljahrsschrift der Zürch. Naturforsch. Gesellschaft, Bd. 61, 1916.

ausgeführt.³⁾ Zum Vergleich sind aus der Literatur einige Vergleichsanalysen außerschweizerischer Gesteine angeführt (Nr. I bis XI).

Die allgemeinen heutigen klimatischen Bedingungen der Lokalitäten der Gesteine 1—7 können etwa folgendermaßen charakterisiert werden. Die mittleren Jahrestemperaturen liegen zwischen ca. 8,5° und 11°. Im Einzelnen ergeben sich folgende approximative Werte:

	Bellinzona- Giubiasco	San Vittore	Gränichen	Walensee	Amsteg
Mittlere Januartemperatur	1	0,1	— 1,5	— 1	— 0,2
Mittlere Julitemperatur	22,3	21,2	11,7	18	18
Jahresmittel der Niederschläge in cm	168	145	102	163	120

Die Hauptniederschläge erfolgen durchwegs in der wärmeren Jahreszeit oder der Übergangszeit, so daß die auf Jahresmittel bezogenen Regenfaktoren $\frac{\text{Regenmenge in mm}}{\text{Temp. in } ^\circ\text{C.}}$ ein humideres Klima

vortäuschen als in Wirklichkeit vorhanden ist. Immerhin sind diese Regenfaktoren so hoch (110 bis 180), daß darnach beurteilt das Klima als ausgesprochen humid bezeichnet werden muß. (Inwieweit die Verdunstungsverhältnisse korrigierend wirken, soll hier nicht untersucht werden.)

Vergleichsweise gibt *G. P. Merrill* für die von ihm untersuchten Gesteine folgende klimatischen Lagen an:

	Greenville, Georgia I	District of Columbia V	Chatham, Virginia VIII
Mittlere Jahrestemperatur	14,5	12,6	13,8
Mittl. Regenmenge in cm	128	112	109

Die höheren Mitteltemperaturen und die eher niedrigen Jahresmittel der Niederschläge bedingen niedrigere (unter 100 gelegene) Regenfaktoren, als sie im allgemeinen für die Schweiz Geltung haben.

Wenig Rücksicht wurde in diesen Voruntersuchungen auf die Art des Humus genommen, der in einigen der Verwitterungsprodukte zugegen ist. Nach den Vorstellungen, welche die Bodenkunde entwickelt hat, spielt aber gerade dieser Humus eine große Rolle. Die Anreicherung an absorptiv ungesättigtem Humus in stark humidem Klima hat z. B. saure Reaktion der Lösungen (Veränderung der Wasserstoffionenkonzentration) zur Folge und begünstigt

³⁾ Die Gesteine der Umgebung von Bellinzona sammelte in zuvorkommender Weise Herr *P. Knoblauch*, den Molassesandstein und sein Verwitterungsprodukt hat Dr. *E. Widmer* aufgesucht.

so die Podsolbildung. Ja, die Mehrzahl der Forscher sieht darin die primäre Ursache dieser Verwitterungsart, doch sind darüber (wenn auch unzweifelhaft die eigentliche Bodenbildung in sehr weitgehendem Maße von der Humusart und Humusmenge abhängig ist) nach der Meinung des Verfassers die Akten noch nicht geschlossen. Schon die Anfänge der Gesteinszersetzung weisen vielleicht in Abhängigkeit von der Temperatur, der Menge der wässerigen Lösungen und der durch die allgemein klimatischen Verhältnisse bedingten Wasserstoffionenkonzentration bestimmte Tendenzen auf. Von den analysierten Zersetzungspprodukten bzw. Böden besaßen unzweifelhaft 2 b, 3 c, 8 b, 10 b Beimengungen von Humus, in geringerem Maße war er vielleicht auch in 3 b, 4 b und 9 b zugegen, während in den übrigen Fällen die Zersetzungspprodukte humusfrei oder praktisch humusfrei gewählt wurden. Irgend einen wesentlichen Unterschied lassen diese verschiedenen Fälle nicht erkennen. Das läßt natürlich noch keine weiteren Schlußfolgerungen zu, diese könnten erst bei der Untersuchung ganzer Bodenprofile einerseits und rein anorganisch-chemischer Verwitterung ohne Humuseinwirkung (Bausteinmaterial z. T., Gerölle u. s. w.) anderseits gezogen werden. Zunächst ist eben mehr die mineralogisch-chemische Seite der Gesteinszersetzung berücksichtigt worden, aus dem einfachen Grunde, weil sie dem Verfasser näher liegt, und weil sie bis jetzt von den Petrographen am meisten vernachlässigt wurde. Es handelt sich auch mehr um Klarstellung der Verhältnisse am Anfang der Verwitterung, als um eine Untersuchung der Endprodukte der Bodenbildung, über die ja mehrere wichtige Arbeiten (z. B. aus dem Laboratorium von Herrn Prof. Dr. G. Wiegner) vorliegen.

Die Gesteine 1 und 2 sind kieselsäurereich und an Eisen und Magnesium arm. Die Quarzzahlen sind 125 und 78; die Gesteine führen reichlich Quarz. Die Analyse 1 b bezieht sich auf noch kompaktes Gestein, das jedoch derart verwittert erscheint (Verrostung u. s. w.), daß man sich hüten würde, das Material zur gewöhnlichen Gesteinsanalyse zu verwenden. Vergleichen wir 1 b mit 1 a, so sehen wir den geringen Grad der chemischen Veränderungen. Im wesentlichen haben nur Oxydation des Eisens und Hydratisierung (Hydrolyse) stattgefunden:

	Fe ₂ O ₃	FeO	H ₂ O+	H ₂ O-
Frisch	1,52	1,71	0,23	0,00
Zersetzt	2,16 ↓	0,98 ↑	1,01 ↓	0,17 ↓

Analysen schweizerischer Gesteine und ihrer Verwitterungsprodukte.

	1. Gneis SanVittore-Lumino Misox		2. Augengneis Val Morobbia Giubiasco		3. Verrucano Murg, Walensee		4. Sericitgneis Amsteg, Reuftal		5. Biotitschiefer bis Biotitgneis Giubiasco		6. Amphibolit westl. Schloß Unter- walden, Bellinzona	
	a. frisch	b. stark zersetzt	a. frisch	b. Grus	a. frisch	b. Boden	a. frisch	b. Boden	a. frisch	b. Grus	a. frisch	b. Sand- boden
SiO ₂	70,55	69,90	65,23	63,70	66,12	70,30	61,20	66,54	56,87	57,68	50,53	48,55
TiO ₂	0,50	0,46	0,62	0,57	0,81	0,43	1,09	0,54	1,14	1,14	0,83	0,90
P ₂ O ₅	0,18	0,19	0,24	0,20	0,31	0,23	0,33	0,46	0,16	0,28	0,15	0,16
Al ₂ O ₃	14,64	14,40	17,18	16,00	14,52	12,63	16,19	13,38	19,34	17,84	18,74	21,79
Fe ₂ O ₃	1,52	2,16	1,48	1,61	5,82	4,23	0,27	4,47	1,89	3,26	3,89	5,24
FeO	1,71	0,98	2,32	1,74 ¹	—	—	6,64	—	6,09	4,28	6,52	4,10
MnO	0,04	0,04	0,06	0,05	n. b.	Sp.	0,10	0,11	0,17	0,10	0,13	0,08
MgO	0,52	0,52	1,35	0,86	1,10	1,06	3,62	1,87	2,49	2,80	5,70	4,14
CaO	2,53	2,42	4,56	3,07	1,62	1,85	1,36	1,21	1,74	2,26	9,86	6,12
Na ₂ O	3,98	3,76	3,55	3,17	2,21	1,63	2,64	2,82	2,65	2,77	2,50	2,39
K ₂ O	3,53	3,83	2,62	3,07	4,69	2,87	3,51	3,87	5,47	3,31	0,56	0,79
+H ₂ O	0,23	1,01	0,52	3,78	3,05	2,77	3,11	4,23	1,66	4,33	0,51	3,92
-H ₂ O	0,00	0,17	0,15	0,89	0,08	0,67	0,11	0,05	0,11	0,41	0,00	1,64
CO ₂	0,00	0,00	0,00	0,00	n. b.	0,89	0,00	n. b.	0,00	0,00	0,00	0,00
Org. Substanz	n. b.	n. b.	n. b.	ca. 1%	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
SO ₃	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	0,15	0,20	0,28	0,41	n. b.	n. b.	S. Sp.	S. Sp.
	99,93	99,84	99,88	99,71	100,58	99,76	100,45	99,96	99,78	100,46	99,92	99,82

¹⁾ Fraglich, da Humus anwesend.

	7. Molassesandstein U. S. W. Mol. Burghalde, Gränichen			8. Mergelkalkstein Ob. Dogger Stanserhorn		9. Kalkstein, Lägern		10. Kalkstein Schattenkalk Bürgenstock	
	a. Sand- stein	b. loser Ver- witterungs- sand	c. Wald- boden	a. frisch	b. Boden	a. frisch	b. Boden	a. frisch	b. Boden
SiO ₂	51,52	57,70	63,95	27,86	71,35	1,65	40,27	0,29	33,80
TiO ₂	0,32	0,49	0,59	0,20	0,55	0,04	0,56	—	0,42
P ₂ O ₅	0,10	0,11	0,23	0,10	0,43	Sp.	0,21	0,05	0,63
Al ₂ O ₃	5,77	8,72	9,75	3,64	9,78	0,46	11,79	0,29	3,20
Fe ₂ O ₃	2,43	3,44	4,97	1,54	3,73	0,38	4,18		5,01
FeO	—	—	—	—	—	—	—	—	—
MnO	0,14	0,14	0,15	0,02	0,03	Sp.	0,12	Sp.	0,09
MgO	0,95	1,33	1,49	4,44	0,96	0,11	1,52	0,15	0,62
CaO	16,96	11,74	3,56	31,39	0,46	54,23	16,87	55,57	23,36
Na ₂ O	1,32	1,54	1,48	0,78	0,94	0,28	0,39	0,34	0,86
K ₂ O	1,90	2,00	2,03	2,48	4,32	0,36	1,88	0,22	1,16
+H ₂ O	2,25	2,32	3,60	0,16	5,59*	—	5,41	—	11,51*
-H ₂ O	2,54	2,08	4,00	—	1,88	—	3,52	—	3,26
CO ₂	13,34	8,17	1,22	27,32	* mit Bitumen	42,76	13,67	43,39	16,52
Org. Substanz	—	—	reichlich	0,29		—	—	—	* mit Bitumen
SO ₃	0,52	0,23	0,00	0,09	0,10	0,06	0,19	Sp.	0,24
	100,06	100,01	97,02	100,31	100,12	100,33	100,58	100,30	100,26

Vergleichsanalysen.

	I. Biotitgranit ¹ Greenville, Georgia		II. Granit, Schwarzwald ²			III. Gneis, Ägyptische Wüste ³			IV. Hornblende- granit ⁴ , Odenwald		V. Granit ¹ D. C. Nordamerika	
	a. frisch	b. zersetzt	a. frisch	b. Boden	c. Ortstein	a. rel. frisch	b. zersetzt	c. Staub- boden	a. frisch	b. Grus	a. frisch	b. Boden
SiO ₂	69,88	51,29	69,61	81,46	62,83	68,10	68,17	44,14	63,57	63,24	69,33	65,69
TiO ₂	—	—	—	—	—	0,30	0,30	0,54	0,55	n. b.	n. b.	0,31
P ₂ O ₅	—	—	0,58	0,29	0,89	—	—	—	0,24	0,30	0,10	0,06
Al ₂ O ₃	16,42	29,69	15,24	10,22	18,56	16,35	16,02	15,71	14,69	16,63	14,33	15,23
Fe ₂ O ₃	1,96	6,33	2,33	1,38	4,80	0,83	1,77	7,98	1,79	4,45	—	—
FeO	—	—	—	—	—	2,40	1,92	1,85	3,11	0,40	3,60	4,39
MnO	—	—	1,12?	0,11	4,14?	—	—	—	—	—	—	—
MgO	0,36	0,14	0,69	0,57	0,63	1,63	1,63	6,97	2,82	1,50	2,44	2,64
CaO	1,78	0,07	0,97	0,17	0,78	2,10	2,15	10,86	3,84	0,90	3,21	2,63
Na ₂ O	4,46	1,12	5,47	3,64	4,63	3,39	3,31	2,41	4,26	1,72	2,70	2,12
K ₂ O	5,63	1,50	5,20	3,90	4,48	4,34	4,22	1,14	4,07	7,73	2,67	2,00
+ H ₂ O	G.V.	G.V.	—	—	—	G.V.	V.G.	G.V.	0,95	3,24	G.V.	G.V.
- H ₂ O			10,36	—	—				0,67	0,61	8,32	—
CO ₂	—	—	—	—	—	0,28	0,18	4,52	—	—	0,28	—
SO ₃	—	—	—	—	—	0,30	0,30	0,36	—	—	—	—
CO ₂ aus org. Substanz	—	—	—	—	—	0,22	0,11	0,46	—	—	—	—
	100,85	100,50	101,21	101,74	101,74	100,61	100,40	100,28	99,89	100,39	99,60	99,70

¹ Nach G. P. Merrill: Rocks, Rock Weathering and soils New York 1906. ² Nach Helbig in R. Lang: Die Verwitterung, Fortschritte 1922. ³ Nach E. Blank, S. Passarge: Die chemische Verwitterung in der Ägyptischen Wüste 1925. ⁴ Nach M. Dittrich: Mitt. Bad. Geol. Landesanstalt, Bd. IV, 1900.

Vergleichsanalysen.

	VI. Gneis ⁵ , Hirzberg-St. Ottilien, Schwarzwald			VII. Trapp ² Punah		VIII. Olivindiabas ¹ Chatham, Virginia		IX. Hornblendegabbro ⁶ La Grange, Georgia			X. Amphibol ⁷ aus Monchiquit, Namib		Lias α Ellwangen ⁸	
	a. frisch	b. zersetzt	c. geschlämmtter Lehmboden	a. frisch	b. Laterit	a. frisch	b. zersetzt	a. frisch	b. zersetzt	c. erdig	a. frisch	b. zersetzt	a. frisch	b. Gelberde
SiO ₂	70,73	65,14	51,90	50,4	0,7	45,73	37,09	45,16	26,02	23,34	40,00	40,96	16,04	65,77
TiO ₂	1,08	0,87	1,46	0,9	0,4	—	—	0,31	0,18	0,15	6,72	8,46	—	—
P ₂ O ₅	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	n. b.	0,38	0,20	0,48
Al ₂ O ₃	12,58	16,17	25,74	22,2	50,5	13,48	13,19	17,22	28,60	32,70	14,09	34,02	0,75	8,06
Fe ₂ O ₃	1,86	4,45	4,98	9,9	23,4	11,60	35,69	3,12	11,38	21,77	8,44	0,94	0,09	9,39
FeO	3,16	1,40	—	3,6	—	—	—	6,99	4,00	—	1,18	0,00	1,77	—
MnO	—	—	—	—	—	—	—	0,47	0,51	Sp.	0,24	0,00	0,31	0,70
MgO	1,44	1,87	0,85	1,5	—	15,40	0,57	4,67	3,03	0,57	13,37	0,32	0,51	0,57
CaO	1,24	0,82	0,42	8,4	—	9,92	0,41	17,50	7,96	0,75	12,36	0,38	43,22	3,59
Na ₂ O	3,44	2,88	2,16	0,9	—	3,24	1,75	2,39	1,54	0,39	2,35	0,75	0,06	0,24
K ₂ O	3,64	2,60	3,62	1,8	—	0,47	0,33	1,37	0,81	1,19	1,52	0,39	0,15	1,22
+ H ₂ O	1,21	3,39	7,58	G.V.	G.V.	0,94	11,83	0,46	15,17	15,05	0,96	11,60	1,20	7,70
- H ₂ O	0,17	1,14	1,31					0,04	0,87	3,77		1,76	—	35,57
CO ₂	—	—	—	—	—	—	—	0,12	0,52	—	—	—	—	—
S	—	—	—	—	—	—	—	0,10	0,04	—	—	—	—	—
SO ₃	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,02	0,05	—
	100,55	100,73	100,02	100,5	100,0	100,78	100,86	100,10	100,23	100,20	101,23	99,76	99,89	100,71

⁵ Nach G. Röhle: Über die Verwitterung von Gneis. Diss. Freiburg 1911. ⁶ A. D. Brokaw, L. P. Smith: Zonal Weathering of a Hornblende Gabbro, Journ. of Geology 24. 1916. Seite 200—205. ⁷ E. Kaiser: Kaolinitierung und Verkieselung als Verwitterungsvorgänge in der Namibwüste Südwestafrikas. Z. f. Krist. Bd. 59, 1923, Seite 125—146. ⁸ Nach R. Lang loc. cit. Nr. 2.

Daß die übrigen Verschiebungen sehr geringfügig sind, zeigt die folgende Berechnung der wasserfrei gedachten Analysen auf 100.

	SiO ₂	TiO ₂	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
Frisch	70,9	0,5	0,2	14,7	3,1	0,05	0,5	2,5	4,0	3,55
Zersetzt	71	0,5	0,2	14,6	3,0	0,05	0,55	2,45	3,8	3,85

Die Zahlen stimmen innerhalb der Fehlergrenzen miteinander überein, nur die Alkalien haben sich in ihrem Verhältnis etwas zu Gunsten von K₂O verschoben. Die Gesamtsumme der Alkalien ist nicht kleiner geworden, Karbonat ist keines vorhanden. Sehr deutlich gehen diese Verhältnisse aus den Molekularwerten (Berechnung nach der Methode des Verfassers) hervor:

Orthogneis, südlich San Vittore-Lumino.

	si	al	fm	c	alk	k	mg	c/fm	h	ti	p	o
Frisch	340	41	16	13	29	0,37	0,23	0,80	3,7	1,8	0,4	0,44
Zersetzt	342	41	15,5	12,5	30	0,39	0,24	0,81	16,4	1,8	0,4	0,66

Es ergibt sich daraus, daß bei uns kalkarme Quarz-, Feldspat-, Glimmergesteine, auch wenn sie stark verwittert erscheinen, den ursprünglichen Chemismus noch gut erkennen lassen. Die ersten Anzeichen der Verwitterung sind Hydratisierung, Oxydation des Eisens und eine kleine Verschiebung im Verhältnis der Alkalien. Diesbezügliche Korrekturen sind leicht anzubringen.

2 ist ein grobflaseriges, etwas quarzärmeres Gestein, die Analyse 2 b bezieht sich auf Grusboden, in dem die Feldspataugen noch erkennbar sind. Die gleichen Eigentümlichkeiten wie bei 1 sind wahrnehmbar.

	Fe ₂ O ₃	FeO	H ₂ O+	H ₂ O-
Frisch	1,48	2,32	0,52	0,15
Zersetzt	1,61	1,74	3,78	0,89

Die Oxydation scheint etwas weniger fortgeschritten zu sein, da jedoch der Grus organische Substanzen enthält, ist die Ferrobestimmung unzuverlässig. 1,74 gibt einen Maximalwert an, der sicher nicht erreicht ist. Es wird mehr Fe₂O₃ und weniger FeO vorhanden sein. Die Wasseraufnahme ist eine recht große. Schalten wir diese beiden Vorgänge aus, indem wir 2 a und 2 b wasserfrei und mit allem Eisen als FeO auf 100 berechnen, so resultieren folgende Vergleichszahlen.

Augengneis, Val Morobbia, Giubiasco, Tessin.

	SiO ₂	TiO ₂	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
Frisch	65,85	0,65	0,25	17,35	3,7	0,05	1,4	4,6	3,6	2,6
Grusboden	67,9	0,6	0,2	17,1	3,4	0,05	0,85	3,25	3,4	3,25

Trotz des völligen Gesteinszerfalles sind auch hier die chemischen Veränderungen in den übrigen Verhältniszahlen keine sehr großen. Immerhin liegen folgende Verschiebungen außerhalb der Fehlergrenzen:

Es haben bei der Verwitterung relativ zugenommen: SiO_2 , K_2O , abgenommen: FeO , MgO , CaO , ev. Na_2O .

Mit Ausnahme der Verschiebung in MgO sind alle diese Veränderungen bereits in den Proben 1 angedeutet. Sie waren dort nur so geringfügig, daß sie ohne weitere Bestätigung nicht als charakteristisch angesehen werden durften. Obschon CaO unzweifelhaft in Lösung gegangen ist, konnte im Boden kein Karbonat nachgewiesen werden. Es hat somit eine Auswaschung stattgefunden.

Die Molekularwerte lauten:

Augengneis, Val Morobbia, Giubiasco, Tessin.

	si	al	fm	c	alk	k	mg	c/fm	h	ti	p	o
Frisch	258	40	20,5	19,5	20	0,33	0,40	0,94	6,9	1,9	0,4	0,37
Grusboden	292	43	18,5	15,5	23	0,39	0,32	0,82	63	2	0,4	0,45

Hier zeigt sich nun recht deutlich, wie vorteilhaft die Berechnungsmethode für das Studium der Verwitterungsprozesse ist. Wasseraufnahme und Oxydation sind für sich aus einem Vergleich der **h**- und **o**-Zahlen ersichtlich, die Hauptwerte werden durch diese reinen Gewinnposten nicht beeinflußt. Verschiebungen in den Verhältnissen K_2O zu Na_2O , FeO zu MgO , CaO zu $\text{FeO} + \text{MgO}$ machen sich in den **k**, **mg**- und **c/fm**-Werten bemerkbar. Über die Veränderung des Molekularverhältnisses SiO_2 zur Basensumme gibt die Änderung der **si**-Zahl Auskunft, während sich Verschiebungen in den Verhältnissen Al_2O_3 : $\text{FeO} + \text{MgO}$: CaO : $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ in den Zahlen **al**, **fm**, **c**, **alk** bemerkbar machen. Man erkennt folgendes: Die Verwitterung bedingt Zunahme der **si**-Zahl. Relativ nehmen unter den Basen die Alkalien (insbesondere K_2O) zu, sowie Al_2O_3 . Sowohl **fm** (besonders MgO) als auch **c** haben abgenommen. Wir sehen nun, daß auch der Orthogneis von San Vittore Tendenzen in der gleichen Richtung aufweist, dort handelte es sich aber um eine Zersetzung unter Belassung des Verbandes ohne direkte Mitwirkung von Humus! Mit Sicherheit können wir nur diese relativen Verschiebungen feststellen. Eine wirkliche Zunahme ist, da nur H_2O und O von außen zugeführt wurden, bei keinen anderen Werten anzunehmen. Es muß daher durch Fortwaschung in den Untergrund oder durch Abfluß der neue Chemismus geschaffen worden sein.

Wir können weiterhin folgendermaßen vorgehen: Nehmen wir für SiO_2 gleichbleibende Molekularzahl an, das heißt berechnen wir für den Grusboden die **al**-, **fm**-, **c**-, **alk**-Werte, die zu **si** = 258 gehören, so erhalten wir folgende approximative neuen Zahlen, die mit denen des frischen Gesteins zu vergleichen sind.

Zersetzt	al' = 38	fm' = 16,5	c' = 13	alk' = 20	Summe = 87,5
Frisch	al = 40	fm = 20	c = 19,5	alk = 20	Summe = 100

Die alk-Zahl ist sich gleichgeblieben, alle andern Werte haben mehr oder weniger abgenommen. Unter Zulassung eines Alkalienumtauschs (da K_2O zugenommen, Na_2O abgenommen haben) erweist sich somit diese Berechnungsweise als zulässig. Nicht zulässig wäre sie dann, wenn auch jetzt noch absolute Gewinne zu verzeichnen wären. Mit anderen Worten: Es ist denkbar, daß bei der Verwitterung der SiO_2 -Gehalt sich gleichgeblieben ist, ebenso die Alkaliensumme unter teilweisem Austausch des Na_2O durch K_2O . Fortgeführt wurden relativ reichliche Mengen von Kalk, Magnesium und recht geringe, immerhin bemerkbare Quantitäten von Eisen und Tonerde. Wahrscheinlich ist natürlich, daß auch etwas SiO_2 und Alkalien ausgewaschen wurden, aber diese Mengen sind im Verhältnis zu den anderen Auslaugungsprodukten auf alle Fälle klein gewesen. Die klimatischen Verhältnisse der Umgebung von Bellinzona scheinen somit (auf Grund der wenigen bekannten Daten) auf Gesteine, die Quarz, Kalifeldspat, natronreichen Plagioklas und Glimmer führen, nachstehenden Einfluß auszuüben: SiO_2 wird im Verhältnis zu den andern Substanzen nur in geringem Maße als Sol fortgeführt, die Alkalien bleiben adsorbiert zurück, wobei sich K_2O etwas anreichert. Der Kalkgehalt der Feldspäte geht zu einem erheblichen Teil in Lösung und wird fortgewaschen. Aber es findet auch eine Wegfuhr von MgO , etwas Al_2O_3 , sowie vielleicht eine kleine Enteisenung statt.⁴⁾ Hydratisierung und Oxydation leiten den Verwitterungsprozeß ein.

Daß das nicht allgemeingültige Prozesse sind, zeigt ein Vergleich mit Verwitterungsprodukten ähnlicher Gesteine anderer Gegenden.

Die Molekularwerte für den Granit von Greenville, Georgia (Vergleichsanalyse I a) und sein Verwitterungsprodukt (Analyse I b) lauten:

⁴⁾ Man darf natürlich nicht die fm-Zahlen direkt vergleichen, sondern muß das mg-Verhältnis berücksichtigen. Deshalb ist hier die Änderung des Fe-Gehaltes eine recht geringe.

Biotitgranit, Greenville, Georgia.

	si	al	fm	c	alk	k	mg	c/fm	h ⁵⁾
Frisch	323	44,5	10	9	36,5	0,45	0,26	0,90	5,5
Zersetzt	210	71	20	0,5	8,5	0,47	0,05	0,01	141

Hier haben neben **c** auch **si** und **alk** stark abgenommen, während **fm** und **al** bedeutend größer geworden sind. Wir könnten hier höchstens den Eisengehalt als konstant ansehen und würden dann konstatieren, daß CaO, MgO, Na₂O, K₂O, SiO₂ zu mehr als $\frac{3}{4}$ und Al₂O₃ fast zur Hälfte ausgelaugt wurden. Weder Alkalien noch Kieselsäure gehören somit in diesem Falle zu den relativ zurückbleibenden Stoffen.

Größer ist die Verwandtschaft mit der durch die Analysen II a bis II c belegten Granitverwitterung im Schwarzwald, die *R. Lang* als typische Solverwitterung bezeichnet. Für II a und II b berechnen sich folgende Molekularwerte:

Granit, Schwarzwald.

	si	al	fm	c	alk	k	mg	c/fm
Frisch	314	40,5	16,5	4,5	38,5	0,38	0,28	0,28
Boden	575	42,5	14	1	42,5	0,41	0,42	0,09

Hier ist SiO₂ der am hartnäckigsten zurückbehaltene Bestandteil, während Kalk und Eisen besonders reichlich ausgelaugt wurden. Die Auswaschung geschah in den Untergrund, es bildete sich ein Ortstein (II c) mit nachstehenden Molekularverhältnissen:

Ortstein, Granitboden, Schwarzwald.

si	al	fm	c	alk	k	mg	c/fm
231	40	29,5	3	27,5	0,39	0,12	0,10

Daß übrigens davon etwas abweichende Verhältnisse gleichfalls aus dem Schwarzwald bekannt sind, zeigen folgende von *M. Dittrich* ausgeführte Analysen aus dem Eisenbachermassiv.

Granit, Eisenbach, Schwarzwald (bei 110° getrocknet).

	SiO ₂	TiO ₂	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	H ₂ O+
Granit, frisch	73,52	Sp	0,24	14,03	0,31	1,00	0,17	0,39	4,00	5,59	0,75
„ verwitt. „	74,66	—	Sp	14,32	1,49	0,24	Sp	0,12	1,17	5,89	1,96

Die Molekularwerte lauten:

	si	al	fm	c	alk	k	mg	c/fm	ti	p	h
Granit, frisch	422	47	7,5	2,5	43	0,48	0,18	0,32	—	1	14,3
„ verwittert „	508	57	8,5	1	33,5	0,77	Sp.	0,1	—	Sp.	44,5

⁵⁾ Da H₂O nur als Glühverlust bestimmt wurde, sind die **h**-Zahlen unzuverlässig. Außerdem ist für diese Zahlen bei den schweizerischen Gesteinen immer nur das H₂O+, d. h. das über 110° frei werdende H₂O benutzt worden.

Neben der relativen **si**-, **al**- und **fm**-Anreicherung ist hier ein starker Rückgang von Na_2O bei Kalivermehrung bemerkbar. Aber SiO_2 ist nicht der persistenterste Anteil. Molekular lauten die Verhältnisse:

	SiO_2	:	Al_2O_3	:	Fe_2O_3
Frisch	136	:	15	:	1
Verwittert	113	:	13	:	1

Es ist also besonders Eisen erhalten geblieben, währenddem sich das Verhältnis $\text{SiO}_2 : \text{Al}_2\text{O}_3$ wenig verändert hat. Immerhin ist gegenüber anderen Vergleichsanalysen auch hier der SiO_2 -Gehalt im Verwitterungsprodukt ein hoher.

In einem ausgesprochen ariden Klima spielte sich der Verwitterungsprozeß des Gneises III ab.

Gneis, ägyptische Wüste.

	si	al	fm	c	alk	k	mg	c/fm	ti	h	CO_2
Relativ frisch	297	41,5	22	10	26,5	0,46	0,49	0,45	1	9,7	2
Stark zersetzt	296	41	23,5	10	25,5	0,46	0,45	0,43	1	8,7	1
Saubboden	105	22	43	27,5	7,5	0,23	0,58	0,64	1	66,2	15

Die ersten Anzeichen der Verwitterung machen sich chemisch lediglich in einem schwachen Ansteigen des Eisengehaltes bemerkbar. Eigentümliche Verhältnisse weist der Staubboden auf. Vermutlich haben Ausblasungen mitgewirkt. Der niedere Kieselsäuregehalt, sowie die starke Abnahme von Tonerde und Alkalien sind bemerkenswert. Das Verhältnis **k** hat sich zu Gunsten von Na_2O verschoben. Eine Auswaschung wie in den früher genannten Beispielen hat nicht stattgefunden. Kalk- (zum Teil als CaCO_3) und Eisengehalt haben sich stark vermehrt. Diese Umkehrung der Verhältnisse läßt vermuten, daß Verwitterungslösungen aufstiegen und einen Teil der gelösten Bestandteile oben wieder ausfällten.

Wir sehen somit, daß sich das erste Stadium der Verwitterung der betrachteten schweizerischen Gesteine scharf unterscheidet von der bei etwas höherer Temperatur erfolgten Zersetzung im humiden (Georgia, Kieselsäureabnahme) und von der Verwitterung im ariden Klima. Sie weist gewisse Analogien mit der zu Bleicherde führenden sogenannten Solverwitterung auf, doch sind ausgesprochene Ortsteinbildung nicht häufig, auch ist als Ganzes wohl die Auswaschung von SiO_2 , Al_2O_3 und Fe_2O_3 eine geringe. Es ist eine Tendenz zur Podsol-

bildung vorhanden, jedoch mit charakteristischen Merkmalen. Es können so interessante unfertige Böden zur Beobachtung gelangen.

Das gleichfalls ziemlich kieselsäurereiche Gestein 3 besitzt größeres **fm** als 1 und 2. Es enthält Sericit, die Feldspäte selbst sind teilweise sericitisiert, beziehungsweise etwas zersetzt. Der Verrucano ist in seiner Zusammensetzung ziemlich wechselnd, so daß die Bodenanalyse nicht mit der ihr zukommenden Genauigkeit mit 3 a verglichen werden kann. Berechnen wir 3 a und 3 b wasserfrei, so erhalten wir auf 100 Teile:

	SiO ₂	TiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
Erisch	68,3	0,8	0,3	0,2	15,0	5,4	1,2	1,7	2,3	4,8
Boden	74,0	0,5	0,2	0,2	13,4	4,0	1,1	1,9	1,7	3,0

Der Zunahme von SiO₂ geht eine Abnahme der übrigen Bestandteile parallel, nur CaO, zum größten Teil als CaCO₃, hat gleichfalls zugenommen. Das beruht wohl darauf, daß im Walenseegebiet über dem Verrucano mächtige Kalksteine lagern, so daß die abfließenden Lösungen CaCO₃ absetzen.

Verrucano, Murg, Walensee.

	si	al	fm	c	alk	k	mg	c/fm	ti	p	h	Co ²
Frisch	310	40	28	8	24	0,59	0,27	0,29	2,8	0,62	47,8	—
Boden	402	42,5	27	11	19,5	0,54	0,32	0,41	1,7	0,34	52,7	6,85

Charakteristisch für die Verwitterung ist also auch hier wieder die starke Zunahme der **si**-Zahl. SiO₂ ist der unlöslichste Bestandteil. Unter den Annahmen, SiO₂ sei gleichgeblieben (**si**-Zahl = 310) und der an CO₂ gebundene Kalk sei zugeführt worden, berechnen sich folgende Zahlen:

	si	al	fm	c	alk
Boden	310	33	21	3,5	15
Frisch	310	40	28	8	24

Eine deutliche Auslaugung ist bemerkbar, wobei zum Unterschied von 1 und 2 auch die Alkalien stark zurückgegangen sind. Es hat sich ferner das Verhältnis der Alkalien etwas zu Gunsten von Na₂O verschoben. Ursache davon ist wohl die primär vorhandene Zersetzung der Feldspäte dieses klastischen Gesteines. Der Sericit als solcher ist ja widerstandsfähig.

In chemischer Beziehung hat der Hornblendegranit des Odenwaldes eine gewisse Ähnlichkeit mit dem Verrucano (Analysen IV, verglichen mit 3).

Die auf 100 umgerechneten wasserfreien Analysen lauten:

Hornblendegranit, Odenwald.

	SiO ₂	TiO ₂	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
Frisch	64,3	0,6	0,2	14,8	4,9	2,9	3,9	4,2	4,1
Grus	65,6	n.b.	0,3	17,2	4,5	1,6	1,0	1,8	8,0

Geringe relative SiO₂- und Al₂O₃-Zunahmen sind vorhanden, die Alkalien haben sich ganz zu Gunsten von K₂O verschoben. Die Molekularwerte zeigen dies ebenso deutlich.

	si	al	fm	c	alk	k	mg	c/fm	fl	ti	p	h	Co ₂	o
Frisch	230 ^b	31	29	15	25	0,39	0,52	0,52	1,5	0,22	11,5	0,0	0,34	
Grus	272	42	26	4	28	0,75	0,37	0,15	—	0,5	46,5	1,8	0,90	

Die Verhältnisse erinnern vollkommen an diejenigen der durch 1 und 2 dargestellten Lokalitäten. Rechnet man die Molekularwerte von IV b auf si = 230 um, so erhält man approximativ al = 26,5, fm = 22, c = 3,5, alk = 24. Die Alkalien scheinen vorwiegend ausgetauscht worden zu sein, während etwas Al₂O₃ und sehr wenig Fe₂O₃, sowie viel MgO und CaO ausgewaschen wurden. Nun zeigen allerdings nach *Dittrich* Quellwässer in diesem Gebiet bedeutend mehr SiO₂ gelöst als Sesquioxide. In 1000 l sind 19,77 gr SiO₂, 0,7 gr Fe₂O₃ + Al₂O₃, 49,12 gr CaO, 13,9 gr MgO, 1,36 gr K₂O, 6,13 gr Na₂O. Wir sehen daraus, daß unsere Annahme, der SiO₂-Gehalt sei konstant geblieben, auch nicht stimmen kann. Wohin die Sesquioxide gelangt sind, ist nicht ersichtlich; vielleicht haben sie sich besonders als Ton im Wasser suspendiert gehalten, oder sie bildeten eine Art Ortstein. Auf alle Fälle können die Analysen von Quellwässern nur in Verbindung mit Gesteins- und Bodenanalysen über die totalen Verschiebungen bei der Verwitterung Auskunft geben.

Wieder anderer Art ist die Verwitterung des Granites vom Columbiadistrikt Nordamerikas (Analysen V). Die Molekularwerte lassen erkennen, daß hier SiO₂ mit CaO und Alkalien weggeführt wurde, während Tonerde und Eisen relative Anreicherungen erfahren haben.

Granit D. C., Nordamerika.

	si	al	fm	c	alk	k	mg	c/fm	h
Frisch	303	37	29	15	19	0,38	0,55	0,52	18
Boden	293	40	33	12,5	14,5	0,38	0,54	0,36	70

Deutlich ist daraus ersichtlich, wie die klimatischen Bedingungen der tiefer gelegenen Teile der Schweiz und der süddeutschen Mittelgebirge hauptsächlich hinsichtlich der Kieselsäure, der Tonerde und des Eisens besondere Verhältnisse schaffen, die

sich (um es nochmals zu betonen) noch dadurch von anderen unterscheiden, daß unvollständig verlaufene Prozesse den Charakter des vorläufigen Endproduktes bestimmen.

fm-reiche Gesteine eines mittleren Kieselsäuregehaltes liegen in 4 und 5 vor. Das erstere Gestein ist typisch sericitführend, das letztere reichlich biotit- und etwas granatführend. Man erhält folgende Daten für den

Sericitgneis von Amsteg, Kt. Uri:

1. Analysen wasserfrei auf 100 umgerechnet:

	SiO ₂	TiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
Frisch	63,0	1,1	0,4	0,3	16,6	7,1	0,1	3,7	1,4	2,7	3,6
Boden	70,0	0,6	0,5	0,4	14,0	4,2	0,1	2,0	1,3	2,9	4,0

2. Molekularwerte:

	si	al	fm	c	alk	k	mg	c/fm	ti	p	h
Frisch	227	35	41,5	5,5	18	0,46	0,48	0,13	3,1	0,45	38,4
Boden	324	38,5	30,5	6	25	0,48	0,46	0,20	2	1,2	69

Die Bodenanalyse auf si = 227 umgerechnet ergibt ungefähr:

si = 227, al = 27,5, fm = 21,5, c = 4,5, alk 18.

Bemerkenswert ist die als Ganzes geringe chemische Veränderung. Der Sericit scheint sozusagen intakt geblieben zu sein, auch der kalkarme Plagioklas wird sich wenig verändert haben. Indessen ist reichlich Eisen und Magnesium in Lösung gegangen. Gegenüber SiO₂ ist auch der Tonerdegehalt zurückgegangen.

In den Laboratoriumsprotokollen finden sich sowohl von der Verrucanerde als auch von der Erde des Sericitgneises Analysen eines löslichen und unlöslichen Teiles. Vermutlich handelt es sich um 10 % ige Salzsäureauszüge. Die löslichen Anteile betragen (mit Ausschluß des H₂O) 2,72 % (Verrucanerde), bzw. 7,39 % (Erde des Sericitgneises). Die Molekularzahlen lauten:

	si	al	fm	c	alk	k	mg	c/fm	ti	p	Co ₂
Boden des Verrucans	löslich 448	0	23	59	18	0,75	?	?	4,5	4,5	91
Boden des Sericitgneises	löslich 428	10,6	45 27	7 21	0,35 0,36	0,55 0,29	0,26	2,91 0,24	0,24 0	0,24 0	0
	unlöslich 428	15	53	8	24	0,52	0,53	0,24	2,7	0,4	0

Der unlösliche Teil hat in beiden Fällen sehr ähnliche Zusammensetzung und ist sehr kieselsäurereich. Der salzsäurelösliche Anteil ist durch geringen Kieselsäuregehalt charakterisiert. Es kann sich in keinem der beiden Fälle um sogenannte salzsäurelösliche „zeolithische Silikate“ handeln. Al₂O₃ ist größer als SiO₂! Es entstehen somit bei der Verwitterung dieser Gesteine salzsäurelösliche Tonerde und ebensolche Eisenoxyde.

Der Biotitschiefer bis Biotitgneis von Giubiasco zeigt, wie zu erwarten, stärkere Angreifbarkeit des Glimmers bei im übrigen ebenso geringfügiger Gesamtänderung. Es ist ja erstaunlich, wie sehr unsere Verwitterungsprodukte der Silikatgesteine den Chemismus des Muttergestein bewahrt haben.

Biotitschiefer bis Biotitgneis von Giubiasco bei Bellinzona, Tessin.

1. Analysen wasserfrei auf 100 umgerechnet:

	SiO ₂	TiO ₂	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
Frisch	58,0	1,2	0,2	19,8	8,0	0,2	2,5	1,8	2,7	5,6
Grus	60,4	1,2	0,3	18,7	7,6	0,1	2,9	2,4	2,9	3,5

2. Molekularwerte:

	si	al	fm	c	alk	k	mg	c/fm	p	ti	h	o
Frisch	192	38	35	6,5	20,5	0,57	0,36	0,15	0,25	2,8	18,6	0,22
Grus	206	37,5	37	8,5	17	0,44	0,41	0,23	0,4	3	50	0,41

Der im Verwitterungsprodukt etwas erhöhte **c**-Gehalt mag auf primären größeren Granatreichtum des Ausgangsmaterials zurückzuführen sein. Bemerkenswert ist im übrigen die Alkaliabnahme (insbesondere Kali). Die Biotite sind unter Rücklassung von Mg-Al-Silikaten offenbar weitgehend zersetzt worden. Es zeigt sich somit, daß für unsere Verhältnisse ein allgemein gültiges Verwitterungsschema nicht gegeben werden kann, die verschiedene Zersetzungswert der Einzelmineralien macht sich in den unfertigen Böden bemerkbar. Das wird nun besonders deutlich, wenn wir kalkreichere, quarzarme oder quarzfreie Plagioklasgesteine betrachten. Der feinkörnige Amphibolit von Bellinzona mag als Beispiel dienen.

Amphibolit von Bellinzona.

1. Analysen wasserfrei auf die Summe 100 berechnet:

	SiO ₂	TiO ₂	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
Frisch	51,0	0,8	0,2	18,9	10,1	0,1	5,8	10,0	2,5	0,6
Sandboden	51,7	1,0	0,2	23,3	9,4	0,1	4,4	6,5	2,6	0,8

2. Molekularwerte:

	si	al	fm	c	alk	k	mg	c/fm	ti	p	h	o
Frisch	123	26,5	41	25,5	7	0,13	0,50	0,62	1,5	0,16	4,1	0,35
Boden	135	36	38	18	8	0,18	0,45	0,47	1,7	0,17	36,4	0,54

Währenddem auch hier **fm** und **c** abgenommen haben und die Alkalien weitgehend erhalten blieben, weist das Verhältnis SiO₂:

Al_2O_3 , andere Beziehungen auf, als sie bislang konstatiert wurden. Relativ am reichlichsten hat sich die Tonerde angereichert, nicht SiO_2 . Nehmen wir den Tonerdegehalt als konstant an, das heißt berechnen wir die Molekularwerte der Bodenanalyse auf $\text{al} = 26,5$, so erhalten wir:

$$\text{si} = 90,5, \text{al} = 26,5, \text{fm} = 28, \text{c} = 13, \text{alk} = 6.$$

Es sind also offenbar erhebliche Mengen von SiO_2 in Lösung gegangen. Wahrscheinlich haben sowohl die kalkreichen Plagioklase als auch die Hornblenden starke Zersetzung unter Bildung von Kieselsäuresol erlitten. Immerhin ist diese SiO_2 -Abnahme geringer als in den meisten Vergleichsanalysen anderer Lokalitäten und die Enteisenung ist eine weit fortgeschrittenere. Auch dieser zersetzte Amphibolit enthält kein Karbonat. In dem kalkarmen Gebirge des mittleren Tessins wird eben alles Calciumkarbonat fortgewaschen.

Der Hornblendegabbro von La Grange, Georgia, weist folgende Verhältnisse auf:

Hornblendegabbro, La Grange, Georgia.

	si	al	fm	c	alk	h	mg	c/fm	ti	p	h	CO_2
Frisch	94	21,5	32,5	39	7	0,28	0,45	1,21	0,5	—	3	—
zersetzt	59	38	38	19,5	4,5	0,27	0,27	0,51	0,4	—	114	2,7
Erdig	61	50	45	2	3	0,68	0,05	0,045	0,3	—	131	13

Stärkere Alkalienabnahme und größere Resistenz des Eisengehaltes unterscheiden diesen Verwitterungsprozeß in erster Linie von demjenigen des Gebietes von Bellinzona. Geradezu extreme Eisenanreicherung ist im zersetzen Diabas von Virginia (Analysen VIII) zu bemerken. (Man beachte die mg-Zahlen!).

Olivin-Diabas, Virginia.

	si	al	fm	c	alk	k	mg	c/fm	h
Frisch	85	15	59	20	6	0,09	0,73	0,34	5,8
Zersetzt	98	21	73	1	5	0,12	0,03	0,01	104

Ausgesprochene SiO_2 -Wegfuhr kennzeichnet bekanntlich die lateritische Verwitterung.

Trapp von Punah und zugehöriger Laterit.

	si	al	fm	c	alk	k	mg	c/fm	h (Glühverlust)
Frisch	137	35,5	34,5	24,5	5,5	0,56	0,18	0,71	8,2
Lakrit	1,3	63	37	—	—	—	—	0,0	176

Auch von diesem Prozeß ist unsere Bodenbildung stark verschieden. Daß auch tonerdehaltige Amphibole zu starker Al_2O_3 -

Anreicherung Veranlassung geben können, zeigt das Beispiel der Amphibolverwitterung im Monchiquit von Namib.

Amphibol aus dem Monchiquit von Namib.

	si	al	fm	c	alk	k	mg	c/fm	ti	h
Frisch	76,5	16	52,5	25,5	6	0,30	0,73	0,49	9,6	5,7
Zersetzt	181	88,5	5,5	2	4	0,25	0,40	0,35	28	171

Eine sehr hübsche Ergänzung nach der Seite der ultrafemischen Gesteine liefert die Untersuchung der Verwitterungsprozesse des Amphibolperidotites von Schriesheim (Baden) durch *M. Dittrich*.

Folgende Analysen wurden ausgeführt:

Amphibolperidotit (z. T. serpentinisiert) von Schriesheim (bei 110° getrocknet).

	SiO ₂	TiO ₂	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	H ₂ O+
Frisch	43,17	0,38	Sp.	5,79	6,82	4,90	0,15	23,15	8,53	1,20	0,96	5,12
Verwittert	46,16	0,38	Sp.	5,83	10,96	2,27	0,16	21,10	6,73	0,84	0,68	4,79
Verlehmt	47,10	0,38	Sp.	7,38	11,28	1,14	0,17	19,64	3,39	0,39	0,70	8,56

Die Molekularwerte lauten:

	si	al	fm	c	alk	k	mg	c/fm	ti	h
Frisch	74	6	75,5	15,5	3	0,37	0,79	0,21	0,51	29
Verwittert	86	6,5	78	13	2,5	0,36	0,75	0,17	0,54	29,7
Verlehmt	98,5	9	81,5	8	1,5	0,54	0,75	0,1	0,6	59,5

si, al, fm haben bei der Zersetzung zugenommen. Auch hier ist nicht die Kieselsäure der persistenteste Bestandteil. Die Molekularverhältnisse lauten:

	SiO ₂	:	Al ₂ O ₃	:	Fe ₂ O ₃	(alles Eisen Fe ₂ O ₃)
Frisch	10	:	0,8	:	1	
Verwittert	9,2	:	0,68	:	1	
Verlehmt	10	:	0,94	:	1	

Im Endprodukt ist die Tonerde relativ angereichert, im Mittelglied Fe₂O₃. Die Änderung der Verhältnisse ist jedoch eine geringe und es fällt auch hier der hohe Kieselsäuregehalt des Lehmbodens auf.

Haben die bisher besprochenen schweizerischen Silikatgesteine Verwitterungsprodukte ergeben, die noch deutlich den Ursprungchemismus erkennen lassen, so ergeben sich sofort tiefergreifende Veränderungen, wenn karbonatführende Muttergesteine in Betracht gezogen werden. Es findet dann eine starke Auslaugung des Karbonates statt. Typisch ist die Verwitterung des Kalksandsteines der U. S. W. Molasse zu Waldboden.

**Molassesandstein, Burghalde bei Gränichen,
Aargau.**

	si	al	fm	c	alk	k	mg	c/fm	ti	p	h	CO ₂
Sandstein	188	12,5	12	66,5	9	0,49	0,43	5,4	0,9	0,15	27,3	66,5
Sand	230	20	19	50	11	0,47	0,43	2,7	1,4	0,2	30,8	44,7
Waldboden	348	31,5	33	21	14,5	0,47	0,37	0,64	2,6	0,5	65,3	16,5

Im frischen Sandstein ist das Verhältnis **si : al : fm** = 15,7 : 1,04 : 1, im daraus hervorgegangenen Boden lautet es 10,6 : 0,96 : 1. Da außerdem **mg** kleiner geworden ist, scheint der Eisengehalt sich am wenigsten verringert zu haben. Verhältnismäßig etwas mehr Kieselsäure als Tonerde ist in Lösung gegangen. Doch ist auch hier der relative hohe SiO₂-Gehalt des Verwitterungsproduktes besonders bemerkenswert. Aus dem Kalksandstein ist ein sandiger Mergelboden geworden, der ziemlich viel Alkalien zurückbehält.

Zu einem sandigen eisenschüssigen Lehm wurde der Doggermergel des Stanserhornegebietes.

Oberer Dogger, Stanserhorn, Vierwaldstättersee.

	si	al	fm	c	alk	k	mg	c/fm	ti	p	h	CO ₂
Frisch	61	5	17	73	5	0,67	0,85	4,3	0,4	0,13	1,2	81,3
Boden	487	39,5	32,5	3	25	0,75	0,3	0,09	2,5	1,2	127	0

Interessant ist es, einige Verhältniszahlen zu betrachten. Nehmen wir alles Eisen als Fe₂O₃, so ergeben sich molekular folgende Zahlen:

$$\begin{array}{rcc}
 \text{SiO}_2 & : & \text{Al}_2\text{O}_3 & : & \text{Fe}_2\text{O}_3 \\
 \text{Frisch} & 51,6 & : & 3,9 & : & 1 \\
 \text{Boden} & 44 & : & 3,6 & : & 1
 \end{array}$$

Die Verhältnisse haben sich nicht stark verschoben, immerhin ist im Verwitterungsprodukt Eisen relativ etwas angereichert, Kieselsäure etwas verringert.

Stark geändert hat sich das Verhältnis MgO : CaO. Es ist im ursprünglichen Gestein molekular 0,2 : 1, im Verwitterungsprodukt 3 : 1.

Im salzsäurelöslichen Anteil verhalten sich SiO₂ : Al₂O₃ wie folgt:

Frisch 0,5 : 0,1, zersetzt 4,7 : 20,5. Wiederum erkennen wir den großen Gehalt an „löslicher“ Tonerde. Die Molekularwerte des unlöslichen Teiles des Bodens sind:

si = 702, al = 49, fm = 15, c = 5, alk = 31, k = 0,81, mg = 0,68, ti = 4,1.

Vergleichsweise lauten die Daten für den unlöslichen Teil des normalen Doggers:

si = 564, al = 42,5, fm = 21, c = 5, alk = 31,5, k = 0,81, mg = 0,41, ti = 3,7.

Daraus geht die Anreicherung an SiO_2 im unlöslichen Teil hervor. Es sind also durch die Verwitterung die Sesquioxide „löslicher“ geworden.

Ein sehr schwach sandig-toniger Kalkstein ist der analysierte Lägernkalkstein.

Kalkstein der Lägern.

si	al	fm	c	alk	k	mg	c/fm	ti	p	h	CO_2
Gestein 3	0,5	1	97,5	1	0,45	0,33	97,5	0,1	n. b.	—	98,2
Boden 126	22	17	56	5	0,77	0,42	3,3	1,3	0,28	56,2	58

Der Boden ist ein typischer, etwas eisenschüssiger Mergel.

Hier lauten die oben berechneten Verhältniszahlen ungefähr:

Gestein	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	ferner	MgO	CaO
	9	1,67	1 (?)		0,003	1
Boden	25,8	4,5	1		0,13	1

Die geringen Mengen der nicht völlig getrennten Sesquioxide im Gestein machen das Fe_2O_3 -Verhältnis unsicher, das Verhältnis $\text{SiO}_2 : \text{Al}_2\text{O}_3$ hat sich wenig geändert. Wiederum ist $\text{MgO} : \text{CaO}$ stark zu Gunsten von MgO verschoben worden.

Noch reiner ist der Schrattenkalkstein des Bürgenstocks. Der Boden selbst ist noch sehr kalkreich. Die Molekularwerte dafür lauten:

si	al	fm	c	alk	k	mg	c/fm	ti	p	h	CO_2
100	5,5	15,5	74	5	0,48	0,17	4,8	0,9	0,7	114	66,6

Hier ist ein Teil des CaO (durch Bindung mit SiO_2 und Al_2O_3) unlöslich geworden, eine Erscheinung, die bereits aus Analysen des unlöslichen Anteils der Lägernkalksteinerde hervorgeht. Es lauten für die unlöslichen Anteile beider Böden die Molekularwerte:

Unlösliche Anteile der:

	si	al	fm	c	alk	k	mg	c/fm
Böden des Lägernkalksteins	306	49,5	34	5,5	11	0,79	0,41	0,16
„ „ Schrattenkalke	559	30	46	16	8	0,75	0,17	0,35

Man beachte die hohen k -Zahlen im unlöslichen Anteil.

Als Ganzes ergibt sich für die betrachteten karbonatführenden Sedimentgesteine eine ziemlich gleichartige Verwitterung. In erster Linie geht CaCO_3 als Bikarbonat in Lösung. Wenn auch SiO_2 nicht mehr der widerstandsfähigste Bestandteil ist, sondern eher Fe_2O_3 und Al_2O_3 , so findet es sich doch sehr reichlich im Boden.

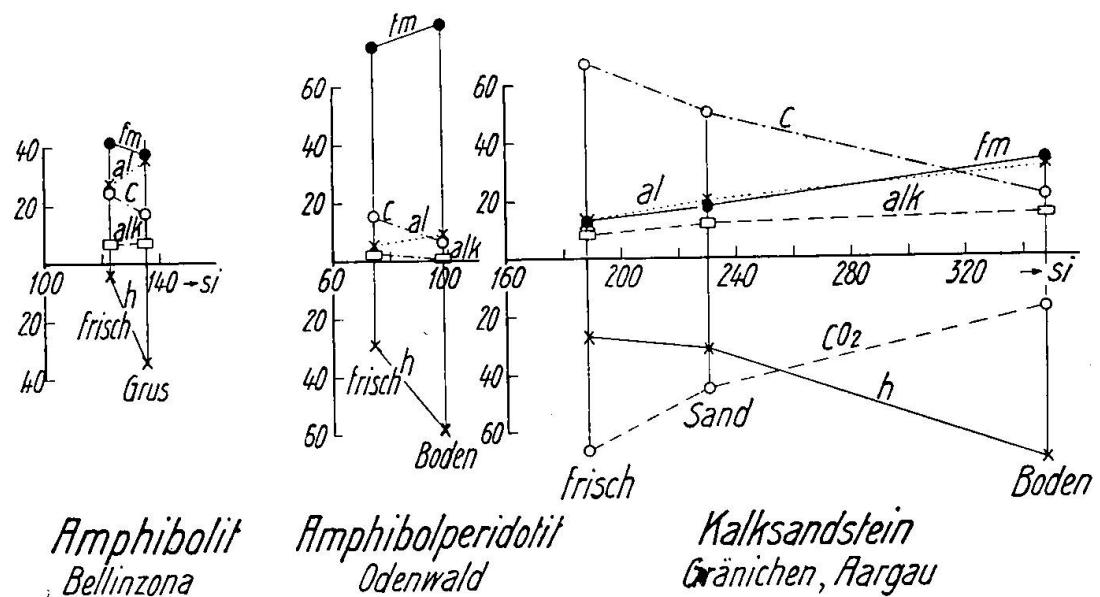
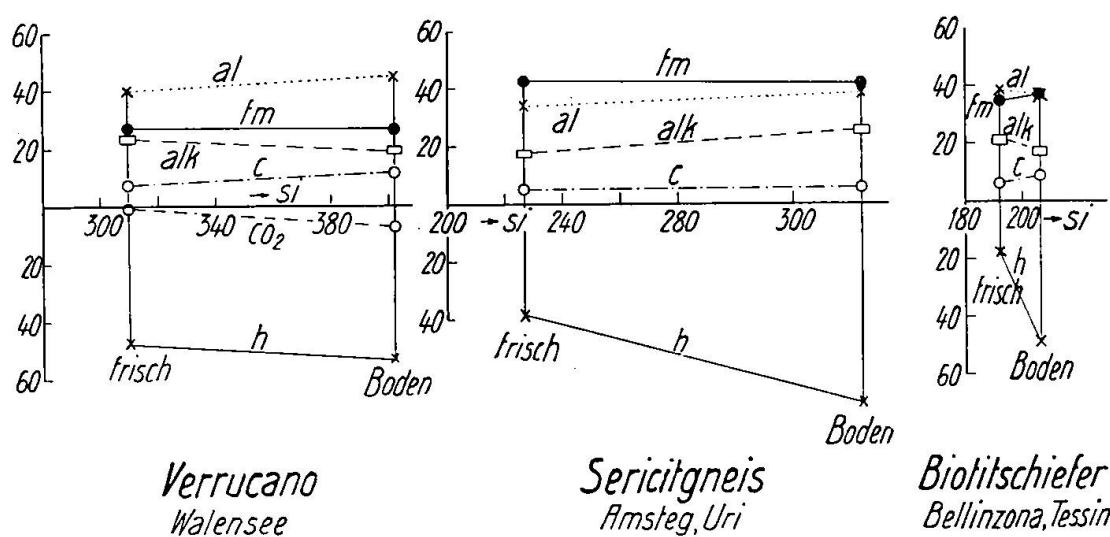
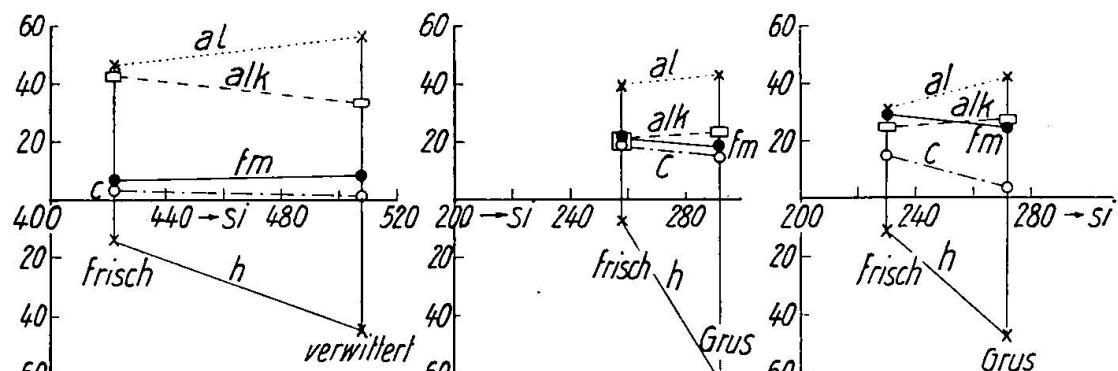


Fig. 1. Graphische Darstellung der chemischen Verwitterung sehr SiO_2 -reicher Gesteine der Schweiz und Südwest-Deutschlands.

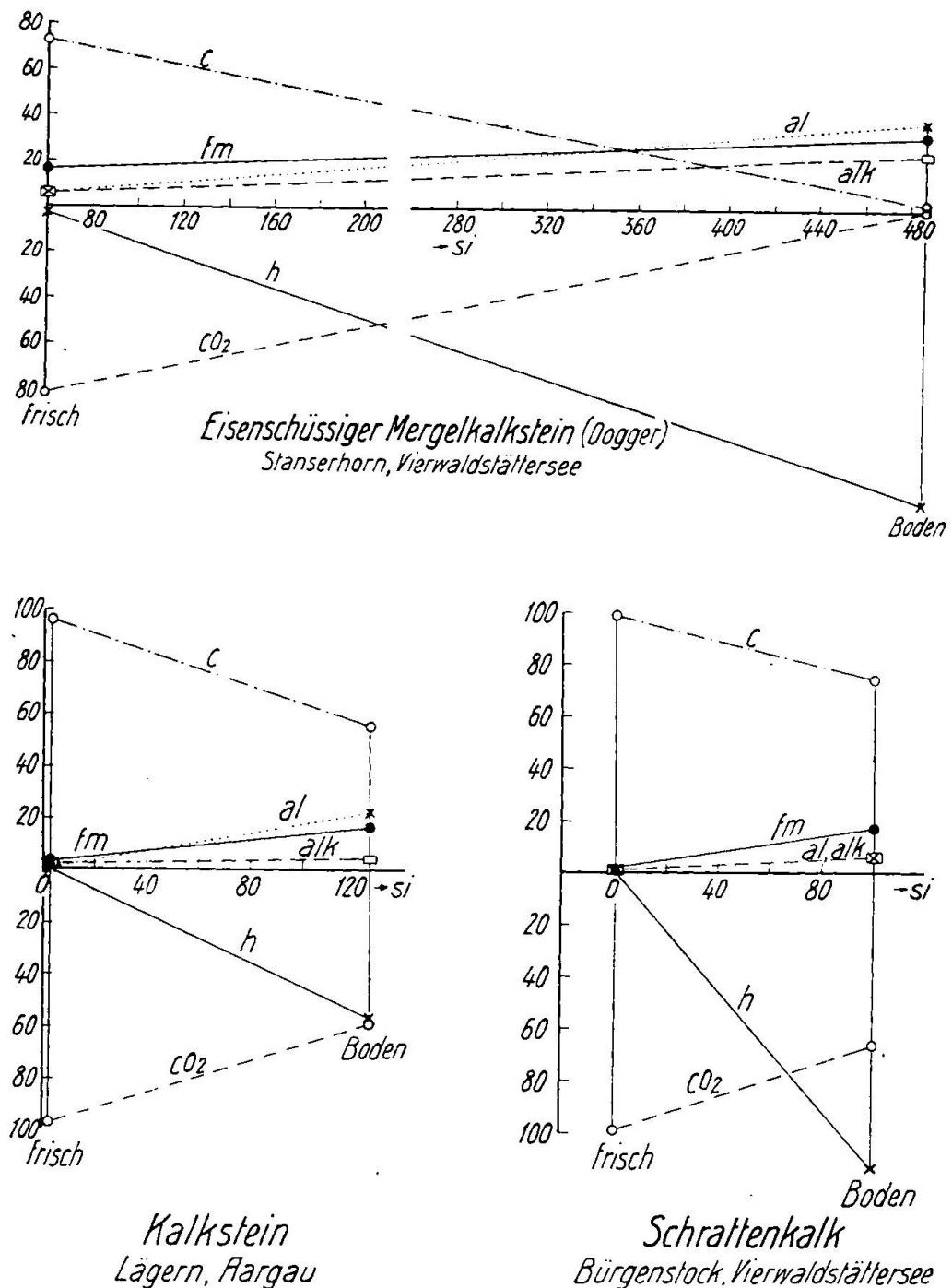


Fig. 2. Graphische Darstellung der chemischen Verwitterung kalkreicher Gesteine der Schweiz.

Es ist zweifellos keine ausgesprochene Tendenz zur Roterdenbildung vorhanden, die Verwitterungsprodukte wären als Gelberden zu bezeichnen. Der Lias α von Ellwangen in Württemberg (Analysen XI) weist analoge Verhältnisse auf.

In zwei Tabellen sind die wichtigsten Molekularwerte der Muttergesteine und der Zersetzungspodukte zusammengestellt. Zwei graphische Darstellungen geben über den Verlauf der Verwitterung in den tiefern Lagen der Schweiz und Südwestdeutschlands Auskunft. (Fig. 1 und 2.) Durchwegs ist **si** des Verwitterungsproduktes höher. Nur bei karbonatführenden Gesteinen oder plagioklasreichen Gesteinen sind die Verbindungslien von **al** bzw. **fm** bzw. **c** bzw. **alk** stärker geneigt. Nahezu horizontaler Verlauf dieser Geraden bedeutet geringe Veränderung dieser Komponenten.

Gesteinsverwitterung in der Schweiz und in Süddeutschland.

si	al	fm	c	alk	k	mg	c/fm	h	CO ₂	
258	40	20,5	19,5	20	0,33	0,40	0,94	6,9	—	frisch
292	43	18,5	15,5	23	0,39	0,32	0,82	63	—	Grus } Augengneis, Giubiasco
314	40,5	16,5	4,5	38,5	0,38	0,28	0,28	?	—	frisch
575	42,5	14	1	42,5	0,41	0,42	0,09	?	—	Grus } Granit, Schwarzwald
422	47	7,5	2,5	43	0,48	0,18	0,32	14,3	—	frisch
508	57	8,5	1	33,5	0,77	Sp.	0,1	44,5	—	Grus } Granit, Schwarzwald
310	40	28	8	24	0,59	0,27	0,29	47,8	—	frisch
402	42,5	27	11	19,5	0,54	0,32	0,41	52,7	6,85	Boden } Verrucano, Walensee
230	31	29	15	25	0,39	0,52	0,52	11,5	—	frisch
272	42	26	4	28	0,75	0,37	0,15	46,5	1,8	Grus } Granit, Odenwald
227	35	41,5	5,5	18	0,46	0,48	0,13	38,4	—	frisch
324	38,5	30,5	6	25	0,48	0,46	0,20	69	—	Boden } Sericitgneis, Amsteg
192	38	35	6,5	20,5	0,57	0,36	0,15	18,6	—	frisch
206	37,5	37	8,5	17	0,44	0,41	0,23	50	—	Grus } Biotitschiefer, Giubiasco
123	26,5	41	25,5	7	0,13	0,50	0,62	4,1	—	frisch
135	36	38	18	8	0,18	0,45	0,47	36,4	—	Sandgrus } Amphibolit, Bellinzona
74	6	75,5	15,5	3	0,37	0,79	0,21	29	—	frisch
98,5	9	81,5	8	1,5	0,54	0,75	0,1	59,5	—	Amphibolperidotit, Oden- verlehmtd } wald
188	12,5	12	66,5	9	0,49	0,43	5,4	27,3	66,5	frisch } Molassesandstein,
348	31,5	33	21	14,5	0,47	0,37	0,64	65,3	16,5	Boden } Gränichen
61	5	17	73	5	0,67	0,85	4,3	1,2	81,3	frisch } Kalkmergel, Dogger,
487	39,5	32,5	3	25	0,75	0,3	0,09	127	0	Boden } Stanserhorn
3	0,5	1	97,5	1	0,45	0,33	97,5	—	98,2	frisch } Kalkstein, Lägern
126	22	17	56	5	0,77	0,42	3,3	56,2	58	Boden }

Gesteinsverwitterung (Vergleichsgesteine).

si	al	fm	c	alk	k	mg	c/fm	h	Co ₂	
323	44,5	10	9	36,5	0,45	0,26	0,90	5,5	—	frisch
210	71	20	0,5	8,5	0,47	0,05	0,01	141	—	Grus
303	37	29	15	19	0,38	0,55	0,52	18	—	frisch
293	40	33	12,5	14,5	0,38	0,54	0,36	70	—	Boden
94	21,5	32,5	39	7	0,28	0,45	1,21	3	—	frisch
61	50	45	2	3	0,68	0,05	0,05	131	13	erdig
85	15	59	20	6	0,09	0,73	0,34	5,8	—	frisch
98	21	73	1	5	0,12	0,03	0,01	104	—	zersetzt
137	35,5	34,5	24,5	5,5	0,56	0,18	0,71	8,2	—	frisch
1,3	63	37	—	—	—	—	—	176	—	Laterit
										Trapp, Punah

Die 21 Bauschalanalysen genügen natürlich keineswegs zur allgemeinen Kennzeichnung der Gesteinsverwitterung oder gar der Bodenbildung in der Schweiz. Inwiefern Exposition, besondere klimatische Verhältnisse, Art des Kulturbodens u. s. w. die erhaltenen Resultate beeinflussen, läßt sich noch gar nicht abschätzen. Auch fehlt die wichtige Untersuchung nach Bodenprofilen und die Berücksichtigung des Humus. Immerhin ergeben sich eine Reihe von Anregungen für das weitere Studium. Zunächst läßt sich aus den gewonnenen Daten sehr wohl ein einheitliches Bild der ersten Zersetzungsvorgänge in den tieferen Lagen unseres Gebirgslandes ableiten. Inwiefern es erweitert oder ergänzt werden muß, kann erst die Zukunft lehren. Oxydation des Eisens und Wasseraufnahme leiten den Verwitterungsprozeß ein. Quarz, Kalifeldspat, natronreicher Plagioklas, Muskovit, zum Teil auch Biotit sind in unseren klimatischen Verhältnissen sehr widerstandsfähig, so daß die Böden von Gesteinen dieser Mineralien zunächst einen dem Muttergestein sehr ähnlichen Chemismus bewahren. Die Alkalien werden häufig in erheblichen Mengen unter Anreicherung des K₂O zurückbehalten. Besonders bemerkenswert ist, daß in diesen Gesteinen unzweifelhaft eine kleine Wegfuhr konstatiert werden kann, wobei SiO₂ sehr wenig in Mitleidenschaft gezogen wird, währenddem Eisen und auch Tonerde eher mehr in Lösung gehen. Bei basischen Gesteinen und karbonatführenden Gesteinen, sowie in besonderen Fällen ist diese Enteisenung bei allgemein viel stärkerer chemischer Zersetzung weniger bemerkbar. Doch sind auch die Böden dieser Gesteine anormal SiO₂-reich. Basischer Plagioklas und

Hornblende sind leichter zersetzbare, CaCO_3 wird immer reichlich gelöst. Es bietet nun nicht unerhebliche Schwierigkeiten, den konstatierten Typus des Verwitterungsprozesses in das gewöhnliche Lehrbuchschema der klimatischen Bodentypen einzuordnen. Der üblichen Beurteilung nach ist das gemäßigte Klima ein ausgesprochen humides. Damit ist in Übereinstimmung das Fehlen von CaCO_3 im Boden CaO-haltiger Silikatgesteine und die konstatierte Auswaschung. Indessen ist weder Tschernosem noch Braunerde noch Bleicherde (Podsol) im strengen Sinne der Begriffe vorhanden. Das ist an und für sich selbstverständlich, weil die Klassifikation auf die Endstadien Bezug nimmt, hier aber unfertige Verwitterungsprodukte vorliegen. Immerhin müssen diese tatsächlich vorhandenen Typen auch klassifiziert werden können. Und in die Lang'schen Verwitterungstypen (Gelberdeverwitterung, Roterdeverwitterung, Lateritverwitterung, Solverwitterung) läßt sich die beobachtete Zersetzung nur sehr schwierig einordnen. Die Menge des Gelösten (abgesehen von CaCO_3) ist an und für sich nicht groß, eine makroskopisch erkennbare Ortsteinbildung scheint fast durchwegs zu fehlen. Die relative Anreicherung an SiO_2 ist ein weiteres Merkmal, das den üblichen, zur Definition der Begriffe herangezogenen Beispielen fehlt. Es scheint nicht nur ein Anfangsstadium der gewöhnlichen Solverwitterung vorhanden zu sein, sondern es ist eine ganz bestimmte Tendenz vorhanden. Die Beobachtungen scheinen in ähnlicher Weise zu deuten sein, wie diejenigen, welche H. Geßner und R. Siegrist⁶⁾ soeben veröffentlicht haben. Diese Autoren konstatierten in den Schottern der Umgebung von Aarau einen eigenen Bodentypus der Gruppe der podsoligen Böden mit Kalk- und Sesquioxidauswaschungen. Ich möchte glauben, daß dieser Bodentypus u. a. durch die relativ niedrigen Temperaturen bei reichlicher Niederschlagsmenge bedingt wird, und daß er recht eingehende Beachtung erfahren sollte. Es ist wohl möglich, daß gerade in der Schweiz durch Auffindung verbindender Mitteltypen und erster Verwitterungsstadien die Streitfrage über die Beziehungen der verschiedenen humiden Bodenarten gelöst werden kann, wobei über den Gang der Solverwitterung neue Beobachtungen möglich sind.

Nicht minder wichtig ist eine nähere Untersuchung der Verhältnisse für die Beurteilung der von R. Ganssen⁷⁾ neuerdings auf-

⁶⁾ Festschrift der Aarg. Naturf. Gesellschaft, 1925.

⁷⁾ Loc. cit auf Seite 323.

gestellten Theorie der chemischen Verwitterung. Nach dieser Theorie wird zwischen toniger, lateritischer und hydratischer Verwitterung unterschieden. Obschon zur Einordnung im wesentlichen die Salzsäureauszüge benötigt werden, läßt sich jetzt schon sagen, daß sich die Verwitterungsart der betrachteten schweizerischen Böden streng in keine der drei Gruppen einordnen läßt. Es dürfen eben solche Theorien nicht ohne Berücksichtigung der ersten Gesteinsverwitterungsstadien aufgestellt werden. Wir müssen in der Natur den Zersetzungsprozess verfolgen, chemisch und mineralogisch, und das soll in Zukunft auch geschehen. Vorläufig mögen die obigen Andeutungen genügen, um darzutun, wie interessant sich derartige Untersuchungen in der Schweiz gestalten können. Ihr Ergebnis aber wird auch von großem praktischem Nutzen sein. Es wird dabei auch notwendig sein, die von *Dittrich* begonnenen Studien über die Art der Kalibindung fortzusetzen. Sie wurden von diesem Forscher an den hier vergleichsweise publizierten Gesteinen von Baden ausgeführt und ergeben sehr starke Bindung mindestens eines Teiles des bei der Verwitterung sich anreichernden K_2O .

Manuscript eingegangen im Oktober 1925.
